



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

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



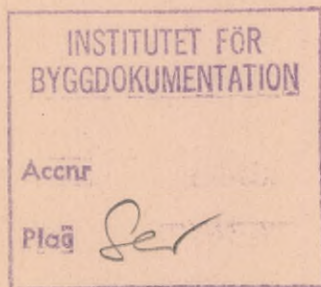
Rapport

R86:1988

R Lagring av spillvärme i bergrum  
och borrhålslager i Vänersborg

R/TK

Gunnar Gustafson



Byggeforskningsrådet

R86:1988

LAGRING AV SPILLVÄRME I BERGRUM  
OCH BORRHÅLSLAGER I VÄNERSBORG

Gunnar Gustafson

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 840217-3  
från Statens råd för byggnadsforskning till VIAK AB,  
Göteborg.

## REFERAT

Spillenergi från Vargön Alloys utnyttjas för energiförsörjning till Holmens Bruk samt fjärrvärmenätet i Vänersborg. Med ett säsongslager är det möjligt att öka spillvärmeutnyttjandet i fjärrvärmenätet.

I en tidigare BFR-rapport (1985) genomfördes en ekonomisk förstudie beträffande värmelager i berg vid Vänersborg. Sedan den studien utfördes har förutsättningarna ändrats i flera avseenden för genomförande av ett värmelagringsprojekt. Föreliggande studie belyser möjligheterna att med nuvarande förutsättningar utföra ett kombinerat bergrum- och borrhålslager. Föreslagen lagerstorlek uppgår till ca 10 GWh.

På grund av den minskade mängden dumpad spillenergi från Vargön Alloys samt allmänt sänkta energiproduktionskostnader under senare år har intresset för genomförande av ett värmelagringsprojekt minskat.

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, oblekt papper.

R86:1988

ISBN 91-540-4939-3

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

INNEHÅLLSFÖRTECKNINGSID

0.	SAMMANFATTNING	3
1.	INLEDNING	5
1.1	Bakgrund	5
1.2	Syfte	5
2.	VÄNERSBORGS FJÄRRVÄRME	7
2.1	Effekt- och energibehov	7
2.2	Hetvattenproduktionsenheter	7
3.	VARGÖN ALLOYS AB - ENERGIPRODUKTION	9
3.1	Produktionsugnar	9
3.2	Energileveranser	15
4.	GEOTEKNISKA FÖRUTSÄTTNINGAR	16
4.1	Tektonik och geologi	16
4.2	Bergmekaniska, geohydrologiska och vatten- kemiska aspekter	20
4.3	Utformning, bygg- och borrhningsteknik	25
5.	LAGERUTFORMNING	29
5.1	Bakgrund	29
5.2	Förutsättningar vid lagrets dimensionering	31
5.3	Layout av värmelager	33
6.	VÄRMEFÖRLUSTBERÄKNINGAR	36
6.1	Stationära värmeförluster	36
6.2	Transienta värmeförluster	37
7.	SYSTEMLÖSNINGAR OCH DRIFTSTRATEGI	41
7.1	Inlagringsperiod	41
7.2	Uttagsperiod	42

	<u>SID</u>	
8.	EKONOMI	45
8.1	Investeringar	45
8.11	Berg- och markarbeten	45
8.12	Värmeteknisk utrustning	48
8.13	Investeringskalkyl	49
8.2	Driftekonomi	50
9.	REFERENSER	52



## 0. SAMMANFATTNING

I Vänersborg finns ett intressant exempel på hur spillvärme-  
produktion vid en stor industri, Vargön Alloys, kan utnyttjas  
och bli en viktig del av energiförsörjningen för en annan  
industri, Holmens bruk, samt för kommunens fjärrvärmenät.

Denna rapport redovisar en principiell teknisk lösning på hur  
ett säsongsvärmelager skulle kunna öka spillvärmeutnyttjandet  
ytterligare. Ett värmelager i anslutning till fjärrvärmenätet  
laddas under sommaren med spillenergi som i annat fall skulle  
dumpas. Under vintern när oljeeldning krävs för att täcka  
fjärrvärmenätets effektbehov, urladdas lagret och ersätter på  
detta vis en del av oljeeldningen.

I en tidigare förstudie (ref.5) har förutsättningar för ett  
värmelager i Vänersborg studerats. Sedan den studien genom-  
fördes har förutsättningarna för värmelagring ändrats i flera  
avseenden, exempelvis:

- Energipriser är allmänt lägre
- Mängden dumpad energi från Vargön Alloys har minskat
- Den totala anslutningseffekten för Vänersborgs fjärrvärme  
är betydligt lägre än vad prognoser förutsade för några år  
sedan.

Vänersborgs fjärrvärme har idag ett energibehov av ca 110  
GWh/år varav ca 86% täcks med direkt spillvärmeutnyttjande  
vid Vargön Alloys.

Föreslaget lager utformas som ett berglager i två våningar.  
Mellan ett övre och ett undre tunnelgalleri borras hål för  
hydraulisk kommunikation. Ett sådant lager har ett bergrums  
installationstekniska fördelar med enkla in- och utmatnings-  
anordningar. Till skillnad från konventionellt bergrumsbygg-  
ande utnyttjas värmelagring i bergmassor som omger borrhålen,  
vilket medför betydligt mindre utsprängd volym ur berget och  
därmed ett förbilligande av byggandet.

De studerade lagerstorlekarna motsvarar ca 5 GWh respektive 10 GWh utvunnen energi per lagringscykel. Temperatursvinget i lagren förutsätts vara  $115-60 = 55^{\circ}\text{C}$ .

Värmeförlustberäkningar visar att den stationära termiska verkningsgraden för lagren torde bli 70-80%, det vill säga mellan 70-80% av inlagrad energi kan tillgodogöras under urladdningsfasen. Efter ca 15 års drift är ett tillstånd nära det stationära uppnått.

Anvärmningen av lagret samt de transienta värmeförlusterna under de första åren är stora varför kravet är mycket starkt på billig spillenergi vid idrifttagning av ett lager.

Kostnaden för genomförande av ett energilagringsprojekt har beräknats till drygt 30 Mkr för ett 5 GWh-lager och drygt 40 Mkr för ett 10 GWh-lager.

Sammanfattningsvis medför de under senare år ändrade förutsättningarna att det ekonomiska intresset har minskat för utförande av ett bergvärmelager. Nuvarande energiproduktionskostnader är så låga att ett bergvärmelager inte kan motiveras ekonomiskt, inte ens om inlagrad spillenergi skulle tillhandahållas gratis.



## 1. INLEDNING

### 1.1 Bakgrund

VIK AB har i en tidigare studie, daterad 1984-10-11 (reviderad 1985-03-13), belyst möjligheterna att utnyttja ett värmelager i Vänersborgs fjärrvärmenät (ref.5). Spillenergi från Vargön Alloys produktion lagrades sommartid för att utnyttjas av fjärrvärmenätet under vintern. Förstudien finansierades huvudsakligen av Byggforskningsrådet (BFR), men även Vänersborgs Fjärrvärme AB (VFAB) och Vargön Alloys AB bidrog till finansieringen. Studien behandlade dels konventionella utsprängda berggrum för värmelagring, dels bergvärmelager utförda i två våningar som sammanbinds med borrhål. I det senare fallet utnyttjas bergmassor för en stor del av värmelagringen, vilket gör att anläggningskostnaden kan nedbringas jämfört med ett utsprängt berggrum med samma lagringskapacitet.

De tekniska möjligheterna och ekonomiska utfallen för värmelager med lagringskapacitet 25 GWh respektive 45 GWh studerades i den tidigare förstudien. Härvid förutsattes att temperatursvinget i lagren var mellan temperaturnivåerna 115°C och 65°C.

### 1.2 Syfte

Förutsättningarna för värmelagring har i några avseenden ändrats under den tid som förflutit sedan ovannämnda studie utfördes. Exempelvis har fjärrvärmenätets totala anslutningseffekt i ett framtida färdigutbyggt skede reducerats, samt har större kännedom erhållits om storlek och tillgänglighet av spillenergi från Vargön Alloys.

Vattenfall har efter den tidigare förstudiefasen byggt en tunnel under den så kallade Huvudnäsön i syfte att öka vattenflödet i Göta älv. De geotekniska undersökningar och erfarenheter som framkom till följd av tunnelbygget kan till vissa delar utnyttjas vid bedömningen av förutsättningarna för ett bergvärmelager i området.

I föreliggande studie har uppdatering gjorts av tillämpliga delar ur den tidigare rapporten. Med anledning av de under åren ändrade förutsättningarna har dessutom lagerkonceptet modifierats. Bland annat har föreslagen lagerstorlek minskat till ca 10 GWh.

## 2. VÄNERSBORGS FJÄRRVÄRME

### 2.1 Effekt- och energibehov

Det av Vänersborgs kommun ägda VFAB, Vänersborgs Fjärrvärme AB, startade fjärrvärmeutbyggnaden 1981. För närvarande är ansluten effekt ca 48 MW. Producerad energi var under 1987 ca 107 GWh. Av detta utgjorde spillvärmeleveranser från Vargön ca 92 GWh, motsvarande ca 86% av totalt energibehov. Egen energiproduktion med oljeeldning var således ca 15 GWh.

Framtida energipriser avgör hur mycket ytterligare värmeförbrukare som blir ekonomiskt intressanta att ansluta. VFAB har vid Vargön och Onsjö mindre lokala fjärrvärmenät som är tänkbara att ansluta till det stora nätet. Totalt finns en potential av ytterligare 25-30 MW anslutningseffekt för fjärrvärmenätet.

Det totala effektbehovet för de färdiga framtida fjärrvärmeanläggningarna i Vänersborg kan enligt ovan beräknas till närmare 70 MW.

### 2.2 Hetvattenproduktionsenheter

Under värmeverksrörelsens första år producerades energi i provisoriska oljeeldade centraler. Numera sker den övervägande delen av hetvattenproduktionen genom spillvärmeutnyttjande vid Vargön Alloys. Maximalt kan ca 25 MW spillenergi levereras till fjärrvärmenätet med nuvarande installationer.

Sedan hösten 1985 finns en permanent hetvattencentral, Önaforsverket, för spets- och reservlastproduktion. Önaforsverket har 4 st oljeeldade (Eo4) pannor med 15 MW kapacitet, totalt således  $4 \times 15 = 60$  MW.

Från Vargön Alloys och Önaforsverket distribueras fjärrvärmen med en kulvert DN 400 mot Vänersborgs centrum. Totalt uppgår distributionsnätets kulvertlängder till närmare 20 km.

För framtiden planeras en hetvattencentral för spets- och reservlast, ca 30 MW, placerad vid fjärrvärmedistributionsområdets västra del.

### 3. VARGÖN ALLOYS AB - ENERGIPRODUKTION

#### 3.1 Produktionsugnar

Vargön Alloys är en av Europas ledande producenter av ferrolegeringar. Produktionen sker i 3 st elektrodugnar. Ugnarna försörjs med högspänd elkraft via transformatorer 130/10 kV. Normalt utnyttjas ett effektuttag av ca 90 MW. Belastningen är jämn men kan reduceras exempelvis genom avställande av en ugn vid stor belastning på elnätet. De 1000-gradiga avgaserna från processerna tas om hand i avgaspannor och så kallade economiser-kopplingar i anslutning till ugnarna. Beroende på temperaturområden produceras ånga och hetvatten från de olika energiåtervinningskretsarna. Ugnarna benämns med nummer 8, 9 och 12. Principscheman över energiåtervinnningssystemen finns i figurerna 3.2, 3.3 och 3.4. En samlad bild av spillvärmeutnyttjandet för fjärrvärmeproduktion ges i figur 3.1.

Data för ugnarna och deras energiåtervinnningssystem framgår av tabell 3.1.

