



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

R104:1983

Högtemperaturlagring under mark

BFR-seminarium december 1982

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

*K
GWS*

R104:1983

HÖGTEMPERATURLAGRING UNDER MARK

BFR-seminarium december 1982

Dokumentationen sammanställd av
Ulf Lindblom

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 811449-5
från Statens råd för byggnadsforskning till Stiftelsen
Bergteknisk Forskning, BeFo, Stockholm.

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

R104:1983

ISBN 91-540-3993-2
Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm
LiberTryck Stockholm 1983

INNEHÅLL

Förord - Sten Bjurström, BeFo	5
Markvärmegruppens slutsatser	7
Uppläggning av expertseminariet - Ulf Lindblom, Hagconsult AB och CTH	11
INLEDNING - Sten Bjurström, BeFo	15
LAGRING I GROPMAGASIN, BERGRUM, GRUVOR OCH BORRHÅL Sven-Erik Lundin, Byggeforskningsrådet	19
TEKNIKLÄGE	
Tekniska aspekter på högtemperaturlagring under mark - Gunnar Gustafson, VIAK AB	33
LAGRINGSSYSTEM	
Bergrum - Per-Olov Karlsson, Vattenfall och Elisabeth Kjellsson, UKAB	39
Blockfyllda bergrum och berggrovar - Ingvar Bogdanoff, Hagconsult AB	44
Värmelagring i gruva - Kjell Windelhed, Hagconsult AB ...	53
Ljusnarbergsgruvan i Kopparberg - Christer Langner	55
Borrhålslager - Sören Andersson, Allmänna Ingenjörss- byrån AB	60
Borrhålslager - Peter Margen, Studsvik Energiteknik AB ...	67
TEORI OCH BERÄKNINGAR	
Termiska analyser - Johan Claesson, Byggnadsteknik, matematisk fysik, LTH	79
Erfarenheter vunna inom Avestaprojektet fram till årsskiftet 1982 - 1983	83
TILLÄMPNING	
Värmelager i fjärrvärmesystem - Elisabeth Kjellson, UKAB .	91
Säsongslagring av värme i mark vid hög temperatur, Hans Hydén, VBB	97
Om juridiska aspekter avseende högtemperaturlagring under mark - Nils Åberg, VIAK AB	100

LAGRINGSSTUDIE I GÖTEBORG

Förutsättningar - Gunnar Nilsson, Energiverken i Göteborg	109
Spillvärmelagring i bergrum - Gunnar Gustafson, Anders Eriksson och Magnus Liedholm	112
Alternativ blockfyllda bergrum - Ulf Lindblom och Tibor Ritzl, Hagconsult AB	115
Alternativ borrhålslager - Per Ingre, Studsvik Energiteknik AB	122
Synpunkter på högttemperaturlager i allmänhet och sådana för Energiverken i Göteborg i synnerhet - Gösta Rosenblad, Jordvärmegruppen, CTH	142
Betydelsen av exergiverkningsgraden för ett energilager - särskilt i Göteborg, Peter Margen, Studsvik Energiteknik AB	153
SAMMANFATTANDE ANALYS - Ulf Lindblom, Hagconsult AB och CTH	159
BILAGOR	
Deltagarlista	171
Projektregister	175
Litteratur och referenser	183

FÖRORD

För utvärdering av BFRs energiforskningsprogram har rådet tillsatt ett antal s k utvärderingsgrupper. Utvärderingsgruppen MARKVÄRME har till huvuduppgift att utvärdera och sammanställa kunskapsläget inom området värmeutvinning och värmelagring i mark och vatten. Gruppen består av Sten Bjurström, Bergteknisk Forskning-BeFo (ordförande), Per Olov Karlsson och Sven-Allan Eklund, Vattenfall, Carl-Olof Morfeldt, Hagconsult samt Björn Svedinger, VIAK. Sven Erik Lundin och Rolf Engwall har deltagit från BFR.

Som ett led i utvärderingsarbetet har gruppen beslutat att genomföra ett antal utvärderingsseminarier. Under våren 1982 anordnades möten beträffande ytjordvärme, sjövärme och grundvattenvärme. Under hösten 1982 har genomförts två seminarier beträffande energilagring i mark.

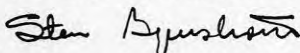
För planering, genomförande och avrapportering av dessa möten har gruppen engagerat experter inom respektive delområde.

Hagconsult AB med professor Ulf Lindblom som ansvarig har svarat för seminariet "Högtemperaturlagring av värme under mark".

Föreliggande rapport redovisar presentationer, förda diskussioner samt slutsatser av seminariet i Göteborg den 1 och 2 december 1982.

Markvärmegruppen har all anledning att rikta ett varmt tack till seminarieledaren och Hagconsult AB samt till mötesdeltagarna för positiv medvekan och värdefulla bidrag.

För BFRs MARKVÄRMEGRUPP



Sten Bjurström
Ordförande

MARKVÄRMEGRUPPENS SLUTSATSER

Allmänt

Följande, kortfattade slutsatser av förhandlingarna vid expertseminariet är avsedda att tjäna som underlag vid BFR:s planering av FoU-satsningar på högttemperaturlagring under mark.

Högttemperaturlagring, i detta sammanhang definierad som lagring vid över 50°C, är en storskalig operation som främst blir aktuell i fjärrvärmesystem. Man kan hitta tillämpningar där ett värmelager blir ekonomiskt, kanske framförallt för korttidsutjämning, där lagret kan minska eller ersätta topeffektpannor och/eller ta hand om spillvärmekällor med oregelbundet leveransmönster. Även säsongslagring kan bli ekonomisk, men detta kräver god tillgång på billig spillvärme av hög temperatur.

Värmelagring under mark har diskuterats i Sverige sedan början på 1970-talet. Konkreta forskningsinsatser i BeFo:s regi startade så tidigt som 1974 med bl a analys och mätningar av temperaturförlopp i berg. Nu pågående eller nyligen avslutade projekt har byggt vidare på denna kunskap. Många av dessa projekt har dessutom varit föremål för omsorgsfull uppföljning och utvärdering. Man kan därför konstatera att utvecklingsläget för tekniken är bra. Utarbetade tekniska lösningar på värmelager för givna lagringsbehov finns att tillgå från exempelvis konsultföretagen. Utöver de aktiviteter som nu pågår eller planeras, kan därför inga större öknings av FoU-behovet behöva förutsättas.

Slutsatserna av seminariet skall här kortfattat ges under nyckelorden Prestanda, Problem, Pris och Potential. De huvudalternativ för högttemperaturlagring som skall diskuteras, är berggrum, gruvor, blockfyllda berggrum och borrhållager i berg.

För en utförligare analys hänvisas till sammandraget sist i rapporten.

Prestanda

Värmelagring leder ovillkorligen till energiförluster genom utläckning av värme till omgivningen. Storleken av dessa förluster kan nöjaktigt beräknas för stora berggrums- och borrhållager till 10 å 15% per årscykel, medan de är svårbedömda och troligen mycket omfattande för värmelager i gruvor. Andra faktorer, såsom osäkerheter rörande den termiska funktionen hos komplicerade gruvgångar och -schakt, innebär att värdet av ökade FoU-insatser inom värmeanalys för gruvor är högst diskutabelt. Överhuvudtaget bör högttemperaturlagring i gruvor ifrågasättas.

Värmeförlusterna i medelstora gropmagasin kan kontrolleras, men här uppstår materialproblem i isolering och membran vid höga temperaturer. För att klara lagringsbehov i halvstor skala bör gropmagasinen få möjlighet att utvecklas. FoU-satsningar på materialsidan för gropmagasin i jord är därför angelägna liksom på berggropar, där värmeförluster och byggkostnader minimeras. Ett steg i denna riktning kan vara höga självstabiliserande, blockfyllda berggropar.

