



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

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



**Rapport**

**R54:1990**

**Termisk energilagring**

**Underlagsrapport**

**Programgruppen för energilagringssystem**

V-HUSETS BIBLIOTEK, LTH



15000

400135460

**Byggforskningsrådet**

R54:1990

TERMISK ENERGILAGRING

Underlagsrapport

Programgruppen för energilagringssystem

**V-Biblioteket Bygg**  
**Lunds Tekniska Högskola**  
**Box 118, 221 00 LUND**

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 881108-9  
från Statens råd för byggnadsforskning till Kjessler &  
Mannerstråle AB, Solna.

## REFFRAT

Programgruppen för energilagringssystem har utvärderat Byggeforskningsrådets forskningsinsatser under treårsperioden 1987-90 och tagit fram underlag för programinriktning under treårsperioden 1990-93.

Systemteknik, kostnader/lönsamhet, potential, tillämpningar och miljöhänsyn har prioriterats vid granskning och förslag till programinriktning.

Idén med termisk energilagring är att sparad billig energi ska ersätta dyr energi under höglasttid. Lagring minskar också effekttoppar. Värme och kyla kan lagras i olika typer av lager, till exempel vattenlager, jord/berglager, akviferer, smältlager, kemiska lager och fasta material.

Programgruppen föreslår att forskningsinsatserna under perioden 1990-93 allmänt inriktas på systemförenklingar, kostnadsreduktioner, 2:a - 3:e generationen fullskalelager samt införandefrågor.

Skriften Termisk energilagring utgör en sammanfattande slutrapport från programgruppen. Förutom att fungera som underlag för Byggeforskningsrådets planering vänder den sig till en bred intressegrupp av forskare, tekniker och beslutsfattare.

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

Denna skrift är tryckt på miljövänligt, oblekt papper.

R54:1990

ISBN 91-540-5218-1

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

**gotab** Stockholm 1990



# Innehåll

<b>1.</b>	<b>Inledning</b>	
<b>2.</b>	<b>Typer av lager och deras egenskaper</b>	<b>6</b>
<b>3.</b>	<b>Vattenlager</b>	<b>8</b>
<b>3.1</b>	<b>Historik</b>	<b>8</b>
<b>3.2</b>	<b>Uppnådda resultat</b>	<b>9</b>
	3.2.1 Groplager	9
	3.2.2 Bergrumslager	12
	3.2.3 Övriga vattenlager	16
<b>3.3</b>	<b>Mer allmänna slutsatser</b>	<b>16</b>
	3.3.1 Kostnader	16
	3.3.2 Konkurrenskraft och möjligheter	18
<b>3.4</b>	<b>Referenser</b>	<b>20</b>
<b>4.</b>	<b>Marklager</b>	<b>23</b>
<b>4.1</b>	<b>Inledning</b>	<b>23</b>
<b>4.2</b>	<b>Tidigare erfarenheter</b>	<b>25</b>
	4.2.1 Lagring i jord	25
	4.2.2 Borrhålslager i berg	27
<b>4.3</b>	<b>Teknikläget idag</b>	<b>29</b>
	4.3.1 Lagring i jord	30
	4.3.2 Borrhålslager i berg	34
<b>4.4</b>	<b>Kostnader</b>	<b>35</b>
	4.4.1 Kostnader för BFR's forskning	35
	4.4.2 Anläggningskostnader för marklager	35
<b>4.5</b>	<b>Slutsatser</b>	<b>37</b>
<b>4.6</b>	<b>Referenser</b>	<b>39</b>
<b>5.</b>	<b>Akviferlager</b>	<b>43</b>
<b>5.1</b>	<b>Bakgrund</b>	<b>43</b>
<b>5.2</b>	<b>Tidigare genomförd forskning</b>	<b>43</b>
<b>5.3</b>	<b>Forskning efter utvärdering 1987</b>	<b>44</b>
<b>5.4</b>	<b>Utvärdering av genomförd forskning 1987-89</b>	<b>48</b>
<b>5.5</b>	<b>Framtida förutsättningar för akviferlagring</b>	<b>51</b>
<b>5.6</b>	<b>Anläggningskostnader för akviferlager</b>	<b>53</b>
<b>5.7</b>	<b>Principer och systemlösningar för akviferlager</b>	<b>54</b>
	5.7.1 Karakterisering av akviferlager	54
	5.7.2 Priciper och systemlösningar	56



<b>6.</b>	<b>Smältvärme, latent och termokemiska lager</b>	62
6.1	Smältvärmelager för värme	63
6.2	Olika systemlösningar	64
6.3	Spillvärme	67
6.4	Värmepump	70
6.5	Solvärme	72
6.6	Slutsatser smältvärmelager	73
6.7	Sorptionsvärmelager	74
6.8	Smältvärmelager för kylning	76
6.9	Slutsatser kylanläggningar med smältvärmelager	80
6.10	Kyllagring i islager	82
6.11	Keramisk lagring	84
6.12	Utvärderingsgruppens rekommendationer	85
6.13	Aktiv värmelagring i betongbjälklag	89
6.14	Referenser	90
<b>7.</b>	<b>Kostnadsjämförelser mellan olika typer av lager</b>	91
7.1	Värmelagring	91
7.2	Lager för kyla	94
7.3	Referenser	97
<b>8.</b>	<b>Systemstudier och ekonomi</b>	98
8.1	Värmelagring i fjärrvärmesystem	98
	8.1.1 Korttidslagring	98
	8.1.2 Långtidslagring och kombinationslager	100
	8.1.3 Referenser	102
8.2	Värmelagring för gruppcentraler	103
8.3	Systemfrågor	104
	8.3.1 Allmänt	104
	8.3.2 Övergripande studier av potential och lönsamhet	105
	8.3.3 Fjärrvärmeapplikationer	110
	8.3.4 Solvärmeapplikationer	111
	8.3.5 Integrerade energisystem med energilagring för enskilda fastigheter och bostadsområden	113
	8.3.6 Kombinerad kyl- värmelagring samt enbart kyllagring	117
	8.3.7 Referenser	118

# 1 Inledning

Byggforskningsrådet har en programplanering som omfattar perioder om 3 år. Den nu löpande planen avser tiden 1987 07 01 till 1990 06 30. För delprogrammet "energilagring" har rådet på hösten 1988 tillsatt en utvärderings- och programgrupp. Uppgiften är att värdera forskningsinsatserna 1987-90 och ge BFR's kansli ett underlag för programskrivning 1990-93. Detta är gjort och sammanställt i gruppens huvudrapport "TERMISK ENERGILAGRING: Värdering av utförda arbeten under 3-årsplanen 1987/88 - 89/90 och förslag till inriktning för 90/91 - 92/93, huvudrapport", BFR Gxx:1990.

Den tekniska granskningen och underlaget för huvudrapportens föreslagna forskningsinsats återfinns i denna underlagsrapport. Vidare är den en sammanställning och redovisning av utförda arbeten under 3-årsperioden 1987/88-89/90.

Arbetsgruppen antog namnet ELS-gruppen (Energilagringssystem-Gruppen) och består av följande medlemmar:

Sven-Erik Lundin, ordförande  
Kjessler & Mannerstråle AB, Solna

Stefan Aronsson, sekreterare, redigering av denna rapport, förf. kap 4  
Chalmers - Installationsteknik, Göteborg

Peter Margen, redaktör av huvudrapport, förf. kap 3, 7 och 8.1  
Margen - Consult AB, Nyköping

Lennart Berndtsson, författare kapitel 8.2 och 8.3  
HSB Riksförbund, Stockholm

Roland Andersson  
KTH - Fastighetsekonomi, Stockholm

Johnny Kellner, författare kapitel 6  
JM Bygg och Fastighets AB, Stockholm

Håkan Westerlund  
HW - Konsult AB, Sollentuna

Tomas Åbyhammar, författare kapitel 5  
Vattenfall, Vällingby

Adjungerad till gruppen har varit:

Björn Sellberg

Forskningssekreterare BFR

Gruppens insatser ansluter till den tidigare PUL - gruppens arbete och rapport G26:1986 "Energilagring". Det närliggande teknikområdet "Naturvärme" (med värmepumpar) har ej berörts utan detta utvärderas av BFR's värmepumpgrupp.

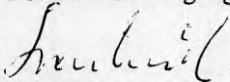
Arbetets tyngdpunkt har legat i att granska och värdera forskningsinsatserna inom perioden främst med genomgång av projektrapporter. Kontakter har tagits med forskare, företag och användare. Ett 10-tal möten har hållits i ELS-gruppen. Tabeller över pågående och avslutade FoU-projekt finns redovisade för varje teknikområde i kapitel 3-6.

En sammanfattning av utförda forskningsarbeten är ej gjord i denna underlagsrapport utan återfinns i huvudrapporten. Viss information i huvudrapporten kan skilja ifrån den här redovisade vilket beror på att huvudrapporten är av senare datum.

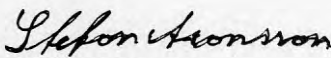
Stockholm

Mars 1990

För BFR's Energilagrings-grupp



Sven-Erik Lundin  
ordförande



Stefan Aronsson  
sekreterare

## 2 Typer av lager och deras egenskaper

Rapporten behandlar termiska lager, dvs lager för värme eller kyla, ej lager för mekanisk eller elektrisk energi eller bränsle. De termiska lagren kan laddas med billig energi när tillgången överstiger efterfrågan. Energin återvinns när den ersätter produktion av energi som är dyr eller medför större miljölägenheter. Lagren kan också bidra till minskat effektbehov. Såväl korttidslagring (i huvudsak dygnslagring) som långtidslagring (mest säsongslagring) är aktuell. Tillämpningarna inkluderar värmebehov (bostadslokalupp-värmning, tappvarmvatten, processvärme) eller kylbehov (komfortkyla, processkyla, kyla för datorer). Lagring kan ske vid hög eller låg temperatur.

De termiska lager för värme och kyla som bearbetats inom BFRs program kan indelas i fyra huvudtyper. De arbetar enligt olika principer och har vitt skilda egenskaper.

I **vattenlagren** är vatten det energilagrande mediet. Räknat per lagrad energienhet är vattnets inslutning (tank, grop eller bergtrum) vanligtvis relativt dyr (lager som utnyttjar befintliga hålrum såsom övergivna gruvor eller oljebergtrum undantagna) varför vattenlager är mindre konkurrenskraftiga som rena säsongslager med bara en laddningscykel per år. Däremot klarar de hög effekt för en låg marginalkostnad per kW och har lite temperaturdegradering mellan laddning och urladdning vilket gör dem utmärkta som korttidslager. De är användbara även som kombinationslager (korttid + långtid).

I **marklager** överförs värme från ett gitter av vertikala eller horisontella vattenkanaler (rör) till berg eller olika slags jord. För korttidslagring fordras tätare röravstånd för att klara de höga effekterna, vilket gör lagren dyra. Däremot klaras långtidslagring med stora avstånd till en låg kostnad per lagrad energienhet. Därför används marklager enbart för långtidslagring.

I **akviferer** används porös mark, som sand/grus eller sedimentärt berg, med vatten och mineralkorn som det energilagrande mediet. Anläggningskostnaden är förhållandevis låg per lagrad energienhet vid lämpliga markförhållanden. Relativt låga temperaturer är bäst ur kemisk synpunkt och för att förhindra höga värmeförluster för i Sverige förhärskande akvifertyper. Akviferen passar därför bäst som säsongslager för kyla eller kombinerade lager för kyla (sommaren) och värme (vintern). För enbart korttidslagring fordras för många brunnar för att göra denna tillämpning ekonomisk.



**Smältlager och kemiska lager** klarar en hög energitäthet inom en liten temperaturmarginal, och passar bäst där denna egenskap är värdefull, t ex för kyltillämpningar i byggnader.

Samtliga fyra huvudtyper kan utföras för att lagra värme eller kyla, och vissa varianter för båda delar i samma anläggning.

I efterföljande avsnitt behandlas de fyra typerna i tur och ordning. Lager för sensibel värme i fasta material beskrivs i kapitel 6 (smältlager och kemiska lager).

**Tabell 2.1** Huvudtyper av lager och deras egenskaper.

Typ	Fördelar	Nackdelar	Särskilt lämpligt för:
Vattenlager	God temperaturåtervinning  Låg marginalkostnad för effektökning  Klarar även höga temperaturer (~ 100°C) vid lämpligt utförande	Relativt hög kostnad per kWh lagrad energi (lager som utnyttjar befintliga hålrum undantagna)	Korttidslagring; (kombinerad korttids/mellantidslagring; för lager som utnyttjar befintliga hålrum även långtidslagring)
Marklager	Låg kostnad per kWh lagrad energi	Dålig temperaturåtervinning  Hög marginalkostnad för effektökning  Temperaturbegränsning (med undantag för stora borrhållager)	Långtidslagring av värme eller kyla
Akviferer	Låg kostnad per kWh lagrad energi vid adekvat storlek	Hög effektkostnad	Långtidslagring av kyla eller kyla plus lågtemperaturvärme
Smältlager och kemiska lager	Högt energiinnehåll per volymenhet även inom snäva temperaturband	Relativt hög kostnad för de flesta varianter. Reducerad värmefaktor för islager	Byggnader med hög kostnad för utrymme, särskilt som kylager
Fasta material	Billigt för korttidslagring i vissa fall	Begränsad reglermöjlighet	Kontor där rumstemperaturen får variera; elradiatorer

## 3 Vattenlager

### 3.1 Historik

Vattentankar har de flesta egenskaper som önskas för korttidslagring, dvs god temperaturskiktning, låg skillnad i temperatur mellan värmen som laddas in och värmen som laddas ur, hög effektöverföringsförmåga. I särskilt hög grad gäller detta för ståltankar som inte behöver ha värmeväxlare mellan tanken och värmekällan eller avnämaren och som exempelvis har använts i många fjärrvärmesystem. Tekniskt är vattenlager lika användbara även som långtidslager; dock är i varje fall den konventionella ståltanken för dyr för att kunna ge lönsamhet vid ren säsongslagring.

Eftersom ståltankstekniken bedömts att vara "kommersiell" har BFR koncentrerat sitt stöd till olika typer av lager som bedömts kunna nå så låga kostnader att även säsongslagring eller kombinerat säongs- och korttidslagring skulle bli lönsam med deras hjälp. Bland "vattenlager" har följande varianter bearbetats under årens lopp, med årtalet för den första i Sverige idrifttagna prototypen markerad i den högra kolumnen. För flera av lagertyperna är detta analogt med första prototypen i världen.

Tabell 3.1 Introduktion av "nya" typer av vattenlager

Vattenlager	Idrifttagning av första prototypen
1. Gropmagasin	
a) i jord	1979 (Studsvik)
b) i berg	1980 (Lambohov)
2. Bergrumslager	
a) nya vattenfyllda bergrum	1982 (Avesta); 1984 (Lyckebo)
b) konverterade oljebergrum	slutet av 1988 (Oxelösund; ej BFR)
c) blockfyllda bergrum	ingen
3. Övrigt	
a) betongtank	1979 (Ingelstad)
b) nedlagda gruvor	1983 (Kopparberg)

Såsom framgår av årtalet för idrifttagningen av första prototypen har många tagits i drift redan innan 87-90 årsprogrammets början, varför i deras fall en

del av satsningen under 87-90 gällde uppföljning av drifterfarenheter, projektering av nya anläggningar, förbättring av beräkningsprogrammen.

Dock gjordes även betydande satsningar på nya varianter särskilt för groplager av modifierad utformning.

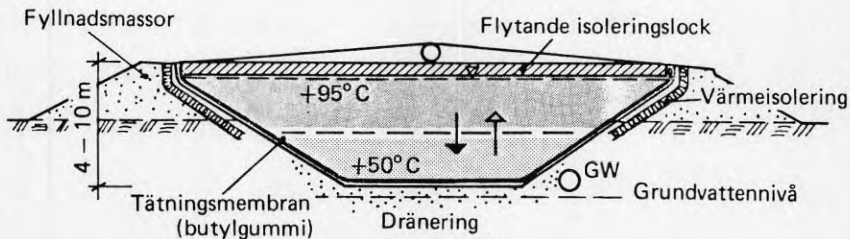
Tabell 3.3 ger en lista av vattenlager som kommit till utförande och Tabell 3.4 en lista av anslag från BFR eller publikationer för vattenlager inklusive några särskilt intressanta arbeten bekostade av andra än BFR. Projekt som tillkommit eller behandlats med stöd från BFR har utpekats genom asterisk i första kolumnen av Tabell 3.4. Projektnumret i Tabell 3.3 och 3.4 i slutet av detta kapitel, används som referensnummer i diskussionen i följande avsnitt.

## 3.2 Uppnådda resultat

### 3.2.1 Groplager

#### a) Det "klassiska" groplagret

Groplager är särskilt intressanta för BFRs arbetsområde, dvs gruppcentraler, därför att de kan få relativt låga kostnader redan i små enheter och lämpar sig såväl för korttids- som mellantidslagring, i vissa fall även långtidslagring.



Figur 3.1 Klassiskt groplager med massbalans.

Prototypen i Studsvik från 1979 (5, G1) blev under lång tid den "klassiska" modellen för jordgropar med lutande sidor, massbalans (dvs den utgrävda massan utnyttjad för att göra en damm för att minska utgrävningsvolymen), tätningssduk av butylgummi, flytande isolerlock, i vissa fall med isolering av en del av sidorna. Den fungerade bra och typen bedöms vid större volym ge en låg kostnad per m<sup>3</sup>, vilket gör den användbar för tillämpningar som inte fordrar alltför hög temperatur (dvs mindre än 70 à 80°C). Den fick en efterföljare i Danmark för säsongslagring och en i Frankrike (ett lönsamt solvärmeprojekt) för korttidslagring och används som utgångspunkt för många studier

internationellt inom IEAs solvärmegrupp.

För att få en variant som skulle kunna användas upp till nära 100°C och slippa värmeväxlaren mellan gropen och distributionsnätet som är en hård ekonomisk belastning vid korttidslagring gick Studsvik vidare med en variant med kopparmembran och förbättrad tätning mellan lock och mark som begränsar inläckage av luft och därmed vattens syresättning.

Kostnadskalkylen (1987) tyder på ca 400 kr/m<sup>3</sup> i storlek 20 000 m<sup>3</sup> (G.10.a) vid utförandet för säsongslagring. Prototypen är under idrifttagning i Malung (8, G10). Även om prototypen blivit dyrare än beräknat tyder resultaten på att detta kan vara ett steg i utvecklingen som kan leda till en kostnadsreduktion per kWh jämfört med ståltankar för korttidslagring eller kombinerad korttids/säsongslagring.

Även andra har angripit problem med förbättrad tätningsmembran som klarar högre temperaturer under perioden. Andersson & Hultmark konstruerade en berggrop (G9) isolerad med påsprutad polyuretan och en kommersiell tätduk. Pilotförsöket, G8a, visade att polyuretanskum fäster bra mot berg men att den valda membrantypen (en kommersiell polyeten-duk) inte var lämplig för 90°C. Prototypen byggdes i Växjö (Kronhjorten) (8,G8) innan pilotförsöket blev klart. Därefter sammankallades en särskild materialgrupp av BFR för att driva utvecklingen vidare (G12). Den har uttryckt förhoppning om att man skall lyckas bättre med membran av teflon. Syre diffunderar dock genom teflon varför groplager med teflonduk fortfarande behöver utrustas med värmeväxlare i de flesta fall.

#### b) *Groplager med bärande tak*

##### *Dikeslager med bärande bjälklag*

Ett annat problem med det "klassiska" groplagret är att marken ovanför gropen inte kan användas för andra ändamål eftersom det flytande locket ej tål hög belastning. Detta kan vara en nackdel i exploaterade områden. Andersson & Hultmarks konstruktion som redan nämnts i avsnitt 3.2.1 däremot klarar detta problem eftersom taket består av ett bjälklag som vilar på gropens bergsidor och vid behov pelare för att klara större spännvidd. Kostnaden beräknas även i detta fall bli väsentligt lägre än för ståltankar av samma volym, t ex i framtiden ca 400 kr/m<sup>3</sup> för 10 000 m<sup>3</sup> (G8b) exklusive ev värmeväxlare. Tyvärr gav inte prototypen i Växjö (7, G8) någon bra kontroll på detta på grund av mycket dålig bergkvalitet. En förstudie av en solvärmecentral med dikeslager genomfördes 1988 för Särö (9,G15), och håller på att byggas.

### *Groplager fyllda med sten och vatten*

Även i Tyskland (Stuttgart) byggdes en prototyp över en typ av groplager där marken ovanför gropen tål belastning, t ex utnyttjning som parkeringsdäck. Den består av en grop med membran av plast där den utgrävda jorden ersatts med sten som kan bära ett isolerlock och parkeringsdäck. Genom det internationella samarbetet är uppnådda resultat även tillgängliga till Sverige. Information rapporterad vid Jigastock-88-konferensen tyder på att kostnaderna för denna typ av lager per kWh kan bli acceptabla, även om de är högre än för det klassiska groplagret (G13). En svensk studie från 1987 (G14) bekostad av BFR tyder på samma slutsats, om lagret är relativt stort, dvs större än ca 80 000 m<sup>3</sup>. Varianten kan därför vara värd att studeras vidare.

#### *c) Groplager i stabiliserad jord*

Ett problem för jordgropsmagasin som byggs i jordarter med låg stabilitet är att släntslutningen blir mycket låg (särskilt i lera under grundvattennivån), vilket leder till en låg volym per m<sup>3</sup> yta, och därigenom stora specifika kostnader och stor ianspråktagen markyta. Problemet har angripits av SGI i en studie för BFR där olika sätt att förstärka marken så att vertikala sidor kan användas även i svaga marker studerats (G9). Den mest lovande varianten bygger på en sk slitsvägg av betong och bedöms kunna reducera anläggningskostnaden och markanvändningen påtagligt just i marktyper med svag stabilitet. Nästa steg bör vara en demonstration av principen med en noggrann uppföljning av kostnaden.

#### *d) Små groplager: brunnslager*

En typ av groplager i princip tillämpbar till korttidslagring i små volymer som studerats teoretiskt är markbrunnar fyllda med sten (G7). Beräkningen tydde på att den specifika kostnaden av en ofodrad variant för volymen några 100 m<sup>3</sup> är av samma storleksordning som för ståltanken i kr/m<sup>3</sup>. Dock behöver brunnslagret foder eller värmväxlare för många tillämpningar och har en lägre energiinnehåll per m<sup>3</sup> än ståltankar, vilket gör det dyrare i praktiken. Möjligtvis kan det finnas en tillämpning i fall där det saknas mark eller utrymme för en ovanjordstank.

#### *e) Övriga arbeten: Uppföljning av Lambohovgropen*

Lambohovgropen med volymen 10 000 m<sup>3</sup> var Sveriges (och troligen världens) första groplager i berg (6,G2). Tyvärr valdes en plats med berg av dålig kvalitet vilket ökade kostnaden till ca 800 kr/m<sup>3</sup> i 1982 års penningvärde exkl anslutningsledningar (G11), och dessutom förorsakade extra



läckageproblem . Man kom redan tidigt underfund med att principen som valdes för isoleringen (en vägg av murade lecablock och ett icke läcksökt foder av bentylgummi lagd på en fiberduk), var dyr. Tätningen hade inte läcksökts vilket ledde till att isoleringen blev vattenfylld.

Relativt omfattande mätningar genomfördes för lagret med den vattenfyllda isoleringen.

#### f) *Sammanfattning*

Sammanfattningsvis kan konstateras att efter många år där utvecklingen av groplager vilat efter byggandet av Studsviksprototypen, nya initiativ tagits i BFRs regi och flera utvecklingslinjer lanserats som kan leda till reella framsteg när det gäller att klara högre temperatur, kunna slopa värmeväxlaren, utnyttjande av marken ovanför gropen, bygga i ostabil mark, förbättrad värmeisolering.

Detta innebär givetvis inte att alla satsningar varit framgångsrika . Av de mindre lyckade satsningarna vi har kommenterat, kan man dra lärdom betr betydelsen av att materialfrågorna är uppklarade i laboriemiljö eller mindre skala innan man börjar en dyr fältdemonstration i större skala, och att markförhållandena måste utredas omsorgsfullt innan man väljer platsen för en demonstration.

### 3.2.2 Bergrumslager

#### a) *Tidigare erfarenheter*

##### *Nya vattenfyllda bergrum*

Tekniken att bygga stora vätskelager i bergrum blev utvecklad för oljebergrum. Samma teknik adapterad till hetvatten används i ett lager för 15 000 m<sup>3</sup> i Avesta (10,B13) bekostat i huvudsak av Vattenfall och Befo med vissa bidrag från BFR, och ett par år senare 100 000 m<sup>3</sup>-lagret i Lyckebo, med stöd från BFR (11, B5, B6, B10).

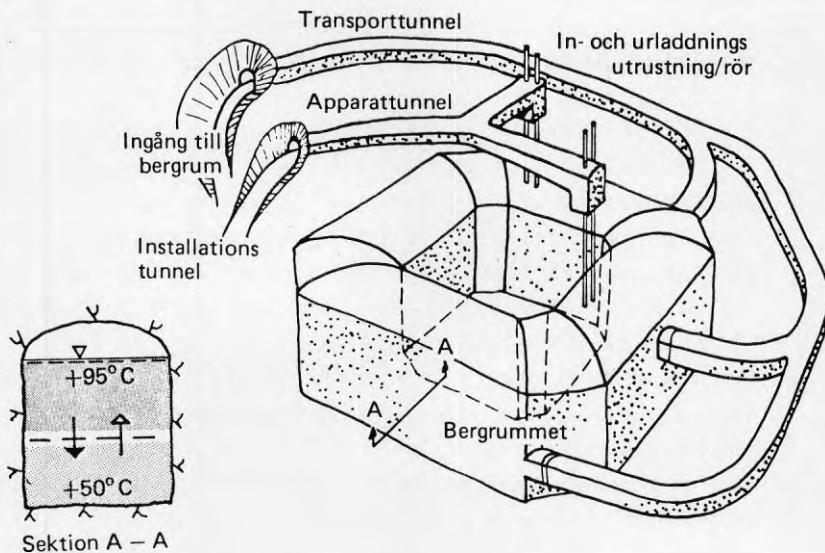
Redan Avestalagret visade att bergrum klarar upprepade mycket extrema temperaturcyklingar (mellan 115 och 50°C) utan deformationer av skadlig omfattning, och Lyckebolagret (90 à 50°C) bekräftade denna erfarenhet ytterligare. Projekten visade även att det gick att bemästra de vattenkemiska problemen om vattnet för initial fyllning passerar en jonbytare som även används i fortsättningen i erforderlig utsträckning. Värmeledning svarade för



90 % av värmeförlusterna, konvektion för bara 10 %. Resultaten för Avesta är dokumenterade i en mycket utförlig internationell rapport (B13). Lyckebo representerar två speciella utvecklingsdrag jämfört med tidigare bergum, nämligen

- i) en kompakt konstruktion med ett torroidformat bergum omkring en centumpelare av berg, för att minska värmeförlusterna till omgivningen
- ii) en rörlig anslutning där man kan mata in och ur vatten på godtycklig höjd (konstruktion Skanska) för att kunna åstadkomma en skarp temperaturstratifiering även under varierande driftförhållanden. Den fungerade bra.

Ett av Lyckeboprojektets värdefulla bidrag var att visa att man kan bygga projekt av denna typ (vid storlek 100 000 m<sup>3</sup>) för en kostnad av ca 200 kr/m<sup>3</sup> i 1988 års penningvärde, vilket är betydligt lägre än för en ståltank men tyvärr ännu inte tillräckligt billigt för att klara en acceptabel ekonomi för ren säsongslagring.



**Figur 3.2** Bergumslagret i Lyckebo

För de små volymer som räcker för de flesta korttidslagringsprojekt är däremot bergum tack vare hög etableringskostnad dyrare än ståltanken, varför denna lönsamma marknad är stängd för bergummen. Den eventuella ekonomiska nischen ligger därför för tillämpningar där stor volym fordras och

lagret kan utnyttjas mera än en gång per år.

En sådan tillämpning har studerats för Kungälv, nämligen en stor solvärmecentral med ett bergumslager för 400 000 m<sup>3</sup> (B9, B12). Kostnaden för hela projektet inklusive solfångare är större än för konventionell värme från t ex naturgas, men skillnaden kan förhoppningsvis reduceras för framtida tillämpningar genom fortsatt utveckling av bl a solfångarna. Ökar framtida utsläppsavgifter och kostnaderna för konkurrerande alternativ kraftigt, förbättras givetvis ekonomin för solvärmecentraler.

#### *Blockfyllda bergum*

Flera studier gjordes av CTH och Hagkonsult av bergum sprängda enligt en teknik som används inom gruvtekniken och fyllda med stenblock och vatten. Kostnaden per kWh beräknades bli något lägre än för nya vattenfyllda bergum, men osäkerheten i kalkylerna bedömdes också vara större än för vattenfyllda bergum eftersom teknik inte ännu använts för projekt av detta slag (B7). Under senare år förekom inga studier av denna variant.

#### *b) Resultat 87-90*

##### *Nya vattenfyllda bergum*

Under 1987-88 pågick främst slutfasen av utvärdering och rapportering av resultaten för Avesta-projektet och mätningar betr Lyckebo. Mätningarna betr temperaturstratifiering i lagret har bekräftat en teoretisk modell framtagen av LTHs enhet för matematisk fysik med anslag från BFR. Däremot visade värmeförlustmätningar för Lyckebo att värmeförlusterna varit ca 50 % större än väntat, vilket man anser bero på ett begränsat vattenläckage mellan bergummet och ett schakt som förorsakar en konvektionsström genom schaktet (B13a). Iakttagelsen visar hur försiktig man måste vara i praktiken för att undvika denna typ av fenomen. För Kungälv-lagret genomfördes en utförlig förstudie omfattande olika värmeförsörjnings- och kraftproduktionssystem i kombination med ett stort bergum (B12).

##### *Ombyggda oljebergum*

Eftersom många oljebergum blir oanvända efterhand, med ökande oljebesparingar för fjärrvärmesystem och andra konsumenter, riktades vid mitten av 80-talet intresset mot möjligheten att konvertera dessa till värmelager. Givetvis har erfarenheterna från Avesta och Lyckebo relevans även för dessa projekt. Dock tillkommer problemet av hur man skulle hantera

kvarvarande oljerester i anläggningen, samt hur arbeten innanför bergrum som fått vissa försvagningar i taket m m på grund av temperaturcykling skulle utföras.

Vid mitten av 80-talet gjordes flera studier bekostade av BFR (B4) och andra av STEV betr olika sätt att angripa oljeproblemet. Mot slutet av perioden konverterades ett 200 000 m<sup>3</sup> oljebergrum, i Oxelösund (12) på kommersiell basis (dock med vissa försök bekostade av STEV). Försöken har visat att det inte torde vara nödvändigt att avlägsna oljan som inte kunde tömmas med enkla åtgärder, vilket gjorde ombyggnaden betydligt billigare. Arbeten inom bergrummet begränsades genom att ansluta bergrummet till värmesystemet genom borrade kanaler. Ombyggnaden är färdig och kommersiell drift påbörjad. Kostnaden blir mycket låg, ca 8 Mkr (exklusive kostnaden för ränta under byggtiden och värmeuppladdningen) eller ca 40 kr/m<sup>3</sup> vid 700 h laddnings- och urladdningstid, vilket är en faktor 3 à 4 lägre än för nya vattenfyllda bergrum av samma storlek (B14).

För ytterligare en kommun (Göteborg) har konvertering av ett stort (400 000 m<sup>3</sup>) oljebergrum studerats med lovande resultat men inga beslut till genomförande har ännu fattats (B15). BFR har finansierat en beräkning av värmeförlusten för detta projekt (B17).