Produktionen vid Vargön Alloys sker under hela året. Således kan energileveranser påräknas under hela sommaren liksom jul- och nyårshelger. Reducerad produktion och energileverans inträffar under ett par veckor på vintern när elpriset är som högst, varvid inspektion och underhåll av ugnar utförs.

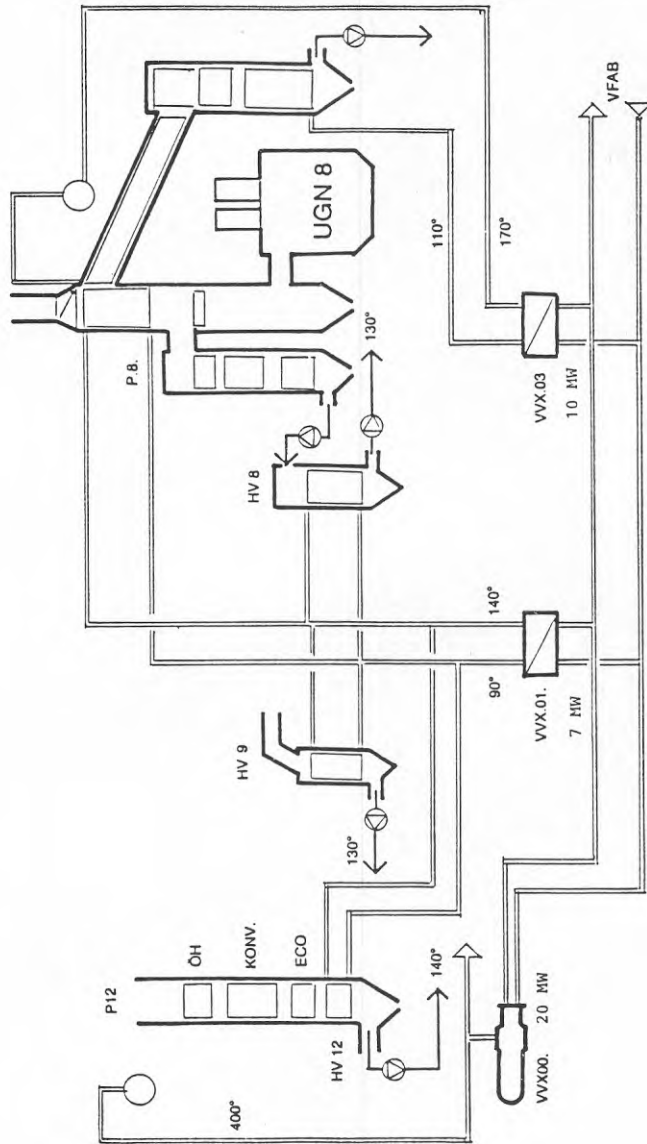


Fig 3.1 Hetvattenproduktion vid Vargön Alloys



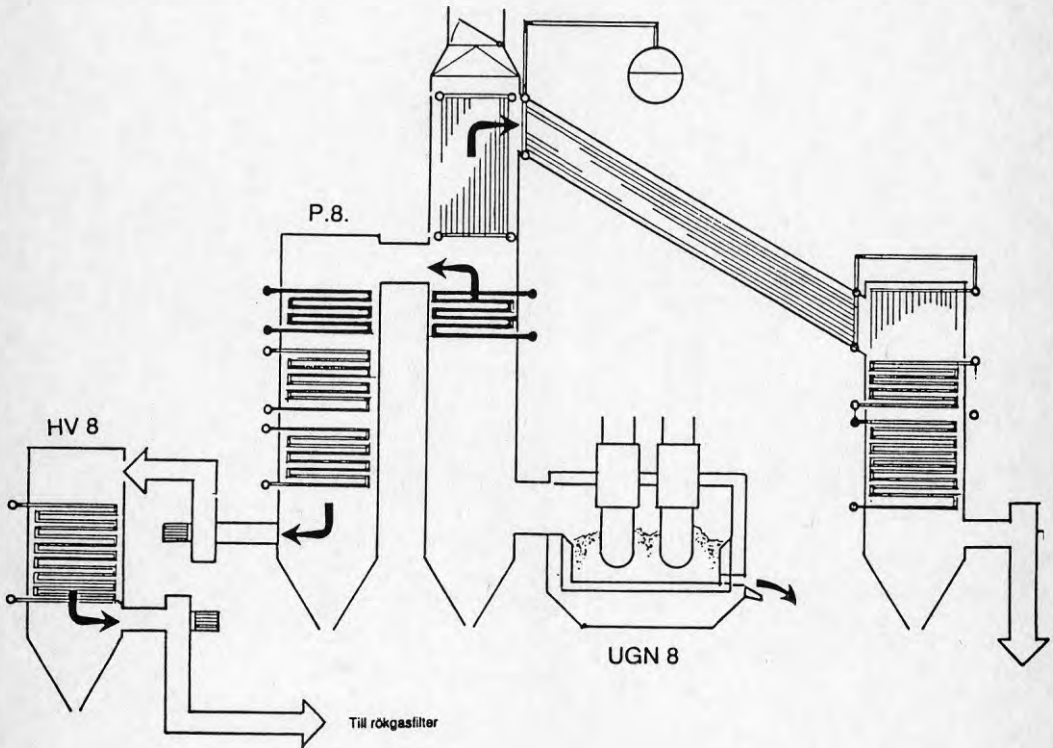


Fig 3.2 Energiåtervinning från ugn 8, Vargön Alloys

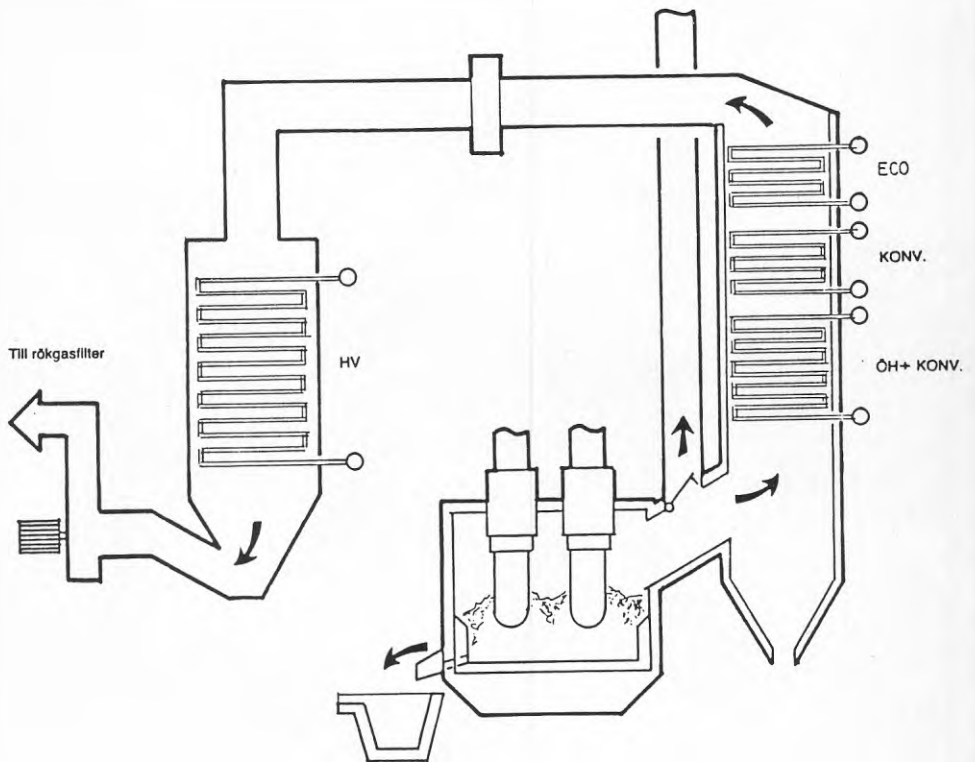


Fig 3.3 Energiåtervinning från ugn 9, Vargön Alloys

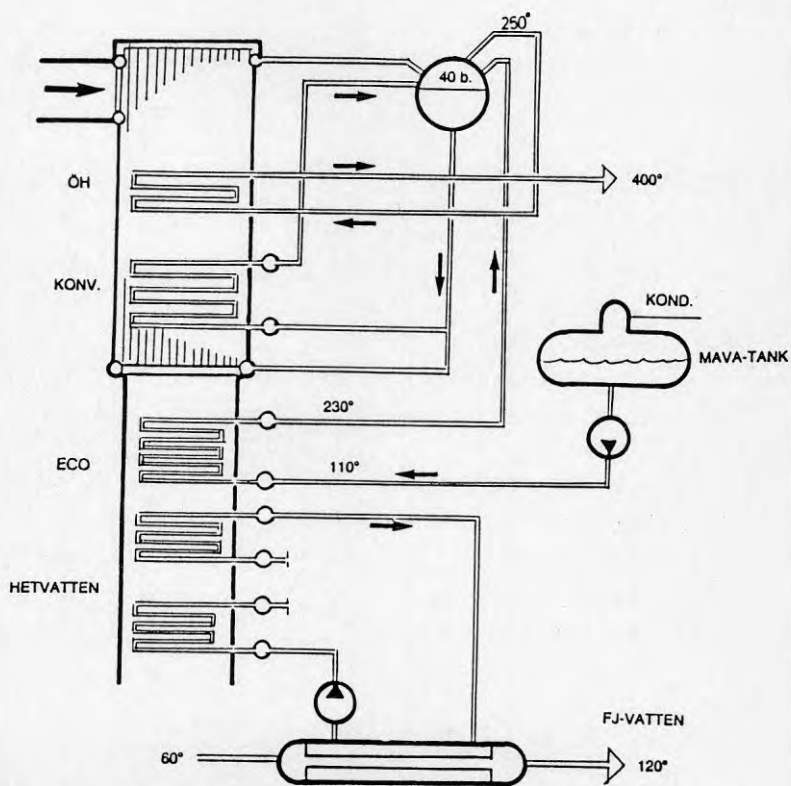


Fig 3.4 Energiåtervinning från ugn 12, Vargön Alloys

<u>Ugn</u>		<u>Ugn 9</u>	<u>Ugn 8</u>	<u>Ugn 12</u>
Produkt		HCFeCr	FeSi75%	ChCr
Elektroddiam.,	mm	1100	1450	1800
Transformatorkap.,	MVA	21	45	105
Driftlast,	MW	15	30	52
<u>Energiåtervinning</u>				
Rökgasmängd,	m <sup>3</sup> (n)			
Ångpanna		50000	50000	125000
Hetvattenpanna			50000	
Rökgastemp. kyltak	°C	600	900	650
"-	efter ångp.	300	290	250
"-	före hetvatten- panna	300	290/750	250
"-	efter   "-	140	140	140
Ångproduktion,	MW	3	12	20
Ångtemperatur	°C	420	420	ca 400
Hetvattenproduktion,	MW	2	12	1,3
Hetvattentemperatur	°C	120	120	120

Tab 3.1 Data för produktionsugnar, Vargön Alloys

### 3.2 Energileveranser

Enligt uppgift är det med befintliga energiåtervinningsanläggningar möjligt att återvinna ca 60% av den elenergi som förbrukas i smältugnarnas processer.

Det mesta av återvunnen energi ur ugnar försäljs i form av ånga till Holmens pappersbruk. Drygt 150 GWh högtrycksånga av ca 350°C levererades till Holmens pappersbruk under 1987. Effektuttaget är varierande men energileveranserna uppgår normalt till 12-15 GWh per månad.

Med 2 st värmväxlare kan energi ur 140°C respektive 170°C hetvatten överföras till VFAB:s fjärrvärmenät. Kapaciteten för dessa värmväxlare är ca 10 MW respektive 7 MW. Dessutom finns en värmväxlare med vilken högtrycksånga från ugnarna kan utnyttjas för fjärrvärmeproduktion. Denna värmväxlare är dimensionerad för ca 20 MW överförd effekt. Den maximala effekt som kan tillgodogöras fjärrvärmenätet med nuvarande installationer är ca 25 MW.