Värmelagring innebär också kvalitetsförluster genom sammanblandning av varmt och kallt vatten eller utjämning av värme i berg.

För bergrumslager är kvalitetsförlusterna begränsade till ett 5-7 m övergångsskikt mellan varmt och kallt vatten medan skiktet är minst dubbelt så högt i blockfyllda rum. Å andra sidan kan de blockfyllda rummen göras mer än dubbelt så höga, vilket innebär att kvalitetsförlusten, relativt sett, blir av samma omfattning. Även när det gäller beräkning av skiktning i bergrum, öppna eller blockfyllda, finns idag erforderliga beräkningsmodeller. Idag existerar två testanläggningar i öppna bergrum för värmelagring vilket kan anses tillfredsställande. En testanläggning i blockfyllt bergrum saknas för närvarande.

Borrhålslagren är väsensskilda från bergrumslagren - de arbetar med temperaturutjämnningar i berget och därmed med kvalitetsförluster. Skillnaden mellan in- och utmatad vattentemperatur kan vara så stor som 40-50°C i högtemperaturlager. Detta kan ofta vara energimässigt betydelselöst vid långtidslagring, exempelvis om lagret används för påvärmning av returvattnet till en spetsvärmepanna. I motsats till bergrumslagren lämpar sig borrhålslagren inte för korttidslagring. De är dock klart billigast vid säsongslagring om kvalitetsförlusterna hos värmelagret kan accepteras. Flera provanläggningar med borrhålslager finns och planeras i landet.

Kunskapsläget när det gäller allmänna prestanda hos olika värmelager i berg motiverar således endast begränsade FoU-insatser i framtiden.

Problem

Tidigare har nämnts att materialforskning när det gäller gropförlagad värmelager i jord kan anses motiverad.

När det gäller berglagren, bör kemiska deponeringsproblem ägnas uppmärksamhet, särskilt vid verkligt höga lagertemperaturer (100°C eller däröver).

Inverkan av kallras längs bergrumsväggarna på skiktningen i öppna och blockfyllda bergrum bör studeras.

Problem vid konvertering av överflödiga oljelager till värmelager bör kanske ägnas ett studium.

Borrhålsprecision för mycket långa massproducerade grovhål är ett aktuellt problem för borrhålslager och blockfyllda bergrum bör studeras ytterligare.

Vidare bör utredningar om lämplig utformning av installationer i borrhål fortsättas.

Metoder att minska borrhålslagers värmetröghet genom exempelvis uppspräckning av bergmassan mellan hålen bör utredas.

Pris

Det konstaterades vid seminariet att högtemperaturlager har svårt att bli prismässigt konkurrenskraftiga vid kort avskrivningstid. Det ifrågasattes om kortsiktig lönsamhet skulle krävas för lager;

en jämförelse gjordes med avloppssystem i bergtunnlar, där installationerna får kort avskrivningstid medan tunneln kan skrivas av på en betydligt längre tid.

En kommun måste inför konsumenterna ofta bedöma investerings värde kortsiktigt. Eftersom högtemperaturlager är dyra system, där intäkterna kommer sent, kan detta leda till att "nationalekonomiskt" vettiga investeringar i värmelager aldrig genomförs.

Beträffande pris på lagertyperna ligger det kvalitetsmässigt bästa lagret, bergrumslagret, högst. Det kan dock återanvändas flera gånger årligen genom korttidsanslutning. Detsamma gäller blockfyllda bergrumslager som per årlig lagringskapacitet kostar ca 70% av motsvarande öppna bergrum. Klart billigast för säsongs-lagring är borrhålslagren, ca 35% av öppna bergrum, men som tidigare nämnts har dessa begränsningar i tillämpning och kan ej användas för korttidslagring.

Frågan om vilken av lagertyperna som är ekonomiskt bäst motiverad kan först lösas efter en systemstudie liksom den som för närvarande genomförs av Energiverken i Göteborg. Vid seminariet konstaterades att tillräcklig möda tidigare inte ägnats åt utvärdering av lagren i större energiförsörjningssammanhang med beaktande av alla kostnader som kan hänföras till lagret. Dylika systemstudier bör prioriteras i kommande FoU-arbete.

Potential

Man kan konstatera att högtemperaturlagring endast kan svara för en liten del av den totala energiförsörjningen. Den betraktas dock idag som viktig.

Högtemperaturlager för korttidsutjämning är redan i dag ekonomiskt motiverade i en del fjärrvärmesystem. Ju billigare dessa korttidslager kan göras, desto större blir potentialen.

Fastbränsleeldning kan ge ekonomiskt försvarbart lagringsbehov genom att olja via lagret ersätts med fastbränsle. Potentialen skulle kunna vara så stor som 5 göteborgslager (å 50 GWh) per år under 1980-talet.

När det gäller säsongslagring är potentialen sett över landet begränsad beroende på svag tillgång på spillvärme av hög temperatur för inlagring. Situationen i Göteborg är därvidlag ett lysande undantag.

UPPLAGGNING AV EXPERTSEMINARIET

Ulf Lindblom, Hagconsult AB och Chalmers tekniska högskola, Göteborg.

Seminariet ägde rum på hotell Europa i Göteborg från kl 16.00 den 1 december till kl. 17.00 den 2 december 1982. Ett trettio-tal delegater deltog i arbetet.

Ändamålet med seminariet var att fånga upp det stora kunnandet hos de samlade experterna inom området hetvattenlagring. Jag formulerade följande nyckelord för seminariedagarnas diskussioner (de fyra "P"-na).

Prestanda

Problem

Pris

Potential

Väldigt ofta koncentrerar vi oss på att diskutera tekniska systemlösningar för värmelagring, d v s hur skall vi lagra? Mera sällan diskuteras vad som skall lagras och de ekonomiska förutsättningarna för de olika lagertyperna. Vi beslöt oss för att vid detta seminarium åtminstone göra ett försök att ge de fyra "P"-na lika vikt.

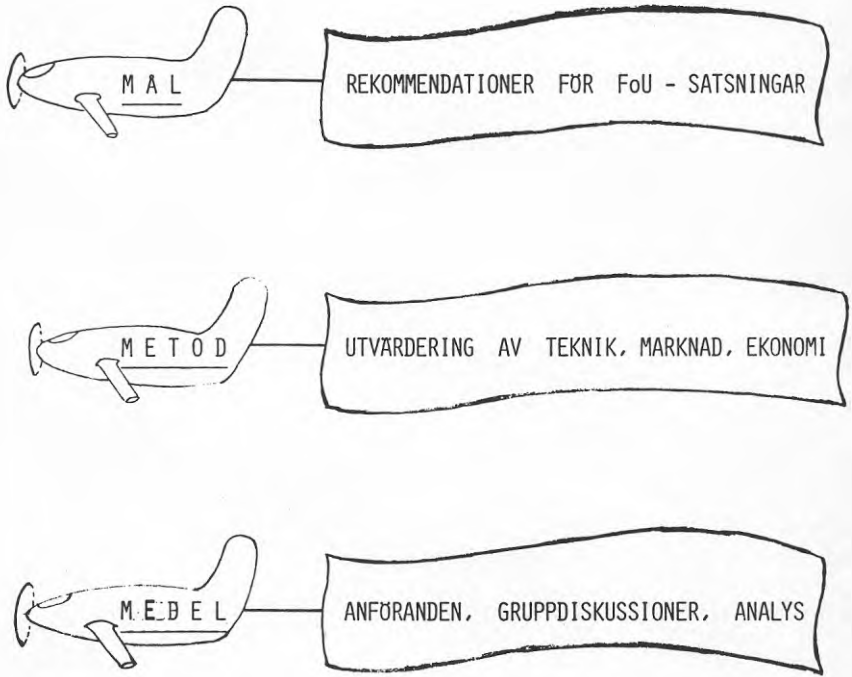
Seminariets mål var att lämna rekommendation för BFR:s satsningar på FoU inom högtemperaturlagring. Metod och medel som användes för att nå detta mål visas schematiskt av Figur 1.