### *Sammanfattning*

Sammanfattningsvis kan konstateras att arbeten under programmet 1987-90 ytterligare bidragit till kunskaperna betr beteendet av nya vattenfyllda bergrum, så att tekniken nu behärskas. Problemet ligger på det ekonomiska planet eftersom typen har bara en smal eventuell nisch där den eventuellt kan förväntas bli lönsam i framtiden, nämligen relativt stora lager med väsentligt mer än en omsättning av energin per år. I stort sett samma slutsats gäller för nya blockfyllda bergrum även om dessa eventuellt kan bli något billigare men har en mindre väl underbyggd teknik.

Den största förhoppningarna betr god ekonomi är förknippade med ombyggnaden av existerande oljebergrum som ligger nära fjärrvärmenät eller stora gruppcentraler. Dessa kan bli lönsamma för såväl korttids- som långtidslagring, ofta i samma projekt.

### 3.2.3 Övriga vattenlager

#### a) *Betongtankar*

I Ingelstad (Växjö) byggdes redan 1979 ett 5 000 m<sup>3</sup> lager som består av en betongtank (13,A6). Den har dock inga direkta fördelar över ståltankar och vissa nackdelar betr vattenkemin varför arbetet inte fortsattes därefter.

#### b) *Nedlagda gruvor*

En nedlagd gruva i Kopparberg utrustades 1983 med en värmepump för uttag av värme under vinterhalvåret (15, GV2, GV3, GV4). Den återladdas med hjälp av åvatten sommartid. Slutsatsen blev att denna typ av projekt kan ge acceptabel ekonomi när gruvan ligger nära lämplig bebyggelse som kan utnyttja värmen. Redan innan hade ett mindre projekt av samma typ utfördes i Kågered (GV1). Flera andra projekt studerades under perioden 87-90.

#### c) *Kombinationslager, vattentunnel/borrhål*

Eftersom borrhål från marknivå har låg kostnad per lagrad kWh vid tillämpning av säsongslagring men ej klarar höga effekter, projekterade Studsvik redan 1980 ett lager där man skulle använda sprängda tunnlar som ett "effektkomplement" för korttidslagring (B11). Borrhålen borrar från tunnlar innan vattenfyllningen.

Konceptet studerades vidare med anslag från BFR och befanns ha god ekonomi när det gäller mycket stora lager. För mindre lagerstorlekar ger kombinationen ståltank + borrhålslager bättre ekonomi, men innebär ett större ingrepp i landskapsbilden. Åren 1984-87 studerades ett kombinationslager med tunnlar på två nivåer av VIAK, men bedöms ge högre kostnader per kWh än varianten med tunnlar på en nivå (E3, E4).

## 3.3 Mer allmänna slutsatser

### 3.3.1 Kostnader

Kostnaden för vattenlager kan beräknas approximativt från en formel med tre

komponenter enligt följande:

$$Kostnad = A + B V + C W$$

där

$A, B, C$  = konstanter för en given typ av lager

$V$  = volymen

$W$  = dimensionerande vattenflöde

Komponenten  $A$  består av etableringskostnaden på platsen, kostnaden av ev urlastningstunnlar och schakt för bergrum m m. Dessa tunnlar bidrar till ett högt värde av  $A$  för nya bergrum, vilket är anledningen till att dessa är oekonomiska vid små volymer.

Kostnaden  $BV$  är den volymsberoende kostnaden och inkluderar t ex ståltankens tryckbärande skal och grundläggning, bergrummens sprängnings- och urlastningskostnader m m.

Kostnaden  $CW$  representerar en del av våra kostnader för anslutningsrör, pumpar, fördelningslådor och eventuella värmeväxlare. Det är denna del som gör ett korttidslager dyrare per  $m^3$  än ett långtidslager.

Tabell 3.2 ger exempel på typiska värden av dessa konstanter, exklusive kostnaden för den första laddningen med energi i 1988 års kostnadsläge.

**Tabell 3.2** Typiska kostnader för vattenlager (1988 års prisnivå)

Typ av lager	Initial-kostnad  A Mkr	Volym-beroende kostnad  B, kr/m <sup>3</sup> /h	Vattenflödet (& effektberoende kostnad C, kr/m <sup>3</sup> /h	Total specifik kostnad i kr/m <sup>3</sup> vid följande volym* & urladd. tid	
				25 000 m <sup>3</sup> 8 h kr/m <sup>3</sup>	250 000 m <sup>3</sup> 800 h kr/m <sup>3</sup>
Ståltank för fjärrvärme	2	300	400-1500	~500	Ej realistiskt i denna storlek
Jordgrop med metallmembran	1	260	500-1500	~420	
Nya bergrum: a) vattenfyllt	8	115	2000-5000	~800	152**
b) blockfyllt	11	70	2000-5000	~900	119**
Konverterade oljebergum	2.5	15	2000-10000	~500	~35

\* varierar kraftigt med avstånd från huvudledning, urladdningstid m m. Det större värdet för konverterade oljebergum beror på att detta läge ej kan påverkas, varför längre

ledningarna ofta fordras.

\*\* ca 22 % lägre lagrad energi per m<sup>3</sup> än övriga typer på grund av stenblockens lägre specifika värme än vatten.

Kostnaderna gäller för lager med volym > ca 3 000 m<sup>3</sup>. Kostnader för ett bredare utbud av korttidslager och säsongslager (dvs även marklager, akviferlager och smältlager) per kWh lagrad energi presenteras i kurvform i kapitel 7 över ett större storleksområde, dvs även för mindre lager.

### 3.3.2 Konkurrenskraft och möjligheter

Vi menar att de arbeten som bedrivits tyder på att **vidareutvecklade gropmagasin** kan uppnå lägre kostnader än ståltankar för mindre system av typ gruppcentraler och då bli lönsamma, förutsatt att lagret kan omsättas mer än en gång (helst flera gånger) per år. Därför bör de citerade utvecklingsarbetena (hög temperaturfoder, eliminering av syreinläckage, jordstabilisering och grop med bärande tak) fullföljas.

**Nya bergrum** har, enligt vår bedömning, svårare att hitta en ekonomisk tillämpning även om det senare kan utvecklas en nisch för vidareutvecklade solvärmecentraler. Konverterade oljebergrum förlagda nära värmeavvärmare och baslastproduktionskällor har däremot goda utsikter att bli lönsamma för korttids-, långtids- och kombinerade tillämpningar, varför uppföljning av erfarenheterna och vidareutveckling är angeläget.

**Nedlagda gruvor** kan användas som värmekälla för värmepumpar när de ligger mycket nära lämplig bebyggelse. Här fordras dock knappast ytterligare FoU.

**Ståltanken** har inte behandlats aktivt inom BFR-programmet hittills. Vi menar dock att även ståltanken kan behöva FoU-insatser eftersom den mest framgångsrika konstruktion hittills (kolståltankar vid atmosfärstryck) har tagits fram med sikte på stora tankar som har råd med relativt omfattande hjälpsystem för att kunna upprätthålla en ångkudde ovanför vattenytan som skydd mot syresättning av vattnet och korrosion. Konstruktioner som saknar dessa hjälpsystem kan vara värda att bearbeta vidare.



**Tabell 3.3** Vattenlager byggda i Sverige <sup>a)</sup>,  
(för ståltankar ges bara några exempel).

Nr	Typ av vattenlager	Anläggningen	Volym m <sup>3</sup>	Huvudtillämpning	Temperaturintervall	Värmekälla	Anläggningskostnad Mkr verklig	Anläggningskostnad kr/m <sup>3</sup> index justerad till 1988	Referens
<b>Ståltankar vid atmosfärstryck</b>									
1.	Ståltank	Uppsala, 1978	31 800	Dygnslagring	95 - 55	Fjärrvärme	10.0	680	
2.	Ståltank	Stockholm, 1980	47 500	Dygnslagring	95 - 40	Fjärrvärme	30.0	1 120	
3.	Ombyggd oljetank	Västerås, 1977	25 000	Dygnslagring	99 - 50	Fjärrvärme	3.2	300	
4.	Ståltank	Södertälje, 1985	1 500	Dygnslagring	90 - 40	Solvärme	1.3	2 050	
<b>Gropmagasin</b>									
5.	Jordgrop	Studsвик, 1979	640	Säsongslagring	70 - 30	Solfångare	0.6	1 900	G1
6.	Berggrop	Lambohov, 1980	10 000	Säsongslagring	70 - 5	Solfångare + värmepump	4.9	870	G2
7.	Jordgrop med kopparmembran	Malung, 1988	200	Säsongslagring	95 - 50	Solfångare			G10
8.	Dikesmagasin	Kronhjorten, Växjö	800	Säsongslagring	95 - 50	Solfångare			G10a
9.	Dikesmagasin	Särö	1 800	Säsongslagring	95 - 50	Solfångare	0.8	460 <sup>b)</sup>	G8 G15
<b>Bergrum</b>									
10.	Nytt bergrum	Avesta <sup>b)</sup> , 1987	15 000	Veckolagring	115 - 70	Sopförbränning	21.5	1 520	B13
11.	Nytt bergrum	Lyckebo, 1983	105 000	Säsongslagring		Solvärme + el	15.0	190	B5,1
12.	Konverterade oljebergum	Oxelösund <sup>c)</sup> , 1988	200 000	Säsongs + korttidslagring	95 - 50	Spillvärme	8.0 <sup>d)</sup>	~ 40 <sup>d)</sup>	B14
<b>Övrigt</b>									
13.	Betongtank	Ingelstad, 1979	5 000	Säsongslagring	95 - 40	Solfångare	2.9	1 170	B13
14.	Gammalt berg tunnel	Gullspång, 1982	12 000	Säsongslagring	19 - 8	Ytvatten	0.5	61	GV1a
15.	Nedlagd gruva	Kopparberg, 1983	300 000	Säsongslagring	20 - 5	Ytvatten	7.3	32	GV2, GV3 GV4

a) Med undantag för Kronhjorten, Särö och Oxelösund har data hämtats från slutrapporten av PUL-gruppens referensgrupp för vattenlager. Observera att lagrets storlek har stor inverkan på kostnaden per m<sup>3</sup>.

b) Finansierad i huvudsak genom Vattenfall och Befo.

c) Privat finansiering + anslag från STEV för försök och viss riskgaranti. Dimensionerad för laddning/urladdning på en månad var.

d) Exklusive kostnad för energinvestering och ränta under byggtiden.

e) Skattad under förprojekteringen

### 3.4 referenser

Tabell 3.4 Studier och projekt beträffande vattenlager i Sverige\*.

Ref nr	BFR-projekt-nummer	Förkortad projekt-titel	Projekt-ledare eller författare	Belopp	Ev rapport
<b>Gropmagasin</b>					
x G1	?	Drifterfarenheter från Studsviks solvärmecentral	Perers Studsvik	?	ET 84/118 & EI-85/116
x G2	821529-2 + 84.....	Groplager Lambyhov: Mätning & utvärdering	Söderlund, VIAK		R92:1984
x G3	831622-1	Blockfyllt bergrum, Trollhättan: Förstudie	Boganooff, JoW		
x G4	850553-7	Isolerat bergdike/grop: Pilotförsök Ingelstad	Hultmark, A&H		
x G5	850900-4	Isolerat dikesmagasin: Fallstudie Ingelstad II	Hultmark, A&H		
x G6		Förstudie till solvärme-prototyp med groplager	Perers, Zinko Studsvik		R77:1985
x G7	860131-1	Korttidslagring i sänkbrunnar i jord: Förstudie	Boganooff, Hagkonsult		R87:1988
x G8a	850553-7	Isolerat bergdike i pilotförsök, Ingelstad	Hultmark, A&H	R64:1987	
x G8	860324-1	Solvärme med dikesmagasin, Kronhjorten, Växjö	Bygg Sjö AB		
x G9	870342-7	Anläggningsteknik för gropvärmelager i jord: Teknisk/ekonomisk studie (förstärkningsåtgärder)	Magnusson, SGI		R47:1988
x G10	?	Groplager med kopparmembran, Malung	Leif Ericsson, Studsvik		
x G11	870242-5	Nordiskt samarbete om värmelagring i gropmagasin	Lundin, K&M		NBS sem, R84:1987
x G12	870457-7	Arbetsgrupp för val av material i isolerade värmelager i mark	Hultmark, A&H		
G13		Groplager fyllt med sten & vatten: demoanläggning i Stuttgart	Harde, Stuttgart		Jigastock -88
x G14		"Hålrumsmagasin" (= gropmagasin fyllt med sten & vatten: studie	Eriksson, AIB		NBS em. R84:1987
G15	860435-9	Grupphusområdet med säsongsolenergi, Särö: Förstudie	Gräslund, A&H		R16:1988
↑					
Projekt eller rapporter med BFR-bidrag					

Tabell 3.4 Forts.

Ref nr	BFR-projekt-nummer	Förkortad projekttitel	Projektledare eller författare	Belopp	Ev rapport	
<b>Bergrum</b>						
	B1	Bergtunnel/borrhålslager för Shell & BP-raffinaderierna: Förstudie	Margen, Studsvik		E-81/1 & 2 EI-82/190	
x	B2	811157-9	Befintlig bergtunnel i Gullspång: Mätning & utvärdering	Ericson, Örebro	15	R66:1985
x	B3	820716-5	Mätning & utvärdering, Lyckebo	Wallentun, Studsvik	85	
x	B4	830907-1	Energilagring i övertaliga oljebergum	Hillström, VIAK	125	
x	B5	840217-3	Berggrums/borrhålslager, Vänersborg: Förprojektering	Gustafsson VIAK	150	R130:1984 + R86:1988
x	B6	-	Lyckeboprojektet	Hillström/ Åstrand, Uppsala		G4 1984 G14 1985
	B6a	850832-6	Lyckebo: Utvärderingsresultat & drifterfarenheter	Brunström & Hillström, Befo		R86:1987
x	B7	-	Blockfyllda bergum och berggrovar	Boganoff Hagkonsult		BFR sem R104:1983
x	B8		Konverterad bergtunnel, Gullspång: Mätning, utvärdering	Hallenberg		R46:1985
x	B9	841358-6	Säsongslagrad solvärme, Kungälv: Förstudie	Erver, Skandiakons	138	
x	B10	850832-6	Säsongslagring Lyckebo: Systemutveckling	Hillström, Uppsala	400	
x	B11		Lagring av spillvärme i bergum & borrhålslager, Göteborg: Jämförande studie	Nilsson, Energiverken Göteborg		R27:1985
x	B12	851074-5	Säsongslagrad solvärme i Kungälv	T Claesson, Scandiakons	234	T9:1986
	B13		Avesta-bergummet: Resultat av mätprogrammet			Befo-rapport
	B13a		Lyckebo; värmeförluster			
	B14		Konvertering av oljebergummet i Oxelösund	Margen/ Gedung		Jigastock 88 & NBS sem 88
	B15		Konvertering av oljebergum i Göteborg	Margen		Rapport f Energiverken Göteborg (+ NBS sem 88

↑  
Projekt  
eller  
rapporter  
med BFR-  
bidrag

Tabell 3.4 Forts.

Ref nr	BFR-projekt-nummer	Förkortad projekttitel	Projektledare eller författare	Belopp	Ev rapport
<b>Nedlagda gruvor</b>					
x	GV1	8107752-4	Kågered, plastledning från gruva	Hekfor, Kalmar	134
x	GV2	811602-8	Säsongslagring av sjövärm i gruva i Kopparberg	Hult, Kopparberg	1 476
x	GV3	820659-6	Dito; Mätning & utvärdering	Wallentun, Studsvik	300
x	GV4	841017-0	Dito; Laddning sommar/höst 1984	Finn, WEPAB	300
x	GV5	850160-3	Dito; Förprojektering av alternativ systemlösning	Hillström, VIAK	75
x	GV6	850215-7	Uppföljning & utvärdering av värmeutvinning från vatten i Storgruvan, Norberg	Manheim, VIAK	149
x	GV7	851146-5	Gruvvärme i Mellansverige: Värmealternativ för 30 samhällen	Nilsson, Hofors Energi	50
x	GV9	861026	Gruvvärme i Glashammar med återladdning: förstudie	Hillström, VIAK	50
x	GV8	860449-2	Studier & information kring gruvprojekt i Dalarna	Tenne, Byggnads-geologiska s	8
<b>Ekonomi och allmänt om vattenlager och andra värmelager</b>					
x	E1		Rollen för olika typer av energilager för svensk energiförsörjning	Margen	R13:1985
x	E2		Ekonomi av energilager i mindre system	Margen	R3:1986
	E3		Ekonomisk analys av värmelager för Fjärrvärmesystem	Margen	STEV nov 85
	E4		Värmelager för fjärrvärmenät och gruppcentraler	Margen	Kompendium juni 1987
	E5		Energiekonomi; Metodik för värdering av värmepumpsystem solvärmesystem & lager	Aronsson, CTH	CTH D:31987
x	E6	850420-5	Large Scale Swedish Solar Heating Technology	Dalenbäck, CTH	D6:1987
	↑		Projekt eller rapporter med BFR-bidrag		
(Vissa förstudier som ej lett till konkretisering efteråt eller beskrivit nytt koncept är ej medtagna i denna förkortade lista.)					

## 4 Marklager

### 4.1 Inledning

Genom lagring av värme kan värmekällor som tex sol-, uteluft-, sjö- och spillvärme bättre tas tillvara. De bästa förutsättningarna för värmelager finns i naturliga formationer i jord, berg och vatten. Tekniken för att bygga gropmagasin och bergrun var tidigare känd, men många nya geotekniska problem med vattentäthet, stabilitet och termiska påkänningar måste lösas. När sedan berg, lera och torv började användas som direkt lagringsmedium blev behovet av geotekniska baskunskaper påtagligt i tvärtekniskt samarbete mellan energikonstuler och högskoleinstitutioner.

Med värmelagring i mark avses vanligen värmelager i berg och jord som med hjälp av hål eller slangar placerade vertikalt eller horisontellt kan överföra värmets mellan en värmebärare och lagret. I berg borrar vanligen hål med en diameter 100-150 mm ned till 50-100 m djup och kallas vanligen borrhålslager. I berg kan värmeväxlarssystemet vara öppet eller slutet med ett slangsystem som värmeväxlar mot vattnet i borrhålet. I jord används alltid slutna slangsystem som värmeväxlare mellan en värmebärande fluid och jorden. I mark kan slangar föras ned genom nedpressning, spolning eller borrhning. I lera kan slangar i allmänhet tryckas ned med ett lämpligt don, medan i sand krävs förutom tryckning också spolning och vibrering. Lagrets djup begränsas av lermäktighetens djup där vanliga mäktigheter är 10-20 m, det största byggda lerlagret har dock ett djup på 35 m.

Värmelagring kan också ske i torvmossar och sjöars bottensediment. Slangarna förläggs i dessa fall horisontellt i flera lager, på grund av det ringa tillgängliga djupet. Lagerformen blir här utplattad vilket ger stora värmeförluster vid höga lagertemperaturer. Lagertypen lämpar sig därför bäst för tillämpningar med låg temperatur.

Värmelager i mark är termiskt tröga vilket innebär att det är svårt att momentant ta ut och ladda in stora värmeeffekter. Det är tekniskt möjligt att konstruera lagren så att stora effekter kan överföras men detta kräver stora värmeväxlarytor, dvs litet avstånd mellan borrhål eller slangar, vilket i sin tur medför att lagren blir för dyra per lagrad kWh. Detta för naturligt med sig att lagertypen används som säsongslager där överförda effekter är små i förhållande till den lagrade energimängden.

Då lagren alltid är förlagda i mark, inskränks möjligheten för värmeisolering till lagrets lock. detta medför att lagren alltid är oisolerade mot omgivande mark med stora värmeförluster som följd. Det vanligaste sättet att hålla ned



förlusterna är att utnyttja lagret vid låga temperaturer nära den omgivande markens temperatur. Ett annat sätt är att vid höga lagertemperaturer endast bygga stora enheter vilket håller de relativa värmeförlusterna per lagervolym på en låg nivå. Vid en jämförelse av värmekonduktiviteten i lera och berg ger detta att lera har betydligt lägre värmeledningsförmåga och lämpar sig därför bättre vid höga lagertemperaturer då värmeförlusterna genom ledning är lägre.

En förutsättning för den här typen av lager är att geologiska och geohydrologiska bedömningar måste göras för att fastställa vilka lagertyper som är möjliga att bygga ur teknisk synvinkel. Energigeotekniska utredningar kan klargöra förutsättningarna för och konsekvenserna av utvinning och lagring av värme i jord och berg. Framförallt gäller det att applicera kända geotekniska beräkningsmodeller och synsätt på ett nytt verksamhetsområde. Detta är emellertid inte tillräckligt, dessutom erfordras kunskaper med anknytning till värmeteknik som tex kännedom om termiska egenskaper hos jord och berg samt konsekvenser vid temperaturförändringar. Givetvis är medverkan av VVS/energi-tekniker nödvändig för att värmelagren skall behandlas energitekniskt korrekt i det värmeproduktionssystem vari de ingår.

Tekniken för storskalig lagring av värme från bla sol, uteluft, ytvatten samt spillvärme har under 1980-talet utvecklats på ett intressant sätt. Avgörande utvecklingssteg har kunnat tas genom byggandet av projekt i full skala, där olika systemkombinationer med värmekällor, lagringsmedium och värmeproduktion testats och en realistisk utvärdering kunnat göras.

De större byggda lagerprojekten i Sverige återfinns i tabell 4.1. Av dessa lager är nummer 1-12 byggda under PUL-gruppens och föregående programgruppers verksamhetstid. Projekt 13-15 har dock tillkommit under innevarande programmeringsperiod och har tillsammans tilldelats experimentbyggnadslån på ca 12 Miljoner kronor.

Noterbart i samband med tabell 4.1. är att nästan samtliga värmelager är anslutna till värmepumpar, undantaget (15), vilket får ses som en begränsning. Detta är inte i första hand beroende på lagertypen utan avhängt på den värmekälla varmed lagret laddas. Värmekällorna sol- och spillvärme kan i vissa fall mycket väl användas direkt för uppvärmning utan värmepumpning medan övriga värmekällor i tabell 4.1 fodrar temperaturhöjning.



Tabell 4.1 Värmelager i mark byggda i Sverige

Ref nr	Typ av värme lager	Ort och år	Volym m <sup>3</sup>	Värmebärarsystem	Temperaturintervall <sup>1)</sup>	Värmekälla
1	Berg	Sigtuna 1978	10 000	Slutet	8-42	El/Solfångare
2	Lera	Utby 1979	1 200	Slutet	4-12	Uteluft
3	Lera	Kungsbaka 1981	87 000	Slutet	10-16	Solfångare
4	Torv	Härreda 1983	5 000	Slutet	6-16	Solfångare
5	Berg	Luleå 1983	120 000	Öppet	10-80	Spillvärme
6	Lera	Kullavik 1983	8 000	Slutet	10-55	Solfångare
7 <sup>2)</sup>	Berg	Stora Skuggan, Sthm 1984	210 000	Slutet	7-50	Dammvatten
8 <sup>2)</sup>	Berg	Vallentuna 1984	10 000	Slutet	0-15	Frånluft/ Solfångare
9 <sup>2)</sup>	Berg	KF, Finspång 1985	42 000	Slutet	15-30	Spillv.-frysar
10 <sup>2)</sup>	Berg	Grosvad, Finspång 1985	300 000	Slutet	10-35	Spillv.-bandybana
11	Berg	Sun Court, Sthm 1985	30 000	Slutet	4-14	Från/Uteluft
12 <sup>2)</sup>	Botten-sediment	Vallentuna-sjön 1986	1300 000	Slutet	5-18	Sjövatten
13	Lera	Söderköping 1986	36 000	Slutet	6-28	Uteluft
14	Berg	Upplands Väsby 1989	100 000	Slutet	12-40	Spillvärme
15	Berg	Stocksunds Torp, Solna 1989	140 000	Öppet	50-80	Fjärrvärme

1) Projekterade temperaturer  
2) Ej BFR finansiering av lagerentreprenaden

## 4.2 Tidigare erfarenheter

### 4.2.1 Lagring i jord

Utförandet av ett värmelager baseras på lagringskapaciteten och värmeledningsförmågan i marken. Värme överförs till och från marken med hjälp av vatten som cirkulerar genom ett kanalsystem.

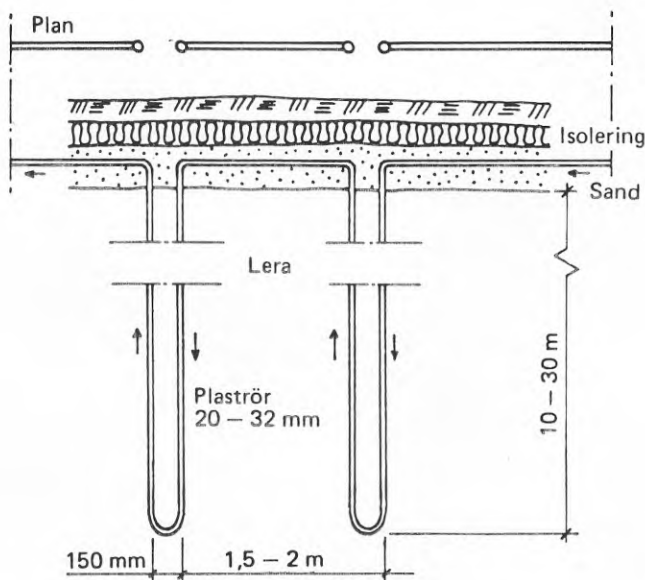
Värmelagringskapaciteten hos torv och lera är i hög grad beroende av vatteninnehållet och varierar mellan 0,6 och 1,1 kWh/m<sup>3</sup>,°C, för lera normalt 0,8 - 1,0 kWh/m<sup>3</sup>,°C.

För lager i torv, lera, sand eller silt är endast slutna värmeväxlersystem tänkbara. Utformningen kan vara enkla eller flerdubbla U-rör, koncentrisk rör etc.

Dimensioneringsmetoder för värmeväxlare mot marken är väl utvecklade och möjliggör hänsyntagande till; rörlängd, avstånd mellan rör, skänkelavstånd vid

U-rör, rördimensioner, markegenskaper m,m.

**Rörssystem i lera** har vid hittills byggda vertikala lager utförts genom nedpressning av plaströr i u-form med pålkran, traktorgrävare eller till och med manuellt. Avstånd mellan skänklarna är 15-50 cm och mellan varje nedstick vanligen 2 m. Vid lagren i Kungsbacka (3) och Kullavik (6) gjordes neddrivningen med pålkran och med en ihålig triangulär påle som foderrör. Slangen installeras inuti pålen och slangen vattenfylls. Påsens bottenplatta lossas så att lera kan tränga in och låsa slangen i bottenläget. Därefter dras den ihåliga pålen upp varpå lera trycks in mot slangen och installationen är klar.



**Figur 4.1** Klassiskt marklager i lera med vertikala kanaler.

Samtliga neddrivningsmetoder går att komplettera med en sanddrän som ökar värmeöverföringsförmågan mellan slang och lera. Enklast och bäst utförs sanddränen om neddrivningen görs med ett foderrör som efter det slangen nedsänkts i röret fylls med sand och sedan dras upp (MA18).

Neddrivningsmetoder för **lager i sand/silt** är under utveckling men ännu har inget sådant lager byggts i Sverige.

När det gäller **lager i torv** har byggandet begränsats av att bärigheten ej varit tillräcklig för de maskiner som utnyttjats. Med de erfarenheter man fått av bredbandsmaskiner när det gäller torvtäckt bör maskiner kunna användas där rationell slangläggning kan utföras.

För lager i sjöars bottensediment finns endast erfarenheter från en anläggning (11). Detta är ingen vanlig lageranläggning utan kan mer jämföras med en sjövärmepump med slangar i bottensedimentet. Denna anläggnings slangar har dock pjöjts ned till ett större djup och dessutom tas vattnet till värmepumpens förångare direkt från sjön och pumpas sedan genom slangsystemet. Det visade sig att slangläggningen efter vissa initialproblem kunde utföras mycket snabbt och rationellt. Ett problem var slangarnas inkoppling på fördelningslåda ute på sjön. Maximala slanglängder och ett grundligt förberedelsearbete på land måste eftersträvas. Stora lagervolymer kan då byggas till låg kostnad.

#### 4.2.2 Borrhålslager i berg

Värmelagringskapaciteten hos i Sverige vanliga bergarter som granit och gnejs är ca  $0,6 \text{ kWh/m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$ , vilket motsvarar halva kapaciteten jämfört med vatten. Kanalsystemet görs i de flesta fall vertikalt med borrhål till ett djup av 50 - 100 m och en diameter på normalt 100 - 150 mm. Ett rör eller en slang sänks ned i borrhålen, vilka kan sammankopplas parallellt eller i serie. Beroende på tillgänglig laddnings och urlagringstid placeras hålen på 2 - 6 meters mellanrum för säsongslager.

Ett stort antal koncept har studerats för borrhålslager i berg. Det enklaste är att borra helt vertikalt för att få ett cylindriskt lager, eller vinklat så att en konisk form fås. Borrhålen kan även utgå från ett tunnelsystem, som vid högre uttagseffekt fungerar som vattenlager. Denna typ av system har föreslagits för storskalig lagring av spillvärme från raffinaderier i Göteborg.

Borrning i kristallint berg görs med två väl utvecklade metoder, topphammarborrning och sänkhammarborrning. För sedimentära bergarter har en tredje metod utvecklats som bygger på roterande, krossande borring. Hammarborrning utförs genom en kombination av slag och rotation. Sänkhammarutrustningen har separat rotationsmotor från slagverket som placeras i botten på borrhålet vid borrkronan.

De flesta borrhålsborrningar för brunnsborrning utnyttjar kompressorer på ca 20 bar och borrar ned till ca 150 m. Djup ned till 200 m går att nå om inte vattentillströmningen i borrhålet är för hög, då en stor del av kompressoreffekten går åt för att lyfta vattnet ur hålet.

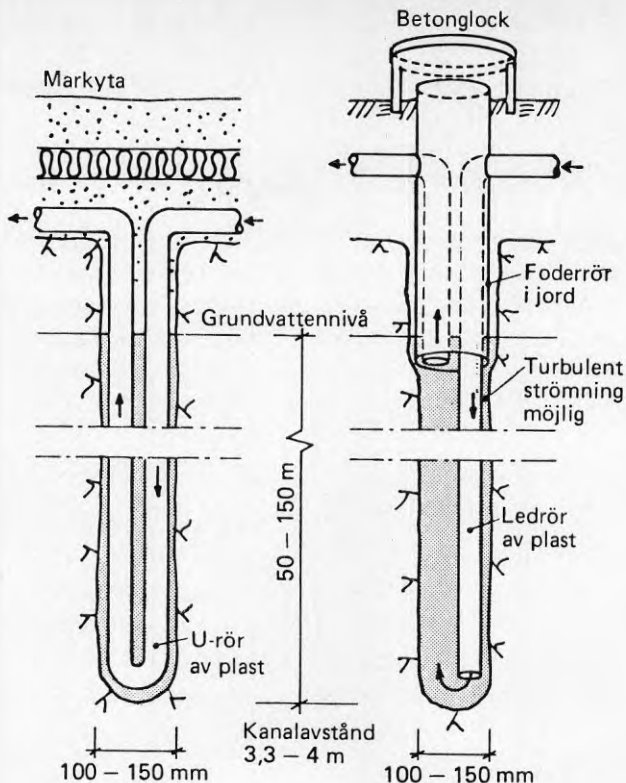
För borrhålslager i berg kan i princip två olika värmeväxlingssystem användas, öppna och slutna system. Skillnaden rent värmetekniskt mellan öppna och slutna system är att de öppna uppvisar högre värmeövergångstal mellan värmebärare och berg. Detta innebär att antalet borrhål i en bestämd bergsvolym kan göras färre vid öppen systemlösning under

förutsättningen samma överförda effekt.

