



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

R56:1988

Ytjordvärme för gruppcentraler med grunda frusna lerlager

Förstudie

Peter Margen

R
Drott

INSTITUTET FÖR
BYGGDOKUMENTATION

Accnr

Plac

Per

Byggforskningsrådet

R56:1988

YTJORDVÄRME FÖR GRUPPCENTRALER
MED GRUNDA FRUSNA LERLAGER

Förstudie

Peter Margen

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 860674-3
från Statens råd för byggnadsforskning till Margen
Consult AB, Nyköping.

REFERAT

Långa horisontella plaströrsslingor lagda i ett antal nivåer i en och samma operation har visat sig leda till mycket låga beräknade kostnader per kWh lagrad energi för värmelager i torv (Bengt Rydell m fl) när torven tillåts frysa.

Nuvarande rapport studerar liknande teknik tillämpad till grunda lerlager. Lagret återladdas genom en kollektor av plaströr lagda i markplanet ovanför lagret. Kostnader beräknas med hjälp av underlag från torvprojektet, och lagret optimeras. Själva lagret kostar ca 0.3 kr/kWh lagrad energi när markförhållandena är gynnsamma.

Ekonomi för systemet beräknas för en gruppcentral med energibehov 5 GWh/år. Den jämförs med ekonomi för system med lager i lera med vertikala kanaler enligt senaste teknik (lagret i Söderköping) med och utan användning av värmepump för återladdning av lagret; med ekonomi för luftvärmepumpar utan lager och med ekonomi för gruppcentraler som innehåller endast oljepannor. Jämförelsen visar att systemet med grunda lerlager och markkollektor ger den lägsta beräknade energikostnaden av samtliga studerade alternativ över ett brett område av energipriser, gruppcentraltemperaturer och markförhållanden. Eftersom grunda leryndigheter har en stor utbredning i Sverige anses tekniken mycket lovande för gruppcentraler av vitt skilda storlekar. Ännu bättre ekonomiska resultat erhålls i fall där lagrets lagrade kyla även kan utnyttjas för luftkonditionering sommartid.

Publiceras förslagsvis i BFRs R-rapport-serie. Kan ha intresse dessutom för SEAS i förkortad form.

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

Denna skrift är tryckt på miljövänligt, oblegt papper.

R56:1988

ISBN 91-540-4902-4

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Svenskt Tryck Stockholm 1988

Innehållsförteckning

	Sid
1. Inledning	1
2. Grunda lerlager enligt en teknik studerad för torvlager	1
2.1 Konventionella lerlager med vertikala kanaler	1
2.2 Lager med horisontella kanaler	2
2.3 Inverkan av frysning	3
2.4 Lerlager med horisontella kanaler	6
2.5 Energikollektor ovanför lagret	7
2.6 Angreppsmetod	7
3. Ekonomisk jämförelse med alternativen vid referensförutsättningar	10
3.1 Utformning av det föreslagna systemet med grunt lerlager	10
3.2 Vertikalt lerlager med luftbatteri	15
3.3 Uteluftvärmepump (= Alternativ 4)	19
3.4 Ojepannor enbart (= Alternativ 5)	19
3.5 Sammanfattning av jämförelserna	20
4. Känslighetsanalys	20
4.1 Förhållanden för lagret	20
4.2 Markkollektorns förhållanden och prestanda	22
4.3 Variabler för fjärrvärmesystemet	22
4.4 Kostnaden för olja och el	23
4.5 Sammanfattning	24
5. Projekt med behov av värme och kyla	24
6. Tekniska problem	25
7. Slutord	27
Referenser	28

Bilagor:

1. Analys av beräkningsresultaten för torvlager i Motala
2. Kostnader för lerlager med horisontella kanaler
3. Kostnader och prestanda för lerlager med vertikala kanaler
4. Markkollektorer
5. Beräkningar för värmepumparna

Förord

Förslaget till det aktuella systemet är delvis inspirerat av SGI:s projektförslag för **torvlagret** i Motala, vilket utnyttjar nedplöjda plastslangar i ett grunt värmelager med infrysning. Lera har i många avseenden liknande egenskaper som torv – t ex hög vattenhalt – och förekommer i betydligt större omfattning i bebyggda trakter i Sverige, vilket gör den i rapporten studerade varianten särskilt intressant. Den i rapporten föreslagna markkollektorn förbättrar ytterligare systemets ekonomi.

SGI (Carolina Magnussen och Bengt Rydell) har i ett underuppdrag tagit fram underlag för beräkning av anläggningskostnaden av lagret, baserat på sina erfarenheter för torvlagret, och dessutom vänligen ställt till förfogande dataprogram-beräkningsresultat för torvlagret som vi använt för att korrelera en enklare beräkningsansats för lerlagret med infrysning.

Peter Margen

Sammanfattning

Rapporten analyserar ett energisystem för gruppcentraler som består av en värmepump, ett grunt värmelager i lera och en markkolektor. Lerlagret byggs genom att plöja ned ca 4 långa plaströr ovanför varandra i rörgrav exempelvis mellan 1 m och 3 m djup, på ett horisontalavstånd på ca 1 m, vilket leder till en låg kostnad per m plaströr. Under värmeuttaget under vintern fryser större delen av marken, vilket leder till ett mycket högt energiuttag per m^3 (ca 44 kWh/ m^3) och en mycket låg specifik kostnad för lagret — ca 0.3 kr/kWh — när markförhållandena är gynnsamma.

Energikollektorn som består av plaströr läggs i marknivå med några cm jordtäckning ovanför lagret för att dels återladda lagret, dels försörja värmepumpen för gruppcentralens energibehov under den varmare årstiden.

Ekonomi för systemet undersöks i rapporten för en gruppcentral med 5 GWh/år energibehov och jämförs med system som har lerlager med vertikala kanaler och luftbatterier; system med uteluftvärmepump utan lager samt system med enbart oljepannor. Jämförelserna sker under varierande förhållanden beträffande temperaturkrav för gruppcentralen, energipriser och markförhållanden. Den visar att det föreslagna systemet beräknas bli billigare än de konkurrerande systemen över det undersökta parameterområdet. Markkolektorn undviker dessutom luftbatteriers bullerproblem.

Ekonomi för systemet kan ytterligare förbättras vid tillämpningen gruppcentraler som måste täcka såväl behov av värme som kyla (luftkonditionering sommartid), eftersom lagret representerar ett stort kylförråd sommartid, som kan användas för detta ändamål. Exempel på sådana tillämpningar är stora kontorshus, stormarknader m m förlagda utanför fjärrvärmeområden.

I stora delar av landet förekommer lerfyndigheter med åtminstone några meters djup, vilket är en av förutsättningarna för det föreslagna systemet. Den erforderliga markytan för lagret är trots lagrets ringa djup inte nämnvärt större än ytan för ett konventionellt

lager i lera med 30 m djupa vertikala kanaler, eftersom infrysningen ökar energilagringen i det grunda lagret med ca faktorn 8 jämfört med t ex projekt av typ Sunclay.

Inverkan av upprepade frysningssyklar på slangarna och markytan bör kontrolleras genom ett experimentlager i förminskad skala som medger en förkortning av cyklingstiden, följd av ett fullskaleprojekt.

1. Inledning

Säsongslager har haft svårt att etablera sig på marknaden för gruppvärmecentraler. Ett antal väl fungerande demonstrationsprojekt har byggts, men bara ett fåtal objekt byggda för gynnsamma omständigheter, t ex kostnadsfri spillvärme för laddning, har kunnat visa kommersiell lönsamhet^{1,2}). Flera författare har dragit slutsatsen att för de mera allmänt tillgängliga energikällorna, uteluft eller spillvärme, system med säsongslagring inte kan konkurrera med system som saknar säsongslagring^{3,4}) i varje fall för små gruppcentraler. Sedan dessa slutsatser dragits har dessutom oljepriserna fallit kraftigt, och även om viss återhämtning förväntas ske, lär priserna ej under lång tid återvända till 1985 års höga nivå. Detta undergräver ytterligare ekonomin för värme-pumpsystemen med eller utan säsongslager.

Den ovan beskrivna bakgrunden visar att man måste finna **billigare typer av energilager** om säsongslagring för mindre system, typ gruppcentraler, skall kunna löna sig för de mera allmänt tillgängliga energikällorna, luftvärme eller solvärme.

Denna rapport beskriver och analyserar en typ av lager som anses vara betydligt billigare än de konventionella typerna även i relativt små storlekar och därigenom passar väl för gruppcentraler, i fall där lämplig mark finns.

2. Grunda lerlager enligt en teknik studerad för torvlager

2.1 Konventionella lerlager med vertikala kanaler

Ett antal lager i lera har byggts som demonstrationsprojekt med start för Sunclayprojektet 1978⁵). I samtliga fall används vertikala kanaler. För kanaldjup omkring 30 m har kostnaden för nya projekt beräknats till ca 70 kr/m⁶). Kostnaden per m stiger dock kraftigt för kortare kanaler, dvs tillämpningar i områden där lerförekomsten har lägre mäktighet. Men även 70 kr/m är alltför dyrt för att ge konkurrens i de flesta fall

År 1985 beskrevs ett förslag att förbättra värmeöverföringen per meter kanal med 50 à 60 % och därigenom ekonomin för lager i lera med vertikala kanaler genom att använda två U-rör per kanal och öka skänkelavståndet från ca 10 cm till ca 50 cm⁷). För ett lager på bara 20 m djup uppgavs att kostnaden per meter kanal ligger på 69 à 87 kr/m beroende på kanalavstånd. Orsaken härtill är inte helt klarlagd. Ett lager av denna typ kom till utförande år 86/87 i Söderköping*. Trots förbättringen är dock ekonomin för projekt med lager i lera med vertikala kanaler fortfarande ansträngd för de flesta tillämpningarna.

2.2 Lager med horisontella kanaler

I samband med lager i torv, där mäktigheten vanligtvis är bara ett fåtal meter, föreslogs redan 1983 att man skulle använda rör - slingor som kunde läggas i långa horisontella frästa spår⁸). Slingorna hade dock fortfarande vertikala skänklar i zigzag-mönster.

Flera författare har varit inne på tanken att reducera kostnaden för lager i jord genom att bygga grunda lager med **horisontella** rör som **plöjs** ned i marken. Lars Jacobsson m fl (Ref 9) föreslog 1982 ett mindre lager, yta 3 500 m² i jord som skulle bestå alternativt av slangar på 1, 2 eller 4 nivåer. Han beräknade kostnaden per m slang till ca 13, resp 43 och 36 kr/m. De relativt höga kostnaderna för alternativen med flera slangnivåer berodde i stor utsträckning på det faktum att utvecklingkostnaden för lämplig utrustning för nedplöjning inkluderades. Ingen frysning av marken tilläts och inga mera långtgående slutsatser betr ekonomin drogs. Den låga kostnaden för alternativet slangar på *en* nivå beror på tillgänglig utrustning för nedplöjning från markvärmepumpar och antyder redan metodens möjligheter.

En nackdel med grunda lager av detta slag är dock att värmeförlusten blir oacceptabelt hög om lagret läggs vid en temperatur som

* Det har visat sig att den faktiska kostnaden av lagret i Söderköping blev högre än de ovan angivna siffrorna som baserades på entreprenörskalkyler innan lagret byggdes. Orsaken härtill är inte helt klarlagd.

är väsentligt högre än omgivningens temperatur. Det ligger därför nära till hands att gå i **motsatt riktning**, dvs lägga lagret vid en temperatur som är **lägre än omgivningstemperaturen** för att istället kunna dra fördel av ett påtagligt värmeintag från omgivningen.

2.3 Inverkan av frysning

Bengt Rydell et al¹⁰⁾ drog den logiska slutsatsen av detta resonemang och projekterade ett torvlager med horisontella kanaler med infrysning för ett projekt i Motala 1985/86. Fasomvandlingsenergin medför att man kan lagra en tiopotens mera energi per m³ än i lager utan infrysning och vanliga temperatursving (ca 7°C), och höjer dessutom torvens ledningsförmåga med en faktor av fyra för den frusna delen av marken, se Tabell 1.