Seminarieledarens uppgift är således att locka fram, strukturera och analysera den samlade kunskapen som står till förfogande under några korta timmar. För att nå detta mål valde jag att söka stimulera diskussionen genom gruppmetodik: sex kategorier experter identifierades bland delegaterna och med visst våld kunde ett lika antal delegater inordnas i vardera kategorin.

I Figur 2 visas de sex expertgrupperna. Dessa placerades vid varsitt bord och fick i uppdrag att efter anförandena diskutera aspekterna enligt Figur 3.

Slutdiskussionen genomfördes fritt utan gruppindelning.

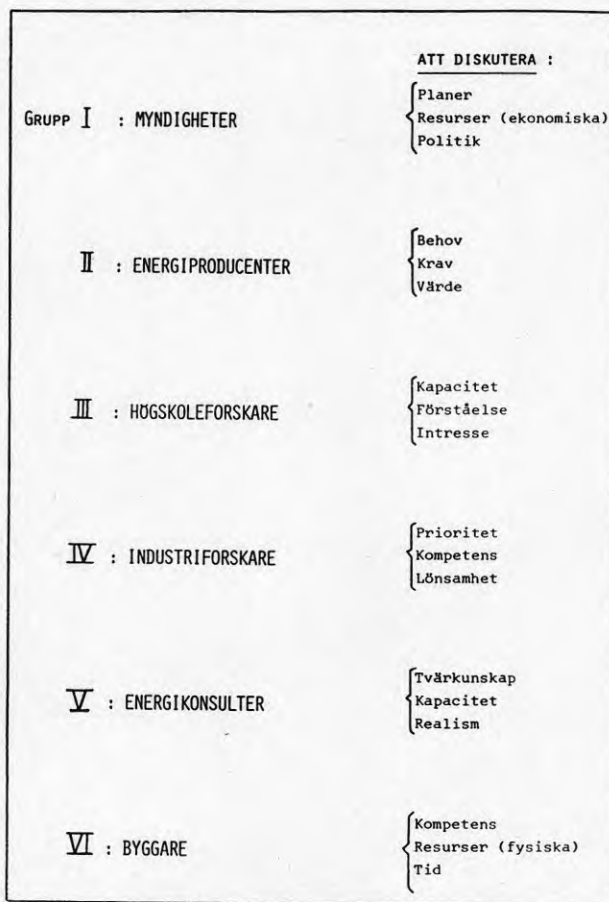
De anföranden som hölls vid seminariet publiceras i denna rapport med undantag av ett föredrag om gropmagasin som inte inkommit. Synpunkter på högtemperaturlagret i Göteborg har inkommit skriftligen efter seminariet och har medtagits i rapporten.



Figur 1.



Figur 2.



Figur 3.

INLEDNING

INLEDNING

Forskningsdirektör Sten Bjurström, Stiftelsen Bergteknisk Forskning
- BeFo, Stockholm

Området värmelagring i mark har ett stort utrymme i BFRs och andra energiforskningsorgans program. Sedan 1972 har BFR m fl satsat betydande belopp på forskning kring energilagring i mark och många projekt har genomförts och är under utförande. De relativt sett stora forskningsinsatserna återspeglas ännu ej i någon nämnvärd omfattning i officiella prognoser om Sveriges framtida energiförsörjning. Man är uppenbarligen osäker om tekniken och dess värde.

Inför kommande energibeslut är det därför synnerligen angeläget att försöka dokumentera och i görligaste mån utvärdera markvärmets realistiska roll och bidrag i Sveriges framtida energiförsörjning. I detta sammanhang är det viktigt att få perspektiv på energilagring och den roll värmelagring i mark kan komma att spela.

Oklarheter härvidlag innebär stor risk att den i många avseenden nya och oprövade tekniken att utvinna och lagra värme under mark kan bli överspelad av andra mer traditionella energialternativ.

Det är också viktigt att klargöra behov av forskning för fortsatt teknikutveckling samt de övriga insatser som krävs för t ex planering, reglering och finansiering.

För att utvärdera olika områden inom BFRs energiforskning har rådet etablerat ett 10-tal utvärderingsgrupper. Huvuduppgiften för dessa är att genomföra studier över "the State of the Art" inom respektive delområden och i rapportform presentera resultaten.

För att kunna lämna underlag i tid till BFRs samlade bedömning är man tvungen att i flera fall mycket tidigt dra slutsatser av icke avslutad försöksverksamhet. För Markvärmegruppens del bör en första rapport föreligga under våren 1983.

För att fullgöra denna uppgift i tid är vi beroende av att olika i verksamheten engagerade grupper och individer hjälper oss att på bästa möjliga sätt belysa förhållandena så att området MARKVÄRME får den roll i energiförsörjningen som den förtjänar och att området även fortsättningsvis får ett rimligt stöd för forskning, utveckling och demonstration.

HÖGTEMPERATURLAGRING UNDER MARK

- Lagring i gropmagasin, bergrum, gruvor och borrhål -

BFR-seminarium 1-2 december 1982

Inledning

Sven-Erik Lundin, Byggeforskningsrådet

Statens energiforskningsprogram är nu inne i sin tredje 3-årsperiod. Forskningen finansieras, planeras och drivs av fem programorgan varav BFR har ansvaret för delen "Energianvändning i bebyggelsen". Som framgår av OH 1 har forskningsmedlen i stort sett fördubblats varje period och uppgår nu totalt till 1,4 miljarder kronor 1981-84.

Bilden visar också hur oljeersättningen och energiförbrukningen kan tänkas bli förändrad fram till år 2010. Solvärmetekniken (inkl naturvärme, spillvärme, värmepumpar allm) bidrar med en ganska begränsad del av landets totala behov på ca 150 TWh/år. Här finns plats och krav på intensifierad forskning innefattande även dagens seminarieämne "Värmelagring".

BFRs energienhet driver FoU-programmet "Lokala energikällor". Detta är indelat i de sju delprogram som visas på OH 2 och där forskningen kring värmelagring främst sker inom del 4 "Värmelagring i vattenmagasin" och 5 "Värmelagring i mark". Budgeten uppgår till ca 25 Mkr/år varav ca 50% utgörs av s.k. experimentbyggnadslån för forskningsinriktade fullskaleprojekt.

Redan på 1970-talet identifierades de utvecklingslinjer och lagringstekniker som OH 3 anger. För högtemperaturlagring under mark har system 11-12-13-14 med lagring av hetvatten i gropar i jord och berg, i bergrum, blockfyllda bergrum och gruvor visat sig intressanta och lämpliga. Med borrhålslager i berg kan värme också lagras direkt i den massiva undergrunden. Under åren 1977-82 har en projektbank på ca 80 st projekt skapats på området värmelagring enbart på BFR för ca 60 Mkr. Denna omfattande forskning ska utvärderas med hjälp av Markvärmegruppen och detta seminarium blir en viktig lägesrapport.

Lagrets roll i olika energisystem är en viktig frågeställning som under de gångna åren dock inte riktigt har klarlagts. Svaren på frågorna VAD som ska lagras och NÄR lagring kan användas har ofta blivit tekniklösningar om HUR lagring kan ske! Systemforskning bör därför snarast inledas över säsongslagringens möjligheter, begränsningar och aktuella värmekällor. För olika typer av korttidslagring finns också många tillämpningar för både fjärrvärmenet, fastbränslecentraler, spillvärmeutjämning m m enligt OH 4.