I **slutna system** med slangar kan olika köldbärare användas så att temperaturer under 0 °C kan utnyttjas i lagret. Flertalet av de byggda borrhålslagen är av principen slutet värmebärarsystem, vilket ger samma vattenkemiska förutsättningar för värmebäraren som för lager i jord.

I ett **öppet system** är det cirkulerande vattnet i direkt kontakt med berget i varje borrhål. Temperaturen i dessa system måste vara över 0 °C eftersom frysskyddsmedel inte kan användas. För öppna system har möjligheten att utnyttja naturliga eller uppspräckta sprickor som vattenkanaler undersökts. Resultaten visar dock på att sprickorna blir ojämna och lätt sätter igen, varför värmebäraren lämpligen cirkuleras inom borrhålet (MP1).

Då direkt kontakt mellan värmebärare och berg föreligger, medför detta konsekvenser för vattenkemin. För lager som arbetar vid låga temperaturer är vattenkemin i form av utlösning och utfällning samt korrosion på ledningar och värmeväxlare små och väl kända. Vattenkemiska problem blir påtagligare i lager av högttemperaturtyp. Framst är det karbonat av Ca och Mg som faller ur i ledningar och värmeväxlare vid temperaturhöjning. Denna problematik är vid högttemperaturlagring avgörande för den övre temperaturgräns som kan accepteras.



**Figur 4.2** Borrhålslager med slutet system (till vänster) och öppet system.

I Luleå (5) utfördes lagret med borrhål  $\phi 150$  mm / öppet system för att maximal flexibilitet skulle föreligga vid en eventuell ombyggnad till ett slutet system med olika typer av U-rör i borrhålen

Erfarenheter från Luleå visar att lagerkostnaden kan sänkas genom mindre dimension på borrhålen, slopande av injektering och förenklad sättning av foderrör genom jordlagret.

### 4.3 Teknikläget idag

Miljökonsekvenserna pga värmelagring i mark får anses vara mycket begränsade och synes i de flesta fall vara försumbara. Dock måste hänsyn tas i de fall där risk finns för uttorkning med sättningar som följd, eller i fall med stora markrörelser orsakade av temperaturväxlingar, tex höjning av markytan. Dessa fenomen orsakar emellertid mer tekniska än miljömässiga problem.

Miljöfrågorna följs i det pågående utvecklingsarbetet, dels genom uppföljning av anläggningar i drift, dels genom särskilda studier och försök. Speciellt studeras fysikaliska, kemiska, biologiska och geotekniska förändringar vid ändrade temperaturförhållanden och konsekvenser vid eventuellt läckage av köldbärande vätskor och freon.

Tillståndsgivningen följer i princip gällande lagstiftning rörande byggnadslov, vattendom för utnyttjande av grundvatten och byggande i vatten samt anmälningsplikt enligt miljöskyddslagen. I många kommuner gäller dessutom speciella restriktioner utfärdade av tex hälsovårdsnämnd inom skyddsområde för vattentäckt. Lagstiftning som explicit anger rätten till energin i mark och vatten saknas dock.

Sammanfattningsvis kan sägas att införandet av värmelagersystem i tex mark minskar primärproduktionen av värme i motsvarande grad. Detta medför att ett brett utnyttjande av värmelager, vilka laddats med naturvärme, kommer att ge positiva effekter på miljön.

### **4.3.1 Lagring i jord**

#### **Lagring i lera**

##### *ny teknik*

I strävan att utveckla ny teknik för värmekollektorer i mark, har ett nytt projekt på SGI startats (MA38). Här är målet att kompakt markvärmeteknik med hög effektivitet skall uppnås i kombination med låg anläggningskostnad. Projektet är i första hand inriktat på markvärme för värmepumpar och inte värmelagring men intressanta resultat bör komma lagerområdet tillgodo.

Rapporten "Teknikutveckling för värmelagring med vertikala rör i jord och berg" (MA19), redovisar ett samarbetsprojekt mellan jordvärmegruppen på CTH och Danmarks Geotekniske Institut i Lyngby. Projektet behandlar metoder att anlägga värmelager i mark med vertikala rörsystem. Den innefattar resultat från utförda neddrivningsförsök i lera med ny teknik samt kostnadsberäkningar.

Den nya tekniken som utvecklats vid CTH för att sätta enkla u-rör i lera, baseras på att u-röret sätts ned oskyddat i ett moment med en neddrivningslans. Neddrivningsmetoden fungerade bra på försöksplatserna i Söderköping och Göteborg och neddrivning gjordes ned till 18 m djup med pålkran. Kostnadsmässigt innebär de nya neddrivningsmetoderna att ett lager i lera kan byggas till lägre kostnad än tidigare.



I rapporten "Teknikupphandling av markvärmelager" (MA28), har syftet varit att klargöra potential och indentifiera avvärmare för markvärmelager i jord. Resultatet skall ligga till grund för en teknikupphandling av ett antal värmeförsörjningsanläggningar med värmepump och markvärmelager. Genom en samverkan mellan ägare till gruppcentraler och med en gemensam satsning på teknikupphandling, kan system, material, maskiner och byggande av värmelager utvecklas för att förbättra dess ekonomi.

Rapporten beskriver en modell för teknikupphandling av lagren. Teknikutvecklingen utförs i en specifikations- respektive prototypfas. I specifikationsfasen klarläggs vissa grundförutsättningar, upprättas en kravspecifikation och utförs en upphandling av teknikutvecklingens första fas. I prototypfasen genomförs teknikutveckling, pilotförsök och byggande av anläggning i full skala i olika geologiska miljöer. Under förutsättning att kommersiellt intressanta kostnadsnivåer erhålls, påbörjas en seriefas med målet att bygga 10-15 anläggningar.

#### *material egenskaper*

Ett flertal arbeten inom området materialegenskaper har startats. Ett pågående projekt i Luleå (MP5) behandlar sulfidjord vars geotekniska egenskaper undersöks i laboratorie miljö.

I rapporten "Värmeöverförande egenskaper i svenska jordarter" (MA7), är utförliga analyser av olika markmaterial gjorda. Ett stort antal jordprover har tagits till analys vilka ligger till grund för generella diagramm på materialegenskaperna. Analyserade egenskaper är värmekonduktivitet, vattenhalt, densitet, humushalt, kornstorlek och vattenhållande förmåga. Rapporten ger svar på frågor om värmekonduktivitet, värmekapacitet och latentvärme i olika jordar.

I rapporten "Energilagring i lera" (MA6) är geotekniska frågor kring lera behandlade. Inom projektet har två fullskaleanläggningar byggts och mätts med huvudsyftet att klarlägga lerans egenskaper vid förhöjd temperatur. Resultatet ger att störst betydelse är sänkningen av lerans förkonsolideringstryck vilket med tiden leder till sättningar. Projektet behandlar även värmeströmning och värmeväxlarutformning i lerlager.

#### *systemteknik*

Intresset för användning av lerlager vid högre temperaturnivåer än tidigare har ökat. Detta kommer främst av att lerans värmetekniska egenskaper är bäst lämpade för detta vid en jämförelse med berg och torv. Berg har högre värmeledningsförmåga och uppvisar således större värmeförluster vid samma



lagergeometri medan torv får stora förluster dels för att lagren måste byggas utplattade med ringa djup och dels för att konvektionsströmmar kan uppstå i lagren. För mycket stora volymer uppvisar dock borrhålslagren lägst förluster pga gynnsammare geometri.

Ett något äldre projekt i Göteborg (MA10) och ett i Märsta (MA37) studerar möjligheten att ladda lertager under sommaren med fjärrvärmens överskap.

För Märsta redovisas de tekniska och ekonomiska möjligheterna för säsongslager i lera i kombination med lågtemperaturdistributionssystem för Sätuna. Systemlösningen innebär att befintlig bebyggelse anpassas till de nya temperaturnivåerna då värmedistributionen sker via tappvarmvattnet. Arbetstemperaturen för lagret föreslås till 30-50 °C vilket innebär att in- och urlagring sker utan hjälp av värmepump. Systemlösningen bedöms kunna bli samhällsekonomiskt intressant i ett läge när landet behöver ny kapacitet för basproduktion av elenergi.

Ett nytt lertager i Söderköping (13) har byggts som en uppföljare till de tidigare byggda. I förprojekteringen (MA18) behandlas speciellt olika typer och former på värmeväxlarrören i leran. Det byggda lagret utfördes med dubbla korsade u-rör med skänkelavståndet 0,5 m. I utvärderingen (MP6) skall särskild vikt läggas vid dels värmespridningen kring den nya typen av värmeväxlarrör och dels det ekonomiska utfallet och kostnader kring lagerentreprenaden.

I "Sunclay-projektet" (MA1, 3), redovisas en fyllig utvärdering av det relativt gamla lertaget (start 1981) som laddas med värme från lågtemperatursolfångare (1500 m<sup>2</sup>) och urlagras med hjälp av dieseldrivna värmepumpar. Att konventionella elmotordrivna värmepumpar inte valdes vid projekteringen, berodde på att den framtida elförsörjning var oklar. Lertaget som är det största av sitt slag (87 000 m<sup>3</sup>), har till stora delar utgjort en referensanläggning för marklager med vertikala slangar.

Inom ramen för utvärderingen har alternativa systemlösningar och dimensioneringar studerats. Dessa visar att något av följande två system skulle ha byggts idag:

- 1 700 m<sup>2</sup> solfångare av mellantemperaturtyp (enkelglasade),  
21 000 m<sup>3</sup> lertager samt elvärmepump.

Eller ett system helt utan värmepump:

- 2 800 m<sup>2</sup> medeltemperatursolfångare, 53 000 m<sup>3</sup> lertager samt värmeförsörjning med golvvärme.

I rapporten "Ytjordvärme för gruppcentraler med grunda frusna lerlager" (MA31), analyseras ett kalkylerat energisystem för gruppcentraler som består av värmepump, ett grunt lager i lera och en markvärmekollektor. Lerlagret byggs genom att plöja ned 4 stycken plastslangar ovanför varandra, på ett djup ned till ca 3 m. Vid värmeuttaget under vintern fryser större delen av leran, vilket leder till ett mycket högt energiuttag per lagervolym ( $m^3$ ) och en låg kostnad för lagret när markförhållandena är gynnsamma. Energikollektorn av plastslang, läggs ovanpå lagret med ett tunnt skickt av jordtäckning. Denna tjänstgör som värmekälla vid återladdning av lagret. Värmepumpen krävs alltid vid urladdning då lagrets temperatur pendlar runt  $0\text{ }^\circ\text{C}$ .

Ekonomi för systemkonceptet beräknas och visar sig vara god vid jämförelse med dels mer vanliga lagersystem dels värmepumpssystem eller oljepannor. Det framhålls att ekonomin förbättras ytterligare om kylbehov föreligger under sommaren och det frysta lagret då kan utnyttjas för kyländamål.

### Lagring i torv

Resultat från det tidiga torvlagret i Härryda (4) är kraftigt försenade då skolan som värmeförsörjs brann ned 1984. Erfarenheter från tiden efter återuppbyggnaden, med ett ombyggt sol och värmepumpssystem, visar att förlusterna från torvlagret är mycket högre än förväntat. I slutet av sommaren är lagertemperaturen  $14\text{ }^\circ\text{C}$  som beräknats men under tiden februari-april är den så låg att värmepumpen får gå med reducerad effekt. Utvärderaren har inte djupare analyserat lagrets förluster men tror att dessa ökat pga konvektion i torvens vattenmassa med nedkylning som följd.

Ett nytt torvlager i Motala har projekterats, (MA27). Detta lager är tänkt att arbeta vid temperaturer runt  $0\text{ }^\circ\text{C}$  och vara igenfruset under en stor del av året varför värmepumpar alltid behövs för urladdning. Lagret skall aktivt laddas med värme från uteluften och passivt laddas med solvärme vilket är möjligt då temperaturen i lagret understiger omgivningens. En ansökan av experimentbyggnadslån är beviljad men projektet är lagt på is i väntan högre oljepris och därmed bättre lönsamhet.

Ett koncept kallat "system Backlund" har provats i full skala för radhus i Sveg (MA5 och MA34). Värmepumparna som är flera till antalet är små, där var och en endast försörjer två lägenheter. Slangar nedplöjda i en myr tjänstgör som säsongslager. Detta lager arbetar vid temperaturer ned mot  $0\text{ }^\circ\text{C}$  och återladdas dels aktivt av luftvärmekollektorer i form av slangar under takteget (benämnt klimatbur) och dels passivt av solen. Lagret urlagras med en värmepump nedgrävd i marken (benämnd jordvärmeugn), som värmer ventilationsluften, radiator- och varmvattnet. Konceptet är nytt men ger relativt lite ny information till området effektivare systemteknik

där förenkling och förbilligande av anläggningar istället eftersträvas.

#### 4.3.2 Borrhålslager i berg

Det ena av de två nya borrhålslagren är beläget i Upplands Väsby (14). Detta värmelager skall spara värme i ca 110'000 m<sup>2</sup> nybyggda kontorslokaler i GLG-center. Lagret skall sommartid laddas med spillvärme från kontorens kylmaskiner genom att dessas kondensorer avlämnar värmets till lagret via slangsystem med vanligt vatten. Vintertid skall lagret tömmas på värme med värmepump för uppvärmning av kontoren genom betongbjälklagen, sk Termo Deck. Systemkonceptet för berglagret i Upplands Väsby stämmer i stora delar överrens med tidigare byggda tex Finspång (9) och Grosvad (10) vilka är byggda helt kommersiellt. Utvärderingar av dessa lageranläggningar är dock BFR-finansierade, (MA32,MP7,MP11).

En avslutad förprojektering behandlar lågtemperaturlager med borrhål i berg i kombination med uteluftvärmepump för gruppcentral i Nacka (MA22). Systemprincipen är liknande de ovanstående men med den skillnaden att uteluft är värmekälla. I projektet har olika kombinationer av värmepump med och utan borrhålslager dimensionerats och kostnadsberäknats, lagret har här rollen som systemeffektiviserande enhet. Resultatet av kostnads kalkylen ger att säsongslager i den här typen av värmeproduktionssystem inte är ekonomiskt försvarbara, varför ytterligare arbete på projektet inte är aktuellt. Ett annat projekt av den här typen men som ändå byggts är Suncourt (11, MA13), vilket redan behandlats i PUL-gruppens arbete (MA41).

Det andra berglagret beläget i Stocksunds Torp (15) bygger på ett helt annat systemkoncept som mer liknar Luleålagrets (5). Här skall lagret arbeta helt utan värmepump med ett öppet system i borrhålen. Laddning sker på sommaren då fjärrvärmenätet har överkapacitet till låg värmekostnad. Urlagring sker utan värmepump till ca 400 nybyggda lägenheter vars temperaturkrav för uppvärmning är lågt. Inom projektet skall olika typer av borrhålsinklädnader i form av plast och gummikondomer/strumpor provas, för att på enklast och effektivast sätt hindra grundvattenströmning till och från borrhålen.

En forskartjänst inom området "värmelagring i berg" har avslutats i Högskolan i Luleå, (MA26). I detta arbete har ingått långtidsuppföljning av Luleålagret med systemutveckling och drifteffektivisering som främsta mål. Nya lagerkoncept med lågtempererad solvärme och naturvärme har bland annat studerats inom avdelningens långsiktiga kunskapsuppyggnad.

En tänkbar utvecklingslinje för borrhålslager är metodiken för att spräcka upp berget, den sk Hydrock-metoden.(MA35, MP1) Vinsterna med detta är att ett färre antal hål behövs då hydrauliskt uppspräckta sprickor leder vattnet mellan hålen. Metodiken är inte problemfri med tanke på ojämn flödesfördelning, grundvatteninläckning och igensättning av trånga passager, men forskning pågår.

#### **4.4 Kostnader**

Här redovisas dels de kostnader som BFR haft inom delområdet marklager under innevarande programperiod och dels de anläggningskostnader för marklager som idag anses som aktuella.

##### **4.4.1 Kostnader för BFR's forskning**

Ett stort antal BFR-projekt har dels avslutats, tabell 4.2, och dels påbörjats/pågått, tabell 4.3, under innevarande programperiod.

Summan av BFR-bidrag till projekt inom delområdet marklager uppgår till:

- Avslutade projekt ca 11,7 Miljoner kr (referens MA1-MA39).
- Pågående projekt ca 4,9 Miljoner kr (referens MP1-MP15).

Experimentbyggnadslån har beviljats till de tre senast byggda marklagren (tabell 4.1: 13-15), till ett belopp av ca 12 Miljoner kr.

##### **4.4.2 Anläggningskostnader för marklager**

Att på generell basis kunna bestämma eller prediktera anläggningskostnader för marklager är inte helt enkelt då lagren alltid är platsbyggda med skiftande förutsättningar både under som ovan marken. Utifrån de lager som byggts och från pilotförsök kan dock en bild av anläggningskostnaderna skapas och lägsta tänkbara kostnad (gränskostnaden) kan beräknas.

Nedan följer exempel på anläggningskostnader från de avrapporterade projekten.

PUL-gruppen; "Energilagring" (MA41) ger följande sammanställning över föregående programmperiod (kostnadsläge 1986):

Typ	Volym m3	Lagertemp oC	Anläggningskostnad	
			SEK/m3	SEK/kWh
Lager i jord *	100 000	4-16	8-12	0,7-1,1
Lager i jord *	100 000	10-50	8-12	0,2-0,3
Lager i berg	100 000	4-16	15-30	2,1-4,1
Lager i berg	200 000	20-50	25-40	1,3,2,2
Lager i berg	2 000 000	20-80	30-35	0,8-1,0

\*) lätt penetrerbar jord

Referens (MA37) visar beräkning:

Lager i lera	165 000	30-50	ca 20	(1988)
--------------	---------	-------	-------	--------

Referens (MA1) ger den uppräknade kostnaden från "sunclay-projektet":

Lager i lera	87 000	10-16	10,5	(1984)
--------------	--------	-------	------	--------

Referens (MA14) ger kostnaden från "Kullavik-projektet":

Lager i lera	8 100	10-55	49	(1985)
--------------	-------	-------	----	--------

Lagret innehåller två temperaturzoner med olika slangtätethet.

Referens (MA18) ger den beräknade kostnaden för "Söderköping":

Lager i lera	36 000	6-28	52	(1986)
--------------	--------	------	----	--------

Beräknat för dubbla u-rör i varje nedstick och inklusive kulvert mellan lager och värmecentral.

(MA31) ger beräknad kostnad för horrisontella kanaler i lera och i torv:

Horr. lera	22 700	ca 0-10	13,7	ca 0,3	(1987)
Horr. torv	30 000	ca 0-10	31	ca 0,6	(1987)

Beräknat för påfrysning på slangarna.

Referens (MA11) ger kostnaden från "Luleå-lagret"(1985):

Borrhål	120 000	10-80	55	verklig kostnad
-"-	-"-	-"-	37	omräknat och förenklat

Nedstick cc 4,0 m. Kostnaden inkluderar apparatrum med installationer.



(MA19) ger en utförlig beräkning av lägsta möjliga kostnader för lager i lera och borrhålslager:

Lera nedstick cc 2,0m	lågtemp	8-10	(1987)
Lera nedstick cc 1,15m	högtemp	22	-""-
Borrhål nedstick cc 3,5m	lågtemp	12	-""-
Borrhål nedstick cc 2,0m	högtemp	33	-""-

Dessa kostnadsdata för lager skall jämföras med försiktighet då de dels bygger på olika konstruktioner av lagren och dels innehåller olika delkostnader som tex kringutrustning, entreprenadpåslag och moms.

De lägsta beräknade kostnaderna i dagsläget ges av (MA31); horrisontella kanaler i lera och torv, och av (MA19); vertikala kanaler i lera och borrhål. Dessa nya kostnader skiljer sig dock inte nämnvärt från den sammanställning som gjordes av PUL-gruppen, varför man kan säga att kostnadsänkningen av marklager har motsvarat ökningen av entreprenadindex under programmeringsperioden.

#### 4.5 Slutsatser

Säsongslagring av värme i jord och berg har studerats i Sverige sedan början av 1980-talet. Systemvarianterna är många och ett värmelager kan utnyttjas för ett flertal syften. De lokala förhållandena, som bla bebyggelse, värmesystem och geologi, bestämmer förutsättningarna för att utnyttja ett värmelager och styr också de ekonomiska möjligheterna.

Kunskapsläget för lagring av värme i jord och berg är idag tillfredsställande, bla beroende på att ett antal fullskaleanläggningar uppförts i olika geologiska miljöer.

Den Svenska energiforskningen har lett till att svenskt teknikkunskande och produktutveckling inom marklagerområdet i många avseenden har stort försprång till utlandet. Detta kan ge exportmöjligheter för svensk industri, såväl konsulttjänster, anläggningskunskande som maskinell utrustning. En speciellt intressant exportmöjlighet kan vara totala systemlösningar där konsulter, tillverkare och entreprenörer tillsammans erbjuder kompletta anläggningar.

Vid en internationell jämförelse står sig resultaten av det svenska FoU-programmet mycket gott. Vi har inte bara en bredd som är större än i något annat land, vi har också ett bättre djup genom den mycket noggranna uppföljning som kan ske inom experimentbyggnadsprogrammet.

Energiverk och större fastighetsägare bör i högre grad beakta möjligheterna



och kommunerna anpassa energiplanerna efter de lokala naturliga resurserna. Miljöproblemen med de nya teknikerna är små och kan behärskas men de geotekniska begränsningarna och konsekvenserna måste nog beaktas.

De tekniska problemen med värmeuttag ur jord, berg och vatten behärskas till stora delar. Systemen kan dock totalt göras effektivare och mer ekonomiska. Värmekällorna bör utnyttjas bättre genom ny anläggningsteknik med specialmaskiner för kollektorer jord, berg och torv.

Fullskaleanläggningarna för värmelagring fungerar tillfredsställande och teori och praktik synes stämma för olika tekniklinjer. Nyckelfrågor är lagrets roll i värmeproduktionen vid utnyttjandet av olika värmekällor.

Det främsta syftet med säsongslagring av värme är att utjämna tillgång av värme under året och därigenom erhålla en lägre uppvärmningskostnad och minskade utsläpp av föroreningar. En kapitalisering av kostnaden för värmelagret bör därför kompenseras av lägre driftkostnader. Nyttan med ett värmelager kan bedömas genom att studera lagrets marginalkostnad jämfört med motsvarande värmeanläggning utan värmelager, (MA40). Härvid kan anges gränskostnader för lagret för olika utföranden av värmesystemet och alternativa energipriser. Kostnader för värmelager med dagens teknik ligger dock oftast över den nivå som kan tillåtas för att värmelager skall vara kommersiella. Anläggningskostnaderna för de i Sverige byggda marklagren varierar kraftigt, bla beroende på att de flesta lagren är experimentanläggningar. Detta innebär att kostnader för utveckling av ny teknik och bedömda risker belastar det enskilda projektet.

Om lagren kan tillgodoräknas andra fördelar förutom värmelagring, tex kyllagring eller miljöfördelar, ökar givetvis motiven för införande av tekniken.

## 4.6 Referenser

Tabell 4.2 Avslutade BFR-projekt inom delområdet energilagring i mark.

Ref nr	BFR-projekt-nummer	Förkortad projekttitel	Projektledare/ ansökare	Ev rapport
MA1	7914249	Lindälvsolan - Sunclay Mätning Utvärdering	G Hultmark Kungabacka Kommun	R84:1986
MA2	8002798	Termisk-tekniska egenskaper i lera vid värmelagring, Sunclay-projektet	KG Eriksson CTH-Geologi	EJ tryckt.
MA3	8006203	Lagring av solvärme i torvmosse för skola, Härryda, mätning, utvärdering	G Hultmark B Dahlgren AB	EJ tryckt.
MA4	8007311	Sunclay-projektet, Kungabacka. Värme- och apparattekknisk uppföljning	T Berntsson CTH-VoM	JVG 23
MA5	8100018	Sol och jordvärmeanläggning system Backlund för Sveg, mätning, utvärdering	I Holmlund I Holmlund AB	R108:1986
MA6	8101132	Värmelagring i lera, geoteknisk påverkan och värmeväxling	G Sällfors CTH-Geotekn	R23:1987
MA7	8106718	Värmeöverförande egenskaper i jord och berg	KG Eriksson CTH-Geologi	R104:1986
MA8	8114411	Lagring av spillvärme i lera i Upplands Väsby, förprojektering	L Engvall VIAK AB	R92:1986
MA9	8118022	Solvärme med säsongslagring i lera för bost. omr. i Kristianstad, förprojektering	L Husberger Kristianstads kommun	EJ tryckt
MA10	8207870	Värmelager i lera för blockcentral Karl- Staafsgatan, Göteborg, alternativstudier	R Buresten Bostads AB Poseidon	R89:1986
MA11	8203967	Borrhålsvärmelager vid LUTH, simulering och utvärdering av drift	B Nordell LUTH-Vattenteknik	D6:1987
MA12	8204538	Fövärmning av tilluft med solfångare och marklager, småhus i Västerås, proj,mät,utv.	L Danemo Bostadsstif Aroseken	R62:1987
MA13	8211192	Suncourt överglasad gård och borrhålsvärme lager för flerbost.hus i kv Höstvetet, Sthm	M Thor'en Stockholms kommun	R81:1986
MA14	8217637	Solvärmelagring med höga temperaturer i lera för radhus i Kullavik, mätning, utvärd	S Olsson Eksta bostadsstiftelse	R105:1986
MA15	8303897	Metod att driva ned värmeväxlarrör i lera	L Engvall VIAK AB	R92:1986
MA16	8306315	Värme- och vattenströmning till och från borrhålslayersystem	S Andersson AIB AB	R6:1988

Tabell 4.2 Forts.

Ref nr	BFR-projekt-nummer	Förkortad projekt-titel	Projekt-ledare/ ansökare	Ev rapport
MA17	8400531	Borrhålsvärmelager i berg vid Lulå Högskola värmeteknisk utvärdering	T Åbyhammar AIB AB	R80:1987
MA18	8404949	Värmelagring i lera med luftvärme för skola i Söderköping, förprojektering	B Rydell söderköpings kommun	SGI-V186
MA19	8405915	Teknikutveckling för värmelagring i jord, etapp II	B Bäckström CTH-Geologi	R33:1988
MA20	8410532	Bergundersökning för värmelager vid kv Rågaxet, Stockholm	H Stille KTH-Jord/Berg	R61:1987
MA21	8414650	Mät-undersökningsmetoder vid tillämpad markvärmeteknik, metodstudie	B Rydell SGI	SGI-V140
MA22	8501033	Borrhålsvärmelager i berg för gruppcentr i Nacka, förprojektering, system opt	H Hyden AB Nackahem	Ej tryckt.
MA23	8501719	Referensgrupp för värmelagring i mark	S Andersson AIB AB	Ej tryckt.
MA24	8505112	Smalslangsteknik för energilagring i lera, programanslag	H Eriksson SSES AB	Ej tryckt
MA25	8509030	Lokal spillvärmelagring i lera för fjärrabonnet/blockcentr.,system/kostnadsstudie	R Buresten Bostads AB Poseidon	R82:1987
MA26	8509790	Forskartjänst vid LUTH för värmelagring i berg 1985-88	B Nordell LUTH-Vattenteknik	Ej tryckt
MA27	8510229	Värmelagring i torv för flerlägenhetshus i Motala, förprojektering	B Rydell Bostadsstif. Platen	SGI-V182
MA28	8511752	Förutsättningar för introduktion av värmelager i jord vid gruppcentraler	B Rydell SGI	R44:1988
MA29	8600138	Solvärmelagring med höga temperaturer i lera, radhus Kullavik, långtidsuppföljning	I Franzen Eksta Bostadsstif.	R105:1986
MA30	8600740	Ökad vattenströmning i bergssprickor genom kemisk lakning i borrhålsvärmelager	B Nordell LUTH-Vattenteknik	D4:1988
MA31	8606743	Ytjordvärme för gruppcentraler med grunda frusna lerlager	P Margen Margen Consult AB	R56:1988
MA32	8703171	Undersökning av geologiska förutsättningar för värmemagasin vid GLG center, etapp VI	G Olsson Scandenergy	Ej tryckt

**Tabell 4.2** Forts.

Ref nr	BFR-projekt-nummer	Förkortad projekttitle	Projektledare/ ansökare	Ev rapport
MA33	8703432	Ramprogram för energigeoteknisk FoU vid SGI	B Rydell SGI	R47:1988
MA34	8100024	Sol-jordvärmeanläggning sytem Backlund för bostadsområde i Sveg, anläggningsrapport	R Zenkert Swenor Consulting AB	R3:1989
MA35	8101967	Hydrock - Pilotförsök för lagring av värme i uppspräckt berg	S-Å Larsson CTH-Geologi	Ej tryckt
MA36	8608630	Planering av demonstrationsanläggningar för lager i mark inom MOU BFR/STU/EMR	B Rydell SGI	SGI-V178
MA37	8700377	Värmeförsörjning i Sätunaområdet, Märsta, Sigtuna kommun	J Thorburn Sigtuna kommun	R53:1989
MA38	8712170	Ny markvärmeteknik för tät bebyggelse, etapp 1: inledande studie	J Sundberg SGI	?
MA39	8800427	Förutsättning för introduktion av värme-lager i jord vid gruppcentraler, förstudie	B Rydell SGI	?
MA40	8300743	Systemfrågor, Underlag för BFR's treårsplan 1987/88-89/90	E Abel CTH-Install tekn	G25:1986
MA41	8500818	Energilagring, Underlag för BFR's treårsplan 1987/88-89/90	Arne Boysen Hidemark & Danielsson	G26:1986

R47:1988 - BFR's rapportserie

D4:1988 - BFR's dokumentserie

SGI-V186 - SGI's serie Varia

JVG 23 - Jordvärmegruppen, Chalmers

Tabell 4.3 Pågående BFR-projekt inom delområdet energilagring i mark.

Ref nr	BFR-projekt-nummer	Förkortad projektitel	Projektledare/ ansökare	Ev delrapport
MP1	8309018	Hydrock - värmelager i uppspräckt berg, pilotförsök vid Rixö, etapp 2a	B Mchugh CTH-Energitek	
MP2	8402562	Värmelagring i lera, fältförsök med storytiga värmeväxlare av sanddräntyp	G Sällfors CTH-Geotekn	Exam. arb G83/1
MP3	8604519	Uteluftvärmepump med vindkonvektorer och jordvärmelager i Alingsås, förstudie	T Jilar Scandiaconsult AB	
MP4	8605958	Värmelager i lera i Matfors samt jämförelse med uteluft-och ytjord-VP, förstudie	B Modin Sundsvalls kommun	
MP5	8606657	Energilagring i sulfidjord, laboratoriebestämningar av geotekniska data	L Eriksson LUTH-	
MP6	8608055	Uteluftvärmepump med värmelagring i lera för skola i Söderköping, mätn.,utvärdering	B Carlsson SGI	
MP7	8702493	Utvärdering av Grosvadanläggningen i Finspång	H Wallentun Studsvik AB	
MP8	8704992	Mätmetod för bestämning av termiska egenskaper in situ i berg	P Wilén CTH-Geologi	
MP9	8800432	Basverksamhet inom markvärmeområdet	J Sundberg SGI	
MP10	8801067	Forskartjänst vid LUTH, Värmelagring i berg	B Nordell LUTH	
MP11	8804674	Mätning och utvärdering av GLG-center, Upplands Väsby	P Wickman KTH-Mätcentralen	
MP12	8806850	Teknikupphandling av värmelager, del 1: Inventering av beställare	J Sundberg SGI	
MP13	8807927	Styrgruppsmedel markvärmeteknik (för SGI)	M Larsson Vattenfall-Älvkarlebylab.	
MP14	8808769	Högtemperaturlager med vertikala slangar i jord	J Sundberg SGI	
MP15	8808795	Värmeväxlare för markvärmelager	C Magnusson SGI	

## 5. AKVIFERLAGER

### 5.1 Bakgrund

En akvifer består av jord eller poröst berg vars hålrum är fyllt med fritt vatten. För att vara användbart för värmelagring skall vattnet vara rörligt i marken. Akviferlager karaktäriseras av vattnets transportegenskaper och har därför stora likheter med vattenlager (kap 3). En stor skillnad är emellertid att lagringsvolymen inte behöver anläggas artificiellt. Kostnaderna begränsas alltså till undersökning av marken och till installationer för cirkulation av grundvattnet. Principer och systemlösningar för lagren beskrivs i kapitel 5.7. Akviferens värmekapacitet är ca  $0,8 \text{ kWh/m}^3, ^\circ\text{C}$ .