Under 1987 levererades ca 92 GWh energi från Vargön Alloys till VFAB:s fjärrvärmenät. Med de drygt 150 GWh som levererades till Holmens pappersbruk uppgick försäld energi via återvinnningssystemen till totalt nära 250 GWh under 1987. Endast lite av producerad spillenergi kunde icke tillgodogöras och blev dumpad. Den mesta dumpade spillenergin producerades under sommarmånaderna.

Betalning för levererad spillenergi från Vargön Alloys beräknas enligt kontrakt och baseras på gällande priser för olika energislag.

Under senaste uppvärmningssäsong har VFAB betalat ca 13 öre per kWh för erhållen energi. Sommartid har emellertid priset varit 11 öre per kWh.

#### 4. GEOTEKNISKA FÖRUTSÄTTNINGAR

##### 4.1 Tektonik och geologi

Som ett förstahandsönskemål för lokalisering av ett värme-lager har VFAB framhållit ett läge i anslutning till befintlig panncentral Önafors, på västra sidan av Göta älv vid Vargön.

##### **Tektonik**

Inledningsvis kan vi konstatera att Vänersborgs-/Vargönsområdet (samt hela Göta älv-dalen) har ett flertal större sprick- och rörelsezoner. I anslutning till dessa zoner finns berg med en stor mängd sprickor.

En detaljerad analys av sprickzoner har utförts från flygbilder över det primärt aktuella området vid Vargön. Resultatet av denna flygbildstolkning visas i figur 4.1. Två huvudsakliga spricksystem kan urskiljas. Dels ett spricksystem med sprickor i N 15° V och N 70° O och dels ett spricksystem N 80° V och N 15° O. Dessutom finns ett mer storskaligt system i N 40° O.

Dessa spricksystem verifieras även av den studie över lineament i södra Sverige som utförts från satellitbilder av Ehrenborg, SGU.

Inom storskaliga lineament eller sprickstråk behöver sprickor inte nödvändigtvis ha utbildats längs hela linjen. Spänningarna i berggrunden som en gång orsakade uppspräckningen kan även "ta omvägar".

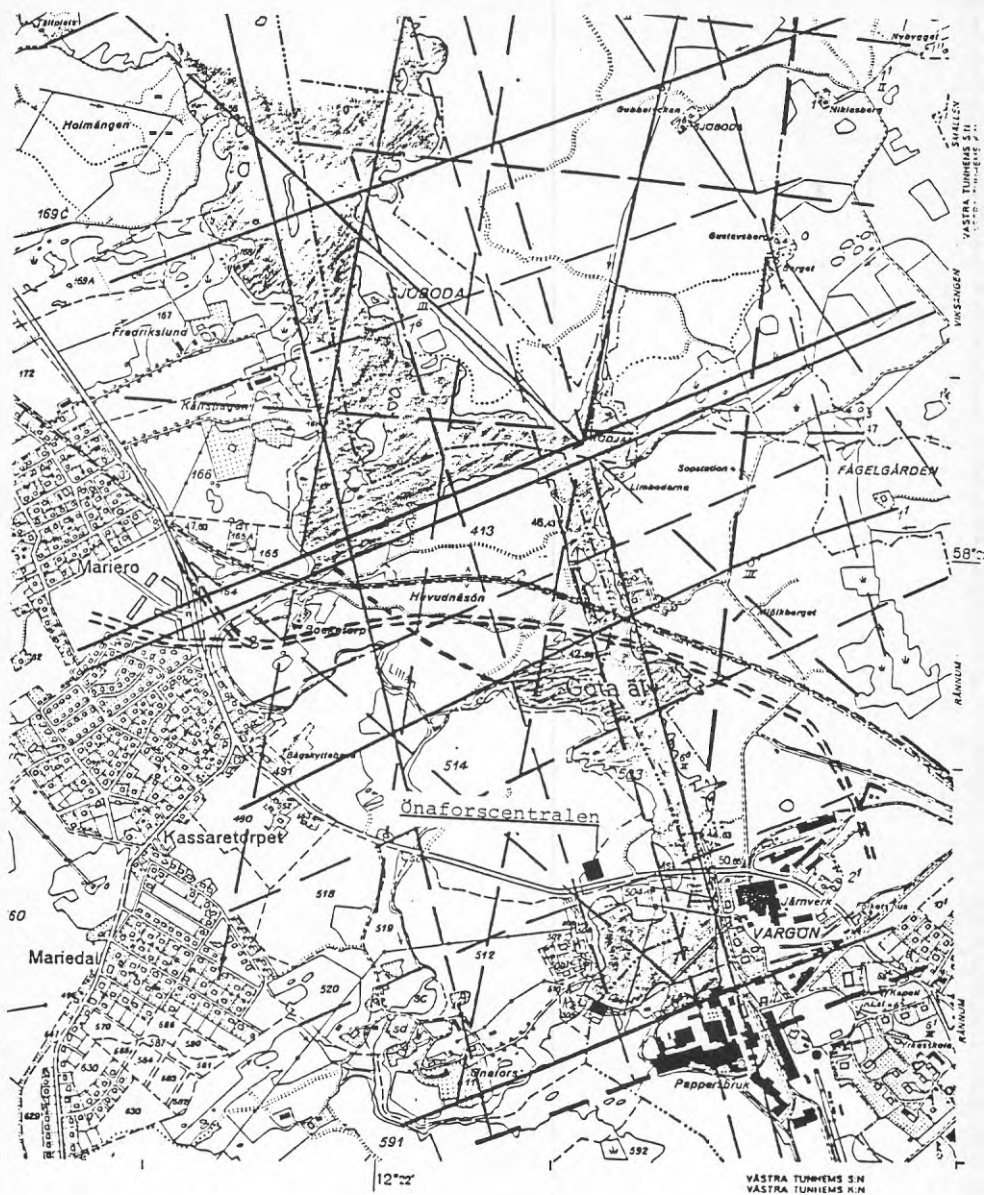
##### **Geologi**

Berggrunden i området utgörs av ådergnejs och migmatit. Öster om Göta älv återfinns grå ögongranit.



Vid Vargö-tunneln, strax norr om aktuellt område, som i skrivande stund håller på att färdigställas, är geologin i korta ordalag enligt följande:

Dominerande bergart är en gnejs med utpräglad foliering. Foliationsriktningen NS/50-70W utgör även en huvudsprickriktning, varvid foliationen representerar potentiella svaghetsplan. Sprickorna i denna riktning är relativt uthålliga och är ofta belagda med glimmermineral (biotit). Därutöver förekommer även sprickor i N20-30E/50SE och horisontella. Den horisontella sprickgruppen har vållat vissa problem i taket vid tunneldrivningen.



Figur 4.1 Sprickzoner i området vid Vargön

Erfarenheter från Trollhättan-Vänersborg visar att det förekommer mycket sprickigt berg, som ofta är mylonitiserat. Sprickorna är ofta kvartsläkta eller kalcitläkta.

De sprickor som oftast är öppna och kan vara mest vattenförande är sprickor i N-S riktning.

De geologiska förutsättningarna synes dock vara tämligen goda för att anlägga ett bergrumslager i anslutning till den befintliga panncentralen i Önafors. En definitiv lokalisering måste dock föregås av en fördjupad geologisk undersökning enligt nedan:

- Detaljerad berggrundskartering (hällkartering) inom det område som framgår av figur 4.1.
- Geofysisk VLF-undersökning för att lokalisera sprickors förekomst på djupet i berg.
- Undersökningsborrning för att provta berg och i detalj undersöka förekommande sprickor och sprickzoner.
- Laboratorietestning på bergkärnor för bestämning av bergarternas hållfasthets- och deformationsegenskaper.
- Hydrogeologisk undersökning innefattande provpumpningar för att utröna vattentransporterande förmåga i de olika sprickorna.
- Undersökning av bergets urlaknings- och vittringsegenskaper för att utröna bergrummets stabilitet vid de höga temperaturer som är aktuella vid värmelagring.
- Bergspänningsmätningar för att klarlägga spänningssituationen i området.

Dessa undersökningar utgör underlag för en detaljerad bedömning av berggrundens kvalitet, behov av länshållning under byggande och behov av tättnings- och förstärkningsinsatser.

#### 4.2 Bergmekaniska, geohydrologiska och vattenkemiska aspekter

Då berg värms upp induceras sk termiska spänningar. De termoinducerande spänningarnas storlek beror dels av temperaturstegringen  $T$ , dels av bergets materialparametrar  $E$ ,  $\alpha$  och  $\nu$ .  $E$  är här bergets elasticitetsmodul,  $\alpha$  är bergets längdvidgningskoefficient och  $\nu$  är dess tvärkontraktionstal.

I figur 4.2 redovisas temperaturfördelningen runt ett hetvattnelager vid olika långa uppvärmningstider. Med ledning av temperaturberäkningarna har det termoinducerade spänningstillståndet i berget efter 10 år beräknats, se figur 4.3. En ökning av bergtemperaturen medför termoinducerande spänningar i bergytan närmast lagringsutrymmet, som för en uppvärmning på  $100^{\circ}\text{C}$  kan bli ca 0,1 - 0,3 av bergartens enaxiella tryckhållfasthet (ref 7). Detta tillskott torde ej, bortsett från lokala ytavskaolingar, påverka totalstabiliteten såvida belastningen på berget före uppvärmning inte befinner sig på gränsen till vad det tål.

Kunskap om bergarternas hållfasthet och elastiska egenskaper avseende lakning i olika kemiska miljöer är av stort intresse vid bedömning av långtidsstabiliteten vid lagring av varmt vatten.

Laboratorieförsök (ref 8) visar att lakning av en bergart (i detta fall gnejs) kan ge reducerad E-modul. Lakningen utfördes i en autoklav med  $120^{\circ}$  vatten. Lakningstiden varierades från 0 - 24 veckor. Resultat av försöken redovisas i figur 4.4 och tabell 4.1. Även andra egenskaper hos berget kan tänkas förändras då detta utsätts för lakning, t ex böjbrottlasten och brottsegheten.

För att bedöma effekterna på bergets långtidsstabilitet på grund av spänningstillskotten från uppvärmningen rekommenderas en utförlig numerisk modellanalys med t ex Finita Differensmetoden (FDM). Modellering bör också utföras parallellt med utsprängningen av lagret, varvid modellen successivt kan

förfinas allteftersom geologisk detaljinformation blir tillgänglig. Modelleringen kan även ligga till grund för slutlig bestämning av förstärkningsinsatserna.

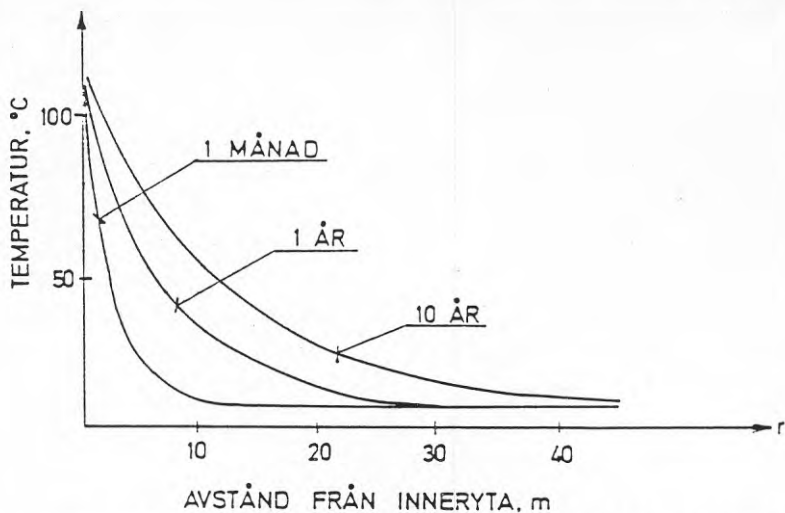
Grundvattensystemets egenskaper har stor betydelse vid värme-lagring i oinklädda berggrum. Vid utsprängning av ett berggrum eller en gruva sker en omlagring av de initiella spänningarna kring lagerutrymmets periferi. Detta förändrade spännings-tillstånd påverkar i sin tur bergets spricksystem, de vatten-förande enheterna, med en nettoeffekt som bl a beror på anläggningens geometri i förhållande till spricksystem och det ursprungligt rådande spänningsfältet. Totalt sett tenderar spänningsomlagringen att sluta existerande sprickor, varvid den totala grundvattenströmningen reduceras inom det spänningspåverkade området.