Solenergins nyckelfråga har ansetts vara just lagringen och dess kostnader. Som framgår av OH 5 kan stora frågetecken också sättas för solfångarnas kostnader, solfångartekniken, de långa distributionsledningarna, plats och utrymme för solfångarna m m. Om och när solenergin ska nyttjas i större omfattning på 1990-2000-talet torde inte värmelagren utgöra något

hinder efter vad dagens lovande teknicklage visar. Sverige har en utmärkt berggrundsgeologi för att bygga lager direkt i undergrunden i kristallint urberg. De svenska värmesystemen har vanligen en "kollektiv uppbyggnad" till fördel för alternativa energikällor och storskaliga lagersystem. I jämförelse med utlandets möjligheter, ambitioner och teknikfront synes Sverige här vara väl lottat och långt framme.

Om man ska peka på några nyckelfrågor för lagringsteknikerna som ännu ar olösta så kan framhallnas för

- o Gropmagasin: Utrymme, höga grundvattenivaer, tätnings- och isoleringsproblem
- o Bergrum: Vattenkemi, bergstabilitet, temperaturskiktning
- o Borrhålslager i berg: öppna contra slutna system, rörinstallationer, trögheter i lager
- o Ekonomiskt mål: < 1,0 kr/kWh-ar i spec. anlagningskostnad?
- o Allmänt: Helheten, systemlösningar, lagrens och varmekallornas krav på varandra

Under de fem år som forskning bedrivits på lagringsomradet har som tidigare nämnts många projekt i liten och stor skala genomförts. Planeringen fram till 1985 framgår av tabell OH 6 som är en grov bedömning av medelbehov för experimentbyggnadslån. Lagring med undermarken som medium kommer de närmaste åren att prioriteras i jämförelse med lagring i vattenmagasin vars FoU-program ar väl uppstartat och intackt. Uppföljning av pagande projekt, viss grundforskning och förbättringar av lagringsteknikerna för höga temperaturer anvisar att fortsatta FoU-insatser behövs under flera år framåt.

Markenergi 1990 kan till vissa delar vara uppbyggd av system som visas i OH 7. Redan nu sker ett kommersiellt inforende främst genom naturvarmens utnyttjande med värmepumpsteknik. Varmelagringen tar sannolikt längre tid att föra in på marknaden men tekniken bör kunna användas både i lokala system som blockcentraler och i de mer storskaliga fjärrvärmesystemen.

Ur BFRs diskussionsskrift G13:1982 "Byggsektorn 1990" kan slutligen följande noteras enligt OH 8:

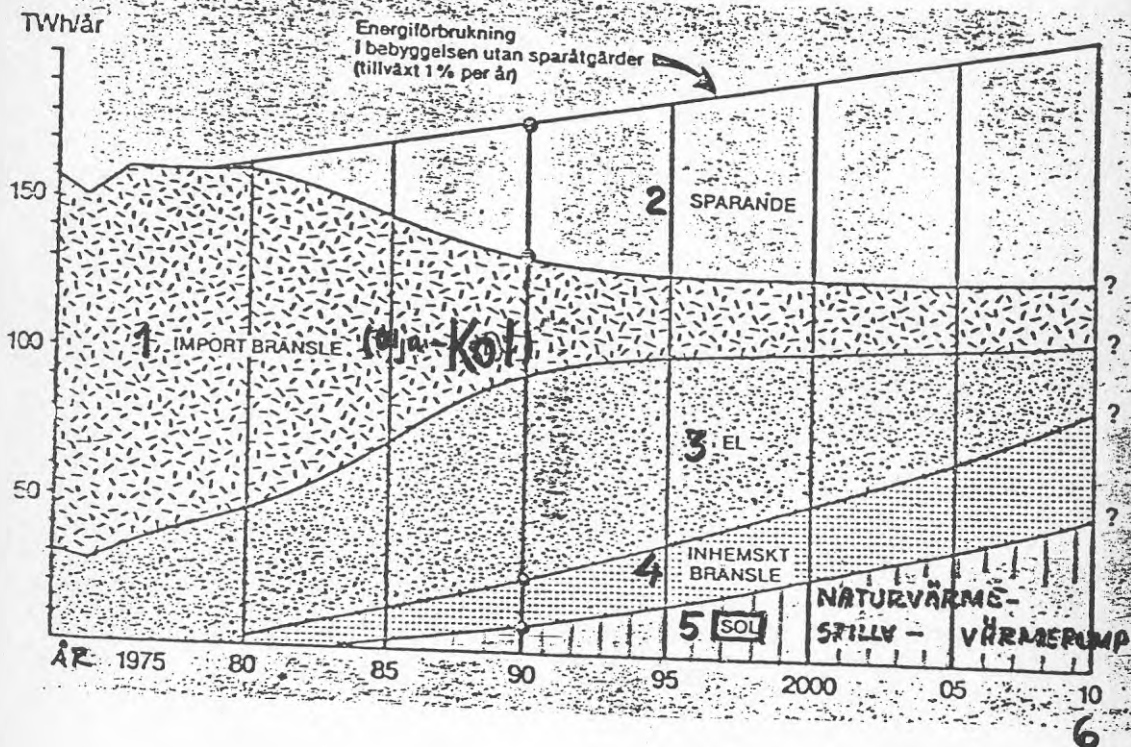
Kommande stadsombyggnad och energiforendringar i befintliga byggnader kan och bör ske parallellt. Kommunerna måste redan nu planera för mångfald och valfrihet och inventera fram sina resurser även på markvarmesidan.

Oljeersattningsplanerna borde i högre grad redan nu återspegla undermarkens roll som en energiresurs men den kan beaktas genom rullande planer.

FoU-resurserna och kompetensen finns i landet för markvarmetekniken och goda möjligheter föreligger till export. Den nya tek-

niken har bara haft fyra år på sig för utveckling vilket kan jämföras med 40 års erfarenhet av energi från olja, el och kol. Energipolitiken har både en kort och en lång målsättning varför forskningen också bör bedrivas med dessa tidsperspektiv. Ett första vägskejl uppnås dock redan "i mitten på 80-talet" när den s k SOL-85 utvärderingen ska genomföras. Dagens seminarium om värmelagring är en viktig del av denna kommande utvärdering och BFR ser fram mot ett resultat och en lägesrapport som ger anledning till fortsatta och kanske ökade forskningsinsatser under resten av 1980-talet.

ENERGI FÖR UPPVÄRMNING



ENERGIFORSKNINGSPROGRAMMET

1975 - 78	~ 350 Mkr
1978 - 81	~ 800
1981 - 84	~ 1400

Utvärdering

OH-1

"LOKALA ENERGIKÄLLOR" (Ur AF 83/84)

23

Delprogram	1981/82		1982/83		Förändring pga stats- makternas beslut	1983/84 Myndighetens förslag
	Budget	Utfall	Budget	Prisomr till 83/84		
<u>1. System- och gen- omförandeåtgärder</u>	5,2	4,9	5,6			5,9
<u>2. Solvärmeteknik</u>						
- bidrag	6,3	7,6	8,2			11,6
- lån	4,7	4,7	6,1			6,7
<u>3. Värmepumpar</u>						
- bidrag	10,0	8,8	12,0			15,5
- lån	37,3	37,3	18,4			20,1
<u>4. Värmelagring i vatten</u>						
- bidrag	4,6	3,8	6,0			8,0
- lån	10,0	10,0	6,9			6,3
<u>5. Värmelagring och värmeutvinning ur mark</u>						
- bidrag	7,7	9,3	12,1			16,5
- lån	7,8	7,8	8,0			10,0
<u>6. Termokemisk värme- lagring</u>						
- bidrag	3,7	3,7	3,0			3,0
- lån	-	-	-			-
<u>7. Värmedistribution</u>						
- bidrag	5,7	4,9	7,6			11,0
- lån	0,5	0,5	5,2			5,8
Summa						
- bidrag	43,2	43,0	54,5	54,5		71,5
- lån	51,0	61,3 ¹⁾	44,6	48,9		48,9
STU, bidrag	14,0	8,1	—	—		—
Summa totalt	108,2	<u>112,4</u>	99,1	<u>103,4</u>		<u>120,4</u>

1) Inkl disposition av överförda medel från föregående budgetår.