Dessa fördelar medger att rören läggs närmare varandra än för vertikala lerlager, vilket gör det möjligt att tillämpa en relativt billig och effektiv läggningsteknik med banddrivna fordon som sågar eller fräser upp trånga spår, i vilka ett antal rör läggs i samma operation, se Figur 1. För ett lager med en volym på 38 000 m³, medel röravstånd 0.7 m och medeldjup ca 3 m, uppger Rydell¹⁰⁾ en investeringskostnad av bara ca 18 kr/m rör enligt erhållna anbud, dvs ca fjärdedelen av den specifika investeringskostnaden per m för konventionella lerlager med vertikala kanaler och större röravstånd, ca 2 m. Ytterligare kostnadsreduktioner är möjliga enligt åtgärder vi föreslår i Bilaga 1 och 2.

Det grunda torvlaget åstadkommer sålunda en väsentlig minskning i den specifika kostnaden såväl per meter kanal som per kWh lagrad energi, jämfört med konventionella lerlager med vertikala kanaler, se Tabell 1, kol 1, resp 3 och 4, och dessutom ett automatiskt värmetillskott från omgivningen genom den grunda formen och den låga temperaturen. Visserligen uppnås dessa fördelar på bekostnad av en låg temperatur av lagret som värmekälla under vintern, vilket ökar värmepumpens specifika kostnad och minskar dess värmefaktor, men fördelarna är så betydelsefulla att det mera än kompenserar dessa nackdelar.

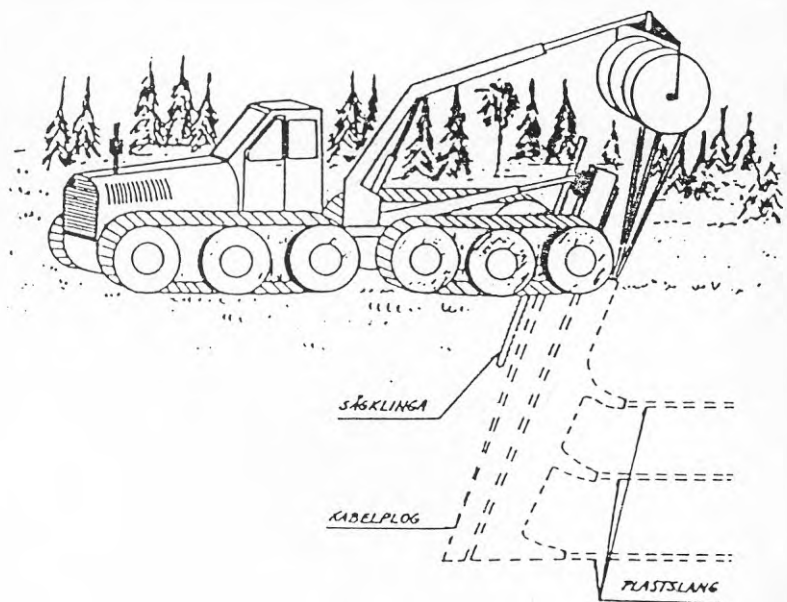
Tabell 1. Egenskaper av värmelager i torv och lera som laddas genom ytjordvärme eller uteluft

		TORV ¹⁾	LERA ²⁾		
A) ALLMÄNNA EGENSKAPER					
1.	Typisk vattenhalt (ofrusen) kg/liter	0.95	0.6		
2.	Markens konduktivitet				
	a) ofrusen W/mK	0.45	1.0		
	b) frusen W/mK	1.8	2.36		
3.	Markens specifika värme				
	a) ofrusen Mj/m ³ K	4.0	3.4		
	b) frusen Mj/m ³ K	2.0	2.07		
4.	Maximal fasomvandlings- energi vid frysning av allt vatten Mj/ton	317	200		
B) TILLÄMPNING TILL TYPISKA LAGER					
(i) <i>Specifik energi och kostnad</i>					
5.	Typ av lager	Grunt torv- lager, med frysning	Grunt ler- lager med frysning	Lerlager med vertikala kanaler utan frysning	
				a) utan vpump	b) med vpump
6.	Medelavstånd mellan rören i kvadratisk eller rektangulärt gitter D _m *	0.71	0.82	2.68	2.04
7.	Temperaturintervall °C	+5 - 0**	+5 - 0**	9.5 - 2.5	38 - 14
8.	Andel av vattnet som antas bli fruset %	69	69	0	0
9.	Fasomvandlingsenergin = (4) x (8) Mj/m ³	219	138	—	—
10.	Sensibel lagrad energi = (3a) x (7) Mj/m ³	20	17	23.8	81.6
11.	Totalt lagrad energi				
	a) Mj/m ³	239	155	23.8	81.6
	b) Q = kWh/m ³	66.4	43.0	6.6	22.7

(ii) *Temperaturskillnader, mark/köldmedium*

12. Utvunnen energi Q_a kWh/m ³	68	44	6.6	21.6
13. Laddad energi Q_b kWh/m ³	61.8	41.4	6.5	23.8
14. Specifik kostnad				
a) per m kanal kr/m	18 (15.5) ⁶⁾	11.17)	87.08 ⁸⁾	68.98 ⁸⁾
b) per m ³ (14a)/(6) ² kr/m ³	37 (31) ⁶⁾	13.77)	12.28 ⁸⁾	16.58 ⁸⁾
c) per utvunnen kWh (14b)/(12) kr/kWh	0.544 (0.456)	0.311	1.85	0.764
12. Antagen yttre rördiameter	mm 40	25	2 x 20	2 x 20
13. Antagen tryckklass	PN 6.3	10	6.3	6.3
14. Skattat medelmotstånd av marken				
under urladdning m ³ K/W	0.171	0.180		
under laddning m ³ K/W	0.353	0.280		
15. Totalt motstånd till värmeöverföring ⁹⁾ mK/W				
a) urladdning r_{av}'	0.238	0.304	2.2	1.1
b) laddning r_{bv}'	0.443	0.429	2.2	1.1
16. Medeltemperaturskillnad*** mellan mark & köldmedium θ				
a) urladdning vid 3 650 tim ekvivalent urladdningstid, (H_a), $Q_a r_a'/H_a$ °K	4.4	3.7	4.0	6.5
b) laddning, vid 3 650 tim antagen laddningstid (H_b) $Q_b r_b'/H_b$ °K	7.5	4.9	3.9	7.2

- 1) Data för torv, del A, baserade på Rydell, Ref 10
- 2) Data för lera, del A, baserade på Per Åke Fransk, Ref 3.
- 3) D_m = geometriskt medelvärde av vertikalavstånd och horisontalavstånd för rektangulärt gitter.
- 4) Isen nära plastslangen är dock kallare än 0°C.
- 5) Utvunnen och inlagrad energi skiljer sig från lagrad energi genom värmeutbytet med omgivningen, dvs värmeintag för de kalla lagren, kol 1 till 3 och värmeförlust för det varma lagret, kol 4.
- 6) Värdet utan parentes hänför sig till Ref 9. Värdet inom parentes beräknas i Bilaga 1 för nyare uppgifter, Ref 10 för projekt efter Motala samt billigare köldmedium.
- 7) Se Bilaga 1
- 8) Se Bilaga 3
- 9) Detta motstånd inkluderar även rörväggens motstånd samt en faktor på ca 1.1 för ojämn temperaturfördelning i praktiken, se Bilaga 1 och 3.



Figur 1. Banddrivet fordon för installation av horisontella slingor i flera nivåer. (Vyrmetan, 1983); Ref 10.

2.4 Lerlager med horisontella kanaler

Nuvarande förstudie syftar till att undersöka möjligheten att tillämpa samma teknik för grunda lerlager. Lera har ju i flera av - seenden egenskaper som liknar dem för torv, se Tabell 1 kol 1 resp 2. Båda har en hög vattenhalt, även om vattenhalten för lera (ca 60 %) är lägre än den för torv (ca 95 %). Båda tjänar sålunda genom frysning av marken både vad beträffar energilagring - mågan per m^3 och ledningsförmågan, men lera har fördelen av en **högre konduktivitet** än torv, särskilt i det icke frusna tillståndet. För båda är marken relativt lättbearbetad, även om lera är mera trögbearbetad än torv. Tillämpningen av tekniken för lera gör det dessutom möjligt att även utnyttja leraförekomster av ringa mäktig - het, vilket innebär att ur geotekniskt avseende lämpliga förhållan - den bör finnas i stora delar av Sverige. Vissa tekniska frågor såsom inverkan av infrysning på lerans stabilitet måste givetvis belysas.

Punkt 13a i Tabell 1 visar att lerlagret med horisontella kanaler har en kostnad per meter slang som är en faktor 7 à 8 lägre än kostnaden per meter kanal för lerlager med vertikala kanaler. Detta samt det höga energiinnehållet per kWh ger en mycket låg kostnad per kWh lagrad energi, t ex ca 0.3 kr/kWh i gynnsam mark där behov av åtgärder för beredning och återställning av markytan är begränsad.

2.5 Energikollektor ovanför lagret

En möjlighet att ytterligare förbättra ekonomin för det grunda lerlagret är att använda rör nära marknivån som en energikollektor för att ladda lagret under sommaren utan användning av värmepump samt som energikälla för värmepumpen när det gäller gruppcentralens direkta energibehov vår, sommar och höst. Marginalkostaden för denna energikollektor är nämligen lägre än kostnaden för ett speciellt luftbatteri som annars behövs för dessa ändamål, och fordrar dessutom ingen fläktenergi och ger inga bullerproblem. Geometrin för markkolektor framgår av Figur 2.

2.6 Angreppsmetod

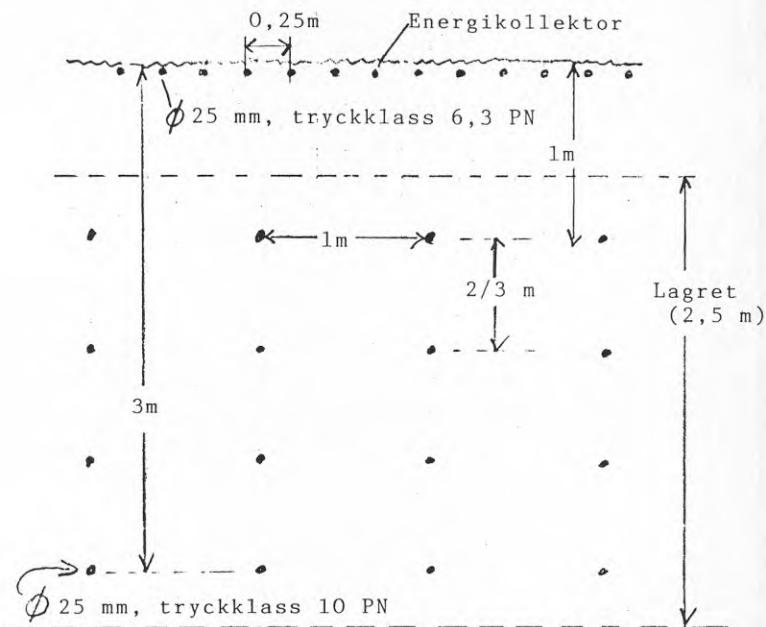
I denna rapport undersöks först kostnaderna och egenskaperna för grunda lerlager och markkolektorer = *Alternativ 1*. Lagret optimeras för ett typiskt system i mellansvenskt klimat med ett energibehov av 5 GWh/år. Ekonomin jämförs med

Alternativ 2 och 3

Lerlager med vertikala kanaler utan frysning av marken (eftersom konventionella lerlager med frysning uppenbarligen ej kan konkurrera med grunda lerlager). Därvid används den modernaste tekniken, dvs stort skänkelavstånd. I *Alternativ 2* återladdas lagret genom luftbatterier utan att använda värmepump, däremot att i *Alternativ 3* en värmepump används för återladdning för att kunna öka lagrets temperatursving och sålunda minska lagrets storlek.

Alternativ 4

Uteluftvärmepumpsystem utan säsongslager.



Figur 2. Geometri för grunt lerlager med horisontella plastslangar (ca 100 m per slang).

Alternativ 5

Ett system försörjt enbart genom oljepannor.