### 5.2 Tidigare genomförd forskning

Föregående utvärderingsgrupp har 1987 i rapporten från anslag 850088-7 sammanställt utvecklingsläget och framtida FoU-behov för värmelagring i akviferer. De sammanfattningar och riktlinjer som ges är fortfarande aktuella trots att endast ett fåtal anläggningsprojekt då hade slutrapporterats. Bedömningen av potentialen för akviferlagring bör dock justeras ned, se 5.3.

Erfarenheter från anläggningarna i Klippan, Kristian stad och Falun redovisas liksom inledande erfarenheter från Solnalagret.

Potentialen för akviferlager bedömdes till:

- Lågtemperaturlager	ca 2 TWh
- Kyl/värmelager	ca 2 TWh
- Högtemperaturlager	låg

Utvecklingsarbetet föreslogs få följande inriktning:

- De tekniska problemen är väl identifierade sedan lång tid t ex vad avser dimensionering och igen sättning av brunnar m m. Kunskaperna skall göras tillgängliga för projektörer och byggare.
- Uppföljning av byggda anläggningar.
- Komplettering av byggda anläggningar.
- Styrmedel och genomförandefrågor studeras.
- Lågtemperaturlager prioriteras före högtemperaturlager.



### 5.3 Forskning efter utvärdering 1987

I tabell 5.1 har avslutade akviferprojekt förtecknats. I tabell 5.2 anges pågående projekt och i tabell 5.3 beviljade experimentsbyggnadslån. Listorna är inte fullständiga. Trots betydande arbete centralt i arbetsgruppen har det inte varit möjligt att kartlägga projekten och deras status på ett heltäckande sätt. Detta pekar på brister i BFR s annars så väl utbyggda distribution av forskningsresultaten. Råmaterialet pekar på en stor andel icke slutförda projekt, varav några är mycket gamla. Såväl forskarna, deras administrerande organ som BFR tycks ha svårigheter med administrationen. Ett bra sätt att snabba på rapporteringen är att innehålla en del av anslaget tills dess projektet slutredovisats. BFR bör i större utsträckning efterfråga rapporter. "Omöjliga" projekt bör i större utsträckning avslås eller avbrytas. Anmärkningsvärt är att varken utvärderingen av lagren i Vännäs eller i Klippan ännu rapporterats. Utvärderingen av Falun-projektet försenades av olika skäl ca 2 år.

**Tabell 5.1** Avslutade akviferprojekt 1987 - 1989

Proj nr	Forskare/objekt	tkr	Rapport	Utv <sup>1)</sup>
810238-4	C Gedda/Tärnan	222	Ej tryckt	U
820274-2	G Gustafsson/IEA	122	? <sup>2)</sup>	?
820702-5	S Johansson/Teori o Labf	464	D4-1989	G
831082-4	U Eckefeldt/Klippan	150	Ej tryckt	M
850563-8	S Johansson/SAS	200	KTH	M
850908-8	Follin, Odeblad/Vännäs	?	R69:1987	D
860785-1	O Andersson /IEA	146	? <sup>2)</sup>	G/M
861029-3	E Backman/Rotebro	290	Ej tryckt	F
871239-3	L Kronqvist/Kristian- stad	195	R6-1989	U
851005-3	O Andersson/Ängelholm	350	R43-1988	F

1) Vid utvärdering indelas projekten i: Grundforskning, Demonstrationsanläggning, Nya uppslag, Undersöknings metoder, Modell- och systemstudier, Förstudier och Utvärdering.

2) IEA-rapporter är ej tillgängliga.

**Tabell 5.2** Pågående akviferprojekt

Proj nr	Forskare/objekt	tkr	Rapport	Utv 1)
820350-0	G Gustafsson/ Adj Professor	150	BFR	G
821617-2	M Bernard/ SPEOS Lausanne	666	? <sup>2)</sup>	D
831525-5	L Lemmeke/Klippan	835	Rapporteras 1989-06-30	U
841229-6	G Gustafsson/Falun	677	R30-1989	D/U
860609-3	Eriksson, Johansson, Melin/Isakvifer	387	Del 1, ej tryckt	Ny
861047-4	T Åbyhammar/SAS	575	Del 1 inl. 1990-03-30	U
861049-4	S Johansson/SAS	360	Del 1 inl. 1989-06-30	U
870196-0	O Andersson/Hydro- kemi, IEA	1000		G
880132-8	T Holm/Undersökn m	126		Und
880673-8	T Hallén/Triangeln	278		U

1) Vid utvärdering indelas projekten i: Grundforskning, Demonstrationsanläggning, Nya uppslag, Undersöknings metoder, Modell- och systemstudier, Förstudier och Utvärdering.

2) IEA-rapporter är ej tillgängliga.

**Tabell 5.3** Beviljade experimentbyggnadslån för akviferlager

Proj nr	Forskare/objekt	tkr	Slutdatum	Anm
831468-3	Hedemora	8 000	871231	Ej påbörjat
840676-3	Falun	3 340	861231	
850551-6	Sjöbo	1 003	881231	Ej påbörjat
851157-1	Solna	ca 8 000	?	Utökad
?	Triangeln, Malmö	4 400	911231	

Projekten kan fördelas på följande rubriker:

	Antal	Mkr
Grundforskning	2	1,5 (+1)
Demonstrationsanläggning	1	0,7
Nya uppslag	1	0,4
Undersökningsmetoder	1	0,1
Modell- och systemstudier	2	0,35
Förstudier	6	1
Utvärdering	8	2,5
Experimentsbyggnadslån som lett till byggande	3	10,6
Totalt	21	17,1

Under föregående utvärderingsperiod ingångsattes fyra fullskaleprojekt, några av mycket stort demonstrationsvärde. Man kunde förvänta att ett flertal projekt där efter inlett. Så är emellertid inte fallet. Endast ett fåtal projekt har påbörjats, t ex:

Kv Triangeln, Malmö  
Ekplantan, Sollentuna

värme och kyla  
kyla

Bland planerade projekt kan nämnas:

Eds Vik, Sollentuna  
Norrviksstrand, Sollentuna

värme och kyla  
värme och kyla

## 5.4 Utvärdering av genomförd forskning 1987-89

I rapporten från den tidigare PUL-utvärderingsgruppen (850088-7) daterad i augusti 1987 knyts stora förhoppningar till de 4 projekt som då nyligen uppförts och 5 st planerade anläggningar. Det kan därför vara på sin plats att inledningsvis behandla dessa objekt.

1. **I Klippan** anlades ett cirkulationslager av pulserande typ för värmeproduktion. Efter problem med infiltration i brunnarna har systemet ändrats till ett renodlat grundvattenvärmsystem. Utvärderingsrapporten är ej klar.
2. **I Kristianstad** anlades 1984 ett cirkulationslager av pulserande typ och för kombinerad värme- och kylproduktion. Akviferen består av sandsten och glaukonitsand på ett djup av 90-120 m. Avståndet mellan de 2 brunnarna är 70 m. Uppföljningsprojektet redovisas i R6:1989.

Anläggningen har en värmeeffekt av 800 kW från 2 st värmepumpar. Kyleffekten är högst 800 kW och vanligen ca 400 kW. Den varma brunnens temperatur är 15-30 °C och den kalla 10-15 °C.

Anläggningen fungerar väl men produktionen av värme och kyla har förändrats så att systemet nu befinner sig i obalans. Under utvärderingsperioden var netto tillskottet av värme till akviferen i genomsnitt 1,4 GWh/år. För att åter kunna kyla produktionsprocesserna direkt utan kylmaskin planeras åtgärder för att bortleda värme. Inga störningar i grundvattencirkulationen har rapporterats.

3. **I Falun** har ett utskiftningslager av genomströmningstyp anlagts för värmeproduktion med hjälp av en värmepump om 460 kW värmeeffekt.

Uppföljningsprogrammet skulle pågå till 1987. Rapporten R30-1989 avser utvärderingsprojektet men innehåller ingen utvärdering. En senare hittills otryckt rapport omfattar utvärdering. Anläggningen tillgodoser värmebehovet väl. Inslaget av lagring contra grundvattenvärme är oklart.

4. I **Solna** har ett cirkulationslager av pulserande typ byggts som enda kyl- och värmekälla för SAS nyuppförda huvudkontor om 64 000 m<sup>2</sup>. Anläggningen har utnyttjats sedan vintern 1987 för olika former av provisorisk drift under byggtiden, som beräknas på gå till sommaren 1989. Akviferen består av ca 1 Mm<sup>3</sup> isälvsmaterial där 5 brunnar anlagts. I det av BFR stödda experimentbyggnadsprojektet ingår också den energicentral som ombesörjer värmeväxling, värmepumpning, korttidslagring i ståltankar, varmvattenberedning samt cirkulation av byggnadens distributionssystem. Eftersom kylning sker genom direkt värmeväxling med grundvattnet förväntas andelen tillförd elenergi bli låg för anläggningen.

De erfarenheter, som hittills erhållits, är att akviferdelen fungerar mycket bra och klarar erforderliga kapaciteter. Inledningsvis sattes en brunn igen men när akviferen homogeniserats har samtliga brunnar återfått ursprunglig kapacitet. Grundvattencirkulationen fungerar utmärkt och igensättnings tendenser på värmeväxlare m m har ej kunnat iakttas.

Byggnadens behov av värme var emellertid dubbelt så stort som planerat. Den erforderliga kyleffekten är ca hälften av den planerade. Samordning av bygg, el och VVS i byggprojektet var mycket summarisk, varför de verkliga behoven kom att avvika kraftigt från specifikationen för energisystemet.

Kylfunktionerna har från början fungerat mycket bra och klarar väsentligt högre kapaciteter än vad som krävs. En tredje värmepump togs i drift i februari 1989, varvid flertalet driftproblem upphörde. Mätanläggningen fungerar hjälpligt från 1989-04-01. De producerade energimängderna har överträffat de planerade.

De anläggningar, som planerades 1987, var Hedemora, Sjöbo, Högsby, Rotebro, Triangeln (Malmö), Landskrona och Ängelholm.

**Hedemora** har ej kommit till utförande på grund av svag ekonomi.

**Sjöbo** har ej genomförts på grund av svag ekonomi.

**Högsby**projektet har ej förts vidare på grund av svag ekonomi.



**Rotebro** planerades som ett integrerat system där 15 GWh industriellt spillvärme lagrades tillsammans med "kontorskyla" för värmeproduktion i Rotebro fjärrvärmeverk (861029-3). Kommunen är ej intresserad av värmepumpinvesteringar varför projektet fortsätter som ett 6 GWh kyl/värmelager för kontorskomplexet Norrviksstrand. Ansökan om vattendom har inlämnats men stött på stort motstånd från en granne.

**Triangelnprojektet** i Malmö är under uppförande som ett kombinerat kyl/värmelager.

**Ängelholmsplaneringen** stoppades sedan provborrningar (R43:1988) givit negativa resultat.

Av ovanstående kan man dra slutsatsen att det är många faktorer som måste falla på plats för att ett akviferprojekt skall realiseras.

Av anslagen har ca 60 % använts för experimentbyggnadslån. Detta är en rimlig relation också i framtiden. Av övriga medel har ca hälften förbrukats vid förstudier för och uppföljning av låneobjekten. Med hänsyn till de många svårigheter som trots förstudierna uppstått i låneprojekten är andelen inte för stor. Slående är att inget experimentbyggnadslån rapporterats och av övriga projekt har avrapportering skett för ca 2 Mkr av de totalt beviljade 6,5 Mkr.

Föregående utvärderingsgrupp slog fast att de tekniska förutsättningarna för akviferlagring sedan lång tid är väl identifierade. Trots detta har 1 Mkr anslagits för grundforskning för högttemperaturlagring och vattenkemi. Potentialen för högttemperaturlagring i Sverige är enligt föregående utvärdering liten. Orsaken är att lämpliga akviferer främst finns i delar av SV Skåne. Den nuvarande utvärderingsgruppen ansluter sig till de tidigare framförda riktlinjerna.

De vattenkemiska frågeställningarna är många gånger avgörande för ett akviferlagringsprojekt. Dessa problem är emellertid på intet sätt nya, en betydande forskning har bedrivits inom området i minst 150 år. Trots detta uppträder kemiskt betingade störningar i nästa all vattenhantering i ett modernt samhälle. Det är knappast troligt att de små forskningsmedel som kan ställas till förfogande inom värmelagringsområdet kan förändra denna naturlagsbetingade situation. Insatser som däremot kan ge effekt är att överföra befintlig kunskap till värme lagringsområdet. Detta är dock förenat med betydande svårigheter eftersom de berörda som regel inte har er forderliga grundkunskaper.

Forskarnas förmåga att rapportera tidigare beviljade projekt måste beaktas

vid ansökan om nya anslag. Man skall dock inte generellt öka kraven på nya forskare. Dels behöver den lilla kretsen av akviferforskare utvidgas och dels har det ett egenvärde att BFR utan formella krav på forskaren kan få nya uppslag belysta.

## **5.5 Framtida förutsättningar för akviferlagring**

Lagringstekniken i allmänhet brukar tillmätas stor potential i samband med planering av forskning. Så har det varit i mer än 10 år. Utfallet är emellertid magert. För akviferlager kan orsaken vara att inga färdiga koncept eller demonstrationsanläggningar fanns före oljeprissänkningen i mitten av 80-talet. Trots de nya konkurrensförhållandena planeras flera projekt både med och utan BFR-stöd. Tekniken har alltså redan efter ett fåtal anläggningar viss självständig livskraft. Främst är det kombinerade värme/kyllager eller renodlade kyllager som planeras.

Tillämpningarna styrs mot lagringskapaciteter på någon GWh. Större lager kräver flera  $Mm^3$  akvifervolym. Samtidig förekomst av akvifer och behov blir vid ökade storlekar alltmer osannolik. Anläggningar med kapaciteter under 0,5 GWh kommer att belastas ekonomiskt av höga markundersöknings- och projekteringskostnader eftersom tekniken är så platsspecifik.

Med ett antagande om att framtida oljepriser realt sett kommer att vara 100-200 % av 1988 års pris blir slutsatsen att akviferlager enbart för värmeproduktion blir marginella företeelser starkt beroende av lokala förutsättningar och med låg upprepningsfrekvens.

För kombinerad värme/kyllagerproduktion eller enbart kylproduktion föreligger i dag en ekonomisk drivkraft. Efter ytterligare några demonstrationsprojekt kommer de systemtekniska lösningarna att konvergera och en viss upprepningsfrekvens kan nås.

**Tabell 5.4** Bedömd potential för akviferlager

	(1987)	1989
Värmeproduktion:		
- lågtemperatur	(2-3)	<0,1
- högtemperatur	(låg)	låg
Kyla eller kombinerad värme- och kylproduktion	(1-2)	0,3
Summa	(4 TWh)	0,4 TWh

I tabell 5.4 anges den bedömda potentialen för akviferlager i Sverige. Uppgiften för kyla och kombinerad värme/kyla baseras på följande beräkning:

	GWh
50 anläggningar om ca 0,5 GWh	25
100 anläggningar om ca 2 GWh	200
5-10 anläggningar om ca 10 GWh	75
Summa	300 GWh

Den nu bedömda potentialen är alltså 1/10 av den tidigare angivna. Denna minskning är inte föranledd av en ändrad syn på de tekniska möjligheterna utan ett uttryck för en mera realistisk bedömning av hur ofta geologiska förutsättningar och värmetekniska behov kan sammanfalla. De återstående ca 150 anläggningarna motiverar väl fortsatt FoU-insats eftersom de ekonomiska förutsättningarna är ovanligt goda för denna lagertyp.

Arbetet under den kommande forskningsperioden bör ha följande målsättningar:

- att utöka antalet forskare inom området
- att främja tillkomsten av flera bra demonstrationsprojekt.

## 5.6 Anläggningskostnader för akviferlager

I kapitel 3.3.1 anges typiska kostnader för vattenlager som 3 konstanter A, B och C till följande formel:

$$\text{Kostnad} = A + BV + CW$$

där

$V$  = lagringsvolym ( $\text{m}^3$ )

$W$  = dimensionerande vattenflöde ( $\text{m}^3/\text{h}$ )

För akviferlager kan följande intervall för konstanterna anges:

A: 0,2-0,5 Miljoner kr (fast kostnad)

B: 0,5-2 kr/ $\text{m}^3$  (volym)

C: 400-900 kr h/ $\text{m}^3$  (flöde)

A svarar mot kapacitetsoberoende kostnader. B utgörs av de volymsberoende markundersökningskostnaderna. C baseras på rörliga kostnader för brunnar, ledningar och pumpar. A och C är i nivå med vattenlagren men B är ca 1/100 av vad som anges för vattenlagren.

Exempel på storlek och kostnad:

Ett lågtemperurlager för 1 GWh med ett temperatursving av 8 grader, värmekapacitivet 0,8kWh/ $\text{m}^3$  och en volymverkningsgrad av 0,45 kräver en volym av:

$$1\,000\,000 / (8 * 0,8 * 0,75) = 210\,000 \text{ m}^3$$

Utsträckning vid djupet 10 m:

$$100 * 210 * 10 \text{ m} = 210\,000 \text{ m}^3$$

Kostnaden blir enligt ovan:

	lägst	högst
A	200 000	500 000
B	105 000	420 000
C(80 m <sup>3</sup> /h)	32 000	72 000
Summa	340 000 kr	990 000 kr
	0,34 kr/kWh	0,99 kr/kWh

Ovanstående kostnader avser markanläggningar, brunnar, ledningar och pumpar. För att kunna utnyttja lagret krävs dessutom värmeväxlare, värmepumpar och distributionsystem i byggnaden.

## 5.7 Principer och systemlösningar för akviferer

### 5.7.1 Karakterisering av akviferlager

En akvifer utgörs av jord eller poröst berg, vars hålrum är fyllt med vatten. Ordet akvifer innehåller latinets ferro = bärare och kan stavas aquifer eller försvenskat akvifer. Denna senare stavning är i dag helt dominerande och bör enligt Svenska Språknämnden behållas.

Vattnet i akviferen måste vara tämligen rörligt för att vara av intresse för värmelagring enligt akvifer principen. Detta innebär att kornstorleken i jord minst måste motsvara sand. Vattnet måste också distribueras tämligen homogent i akviferen. En krosszon i berg kan således uppfylla kraven, medan sprickigt berg inte kan det.

Värmelagringen äger rum både i vattnet och i det fasta materialet. Akviferens värmekapacitet är beroende av porositeten men anges vanligen till 0,8 kWh/m<sup>3</sup> °C. Vattnets rörelse utnyttjas för konvektiv transport av värme såväl till och från som i akviferen. Vatten är genom sin höga värmekapacitet (1,16 kWh/m<sup>3</sup>) och goda värmeöverföringsegenskaper mycket väl lämpat för denna transport. Inom akviferens korn sker värmetransporten genom ledning. Vanligen är kornen små varför man kan bortse från demparaturgradienter i kornen.

När man betraktar en vertikal profil genom en akvifer kommer vatten med olika temperatur och densitet att sträva efter hydraulisk jämvikt. Detta innebär att ett lättare vatten strävar uppåt om det finns ett tyngre vatten ovanför. Gradienten från denna egenkonvektion är mycket liten vid vattentemperaturer under 10 °C. Vid högre temperaturer tilltar den egenkonvektiva gradienten, vilket leder till att vattnet kan skiktas i akviferen

också vid små temperaturskillnader.

En grundläggande fråga vid utnyttjande av akvifer lager är huruvida en termisk skiktning uppstår eller ej. En påtvingad strömning av vatten genom akviferen resulterar i en hydraulisk gradient mellan infiltrationspunkt och uttagspunkt. Denna gradient är större än den egenkonvektiva om akviferens transmissivitet är låg eller om vattenhastigheten är stor såsom i närheten av brunnar. Den fysikaliska storhet som har störst temperaturberoende är vattnets viskositet. Vid låga temperaturer stiger denna kraftigt. Detta resulterar i att ett kallare vatten efter en eventuell skiktning blir relativt trögrörligt.

Av ovanstående framgår att en akvifer nästan uteslutande karaktäriseras av transportförhållandena för vattnet. Jämfört med värmelager, där värmen skall transporteras långa sträckor genom ledning, har akviferlagret en mycket god effektkaraktäristik, vilken närmast kan liknas vid lager av typen tankar och bergum.

Kemisk förändringar i vattnet kan förändra transportmöjligheterna. Utfällningar kan hindra vattnets strömning i brunnar och värmeväxlare. De vanligaste utfällningsmekanismerna kan inordnas i 3 grupper:

- Syresättning av tidigare syrefattigt vatten leder till oxidation och utfällning av främst järn och mangan, ofta med hjälp av vissa bakterier. En flockig hydroxidfällning uppstår, vilken effektivt kan sätta igen t ex brunnsfilter i infiltrationsbrunnar. Detta måste beaktas vid alla syrefattiga samt järn- och manganhaltiga vatten.
- Höjning av temperatur och sänkning av tryck medför att koldioxid avgår gasformigt från vattnet. Härigenom minskas vattnets bikarbonathalt och därmed minskas lösligheten för de s k hårdhetsbildarna, främst kalcium och magnesium. Beaktas vid temperaturer över 10 °C.
- Vid högre temperaturer löser vatten betydande mängder kiseldioxid m fl ämnen ur marken. När temperaturen på ett sådant vatten sänkts faller kiseldioxid ut. Beaktas vid temperaturer över 50 °C.

Korrosion är mera sällan ett problem men kan uppstå vid mjuka vatten, sulfidhaltiga vatten och vid högre temperaturer.

Vid värmelagring i akviferer åsyftas vanligen naturliga akviferer. I Sverige utgörs sådana av isälvsavlagringar, främst långsträckta "grusåsar", samt av



porösa sedimentbergarter i Skåne och ytterligare några områden.

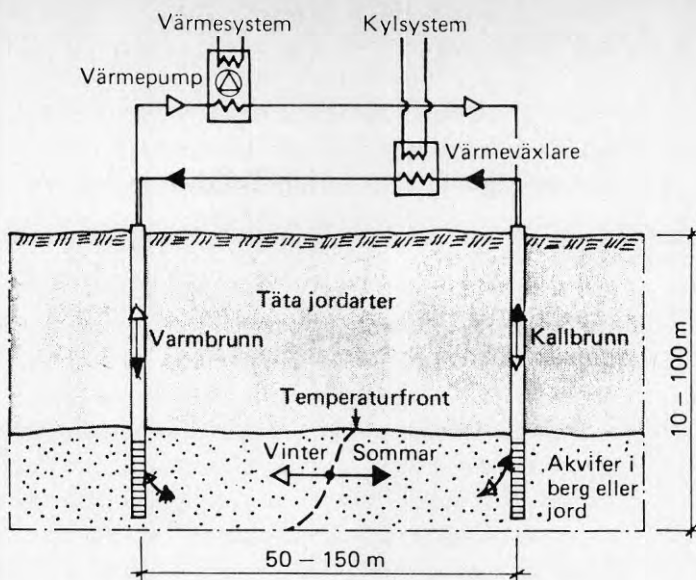
När en naturlig akvifer utnyttjas begränsas anläggningskostnaderna till anordningar för uttag, transport, värmewäxling och infiltration av grundvatten. Åtgärder för isolering eller avgränsning av akviferen övervägs sällan. De hydrogeologiska undersökningarna måste som regel vara relativt omfattande. Orsaken är att man måste konstatera att en viss markvolym, ofta i storleksordningen 1 Mm<sup>3</sup>, har erforderliga hydrauliska och kemiska egenskaper. Jämför med en geoteknisk undersökning där jordlagrens mekaniska egenskaper i ett begränsat antal pålningspunkter kan ge erforderlig information. Bristen på heltäckande information om akviferens egenskaper har alltid och kommer alltid att medföra svårigheter och risker speciellt vid utnyttjande av inhomogena akviferer.

### 5.7.2 Principer och systemlösningar

Den utnyttjningsbara delen av en porös formation begränsas till de delar som ligger under grundvattenytan. Täckande jordlager har en isolerande och avskärmande effekt. Det är fördelaktigt med några meter relativt tät jordart ovanför värmelagret.

- A. Lager kan arrangeras som ett **genomströmningslager**. Detta innebär att vattnet alltid strömmar i samma riktning. Funktionen blir då att tidsfördröja den värmepuls som exempelvis sommartid leds ned i infiltrationsbrunnen.

Genomströmningsprincipen kräver att tidpunkter för laddning och uttag liksom kapaciteter kan prognosticeras tämligen väl som t ex vid regelbundna årtidscykler. En fördel är den enkla uppbyggnaden. En nackdel är att värmepulsen blir kraftigt utslätad, dvs temperaturverkningsgraden är låg. Detta gäller speciellt om akviferens aktiva del är inhomogen.



**Figur 5.1** Cirkulationslager av pulserande typ

I ett **pulserande lager** vänds vattnets strömningsriktning vid laddning och uttag. Detta kräver att pumpsystemet kan reverseras, vilket medför en mera komplicerad uppbyggnad av pumpar, rör och ventiler. Lagringen utnyttjar inte större volym än vad som motsvaras av det momentana energiinnehållet. Detta begränsar värmeförlusterna. Vidare finns alltid kallt respektive varmt vatten vid respektive brunn, vilket möjliggör en snabb omställning mellan laddning och uttag med full kapacitet. Lagrets temperaturverkningsgrad och energiverkningsgrad kommer att vara högre än genomströmningslagrets.

- B. Lagren kan också indelas efter principerna för vattnets strömning genom akviferen.

#### **Cirkulationslager:**

Att lagret är ett cirkulationslager innebär att uttaget vatten hela tiden återförs till akviferen. Systemet är däremot inte slutet, eftersom ett utbyte äger rum med omgivande atmosfär och mark.

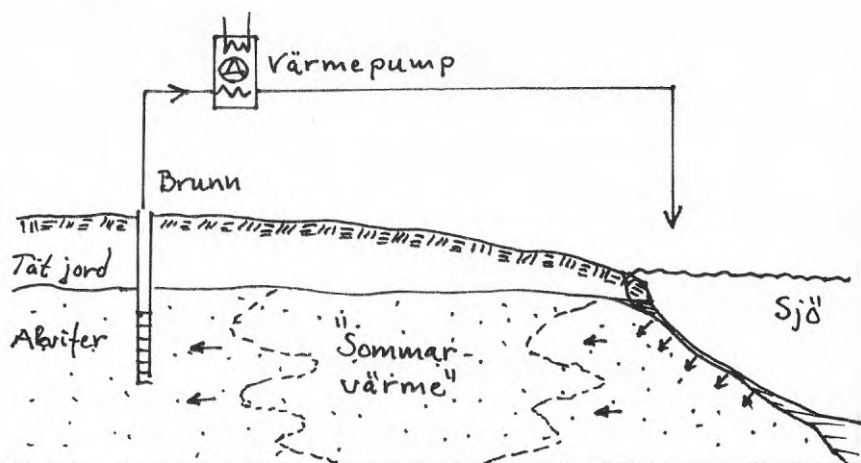
## Utskiftningslager:

Vid stora distributionsavstånd eller när infiltration försvåras av utfällningar etc kan det bli aktuellt att det vatten som utnyttjats i energianläggningen leds bort som ytvatten. Om vattnet inte återleds till akviferen ersätts vattnet med annat vatten och man kan tala om ett utskiftningslager.

Vattnet kan ersättas genom **konstgjord infiltration** t ex av ett ytvatten med önskad temperatur.

Vid uttag av vatten utan aktiv tillförsel av ersättningsvatten kommer i första hand den naturliga bortförsele av bildat grundvatten att avta. I andra hand kommer ytvatten i omgivningen att strömma mot området. Man talar då om **inducerad infiltration**. Vid inducerad infiltration tillförs vanligen ett ytvatten som innehåller mera syreförbrukande substans än syre. Detta leder till syrefria förhållanden i delar av akviferen och en successiv försämring av cirkulationsmöjligheterna kan befaras

Båda typerna av utskiftningslager med konstgjord eller inducerad infiltration kan användas både som genomströmningslager och som ett pulserande lager. Genomströmningsprincipen är emellertid mest näralliggande för denna lagertyp. Utskiftningslagren kan anläggas till låga kostnader. Prestanda karakteriseras av låg temperaturverkningsgrad och ett betydande om världsberoende vid laddning av lagret.



Figur 5.2 Utskiftningslager med inducerad infiltration.

### **Magasinstömningslager:**

Om varken det uttagna grundvattnet eller annat vatten tillförs akviferen vid uttag sänks nivån periodvis i magasinet. Återfyllning av magasinet sker också periodvis. Denna kan vara naturlig vid höga vattenstånd i akviferens omgivning eller konstgjord. Denna typ kan t ex vara aktuell vid lagring av kyla om vårens smältvatten fyller en avsänkt akvifer eller vid lagring av värme genom att ytvatten sommartid tillförs den avsänkta akviferen.

Dessa system blir vanligen en kombination av utskiftningslager och magasinstömningslager, eftersom förhållandena inte är renodlade i naturliga formationer. De kan utnyttjas som pulserande lager eller som genom strömningslager, medan den pulserande typen är mest näraliggande

Endast lågtemperaturutnyttjande kan bli aktuellt. Lagringskapaciteten blir låg, eftersom det krävs att flera porvolym vatten passerar genom ett lageravsnitt innan detta antagit det tillförda vattnets temperatur. Det tillförda vattnet måste lagras i akviferen utanför värmelagringsområdet, vilket tar större volym i anspråk än det aktiva värmelagret.

Om man vid en teknisk tillämpning helt eller delvis utnyttjar magasinstömning uppstår onaturliga förändringar av grundvattennivån. Risken för skador genom sättningar i marken ökar avsevärt jämfört med andra alternativ.

- C. Andra indelningsgrunder för akviferlager är arbetstemperaturen och djupet under markytan.

### **Hög- och lågtemperaturlager:**

Lagringstemperaturen i en akvifer begränsas nedåt av frysning och uppåt av koktemperaturen vid aktuellt tryck, dvs lager i djupa akviferer kan arbeta med temperaturer över 100 °C. Vad som är hög respektive låg temperatur kan ur förbrukningssynpunkt definieras så att ett högttemperaturlager levererar värme som kan utnyttjas direkt utan uppgradering i t ex en värmepump. På samma sätt kan man för kyländamål definiera ett lågtemperaturlager så att det kan leverera kyla utan utnyttjande av kylmaskin.

Ovanstående indelning är av stor ekonomisk betydelse men beskriver inte lagerteknikens begränsningar.

Lagrets funktion är beroende av att omfattande utfällningar ur vattnet inte äger rum i anläggningarna. Temperaturen påverkar lösligheten av kalcium och magnesium så att dessa fälls ut vid temperaturhöjning. För kiseldioxid m fl ämnen gäller det motsatta förhållandet. Eftersom lagringstekniken bygger på att vattnet skall vara i kontakt med lagrets mineraler både i varmt och kallt tillstånd kan man inte varaktigt rena vattnet från potentiellt utfällningsbar substans.

En vattenkemisk/anläggningsteknisk definition på ett lågtemperaturlager blir då att lagrets arbetstemperatur understiger den nivå där kontinuerlig vattenbehandling krävs. En anläggning för utfällning av dessa ämnen är dyrbar i anskaffning och drift och förändrar anläggningens karaktär från en värmeteknisk installation till en kemisk fabrik.