Laddningen av berggrummet genom tillförsel av uppvärmt vatten medför att temperaturen i lagrets omgivning successivt höjs till en pseudostationär nivå. Bergtemperaturen kommer att oscillera inom vissa givna gränsvärden, vilka beror av djup och avstånd till lager, bergets termiska egenskaper samt lagringens temperaturintervall och lagringscykel.

Temperaturhöjningen påverkar grundvattensystemet dels genom att vattnets viskositet och densitet förändras och dels genom att termoinducerande spänningar uppkommer, förändringar som även de påverkar vattenvägarna och därmed det totala grundvattenflödet kring lagret.

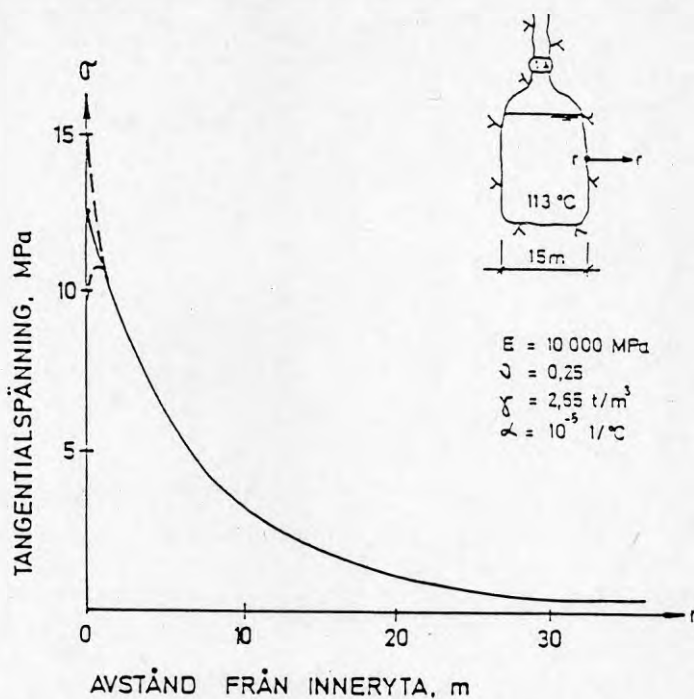
Sammantaget innebär dessa spännings- och temperatureffekter i berglagrets direkta närhet att även grundvattenströmningen förändras i jämförelse med vad som kan förväntas med kännedom om bergmassans ursprungliga hydrauliska egenskaper.

Den konduktiva energitransporten från lagret och ut i omgi-vande berg ger upphov till energiförluster, som påverkar lagrets termiska verkningsgrad. Den naturliga grundvatten-strömningen bidrar dessutom till ytterligare förluster genom att konvektiva förluster adderas till de konduktiva. Kvantitativt ökar den konvektiva transporten med ökad vattenföring i berget (ref 9).



Figur 4.2 Temperaturfördelningen runt ett hetvattenlager vid olika uppvärmningstider.

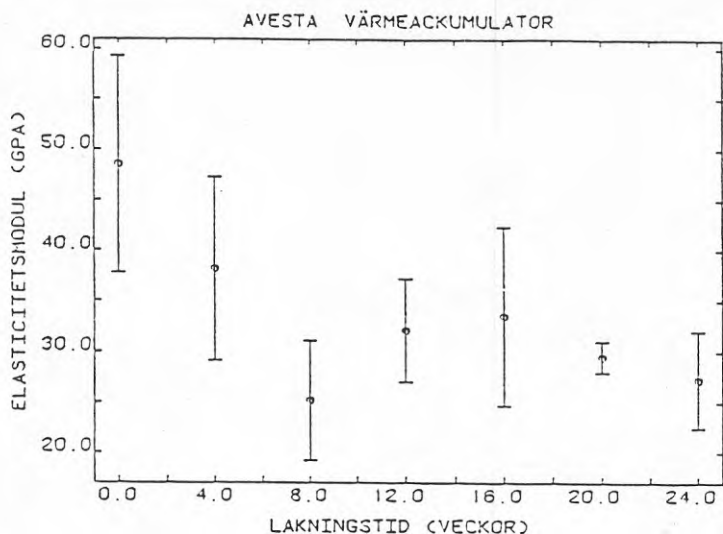




Figur 4.3 Det terminducerade spänningstillståndet efter 10 år.

Lakningstid (veckor)	Antal tester	E (GPa)
0	5	48.29
4	4	38.16
8	3	25.12
12	4	32.09
16	4	33.48
20	3	29.48
24	5	27.22

Tabell 4.1 Medelvärdet för E vid olika lakningstider.



Figur 4.4 Medelvärde och standardavvikelse av E som funktion av lakningstiden.

En annan faktor som kan bidra till en ökad konduktivitet i berget är att vissa sprickfyllnadsmaterial kan lösa sig då de kommer i kontakt med uppvärmt vatten.

Då varmt vatten kommer i kontakt med sidoberget i ett lagringsutrymme, sker en reaktion som innebär en urlakning av joner till lagringsvattnet. Urlakningsprocessen i sig innebär inte något allvarligt hot mot anläggningens driftsäkerhet. Det är följderna av den med tiden allt högre koncentrationen av joner i lagringsvattnet som kan ge upphov till utfällningar i ledningar och värmeväxlare. Utfällningar kan ta sig formen av kristallina ytbeläggningar eller kolloidala partiklar.

Fem faktorer styr jonutlakningen och därmed också indirekt eventuella beläggings- och igensättningsproblem i systemet:

1. Reaktionstemperatur
2. Bergartstyp
3. Ursprunglig vattenkvalitet
4. Stillastående eller strömmande vatten
5. Förhållandet vattenvolym - bergyta.

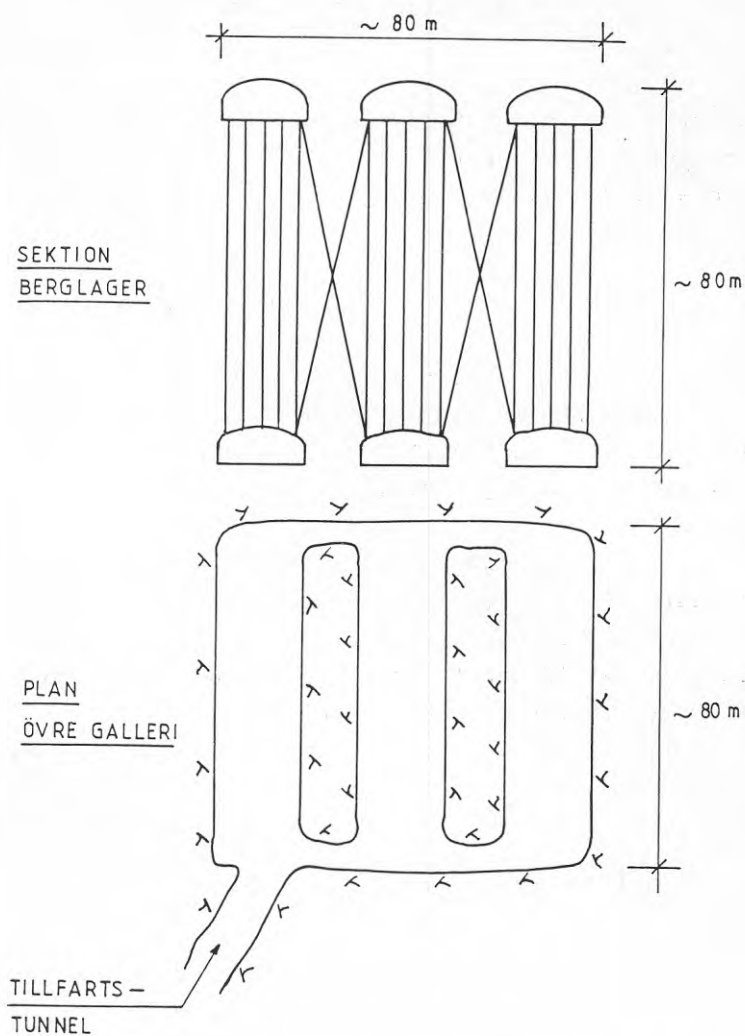
Genom att studera dessa faktorer och begränsa deras skadliga inverkan kan utfällningsproblem minimeras för varje speciell anläggning (ref 10).

Om ett lager omges av bergarter innehållande sulfidmineraler kan detta betyda att lagringsvattnet är starkt korrosionsaggressivt, vilket kan påverka valet av material i ledningar och dylikt.

#### 4.3 Utformning, bygg- och borrhningsteknik

I varje bergrum sker värmeutbyte med omgivande berg. Genom att utföra rummen som parallella skepp i två våningar och förbinda dem med borrhål ökar man kontaktytan mot berget väsentligt, se figur 4.5.

Genom att utföra lagret på detta vis har man de installationstekniska fördelar som ett normalt bergrum har, med enkla in- och matningsanordningar och en viss temperaturskiktning i lagret. Det förutsätts härvid att god kommunikation erhålls i såväl vertikal- som horisontalled.



Figur 4.5 Principiell lagerutformning för ett 10 GWh lager.  
Plan och sektioner.

Berglager i två våningar innebär jämfört med ett traditionellt bergrumsbyggande att man bygger både på höjden och bredden. Den väsentliga delen av lagret är borrhålen mellan de två våningarna, se figur 4.5. För god funktion erfordras hydraulisk kontakt mellan borrhålen inom respektive våning.

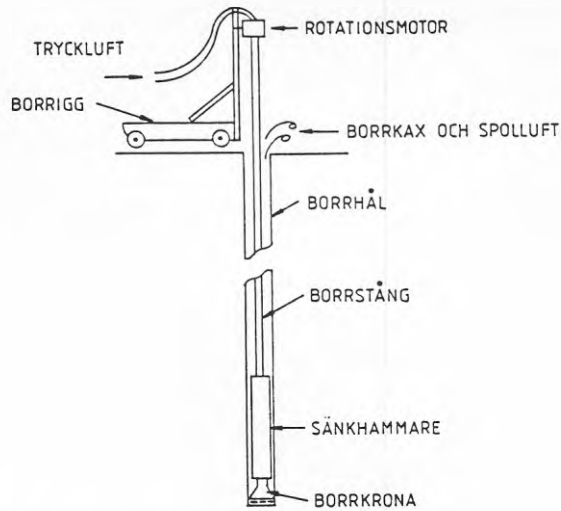
Vid tillredning av övre galleri för borrhning erhålls samtidigt hydraulisk kontakt. Layouten på övre galleriet måste bli en kompromiss mellan följande parametrar:

- Minimal tillredningsvolym.
- Sammanlagd golvyta jämnt fördelad inom lagret och anpassad till borrhålens c/c-avstånd (i detta fall c/c 3.2 m alt 4.0 m).
- Utrymmesbehov för borrhvagn. Takhöjd min 5.0 m ger plats för borrhning med t ex Roc 601 eller BVB 25 utrustad med sänkbormmaskin. Frigång mellan hål och teoretisk väggkon- tur har satts till 0.5 m.
- Stabilitet

För utförligare redovisning av berglager i två våningar hänvisas till Byggforskningsrapport "Värmelagring i bergrum med två våningar" av Gunnar Gustafsson, VIAK AB (ref.1).