Först behandlas **referensförutsättningar** som utgår från bl a

- relativt gynnsam mark som ej fordrar stora berednings-
arbeten och återställningsarbeten och medger nedplöjning av
slangarna för Alternativ 1,
- ett lågtemperatursystem för fjärrvärme med maximalt 55°C
framledningstemperatur,
- oljepriser
(= riktpriiserna jan 87, EO4 + 3 % ortstillägg – 6 % rabatt),

- d) elpriser enligt Stockholm Energis nya taxa jan 1987, för större konsumenter typ gruppcentral,
- e) Stockholms klimat betr lufttemperaturer och solinstrålning, samt skuggfri yta för markkollektorn. Data härför sammanfattas i Tabell 2.

Tabell 2. Använda klimatdata (Stockholm)

		Sommaren maj-sept	Vår/höst april,okt	Vintern nov-mars
1. Utelufttemperaturen (medelvärdet 1931/60)	°C	14.3	5.8	-0.8
2. Solstrålning på horisontell yta (medelvärdet 1961-80) kWh under perioden, per m ²		692	146	129 (därav mars+nov: 84)

Därefter behandlas **känsligheten** av resultaten för olika avvikelser från dessa förutsättningar, t ex mindre gynnsam mark, konventionella gruppcentralvattentemperaturer, höjda olje- och elpriser, EO1 olja, skuggad mark för energikollektorn, norrlandsklimat.

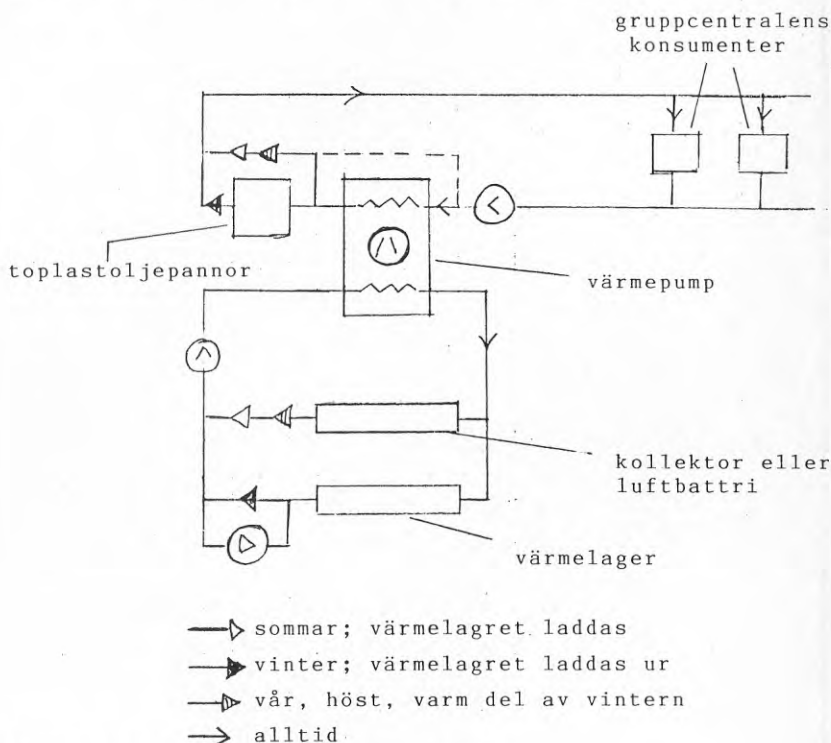
Till sist behandlas tillämpningar där systemet även kan utnyttjas för att leverera kyla sommartid.

3. Ekonomisk jämförelse med alternativen vid referensförutsättningar

3.1 Utformning av det föreslagna systemet med grunt lerlager

3.1.1 Kretsen

Figur 3 visar kretsen för det föreslagna systemet med ett grunt lerlager, en markkollektor, en värmepump och fjärrvärmenätet.



Figur 3. Principschema, alternativ 1 och 2.

Kretsen är kopplad på ett flexibelt sätt så att under perioden oktober – april markkollektorn och värmelagret kan försörja värmepumpens förångare med energi var för sig eller parallellt. Normalt försörjer kollektorn ensam värmepumpen under de relativt varma vår/höst-månaderna april och oktober, lagret ensamt värme -

pumpen under de kallaste månaderna december t o m februari, och båda enheterna parallellt under den varmare delen av vintern, november, mars.

Under sommaren, maj – september, laddar kollektorn lagret direkt och försörjer dessutom värempumpens förångare för att täcka fjärrvärmenätets sommarbehov av energi.

Topplastoljepannor täcker vinterns topplasteffekt och spetsar även temperaturerna vintertid. Panneffekten är tilltagen så att systemets maximala effekt kan klaras om värmepumpen faller ifrån.

3.1.2 Lagrets geometri och prestanda

Figur 2 visar den valda geometrin för lagret. Vi har utgått ifrån fyra 25 mm plastslangar per rörgrav, med inbördes avstånd 0.667 m, förlagda mellan nivåerna 1 m och 3 m under mark, vilket kan jämföras med förslaget för torvlagret i Motala på ca 40 mm slangar med inbördes vertikalavstånd 0.5.

Horisontalavståndet är 1 m som för Motala. Anledningen till det större vertikalavståndet vi valt för lerlagret är dels lägre lagrad energimängd per m^3 på grund av lerans lägre vattenhalt, dels lerans högre ledningsförmåga. På grund av dessa egenskaper klarar man relativt små temperaturskillnader mellan mark och köldmedium trots de större vertikalavstånden. Vi har kontrollerat att det valda avståndet är ungefär optimalt.

För beräkning av erforderliga temperaturskillnader har vi analyserat de beräkningar som Caroline Magnussen, SGI, utfört för Motalalagret med ett dataprogram som utvecklats i samarbete mellan LTH och SGI. Vi har därvid tagit fram förenklade formler för beräkning av lagrets motstånd till värmeöverföring som funktion bl av motståndet av frusen mark r_f resp ofrusen mark r_o och sedan korrelerat vissa konstanter i dessa formler (se Bilaga 1) mot de detaljerade beräkningsresultaten för Motalas torvlagret.

Samma formler men med värden r_o och r_f för frusen resp ofrusen lera samt det aktuella slangmotståndet och gitteravståndet för lerlagret användes sedan vid beräkning av prestanda av lagret. Vi bedömer att denna metodik ger resultat av tillräcklig noggrannhet för jämförelsen som denna rapport syftar till. Givetvis är medelmotståndet under laddningsfasen, då frusen mark med dess låga motstånd ligger närmast lagrets slangar, lägre än medelmotståndet under urladdningsfasen då marken närmast slangarna är ofrusen och därför har högre motstånd, se Tabell 1 punkt 14.

I Bilaga 1 har vi även jämfört ekonomin av två olika slangdiametrar, 25 mm resp Motalalagrets 40 mm, och kommit fram till att 25 mm är den mera ekonomiska diametern, trots att man i detta fall tvingas välja en högre tryckklass för den mindre diametern för att undvika risk för skada under nedplöjning.

Urladdningsenergin är 44 kWh/m^3 och lagrets investeringskostnad bara ca 0.3 kr/kWh .

3.1.3 Markkollektorn

Markkollektorer bestående av rör lagda ungefär i markplanet har använts för flera isbanor för den dubbla funktionen av konstfrysning av isen och energiinsamling för energisystem, t ex vid Lugnet (Falun), Ryddalen (Göteborg) och Grosvad (Finspång). Energin samlas dels från luften, dels solinstrålningen. I samtliga fall erhålls energimängder per m^2 markyta som är betydligt större än vad som fordras för laddning av det aktuella lerlagret. Av denna anledning har kollektorn för lerlagret utformats på ett enklare och billigare sätt, dvs med bara ca 4 rör per m mot 9 rör per m för de aktuella isbanorna och med bara några cm jordskydd ovanför rören istället för en mera omsorgsfull delinbäddning i stenmjöl eller asfalt som för isbanorna. Ändå räcker det enklare utförandet för de erforderliga energimängderna med ca 25 % marginal enligt våra överslagsberäkningar (Bilaga 4) som bygger på vissa erfarenheter från isbanorna.

Tabell 3. Bakgrundsdata

		1	2	3	4	5
		Grunda lerlager + mark- kollektor	Lerlager med vertikala kanaler + luftbatteri batteri- laddat	3 VP- laddat	Uteluft- värme- pump	Olje- pannor enbart
ENERGIBALANS:						
<u>Energi till fjärrvärmesystemet</u>						
<i>Vinter: (nov-mars)</i>						
1.	Värmeenergi från lagret	MWh	1 000	1 068	1 176	—
2.	Värmeenergi från kollektor eller luftbatteri	MWh	371	371	371	1 083
3.	Värmeenergi totalt	MWh	1 371	1 439	1 547	1 083
4.	Drivenergi (El)	MWh	779	711	6003	727
5.	Energi från VP totalt	MWh	2 150	2 150	2 150	1 810 ¹⁾
6.	Energi från oljepannor	MWh	850	850	850	1 190
7.	Sammanlagt	MWh	3 000	3 000	3 000	3 000
<i>Vår/höst (april-oktober)</i>						
8.	Värmeenergi från kollektor eller luftbatteri	MWh	574	599	558	578
9.	Drivenergi (El)	MWh	326	301	342	322
10.	Totalt	MWh	900	900	900	900
<i>Sommar (maj-september)</i>						
11.	Värme från luftbatteri	MWh	746	777	733	758
12.	Värme från el	MWh	354	323	367	342
13.	Totalt till fjärrvärme	MWh	1 100	1 100	1 100	1 100
14.	Till fjärrvärme under året = (7) + (19) + (13)	MWh	5 000	5 000	5 000	5 000
<u>Laddning av lagret under sommaren</u>						
15.	Från kollektor eller luft- batteri till lagret ²⁾	MWh	941	1 063	950	—
16.	Från el till lagret	MWh	—	—	344	—
17.	Totalt till lagret	MWh	941	1 063	1 294	—
18.	El, sommar, totalt = (12) + (16)	MWh	354	323	711	342
KOMPONENTDATA:						
19.	Lagrets volym	m ³	22 750	162 700	52 400	—
20.	Kostnad/m ³	kr/m ³	13.7	12.2	17.3	—
	Kostnad	kkkr	312	1 985	906	—
21.	Luftbatteriets storlek	kW/°C	—	77.4	58	52.3
22.	Kostnad/(kW/°C)	kr	—	10 600	10 600	11 130 ³⁾
23.	Kostnad	kkkr	—	820	615	582
24.	Kollektorns storlek	m ²	9 100	—	—	—
25.	Kostnad/m ²	kr/m ²	32	—	—	—
26.	Kostnad	kkkr	291	~ 300	—	—
27.	Värmepumpeffekt	kW	780	~ 780	~ 780	~ 780
28.	Värmepumptyp		VSP51E	VSP51E	2xVMP124	VSP57
29.	Panneffekt ⁴⁾	kW	1 950	1 950	1 950	2 600
30.	Pannkostnad per kW	kr/kW	400	400	400	400

- 1) Mindre än för Alternativ 1 till 3 på grund av låg eller ingen effekt vid mycket låga utelufttemperaturer och avställningar för avfrostning.
- 2) Skillnaden mellan (1) och (14) beror på det kalla lagrets värmeintag från omgivningen (Alternativ 1, 2, 3) resp det varma lagrets värmeförlust till omgivningen (Alternativ 3).
- 3) 5 % större än för Alternativ 2 och 3 på grund av utrustning för avfrostning.
- 4) Dimensionerad så att max effektbehov 1 950 kW klaras med största enheten (= värmepump eller elpanna) ur drift. För Alternativ 4 ger dock värmepumpen ingen effekt kallaste dag.