#### **Ytliga och djupa akviferer:**

Den mest påtagliga skillnaden mellan ytliga och djupa akviferer är det statiska trycket. Som nämnts tidigare kan trycksänkningar skapa utfällningsproblem. Geologiskt är tillkomstsättet helt olika, vilket bl a medför att djupare akviferer vanligen är mer homogena än de ytliga.

Riktigt djupa akviferer har en så hög naturlig temperatur att ett lågtemperaturutnyttjande inte blir aktuellt p g a höga halter lösta och utfällningsbara ämnen.

#### **Isakviferlager:**

För att erhålla större lagringskapacitet och för att bli oberoende av vattnets hydraulik och kemi har viss forskning bedrivits på s k isakviferlager. Tanken är att värmeutbytet sker genom vertikala rör som drivs ned i akvifermaterialet. I rören cirkulerar en frysskyddad vätska så att vattnet i akviferen kan kylas till frysning.

I och med att vattnet fryser upphör emellertid marken att vara en akvifer, dvs en bärare av vatten. Värmen transporteras inte genom hydraulisk transport av vattnet utan genom termisk ledning i det stationära materialet. Vid upptining sker värmetransporten i den upptinade akviferen men utan hydraulisk gradient. Eftersom den

egenkonvektiva cirkulationen i närheten av vattnets densitetsmaximum vid +4 °C är obetydlig måste värmetransporten åter främst ske genom termisk ledning. Vattnets ledningsförmåga är sämre än isens varför lagrets värmeförsörjning kommer att kräva relativt stora temperaturdifferenser.

Värmetekniskt tillhör alltså isakviferlagren gruppen av Marklager i kap 4 eller latent lager i kap 6. Isakviferen har genom isbildningsvärmeförbrukningen och något högre lagringskapacitet än andra marklager. Till nackdelarna hör högre kostnader för rördrivning än vid lerlager eller ytjordvärme. Behovet att använda frysskyddsmedel i cirkulationsvätskan medför föroreningsrisker och extra driftkostnader. Markytan ovanför lagret måste vara tillgänglig för service och inspektion.

### **Öppna och slutna akviferer**

Inom geologin karakteriseras ofta akviferer som öppna eller slutna. Vid artificiellt utnyttjande bör alla akviferer betraktas som öppna hydrauliska system.



## 6 Smältvärme, latent och termokemiska lager

Principen för att korttidslagra värme i salt och is går ut på att utnyttja fasomvandlingsenergi s k latent värmelagring. Temperaturen för fasomvandling i salt (fast-flytande) varierar för olika salttyper. Upptagning eller avgivning av värme vid fasomvandling från en kristallstruktur till en annan sker vid konstant temperatur och ger en hög lagringstäthet i jämförelse med sensibla lager (vattenlagring) i de fall skillnaden mellan lagrets laddnings- och urladdningstemperatur är liten.

Lagring av värme i form av fasomvandlingsenergi innebär att en relativt stor lagringstäthet kan uppnås även när lagret arbetar i ett litet temperaturintervall. Visst intresse för saltsmältor har hittills koncentrerats på kalciumkloridhexahydrat och glaubersalt som smälter strax under 30°C och har en latent lagringskapacitet på ca 70 kWh/m<sup>3</sup>. Sensibel lagring i t ex vatten ger i dessa fall en avsevärt lägre lagringstäthet.

Om temperaturskillnaden mellan laddning och urladdning är 20°C blir lagringstätheten ca 105 kWh/m<sup>3</sup> för kalciumklorid-6-hydrat jämfört med 23 kWh/m<sup>3</sup> för vatten, d v s 4,6 gånger högre. Ju större temperaturdifferensen är desto mindre blir dock skillnaden mellan smältvärmelagrets kapacitet och vattnets. Dels beror detta på att saltsmältans specifika värmekapacitet är lägre än vattnets, dels på att andelen av det totalt lagrade värmets som utgörs av fasomvandlingsvärme minskar. Dessa egenskaper medförde tidigare att den latent värmelagringen tilldrog sig speciellt intresse för korttidslagring av solvärme. Senare tilldrog sig intresse mera på att utnyttja spillvärme från industriella processer, fjärrvärme, lagring av nattel och för kylning av lokaler.

Tabell 6.1 Data för smältsalter.

Lagringssubstans	Smält- punkt °C	Latent smält- värme kJ/kg	Kostnad 1 jan 1989	
			kr/t	kr per lagrad kWh(latent)
Salthydrater				
Natriumvätefosfat- -12-hydrat	35	280	ca 3000	ca 39
Kalciumklorid- -6-hydrat	29	170	1900	42
Natriumsulfat-10- hydrat (glaubersalt)	32	254	1050	14
Natriumtiosulfat- -5-hydrat	48	205	ca 2450	43

**Tabell 6.1** Forts.

<b>Organiska ämnen</b>				
Laurinsyra	45	180	ca14800	ca 295
Palmitinsyra	63	190	ca12400	ca 235
Paraffin	45-60	190	4300-6200	80-115
Stearinsyra	69	200	ca8650	ca 150
<b>Stabiliserade salter</b>				
"Chliarolithe" (Frankrike)	28			
"TESC 81" (USA)	27	191	3700	70
"TESC 135"	57	135	7400-9500	195-255

## 6.1 Smältvärmelager för värme

Tekniken för termisk energilagring med hjälp av fasomvandlingsmaterial har efter fler år av vetenskaplig forskning och teknisk utveckling nått ett visst kommersiellt stadium. För några år sedan fanns på marknaden ett flertal lagringssystem eller lagringsprodukter som huvudsakligen byggde på smältlagring i salter men även några istillämpningar. Marknaden minskade dock på grund av sjunkande oljepriser och i Sverige relativt billig elkraft. En återhämtning tycks emellertid nu kunna äga rum, som kan förklaras med det stigande intresset för lagring av industrikyla och kyla för luftkonditionering.

En orsak, framför allt i utlandet, är stigande elpriser. Utomlands, och nu även i Sverige, införs differentierade eltaxor som i hög grad gynnar lagringstekniken. Ett komersiellt genombrott för latent värmelagring dröjer eftersom kostnaderna är höga ca 350 SEK/kWh. Den främsta konkurrenten är billig etablerad teknik med vattenlager.

Värmelagring för industribyggnader och bostäder har korttidskaraktär och blir i princip dygnslagring. Lokaluppvärmningen är till övervägande del vattenbaserad. Därför kan dygnsdifferentierade eltariffer och straffavgifter för effektöverskridande göra det intressant att utnyttja nattackumulering för uppvärmning. Om inte priset på latentlagren kan reduceras avsevärt, utblir dock möjligheten att idag effektivt konkurrera med värmelagring i vattenmagasin. Direktverkande elvärme utgör också ett stort hinder vid introduktion av smältvärmelager för lokaluppvärmning. Eftersom denna teknik nu begränsas kraftigt kan värmelagring bli intressant om en större

ombyggnad av elvärmesystemen kan komma att äga rum till vattenburna system.

Inom industrin finns en stor spillvärmepotential. Innan värmelagring kan sättas in i industriprocesser bör givetvis alla ansträngningar göras för utnyttjande av spillvärmets. Mycket har redan gjorts för effektivisering av processerna, men ett fortsatt tillvaratagande av spillvärmets blir allt dyrare och svårare att realisera. Särskilt inom den tunga processindustrin (järn och stål-samt massa- och pappersindustrin). Högre energipriser torde åter sätta fart på dessa ansträngningar. Spillvärmekvaliteten d v s temperaturnivån och energimängden har en avgörande betydelse för insatserna.

Kylbehovet i Sverige, som traditionellt har varit låg, är ökande och numera byggs knappast några offentliga lokaler eller affärs och kontorsfastigheter utan installationer för komfortkyla. Utnyttjandetiden är säsongsbetonad och driften över dygnet har korttidskaraktär. Lagringssystemen blir därför oftast små och dygnslagrande. De nya energibestämmelserna i nybyggnadsreglerna för bostadshus kommer sannolikt att medföra stigande inomhustemperaturer under icke uppvärmningssäsong. För att uppnå komforttemperaturer kan enkla kylager bli aktuella

Kyllagring är effektersättande d v s utbyggnad blir möjlig med befintliga kylanläggningar oförändrade. I fall av nyinstallationer kan anläggningarna i stället dimensioneras för lägre kyleffekt med hjälp av ett lager. Kyla inom processindustrin behövs även på vintern och billig natt-el kan producera kyla som sedan lagras för utnyttjande under dagtid (minskat effektbehov). Vidare kan ett stegrat behov förväntas av "back-up"-kyla för t ex datahallar och liknande anläggningar för elektronisk utrustning med krav på störningsfri drift.

## **6.2 Olika systemlösningar**

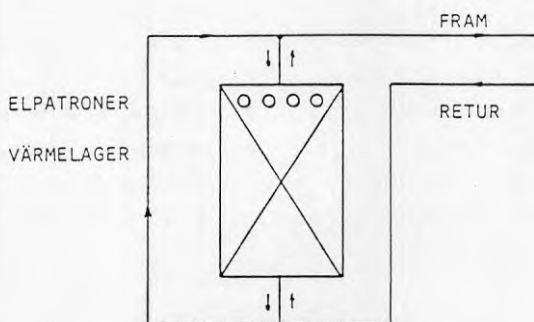
### **6.2.1 Natt-el och/eller effektutjämning**

Systemet tillämpas främst för småhus med vattenburen värme.

Under den tid på året, eventuellt hela året, då differentierad eltaxa dag/natt tillämpas, kan ett smältvärmelager utnyttjas för att lagra energin från natt till dag. Samma typ av system kan även utnyttjas för effektutjämning.

I länder med en elproduktion baserad på i huvudsak kol och olja, t ex på kontinenten, är produktionskostnaderna per kWh mycket högre under

högförbrukning än under lågförbrukning och därför används i flera länder t ex en dag- och en natttaxa. I övrigt där huvuddelen av elproduktionen sker med kärn- och vattenkraft är skillnaden i produktionskostnad vid höga och låga effekter normalt mycket mindre. Däremot kan distributionskostnaderna variera betydligt mera mellan höglast och låglast. Genom att använda en eltaxa med differentierade priser, d v s olika priser under olika tider, kan förbrukningens fördelning över dygnet, veckan eller året utjämnas i viss grad. I samband med kärnkraftsavvecklingen kan man förvänta sig en mera kraftfull inriktning mot differentierade el-taxor även i Sverige. Det framtida tariffsystemet väntas även leda till en ökad kombinationsdrift mellan el och olja, kol samt gas för uppvärmning, varigenom el-systemet avlastas under höglasttid.



**Figur 6.1** Lagringsbehållare och elpanna byggs ihop till en enhet som är av samma storlek som en konventionell villaelpanna.

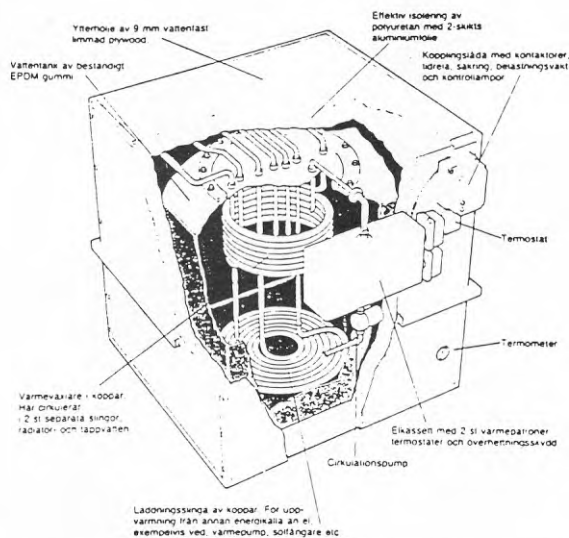
Fyra driftfall kan urskiljas:

- a/ Lagring av värme; detta sker då billig elenergi finns och det inte finns något uppvärmningsbehov.
- b/ Lagring av värme samt uppvärmning; detta sker då det finns billig elenergi samtidigt som uppvärmningsbehov föreligger, dock inte av maxeffekt.
- c/ Uppvärmning från lager; detta sker då elenergin är dyr och det finns energi lagrad samtidigt som uppvärmningsbehov föreligger.
- d/ Direktuppvärmning; detta sker då uppvärmningsbehov föreligger och lagret antingen är urladdat eller fulladdat samtidigt som elenergin är billig.

Lagringstemperatur:

Lagring sker i temperaturintervallet 55-80°C.

Saltet genomgår fasomvandling vid 64°C.



Figur 6.2 Trelleborgs energibox. Ackumulator för lagring av natt-el.

## Ekonomi

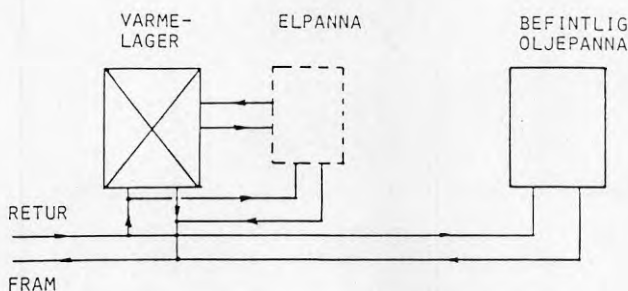
En renodlad ekonomisk värdering är svår att göra. En mera pedagogisk jämförelse är en modell som beskriver smältvärmelagret med en konkurrerande modell. Trelleborgs Energibox har en lagringsvolym på 1,5 m<sup>3</sup>. För att lagra motsvarande mängd energi kräver ett smältvärmelager ca 0,8 m<sup>3</sup>. En ökning av lagringskapaciteten med 1 m<sup>3</sup> av Trelleborgs Energibox kostar ca 50 kr/kWh motsvarande ökning av smältvärmelagret kostar ca 215 kr/mWh. Bedömningen blir därför att någon större marknad för smältvärmelager för natt-el på detta sätt inte kan påräknas. Om systemet i en framtid blir ekonomiskt konkurrenskraftigt finns en villamarknad där det som totallösning kan konkurrera med värmepumpsinstallationer och konventionella el-pannan.

## 6.2.2 Lagring av nattel och/eller effektutjämning i gruppcentraler och fjärrvärmesystem

Saltgretet och elpannan installeras i en gruppcentral i kombination med en befintlig oljepanna.

Uppvärmning sker i första hand med hjälp av lagret som laddas av nattel. Uppvärmning under natten sker med el. Oljepannan får svara för spetslast samt tillsatsvärme under dagen. Lagret kommer också att minska behovet av installerad effekt och underlätta driften.

Lagring av nattel i gruppcentral skiljer sig från fallet med lagring i villa genom att returtemperaturen kan bli hög, vilket minskar den utnyttjningsbara temperaturdifferensen. Låga temperaturdifferenser för smältvärmelager mer konkurrenskraftiga jämfört med varmvattenackumulatorer.



Figur 6.3 Principkopplingsschema

Lagringstemperatur:

Lagring sker i temperaturintervallet 65-85°C med en fasomvandlingstemperatur på 78°C

Kostnaden för en hetvattenackumulator är drygt 10 kr/kWh. Motvarande smältvärmelager kan uppskattas till 140 kr/kWh. De i jämförelse höga kostnaderna för smältvärmelager jämfört med ackumulator gör att det är svårt att inom en skönjbar framtid finna någon marknad för smältvärmelager i denna typ av applikation.

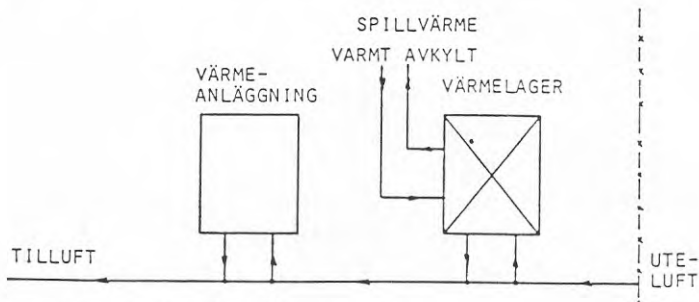
## 6.3 Spillvärme

I många industrier uppstår normalt värmeöverskott under drift medan behov av uppvärmning föreligger då verksamheten ligger nere. Med hjälp av

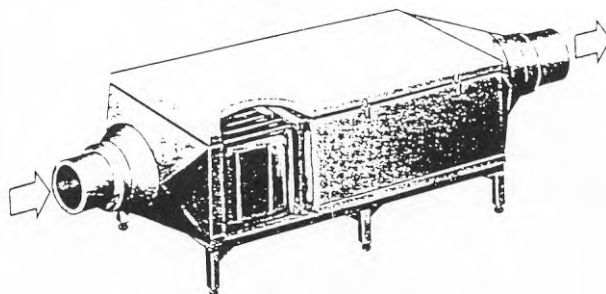


smältvärmelager kan värme lagras antingen från dag till natt eller från arbetsvecka till helg.

För att återvinning av spillvärme ska bli lönsamt måste summan av insamlings-, lagrings- och distributionskostnaden understiga priset på primäre energi. I de fall lagring är billigare än produktion av ny värme kommer den att få konkurrera med i första hand enkla energisparåtgärder som isolering och införande av mera energisnål ventilation och värmeåtervinning.



Figur 6.4 Principkopplingsschema



Figur 6.5 Alfa Laval ECS AB värmelager

Smältvärmelagret installeras i anslutning till den befintliga värmeanläggningen och utnyttjas tillsammans med denna.

Under arbetstid lagras tillgänglig spillvärme i smältvärmelagret. Vid värmebehov tas värme i första hand från lagret och i andra hand produceras värmen i den befintliga värmeanläggningen. Lagring av spillvärmeöverskott sker från dag till natt.

Lagringstemperatur:

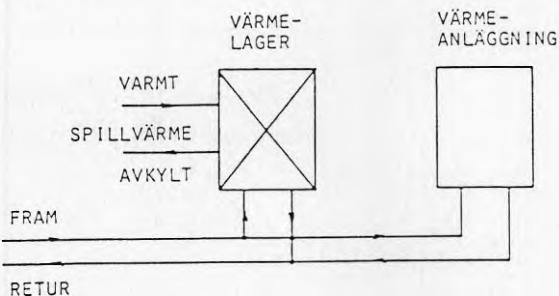
Lagring sker i temperaturintervallet 25-37°C med fasomvandling vid 31°C.

## Ekonomi

En prototyp från Alfa Laval ECS kan lagra 50 kWh per cykel. Antalet cykler beräknas till 150/år. Kostnaden för anläggningen är drygt 300 kr/kWh. Vid en halvering av priset kan produkten bli kommersiellt intressant.

### 6.3.1 Lagring av värme från dag till natt i industrilokaler med vattenburet uppvärmningssystem

Smältvärmelagret installeras i anslutning till den befintliga värmeanläggningen och utnyttjas tillsammans med denna. Ett exempel kan vara att spillvatten med en temperatur av ca 40°C finns tillgängligt under ca 6 timmar per dygn. Under denna tid laddas lagret. Under dygnets övriga timmar sker urladdning. Vid dessa låga temperaturer måste ett lågtemperatursystem utnyttjas. Fläktluftvärmare och värmebatterier för tilluftsaggregat kan dimensioneras för mycket låga temperaturer.



Figur 6.6 Principkopplingsschema

#### Lagringstemperatur:

Lagringstemperaturen är beroende av spillvärmemetemperaturen, dock i praktiken inom intervallet 30-50°C. Vid högre temperatur konkurrerar varmvattenlager.

## Ekonomi

Ingen anläggning är uppförd i Sverige. I de flesta tillämpningar är vattenackumulatörer ett betydligt billigare alternativ och samtidigt en tidigare känd och utvecklad teknik.

## 6.4 Värmepump

Användande av lager i värmepumpsystem medför vissa fördelar. Driften blir jämnare och gångtiderna för värmepumpen längre. Lagret ger även möjlighet att utnyttja värme- och kylenergi när den behövs istället för när den alstras. I och med detta erhålls ett större energiutnyttjande.

### 6.4.1 Lagring av värme före uteluftsvärmepump

Smältvärmelagret lagrar energi från uteluft vid något varmare tillfällen till perioder då värmepumpen annars inte skulle drivas pga för kall väderlek.

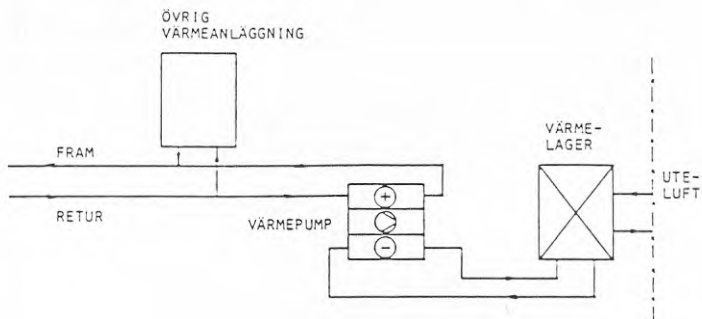
När det är tillräckligt varmt ute lagras energi i smältvärmelagret samtidigt som värmepumpen är i drift. När det är för lågtemperatur för värmepumpen att arbeta direkt mot uteluften tas värme från lagret så länge det är möjligt. När lagret är urladdat måste el eller oljepanna utnyttjas.

Med ett smältvärmelager förlängs drifttiden för värmepumpen och värmefaktorn förbättras. Detta gynnar driftekonomin.

Lagret utnyttjas främst under för- och eftervinter, men även under midvintern då temperaturen pendlar. Såväl temperatursvängningar på några dygn som från dag till natt kan utnyttjas.

Lagringstemperatur:

Lagring sker i temperaturintervallet  $-10$  till  $+7^{\circ}\text{C}$  med en fasomvandlingstemperatur på ca  $0^{\circ}\text{C}$ .



Figur 6.7 Lagring via uteluftsvärmepump - principkopplingschema

## Ekonomi

Ingen anläggning av denna typ är ännu planerad eller uppförd. I de fall då uteluftvärmepump eller värmepump med likartad tillgänglighet av värmekällan installeras kan ett lager av ovan beskriven typ installeras. En lönsamhet i samma storleksordning som hos värmepumpen krävs dock. Markvärmelager kan utnyttjas på liknande sätt.

Produktionsutvecklingen gör att uteluftvärmepumpar på ett allt bättre sätt klarar att arbeta vid låga utetemperaturer. Detta minskar lönsamheten för system av denna typ. Ingen marknad för smältvärmelager i denna applikation kan påräknas.

### 6.4.2 Lagring av värme efter uteluftvärmepump

Smältvärmelagret lagrar energi efter värmepumpen vid de tillfällen värmepumpen kan gå med hänsyn till utelufttemperaturen. Det är alltså genom värmepumpen som lagret laddas.

När utelufttemperaturen blir för låg för effektivt utnyttjande av värmepumpen tas värme från lagret.

Lagringstemperatur:

Lagring sker i temperaturintervallet 55-70°C med en fasomvandlingstemperatur på 64°C.

Den möjliga marknaden är gruppcentraler med uteluftsvärmepumpar där stora svängningar i värmelasten förekommer. Värmelagret bör i denna tillämpning kunna konkurrera med vattenackumulatorer. En ekonomisk utvärdering kan ej göras med de erfarenheter som finns idag och med de osäkerheter som råder om lagrets kapacitet.

### 6.4.3 Frånluftvärme

I frånluftssystem och från-/tilluftssystem där värmeväxlare inte installerats och där drift endast sker under dagtid kan ett smältvärmelager utnyttjas för att öka drifttiden för en frånluftsvärmepump. Systemet blir speciellt intressant vid höga frånluftstemperaturer, vilket är vanligt inom industrin.

Lagring sker av det värmeöverskott som inte utnyttjas av värmepumpen.

Detta sker då verksamheten är igång, dvs under dagtid. Natttid tas värme från lagret till frånluftsvärmepumpen.

En konventionell uteluftsvärmepump konkurrerar med detta system likaså en vattenackumulator. En variant är även ett is-vattenlager. Systemet är möjligt att installeras där ventilationssystemet är avstängt under natten.

#### Lagringstemperatur:

Lagring sker i temperturintervallet 0-40°C med en fasomvandlingstemperatur på 10-40°C. Eftersom ett flertal av de salter som omnämns ingår i komersiella produkter vill ej företagen ange de kemiska beteckningarna.

#### Ekonomi

Inget system av denna typ finns ännu installerad eller utvärderad. Kostnaden för lagret är ganska låg jämfört med värmepumpen. En värmepump av aktuell typ kostar ca 5.000 kr/kW. Ett smältvärmelager för lagring av den kylenergi som en värmepump med värmeeffekten 1 kW behöver för 12 timmars drift kostar ca 2.000 kr. Lagerkostnaden inkl kringutrustning har då antagits till 300 kr/kWh. Av detta skäl förefaller systemet vara intressant. Systemet passar i kontor, skolor och industrier som vanligen endast utnyttjas under dagtid. Denna kategori av fastigheter har inte räntebidrag som bostadssektorn. Detta försämrar konkurrenskraften för alla kapitalintensiva system inklusive konventionella värmepumpar utan lagring. En viss marknad för denna typ av system kan påräknas. Storleken är dock svårbedömd p g a den osäkra kostnadsbilden.

## 6.5 Solvärme

Redan under efterkrigstidens första lilla energikris i slutet av 40-talet och återigen 1973/74 lovade smältvärmelagring att kunna bli ett ekonomiskt alternativ för soluppvärmda småhus. Detta gällde vid jämförelser med mer konventionell lagring i stenmaterial eller vatten.

De system för latent korttidslagring av solvärme främst för småhus som hittills har utvärderats eller rapporterats blir dockför dyra i relation till den inbesparade energimängden. Orsakerna är att konkurrensen med de nya kraven på energihushållning som innebär att uppvärmningssäsongen blir allt kortare. Husens klimatskärm blir allt bättre samtidigt som systemen för tappvarmvatten blir allt effektivare. De största utsikterna för ett solvärmesystem med korttidslagring bör dock tappvarmvattenberedning ha.

Därför har en satsning på solvärmesystemen som arbetar vid omkring +55°C i en framtid möjligheter att bli konkurrenskraftig. Kvar står emellertid det faktum att utnyttningstiden blir låg för lagret och innan någon utveckling av ett sådant lager startas måste systemen utformas och värderas både ekonomiskt och driftmässigt. För att lönsamhet skall nås krävs dock mycket stora energiprisökningar.

## **6.6 Slutsatser smältvärmelager**

För samtliga av de beskrivna tillämpningarna förefaller potentialen idag vara låg eller mycket låg.

Mycket kraftiga ökning av energipriset är nödvändiga. Flera av de beskrivna tillämpningarna har heller ej prövats integrert i en systemlösning. Den tillämpning som det idag eventuellt kan finnas marknad för är kopplingen till spillvärme. Konkurrensen med enkla byggnadstekniska tillämpningar gör att uppvärmningsperioden blir allt kortare, jmf BABS, 9 månader och Nybyggnadsreglerna 1989 ca 5 månader.

Beräkningar över smältvärmelagringens ekonomi tenderar lätt att bli spekulativa. Systemtekniskt är osäkerheten stor med en i flera stycken oprövad teknologi och driftsättet är generellt sett svårt att precisera. Priset på lagringsmaterialet är starkt avhängigt kvalitet och tonnage. Det billigaste är fortfarande gaubersalt vilket hittills betraktas som en industriell spillprodukt. Detsamma gäller i viss mån kalciumklorid. Stiger efterfrågan på grund av en storskalig tillämpning får man sannolikt räkna med prisökningar.

Värmelagringsmediet självt representerar en kostnadsmässigt liten del av färdigt magasin. Detta kan i sin tur vara mer eller mindre tekniskt sofistikerat beroende på det värmesystem det ingår i. Skall en helhetsbedömning göras måste den totala systemkostnaden ingå.



**Tabell 6.2** Exempel på totala och specifika systemkostnader för värmelagring.

Lagersystem Fabrikat eller projekt	Volym (inkl hålrum m <sup>3</sup> )	Total lagrings- kapacitet kWh(20°-50°C)	Investerings- kostnad	
			totalt kr	kr/kWh
<b>Saluförda system</b>				
"Heat-Pac"	ca 1,5	ca 30-50	ca 17300	ca345-550
"Thermol-81"	2	100	ca 42000	ca420
Förrådsvärmeväx- laren "STL"	1	ca 58-60	21000	ca370
<b>System under utveckling</b>				
LiTH m fl	ca 1,5	50	ca 18000	ca370
<b>Forskningsprojekt och utredningar (uppdaterade)</b>				
Solveig-projektet JM/VBB	0,84	52	ca 16000	ca310
"Fahe"	-	140(salt)	-	ca340
(IKE, V-Tyskland)	-	75(paraffin)	-	ca680
Studsvik Energi- teknik AB (studie av förf 1981)	2	ca 120	ca 32000	ca270
<b>Referensmagasin vatten</b>				
Standardlager- tank (diverse tillverkare)	1,5	52	7500-8500	140-170
D:o	10	350	ca 29000	93

## 6.7 Sorptionsvärmelager

Sorptionsvärmelagring innebär att sorptionsvärme utnyttjas för att binda energi. Vid laddning går reaktionen åt ena hållet och vid urladdning åt motsatt håll. Den teoretiska energilagringstätheten varierar beroende på typ av reaktion men blir avsevärt större än vid sensibel lagring (vattenlager, stenlager) och latent lagring (smältlager).

De reaktioner som befunnits lämpliga för sorptionsvärmelagring vid lägre temperaturer är dissociationsreaktioner mellan någon adsorbent (t ex kalciumklorid) och något flyktigt arbetsmedium (vatten, ammoniak, metanol eller aminer). Vid laddning tillförs värme till saltkomplexet varvid den flyktiga komponenten avgår (desorberas) från saltet och vanligtvis kondenseras i en separat tank. Det tillsatta värmets återfinns huvudsakligen i ångbildningsvärmets som avges vid kondenseringen. En mindre del ligger lagrad i form av kemisk energi. Vid urladdning upptas (sorberas) arbetsmedieånga till saltet, varvid kondenseringsvärmets och den lagrade kemiska energin frigörs vid den exoterma reaktionen.

Vid urladdningen tillförs lågvärdig värme till tanken med den flyktiga komponenten så att ångtrycket blir högre över denna än över saltet varvid ångan spontant sorberas på saltet. Genom det låga ångtrycket över saltet kan det värde som tillförs för ångbildningen vid urladdningen vara av betydligt lägre temperatur än det värme som tillförs vid laddningen. Systemet fungerar vid urladdning som en periodisk absorptionsvärmepump, d v s värme tas upp vid en lägre temperatur och avges vid en högre.

Endast ett fåtal tillämpningar har prövats i full skala i Sverige. Tepidusprojektet startades 1976 vid KTH, Stockholm. Tepidusystemet är ett sorptionslager som arbetar med  $\text{Na}_2\text{S}$  och  $\text{H}_2\text{O}$ . I utförande för säsongslagring beräknades en lagringstäthet på ca  $500 \text{ kWh/m}^3$  uppnås. Vid laddning avdrivs vattnet till en kondensator som vid urladdning fungerar som förångare. Förångningsvärmets vid urladdningen tas från en markslinga.