04-2

LOKALA ENERGIKÄLLOR - BFR ²⁴

DELPROGRAM 4-5

FolU-områden/Utvecklingslinjer

(INDIREKT SOLVÄRME)

NATURLIGA VÄRMEKÄLLOR

1. Ytjordvärme
2. Sjövärme (Ytvattenvärme)
3. Grundvattenvärme
4. Bergvärme
5. Geotermisk värme
6. (Uteluft)
7. (Sol)

VÄRMELAGRING I VATTEN OCH MARK

11. Tankar
12. Gropmagasin
13. Bergrum
14. Borrhålslager i berg
15. Lagring i jord
16. Lagring i akviferer (GW-magasin)

ÖVR. Geo Teori. Kart. Miljö

OH-3

PROJ 77-82

Milj Kr

40

30

30

10

4

3

9

10

15

20

15

40

10

~ 220 st

120

VÄRMELAGRING

25

• SÄSONGSLAGRING

- SOLVÄRME ∞ TWh
- NATURVÄRME $\sim 10 + (6+8+15)$ TWh
- SPILLVÄRME ~ 15 TWh

KORTTIDSLAGRING

- LASTUTJÄMNING I FJV-NÄT
- SOPFÖRBRÄNNING
- FASTBRÄNSLE
- TRÖGA MARKLAGER
- VÄRMEPUMPARS EFFEKTUTJÄMN
- SPILLVÄRME 5 TWh småindustri

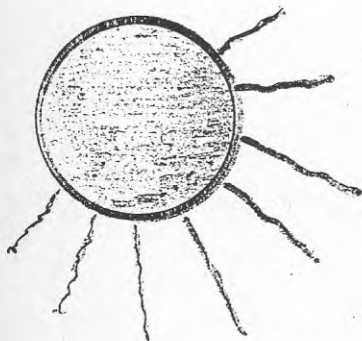
VAD ?

NÄR ?

HUR ?

DH-4

Solenergiens nyckelfråga: säsongslagringen ?



KOSTNADERNA ?

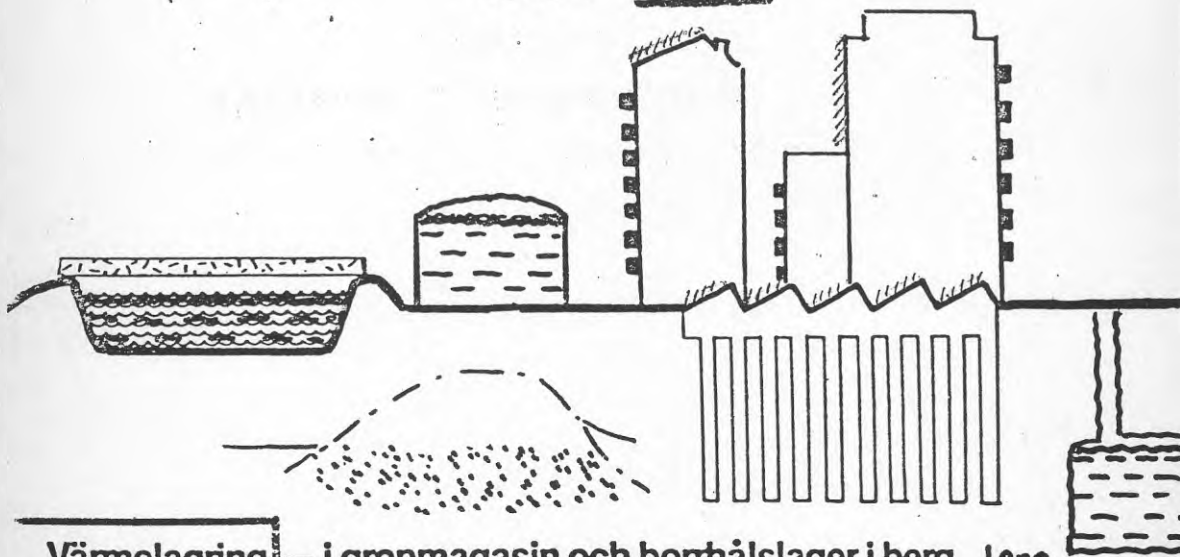
ELLER

SOLFÅNGARNA ?

ELLER

DISTRIBUTIONSLEDN. ?

ELLER PLATS ?