Tabell 4. Kostnadssammanfattning för referensförutsättningar

		1	2	3	4	5
		Grunda lerlager + mark- kolektor	Lerlager med vertikala kanaler + luftbatteri- batteri- laddat	3 VP- laddat	4 Uteluft- värme- pump	5 Olje- pannor enbart
INVESTERINGSKOSTNAD						
1. Lager	kkkr	312	1 985	906	—	—
2. Kolektor	kkkr	291	—	—	—	—
3. Luftbatteri	kkkr	—	820	615	566	—
4. Värmepump m m ¹)	kkkr	1 560	1 560	1 950	1 630	—
5. Laddningsvärmväxlare	kkkr	—	—	50	—	—
6. Kulvert	kkkr	100	100	100	100	—
7. Pannor	kkkr	<u>780</u>	<u>780</u>	<u>780</u>	<u>1 040</u>	<u>1 040</u>
8. Totalt	kkkr	3 043	5 245	4 411	3 336	1 040
9. Projektering, oförutsett, moms ²)	kkkr	609	1 049	802	567	104
10. Totalt		3 652	6 294	5 293	3 903	1 144
FASTA ÅRSKOSTNADER						
11. Underhållskostnader & perso- nal ³)	kkkr/år	86	102	117	98	31
12. Kapitalkostnader, 8.72 %/år (= 6 % realränta, 20 år)	kkkr/år	<u>318</u>	<u>549</u>	<u>461</u>	<u>340</u>	<u>100</u>
13. Totala fasta kostnader	kkkr/år	404	651	78	438	131
RÖRLIGA KOSTNADER						
14. Vinterel à 34 ö/kWh ⁴)	kkkr/år	265	242	2005	247	—
15. El under sommar, vår och höst, à 22.83 ö/kWh ⁴)	kkkr/år	155	142	240	152	—
16. Eleffekt à 275 kr/kW-år vinter- effekt	kkkr/år	<u>78</u>	<u>62</u>	<u>78</u>	<u>77</u>	<u>—</u>
17. El total ⁴)	kkkr/år	448	446	523	476	—
18. Olja (EO4) à 27.8 öre/kWh	kkkr/år	<u>236</u>	<u>236</u>	<u>236</u>	<u>331</u>	<u>1 390</u>
19. Totalt rörliga kostnader	kkkr/år	734	682	759	807	1 390
20. Total årskostnad = (13)+(19)	a) kkr/år	1 138	1 333	1 387	1 245	1 521
	b) ö/kWh	22.8	26.7	26.7	24.9	30.4
22. Merkostnad jämfört med Alternativ 1	a) kkr/år	—	195	199	107	383
	b) ö/kWh	—	3.9	4.0	2.1	7.7

1) Budgetpris från tillverkare för värmepumpen + 100 % för hjälpströmning, rörslutningar, elanslutningar, byggnad reglersystem.

2) 20 % av punkt (8) för Alternativ 1 till 3; 17 % för Alternativ 4 och 10 % för Alternativ 4.

3) Följande % av investeringskostnaden; värmelager och kulvert 1 %, luftbatteri: 2 %, värmepumpar m m 4 %, olje-pannor för hela lasten 3 %, och för topplast enbart 2 %.

4) Motsvarar Stockholm Energis nya tariff för större konsumenter. Vägt medelvärde av höglast och låglastavgift har använts enligt timantal.

5) Publicerat riktpis, jan 87 plus 3 % ortstillägg minus 6 % antagen bonus.

3.1.4 Energibalans och kostnader

Tabell 3 kol 1 visar energibalansen för systemet med värme - pumpens prestanda och är beräknad enligt formlerna i Bilaga 5 och sammanfattar data för viktiga komponenter. Tabell 4 kol 1 redovisar investeringskostnader och årskostnader.

Investeringskostnaderna för systemet är beräknade till ca 3.65 Mkr (= 2 870 kr/kW max effektbehov) och den totala energikostnaden vid 6 % realränta och 20 års annuitet till 22.8 öre/kWh.

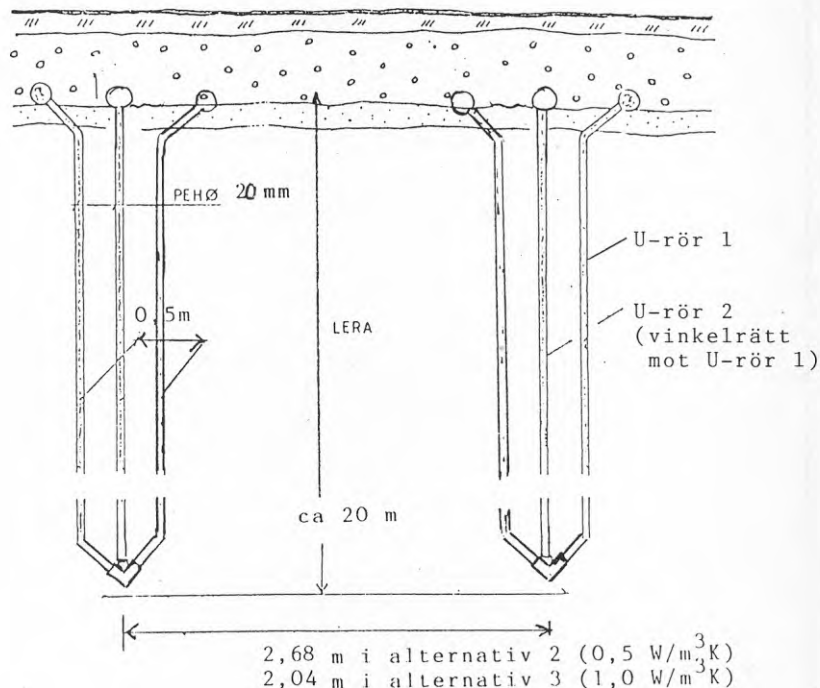
3.2 **Vertikalt lerlager med luftbatteri**

3.2.1 Variant med laddning av lagret utan användning av värmepump (= Alternativ 2)

Detta system använder samma krets som Alternativ 1, se Figur 3, dock med ett luftbatteri istället för markkollektorn, och ett ler - lager med vertikala kanaler istället för det grunda lerlagret med horisontella kanaler. Eftersom lagret laddas direkt genom luft - batteri utan att använda värmepumpen tvingas man hålla relativt låga temperaturer i lagret. Därigenom blir den lagrade energin per m³ låg — bara ca 6.6 kWh/m³ motsvarande ett specifikt tempera - tursving på 7°C.

Specifika kostnader och prestanda är baserade på värden som SGI sammanställt för det optimala skänkelavståndet 50 cm, se Bilaga 3.

Lagret består av vertikala U-rör med skänkelavstånd 50 cm, se Figur 4, som är optimalt enligt en analys av SGI (Ref 7, 11 och Bilaga 3). Med hänsyn till det låga energiinnehållet per m³ valde vi ett relativt stort kanalavstånd 2.68 m, som bedöms ge ungefär optimal ekonomi. Värmebalansen och övriga data framgår av Tabell 3 kol 2 och kostnader från Tabell 4 kol 2.



Figur 4. Lerlager med vertikala kanaler och stort skänkelavstånd (0.5 m) (typ Söderköping; två U-rör/kanal).

Investeringskostnaden för detta alternativ beräknas till ca 6.3 Mkr mot 3.65 Mkr för Alternativ 1. Anledningen till den stora merkostnaden är i första hand själva lagret som på grund av dess låga energiinnehåll per m^3 blir stor (ca 163 000 m^3) och dyr (nära 2 Mkr) samt luftbatteriet som blir dyrt (0.82 Mkr) eftersom det måste kunna ladda lagret med en låg disponibel temperaturskillnad och samtidigt försörja värmepumpen. Det är mycket dyrare än markkollektorn för det grunda lagret.

Värmefaktorn blir något högre än för Alternativ 1, och elförbrukningen därför något lägre, men denna marginella skillnad förmår ej att kompensera den stora merkostnaden för lagret och luftbatteriet. Den totala beräknade energikostnaden, 26.6 öre/kWh, blir sålunda 4.9 öre/kWh mera än för Alternativ 1.

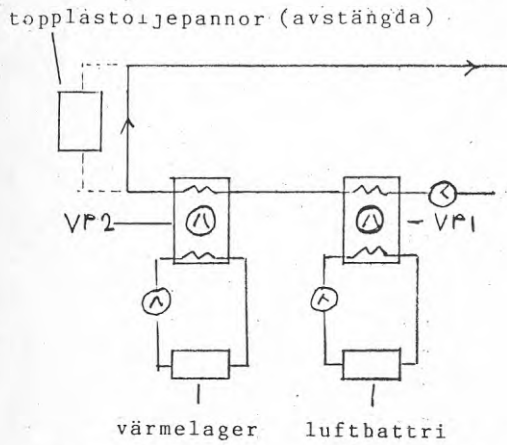
3.2.2 Variant med laddning av lagret med värmepump (= Alternativ 3)

I detta alternativ utnyttjas samma typ av lager som för Alternativ 2, men lagret laddas genom en värmepump. Detta medger att man laddar lagret till en hög temperatur, ökar sålunda temperatur - svinget och reducerar lagrets volym radikalt. Kanalavståndet reduceras till 2.04 m för att begränsa temperaturskillnaderna.

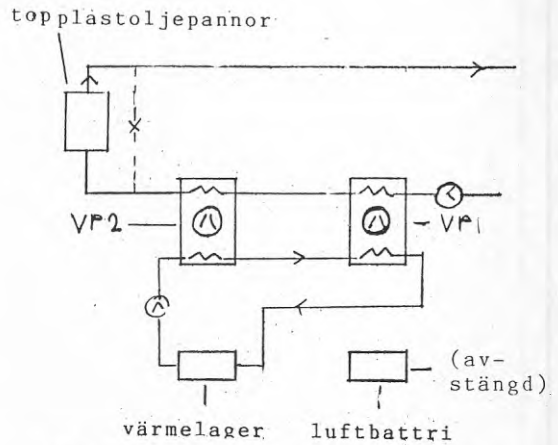
För att kunna utnyttja lagrets höga medeltemperatur (26°C) vid urladdning, fordras att man utnyttjar två värmepumpar. Under varmare delar av vintern (november, mars) måste både luftbatteriet och lagret användas för att försörja värmepumparna med energi. Eftersom lagrets vattenkrets ligger vid en väsentligt högre temperatur är luftbatteriets vätskekrets, fordras att en värmepump kopplas till luftbatteriet och en till lagret under detta driftskede för att kunna få en relativt hög genomsnittlig värmefaktor.

Även under sommaren är det en fördel att ha två värmepumpar. Den ena värmepumpens kondensator kan då betjäna fjärrvärme - systemet vid dess relativt höga temperatur, den andra ladda lagret vid dess väsentligt lägre temperatur, vilket ger relativt hög genomsnittlig värmefaktor. Schemat för detta arrangemang visas i Figur 5.

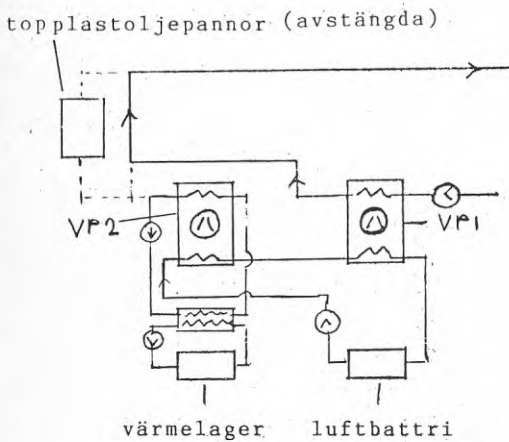
Lagret och luftkylaren blir i detta fall betydligt billigare än för Alternativ 2, se Tabell 4, punkt 2 resp 3 och värmefaktorn under vintern högre. Å andra sidan är två mindre värmepumpar väsentligt dyrare än en stor enhet, och ger dessutom för givna temperaturer något sämre värmefaktor. Slutligen ökar elbehovet under sommaren, eftersom även laddning av lagret fordrar drivenergi, däremot att laddning sker utan värmepump för Alternativ 2. Tabell 4, kol 3 visar att dessa positiva och negativa faktorer i stort sett kompenserar varandra, varför Alternativ 3 ger ungefär samma energikostnad som Alternativ 2 och 5.0 öre/kWh mera än det grunda lerlagret, Alternativ 1.