För ett bergrumslager i två våningar kan gallerisprängnings- teknik utnyttjas, vilket skulle ge ett utrymme i övre och undre galleri med en bredd av 18 m och en höjd av minst 5.5 m. Detta ger möjlighet till att utnyttja konventionell borrhningsutrustning i det övre galleriet.

Under senare år har tekniken att borra djupa raka hål i berg främst utvecklats för brunnsborrnings- och gruvindustrin. Införandet av sänkhammare har väsentligt ökat borrhningskapa- citeten, vilket medför att kostnaden har kunnat hållas låg, se figur 4.6.



Figur 4.6 Borrning med sänkhammare.

Med denna typ av borrning kan de slumpmässiga hålavvikelserna hållas inom ca 1 - 2% av borrhålsdjupet. Till detta kommer de systematiska avvikelserna, som orsakas av bergväxt m m. Dessa bör emellertid stå relativt lika i ett fält av hål och påverkar därför inte lagrets funktion.

Om en avvikelse på ca 2 m kan tolereras ur byggnadsteknisk synpunkt, medför detta således ett största vertikalt avstånd mellan gallerierna av ca 100 m. Vid större borrhålsängder ökar dessutom specifik borrhålskostnad samt erforderlig utsprängd bergvolym i undre galleri och ramp.

## 5. LAGERUTFORMNING

### 5.1 Bakgrund

För värmelagring i stor skala har olika koncept prövats. Som ett första steg utfördes lagren som isolerade gropar, där uppvärmt vatten lagrades från sommar till vinter. Emellertid finner man att denna teknik har sina begränsningar och att den specifika kostnaden för lagret endast sjunker obetydligt sedan en viss storlek uppnåtts. Att utföra stora gropmagasin som oisolerade i syfte att minska anläggningskostnaderna medför att värmeförlusterna blir orimligt höga.

Nästa steg i utvecklingen har varit att flytta ned lagret i ett oisolerat bergtrum. Sådana anläggningar finns exempelvis i Avesta och i Uppsala (Lyckebo). Med en sådan förläggning sänks den specifika kostnaden vid stora volymer. Tillredningskostnaderna blir emellertid så stora att bergtrumslager inte blir kommersiellt genomförbara med nuvarande teknik och energipriser.

För att ytterligare sänka den specifika kostnaden har flera modifierade förslag lagts fram. Ett är att inte lasta ut allt berg ur bergtrummet, utan lämna kvar en väsentlig mängd block som får utgöra en del av lagret.

Ett annat förslag är att kombinera borrhålslager med bergtrum. Nackdelen med ett konventionellt borrhålslager är att omfattande rördragning erfordras för att leda värmen ner i borrhålen. Dessa rör är känsliga för yttre påverkan och kräver ett omfattande injusteringsarbete, vilket är till belastning vid bedömning av driftsäkerhet och funktion för systemet.

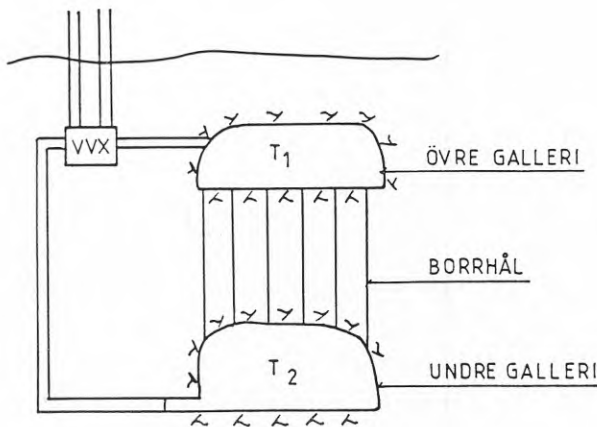
Genom att utföra ett berglager i två våningar som förbinds med borrhål vinner man dels de installationstekniska fördelar som ett bergtrum har med enkla in- och utmatningsanordningar, dels utnyttjas värmeinlagring i bergmassor som omger borrhålen, vilket förbilligar den totala tillredningskostnaden jämfört med ett konventionellt bergtrumslager.



Berglager i två våningar innebär jämfört med ett traditionellt bergrumsbyggande att man bygger mer på både bredden och höjden. Detta innebär att utbredningen i horisontalled minskar, vilket kan vara fördelaktigt i den händelse tillgängligt utbredningsområde är begränsat. I alla händelser innebär det kompaktare byggnadssättet fördelar ur värmeförlustsynpunkt.

Beroende på storlek på tvåvåningslagret kan de övre och undre utsprängda bergrummen utföras som gallerier av parallella skepp. Mellan gallerierna på samma plan utförs tunnlar som ger hydraulisk kontakt. Den hydrauliska kontakten i vertikallid upprättas med det stora antalet borrhål mellan våningarna. Vid in- och urladdning av lagren kan därmed temperaturskiktning erhållas, vilket är nödvändigt för god funktion.

I anslutning till utlastningstunnel för nedre galleri utsprängs lämpligen en service- och installationstunnel. I denna tunnel installeras pumpar som betjänar värmelagret samt värmväxlare bergrumsvatten/fjärrvärme. Installationstunneln placeras på så låg nivå att lagrets trycknivå blir tillräcklig för undvikande av kavitation och kokning i in- och utmatningssystem.



Figur 5.1 Berglager i två våningar.

Lagrets trycknivå bestäms av den grundvattenyta som råder i aktuellt område. Erforderliga expansionsvolymer säkerställs med hjälp av utsprängda volymer i eller vid utlastningstunneln till nedre galleri.

## 5.2 Förutsättningar vid lagrets dimensionering

Värmelagrets utformning har skissats för två lagerstorlekar:

Alternativ 1,	värmelager	5 GWh	
"	2,	"	10 GWh

Temperaturer i lagret antas vara följande:

Max temp,  $T_{\max} = 115^{\circ}\text{C}$

Min temp,  $T_{\min} = 60^{\circ}$

Medeltemp under året,  $T_m = 85^{\circ}\text{C}$

Medeltemperaturen i lagret antas variera under året enligt följande figur 5.2.

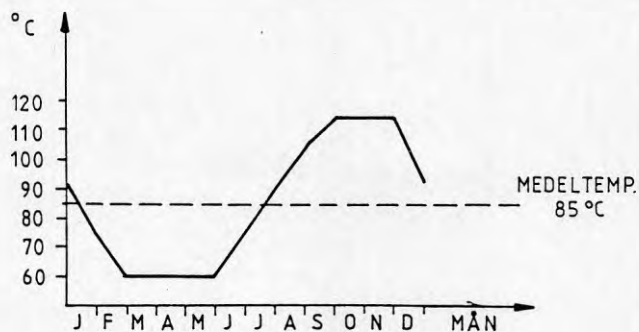


Fig 5.2 Medeltemperatur i berglager

Följande materialparametrar antas vara representativa för bergets egenskaper:

Värmekonduktivitet,  $K_B = 3.5 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

Värmekapacitet,  $C_B = 2.1 \times 10^6 \text{ J/m}^3 \text{ }^\circ\text{C}$

Ursprunglig temperatur,  $T_0 = 7^\circ\text{C}$

De värmelager som har studerats består av ett antal parallella tunnlar i ett övre och ett undre galleri. Dessa sammanbindes med en mängd borrhål enligt principsektion figur 5.3.

Värmen lagras dels i vatten som finns i tunnelgallerierna, dels i bergmassan mellan dessa. De följande beräkningarna är utförda med hjälp av resultat från studier av Gustafson G., 1984 (ref 1) och Claesson J., m fl., 1985 (ref 2).

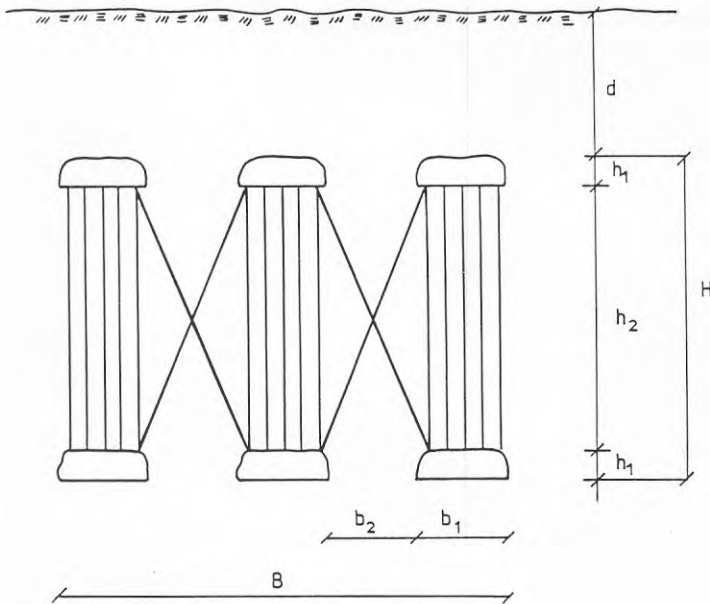


Fig 5.3 Principsektion av värmelager

### 5.3 Layout av värmelager

Enligt Gustafson G (ref 1) finns ett optimalt borrhålsavstånd i den föreslagna lagermodellen av ca 3.2 m. Härvid har hänsyn tagits till bergets termiska egenskaper liksom kostnader för tillredning av lagret. Den specifika kostnaden kr/kWh ökar kraftigt vid en minskning av borrhålsavståndet från det optimala, medan en ökning av delningen mellan borrhålen medför en måttlig ökning av den specifika kostnaden.

Med hänsyn till ovanstående har två alternativa borrhålsavstånd studerats. Borrhålen  $\varnothing 100$  mm förutsätts vara placerade i ett hexagonalt mönster. Den bergmassa som omger respektive borrhål är därmed approximativt innesluten av en radie  $R$ , där  $R$  är halva borrhålsavståndet. En effektivitetsfaktor,  $\eta_T$ , kan definieras för att uttrycka följande förhållande:

$\eta_T = \text{Inlagrad energi} / \text{lagringskapacitet i berg.}$

Enligt ref 1 är storleksordningen på  $\eta_T$  beroende på radien  $R$  ungefär enligt nedan:

$R = 1.6 \text{ m}$	$\eta_T = 0.75$
$R = 2.0 \text{ m}$	$\eta_T = 0.60$

Tvårsnittsarean för den sexkantiga yta som omger varje borrhål beräknas som:

$$A_H = 2\sqrt{3} R^2$$

Med beteckningar enligt fig 5.3 kan ett allmänt uttryck för värmelagringsförmågan per borrhål erhållas. Vi förutsätter härvid att lagringspotentialen är reducerad med ca 30% i det nedre galleriet då maximalt temperatursving inte kan förväntas i detta.  $E_B$  avser värme lagrad i berg runt varje borrhål och  $E_V$  avser värme lagrad i vattenvolymer i gallerier ovanför och under respektive borrhål.

$$E_B + E_v = 2\sqrt{3} R^2 (h_2 \times C_B \times \eta_r + 1.7 \times h_1 \times C_v) (T_{\max} - T_{\min})$$

I fortsättningen antas att gallerihöjder är  $h_1 = 5$  m samt borrhålslängder  $h_2 = 50$  m för 5 GWh-lagret respektive  $h_2 = 70$  m för 10 GWh-lagret. Följande tabell redovisar lagringskapacitet för varje borrhål samt det totala antalet borrhål som krävs för den önskade lagringskapaciteten.

LAGERSTORLEK (GWh)	$h_2$ (m)	R (m)	$E_B + E_v$ (MWh)	ANTAL BORRHÅL (st)
5	50	1.6	15.6	320
5	50	2.0	21.0	240
10	70	1.6	19.9	500
10	70	2.0	26.4	380

Avståndet mellan hålraderna i tunnlarna blir  $\sqrt{3}R$ , dvs 2.77 m för  $R = 1.6$  m och 3.46 m för  $R = 2.0$  m. Tunnelnarnas bredd ( $b_1$ ) väljs till ca 17 m och bergpelarnas bredd väljs till ca 15 m. Borrhålens konfiguration i tunnlarna blir därmed enligt följande figurer 5.4 och 5.5.