Under det senaste året har en satsning gjorts på utveckling av ett korttidslager med avsevärt högre effekt än säsongslagret, den s k högeffektackumulatorn. Ackumulatorn kan laddas upp och ur under ett dygn. Laddning kan ske exempelvis med natt-el. Korttidslagring bedöms av Tepidus bli den mest ekonomiska tillämpningen för systemet. Den utvärdering som gjorts av systemet visar dock att delar av de förväntade resultaten ej har kunnat uppnås. Saltlagrets energitäthet var beräknat till  $500 \text{ kWh/m}^3$ . Uppmätt resultat var ca  $200 \text{ kWh/m}^3$ . Effektuttaget var beräknat till  $2 \text{ kW/ton salt}$ . Uppmätt resultat  $0,2$  till  $0,7 \text{ kW/ton salt}$ . Energiuttaget beräknades ske med temperatursteget  $40-55^\circ\text{C}$  över hela arbetsområdet. Det uppmätta resultatet visar att temperatursteget  $55^\circ\text{C}$  endast erhålles i området  $0-2,5$  moler vatten per mol salt och att arbetsområdet troligen slutar vid 4 moler vatten. Trots de i vissa stycken nedslående resultaten kan man dock konstatera att forskargruppen (Tepidusgruppen) har lyckats att konstruera ett fungerande korttidslager (prototyp) med högeffekt men med betydligt lägre energitäthet än det teoretiska förväntade. Vidare försök pågår ackumulatör. Ingen slutrapport föreligger juni 1989.

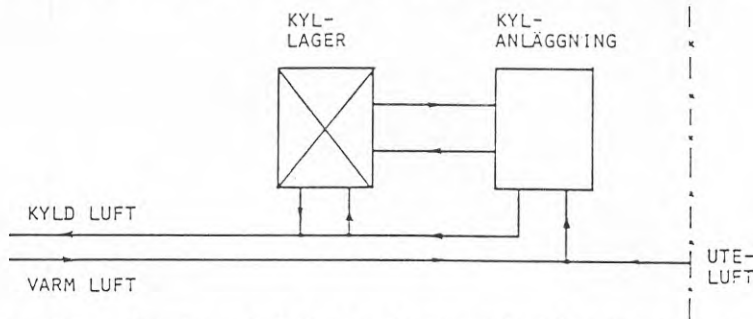
## 6.8 Smältvärmelager för kylning

I smältvärmelager kan kyla lagras vid både lägre och högre temperaturer än 0°C, vilket ofta kan medföra bättre systemlösningar än is-vattenlager.

Kylanläggningar måste dimensioneras efter det maximala kyleffektbehovet. Ofta är emellertid kylbehovet starkt varierande och maximala kyleffekten utnyttjas normalt endast under mycket korta tider. Ett lager kan jämna ut kyleffekttoppar och det blir då möjligt att installera en mindre kylmaskin som kan gå med maximal last under större del av tiden.

En sådan systemlösning skiljer sig ganska väsentligt från värmelagring. Vid värmeproduktion klaras topeffekten i regel med hjälp av en oljepanna, åtminstone vid större anläggningar. En oljepanna är relativt billig per installerad effekt, medan i en kylmaskin produktionen per effekt är lika dyr när det gäller baslast som topplast.

Ett användningsområde är nya anläggningar där smältvärmelagret kan ingå i kylsystemet vid nyproduktion. Ett annat är att öka kyleffekten i en befintlig konventionell kylanläggning. I stället för en ny kylmaskin installeras ett smältvärmelager i systemet. Den befintliga kylmaskinen svarar då för baslastbehovet medan smältvärmelagret klarar toppar i kyleffektbehovet.



Figur 6.8 Lagring av kyla för t ex kontor - principkopplingschema

### 6.8.1 Lagring av kyla i komfortkylanläggning för lokaler typ kontor

Kylanläggningen körs vid full effekt hela dygnet. Vid lågt kylbehov laddar kylanläggningen ett smältvärmelager. Vid höglast tas kyla dels från kylanläggningen, dels från smältvärmelagret.

Någon anläggning i Sverige och ett antal anläggningar utomlands, bl a i Frankrike, utnyttjar system av beskriven typ. Cristopia Energilagring AB säljer denna typ av system i Sverige och utomlands.

Det enda lagringsalternativet är ett is-vattenlager där den utgående temperaturen styrs genom shuntning.

**Lagringstemperatur:**

Lagring sker i temperaturintervallet 7-17°C med en fasomvandlingstemperatur på 12°C.

**Ekonomi**

Vid en urladdningstid på 8 timmar minskar ett lager med kapaciteten 1 kWh det installerade effektbehov med 0,13 kW. Med kostnaden 300 kr per lagrad kWh innebär detta att en sänkning av installerad kyleffekt med 1 kW kostar ca 2.300 kr. Kostnaden för kylanläggningar är i de flesta fall högre. Marknaden för denna typ av lagringssystem torde därför vara intressant. Om lönsamheten kan visas vara tillräckligt god bör det finnas en marknad för komfortkylsystem med smältvärmelager. Kontor, men även butiker, restauranger, datacentraler etc, hör till tänkbara avvännare.

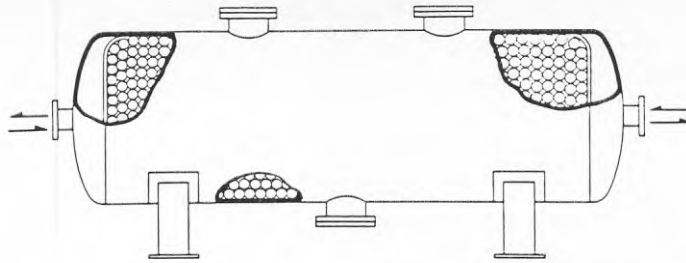
### **6.8.2 Lagring av kyla i kyl-/frysanläggning för industri**

Den konventionella kyl-/frysanläggningen dimensioneras för kontinuerlig drift. Under låglastperioder lagras kyla i lagret. Vid höglast klaras effekttoppar genom tillskott från lagret.

System av beskrivningen typ finns redan i flera anläggningar både i Sverige och utomlands. Bl a Cristopia Energilagring AB säljer smältvärmelager för denna typ av system.

Marknaden är t ex anläggningar för industriprocesskyla, kyla för livsmedel samt lagring av andra frysta/kylda produkter.

Här finns inget konkurrerande system. Alternativet är att installera en större kylanläggning. En sådan blir dock inte lika väl utnyttjad under låglastperioder.

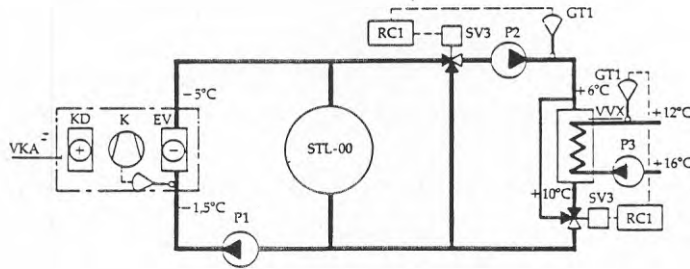


**Figur 6.9** Kylager med inkapslade saltbollar i plast (kalcium-klorid 6-hydrat) typ Cristopia

### Ekonomi

Jämfört med en komfortkylanläggning är effektopparna i en kyl-/frysanläggning både kortare i tiden och högre.

Vid snabbinfrysning av ett varulager på t ex 4 timmar minskar ett lager med kapaciteten 1 kWh det installerade effektehøvet med 0,25 kW. Med en kostnad av 300 kr per lagrad kWh innebär detta att en installerad kyleffekt på 1 kW 1.200 kr. Detta är avsevärt lägre än kostnaden för 1 kW kyleffekt i en konventionell kylanläggning. Det bör därför finnas en marknad för system av denna typ.



- STL-00 = Energilager (Förrådsväxlare)
- KD = Kondensator
- K = Kompressor
- EV = Förångare
- P1 = Köldbärarpump
- P2 = Cirkulationspump
- VVX = Värmeväxlare
- RC = Styrfunktionsenhet för sekvensstyrning
- GT = Temperaturgivare
- SV = Styrventil

**Figur 6.10** Principkopplingsschema kylagring i salt

### **6.8.3 Kombinerad lagring av kyla och värme i komfortkylanläggningar**

Anläggningen består av en kylmaskin som dels kyler lokaler och/eller maskiner utrustade med kyla dels kyler frånluften för att återvinna värme. Ett smält- värmelager inkopplat efter kylmaskinens förångare utjämnar främst dygnsvariationer. På kondensorsidan är kylmaskinen kopplad till värmesystemet (värmning av tilluft, radiatorer och tappvarmvatten) och en utomhusförångare. Utomhusförångaren utnyttjas vid höga kylbehov och låga värmebehov.

Systemet kan alternativt utföras med is-vattenackumulator. Även lagring i byggnadsstommen, av t ex Strängbetongs Termodecksystem konkurrerar. Främst kontors- och affärslokaler utgör möjlig marknad för systemtypen.

Lagringstemperatur:

Värmelagring sker i temperaturintervallet 25-45°C med en omvandlingstemperatur på 33°C. Kyllagring sker i temperaturintervallet 0-15°C med en omvandlingstemperatur på ca 5°C. Anläggningens värmelager antas utnyttjas under större delen av uppvärmningssäsongen.

Ekonomi

Ett flertal liknande system med is-vattenackumulatörer har installerats i Sverige. Is-vattenackumulatörer tycks ligga på ungefär samma kostnadsnivå som smältvärmelager baserade på salt. Installationstekniskt har saltlager dessa fördelar, varför konkurrenskraften bör vara god. Det bör därför finnas möjligheter att en stor del av nyproduktionen av kontors- och affärslokaler kan förses med denna typ av system. Det är även möjligt att introducera systemet i befintliga anläggningar.

### **6.8.4 Passiv lagring av kyla i varma klimat**

Systemet är avsett för klimat där kylbehov föreligger under långa tider men där utetemperaturen på natten är låg. Under natten förs uteluft genom lagret. På dagen sker kylning av byggnaden genom att rumsluften cirkulerar genom saltlagret. Luftcirkulationen sker med hjälp av en fläkt. Styrning av luftströmmarna sker genom spjäll. Marknaden för denna systemtyp finns i länder med varmt inlandsklimat. Systemet kan utnyttjas som ett alternativ till tung byggnadsstomme och skulle eventuellt kunna användas för export av



svenska trähus till vissa länder med varma klimat. En medveten utformad byggnad med tung stomme kan dock ge liknande effekter. Ingen anläggning av denna typ är byggd eller planerad.

**Lagringstemperatur:**

Lagring av kyla sker i temperaturintervallet 15-30°C med en omvandlingstemperatur på 20-25°C. En förutsättning för att systemet skall fungera är att utetemperaturen är minst ca 10°C lägre än omvandlingstemperaturen under minst 6 nattimmar.

**Ekonomi**

Systemet är helt beroende av klimatet. Under tider då temperaturen under natten inte sjunker tillräckligt, t ex på grund av molnighet, fungerar systemet inte. Systemet är dock billigt och ger nästan inga driftkostnader. Drift av fläktar skulle med fördel kunna göras med hjälp av solceller där el saknas.

## **6.9 Slutsatser kylanläggningar med smältvärmelager**

Smältvärmelager i kombination med kylanläggningar förefaller i många fall vara lönsamma. Vid nybyggnad uppstår vinsterna i huvudsak genom att investerings- kostnaderna minskar. I befintliga kylanläggningar kan installation av ett smältvärmelager öka kapaciteten.

De tillämpningar med smältvärmelager i kombination med spillvärme som redovisas är i många fall intressanta. Dessa tillämpningar finns främst i industrin.

En viktig fråga som måste beaktas vid lönsamhetskalkyler är hur uttjänta lagers kemikalier skall omhändertas. Rimligtvis måste det bli användaren av värmelagret som blir juridisk ansvarig. En bedömning är att den lägsta kostnaden för att omhänderta t ex natriumsulfid blir ca 20 kr/kg. Destruktionskostnaderna kan därmed bli högre än anskaffningskostnaderna.

Fasomvandlingssystem för kyla finns för närvarande endast ett fåtal kommersiella system tillgängliga på marknaden. Det är förvånansvärt med tanke på all samlad kunskap om fasomvandlingsmaterialen. Skälet är sannolikt att det tidigare utvecklingsarbetet huvudsakligen bedrevs som vetenskaplig forskning. Industriell systemutveckling och produktutveckling har ägt rum endast i mycket beränsad omfattning.

Marknadspotentialen för belastningsreducerande lagringssystem bör vara stor. Systemen måste dock vara enkla och pålitliga. Det hittills enda kommersiellt tillgängliga kyl-lagersystemen som bygger på kemiska substanser förefaller vara tekniskt enkelt.

Tabell 6.3 Förenklad värderingsmodell av olika tillämpningar av saltlagring.

Lagersystem	Gradering	
Lagring av nattel i villa med vattenburet system	4	1 Omedelbar marknad 2 Trolig marknad, behöver undersökas
Lagring av nattel och/eller effektutjämning i gruppcentral	4	3 Kanske en viss marknad 4 Troligen ingen marknad
Lagring av nattel och/eller effektutjämning i gruppcentral	4	
Lagring av spillvärme från dag till natt; industrilokaler med luftburet system	1	
Lagring av frånluftvärme från dag till natt	2	
Lagring av värme före uteluftvärmepump	4	
Lagring av värme efter uteluftvärmepump för gruppcentral	3	
Lagring av kyla i komfortkylanläggning för t ex kontor	1	
Lagring av kyla i kyl/frysanläggning för industri	1	
Kombinerad lagring av kyla och värme i komfortkylanläggningar	1	
Passiv lagring av kyla i varma klimat	2	

## 6.10 Kyllagring i islager

Smältvärmelagring med is förekommer i en del tillämpningar för t ex kontorshus. Smältvärme för is är 332 kJ/kg. Jämfört med vattnets specifika värme på 4.18 kJ/kg så kan alltså is lagra 80 gånger mer kylenergi för samma vikt vid en grads temperaturhöjning från fast till flytande form. De system som bl a tillämpas i dag kommer bl a från Industriventilation och KLIAB.

Systemen bygger på öppna tankar med volymer 1-6 m<sup>3</sup> som kan serie- eller parallellkopplas i ett lämpligt antal beroende på dimensionering. De vattenfyllda rören är anslutna till ett vätskeburet köldbärarsystem via ett slutet glykolvattenkretslopp. Vid laddning cirkuleras köldbäraren mellan kylvärmepumpensförångare och isackumulatorn. Köldbärartemperaturen sjunker då till ca -4°C och is bildas på rörens utsida i ackumulatorn. Vid urladdning är köldbärartemperaturen över 0°C och isen smälter runt rören. Islayersystemens problematik består i uppbyggnaden av jämntjockt skikt av is på värmeväxlarrören. Systemutvecklingen pågår fortfarande men det tycks finnas väl fungerande system på marknaden.

### Ekonomi

Flera räkneexempel från genomförda projekt visar att investeringskostnaderna för ett islager är klart konkurrenskraftiga jämfört med ett konventionellt system med en kylmaskin. Systemen med ismaskin får ofta en lägre energiförbrukning samt ett lägre effektabonnemang. Kompressorerna får ofta bättre gångtider med färre start och stopp. Säker driftstatistik för en längre tidsperiod från projekt med islager saknas.

I nedanstående tabell redovisas en kostnadsjämförelse av ett projekt, Nässjö Polishus, mellan grundalternativet och BFR:s alternativ.

**Tabell 6.4** En jämförelse av årlig energiförbrukning, uppvärmning och ventilation, för de båda alternativen.

	Grundalternativet		BFR-alternativet	
uppvärmning	297,5 MWholja/år		93,8 MWhel/år	
fläktarbete	95,7 MWhel/år		57,0 MWhel/år	
Summa	393,2 MWh/år		150,8 MWh/år	
Årskostnaderna för systemen, då underhållskostnaderna sätts olika, är i prisläge 89-02				
System	El (fläkt, kompr)	Abonn. effekt	Tillskotts- värme(el/olja)	Summa kostn/år
Grundalt (olja)	38.000:-	0	100.000:-	138.000:-
BFR-alt (el)	22.700:-	5.300:-	37.000:-	65.000:-
(Kostnadsförutsättningar: elenergi 22,5 öre/kWh, oljevärme 15-20 öre/kWh)				

#### Kommentarer och slutsatser

Kartläggningen av tänkbara system visar att det finns ett flertal tillämpningar där smältvärmelager är lönsamma.

Dokumenterad redovisning av praktiska erfarenheter saknas dock i flera fall. I ett flertal fullskaleexperiment har resultatet ej blivit det som de teoretiska beräkningarna har visat. I och med att nya anläggningar byggs och provas är det viktigt att erfarenheterna analyseras för en erfarenhetsåterföring.

Smältvärmelager i kombination med kylanläggningar förefaller i många fall vara lönsamma. Vid nybyggnad uppstår vinsterna i huvudsak genom att investeringskostnaderna minskar. I befintliga kylanläggningar kan installation av ett smältvärmelager öka kapaciteten.

De tillämpningar med smältvärmelaget i kombination med spillvärme som redovisas är i många fall intressanta. Dessa tillämpningar finns främst i industrin. Återbetalningstiden blir dock vanligen längre än 5 år, vilket ofta bedöms som en alltför lång tid.

Smältvärmelager i kombination med konventionella värmepumpsystem, t ex uteluftvärmepumpar, är sällan lönsamma.

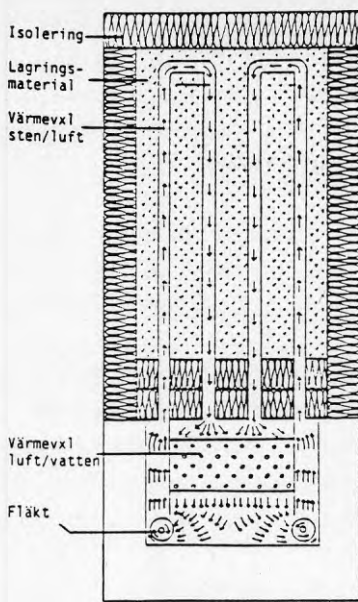
I Sverige har ett flertal anläggningar med isackumulatörer för kombinerad lagring av värme och kyla installerats i kontorshus.

### **6.11 Keramisk lagring**

Tekniken med att korttidslagra värme i keramiska material innebär att värme lagras i ett ämne med en hög värmekapacitet med ett välisolerat hölje.

Kaminen säljs kommersiellt i Sverige under namnet FEO(100, 150,1000). I Europa är produkten mer spridd och kommersiell. Kaminen är framtagen för att utnyttja el under låglasttid främst nattetid. Kaminen har en lagringskapacitet på ca 12 kWh till 100 kWh. Aggregatet ansluts till vanliga shunt- och effektstegspannor.

Den inbyggda och isolerade delen består av kompakta järnoxid-plattor. Systemet bygger på luft som cirkulationsmedium. Urladdning sker med hjälp av egenkonvektion eller med hjälp av en inbyggd fläkt, vilken pressar luft genom det uppvärmda feolitemagasinet och vidare till värmeväxlare där energin överförs till fastighetens värmesystem. Laddning och urladdning regleras efter utetemperatur och rumstemperatur. Det elfasta materialet i lagerdelen värms upp till över 700°C. Denna typ av värmelager är avsett för små värmesystem tex villor.



**Figurur 6.11** Keramiska lagret "FE0".

## Ekonomi

Kostnaden för kaminen är ca 3.000 kr. Lönsamheten är helt beroende på skillnaden i elpris mellan låg- och höglasttid. I utlandet har kaminer sannolikt en betydligt större marknad än i Sverige, beroende på att elproduktionen vanligtvis är baserad på olja eller kol vilket medför att utrymmet för differentierade eltaxor är större.

## 6.12 Utvärderingsgruppens rekommendationer

### 6.12.1 Allmänt

På kort sikt är de ekonomiska förutsättningarna dåliga för korttidslagring av värme. Detta gäller under förutsättning att energisystemets utformning och energiprisutvecklingen blir den som kan förutses med nuvarande energipolitiska beslut och kunskaper. De tillämpningar som har störst möjlighet att komma ifråga, med reservation för att de ännu är fullständigt undersökta, är absorptionsvärmepumpar och korttidslager för kyla i olika tillämpningar. Fortsatta insatser bör därför ha sin tyngdpunkt på dessa områden. Med tanke på att förutsättningarna snabbt kan förändras beroende



på yttre störningar i energitillförseln, miljökrav eller politiska beslut bör dock kunskapsberedskap hållas även på andra områden, som då kan få stor betydelse. Sådan kunskapsberedskap bör kunna upprätthållas genom teknikbevakning och utvärdering samt dokumentation av redan gjorda insatser. Detta förutsätter att bra grundforskningsförslag kommer att prövas utanför bebyggelseprogrammet.

För att industrin skall ta över och driva utvecklingen krävs en långsiktig och stabil marknad. I de fall genomförda projekt är så långt komna att industrin skulle kunna ta över men inte gör det ser man ingen bärkraftig marknad.

En del av insatserna är knutna till uppvärmning av bebyggelsen. Vi anser därför att området även för nästa treårsperiod bör ligga inom bebyggelseprogrammet. Beroende på resultatet bör hemvisten omprövas. Teknik för att minska elberoendet för främst eluppvärmda småhus bör få en hög prioritering.

Komfortsvalhållning inom bebyggelseplaneringen är en sannolik teknikutveckling. Uppvärmningssäsongen blir allt kortare i våra bostäder och liknar alltmer uppvärmningsbehovet för lokaler. För att få ett drägligt inomhusklimat under sommarhalvåret kommer kraven på svalhållning att öka alltmer. För många allergiker är detta nödvändigt av medicinska skäl.

Någon forcering av programmet anser vi inte är nödvändigt mot bakgrund av att det redan finns tillräcklig kunskapsberedskap och att ekonomiska tillgångar inte kan förutses på kort sikt.

### **6.12.2      Latenta lager**

Insatserna föreslås få följande inriktning:

- Systemstudier för att finna tillämpningar med tillfredsställande totalekonomi. För att kunna bedöma smältlagrets konkurrenskraft fordras att noggrannare kostnadsdata tas fram för lager med olika prestanda samt att dessa kostnadsdata hålls aktuella.
  
- Demonstration av sådana tillämpningar som visat sig konkurrenskraftiga vid systemstudier. Komponentutveckling stöds endast i den utsträckning som erfordras för att möjliggöra tillfredsställande demonstration.

- Begränsade grundforskningsinsatser.
- Teknikbevakning

Beträffande systemstudier föreslås i första hand följande tänkbara tillämpningsområden för fortsatta studier:

### **6.12.3 Korttidslagring i industri (faller utanför bebyggelseprogrammet)**

Ett antal systemstudier bör göras för sådana användningar av korttidslagring som bedöms lovande mot bakgrund av tidigare genomförda inventeringar och branschstudier. Av de som visar sig mest intressanta väljs några ut för fortsatta insatser. Korttidslagring av kyla visar stor utvecklingspotential. För vissa tillämpningar bör kombinationer lagring av kyla och värme studeras. Tillämpningar med kombinationen saltlagring och lagring med ismaskin bör studeras.

### **6.12.4 Korttidslagring av solvärme**

De hittills prövade solvärmesystemen för småhus lider fortfarande av höga systemkostnader, vilket i kombination med låg utnyttjningsgrad givit en alldeles för hög kostnad för den utvunna energin. Om korttidslagring av solvärme skall bli intressant i framtiden måste kvalificerade systemlösningar tas fram för lämpliga applikationer. Lämpliga applikationer bör i första hand vara sådana där ett tillräckligt högt utnyttjande uppnås och där systemets storlek blir tillräcklig för att kapital- och driftkostnader skall kunna bäras av den energibesparing som görs.

Vid utveckling av nya solvärmesystem är det viktigt att i första hand betona systemutformningen snarare än de ingående komponenterna och att på ett så tidigt stadium som möjligt göra en realistisk kostnadsberäkning. Först när systemet är utformat och visat sig tekniskt och ekonomiskt lovande kan en eventuell utveckling av nya typer av lager bli aktuellt. Detta gäller för övrigt inte bara solvärme utan också andra typer av energisystem där korttidslagring ingår.

Eftersom befintliga hus oftast har radiatorsystem är det tänkbart att arbetstemperaturen i solfångare och lager bör vara minst 55°C om höga distributionskostnader skall kunna undvikas. System med lågtemperatursolfångare, lagring vid ca 30°C och luftdistribution bedömer vi

vara av mycket begränsat intresse. För nyproducerade hus blir uppvärmningssäsongen allt kortare ca 5-6 månader genom att husen görs allt energisnålare. Husens utökade isolering är en allvarlig konkurrent till solvärmen. Solvärme för tappvarmvatten kan dock bli intressant när tekniken blir ekonomiskt bärkraftig. Fortsatt teknikutvecklingenom detta område bedöms f n vara intressantare än husuppvärmning.

#### **6.12.5 Korttidslagring i bostäder**

För korttidsvärmelager för bostäder förefaller potentialen låg eller mycket låg, vilket bekräftas av hittills genomförda projekt. De nya kraven i nybyggnadsreglerna innebär att bostadshusen blir mycket energisnåla, vilket ytterligare minskar lagrens konkurrenskraft. Kemiska lager med smältpunkter kring 55°C kan dock bli intressanta främst i samband med differentierade eltaxor. En fortsatt inriktning och bevakning för dessa tillämpningar bör därför göras.

#### **6.12.6 Sorptionsvärmelager**

Avvaktan med fortsatt utvecklings- och demonstrationsarbete inom området tills förutsättningar för rimlig ekonomi eller tydliga behov kan visas. Pågående projekt inom området bör utvärderas och dokumenteras. Periodens insatser begränsas till följande områden:

- Systemstudier för att finna eventuella tillämpningar
- Teknikbevakning

Om systemstudier visar på intressanta tillämpningar bör dessa prövas inom programmet värme/kyllagring.

#### **6.12.7 Utjämning av elförbrukningen**

En övergripande förstudie av behov av och teknik för utjämning av elförbrukningen bör göras av en projektgrupp där bl a representanter för bostadsbolag, industri, kraftbolag och distributörer ingår. Med övergripande menas att inte endast ackumulering i enskilda hushåll och fastigheter beaktas utan även möjligheter att utnyttja och skapa utjämningskapacitet i industri och hos andra storförbrukare.

En särskild uppskattning bör göras av behovet av elackumulering i anslutning till olika teknik för bostadsuppvärmning. Utifrån denna tas sedan ställning till fortsatt arbete med t ex demonstration.

### **6.13 Aktiv värmelagring i betongbjälklag**

Värmelagringsförmågan hos en betongplatta kan ökas avsevärt. Det vanligaste sättet är att utforma plattan som skåpbjälklag, som ventileras av uteluft som får strömma genom skåpbjälklagets kanaler innan den tillföres rummet. Den ökade värmelagringsförmågan beror dels på den kortare vägen in i lagringsmaterialet, dels på den påtvingade luftströmningen och direktkontakten mellan luft och betong. Interna värmeöverskott under dagen lagras i bjälklaget och bortföres ex vis under sommarhalvåret nattetid av sval uteluft. På detta sätt kan ett par graders lägre inomhustemperatur än normalt erhållas utan att dragproblem uppstår. Den svala luften har under sin passage genom skåpbjälklaget värmts och lämnar plattan med en temperatur som är nära nog identisk med betongbjälklagets medeltemperatur.

I många fall kan byggnader, som utan ventilerade skåpbjälklag skulle kräva kylning av ventilationsluften, ge behagligt rumsklimat helt utan kylinstallation.

Ett ventilerat skåpbjälklag påverkas också mindre av tjocka mattor och eventuella undertak vid värmeutbytet mellan luft och betong.

#### **Begränsningar**

I byggnormerna och nybyggnadsreglerna begränsas möjligheterna till att aktivt tillämpa värmelagring i betongbjälklag för flerbostadshus. En förutsättning för att lönsamhet skall bli god är att temperaturen tillåts variera i rummet. Denna möjlighet begränsas av att byggnormerna och nybyggnadsreglerna endast tillåter att temperaturen i rummet får variera med 3°C vid ett enda tillfälle under 30 år (nybyggnadsreglerna 20 år). Lagstiftningens begränsningar är ett komfortkrav. För enfamiljshus är förutsättningarna goda att utnyttja värmelagringseffekterna i bottenbjälklaget. Några byggmetoder tillämpas redan på marknaden.

## 6.14 Referenser

- 1 Studsvik Rapport ED 88/4
- 2 Johnsson H, Kellner J, Malmström L  
R 15 1986 Smältvärmelagrets tillämpningar  
Rapport R 15:1986
- 3 Termokemisk energilagring  
Underlag för BFR:s programplan 1984-987
- 4 Gustavsson L, Rosberg K  
Latent värmelager i Stockholms Tingsrätt -  
Mätning och utvärdering del av rapport BFR-  
projekt 851007-4
- 5 Nilsson Rolf  
Solvärme med smältvärmelager för småhus - utredning  
delrapport BFR-projekt 860483-3
- 6 Dykes Peter  
Dygnslagring av kyla i kontorshus CTH avd för  
installationsteknik E 70:1988
- 7 Söderlund G,  
Termokemiskt lager för uppvärmning av villa i Jakobsberg  
Utvärdering av lagrets funktion  
BFR-projekt nr 821086-1
- 8 Bakken Kjell,  
Tepidus högeffekt ackumulator  
delrapport till BFR-projekt nr 850257-2
- 9 Isaksson P, Kellner J  
En jämförelse mellan en lätt byggnad med aktiv värme-  
lagring och en tung byggnad BFR-projekt R 105:1984
- 10 Hedman H  
Smältvärmelagring - en teknisk översikt  
Studsvik Energiteknik AB

## 7 Kostnadsjämförelser mellan olika typer av lager

Olika typer av lager har olika egenskaper, varför det är svårt att göra entydiga jämförelser. För att ändå ge vissa indikationer jämförs här kostnaderna för ett antal tillämpningar, var för sig.

### 7.1 Värmelagring

#### a) Korttidslager

De viktigaste tillämpningarna för korttidslagring är effektkapning, utnyttjning av differentierade eltariffer, solenergilagring från dagtid till nattetid och värmeåtervinning i industriella satsprocesser.

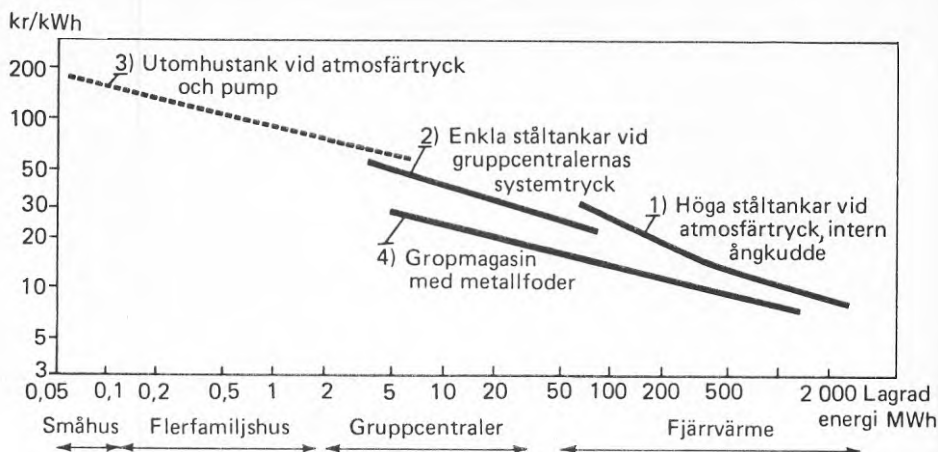
**Ståltankar** utgör den vanligaste typen i alla storlekar se typiska kostnader kurva 1, 2, 3 i Figur 7.1. **Gropmagasin** av nyare typ med högtemperaturfoder lovar att kunna konkurrera för mellanstorleken, se kurvband 4, även om kostnadsunderlaget ännu är osäkert.

För systemtillämpningar som inte kräver höga temperaturer, kan gropmagasin med billigare foder användas. Detta ökar kostnadsfördelen över ståltankar jämfört med värden visade i figur 7.1.