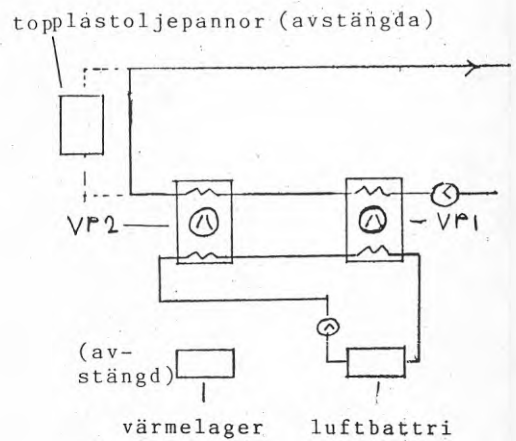
a) mild vinter: lagret & luftbatteri matar var sin värmepump



b) kall vinter: lagret matar båda värmepumpar



c) sommaren: VP1 matar gruppcentralen, VP2 matar lagret.



d) vår, höst: luftbatteri matar gruppcentralen. Lagret vilar.

Figur 5. Värmelager vid relativt hög temperatur laddat genom värmepump (= Alternativ 3): driftsätt för variant med två värmepumpar.

Det kan nämnas att storleken för värmepumpen för Alternativ 1 och 2 råkar sammanfalla med storleken för en av de mest prisvärda värmepumparna på den svenska marknaden idag, däremot att storleken för värmepumparna för Alternativ 3 ligger något sämre till. Sålunda kan det finnas gruppcentraler för andra effektbehov där Alternativ 3 blir något billigare än Alternativ 2, vilket vi har påpekat i andra sammanhang (Ref 12). Dessa avvikelser har dock liten betydelse i förhållande till den relativt stora kostnadsskillnaden mellan Alternativ 1 å ena sidan och Alternativ 2 och 3 å andra sidan.

3.3 Uteluftvärmepump (= Alternativ 4)

För uteluftvärmepumpen har vi valt en något större värmepumpmodell (VSP 57) istället för VSP 51E för Alternativ 2 och 3, för att delvis kompensera den effektminskning som låga kondenseringstemperaturer under den kallaste årstiden medför. Denna åtgärd förmår dock inte att kompensera hela skillnaden i levererad effekt, eftersom värmepumpen ger mycket låga bidrag under de kallaste dagarna, och dessutom förlorar viss drifttid under avfrostningen. Oljebehovet stiger sålunda enligt våra beräkningar med ca 340 MWh/år (= 6.8 % av årets energibehov) och dessutom måste något större oljepannor installeras för att kompensera effektbortfallet under den kallaste tiden.

Nettoresultatet redovisas i Tabell 4, kol 4, är ett beräknat energipris av 24.9 öre/kWh, dvs 2.1 öre/kWh mera än för Alternativ 1. Detta alternativ bli sålunda det grunda lerlagrets mest allvarliga konkurrent.

3.4 Oljepannor enbart (= Alternativ 5)

Ett alternativ med enbart oljepannor för OE4 bedöms medföra en kostnad av 30.4 öre/kWh. För referensförutsättningarna är detta sålunda det dyraste alternativet, hela 7.7 öre/kWh dyrare än alternativ 1, trots dagens relativt låga oljepris.

3.5 Sammanfattning av jämförelserna

Som diskussionen ovan och Tabell 4 punkt 22b visar, ger systemet med grunda lerlager och markkollektor den **lägsta kostnad per kWh** vid referensförhållanden. Besparingen jämfört med de övriga alternativen varierar mellan ca **2 och 8 öre per kWh energibehov** för systemet, vilket motsvarar belopp mellan ca 10 och 40 öre per kWh energiuttag från lagret jämfört med övriga alternativ med värmelager.

Utöver de beräknade ekonomiska fördelarna finns vissa kvalitativa fördelar. Jämfört med övriga alternativ som använder värme - pump, dvs 2, 3 och 4, så undviks luftbatterier och bullret dessa medför. I förhållande till Alternativ 4 och särskilt 5 besparas olja.

I efterföljande avsnitt diskuteras hur avvikelser från referensför - hållandena bedöms påverka jämförelsen.

4. Känslighetsanalys

Tabell 5 visar hur avvikelser från förhållandena vi antagit för jämförelsen i avsnitt 4 skulle påverka den beräknade kostnadsfördelen av Alternativ 1 (grunda lerlager) över övriga alternativ.

4.1 Förhållanden för lagret

Punkt 1 tar upp 3 faktorer som skulle kunna öka kostnaden för det grunda lerlagret, dvs markförhållanden som fordrar grävning av rörgravarna istället för nedplöjning av rören, bedömningar som leder till användning av dyrare kommersiella köldmedier istället för de nya billigare medier vi förutsatt, samt förhållanden som ökar kostnaden för beredning och återställning av markytan med ca 20 kr/m² markyta. Gäller dessa förhållanden reduceras givetvis fördelen av Alternativ 1, men reduktionen är mycket liten i förhållande till reduktionen som föreligger vid referensförhållandena, varför den inte kan rubba systemets överlägsenhet.

Tabell 5. Känslighetsanalys (öre/kWh)

	2 Lerlager med vertikala kanaler + luftbatteri- batteri- laddat	3 VP- laddat	4 Uteluft- värme- pump	5 Olje- pannor enbart
1. Kostnadsfördel av Alternativ 1 över övriga alternativ vid referensförutsättningar (från Tabell 4 punkt 22b)	3.90	4.00	2.10	7.70
Justeringar i denna fördel på grund av:				
2. Faktorer som kan fördyra det grunda lerlagret:				
a) grävning nödvändig istället för plöjning	- 0.06	- 0.06	- 0.06	- 0.06
b) dyrare kommersiellt köldmedium	- 0.08	- 0.08	- 0.08	- 0.08
c) ytterligare markberedning och återställning för 20 kr/m ²	- 0.35	- 0.35	- 0.35	- 0.35
3. Faktorer som kan påverka markkollektorns prestanda och kostnad				
a) kollektorn ger beräknad prestanda så att marginalen i vår kalkyl kan elimineras	+ 0.56	+ 0.56	+ 0.56	+ 0.56
b) kollektorn ger sämre prestanda så att ett extra rör per m fordras	- 0.56	- 0.56	- 0.56	- 0.56
c) hälften av kollektorn i skugga	- 0.56	- 0.56	- 0.56	- 0.56
4. Fjärrvärmesystemet				
a) normala temperaturer istället för lågtemperatursystem (ca)	- 0.60	+ 0.20	+ 0.10	- 2.50
b) befintliga oljepannor (ingen kreditering för reducerad panneffekt)	-	-	- 0.60	- 0.70
c) EO1 istället för EO4	-	-	+ 0.40	+ 4.80
5. Kostnaden för olja och el				
a) kostnaden för olja och el ökar med 30 %	- 0.30	- 0.15	+ 0.4	+ 6.9
b) kostnaden för olja ökar med 30 % och kostnaden för el med 50 %	- 0.50	- 0.25	+ 0.30	+ 1.90

4.2 Markkolektorns förhållanden och prestanda

Punkt 2 tar upp vissa faktorer som kan påverka markkolektorns funktion och som behöver kompenseras genom justering av avståndet mellan rören. Energiupptagningen på solig plats kan bli såväl större som mindre än beräknat inom rimliga gränser ($\pm 25\%$) utan att kompensationsåtgärderna påverkar kostnadsfördelen av Alternativ 1 med mera än ± 0.6 öre/kWh. Även om hälften av planet ligger i skugga i genomsnitt, kan detta kompenseras genom tätare rör med ungefär samma konsekvens för ekonomin, dvs en kostnadsökning för Alternativ 1 med bara ca 0.6 öre/kWh.

4.3 Variabler för fjärrvärmesystemet

I referensförutsättningarna antog vi att gruppcentralen kunde försörjas genom ett lågtemperatursystem med maximalt 55°C framledningstemperatur kallaste vinterdag och 50°C större delen av året, vilket är rimligt för nya gruppcentraler försörjda genom värmepumpsystem. Även i befintlig bebyggelse kan man ofta genom intrimning av systemen komma i närheten av dessa värden, t ex ca 60°C maximal framledningstemperatur. Utan sådana åtgärder är dock temperaturkraven högre, ofta ca 75°C framledningstemperatur, 55°C returledningstemperatur kallaste vinterdag, vilket innebär ca 60°C utloppstemperatur från värmepumpen i medeltal under vintern eftersom pannorna tappar temperaturen, ca 55°C i medeltal resten av året.

Vid dylika förhållanden tvingas man välja R12 som arbetsmedium för värmepumpen istället för R22, vilket ökar den specifika kostnaden för värmepumpen med omkring 50 % och reducerar värmefaktorn vintertid med ca faktorn 1.2, resten av året ca faktorn 1.1. Därigenom ökar elförbrukningen markant, även om inverkan därav på ekonomin mildras något genom att den ökade drivenergimängden minskar den erforderliga storleken av lagret.

Sammanlagt har de ovan berörda faktorerna betydelse för ekonomin av samtliga alternativ med värmepump, vars kostnader ökar med omkring 2.5 öre/kWh. Dessa alternativs inbördes förhållan-

den påverkas dock bara med blygsamma belopp — varför Alternativ 1 behåller kostnadsfördelen jämfört med Alternativ 2, 3 och 4. Däremot minskar kostnadsfördelen över det rena oljealternativet från beräknat 7.7 öre/kWh till ca 5.2 öre/kWh.

Tillämpas systemen till en gruppcentral med befintliga oljepannor kan alternativen med värmepump ej tillgodoräknas någon minskning i erforderlig panneffekt, vilket ytterligare minskar deras kostnadsfördel jämfört med det rena oljealternativet, se punkt 4b.

Det rena oljealternativet blir i stort sett lika lönsamt som alternativ 2 och 3 med lerlager med vertikala kanaler.

Den sammanlagda effekten av dessa avvikelser, dvs punkt 4a och 4b i Tabell 5, är att reducera Alternativ 1:s fördel över Alternativ 5 med ca 3.2 öre/kWh till 4.5 öre/kWh och t ex Alternativ 2 och 3:s fördel över Alternativ 5 med 2.6 resp 3.2 öre/kWh till 1.2 resp 0.8 öre/kWh.

För mindre gruppcentraler används ofta lätt olja, EO1 istället för EO4, vilket ökar oljekostnaden och därigenom förbättra konkurrenskraften av värmepumpalternativen, särskilt varianterna med lager, se punkt 4c. Alternativ 1:s kostnadsfördel över det rena oljealternativet ökar med hela 4.8 öre/kWh och över uteluftvärmepumpen med ca 0.4 öre/kWh. I praktiken har givetvis sådana mindre gruppcentraler värmepumpar med något högre specifika kostnader är stora centraler, varför en del av kostnadsfördelen på grund av ökat värde av oljebesparingen förbrukas av dessa merkostnader. Ändå bör EO1 vanligtvis öka nettokostnadsfördelen av Alternativ 1 över oljepannor, Alternativ 5.

4.4 Kostnaden för olja och el

Enligt alla tillgängliga prognoser kommer såväl kostnaden för olja som kostnaden för el att stiga under de kommande decennierna, men storleken av prisökningar är osäkra.

Stiger priserna för olja och el med lika stora procentandelar, ökar kostnadsfördelen av Alternativ 2 över det rena oljealternativet, eftersom Alternativ 1 ju har lägre rörliga kostnader. Vid en olje- och elprishöjning med t ex 30 % ökar kostnadsfördelen av Alternativ 1 över Alternativ 5 med 6.9 öre/kWh. Ökar däremot priset för el med en större procentsats än priset för olja motverkas denna trend. Oförändrad kostnadsfördel jämfört med Alternativ 5 (olja) erhålls om den procentuella prisökningen för el är ca 2.3 gånger den procentuella prisökningen för olja.

Kostnadsfördelen av Alternativ 1 jämfört med övriga alternativ är däremot relativt okänslig för dylika förändringar i priserna för el och olja.

4.5 Sammanfattning

Känslighetsanalysen tyder på att Alternativ 1 är det mest ekonomiska alternativet även för de olika avvikelserna från referensförutsättningarna behandlade Tabell 5.

5. Projekt med behov av värme och kyla

Gruppcentraler som betjänar relativt stora byggnader där kylbehov föreligger sommartid, t ex vissa kontor, stormarknader m m, får extra fördelar av försörjningssystem med värmepumpar, eftersom värmepumparna kan användas sommartid för att åstadkomma kyla. Detta tillämpas redan t ex för stormarknaden vid Viberga, Finspång (Ref 1).