Värmelagring — i gropmagasin och borrhålslager i berg, lera

- i tankar och bergrum
- i akvifärer

OH-5

BUDGETUTKAST EXOD-LÄN 1982-85

27

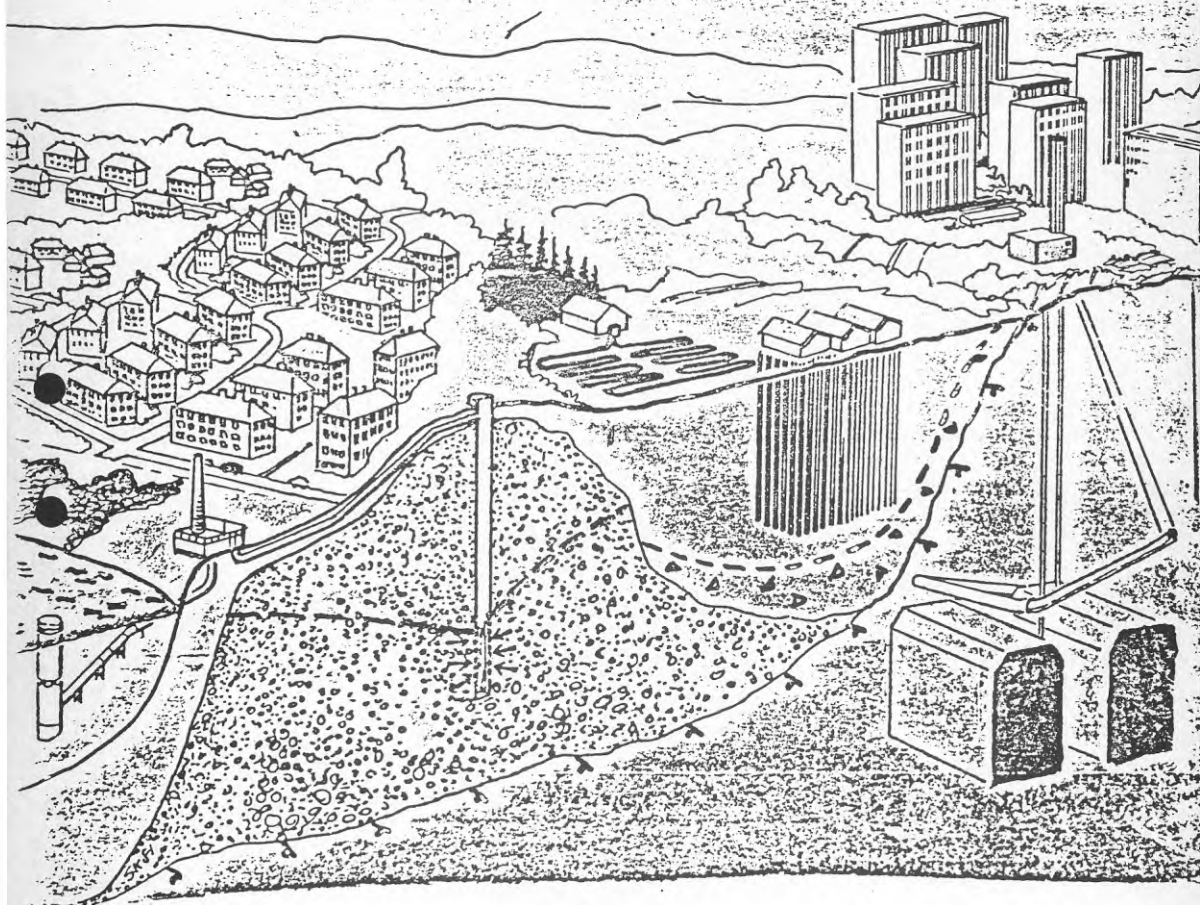
Värmelagring i mark och vatten

TEKNIK	Hela projekt/systemkostn (sol-VP-lager)			Utfall 1978-82	
	82/83	83/84	84/85	Bidr	Läm
TANK	—	—	—	0.7	3.0
BERGEM	—	2	2	3.3	20,0
" BLOCKFYL.			9 (del)	0.2	—
GEOPMIDGASIN		(5)		1.3	5.6
GEOPAR BLOCKF. BERG		6 (del)		—	—
BORRHÄLSLAGER	6	8		8.4	4.8
LAGRING I JORD	4+3			4.6	2.8
AKVIFER I JORD	4	6 (del)	9	2.9	—
AKVIFER I BERG			(3)	0.3	0.2
ÖVRIGT	3	2	2	0.5	—
S:a lager	20 Mkr	22 Mkr	20 Mkr	22,2 Mkr	36.4 Mkr
Totalt projekt	(50)	(48)	(45)		
<u>Värmefvinning:</u> Naturliga värmekällor	6 Mkr	6 Mkr	4 Mkr	9.375 / 15 (exkl VF 20.000)	

OH-6

MARKENERGI 1990 ?

LOKALA SYSTEM OCH/ELLER FJÄRRVÄRME ?



OH-7

BYGG SEKTORN 1990

G13:
1982

Behovsundersökning och utveckling under 80-talet

(ENERGIFÖRSÖRJ-DEL)

- Stadsombyggn / Energiförändr. - befintl byggnader
- Planera kommunalt (Invent. Mångfald. Valfrihet)
- Fall för byggesport
- Oljesättningsplaner rullande
- Folk-resurser och kompetens finns
- Olja - El - Kol 40 års utveckel
- VP - Lager - Sol 4 " "
- Energi politik och Fall med kort och lång målsättn
- Utvärdering 1985-87 VÄGSKÄL?

OH-8

TEKNIKLÅGE

TEKNISKA ASPEKTER PÅ HÖGTEMPERATURLAGRING UNDER MARK

Gunnar Gustafson, VIAK AB

ALLMÄNT

Med värmelagring vid hög temperatur avses i detta sammanhang sådana system, där värmets vid utnyttjandet växlas mot brukarnätet utan hjälp av en värmepump. I princip medför detta en enklare anläggning, men ställer också högre krav på lagrets funktion. Till detta kommer att värmeförluster och vattenkemiska problem blir mer uttalade vid högre temperaturer.

MARKENS TERMISKA EGENSKAPER

Den övre delen av marken påverkas termiskt av årstidsväxlingarna. Hur djupt dessa går styrs av dess värmeledningsförmåga och värmekapacitet. Vattenhållande material som torv och lera har låg värmeledningsförmåga och hög värmekapacitet. Berg har relativt hög värmeledningsförmåga och något lägre värmekapacitet.

Under den årstidspåverkade zonen stiger temperaturen långsamt med djupet. Orsaken är det geotekniska värmeflödet från jordens inre. Detta uppgår i medeltal till ca 60 mW/m^2 .

SYSTEMLÖSNINGAR

Vid värmelagring under mark har i princip tre olika systemlösningar föreslagits, se figur 1.

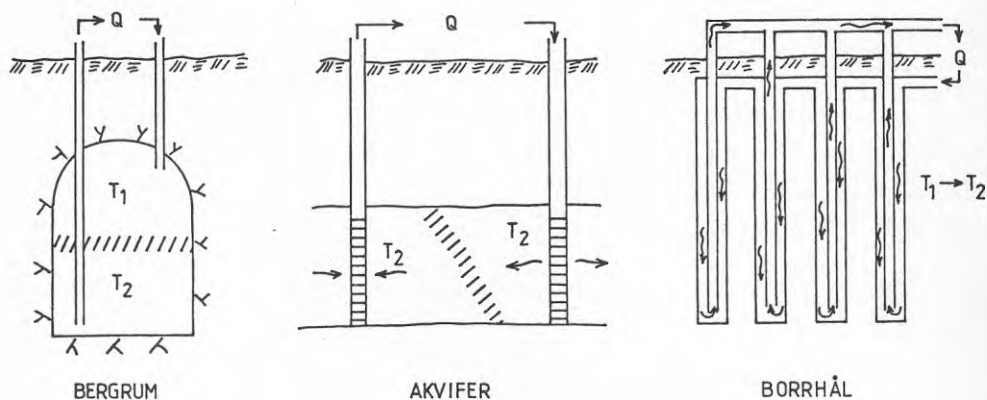


Fig. 1. Olika systemlösningar för värmelagring

1. Grop- eller bergrumslager

Vatten används som lagringsmedium i ett hålrum som byggts för ändamålet. Genom stabil temperaturskiktning, kan hög utvinningstemperatur hållas. Förfarandet bygger på teknik känd bl a från oljelagring.

2. Akviferlager

Vid akviferlagring utnyttjas markens porer som transportväg för värmebäraren, som är vatten. Värmet lagras i porvatten och markmaterial. Ingående delar är känd teknik. Igensättningsproblem i infiltrationsbrunnar kan befaras. Vidare kan man förvänta problem med temperaturfrontens stabilitet.

3. Borrhålslager

Värmet leds med vatten som värmebärare genom ett system av rör eller borrhål. Lagringen sker i materialet kring borrhålen. Borrning som sådan är känd teknik, men hur stora fördelningssystem av denna typ som fungerar är inte i detalj känt.

Vid högtemperaturlagring medför materialkrav att den i första hand kan utföras i berg med dessa tre tekniker.

KONDUKTIVA VÄRMEFÖRLUSTER

Förlusten från lagret sker genom värmeledning ut till omgivningen. Förlusterna styrs av materialets egenskaper, temperaturnivåer och lagrets geometri. Beräkningar visar att relativt stora anläggningar, $>100.000 \text{ m}^3$, fordras för att hålla förlusterna under ca 15 %.

Det slutliga stationära tillståndet nås först efter lång tid och en betydande värmemängd går åt för att värma upp berget kring anläggningen. Uppvärmningskostnaden måste ses som en del av investeringen för lagret, då värmet inte går att återfå när lagringen avbrytes.

KONVEKTIVA VÄRMEFÖRLUSTER

Berget kring anläggningen är mer eller mindre genomsläppligt och kan ge ett grundvattenflöde genom lagret. Detta flöde kommer att ge en värmeförlust, som i högpermeabla bergarter kan bli betydande.

Vidare kan lagret ge konvektionsflöden i grundvattnet, som kommer att medföra värmeförluster.

VÄRMEKVALITETSFÖRLUSTER

Förutom genom värmeavgivningen till omgivningen, uppstår en temperatur-sänkning hos de uttagna värmet genom interna värmeflöden. I ett bergtrum

kan språngskiktet brytas ned och vid ett borrhålslager fordras ett temperatursprång vid in- och urladdning från borrhålen. Båda dessa förlopp sänker värmets värde.

VATTENKEMISKA PROBLEM

Systemet berg-vatten påverkas i hög grad för förhöjda temperaturer. Dels ökar reaktionshastigheten för de flesta kemiska processer, dels förändras lösligheten för olika joner. Laboratorieförsök har visat att framför allt kisel, aluminium och natrium går i lösning, medan ämnen som järn och magnesium binds i systemet.

Dessa specier kan åter fällas ut i värmeväxlarna och orsaka problem. Då systemet är beroende på jämvikten mellan berg och vatten, hjälper inte avsaltning.