När det gäller elvärme kan även **byggnadens tunga stomme** användas som lager om inomhustemperaturen höjs nattetid och minskas dagtid, utan nämnvärt ökad investering. Dock medför detta viss ökning i värmeförlusterna och ökade krav på konsumentens beteende. Åtminstone ett demonstrationshus med denna metod har gett gott resultat (Ref 5). Även **keramiska material** som värms av elradiatorers strålvärme används, se kostnadsindikation 5 i Figur 7.1) **Fasomvandlingsvärme** har använts främst för lagring av solvärme i passiva solsystem (kostnadsindikation 6) och kemiska lager för vissa satsindustriprocesser, men knappast kunnat konkurrera med t ex vattenlager.

För lager som byggs inomhus är kompakthet viktigt för ekonomin eftersom byggnadsvolym är dyr.





**Figur 7.1** Specifik investeringskostnad för dygnslager, temperatursving 50oC, urladdningstid ca 6 timmar (riktvärden 1988 exkl moms).

b) *Säsongslager för högtemperaturvärme*

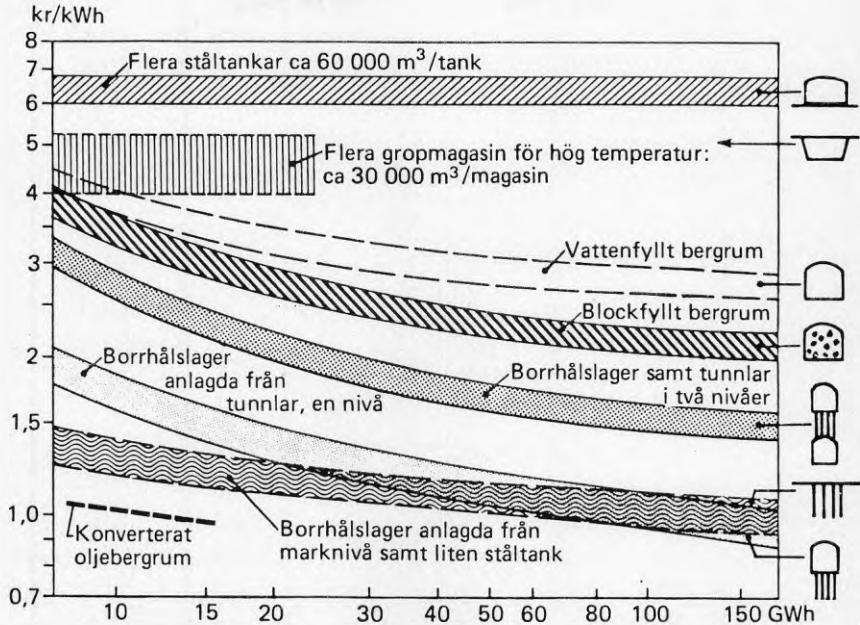
Säsongslager för högtemperaturvärme används i fjärrvärmesystem eller för gruppcentraler där man förfogar över en billig producent av värme vid aktuella systemtemperaturer (t ex avfallspanna eller kraftvärmeverk) under vissa årstider som kan ladda lagret direkt utan värmepump. Värmen återvinns utan värmepump. Den mest flexibla typen av sådana lager utgörs av **vattenlager** som ju har en laddnings- och urladdningseffekt i stort sett oberoende av tidpunkten då effekten matas in eller ut.

Även **borrhålslager** kan användas som högtempertursäsongslager, men med en maximal inmatningseffekt resp urladdningseffekt som avklingar med tiden under laddnings- eller urladdningsoperationen i takt med minskande temperaturskillnad, vatten/berg.

Figur 7.2 visar beräknade kostnadsband för olika högtempertursäsongslager som funktion av lagrets energinnehåll. Billigast är konverterade oljebergum (om dessa finns nära avnämare och värmeproducent), följt av borrhålslager. Dock bör härvid kommentaren ovan betr borrhålslagrets mindre flexibilitet beaktas. Även kanallager i lera skulle kunna få en ekonomi åtminstone jämförbar med borrhålslager om man kunde garantera lerans stabilitet vid så höga temperaturer. Här finns dock inte ännu pålitligt underlag. Övriga lagertyper har så höga kostnader att de svårligen kan motiveras som rena säsongslager med bara ett uttag per år. Vissa säsonger urladdas dock två

gångar per år, dvs under vintern samt under sommarreparationstider av produktionskällan.

För mindre lagerstorlekar kan gropmagasinet ha intresse när det kan urladdas flera gånger per år.



**Figur 7.2** Specifik investeringskostnad för säsongslager vid hög temperatur, temperatursving 50oC, urladdningstid ca 6 timmar (riktvärden 1988 exkl moms).

c) *Säsongslager för lågtemperaturvärme*

Lågtemperaturlager behöver en värmepump för att kunna laddas ur. De laddas vanligtvis med omgivningsvärme från en å eller luften eller lågtemperatursolfångare direkt, eller i vissa fall via värmepumpen. Den höga kostnaden för värmepumpen kräver viss minimum urladdningstid, varför lagertypen inte är intressant som korttidslager.

Tabell 7.1 jämför specifika kostnader för olika typer av lågtemperaturlager. För större lager är **akviferlager** den billigaste demonstrerade typen (0.3 à 0.8 kr investering per kWh) och används redan i flera länder, ofta som kombinerat värme- och kylager. Även **marklager** i lera eller torv med horisontella kanaler ger låga beräknade kostnader, med horisontella slangar

där vattnet i marken tillåts frysa (0.3 à 0.6 kr investering per kWh).  
 Investeringskostnaden per kWh för alla dessa lågtemperaturlager får inte jämföras direkt med kostnaden per kWh för högtemperaturlager i Figur 7.1, eftersom lågtemperaturlagren fordrar ytterligare investering i en värmepump och ger upphov till en driftkostnad för drivenergi.

**tabell 7.1** Typiska kostnader för säsongslager lagrat med omgivningsvärme utan värmepump (temperatursvinn ca 10 °C).

Lagertyp	Storlek GWh	Spec. kostnad kr/kWh	Ref
1. Akvifer	3 à 10	0,3 à 0,8	1, 2
2. Kanallager			
a) vertikala kanaler i lera enligt senaste teknik	ca 1	1,0 à 1,3	1, 4
b) horisontella kanaler i frusen lera eller torv	ca 1	0,3 à 0,6	1, 3
c) vertikala borrhål	ca 1	1,2 à 1,8	1, 4

## 7.2 Lager för kyla

### a) Korttidslager för kyla

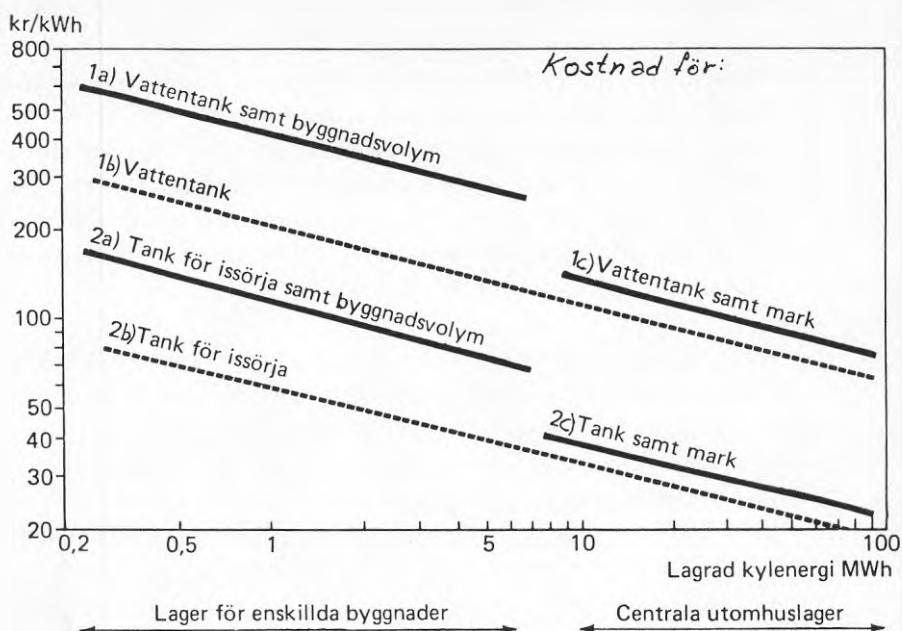
Korttidslager för kyla används mest för att kapa effekttopparna i kylbehovet och därigenom minska den installerade effekten av kylmaskiner och effektagifter. De introduceras alltmera i varma klimat (Japan, Nordamerika), mindre ofta än så länge i Sverige. Större kontor utgör huvudmarknaden.

Den mest använda varianten är en **vattenfylld ståltank**. Det låga temperatursvignet i kylsystem med vatten som köldbärare (ca 10°C) medför dock stor volym per kWh lagrad energi och därför hög specifik kostnad, särskilt om även kostnaden för byggnadsvolymen i hårt exploaterade stadsdelar inkluderas (se kurva 1a och 1b, Figur 7.3).

Volymen per lagrad kWh kan reduceras radikalt om is lagras istället för vatten. Det vanliga systemet härför består av tankar med stålrör eller plastspiraler där is bildas på utsidan av rören när ett köldmedium cirkuleras innanför rören. Rören gör dock tanken dyrare per m<sup>3</sup>, och erforderlig drivenergi för kylmaskinerna ökar på grund av köldmediets lägre temperatur. I Japan har samma tank använts sommartid för att dygnslagra kyla genom is på tuberna, och vintertid för att dygnslagra värme i form av varmvatten. Ungefär samma lagrad energi per m<sup>3</sup> kan då erhållas för båda lagringsformerna.

En tredje typ av lager för kyla som börjat att introduceras i Nordamerika och demonstrerats även i Sverige (Studsвик) är lager för **issörja**. En tank för issörja är mycket mera kompakt än en vattentank, och kostar mindre per m<sup>3</sup> än en istank. Totalt sett erhålls därför en låg specifik kostnad för tanken eller tanken plus byggnadsvolymen, se kurva 2a, 2b i Figur 7.3, och dessutom möjligheten att kyla lokalluften till lägre temperaturer, vilket kan reducera kostnaden av lufttrummor m m. Dock fordrar systemet en speciell typ av förångare för kylmaskinen som är dyrare än konventionella enheter. Här pågår utveckling på flera håll.

Även kylsystem som betjänar flera byggnader kan bli aktuella ("fjärrkyla") och i deras fall utomhustankar användas som ger lägre kostnader per kWh (se kurva 1c resp 2c) än inomhustankar plus byggnadsvolym.



**Figur 7.3** Specifik investeringskostnad för dygnslagring av kyla, (1988 exkl moms; byggnadsvolym antas kosta lika mycket som lagret).

#### b) Säsongslager för kyla

Den internationellt mest uppmärksammade och använda typen av säsongslager för kyla är **akviferlagret**. I Sverige har flera akviferlager byggts under den gångna treårsperioden och ett par av dessa används för kombinerad lagring av värme och kyla, med värmepumpar/kylmaskiner för att producera kylan. Investeringskostnaden per lagrad kWh för själva akviferen är 0,3 à 0,8 kr/kWh.

Utländska studier tyder på att akviferer ofta kan bli lönsamma som säsongslager utan kylmaskin, genom att använda **naturlig vinterkyla** från luften (kyltorn) eller vatten (å, sjö). Även i Sverige kan detta vara en intressant variant i många fall.

Även **marklager i lera eller torv** med horisontella rör i flera lager som fryser markens vatteninnehåll kan med fördel användas som kylager eller kombinerade värme- och kylager. Som angivet i Tabell 7.1 beräknas kostnaden till 0,3 à 0,6 kr/kWh lagrad energi, exklusive värmepump, vilket är mycket lågt. Demonstration återstår dock. För de mer konventionella

varianterna är den specifika kostnaden betydligt högre även om framsteg gjorts under senare år.

### 7.3 Referenser

1. Peter Margen  
Värmelager för fjärrvärmenät och gruppcentraler.  
Kompendium, juni 1987.
2. Sören Andersson  
Värmelagring i mark. Tekniskläget och FoU-behov  
850171-9.
3. Peter Margen  
Ytjordvärme för gruppcentraler med grunda frusna lerlager.  
R56:1988.
4. P Wilén, A Johansson, I Rhen  
Teknikutveckling med vertikala rör i jord och berg  
R33:1988.
5. Om energisnåla hus och det nya tariffsystemet.  
Broschyr från Linköpings Tekniska Högskola,  
Vattenfall Östsverige och Boro AB.
6. L Eriksson och B Perers  
Projektering av gropmagasin för solvärmecentral  
Studsvik Rapport ED-87/48.
7. Peter Margen och Halvard Gedung  
Konvertering av oljebergrum i Oxelösund  
Jigastock 88 och NBS Seminarium 88.



## 8 Systemstudier och ekonomi

### 8.1 Värmelagring i fjärrvärmesystem

#### 8.1.1 Korttidslagring

Korttidslagring tillämpas redan i många av Sveriges fjärrvärmesystem och har tilltagit kraftigt på senare tid. Motiven är följande:

- a) Kapning av effekttoppen under kalla vinterdagar och därigenom begränsning i erforderlig installerad panneffekt,
- b) Bättre utnyttjning av baslastkällor med låga rörliga kostnader under de årstider då dessa källors effekt ej utnyttjas helt nattetid, men deras effekt ej helt räcker till under dagtid (vanligtvis vår och höst; gäller även för lastvariationer förorsakade av korttidsvariationer i utetemperaturen - cykellängd några dygn),
- c) Att åstadkomma jämnare drift av produktionsenheterna och mindre antal starter, för att öka verkningsgraden och minska förslitningen,
- d) För att utnyttja variationer i eltaxorna (eller kraftbörsens elpriser) för att öka intäkterna från elproduktionen av kraftvärmeverk. (Åstadkoms genom att öka elproduktionen dagtid och minska den nattetid under årstiden då kraftvärmeverket ej drivs för fullt, dygnet om.)

Redan motiv a) räcker ensamt till för att bekosta en korttidsackumulator för system under tillväxt, så att lagret kan ersätta nya pannor. Exempelvis kostar en ny topplastpanna ca 600 kr/kW. Ett korttidslager kan kapa spetslasten genom att leverera ca 6 kWh/kW och kostar t ex i storleken 60 MWd (= 10 MW x 6 h) ca 30 kr/kWh enligt Figur 7.1 i kapitel 7, vilket motsvarar bara  $30 \times 6 = 180$  kr/kW.

Motiv b) har fått minskad betydelse på grund av minskade oljepriser när det gäller produktionskällor för värme enbart, men räcker ändå som motiv när baslastkällans bränsle är billigt.

Typiskt kan ett korttidslager omsättas mellan 30 och 80 gånger per år<sup>1,2)</sup> under våren och hösten när belastningen oscillerar kring baslastkällans dimensionerande effekt, så att lagret kan laddas med baslastenergi nattetid och urladdas för att ersätta olja under dagtid. Det exakta antalet beror mest på lagrets storlek i förhållande till systemets storlek.

Tabell 8.1 ger några exempel baserade på 50 omsättningar per år, en prisnivå för bränsle år 2000 (ett "medelår" för lager byggt de närmaste åren) och antagandet att bränslepriset inklusive skatt och avgifter ökar med 1,5 %/år. Som synes ger oljeersättningen en stor vinst för lagret när lagret kan laddas med sopförbränningspannor eller värmepumpar, men bara knapp vinst när det laddas med kol. I praktiken ökar vinsten om andra funktioner som lagret kan uppfylla beaktas, t ex jämnare drift av pannorna, möjligheten att reducera den panneffekt som hålls i driftberedskap, tryckhållningsfunktionen m m.

Motiv d) har fått ökad betydelse genom de nyligen införda differentierade eltarifferna. Eftersom kraftvärmeverket är fullt belastat under vintern, kan den höga prisdifferentieringen av dagens taxor under vintern utnyttjas, varför bara de övriga säsongernas låga dygnsprisvariationer skapar extra intäkter. Antalet omsättningar beror på lagrets storlek i förhållande till kraftvärmeverkets värmeeffekt. Ref 1 ger ett exempel för ett kraftvärmeverk med elutbytesfaktor 1 (kombiverk eller dieselmotorer) och effekt ca 150 MW, som omsätts ca 100 gånger per år, vilket fordrar en lagerstorlek på ca 1 200 MWh. Vid en medelprisskillnad mellan dagel och nattel under veckodagar av 2 öre/kWh och kapital- och underhållskostnader för lagret av 8.8 %/år har denna typ av dygnslagring ett kapitaliserat värde av ca  $100 \times 0.02 \text{ kr/kWh} / (2 \times 0.088) = 11 \text{ kr/kWh}$  och kostar enligt Figur 7.1 i kapitel 7 ca 10 kr/kWh.

Den ger sålunda en mycket begränsad "vinst". Vinsten kan ökas något genom att minska lagrets storlek så att antalet omsättningar ökar. I praktiken fyller samma lager även andra funktioner vilket förbättrar lönsamheten. För kraftvärmeverk som har en elutbytesfaktor av bara 0.5, halveras det kapitaliserade värdet av denna typ av lagring, så att den inte blir lönsam.

En osäkerhetsfaktor i sammanhanget är dygnselprisvariationerna i det framtida energisystemet och taxornas anpassning därtill.

Den mest vanliga typen av korttidsvärmelager för fjärrvärmesystem är en ståltank vid atmosfärstryck med ångkudde för tryck- och nivåreglage. Ofta trycksätter det systemet och utnyttjas även som expansionstank och reservvattenförråd. Vissa mindre fjärrvärmesystem använder dock trycksatta tankar som förenklar driften men är dyrare.

De nya typer av groplager som tål höga temperaturer bearbetade inom BFRs program kan bli billigare än ståltanken och därigenom konkurrera med den, främst om groplagret kan utformas så att det undviker behovet av värmeväxlare. Dock fordras snabba insatser eftersom de flesta system som inte ännu har korttidslager torde skaffa dem inom de närmaste åren.

## 8.1.2 Långtidslager och kombinationslager

### a) *Laddning genom panna för billigt bränsle*

Den kraftiga säsongsvariationen i fjärrvärmesystemens last innebär att baslastkällorna vanligtvis inte utnyttjas till fullo under sommaren, men räcker ej till under vintern. Säsongslagring med en cykel per år förbättrar utnyttjning av baslastkällorna och minskar därigenom de rörliga kostnaderna. Minskade oljepriser har dock reducerat incitamentet för denna typ av lagring med en cykel per år, varför bara de billigaste typerna av lager kan bli lönsamma i dessa fall. Exempel av sådana typer av lager är konverterade oljebergum nära fjärrvärmenäten och i vissa fall borrhålslager bland högttemperaturlagren (se exemplen i Tabell 8.2 punkt 1 och 2), och akviferer med goda lokala förutsättningar bland lågttemperaturlagren som kräver värmepump.

### b) *Laddning genom kraftvärmeverk*

Punkt 4 i Tabell 8.2 belyser skattade förhållanden för ett litet (5 MW) dieselkraftvärmeverk, elutbytesfaktor 1, efter påbörjad kärnkraftavveckling. Vid beräkning av laddningskostnaden antas en elproduktionsverkningsgrad av 43 %, ett gaspris vid kraftvärmeverket under laddningssäsongen av 9 öre/kWh exklusive skatt, 2.9 öre/kWh gasskatt som tillämpas bara för värmeenergin enligt dagens skatteprincip 3.5 öre/kWh rörlig underhållskostnad och ett elpris under laddningssäsongen (sommarhalvåret) av 20 öre/kWh. Detta elpris motsvarar den rörliga kostnaden för ett kustförlagt gaskombikraftverk av kondensstyp med gaspris av 8 öre/kWh, 50 % verkningsgrad, 3 öre/kWh årligt underhåll och 4 % distributionstillägg, dvs  $(8 / 0.5 + 3) / 0.96$ .

Laddningskostnaden blir  $(9 / 0.43 + (2.9 / 0.85) + 3.5 - 20) = 7.5$  öre/kWh. Som synes ger säsongsladdning för kraftvärmeverk med en laddningscykel per år enligt detta kostnadsexempel beräknad vinst när lagret består av ett lämpligt konverterat oljebergum förutsatt att elutbytesfaktorn är hög och viss förlust för ett borrhålslager.

För kraftvärmeverk som har en lägre elutbytesfaktor än 1.0, minskar elintäkterna vilket ökar laddningskostnaden och försämrar ekonomin av säsongslagring.

Om kraftvärmeverket består av en enda enhet kan lagret även urladdas under den tid kraftvärmeverket är avställt för årlig översyn. Detta innebär att lagret

kan säsongsladdas två gånger per år under sen vår och tidig höst, och urladdas två gånger under sommaravställningen av kraftvärmeverket samt under vintern. Därigenom skapas ytterligare intäkter, vilket kan göra även borrhålslager lönsamma. Klarar kanallager i lera de erforderliga temperaturerna (vilket inte ännu är helt klarlagt) så blir dessa något billigare än borrhålslager per kWh och ger dessutom lägre värmeförluster. Därför kan dessa i så fall bli ekonomiska i fall där lämpliga markförhållanden finns.

c) *Kombinerad säsons- och korttidslagring*

Ofta kan viss del av långtidslagret även användas för korttidslagring, vilket ger ytterligare intäkter. Dock fordrar detta relativt hög effekt och flexibilitet. Vattenlager har dessa egenskaper, däremot att marklager av renodlad kanaltyp saknar dem. Därför behöver t ex borrhålslager ofta kompletteras med en vattentank eller vattentunnlar för dylika tillämpningar. Stora solcentraler för fjärrvärmenät kan möjligtvis bli en tillämpning för kombinerade korttids- och långtidslager i framtiden (Ref 4). Utan sådana lager kan inte solvärmecentraler svara för någon hög andel av nätets årsenergiförbrukning.

**Tabell 8.1** Exempel på ekonomi av korttidslagring för energisubstitution i fjärrvärmesystem.

Antaganden:

Energikostnadsnivå år 2000 i dagens penningvärde  
 Ersatt energi: Energi från oljepannor  $k_u = 22$  ö/kWh (EO5;  $\eta_e = 90$  %)  
 Systemstorlek: ca 100 MW max effekt  
 Antal omsättningar per år:  $N = 50$   
 Värmeförlust per cykel: försumbar (dvs  $\eta_L \sim 1$ )  
 Lagrets dimensionerande energi: 65 MWh (ej optimerad)  
 Kostnad för kapital och underhåll:  $f = 8.8$  %/år

1	2	3	4	5
Baslastkällan	Kostnad av baslastenergi  $k_L$ ö/kWh	Kapitaliserat värde av energi- <sup>*</sup> substitution  kr/kWh	Investeringskostnad i lagret (stål-tank, Fig E1) kr/kWh	Kapitaliserad vinst = (3)-(4)  kr/kWh
1. Söföförbränningspannor	4	102	30	72
2. Värmepumpar (VF = 3)	9	74	30	44
3. Kolpannor	14	45	30	15

<sup>\*</sup> =  $(k_u - k_L/\eta_L) N/f$

**Tabell 8.2** Exempel på ekonomi av säsongslagring för energisubstitution i fjärrvärmesystem.

Antaganden:

Energikostnadsnivå år 2000 i dagens penningvärde  
 Ersatt energi: Olja från oljepannor  $k_u = 22$  ö/kWh  
 Antal omsättningar per år:  $N_u = 1$   
 Lagrets dimensionerande energiuttag: 10 GWh (t ex 5 MW, 2 000 h)  
 Kostnad för kapital och underhåll:  $f = 8.8$  %/år

1	2	3	4	5	6	7
Baslast- källa	Kostnad av bas- last- energi  ö/kWh	Värme- för- lust**  %	Kapitali- serat värde av energi- substitu- tion* kr/kWh	Typisk kostnad*** konv olje- berg- rum kr/kWh	borr- håls- lager kr/kWh	Vinst = (5) - (6) kr/kWh
1. Spill- värme	1.5	} 21/25	~1.95	} 0.95	1.2	1.33/1.07
2. Söf- för- bränning	4		1.54/1.57			0.96/0.70
3. Värme- pumpar	9		0.89/0.81			0.25/-0.06
4. Kraft- värme (diesel)	7.5		1.09/1.03			0.45/-0.16

\* Som för Tabell 8.1, men  $N = 1$

\*\* Första värdet gäller med värmeförlust för berggrum, andra värdet borrhåslaget, i båda fallen efter ca 8 år.

\*\*\* Från Figur 2, Kapitel 7. Observera att kostnaden påverkas av lokala förhållanden.

### 8.1.3 Referenser

1. Peter Margen  
Värmelager för fjärrvärmenät och gruppcentraler.  
Kompendium 1987.
2. Peter Margen  
Ekonomisk analys av värmelager för fjärrvärmesystem.  
Rapport för STEV, november 1985.
3. LÅ Cronholm och A Östergren  
Samoptimering av kraftvärme och energilagring  
Rapport VK/85 för STEV, 1988.



4. T Claesson, S Gräslund, G Hultmark, T Jilar  
Säsongslagrad solvärme i Kungälv.  
BFR rapport R104:1988.

## 8.2 Värmelagring för gruppcentraler

Genomförda FoU-projekt visar att beträffande värmelager för gruppcentraler är ståltankar och jordgrovar de lagringsformer som ger bästa ekonomin. Dessa skall då användas som dygns- eller mellantidslager.

Värmelagring är intressant för att utjämna energiuttaget i tiden så att man bättre kan utnyttja "billig" värmeproduktion i gruppcentralerna. Det är även av intresse att lagra billig nattel då elpannor används för värmeproduktion. I samband med fastbränsleeldning kan värmelagring medföra drifttekniska fördelar. Med hänsyn till kostnadsaspekterna är detta dock endast aktuellt i större anläggningar.

Huruvida man väljer ett litet lager för enbart dygnslagring eller ett större lager för mellantidslagring beror på om man premierar korta återbetalningstider eller maximal total vinst.

Det från lagringssynpunkt gynnsammaste fallet är när lagret planeras som en del av en värmeproduktionsanläggning och därvid kan ges ett effektivvärde som basproduktionsanläggning.

Lokala värmelager vid stora abonnentcentraler för fjärrvärme är också ett alternativ till värmelagring vid värmeverken. Lönsamheten är i detta fall i högsta grad beroende på förutsättningarna för att anlägga värmelager dels centralt dels vid abonnentcentralerna. Möjligheterna att utnyttja energilagringsteknik, främst markvärmelagring, i bl a gruppcentraler bör uppmärksammas i den kommunala energiplaneringen.

Framtida insatser beträffande energilagring bör inriktas på de tekniska och ekonomiska möjligheterna att uppnå effektiva energisystem där gruppcentralerna ingår som resurser i området, normalt kommunens, energiförsörjning. Risken för suboptimeringar är stor i nuvarande energisystem. Nybyggnadsreglerna (BFS 1988:18) innehåller regler för hushållning av uppvärmningsenergi i byggnader. Hänsyn tas dock ej till behovet av elenergi för drift av värmeåtervinningsanläggningar m m.

Möjligheterna till värmelagring behandlas ej heller. I områden med kraftvärmeproduktion av elenergi kan nybyggnadsreglerna medföra orimliga



lösningar där eldrivna värmepumpar i välisolerade fjärrvärmvärmda flerbostadshus förbrukar kraftvärmeproducerad elenergi som i sin tur medför att överskottsvärme måste kylas i havet. I den kommunala energiplaneringen måste dessa frågor uppmärksammas. Det är först då man har en helhetssyn på problematiken som värmelagring i bl a anslutning till gruppcentraler kan belysas från ekonomisk synpunkt.

Beträffande tekniska lösningar av lagringsproblematiken i samband med gruppcentraler bör ytterligare insatser göras för att utveckla "standardiserade" lagringslösningar för olika lokala förutsättningar. Man skall med andra ord kunna presentera underlag för bygg- och VVS-projektörer så att man kan ta åt sig lagringstekniken i den normala projekteringen i samband med ny- och ombyggnader. I detta sammanhang måste man eftersträva enkla och driftsäkra anläggningar. Behovet av drivelenergi för värmepumpar och cirkulationspumpar måste uppmärksammas så att man får en helhetsbild av driftekonomin även i en framtid med högre elpriser.

## **8.3 Systemfrågor**

### **8.3.1 Allmänt**

Forskning och utveckling inom energilagringsområdet har hittills haft en stor bredd. Man har studerat ett flertal tänkbara lagertyper. I flera fall har experimentbyggnadsprojekt genomförts, varvid man i praktiken i full eller reducerad skala har kunnat verifiera de teoretiska beräkningarna. Forskningen har visat att lagertekniken i de flesta fall fungerar väl och de problem som finns med vissa tekniska lösningar förefaller möjliga att övervinna med relativt enkla medel.

I avsnitten 2 - 5 redogörs för teknikläget beträffande lagertyperna

- vattenlager,
- marklager,
- akviferer respektive
- kemiska lager och smältlager.

Som framgår av dessa avsnitt är den främsta anledningen till att den teknik för energilagring som utvecklats ej har fått något kommersiellt genombrott energiprissituationen. För flera av de undersökta lagertyperna för såväl korttids- som säsongslagring är enligt forskningsrapporterna, en förutsättning för lönsamhet att oljepriset överstiger 2 000 - 3 000 kr/m<sup>3</sup>.

En brist i den genomförda forskningen är att man i många fall utreder och utvärderar själva lagertekniken utan tillräcklig hänsyn till hur energilagren skall fungera i ett komplett energisystem. I flera energiprojekt har det visat sig att den nya lagringstekniken uppfyller de ställda förväntningarna, medan däremot stora brister uppstår i systemlösningarna när lagringstekniken skall integreras i konventionell installations- och byggt teknik.

Systemets funktion i praktiken är många gånger beroende av värmepumpars prestanda och reglerfunktionerna. Lönsamhetsbilden för ett energilager kan försämrats kraftigt vid exempelvis ofullständig reglering. Det ingenjörsmässiga utförandet av främst VVS-anläggningen och dess funktion i energisystemet är grundläggande för hur ett energilager kan utnyttjas.

### **8.3.2 Övergripande studier av potential och lönsamhet**

I referens 1 behandlas vilka möjligheter olika typer av värmelager har att spela en roll i de svenska energisystemen.

Flertalet fjärrvärmenät och blockcentraler kommer under vissa tider ej att ha fullt utnyttjade baslastproduktionsresurser som producerar energi vid en låg rörlig kostnad. Dessa värmeproducenter behöver, trots detta, använda topplastaggregat med väsentligt högre rörliga kostnader andra tider på året. Energilagrens viktigaste uppgift är att ersätta energi med hög rörlig kostnad med billig baslastenergi. Därutöver kan energilagren kapa effekttoppar och på så sätt minska erforderliga investeringar i topplastpannor.

En distinktion görs mellan högtemperaturlager som kan urladdas utan värmepump och lågtemperaturlager som kräver värmepump. Lågtemperaturlager används så gott som uteslutande för säsongslagring eftersom värmepumpapplikationen medför en så hög effektberoende kostnad att den ej är lämplig för uppgifter i korta tidsperspektiv, d v s dygns- eller mellantidslagring.

Lagringsenergin i lågtemperaturlager utgörs vanligtvis av värme från omgivningen, kommunalt eller industriellt avloppsvatten, eller frånluft från stora industrilokaler eller processer.

För lager vid högre temperaturer finns många tänkbara laddningskällor såsom sopförbränningspannor, högtemperaturspillvärme från industrier, fastbränslepannor, värmepumpar som hämtar energi från omgivningen, industrier m m. I ett högtemperaturdygnslager omsätts energin i genomsnitt 20-30 gånger per år, i ett mellantidslager 5-10 gånger samt i ett säsongslager

en gång per år. Lagringsförmågan är cirka 0,01 % respektive 0,1 %, respektive 10 % av systemens årsenergibehov.

Ståltankar och jordgropar är vanligtvis de bästa lösningarna för renodlade dygns- och mellantidslager med ett visst företräde för ståltankar för dygnslagring i mycket stora system, medan jordgropar normalt är fördelaktigast i andra applikationer.