Det aktuella systemet med grunda lerlager innehåller en värmepump som kan användas på detta sätt, men därutöver ett energilager vid 0°C som representerar en stor kvantitet lagrad kyla. Denna lagrade kyla kan göras tillgänglig för luftkonditionering sommartid. Därigenom uppnås följande besparingar utöver dem som själva värmepumpens användning som kylmaskin ger upphov till:

- 1) markkollector blir onödig, eftersom den ersätts av byggnadernas luftkonditioneringssystem. Detta innebär en betydande kostnadsbesparing.
- 2) Den lagrade kylenergin blir tillgänglig utan elproduktion för en kylmaskin (eller värmepump). Vid ett elpris sommartid på t ex 22.8 öre/kWh enligt den i denna rapport använda tariffen och en kylfaktor (levererad kylenergi/drivelenergi) av 4 blir detta t ex värt ca 4.5 öre/kWh lagrad energi, exklusive den eventuella ytterligare reduktionen i en eleffektavgift.
- 3) Man undviker investeringsbehovet i en extra kylmaskin, vilket med hänsyn till den korta utnyttjningstiden för kylbehovet medför en relativt stor besparing.

Diskussionen visar att det grunda lerlagret har **mycket betydande mervärden** vid tillämpningar där den lagrade kylan kan utnyttjas för kylbehov sommartid, dvs luftkonditioneringssystem för kontor, stormarknader m m.

6. Tekniska problem

Viss osäkerhet finns idag betr konsekvenserna av den upprepade cyklingen av marken med infrysning och upptining av marken för,

- 1) plastslangarnas tillstånd, dvs hurvida slangarna kan skadas,
- 2) plastslangarnas läge i djupled, dvs hurvida slangarna kan gradvis "flyta upp" mot ytan,
- 3) markytans beskaffenhet, t ex hurvida marken ovanför rörgravarna kan sjunka i förhållande till övrig mark, eller andra störningar av typ tjälskador inträffar.

Den allmänna bedömningen av experter som vi diskuterat med, t ex SGI, är att risken för 1) (skada på rören) bör vara liten om rören ej förankras så att lokala punktkänningar undviks.

När det gäller punkt 2 har man så vitt vi vet inte hittills lagt märke till någon tendens för slangen att flyta upp vid sjöprojektet Vallentuna där de är nedbäddade i ett mjukt lager av sjöbotten, trots att marken där är mjukare än för ett lerlager på torr mark. Även denna risk bedöms sålunda som liten. För lagren med frysning bör man dock undvika tjälskjutande mark.

Punkt 3, nämligen störningar i markytan kan däremot vara en realitet. Frågan är dock vilken betydelse sådana eventuella störningar har för projektets värde. Anses dylika störningar besvärande, kan de troligen begränsas genom lämpliga åtgärder, t ex läggning av ett stabiliserande nät i glasfiberarmerad plast några cm under marknivån eller genom att välja ett större avstånd mellan markytan och översta slangraden, för en begränsad merkostnad.

Diskussionen tyder på att de tekniska riskerna torde vara begränsade, men verklig erfarenhet saknas. Sålunda är det angeläget att få ett **bättre underlag** genom att **bygga** ett mindre lager och kollektor av aktuell typ och att följa upp erfarenheterna. För att få viss erfarenhet snabbare, kan det finnas anledning att bygga lagret i **förminskad geometrisk skala** (t ex 1:3.5) vilket förkortar cyklingstiden, t ex från ett år till ca en månad. Då kan man på ett års drift simulera ca 12 årscyklar. Detta ersätter dock ej byggandet av ett fullskaleprojekt eftersom man inte helt kan efterlikna förhållandena i förminskad skala.

7. Slutord

Analysen i denna rapport tyder på att grunda lerlager återladdade genom markkollectorer ger **bättre ekonomi än konkurrerande system för gruppcentraler** över ett brett parameterområde, förutsatt att de lokala förhållandena passar härför.

Den goda ekonomin är en konsekvens av den **låga anläggningskostnaden** för lagret **per m rör eller m³ lager** på grund av den använda effektiva nedläggningstekniken med långa horisontella slingor, samt lagrets mycket **höga energinnehåll per m³** och markens **höga ledningsförmåga** i fruset tillstånd.

Det ena lokala villkoret som måste föreligga, nämligen **tillgången på lerfyndighet med åtminstone några meters djup är uppfyllt i stora delar av landet**. Det andra villkoret, nämligen **tillgång till en lämplig öppen markyta** kan vara en större begränsning, men bör **föreligga på många håll**. Det är nämligen möjligt att använda markytor av varierande form, såväl smala långa ytor som breda korta ytor.

Erforderlig markyta är ungefär **lika stor som för ett lerlager med vertikala kanaler** (Alternativ 2) och djup 20 m.

Markkollectorn är **inget villkor**, eftersom acceptabel ekonomi kan erhållas även med luftbatteri, men den förbättrar ekonomin och eliminerar luftbatteriets bullerproblem.

Ekonomin **förbättras ytterligare** avsevärt i fall där såväl behov för **värme som kyla** föreligger i samma gruppcentral.

Visa **tekniska frågetecken återstår** som bör belysas i ett **experimentprojekt**.

Referenser

1. Börje Östensson
A HVCA system based on seasonal heat storage.
Enerstock Conference, Canada, 1985, Paper D21.
(Även praktikfall från Scandenergy No 1: Viberga.)
2. Praktikfall från Scandenergy No 2: Grosvad
(Broschyr, 1985.)
3. Per Åke Frank
Doktorsavhandling, 1986, CTH.
4. Göran Hultmark
Kostnadsberäkningar och tekniska beräkningar betr
solfångare och vindkonvektorer med värmelager.
Jordvärmegruppens seminarium, CTH, maj 1985.
5. Stefan Olsson
Värmelagring i lera; projekt Sunclay och Kullavik.
NBS seminarium, oktober 1983, R1:1984.
6. Ingvar Rhen
Totala kostnader (för borrhål och kanaler), utveck-
lingsmöjligheter.
Jordvärmegruppens seminarium, CTH, maj 1985.
7. Caroline Magnussen (f Palmgren)
Data för värmelager i lera med varierande
skänkelavstånd.
Jordvärmegruppens seminarium, CTH, maj 1985.

(Även bidrag från Johan Claesson betr prestanda,
IBID.)
8. Olof Andersson
Storskalig värmelagring i torvmarker.
BFR-seminarium betr värmelagring vid låg
temperatur, 1982.
9. Lars Jakobsson
Jordvärmesystem med värmepump i befintlig och ny
bebyggelse R112:1982.
10. Bengt Rydell m fl
Värmelager i torv samt luftvärmepump för gruppen -
tral för 800 lägenheter i Motala: Projektbeskrivning.
BFR-ansökan, 1986.

11. Caroline Magnussen
Personligt meddelande.
12. Peter Margen
Ekonomi för energilagring i mindre system.
BFR-rapport, R3:1986.

BILAGA 1:

ANALYS AV BERÄKNINGSRESULTATEN FÖR TORVLAGER I MOTALA

1.1 Databeräkningar

Caroline Magnussen, SGI, har utfört beräkningar på ett torvlager med horisontella plaströr avsedda för Motala med ett dataprogram utvecklat i samarbete mellan LTH och SGI för de aktuella förhållandena med partiell frysning av marken m m. I denna bilaga redovisas hur vi utnyttjat beräkningsresultaten för att korrelera en enkel beräkningsansats som förväntas ge resultat av acceptabel noggrannhet även för lager i lera med horisontella kanaler och partiell frysning av marken.

Följande information gäller för databeräkningarna för lagret i Motala

- | | |
|--|------------------------|
| 1. Total slanglängd | $L = 60\,000\text{ m}$ |
| 2. Horisontalavstånd mellan rören | $D_x = 1\text{ m}$ |
| 3. Vertikalt avstånd mellan rören | $D_y = 0.5\text{ m}$ |
| 4 Slangdiameter | $d = 0.04\text{ m}$ |
| 5. Markyta = $60\,000\text{ m} \times 1\text{ m} / 5\text{ slingor} =$ | $12\,000\text{ m}^2$ |
| 6. Lagrets nominella djup om man antar att det utsträcker sig ett halvt vertikalt röravstånd förbi den översta och nedersta slingan
= $3.25\text{ m} - 0.75\text{ m} =$ | 2.5 m |
| 7. Lagrets nominella volym = $12\,000\text{ m}^2 \times 2.5\text{ m} =$ | $30\,000\text{ m}^3$ |

Under fem vintermånader har månadseffekterna P redovisade i Tabell 1.1, del A, kol 1, tagits ur lagret, jämnt fördelade över slanglängden, varvid en stor del av marken frusit. Under fem sommarmånader har månadseffekterna redovisade i del B av

tabellen, kol 1, matas in för att återladda lagret. Därvid har praktiskt taget hela marken tinats. En månad, vår och höst, vilar lagret. Totalt har år 10 på detta sätt 2.04 GWh laddats ur och 1.825 GWh återladdats. Mellanskillnaden 0.215 GWh representerar värmeupptagningen från omgivningen, i huvudsak genom ledning från luften vid markytan. Däremot försumrades inverkan av solinstrålningen och grundvattenströmmen.

1.2 Andel frusen mark

Antas att värmeupptagningen från omgivningen, 0.215 GWh enligt avsnitt 1.1, fördelar sig på 80 % under sommarhalvåret och 20 % under vintern, blir den lagrade energin

$$[2.04 - (0.2 \times 0.215)] \text{ GWh} = 2.00 \text{ GWh}$$

eller 66.7 kWh/m^3 nominell volym = 240 MJ/m^3 . Vid slutet av återladdningen hade lagret en medeltemperatur på ca 5°C , motsvarande 20 MJ/m^3 . Fasomvandlingen svarade sålunda för ca 220 MJ/m^3 . Eftersom fasomvandlingsenergin för torv med 95 % vattenhalt är $0.95 \times 333.4 \text{ MJ/m}^3 = 317 \text{ MJ/m}^3$, måste en bråkdel $220/317 = 0.69$ av marken ha frusit under årscykeln.

För 69 % frusen mark och lera med 60 % vattenhalt blir fasomvandlingsenergin per m^3

$$0.69 \times 0.6 \times 333.4 \text{ MJ/m}^3 = 138 \text{ MJ/m}^3$$

och den sensibla energin

$$\text{ca} \quad 5^\circ\text{C} \times 3.4 \text{ MJ/m}^3\text{K} = 17 \text{ MJ/m}^3,$$

$$\text{totalt} \quad 155 \text{ MJ/m}^3 = 43.1 \text{ kWh/m}^3.$$

1.3 Analys av motståndet till värmeöverföring

Beräkningsprogrammet redovisade temperaturer i marken var 25:e cm i djupled på horisontella avtånd 13 cm och 38 cm från röret. Vi har använt de beräknade temperaturer som faller inom lagrets nominella volym för att bilda en medeltemperatur, T_m , för marken varje månad under det tionde året. Beräkningsprogrammet visar även köldmediets temperatur vid inlopp och utlopp av

var och en av de fem rörslingorna under månaden. Vi har använt dessa tio värden för att få ett medelvärde, T_v , av vätsketemperaturen i rören varje månad. Temperaturskillnaden som driver värmeöverföringen antas vara

$$\Delta T = T_v - T_m$$

och motståndet till värmeöverföring per m slang

$$r = \Delta TL / P \quad \text{Km/W}$$

Kol 2 visar värdet på ΔT beräknat på detta sätt varje månad och kol 3 motståndet, r .

Motståndet varierar månad för månad beroende på andelen av mark som är frusen samt fördelning av den frusna delen av marken, eftersom is leder betydligt bättre än vatten.