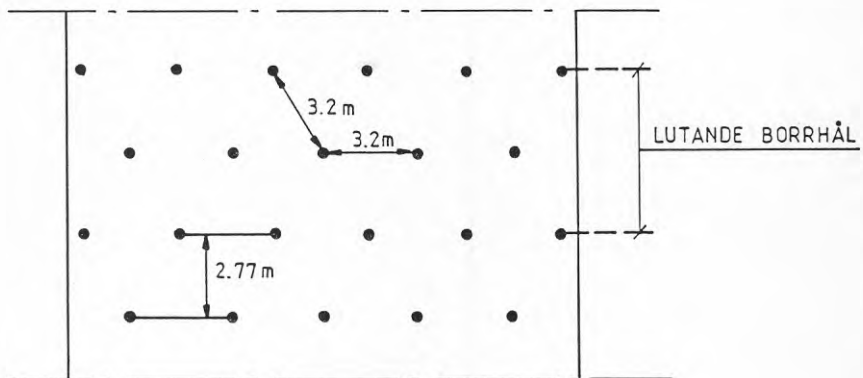


Fig 5.4 Borrhåls konfiguration vid  $R = 1.6$  m

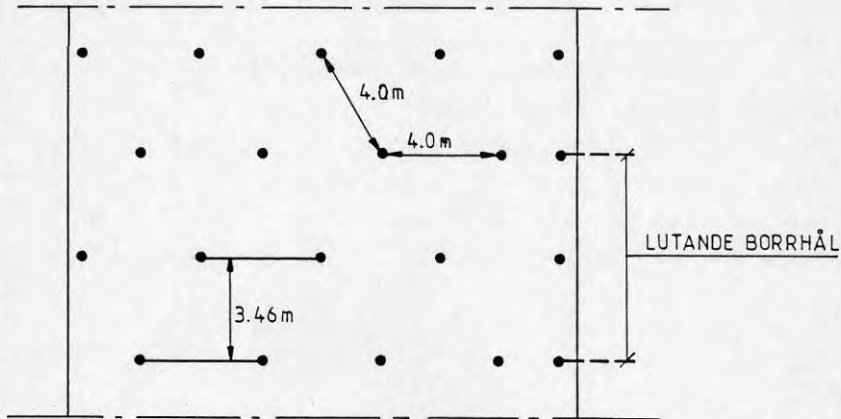


Fig 5.5 Borrhåls konfiguration vid  $R = 2.0$  m

I enlighet med ovanstående figurer är antalet hål i borrhålsraderna tvärs tunnelns längdriktning i medeltal 5.5 st/rad för  $R = 1.6$  m och 5.0 st/rad för  $R = 2.0$  m.

Antalet parallella tunnlar i övre och undre galleri samt dessas längd kan nu bestämmas. Det bör härvid eftersträvas att erhålla en nära kubisk form av hela lagret för att minimera värmeförlusterna från detta. Av denna anledning blir det övre och undre galleriet bestående av 3 st parallella tunnlar i de lagerstorlekar som är aktuella.

LAGERSTORLEK (GWh)	R (m)	TUNNLARNAS LÄNGD (LAGRETS LÄNGD) (m)	LAGRETS BREDD (m)
5	1.6	54	80
5	2.0	56	80
10	1.6	84	80
10	2.0	88	80

## 6. VÄRMEFÖRLUSTBERÄKNINGAR

6.1 Stationära värmeförluster

De stationära värmeförlusterna från värmelagret uppskattas nedan genom att lagret approximeras med en ellipsoid med samma volym som värmelagret (ref 2). Ellipsoidens huvudaxlar väljs så att proportionerna någorlunda väl överensstämmer med det aktuella lagrets. Följande längder 2A, 2B och 2C har valts för huvudaxlarna:

LAGERSTORLEK	ELLIPSOID					
	GWh	L (m)	B (m)	H (m)	2A (m)	2B (m)
5	55	80	60	70	98	74
10	87	80	80	106	100	100

De stationära förlusterna ges av följande formel (ref 2).

$$Q_{stat} = 4\pi K_B (T_m - T_o) \times (A+B+C) / (3 - (A+B+C)/(2d+H)).$$

I nedanstående tabell redovisas beräknade stationära förluster beroende på lagerstorlek och avstånd till markytan (d enligt fig 5.3).

BELÄGENHET UNDER MARKYTAN	LAGERSTORLEK 5 GWh		LAGERSTORLEK 10 GWh		
	d (m)	Q STAT (kW)	E STAT (GWh/år)	Q STAT (kW)	E STAT (GWh/år)
	30	208	1.83	275	2.41
	40	194	1.70	257	2.25
	50	185	1.62	244	2.14
	60	178	1.56	235	2.06
	70	173	1.52	228	2.00



Storleken på de stationära värmeförlusterna reduceras måttligt om lagren förläggs djupare än ca 30 m under markytan.

Om överkant på lagret ligger ca 30 m under markytan erfordras ca 1.8 GWh för täckning av värmeförluster för att ca 5.0 GWh skall kunna tillgodoräknas från det mindre säsongslagret. Lagrets termiska verkningsgrad vid stationärt tillstånd kan i detta fall uttryckas som  $5.0 / (5.0 + 1.8) = \text{ca } 73\%$ . På motsvarande sätt kan verkningsgraden för 10 GWh-lagret beräknas till  $10.0 / (10.0 + 2.4) = \text{ca } 80\%$ .

Anledningen till den större andelen förluster i 5 GWh-lagret är en kombination av större omslutande area i förhållande till volym, samt något ogynnsammare geometri än för 10 GWh-lagret.

## 6.2 Transienta värmeförluster

Under de första åren måste en betydande energimängd uppoffras för att anvärma omgivande berg. Detta är anledningen till att stora transienta värmeförluster erhålls under de första driftåren. De transienta förlusterna avklingar efter ett antal års drift, varefter de totala förlusterna är nära de stationära.

De transienta förlusterna är överslagsmässigt beräknade nedan. Värmelagret har i detta fall approximerats med en sfär med samma volym som lagret. Total effektavgivning på grund av värmeförluster från ett sfäriskt lager i en oändlig rymd ges av:

$$Q_{TR} = 4\pi r K_B (T_m - T_0) (1 + r (C_B / (\pi K_B t)))^{0.5}$$

där  $r$  = sfärens radie (m)

$t$  = tid för värmelagring (s)

Denna formel består av två termer av vilka den första avser de stationära förlusterna och den andra de transienta vilka avklingar med tiden.

De ackumulerade värmeförlusterna från lagret erhålls genom tidsintegrering av ovanstående uttryck för effektavgivning:

$$E_{T R} = 4 \pi r K_B (T_m - T_o) t (1 + 2r (C_B / (\pi K_B t))^{0.5})$$

I nedanstående tabell redovisas de totala värmeförlusterna från ett sfäriskt lager med samma volym som de studerade lagren. Sfärens radie ( $r$ ) är för 5 GWh-lagret ca 40 m, och för 10 GWh-lagret ca 51 m.  $E_{T O T}$  avser de ackumulerade värmeförlusterna från respektive lager.

TID	LAGERSTORLEK 5 GWh		LAGERSTORLEK 10 GWh	
	$Q_{T O T}$ (kW)	$E_{T O T}$ (GWh)	$Q_{T O T}$ (kW)	$E_{T O T}$ (GWh)
t				
(år)				
1	560	8.7	870	13.7
2	440	13.0	670	20.3
3	380	16.6	580	25.7
4	350	19.8	490	30.5
6	310	25.5	460	39.0
8	290	30.8	420	46.7
10	270	35.7	400	53.8
20	230	57.5	330	85.1
30	215	77.1	300	112.6
40	205	95.4	280	138.3

Värmeförlusternas minskning med tiden illustreras av figur 6.1. Kurvorna i figuren är  $Q_{T O T}$  som avsatts mot tiden, vilket innebär att ytorna under kurvorna motsvarar de ackumulerade värmeförlusterna  $E_{T O T}$  enligt tabell ovan.

Den termiska verkningsgraden för lagren definierad av förhållandet (nyttiggjord energi/inlagrad energi) kommer att öka varefter de transienta värmeförlusterna minskar. Detta visas i figur 6.2.

Av ovanstående framgår att ett tillstånd mycket nära det stationära är uppnått efter ca 30 år om lagren är belägna ca 30 m under markytan. Om lagren är djupare belägna tar det längre tid till stationärt tillstånd.

God överensstämmelse föreligger mellan de båda beräkningsmodellerna för ellipsoidformat och sfäriskt lager vad gäller de stationära förlusterna. Med lagren belägna ca 30 m under markytan kan dessa beräknas till ca 1.8 GWh/år för 5 GWh-lagret och ca 2.4 GWh/år för 10 GWh-lagret.

De transienta förlusterna för uppvärmning av omgivande berg kan således beräknas för de 30 första driftåren.

5 GWh-lager:  $77 - (30 \times 1.8) = \text{ca } 23 \text{ GWh}$   
 10 GWh-lager :  $112 - (30 \times 2.4) = \text{ca } 40 \text{ GWh}$

Innan ett värmelager är i drift krävs en anvärmning av bergmassor inom själva lagret, det vill säga mellan övre och undre galleri. Till anvärmningen av lagret hör dessutom uppvärmning av vattenvolymer till lagrets temperaturnivå i drift. Dessa anvärmningar är inte att betrakta som transienta värmeförluster. Det är rimligt att betrakta anvärmningen av lagret som en investering motsvarande uppvärmningskostnaden. Den totala anvärmningsenergin är för 5 GWh-lagren ca 9 GWh och för 10 GWh-lagren ca 18 GWh med de dimensioner som har föreslagits. Ungefär 80% av anvärmningsenergin åtgår för uppvärmning av bergmassor och resten för vattenvolymer. Anvärmningsenergierna är av samma storleksordning som 2 st lagringscykler. Detta medför att kravet är särskilt starkt på billig spillenergi vid idrifttagning av ett lager.