För säsongslagring är lågtemperaturlagring i form av borrhålslager, lerlager och akviferlager aktuella. De geologiska förutsättningarna är avgörande för vilken typ som ger bästa ekonomin.

Bergrum fyllda med vatten eller stenblock och vatten har svårt att konkurrera med ståltankar och jordgropar för lagringsvolymerna upp till 30 000 m<sup>3</sup> som vanligtvis räcker för dygns- och mellantidslagring. I större lager har bergrummen svårt att konkurrera med borrhålslager. Det finns dock en nisch även för bergrum, nämligen mellantidslager för mycket stora system - lägst ca 700 MW effektbehov, där ren mellantidslagring fordrar volymer på i storleksordningen 100 000 m<sup>3</sup>. I system eller energibehov på ca 1 000 GWh/år (max effektbehov knappt 400 MW) är framtidsutsikterna goda för högtemperaturlager där gratisvärme eller kolvärme används. Om lagren görs så stora att säsongslagringen blir huvuduppgiften, uppnås den bästa ekonomin.

För mindre system med effektbehov på 30-40 MW är de ekonomiska förutsättningarna för säsongslagring sämre, men kombinationslager med flera funktioner eller rena korttidslager kan vara intressanta.

Huruvida man väljer ett litet lager för enbart dygnslagring, ett större lager för mellantidslagring eller ett stort lager primärt för säsongslagring beror på huruvida man premierar kortaste återbetalningstider eller maximalt total vinst.

Även referens 4 behandlar energilagrens möjligheter att effektivisera de svenska energisystemen. I detta fall begränsar man sig till potentialen för säsongslagring i berg för fjärrvärmesystem större än 25 MW.

En nödvändig förutsättning är enligt utredningen att det finns tillgång till billig laddningsenergi i form av spillvärme, sopförbränningsvärme, kraftvärme eller kolvärme.

Projektet har visat att utgående från värmetekniska och geologiska förutsättningar skulle tekniken vara intressant för 1,5 - 2 TWh av Sveriges

årliga fjärrvärmeproduktion, varav huvuddelen härrör från system större än ca 200 MW värme, där man kan anta att kraftvärmeproduktion kommer att bli vanligt på slutet av 1900-talet. Totalt skulle säsongsvärmelagringen vara intressant på 30-40 orter.

I utredningen har vid lönsamhetsvärderingarna av säsongslagren för fjärrvärmesystemen ej hänsyn tagits till de möjligheter till korttidslagring som också erbjuds.

Beträffande kostnader bedömer utredarna att man ej kan förvänta sig att anläggningskostnaden för värmelagring med hittills studerad teknik kan komma att understiga 1 kr/kWh lagringskapacitet ens vid gynnsamma förutsättningar i stora system. Kostnaden, inklusive alla kostnader för anslutning av lagret, ligger troligen i ett normalfall under gynnsamma omständigheter på nivån ca 1,50 kr/kWh lagringskapacitet.

Det från lagringssynpunkt gynnsammaste fallet är när lagret planeras som en del av värmeproduktionsanläggningen och kan ges ett effektvärde som basproduktionsanläggning. I ett sådant gynnsamt fall är dock ej värmelager aktuella vid effektbehov som motsvarar mindre än 2.000 timmars utnyttningstid. För det fall att basproduktionseffekt redan finns utbyggd skall värmelagret endast konkurrera mot rörliga bränsleprisskillnader och utrymmet för värmelagring blir då mindre.

En alternativ möjlighet till värmelager i fjärrvärmesystem är lokala lager i anslutning till stora och medelstora abonnentcentraler. Syftet med sådana lager skulle vara att sommartid billig centralt producerad värmeenergi skulle distribueras och lagras lokalt för senare lokalt utnyttjande under vintern. Sådana lager blir i normalfallet så små att de vid tömning endast kan tjäna som värmekälla för en värmepump. Om ett sådant system blir fullt utbyggt skulle värmeverken i huvudsak fungera som spetsproduktionsanläggning under vintern medan den under sommaren lokalt lagrade energin används som baslast. För att uppnå lönsamhet med en sådan systemlösning krävs en kraftigt säsongsdifferentierad fjärrvärmes taxa. Den rörliga energikostnaden måste vara 0,15-0,20 kr/kWh lägre på sommaren än under vintern för att det skall bli lönsamt för konsumenten.

Förutsättningarna för värmelagersystem med kraftvärmeproduktion är gynnsammare. En förlustfri säsongslagring av värme skulle innebära dels att all olja ersätts av fastbränsle såväl under topplasttid som sommartid och dels att det finns möjlighet att producera mer el och koncentrera produktionen mot vinterperioden.

En samkörning av ett kraftvärmeverk med ett säsongslager har den nackdelen att man får förhöjda fjärrvärmemetemperaturer vid uppladdning av lagret mot slutet av en laddningsperiod samt vid urladdning vintertid.

Kraftvärmeprocessens elverkningsgrad blir vid dessa tillfällen lägre. I utredningen har denna effekt beräknats för olika dimensioneringsfall. Det förefaller som om säsongslagringen påverkar kraftvärmeproduktionen i begränsad omfattning om lagervolymen inte överstiger 10 % av årsvärmebehovet. Säsongslagringen är dessutom från rörlig kostnadssynpunkt mindre gynnsam vid stora kraftvärmeverk än vid små.

Den optimala säsongslagervolymen kommer att öka med ökande eltariffer. På grund av den starkt begränsade energimängd som krävs för att täcka spetsvärmebehovet kommer lagerstorleken dock att hålla sig inom relativt snäva ramar. En marginalutbyggnad av lagerstorleken innebär snabbt mycket korta drifttider. Härigenom slår de fasta kostnaderna hårt.

Eftersom ökade eltariffer också medför att ett kraftvärmeverk dimensioneras för större effekt utvecklas säsongslagren mer mot spetsvärmelager.

Resultatet visar att den optimala lagervolymen motsvarar 5-7 % av fjärrvärmenätets årsvärmebehov.

Om enbart kraftvärmeverket och oljebaserad värmeproduktionskapacitet finns i nätet kan säsongslagret leverera värme både vintertid och för sommarperioden. Säsongslagret kommer då maximalt att leverera värme motsvarande ungefär 15 % av årsenergin. Olja är alltid lämplig för den yttersta spetsvärmeproduktionen.

Genom samkörning med säsongslagret kommer kraftvärmeverket att producera mer el under ett normalår. Med beräkningsförutsättningar enligt utredningen ökar elproduktionen med storleksordningen 5-6 %. Ökningen äger rum under höstperioden.

Om fjärrvärmesystemet inte innehåller några fastbränsleeldade hetvattencentraler eller värmepumpar kan elproduktionen maximalt ökas ytterligare omkring 5 %.

Om den prognoserade elutnyttningstiden för ett kraftvärmeverk utan lager kan uppskattas till 4 500 timmar/år kan den ökas till 4 700-5 000 timmar/år med lager.

Elutbytet vintertid kommer dock att sjunka med 1-2 %.



På grund av bland annat de relativt små energibidragen innebär säsongsvärmelagringen inga avgörande minskningar av de totala el- och värmeproduktionskostnaderna. Lagret kan huvudsakligen ge ett bidrag då ingen annan produktion än oljeeldade hetvattencentraler finns förutom kraftvärmeverket.

Säsongslagring i fjärrvärmenät behandlas även i referens 5. Där har man inventerat potentialen för storskaliga högttemperaturlager som laddas med industriell spillvärme, sopförbränningsvärme eller annan värme producerad till låg kostnad.

Den tekniska potentialen för de aktuella lagertyperna har uppskattats:

- lagerbehov vid sommarproduktion av kolvärme för ersättning av olja ca 1 400 GWh fördelade på 25 orter
- lagerbehov vid sommarproduktion av torv- och flisvärme för ersättning av olja ca 700 GWh fördelade på 29 orter
- lagerbehov för sopvärme, industriell spillvärme och värme från värmepump och avloppsvatten ca 700 GWh fördelat på 14 orter.

Den totala tekniska lagringspotentialen är således ca 2 800 GWh fördelat på ett 70-tal orter. Man har bedömt att i 1984 års prisnivå är endast sopvärme samt industriell spill- och avloppsvärme som lagras för att ersätta olja, intressant. Potentialen är i detta fall 700 GWh fördelat på 14 orter.

I de fall det finns tekniska förutsättningar för kol-, torv- eller flisvärme är de ekonomiska villkoren i de flesta fall sådana att energilager ej är intressanta. Under förutsättning att lång avskrivningstid, låg realränta och måttliga kalkylmarginaler kan accepteras synes dock lagring av kolvärme för oljeersättning kunna bli lönsam. En minsta lagerstorlek torde dock behöva vara 30-40 GWh (550 000-700 000 bergrumsvolymer vid temperatursvinget 50°C) med hänsyn till värmeförluster och skalfaktor avseende anläggningskostnad. Den ekonomisktekniska potentialen för lagring av kolvärme skulle då kunna uppskattas till ca 1 100 GWh fördelat på ett 10-tal orter.

I referens 7 behandlas ekonomin för energilagring i mindre energisystem, 0,5 - 20 MW.



Resultatet visar att dygnslagring av värmeenergi ger god ekonomi vid lagring av nattel för el-abonenter. Det gäller även för system med fastbränsleeldning. Utvecklingsmöjligheterna är särskilt goda för gropmagasin med stålfoder.

För säsongslagring utgör den lokala tillgången på billig sommarenergi en förutsättning för ekonomin.

Synergieffekter vid kombination av korttids- och långtidslager är viktiga för lönsamheten.

### 8.3.3 Fjärrvärmeapplikationer

I referens 10, 12 och 22 behandlas möjligheterna för s k "kall fjärrvärme" vilket innebär att fjärrvärmen produceras med värmepumpar som utnyttjar grundvatten eller vattenmagasin.

De tre rapporterna visar att om det finns tillgång till grundvatten inom närområdet, kan tekniken med "kall fjärrvärme" vara ett intressant alternativ till konventionell fjärrvärme. Däremot är anläggningarna ej konkurrenskraftiga mot egen oljeeldning med nuvarande priser på olja och el. Dessutom ingår i systemen eldrivna värmepumpar och elpannor, vilket är en nackdel med hänsyn till framtida kraftigt höjda elpriser.

Sammanfattningsvis förefaller kunskapen om tekniken tillräcklig för tillämpning i större skala. Några direkta tekniska problem föreligger ej. Framtidsutsikterna, med hänsyn till lönsamheten, är dock dåliga.

Av referens 16 framgår att det finns möjligheter att uppnå lönsamhet för lokala energilagring i fjärrvärmesystem.

Principen är att man genom installation av lervärmelager vid abonnentcentraler för fjärrvärme skall uppnå bättre ekonomi än i konventionella fjärrvärmesystem. Man ersätter dyr toppproduktion av värme med billig lagrad värme producerad under låglasttid.

Studien visar att de lokala förutsättningarna för energilagring och fjärrvärmemetaxans konstruktion är av avgörande betydelse för lönsamheten.

Systemet förutsätter värmepump för laddning och tömning av lagret.

### 8.3.4 Solvärmeapplikationer

Flera projekt behandlar energilagrets roll i solvärmesystem.

I referens 3 redogörs för en integrerad lösning av ett gropmagasin för energilagring med solfångarna placerade på "locket".

Erfarenheterna från säsongslagring av solvärme i berggrum redovisas i referens 17. Det gäller "Lyckebo-projektet" i Uppsala där solvärmens utnyttjas i ett fjärrvärmesystem. Utvärderingen visar att tillgängligheten för distribuerad värme till fjärrvärmesystemet blev 100 %. Utbytet från solfångarfältet uppfyller ställda krav och systemet i övrigt motsvarar förväntningarna. Tillgång till höga temperaturer i ett solvärmelager säkerställs om en bra skiktning av lagringsvattnet upprätthålls. Värmeförlusterna från lagret har dock varit större än beräknat.

Beträffande värmeförluster, bergstabilitet, vattenkemi och vegetationspåverkan har inga förändringar i lagrets omgivning kunnat påvisas under perioden 1983-1986.

Beträffande ekonomin konstateras att kostnadsreduktioner har uppnåtts för komponenter och system under senare tid som skulle möjliggjort att solfjärrvärmesystemet skulle ha kunnat byggas med hög teknisk kvalitet och med betydligt bättre ekonomi 1987 än då anläggningen byggdes 1983. En värmekostnad på drygt 40 öre/kWh bedöms vara möjlig att presteras.

I referens 18 görs en lägesavstämning av den storskaliga solvärmetekniken i Sverige.

Beträffande solvärmelagret finns erfarenheter av isolerad markgrop, isolerad betongtank, isolerad berggrop respektive oisolerat berggrum i fyra anläggningar.

Förstudier för flera anläggningar har genomförts där plana solfångare genomgående används och där systemuppbyggnaden är väsentligt förenklad jämfört med tidigare system. För mindre anläggningar som kräver ett isolerat lager föreslås nya konstruktioner av groplager där framför allt isolerade lager kräver fortsatt utveckling. För en större anläggning föreslås vattenfyllt oisolerat berggrum som redan finns i Lyckebo-projektet.

Kostnadsreduktioner och förenklingar i själva systemlösningen har fått större utrymmen än tidigare och anläggningarna har dimensionerats för en

värmetekningsgrad i storleksordningen 70-80 % i stället för 100 % som utgjort dimensioneringsförutsättning i flera av de befintliga anläggningarna.

Vid förprojektering av solvärmecentraler placerade i södra Sverige med kravet att täcka 70-80 % av värmebehovet kan riktvärdet 18 m<sup>3</sup> lagervolym i vatten/kWh anslutningseffekt gälla.

Mindre anläggningar med 100-3 000 kW anslutningseffekt i värmelasten, kräver värmeisolerade lagertyper för att minska värmeförlusterna. För dessa värmelager med vattenvolymer mellan 2 000-60 000 m<sup>3</sup> krävs ännu utveckling av nya konstruktioner med låga anläggningskostnader.

För större anläggningar med mer än 5 MW anslutningseffekt i värmelasten rekommenderas vattenfyllda oisolerade bergtrum som värmelager. Sådana bergtrum i storleksordningen 100 000 m<sup>3</sup> används redan i dag som oljelager varför byggtekniken är väl etablerad och anläggningskostnaderna förhållandevis låga.

För att erhålla en värmekostnad på 0,40 kr/kWh i en mindre anläggning med isolerat vattenlager får lagerkostnaden vara 190-240:-/m<sup>3</sup>.

För att erhålla en värmekostnad på 0,30 kr/kWh i en större anläggning med isolerat vattenlager får lagerkostnaden inte överstiga 100:-/m<sup>3</sup>.

I Falkenbergs centralort sker värmeproduktion, ca 25 GWh, huvudsakligen med flis och olja. Enligt referens 19 är det möjligt att ersätta 8 - 9 % av energin med solvärme. För energilagring avser man att använda en stålackumulator på 1 100 m<sup>3</sup> motsvarande 200 l lagervolym per m<sup>2</sup> solfångaryta.

Referens 23 avser utredningar angående värmeförsörjning av Kungälv. Det årliga värmebehovet uppgår till 56 GWh/år 1990.

Huvudalternativet för värmeförsörjning av Kungälv är säsongslagrad solvärme. Solvärmeomvandlingen sker enligt förslaget i 126 000 m<sup>3</sup> plana solfångare. Värmen säsongslagras i bergtrum med den totala volymen 400 000 m<sup>3</sup>. På detta sätt uppnås en täckningsgrad med solvärme på 75 %.

Följande alternativ till solvärme har undersökts:

- Spillvärme från en processkemisk industri.

- Kylvatten från processerna kan utnyttjas som värmekälla i en värmepumpanläggning.
- Naturgasdistribution via gasnät direkt till lokala gaspannor i bebyggelsen alternativt naturgas eller fjärrvärmecentral.
- Ett fjärrvärmesystem vars värmeproduktion baseras på fastbränsle i form av träflis.
- Konvertering av några av de befintliga gruppcentralerna till gasoleldning.

För närvarande täcks gruppcentralernas värmeproduktion genom olja till 89 % och resterande 11 % av elenergi i elpannedrift. Rapporten redovisar tekniska, ekonomiska och miljömässiga konsekvenser av de olika alternativen. Man behandlar även försörjningsfrågorna i sammanhanget. Kostnaden för värmeproduktion med solvärme enligt huvudalternativet uppgår till 0,42 kr/kWh.

Värmekostnaden för solvärmealternativet ligger med dagens priser 50 % över värmekostnaden för övriga alternativ. Man har dock förhoppningar om att rationaliseringar och kostnadsänkningar vid solfångartillverkningen på grund av de stora leveranser som erfordras kan komma att sänka kostnaderna väsentligt.

Solvärmealternativet med endast 25 % bränslebaserad värmeproduktion ger markant minskning av föroreningsutsläppen. Naturgas som tillsatsbränsle är bäst för lokalmiljön i Kungälv. Kväve och koldioxidutsläppen minskar till 15-20 % av dagens utsläpp vid oljeeldning och övriga utsläpp, t ex tungmetaller försvinner helt.

### **8.3.5 Integrerade energisystem med energilagring för enskilda fastigheter och bostadsområden**

I referens 6 redogörs för möjligheter och hinder för introduktion av markvärmeteknik i gruppcentraler och vilka åtgärder som krävs för att tekniken på ett riktigt sätt skall uppmärksammas och utnyttjas.

Enligt utredningen bör man i den kommunala energiplaneringen ta hänsyn till möjligheterna att utnyttja markvärmetekniken i samband med planering av nya fjärrvärmesystem.

Den markvärmeresurs som är svårast att beskriva är grundvattentillgångarna och möjligheten och begränsningarna för deras utnyttjande.

Tillståndsfrågorna som är knutna till markvärmeutnyttjande behandlas. Det gäller tillstånden för att få utnyttja värmepump teknik, grundvatten m m. Dessutom berörs finansieringsmöjligheterna för markvärmetekniken.

Begränsande för utnyttjande av olika markvärmekällor är:

- för ytjordvärme i anspråkstagande av stora och välbelägna markytor där möjligheterna för annat markutnyttjande starkt begränsas
- för bergvärme de relativt höga kostnaderna
- för grundvattenvärme behovet av förundersökningar för att resursens storlek skall kunna fastställas.

Referens 8 avser utvärdering av ett system där en friliggande äldre villa med bergvärmeanläggning har utrustats med en enkel luftvärmekollektor. Kollektorn utnyttjas för att återladda energi till berget och för att utgöra en parallell värmekälla med berget när värmepumpen arbetar.

I rapporten konstateras att tekniken ej är ekonomisk försvarbar för enhålssystem. I sådana anläggningar är det bättre att fördjupa borrhålet i stället för att installera en luftvärmekollektor.

Referens 9 avser ett systemtekniskt experiment med syfte att i full skala demonstrera ett energisystem i ett nyproducerat flerbostadshus med 71 lägenheter. Projektets tyngdpunkt är en överglasad gård och säsongslagring i borrhål i berg laddat med i huvudsak solvärme via värmepumpar.

Som direkt värmekälla för värmepumpen utnyttjas sommarens värme i den överglasade gården. Värmen i gården utnyttjas som värmelager då lufttemperaturen i gården överstiger + 20°C. Under övrig tid används uteluft som värmekälla för värmepumpen.

Projektet är ett exempel på hur ett lokalt energilager kan utnyttjas i energisystemet för ett flerbostadshus.

En iakttagelse är att komplicerade energisystem av den aktuella typen kräver stor andel drivenergi till nackdel för energihushållningen.

För små och medelstora borrhålsvärmelager som anläggs från markytan kan det från utrymmessynpunkt vara önskvärt att borra hålen i kvastform med litet avstånd i markytan och större avstånd vid hålens botten. Denna möjlighet har utnyttjats i detta projekt. De termodynamiska egenskaperna försämras dock något jämfört med parallellt borrade lager.

Från utvärderingen av projektet, som ej framgår av referens 9, har framkommit att energilagrets funktion är tillfredsställande. Däremot har anläggningen varit behäftad med allvarliga systemtekniska brister såsom felkopplade varmvattenackumulatörer, komplicerade och felaktiga reglerfunktioner m m. Detta har medfört att energilagret ännu ej kunnat utnyttjas på avsett sätt.

Referens 13 redovisar en systemlösning för uppvärmning av flerbostadshus.

Den aktuella anläggningen utgörs av ett värmepumpsystem som är enda uppvärmningskälla för bebyggelse bestående av 114 lägenheter. Värmekälla för värmepumparna utgörs av en myr i vilken plastslangar lagts ned som värmekollektor. Husen som är av typ radhus i sju kvarter har försetts med plastslangar under yttertaket, s k klimatbur. Dessa utgör därigenom solvärmekollektorer.

Värmepumparna är av en speciell typ, s k jordvärmeugnar som har placerats i plåtkasuner i mark.

Systemlösningen är förhållandevis komplicerad. Varje värmepump ("jordvärmeugn") har, förutom att vara kopplade till två lägenheter, även inkopplats i ett kretssystem för hela kvarteret. Även varmvattenberedningen är systemkopplad.

En utvärdering visar att den komplicerade systemlösningen har medfört ogynnsamma driftförhållanden för värmepumparna som bl a resulterat i låga årsvärmefaktorer.

Referens 15 utvärderar ett system för förvärmning av tilluft med hjälp av solfångare och markenergilagret. Förutom värmning av tilluften vid värmebehov ger systemet även en viss kylning av tilluften den varmare delen av året.

Tekniken har tillämpats på fyra småhus i Västerås.



Resultatet visar att tilluftens temperatur är ganska oberoende av utetemperaturen. Vidare konstateras att anläggningarna fungerat störningsfritt efter en del injusteringsproblem.

Referens 20 behandlar energilagring i grunda lerlager där fyra plaströr placeras i en rörgrav på djupet 1-3 meter och med ett horisontalavstånd på ca 1 meter. Under värmeuttaget under vintern fryser större delen av marken vilket leder till ett mycket högt energiuttag per m<sup>3</sup>.

För att återladda lagret utnyttjas en energikollektor av plaströr som läggs på marken med några centimeters jordtäckning ovanför lagret för att återladda lagret och för att försörja den värmepump som används för värmecentralens energibehov under den varmare årstiden.

Ekonomi för systemet undersöks för en gruppcentral med årsenergibehovet 5 GWh och jämförs med system som har lerlager med vertikala kanaler och luftbatterier, system utrustat med pump utan lager samt system med enbart oljepannor. Jämförelserna sker under varierande förhållanden beträffande temperaturkrav för gruppcentralen, energipriser och markförhållanden. Det visar att det föreslagna systemet beräknas bli billigare än de konkurrerande systemen över det undersökta parameterområdet.

Ekonomi för systemet kan ytterligare förbättras om anläggningen utnyttjas för kylning sommartid för exempelvis luftkonditionering.

Eftersom lerfyndigheter med åtminstone några meters djup förekommer i stora delar av landet är förutsättningarna goda för systemtekniken. Den erforderliga markytan är trots lagrets ringa djup inte nämnvärt större än ytan för konventionellt lerlager med 30 meter djupa vertikala kanaler eftersom infrysningen ökar energilagringen i det grunda lagret med ca faktorn 8 jämfört med "konventionellt lerlager".

Referens 26 behandlar lönsamheten för att komplettera en uteluftvärmepump på ca 1 MW med ett säsongsvärmelager i berg. Syftet är att öka värmepumpens tillgänglighet under kalla perioder samt att förbättra värmefaktorn. Värmelagret skall kunna laddas sommartid med hjälp av värmepumpen.

Resultatet av projektet visar att merkostnaden för anläggandet av värmelagret och den därmed något mer komplicerade systemlösningen ej i tillräcklig utsträckning betalar sig i form av förbättrad driftekonomi. System med uteluftvärmepump i kombination med säsongsvärmelagring framstår således som olönsamma i jämförelse med endast uteluftvärmepump.

Referens 27 omfattar en undersökning av tänkbara energilösningar i Starrbäckssängsområdet på Gärdet i Stockholm har utretts. Den planerade bebyggelsen omfattar ca 700 lägenheter och ca 45 000 m<sup>2</sup> kontor.

Utredningen har undersökt följande energialternativ:

- Borrhålsvärmelager där billig fjärrvärmereturvärme sommartid värmer berget och värmen tas tillvara under vintern.
- Lervärmelager där fjärrvärmereturvärme magasineras sommartid i det lerskikt som finns i området.
- Konstgjord akvifär där värmepump delvis värmer husen genom att frysa grus och vatten i en akvifär. Isen kyler kontor sommartid.
- Fjärrvärmereturen används enbart för uppvärmning.

Av de undersökta alternativen var det bara uppvärmning med enbart fjärrvärmereturen samt den konstgjorda isakvifären som visade sig intressanta. Uppvärmning med enbart fjärrvärmereturen bedömdes vara mycket intressant om en lägre taxa kan erhållas för denna uppvärmningsform.

I referens 29 studeras möjligheterna att ansluta ett bostadsområde till ett fjärrvärmenät med ny teknik. För detta ändamål införs en lågtempererad distributionsteknik med en maximal framledningstemperatur om 55 - 60°C samtidigt som inlagring i lerlager kan göras för säsongslagring. Detta skulle möjliggöra att fjärrvärmeverkets baslastproduktionsanläggning skulle få förlängd utnyttjningstid. Även underlaget för längre driftstider för kraftvärmedrift kan på detta sätt göras mer gynnsamt.

### **8.3.6 Kombinerad kyl- och värmelagring samt enbart kylagring**

Lagring av värme innebär som regel att man har en varm del och en kall del i lagret. Man lagrar alltså alltid både värme och kyla. Det är tillämpningen och och temperaturnivån som avgör vad lagret kallas. Vanligen är syftet att lagra värme. Lagrets kalla del får då en temperatur något högre än returtemperaturen från de värmeupptagande anordningarna. Om en värmepump utnyttjas vid uttag av värme kan lagrets kalla temperatur i vissa fall styras så att den är direkt användbar för kyländamål. Detta förutsätter att

lagret inte ger för stora temperaturförluster. De lagertyper, som kommer i fråga, är främst de som har en konvektiv inre värmeöverföring såsom tankar, groplager och akviferer. De lagertyper, där den inre värmeöverföringen sker genom ledning ger som regel så stora temperaturförluster att en värmepump/kylmaskin krävs vid både uttag och laddning. Borrhållagret, som är under uppförande i Upplands-Väsby, är ett exempel på att denna senare tillämpning också kan vara ekonomisk.

När värmepump/kylmaskin endast krävs i ena riktningen blir den driftekniska fördelen uppenbar. Om lagret har en god effektkarakteristik kan omfattande installationer av kylmaskiner ersättas med enkla pumpar och värmeväxlare vilket ger ett bra bidrag till lagerinvesteringen.

Det enklaste systemet består av ett lager för kyla, som vintertid kyls mot omgivande luft eller ytvatten. Detta är en modern form av den gamla jordkällaren. En kontorskylanläggning under uppförande i Sollentuna (Ekplantan), utnyttjar denna princip på enklast tänkbara sätt genom att en naturlig grundvattenström beräknas föra bort det kylvärme som tillförs akviferen.

Exempel på kombinerade kyl- och värmeanläggningar är akviferlagren i Solna (SAS) och Malmö (Triangeln). Byggbranschen är ofta skeptisk till förslag att kyla utan kylmaskin. Från Solna-anläggningen, som varit i drift i 2 år, har speciellt erfarenheterna av kylfunktionerna varit mycket goda.

### 8.3.7 Referenser

Tabell 8.3 Projekt som bl a behandlar systemfrågor.

Ref. nr	BFR-projekt nummer	Förkortad projekt titel	Författare	Rapport
1	830555-7	Rollen för olika typer av värmelager i svensk energiförsörjning, ekonomisk analys	Peter Margen	R3:1985
2	841090-0	Värmelagers roll i energisystem, beräkningsmetoder	Björn Svedinger m fl	R68:1985
3	790940-3	Utveckling av solvärme-centraler, förstudie	Bengt Perers m fl	R77:1985

Tabell 8.3 Forts.

Ref. nr	BFR-projekt nummer	Förkortad projekttitel	Författare	Rapport
4	831598-9	Potential för säsongslagring av värme i svenska fjärrvärmesystem	Hans Hydén m fl	R112:1985
5	830747-1	Säsongslagring av kolvärme och spillvärme i fjärrvärmenät, kostnadsanalys och potential	Sören Andersson m fl	R113:1985
6	840293-9	Markvärmeteknik i gruppcentraler i Södertälje och Strängnäs, införande och hinder	Hans Hydén	R2:1986
7	850086-6	Ekonomi för energilagring i mindre system	Peter Margen	R3:1986
8	830748-7	Bergvärmebrunn med luftvärmekollektor, fältmätning	Johan Tollin	R71:1986
9	821119-2	Stockholmsprojektet kv Höstvetet	Johnny Kellner m fl	R81:1986
10	831513-3	Kall fjärrvärme med grundvatten, Timrå kommun, förstudie	Christer Gedda m fl	R85:1986
11	831411-9	Signalanalys för dimensionering av värmelager	Bengt Simonsson m fl	R90:1986
12	840039-2	Kallfjärrvärme för Djurås Centrum, förprojektering	Kjell Norbäck	R96:1986
13	810001-8	Sol- och jordvärmeanläggning för bostadsområde i Sveg, mätning och utvärdering	Ingemar Holmlund m fl	R108:1986
14	850233-8	Solvärme med årslagring i Sundby	Håkan Elfström m fl	R34:1987
15	820453-8	Förvärmning av tilluft med solfångare och marklager för småhus, mätning och utvärdering	Agneta Persson	R62:1987
16	850903-0	Satellitvärmelager. Lokal värmelagring i ett fjärrvärmesystem	Karl-Henrik Hofgren m fl	R82:1987

Tabell 8.3 Forts.

Ref. nr	BFR-projekt nummer	Förkortad projekttitel	Författare	Rapport
17	850832-6	Lyckeboprojektet. Solfjärrvärme med säsongslagring i berggrum, utvärdering, erfarenheter	Christer Brunström m fl	R86:1987
18	850420-5	Storskalig solvärmeteknik i Sverige. Systemuppbyggnad, dimensionering	John-Olof Dalenbäck	R24:1988
19	870905-2	Solvärme med korttidslager i Falkenberg. Förstudie	Tommy Claesson	R27:1988
20	860674-3	Ytjordvärme för gruppcentraler med grunda, frusna lerlager. Förstudie	Peter Margen	R56:1988
21	860753-7	Signalanalys för dimensionering av lager i energisystem	Per-Olov Larsson	R78:1988
22	810752-4	Kallfjärrvärme från stenbrott i Kågered. Utvärdering	Bengt-Olof Hecktor m fl	R92:1988
23	851074-5 870438-1 880367-2	Säsongslagrad solvärme i Kungälv	Tommy Claesson m fl	R104:1988
24	850307-9	Driftuppföljning av värme- och kylsystem med akvifärlager i Kristianstad	Lars Kronqvist m fl	R6:1989
25	850215-7	Värmeåtervinning ur storgruvan, Norberg	Lena Laurin	R10:1989
26	850103-3	Borrhålsvärmelager i berg för gruppcentral i Nacka	Hans Hydén m fl	Byggdok.
27	860932-4	Idéer för värmeförsörjning av Starrbäcksången	Göran Werner m fl	Byggdok.
28	861029-3	Integrerat energisystem i Rotebro	Erik Barkman m fl	Byggdok.
29	870037-7	Värmeförsörjning i Sätunaområdet	Jan Thorburn	R53:1989







**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 881108-9  
från Statens råd för byggnadsforskning till Kjessler &  
Mannerstråle AB, Solna.**

**R54:1990**

**ISBN 91-540-5218-1**

**Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm**

**Art.nr: 6801054**

**Abonnemangsgrupp:  
Ingår ej i abonnemang**

**Distribution:  
Svensk Byggtjänst  
171 88 Solna**

**Cirka pris: 59 kr exkl moms**