För att få fram ett vägt medelvärde på motståndet under urladdningsperioden A, resp laddningsperioden B, redovisas i kol 4 värdet på $P\Delta T$. Den effektiva medeltemperaturskillnaden för hela urladdningsperioden resp laddningsperioden beräknas från

$$\Delta T_{am} = \Sigma P_a \Delta T_a / \Sigma P_a$$

$$\text{resp} \quad \Delta T_{bm} = \Sigma P_b \Delta T_b / \Sigma P_b$$

Motståndet till värmeöverföringen definieras sedan som

$$\text{Urladdning, } r_a = \Delta T_{am} / \Sigma P_a \text{ (730 h/månad)}$$

$$\text{Laddning, } r_b = \Delta T_{bm} / \Sigma P_b \text{ (730 h/månad)}$$

(1)

Tabell 1.1 Analys av beräkningsresultat för Motala torvlager
(L = 60 km)

Månad	Effekt P, kW	Tempera- turskillnad ΔT °C	Motstånd (Km/W) $= \Delta T L/P$	P ΔT
<i>A) Urladdning</i>				
Nov	300	2.90	0.580	870
Dec	600	4.73	0.472	2 830
Jan	650	3.72	0.343	2 420
Feb	650	4.50	0.415	2 930
Mars	600	4.19	0.419	2 510
Totalt	2 800			11 560
Effektivt medel- värde	560	11 560/2 800	$\frac{4.13 \times 60\ 000}{560\ 000}$	
		= 4.13	= 0.442 = r_a	
<i>B) Laddning</i>				
Maj	- 600	-3.69	0.369	2 214
Juni	- 700	- 7.22	0.619	5 054
Juli	- 600	- 10.40	1.04	6 024
Aug	- 400	- 7.30	1.04	2 812
Sept	- 200	- 3.50	1.05	700
Totalt	- 2 500			16 804
Effektivt medel- värde	500	16 804/2 500	$\frac{6.73 \times 60\ 000}{500\ 000}$	
		= 6.73	= 0.806 = r_b	
<i>C) Vila:</i>				
April och oktober				

I SGIs beräkning har ansatts ett motstånd för plaströrsväggen av $r_p = 0.1$ Km/W. Efter avdrag av detta motstånd är medelmotståndet av själva marken 0.342 under urladdning resp 0.706 under laddning.

I beräkningen har vidare antagits att ofrusen mark har en konduktivitet av $\lambda_o = 0.45 \text{ W/mK}$ och frusen mark en konduktivitet av $\lambda_f = 1.80 \text{ W/mK}$.

1.4 Kontroll av förenklad beräkningsansats för värmeöverföringsmotståndet

Den kvalitativa skillnaden mellan r_a och r_b är lätt att förstå. Under urladdning fryser marken först nära rören, dvs i zonen som har största betydelsen för värmeöverföringen. Därför blir motståndet relativt lågt. Under laddning smälter först marken i denna för motståndet viktiga zon, och motståndet sålunda högt.

Vi har antagit att motståndet kan beräknas genom följande formel,

$$\begin{array}{ll} \text{Urladdning} & r_a = r_o^m r_f^{(1-m)} + r_p \quad \text{Km/W} \\ \text{Laddning} & r_b = r_o^n r_f^{(1-n)} + r_p \quad \text{Km/W} \end{array} \quad (2)$$

där r_f och r_p är värden för motstånd mellan rör av diameter d och mark med $\lambda = \lambda_f$ resp $\lambda = \lambda_o$ vid ett medelavstånd mellan rören av D beräknad från Claessons formel för ekvilibriumöverföring,

$$r = [\ln (D/d) - 0.75] / 2 \pi \lambda \quad (3)$$

och r_p = rörväggens motstånd.

Claessons formel är framtagen för rör i triangulärt gitter. Appliceras den för rör i kvadratisk gitter med gitterdelning D_m ger den acceptabel noggrannhet vid en geometri som har samma tvärsnittsytta per rör, och sålunda $D_m = D/0.866$. För Motalas rektangulära geometri kan vi använda approximationen $D_m = (D_x + D_y) / 2$, vilket ger $D = (1 + 0.5) / 2 \times 0.866 = 0.855 \text{ m}$. Med $d = 0.04 \text{ m}$ blir sålunda

$$r_o = [\ln (0.866/0.04) - 0.75] / 2\pi \times 0.45 = 0.822 \text{ Km/W}$$

$$r_f = r_o \times 0.45 / 1.80 = 0.206 \text{ Km/W}$$

Sätter vi in dessa värden av r_o och r_f samt det givna värdet $r_p = 0.1$ i ekvationen och löser för de i Tabell 1.1 beräknade värdena $r_a = 0.442$, $r_b = 0.806$, får vi $m = 0.32$ och $n = 0.89$.

Dessa värden förefaller rimliga. Under period A (urladdning) är nämligen marken närmast rören (som har största betydelsen för motståndet till värmeöverföringen) frusen, varför r_f för frusen mark bör ha största genomslag, vilket den får med det beräknade värdet av $(1 - m) = 0.63$. Under period B (laddning) är en stor zon omkring rören ofrusen redan på ett tidigt stadium och senare hela marken ofrusen, varför r_o för ofrusen mark bör få största inverkan, vilket den får med $n = 0.89$.

1.5 Inverkan av markens vertikala temperaturgradient

Ledning av värme från markytan till lagret under sommaren leder till en viss vertikal temperaturgradient i marken under sommaren, och en mindre vertikal temperaturgradient för den ofrusna delen av marken under vintern. Eftersom enligt antaganden för dataprogramberäkningarna effektuttaget per m slinga är identiskt för alla slingor, finns samma vertikala temperaturgradient även mellan vätsketemperaturerna i de olika slingorna, enligt SGIs beräkningar. I praktiken däremot fördelas vätska vid samma temperatur till alla slingor, och kyls sedan i olika grad genom marken vid laddning, resp värms vid urladdning av lagret. I praktiken varierar sålunda effekten per slinga, vilket ökar motståndet jämfört med värden som beräkningsprogrammet ger. Vi har därför introducerat korrektionsfaktorer F_a resp F_b för laddning resp urladdning och satt F_a till 1.05 (eftersom temperaturgradienten är låg under vinterns urladdningsperiod) och F_b till 1.1. I praktiken minskar temperaturgradienten om man använder en rörrad i markytan som värmekollektor, men vi har bortsett från denna faktor.

Sammanfattningsvis får vi följande slutliga uttryck som vi använt i beräkningarna.

Korrigerat motstånd till värmeöverföring:

$$\begin{aligned} \text{Urladdning} \quad r_a' &= F_a (r_o^m r_f^{1-m}) + r_p & \text{Km/W} \\ \text{Laddning} \quad r_b' &= F_b (r_o^n r_f^{1-n}) + r_p & \text{Km/W} \end{aligned} \quad (4)$$

som utvärderats för $m = 0.37$, $n = 0.89$, $F_a = 1.05$ och $F_b = 1.1$.

För referensfallet har vi valt en slang med något mindre diameter än för Motala, dvs $d = 0.025$ m, men fått kompensera dess mekaniska svaghet genom att välja en högre tryckklass, 10 PN istället för 6.3 PN, vilket ökar slangväggarnas motstånd från 0.1 till ca 0.165 Km/W. Det valda vertikala avståndet mellan fyra slangar i djupled är 0.667 m (djup 1.00, 1.67 och 3.0 m) och horisontalavståndet 1.0 m vilket ger ekvivalent ett medelavstånd $D = (D_x + D_y) / 2 \times 0.866$ av $(1.0 + 0.667) / 2 \times 0.866 = 0.962$ m och en slanglängd per m^3 av $1/D_x D_y = 1.5 \text{ m/m}^3$.

Motståndet blir

$$r_o = [\ln(0.962 / 0.025) - 0.75] / 2\pi \times 1 = 0.461 \text{ Km/W}$$

$$r_f = [\ln(0.962 / 0.025) - 0.75] / 2\pi \times 2.36 = 0.196 \text{ Km/W}$$

och lagrets totala motstånd

$$\text{Urladdning} \quad r_o' = 1.05 (0.461^{0.37} 0.196^{0.63} + 0.165) = 0.456 \text{ Km/W}$$

$$\text{Laddning} \quad r_b' = 1.10 (0.461^{0.89} 0.196^{0.11} + 0.165) = 0.643 \text{ Km/W}$$

eller motståndet per m^3 lagervolym

$$r_a' D_x D_y = 0.456 / 1.5 = 0.304 \text{ Km}^3/\text{W} \quad (6)$$

$$r_b' D_x D_y = 0.643 / 1.5 = 0.429 \text{ Km}^3/\text{W}$$

$$\text{Medelvärde} \quad (r_a' + r_b') / 2 = 0.367 \text{ Km}^3/\text{W}$$

Enligt Bilaga 2 kostar lagret med dessa slangar 13.7 kr/m^3 vilket motsvarar $16.1 \text{ kr/m}^3 \times 0.305 \text{ K m}^3/\text{W} = 4.16 \text{ kr K/W}$ för urladdning och 5.84 kr K/W för laddning.

För den lagrade energin, 43.1 kWh/m^3 och tillskott för omgivningen direkt på ca 4 % under sommaren tillför
 $43.1 / 1.04 = 41.4 \text{ kWh/m}^3$ genom lagrets slangar under 3 560 h.
 Medeltemperaturskillnaden under laddningen blir

$$\Delta T_b = \frac{41\,400 \text{ Wh} \times 0.429 \text{ Km}^3/\text{W}}{3\,560 \text{ h}} = 4.99 \text{ säg } 5.0^\circ\text{C}$$

Under urladdningsperioden blir tillskottet från omgivningen lägre, uppskattningsvis 2 %. Uttaget genom lagrets slangar blir
 $43.1 \times 1.02 = 44.0 \text{ kWh/m}^3$ under 3 560 h och medeltemperaturskillnaden blir

$$\Delta T_a = \frac{44\,000 \text{ Wh} \times 0.304 \text{ Km}^3/\text{W}}{3\,560 \text{ h}} = 3.76^\circ\text{C}$$

b) *Alternativ med större slangdiameter*

I Bilaga 2 undersöktes även ett slangalternativ med likvärdig prestanda, dvs slang med $d = 0.04 \text{ m}$ och tryckklass 6.3 PN ($r_p = 0.1 \text{ km/W}$) $D_x = 1.25 \text{ m}$. För detta alternativ är
 $D = (1.25 + 0.667) / 2 \times 0.866 = 1.107 \text{ m}$.

$$r_o = [\ln(1.107 / 0.04) - 0.75] / 2\pi \times 1] = 0.408 \text{ Km/W}$$

$$r_f = [\ln(1.107 / 0.04) - 0.75] / 2\pi \times 2.36] = 0.173 \text{ Km/W}$$

och lagrets totala motstånd

$$r_a' = 1.05 (0.408^{0.37} 0.173^{0.63} + 0.1) = 0.354$$

$$r_b' = 1.10 (0.408^{0.89} 0.173^{0.11} + 0.1) = 0.518$$

eller motståndet per m^3 lagervolym

$$r_a' D_x D_y = 0.354 / 1.25 \times 0.667 = 0.295 \text{ K/Wm}$$

$$r_b' D_x D_y = 0.518 / 1.25 \times 0.667 = 0.432 \text{ K/Wm}$$

$$\text{Medelvärde} = 0.364 \text{ K/Wm}$$

Medelvärde av motståndet per m^3 lagervolym är sålunda praktiskt taget samma som för referensalternativet. Den specifika kostnaden däremot är enligt Bilaga 2 väsentligt större för alternativet med den grövre slangen, dvs $15.9 \text{ kr}/\text{m}^3$ mot $13.7 \text{ kr}/\text{m}^3$, varför den mindre diametern 0.025 m valdes för referensalternativet.

BILAGA 2

KOSTNADER FÖR LERLAGER MED HORISONTELLA KANALER

SGI har genom bearbetning av materialet för torvlagret för Motala samt diskussioner med inblandade entreprenörer skattat kostnaderna för ett lerlager till följande belopp, uppdelat på olika poster:

1. **Etablering, inklusive markförberedelser:** 25 000 kr

2. **Förlägningsarbete**

a) vid plöjning:
0.5 kr/m slinga vid skjuvhållfasthet 12 à 25 kPa.
Påverkas med bara ca $\pm 15\%$ av variationer i antalet rör per rörgrav inom gränsen 2 à 5 rör vid max djup 3 m.

b) Vid nedgrävning: ca 1.5 kr/m slang.

Beloppen inkluderar 50 % påslag på direkt kostnad för vinst och risk.

3. **Diverse arbetsmoment, dvs provtryckning, ihopkoppling av slangar, montering av styr- och reglerutrustning inklusive 50 % påslag på direkt kostnad för vinst och risk:**

1.65 kr/m slang.