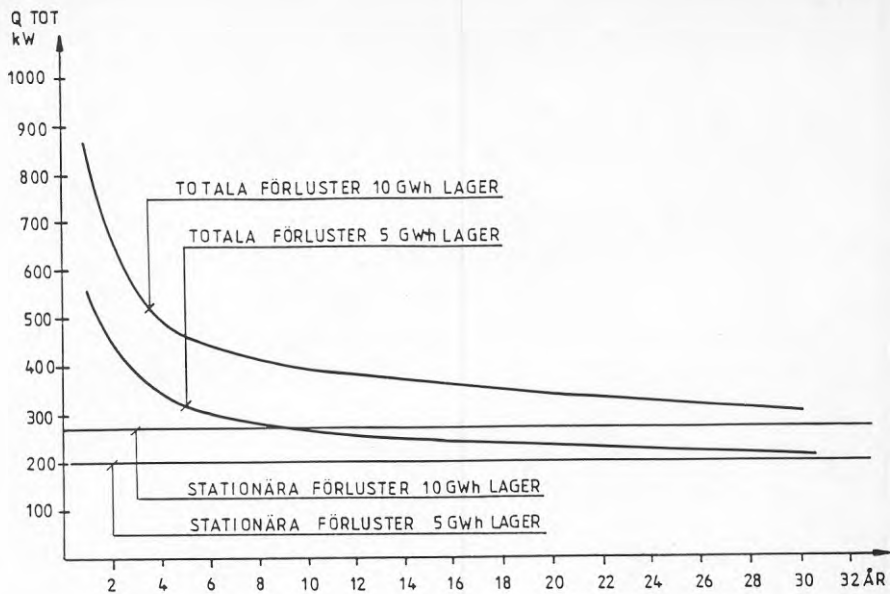


FIG 6.1 Värmeförluster från 5 GWh och 10 GWh lager

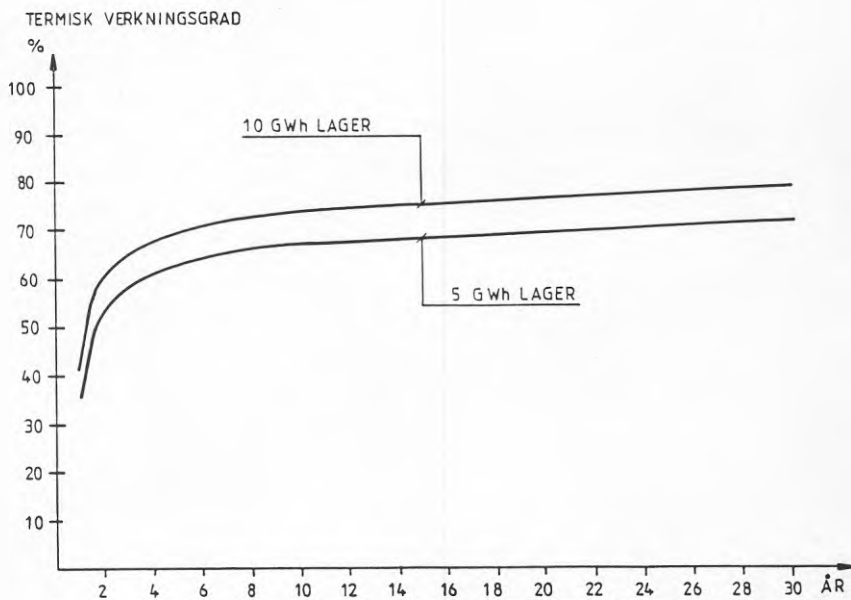


FIG 6.2 Termisk verkningsgrad för 5 GWh och 10 GWh lager.

## 7. SYSTEMLÖSNING OCH DRIFTSTRATEGI MED VÄRMELAGER

I det följande beskrivs hur ett värmelager kan utnyttjas för fjärrvärmeproduktion. Ett principschema över lager och fjärrvärmesystem finns i figur 7.1. Driftstrategin är sådan att direkt spillvärmeutnyttjande vid Vargön Alloys alltid prioriteras och utnyttjas maximalt. Energi som inlagras sommartid och som tillgodogörs fjärrvärmenätet under vintern ersätter alltid oljebaserad värmeproduktion vid Önaforsverket.

### 7.1 Inlagringsperiod

Sommartid, när elpriset är lågt, kan förhållandevis billig energi från Vargön Alloys utnyttjas för inlagring. Energin bör levereras vid högsta möjliga temperaturnivå för att maximera temperatursvinget i lagret.

Eftersom någon abonnent inte finns ansluten till stamkylvertar (DN 400) närmast Önaforsverket, kan dessa med fördel utnyttjas för transport av spillvärme vid hög temperatur under inlagringsperioden.

Vid lagret uppförs en mindre byggnad för den shuntcentral med vilken in- och urladdning av lagret kan göras. Vid shuntcentralen finns erforderliga påstick till fjärrvärmenätets stamkylvertar. Dessutom installeras shuntautomatik för styrning av nätets framledningstemperatur beroende på utetemperatur. På detta vis kan 120°C hetvatten erhållas från Vargön Alloys för inlagring sommartid, medan fjärrvärmeabbonenter får rätt anpassad framledningstemperatur.

Från shuntcentralen cirkuleras hetvatten 120°C från nätets framledning till berglagret. Här överförs värmen till berglagret via VVX1. Vatten i berglagret uttas ur det undre galleriet och återförs efter uppvärmning till det övre galleriet. En maximal inlagringstemperatur på ca 115°C är realistisk. En givare för kontroll av laddningstemperatur placeras vid värmeväxlaren. Beroende på yttre tillgänglig laddningseffekt styrs flödet på bergrumssidan så att rätt inlagringstemperatur (min. begränsning) erhålls.

Det avkylda fjärrvärmevattnet efter VVX1 återförs till nätets returledning och vidare mot Vargön Alloys.

## 7.2 Uttagsperiod

När effektbehovet för fjärrvärmenätet är så stort att det direkta utnyttjandet av spillenergiproduktionen vid Vargön Alloys inte räcker, inleds urladdningsfasen av lagret.

Returvatten från fjärrvärmenätet pumpas till VVX1 vid berglagret för uppvärmning. Det uppvärmda fjärrvärmevattnet återförs i första hand till nätets framledning. Shuntarrangemanget, som säkerställer rätt framledningstemperatur för fjärrvärmenätet, får härvid blanda hetvatten från Vargön-Önafors och berglagret. Vid låga temperaturer i lagret måste det svagt uppvärmda fjärrvärmevattnet från VVX1 återföras till nätets returledning (se figur 7.1). Returvattnet i nätet blir på detta vis förvämt och eftervärms vid Vargön Alloys eller Önaforsverket till erforderlig framledningstemperatur.

Under uttagsperioden tas varmt vatten ur berglagrets övre galleri och återförs efter avkylning i VVX1 till det undre galleriet. Aktuell returtemperatur i fjärrvärmenätet bestämmer vilket temperatursving som kan erhållas. För att säkerställa ett minsta temperaturfall bör en givare för max.begränsning av återföringstemperaturer placeras efter värmväxlaren. Vid stigande returtemperatur stryps flödet på bergrumssidan med hjälp av styrventil, så att tillbörlig avkylning erhålls. I motsvarande grad reduceras i dessa fall den urladdade effekten.



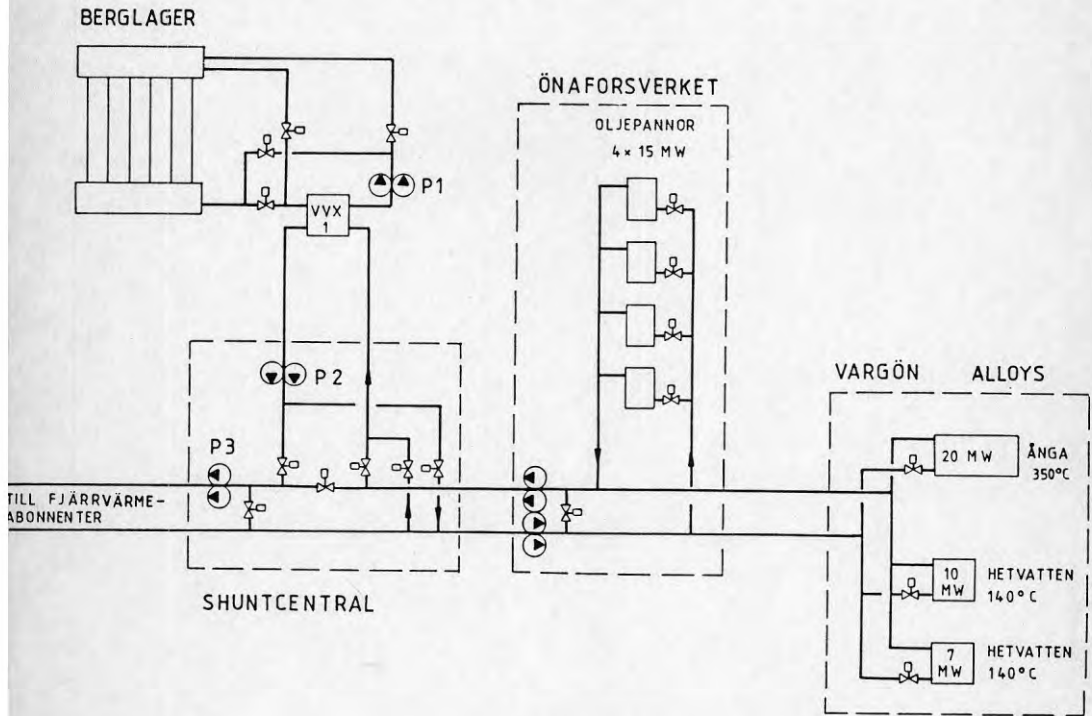


FIG 7.1 Principschema över Vänersborg fjärrvärme med berglager.



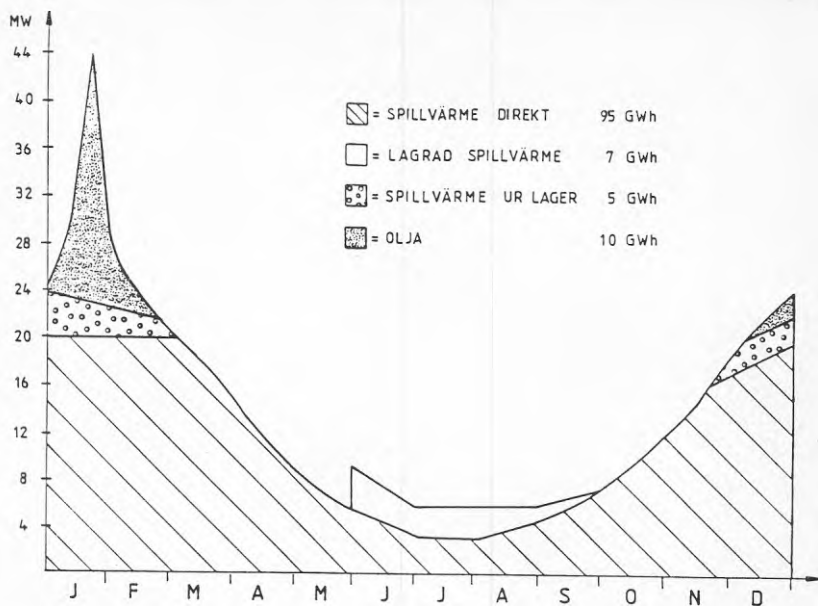


FIG 7.2 Värmeproduktion med 5 GWh lager

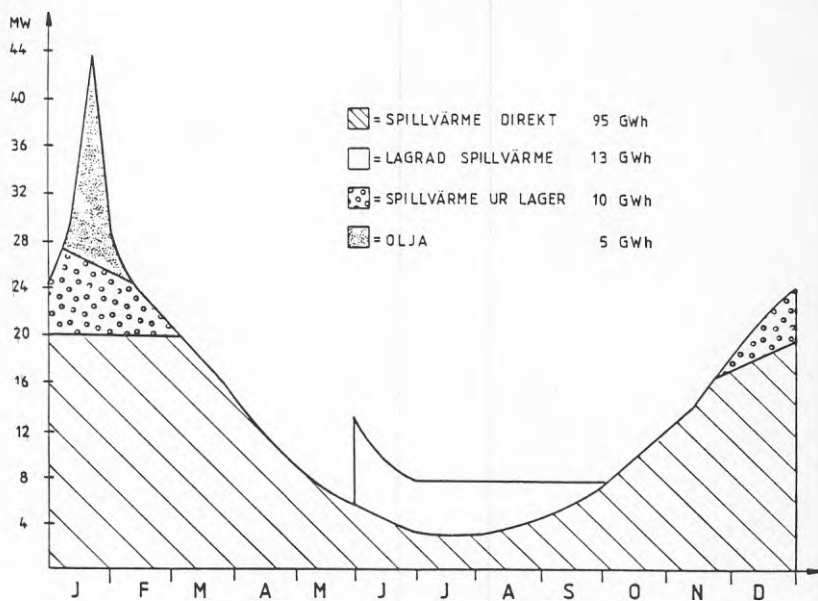


FIG 7.3 Värmeproduktion med 10 GWh lager

## 8. EKONOMI

8.1 Investeringar8.11 Berg- och markarbeten

Följande specifika kostnader har använts vid överslagsmässiga investeringskalkyler för byggande av ett lager.