En orienterande försöksserie på betong visar att problemen i dessa fall sannolikt blir betydande.

SAMMANFATTNING

Värmelagring vid hög temperatur bör vara en både möjlig och lämplig teknik att utnyttja. De här uppräknade problemen är inte i något fall av sådan art att de inte går att ösa med en relativt måttlig forskningsinsats. I vissa fall finns redan fungerande pilotanläggningar och flera är under byggnad. Genom att lagren är förlagda under mark blir miljöpåverkan liten. Finns bara värme att lagra till rimlig kostnad, torde värmelagring vid höga temperaturer under mark bli ett väsentligt inslag i vår energihushållning.

LAGRINGSSYSTEM:

BERGRUM

Per-Olov Karlsson, Vattenfall

Elisabeth Kjellsson, UKAB

Det svenska urberget erbjuder stora möjligheter till utsprängning av stora berggrum till låga kostnader. Positiva erfarenheter från lagring av uppvärmd olja i berggrum föreligger. I dag finns i Skandinavien ca 200 oljelager med volymer från 50 000 m³ upp till 2 å 3 miljoner m³.

Förutsättningarna för att använda samma teknik för lagring av värme i vattenfyllda, oisolerade berggrumsanläggningar bedöms vara goda.

Teoretiska studier och försök i liten skala har genomförts under 70-talet.

För att pröva tekniken i tillräcklig skala har en försöksanläggning om 15 000 m³ uppförts i Avesta som tagits i bruk 1982. Försök kommer att pågå under 1982, -83 och -84.

Huvudfrågor i försöksprogrammet är bergstabilitet, värmeförluster, vattenkemi, skiktning.

En fullstor anläggning (100 000 m³) har också uppförts utanför Uppsala. Denna anläggning är ej en ren försöksanläggning. Ett mätprogram som är koordinerat med Avestaprojektet genomförs dock.

Berggrumslagring bedöms vara ett koncept som kan passa i de flesta värmesystem, där lagringsbehov föreligger eftersom inga direkta praktiska begränsningar vad gäller temperaturnivåer, in- och utladdningstider m m föreligger. En förutsättning för att få acceptabel ekonomi är dock en viss storskalighet.

Nedan ges separata beskrivningar för Avesta- och Uppsalaanläggningarna, varvid den senare benämnes Lyckeboprojektet efter det bostadsområde utanför Uppsala där berggrummet är beläget.

Erfarenheter från Avestaprojektets forskningsprogram redovisas på annan plats i denna skrift.

Avestaprojektet

Tekniken med hetvattenlagring i berggrum har tidigare ej prövats i full skala varför behov av en försöksanläggning i tillräckligt stor skala har förelegat. Syftet med Avestaanläggningen är att praktiskt verifiera resultaten från tidigare utförda utredningar, att utföra sådan forskning som inte är möjlig i laboratorieskala, och att demonstrera tekniken under realistiska driftförhållanden.

Anläggningen har en volym på 15 000 m³. Den är ansluten till ett värmeverk, som använder sopor som bränsle. Den normala driften är avsedd att baseras på korttidslagring - överskottsvärme från värmeverket lagras under vardagar för att användas nattetid och under veckohelger. Den termiska effekten blir 11 MW och normala drifttemperaturer 115/70°C.

Avestaanläggningen är dock som nämnts ovan i första hand en forskningsanläggning och utformas med hänsyn härtill. Det bör således påpekas, att anläggningen är för liten för att vara värmetekniskt och ekonomiskt optimal. Vid den aktuella volymen (15 000 m³) skulle till exempel en ståltank ovan jord innebära lägre anläggningskostnader. För större berganläggningar kan anläggningskostnaden per m³ reduceras flerfaldt jämfört med Avestaanläggningens kostnad.

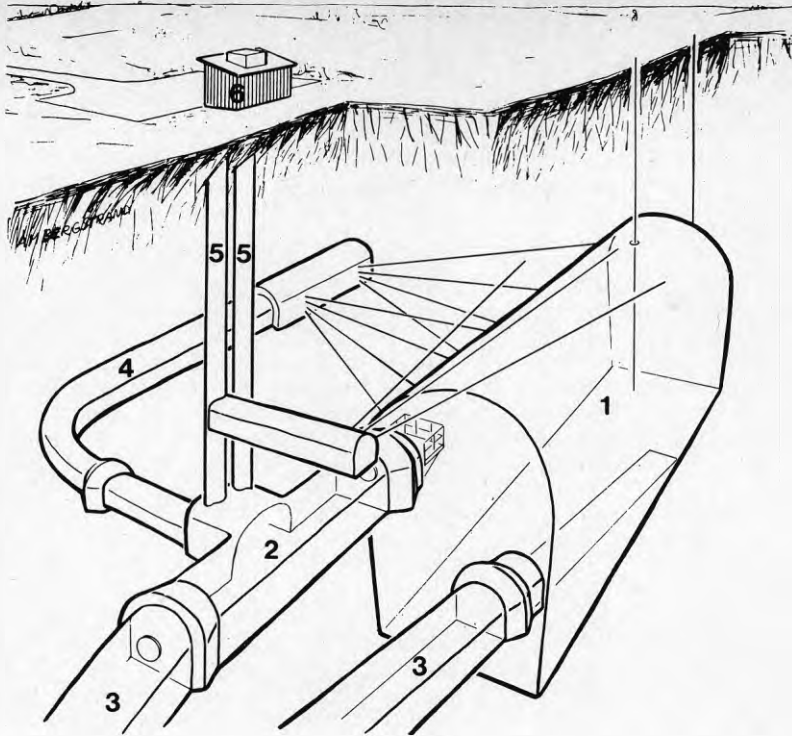
Byggnadsarbetena för projektet startade i augusti 1980 och hela anläggningen stod klar i april 1982. Försök genomföres under 1982, -83 och -84.

Det relativt omfattande forskningsprogrammets huvudfrågor är:

- Bergstabilitet med hänsyn till pulserande värmelaster
- Värmeförluster för bedömning av driftekonomin
- Värmeväxlings- och materialfrågor för bedömning av risker för utfällning av mineraler och korrosion
- Skikttningsfrågor för bedömning av möjligheterna att upprätthålla en stabil skiktning i lagret.

Under försöksperioden simuleras såväl säsongslagring som korttidslagring liksom varierande temperaturspann.

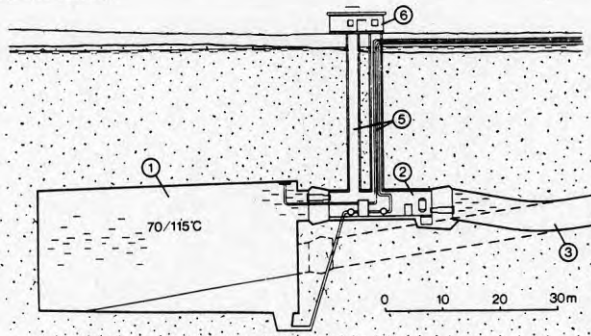
Preliminära resultat från försöken redovisas som nämnts i en särskild rapport i denna skrift.



- | | |
|-------------------|-----------------------|
| 1 Bergrum | 4 Forskningstunnel |
| 2 Maskinrum | 5 Hiss- och rörschakt |
| 3 Transporttunnel | 6 Entrébyggnad |

Figur 1
Perspektiv av anläggningen

1=Storage cavern; 2=Machine room; 3=Transport tunnel; 4=Research tunnel; 5=Access shaft; 6=Entrance building.



Figur 2
Sektion av anläggningen

Lyckeboprojektet

De 550 bostäderna i Lyckeboområdet utanför Uppsala skall värmas med säsongslagrad värme. Till att börja med produceras 15 % av energin med hjälp av solfångare medan de resterande 85 % kommer från en elpanna vilken styrs så att solenergi simuleras. Värmelagret mottar således energin som "100 % solenergi". Så småningom planeras elpannan att ersättas med solfångare.