4. **Material**

a) Slang

Uppgifter gavs av SGI för slangar vid tryckklass 6.3 resp 10 PN. Den lägre klassen ansågs acceptabel för grövre rör $d \geq 0.04$ m, den högre för mindre rör. Den lägsta behandlade diametern var 0.025 m.

Detta ger följande kostnader varvid dock första kolumnen representerar värden acceptabla för en ytkollektor, men ej ett lager:

Diameter, m	0.25	0.25	0.40
Tryckklass, PN	6.3	10	6.3
kr/m	3.38	4.03	6.39

b) Kopplingar

Kostnaden för individuella kopplingar gavs. Med typisk geometri svarar dessa för ca 0.2 kr/m och 0.35kr /m vid 0.025 resp 0.04 m diameter, inklusive 30 % påslag.

c) Samlingsledningar

Individuella priser gavs. Vi har approximerat dessa.

Totalt för poster a), b), c) erhålls värdena i Tabell 6, post 4.

5. Köldbärarvätska och påfyllning

SGI har antagit att systemet fylls med Ca Cl_2 (vägsalt) med vissa inhibitorer enligt en kommersiellt tillgänglig blandning. Skattad kostnad 2 800 kr/m³ för vätskan eller med 30 % påslag för vinst och risk 3 640 kr/m³. Därutöver 500 kr/m³ för fyllningsarbeten, totalt sålunda 4 140 kr/m³. Vi menar att det är möjligt att få fram köldbärarvätska med acceptabelt korrosionsbeteende till väsentligt lägre pris och har därför istället räknat med 1 500 kr/m³ inklusive fyllningsarbeten, vinst och risk. Vid ytterdiameter $d = 0.04$ m resp 0.025 m (innerdiameter 0.0336 resp 0.0192 m) blir kostnaden 1.67 kr/m resp 0.75 kr/m, därav 0.32 kr/m bidrag från samlingsledningar.

6. Total kostnad

Den totala kostnaden bli sålunda följande

		25 000 kr		
		d=0.025m 6.3 PN	d=0.025 m 10 PN	d=0.04m 6.3 PN
1. Etablering för				
2. Förlägningsarbeten vid plöjning	kr/m	0.50	0.50	0.50
3. Diverse arbetsmoment	kr/m	1.65	1.65	1.65
4. Slang, kopplingar, samlingslådor	kr/m	3.93	4.58	7.14
5. Styr- och regleringsmaterial	kr/m	0.90	0.90	0.90
6. Köldbärarvätska + påfyllning**	kr/m	0.75	0.75	1.67
7. Post 2 till 6	kr/m	7.73	8.38	11.86
8. m ³ lager per m slang = D _x D _y , enligt Bilaga 1	m ³ /m		0.667	0.800
9. Kostnad per m ³ = (7)/(8)	kr/m ³		12.6	14.8
10. Etableringskostnaden för ett lager med 22 780 m ³ nominell volym	kr/m ³		1.1	1.1
11. Kostnad inklusive etablering	kr/m ³		13.7	15.9

0.025 m slangen ger sålunda den lägsta kostnaden per m³.

* Vid grävning ökas kostnaden med ca 1 kr/m. För kol 2 motsvarar detta en ökning med 1.5 kr/m³ och för kol 3 med 1.25 kr/m³.

** Baserad på volym i slangarna + 0.32 kr/m för samlingsrören.

BILAGA 3

KOSTNADER OCH PRESTANDA FÖR LERLAGER MED VERTIKALA KANALER

SGI och CTH har kommit fram till att ett lerlager med vertikala kanaler ger lägsta specifika kostnad för given prestanda, om man använder dubbla U-rör med ett relativt stort skänkelavstånd — ca 0.5 m. Detta framgår av följande utdrag ur Ref 7, 11. Lagervoly m 50 000 m³; djup: 20 m, d = 0.02 m.

1	2	3	4	5	6	7
Värme- över- föring/m ³	Värme- överför- ingsmot- stånd/m ³	Skänkel avstånd	m ² lager- yta per kanal*	Kostnad per m ³	Kostnad per m kanal (2 rör) = (4)x(5)	Kostnad per W/K = (5)/(1)
α_v W/Km ³	r_v Km ³ /W	m	D_m^2 m ²	kr/m ³	kr/m	kr K/W
1.0	1.0	0.10	2.59	21.4	55.4	21.4
1.0	1.0	0.30	3.54	17.8	63.0	17.8
1.0	1.0	0.50	4.18	16.5	68.9	16.5
0.5	2.0	0.10	4.62	14.8	68.3	29.6
0.5	2.0	0.30	6.16	12.8	78.8	25.6
0.5	2.0	0.50	7.16	12.2	87.0	24.4

* En kanal består av två U-rör, dvs 4 slangar.

Sålunda har vi utgått från värdena för skänkelavståndet 0.5 m som även valts för lagret för 36 000 m³ vid Söderköping. Det dimensionerades för $\alpha_v = 0.66$ W/Km.

Enligt vår bedömning är $\alpha_v = 0.5$ W/Km³ ungefär optimalt för ett lager som laddas med naturvärme utan värmepump, eftersom effekten per m³ blir så låg att man trots lågt α_v får relativt låga temperaturskillnader. Laddas däremot lagret med en värmepump, blir effekten per m³ så hög att $\alpha_v = 1.0$ W/Km³ är ungefär optimal. Dessa två värden har sålunda använts i vår analys.

Vid beräkning av medeltemperaturskillnaden mellan lagret och kylvätskan har överföringsmotståndet r_v multiplicerats med fördelningsfaktorn $F = 1.1$, dvs $r_v' = F r_v$.

BILAGA 4

MARKKOLLEKTORER

4.1 Prestanda

Stora markkollectorer har använts för infångning av energi från dels luften dels solen vid bl a konstfrusna isbanor vid Ryddalen (Göteborg), Falun och Grosvad (Finspång). Vanligtvis består dessa av rör av galvaniserat järn eller plåt med diametrar på 17 à 25 mm och delning på ca 110 mm. Rören ligger ibland i markytan, ibland nedbäddade i en bädd av stenmjöl eller asfalt för att förbättra ledningen mellan rören och marken.

I vårt fall behövs ej så hög energinfångning per m² mark, varför man bör kunna klara sig med plaströr på ca 25 mm diameter nedplöjda några cm under mark för att skydda rören, med spåren återfyllda med lera eller sand. Även ett väsentligt större avstånd mellan rören bör kunna accepteras än för isbanor.

Vi har antagit att man minskar antalet rör per m från 9 till 4 och att detta samt den mindre raffinerade förläggningsmetoden reducerar energiupptagningen per m² markyta till 35 à 40 % av värdet för en kollector av typ Ryddalen. Då erhålls ett bidrag på ca

$$q_k = 4.5 (T_L - T_k) + 0.14 q_s \text{ Wh/m}^2$$

där första termen representerar energiupptagning från luften och andra termen från solinstrålningen,

T_L = medelvärde av lufttemperaturen under laddningsperioden, °C

T_k = medelvärdet av kollectorns vätsketemperatur under laddningsperioden, °C

H = laddningsperiodens varaktighet, timmar

q_s = solinstrålning under laddningsperioden, Wh/m²

För Mellansverige (Stocholm) blir T_L ca 14.3°C , q_s ca 690 kWh/m^2 och H ca 3 650. Lagrets medeltemperatur blir ca 1°C så att med värdet på ΔT beräknat i Bilaga 1 (5°C) blir T_k ca 6°C . Då erhålls q_k 226 kWh/m^2 eller för lagrets djup = 2.5 m, $226/2.5 = 90 \text{ kWh/m}^3$. För laddning fordras 41.4 kWh/m^3 (se Bilaga 1) och för sommarvärme till nätet vid värmefaktor 2.8 fordras $44 \text{ kWh/m}^3 \times 1.8/2.8 = 28.3 \text{ kWh/m}^3$, totalt sålunda 69.7 kWh/m^3 , så att bidraget 90 kWh/m^3 räcker till med god marginal. Räcker ändå bidraget ej under en mycket kall sommar, kan kompletteringsladdning ske med värmepumpen under laddningens slutskede.

Det bör betonas att detta är en grov ansats. Data från befintliga markkolektorläggningar är ofullständiga och fordrar noggrannare analys för att få ett pålitligt samband. Ändå bör den här använda ekvationen vara tillräckligt noggrann för att belysa kollektorns möjlighet i stort. Visar en noggrannare analys vissa avvikelser, kan detta kompenseras genom att lägga fler eller färre slangar.

Eftersom avståndet mellan kolektorrrören är relativt stort, blir marken mellan rören varmare än marken vid själva kolektorrrören. Detta leder till viss värmetransport vertikalt till lagret direkt från markytan. En del av den energi som kolektorn på grund av de glesta rören ej kan utnyttja kommer sålunda ändå lagret tillgodo genom vertikal värmeledning.

4.2 Kostnad

Kollektorn bör kunna plöjas ned med en traktor, fyra rör åt gången, och leda till ungefär samma plöjningskostnad per m slang som för lagret. Med hänsyn till det låga nedplöjningsdjupet, ca 5 cm, är påfrestningarna på slangen under plöjningen begränsad, varför tryckklass 6.3 PN bör kunna användas.

Enligt Bilaga 1 leder detta till en kostnad på 7.73 kr/m slang motsvarande $7.73 \times 4/2.5 = 12.4 \text{ kr/m}^3$ nominell lagervolymer.

Etableringskostnaden för anläggning av kollektorn bör vara mycket låg eftersom etableringen ändå måste ske i samband med anläggning av lagret. Vi antar att etableringskostnaden ökar med ca 7 000 kr på grund av kollektorn, motsvarande ytterligare 0.4 kr/m³ lagervolym. Kollektorns kostnad blir då totalt 12.8 kr/m³.

BILAGA 5

BERÄKNINGAR FÖR VÄRMEPUMPARNA

5.1 Värmefaktor

Värmefaktorn har beräknats från följande formel:

$$VF = K (T_k + 273) / (T_k - T_f)$$

- T_k = kondenseringstemperatur, °C
 T_f = förångningstemperatur, °C
 K = korrektionsfaktor för Carnotvärmefaktor som satts till 0.53 för Alternativ 1 och 2 och vinter, vår och höst drift Alternativ 4. För Alternativ 2 som har två mindre värmepumpar och för sommardrift av Alternativ 4 där en stor värmepump drivs med låg effekt har K satts till 0.50. Dessa värden stämmer ungefär med tillverkarens uppgifter.

Sedan har elenergiebehovet utökats med 3 % för pumpenergi för perioder då ett lager varit inkopplat (Alternativ 1 till 3, vinter och sommar) och med 1.5 % för perioder då inget lager varit inkopplat (vår och höst Alternativ 1 till 4), vinter och sommar även för Alternativ 4).

För referensförutsättningarna har fjärrvärmevattnets temperaturer antagits uppgå till 55°C så att värmepumpen behöver leverera 46°C vatten. Med 4°C temperaturskillnad i kondensorn medför detta $T_k = 50°C$. Under resterande årstid får värmepumparna (eftersom pannorna inte är i drift) $T_k = 50 + 4 = 54°C$.

När värmepumpen försörjs med värme från luftbatteri eller kollektor har T_f beräknats från medelvärdet av lufttemperaturen för årstiden minus medeltemperaturskillnaden i luftbatteri eller kol-

lektor, minus 2°C för halva temperaturskillnaden mellan cirkulationsvätskans inlopps- och utloppstemperatur och 4°C minimum temperaturskillnad i förångaren.

När värmepumpen försörjts med värme från lagret har temperaturskillnaden över lagret beräknats enligt Bilaga 1 eller 3 beaktats med en korrektion för lagrets temperatursving.

5.2 Kostnad

Riktpris från tillverkare + 100 % för byggnad och övrig utrustning och anslutningar.



**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 860674-3
från Statens råd för byggnadsforskning till Margen
Consult AB, Nyköping.**

R56: 1988

ISBN 91-540-4902-4

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Art.nr: 6708056

**Abonnemangsgrupp:
Ingår ej i abonnemang**

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

Cirkapris: 36 kr exkl moms