Bergsprängning och uttransport av berg i nedfartstunnlar och övre galleri	230 kr/fm <sup>3</sup>
---	------------------------

Bergsprängning och uttransport av berg i undre galleri	240 kr/fm <sup>3</sup>
--	------------------------

Sprängning av berg som ej fraktas ur undre galleri	200 kr/fm <sup>3</sup>
--	------------------------

Borrning mellan övre och undre galleri	200 kr/m
--	----------

Transporttunnlar antas vara utförda med lutning ca 1/7 (14%) ned till respektive nivå för tunnelgallerier. En rimlig tvärsnittsarea för tillbörligt framkomlighet i transporttunnlar är ca 35 m<sup>2</sup>. I det undre galleriet, som utsprängs enbart för att åstadkomma kommunikation mellan alla borrhål, förutsätts att ca 30% av sprängda bergmassor kan kvarlämnas. I följande tabeller beräknas investeringar för byggande av 5 GWh-lager och 10 GWh-lager med de föreslagna borrhålsdelningarna.

LAGER 5 GWh

Arbete	Borrhålsdeln 2R=3.2 m		Borrhålsdeln 2R=4.0 m	
	Mängd	Kostnad M kr	Mängd	Kostnad M kr
Etablering jordschakt tillfartsväg	-	3.0	-	3.0
Nedfart till övre galleri	7400 m <sup>3</sup>	1.7	7400 m <sup>3</sup>	1.7
Övre galleri (3 tunnlar)	13800 m <sup>3</sup>	3.2	14300 m <sup>3</sup>	3.3
Nedfart till undre galleri	14700 m <sup>3</sup>	3.4	14700 m <sup>3</sup>	3.4
Undre galleri utlastat berg	9700 m <sup>3</sup>	2.3	10000 m <sup>3</sup>	2.4
Undre galleri ej utlastat berg	4100 m <sup>3</sup>	0.8	4300 m <sup>3</sup>	0.9
Borrning ø100 mm	16000 m	3.2	12000 m	2.4
<b>Totalt</b>		<b>17.6</b>		<b>17.1</b>

Tab 8.1 Investeringar för bergarbeten, lager 5 GWh

LAGER 10 GWh

Arbete	Borrhålsdeln 2R=3.2 m		Borrhålsdeln 2R=4.0 m	
	Mängd	Kostnad M kr	Mängd	Kostnad M kr
Etablering jordschakt tillfartsväg	-	3.0	-	3.0
Nedfart till övre galleri	7400 m <sup>3</sup>	1.7	7400 m <sup>3</sup>	1.7
Övre galleri (3 tunnlar)	21500 m <sup>3</sup>	4.9	22500 m <sup>3</sup>	5.2
Nedfart till undre galleri	19600 m <sup>3</sup>	4.5	19600 m <sup>3</sup>	4.5
Undre galleri utlastat berg	15000 m <sup>3</sup>	3.6	15700 m <sup>3</sup>	3.8
Undre galleri ej utlastat berg	6500 m <sup>3</sup>	1.3	6800 m <sup>3</sup>	1.4
Borrning ø100 mm	35000 m	7.0	26600 m	5.3
Totalt		26.0		24.9

Tab 8.2 Investeringar för bergarbeten, lager 10 GWh.

8.12 Värmeteknisk utrustning

Värmeväxlaren (VVX1 enligt fig 7.1) dimensioneras för en medeltemperaturdifferens som motsvarar max 5°C vid dimensionerande effektöverföring under in- och urladdning. Värmeväxlaren placeras antingen på markytan eller i ett utsprängt installationsutrymme vid värmelagret. I detta utrymme placeras pump P1 och ventilarrangemang som betjänar lagret (se fig 7.1). De senare installationerna måste vara belägna under den nivå (grundvattenyta) som bestämmer lagrets tryckhållning.

Beräknade investeringar för värmetekniks utrustning vid berglager och shuntcentral har sammanfattats i följande tabeller. I kalkyler för värmekulvertar förutsätts att installationsutrymme vid lager inte är beläget mer än 100 m från befintlig fjärrvärmekulvert (DN 400) mellan Önaforsverket och stadens centrum.

Lager 5 GWh

Värmekulvertar DN 150	3.5 Mkr
Rörmontage i bergrum	0.3 Mkr
Värmeväxlare	0.1 Mkr
Ventiler, armatur, pumpar	0.3 Mkr
Styr- och regler, elarbeten	0.5 Mkr
Oförutsett	<u>1.0 Mkr</u>
Totalt	5.7 Mkr

Tab 8.3 Investeringar för värmeteknisk utrustning, lager 5 GWh

Lager 10 GWh

Värmekulvertar DN 200	4.5 Mkr
Rörmontage i bergrum	0.4 Mkr
Värmeväxlare	0.2 Mkr
Ventiler, armatur, pumpar	0.4 Mkr
Styr- och regler, elarbeten	0.5 Mkr
Oförutsett	<u>1.0 Mkr</u>
Totalt	7.0 Mkr

Tab 8.4 Investeringar för värmeteknisk utrustning,  
lager 10 GWh

8.13 Investeringskalkyl

I följande tabell görs en överslagsmässig kalkyl av de investeringar som krävs vid genomförande av ett värmelageringsprojekt enligt denna studie.

	Lager 5 GWh	Lager 10 GWh
Geol undersökning förprojektering	1.0 MKr	1.0 MKr
Berg- och mark arbeten	17.1 MKr	24.9 MKr
Vattenfyllning	0.4 MKr	0.5 MKr
Anvärmning	0.5 MKr	0.9 MKr
Värmeteknisk utrustning	5.7 MKr	7.0 MKr
Projektering, byggledning, kontroll	2.0 MKr	2.0 MKr
Oförutsett	4.5 MKr	6.0 MKr
	<hr/>	
Totalt	31.2 MKr	42.3 MKr

Vid beräkning av kostnader för anvärmning av lager har antagits att detta kan göras med spillenergi för ca 5 öre/kWh.

## 8.2 Driftekonomi

För att ett värmelager skall vara ekonomiskt motiverat krävs att de besparade driftskostnaderna kan täcka avskrivningen av den investering som utförs. I det följande ges en analys som visar hur stor skillnaden måste vara i fast penningvärde mellan priset på inlagrad spillenergi och alternativ energiproduktion vid urladdning av lagret.

Följande allmänna uttryck kan upprättas för de villkor som gäller beträffande energipriser för att investeringens avskrivningar skall täckas:

$$Q (P_1 - P_2) - Q_f P_2 - U - a I > 0$$

- där  $Q$  = Utnyttjad energi ur lager  
 $Q_f$  = Värmeförluster från lagret  
 $P_1$  = Alternativt energipris  
 $P_2$  = Pris på spillenergi  
 $U$  = Drift- och underhållskostnader  
 $I$  = Investering  
 $a$  = avskrivningsfaktor

Avskrivningstiden för lagret antas vara 30 år. Med ett blygsamt reallt förräntningskrav av ca 4% blir därmed den årliga avskrivningsfaktorn  $a = 5.783\%$ .

Årliga kostnader för drift och underhåll på grund av bergvärmelagret antas uppgå till ca 1% av investeringen, det vill säga ca 300 kkr/år för 5 GWh-lagret och ca 400 kkr/år för 10 GWh-lagret.

De totala värmeförlusterna från lagren under en 30-års period efter idrifttagning framgår av kapitel 6.2.



I följande figur visas det lägsta alternativa energipris som krävs i fast penningvärde under en 30-års period för att ovanstående villkor skall uppfyllas.

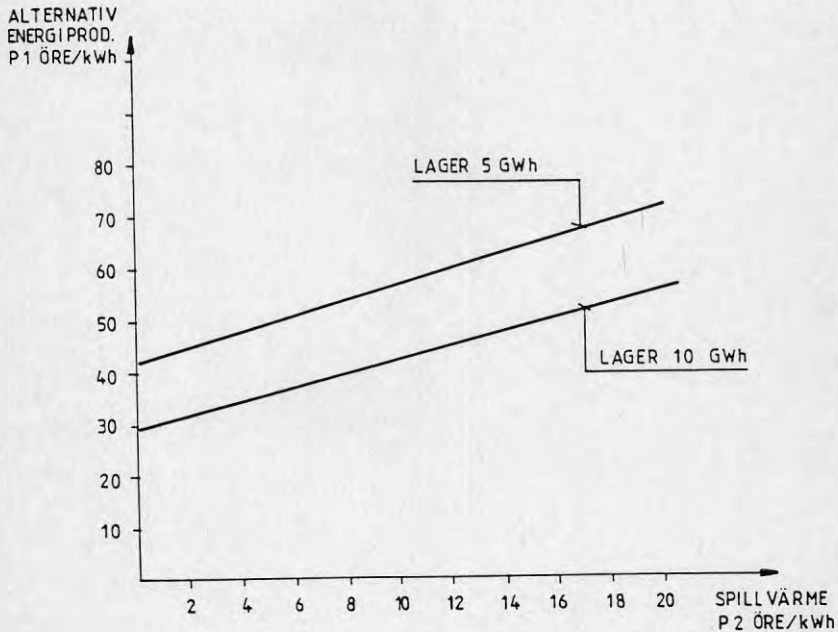


Fig 8.1 Lägsta alternativa energipris i fast penningvärde för att ett reallt förräntningskrav av 4% skall erhållas.

Av ovanstående framgår att ett bergvärmelager inte kan bli ekonomiskt motiverat med dagens energipriser. Eftersom nuvarande oljepriser medför en energiproduktionskostnad av ca 17 öre/kWh blir inte bergvärmelagret ekonomiskt även om spillenergin skulle tillhandahållas gratis under sommar-månaderna.

## 9. REFERENSER

1. Gustafson G; 1984, Värmelagring i bergrum i två våningar. (Statens råd för byggnadsforskning) BFR R130:1984, Stockholm.
2. Claesson J, m fl; 1985, Markvärme. En handbok om termiska analyser del I-III. (Statens råd för byggnadsforskning). T16-T18:1985, Stockholm.
3. Ericsson L-O; 1985, Värmeutbyte mellan berggrund och borrhål vid bergvärmesystem. (Geologiska institutionen Chalmers tekniska högskola) Publikation A52, Göteborg.
4. Hillström C-G, Astrand L, m fl; 1985, Solvärme med säsongslagring i berg för 550 lägenheter i Lyckebo, Uppsala. Från idé till idrifttagning. (Statens råd för byggnadsforskning) BFR R43:1985, Stockholm.
5. Gustafson G, m fl; 1984, Spillvärmelagring i berg för fjärrvärmenät i Vänersborg - Ekonomisk förstudie. (Statens råd för byggnadsforskning), Stockholm.
6. Hillström C-G, m fl, 1985, Lagring av spillvärme i bergrum och borrhål för fjärrvärmenät i Borlänge. (Statens råd för byggnadsforskning) BFR R19:1985, Stockholm.
7. Bjurström S, Cederberg H, Göransson A, Hanson T, Lindskog R, Martna J; 1977, Lagring och transport av vattenburen värme i berg. Fältförsök. (Stiftelsen Bergteknisk Forskning - BeFo) BeFo nr 11:14/77. Stockholm.
8. Röskoff K, Norin J; 1983. Lakningens inverkan på avestagnejsens mekaniska egenskaper. (Luleå Högskola). Luleå.

9. Bergmekanikdag 1985, Hydrologiska undersökningar via hetvattenuttag i Avesta, 1985. (Stiftelsen bergteknisk Forskning). Stockholm.
10. Claesson T, Westas H; 1986, Lyckeboprojektet. Utvärdering av förändring i vattenkemi (Stiftelsen Bergteknisk Forskning - BeFo) BeFo 109:3/86. Stockholm.



**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 840217-3  
från Statens råd för byggnadsforskning till VIAK AB, Göteborg.**

**R86: 1988**

**ISBN 91-540-4939-3**

**Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm**

**Art.nr: 6708086**

**Abonnemangsgrupp:  
Ingår ej i abonnemang**

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

**Cirka pris: 36 kr exkl moms**