Värmelagret som består av ett 100 000 m³ stort vattenfyllt bergum, har under 1981-82 sprängts ut och installationerna av rör, pumpar, värmeväxlare m m pågår några månader in på 1983. Se tidplan i tabell 1. Bergummet fylldes med vatten under ca 6 veckor under hösten 1982. Vattnet som användes var ett infiltrerat grundvatten från en grusås i närheten och vattenfyllningen kombinerades med en propumpning för vattentäkt som kommunen utförde. Värmingen av vattnet kommer att påbörjas i mars 1983 och anläggningen kommer att tas i drift i juni 1983.

Lyckeboområdet utgör ett separat fjärrvärmenät och distributionscentralen finns i en utsprängd tunnel ovanför bergummet. Anläggningen kommer att vara obemannad och styrs via en dator som även samordnar inmatningen från solfält resp elpanna.

Kostnaderna för värmelagret visas i tabell 2 i 1982 års penningvärde. Den viktigaste posten, utsprängningen av bergummet inkl alla installationer av värmeväxlare, pumpar, rör m m, har kostat 14,5 milj kronor. Detta har utförts som totalentreprenad av Skånska Cementgjuteriet. Förundersökningarna som kostat 0,6 milj kronor, omfattar bl a de geologiska och hydrologiska utredningar som krävdes för att finna den bästa placeringen av bergummet. Kostnaden för vattenfyllningen är ca 200 000 kronor, vilket även inkluderar en partiell avhårdning med 5 °dH. Denna kostnad kunde hållas så låg bl a tack vare kombinationen med kommunens propumpning (enl ovan). För att under första året värma vatten och omgivande berg till drifttemperatur kommer ca 10 GWh att åtgå och kostnaden för detta och för den fortsatta anvärmningen under de närmaste åren kan uppskattas till 2 milj kronor. För denna uppvärmning kommer elpannan att användas.

Kostnaden för det färdiga värmelagret, exkl matningssystem för produktion och distribution, kommer att uppgå till ca 17 milj kronor. Med ett utnyttjningsbart energiinnehåll i värmelagret av 6 000 MWh/år är investeringskostnaden per årligt utnyttjad kilowattimme ca 2,80 kr/(kWh/år). Med en annuitetsberäkning fås en energikostnad av 23 öre/kWh under förutsättning att 7 % realränta antas samt att avskrivningstiden är 30 år.

Kostnaden för hela Lyckeboprojektet är 39 milj kronor. Då ingår förutom värmelagret även solfångare, elpanna och distributionssystem. Lagret står i detta fallet för knappt hälften av den totala projektkostnaden.

Tabell 1 Tidplan för värmelagret i Lyckebo, Uppsala

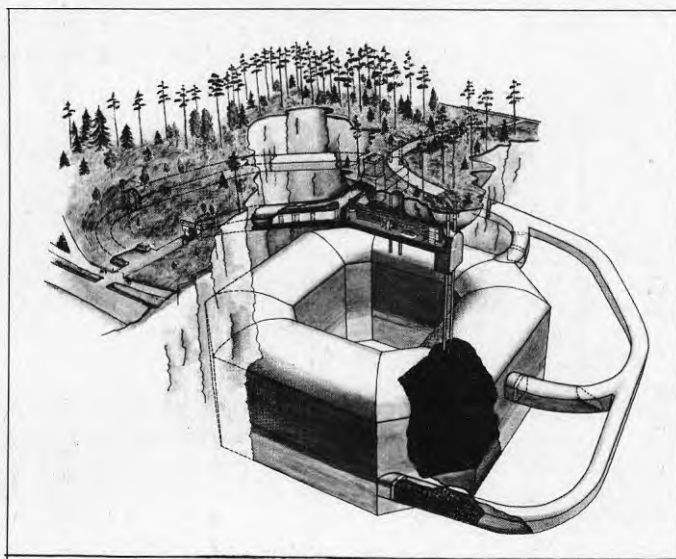
Planering, projektering	1978	-
Utsprängning berggrum	1981-09	- 1982-04
Installationer	1982-04	- 1983-02
Vattenfyllning	1982-08	- 1982-09
Anvärmning	1983-03	- 1983-06
Styr- och reglersystem		- 1983-06

Tabell 2 Kostnader för värmelagret, exkl matningssystem för produktion och distribution, i Lyckebo, Uppsala (1982 års penningvärde) (milj kronor)

Förundersökningar	0,6
Berggrum (utsprängning, värmväxlare, pumpar, rör)	14,5
Vattenfyllning	0,2
Anvärmning	2
	<hr/>
	17,3 milj kronor

Lyckeboprojektet (Värmelager, solfångare, elpanna, distributionssystem)

39 milj kronor



Figur 1
Lyckebo, sprängskiss

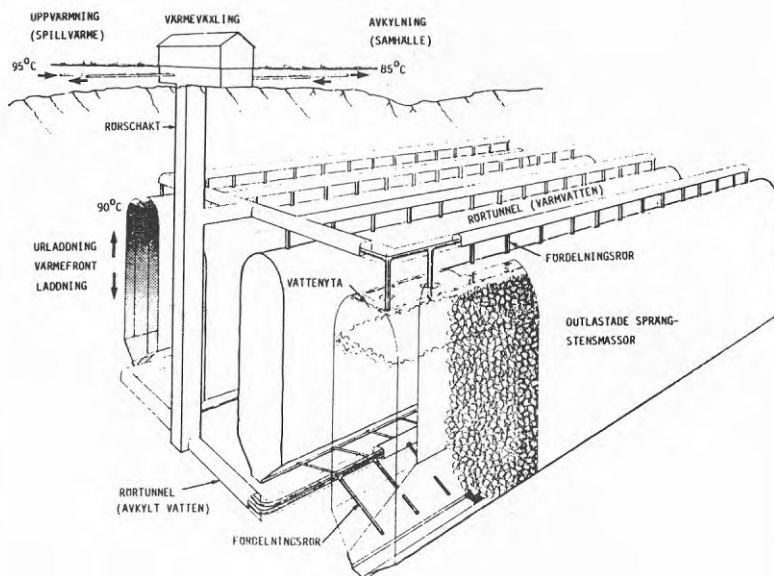
BLOCKFYLLDA BERGRUM OCH BERGGROPAR

Ingvar Bogdanoff
Hagconsult AB

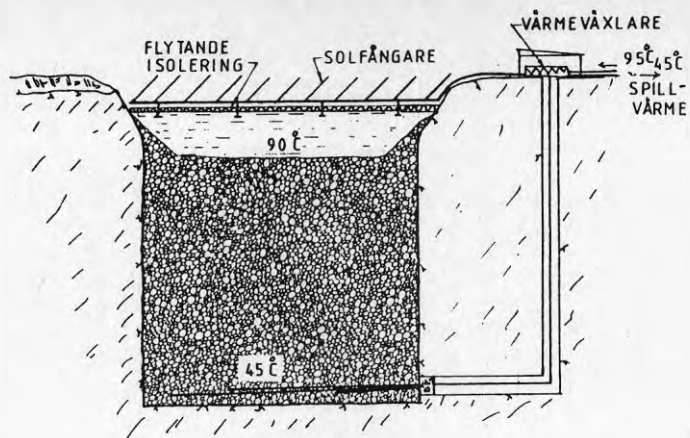
1. Allmänt

Lagring i bergrum med mycket stora volymer av bl a uppvärmd olja är en känd teknik i Sverige. Motsvarande teknik kan användas för att lagra varmt vatten från sommar till vinter. Lagringen kan ske i stora bergrum utan isolering av väggarna. Utförda undersökningar visar att värmeförlusterna från stora värmelager i jord och berg blir relativt små.

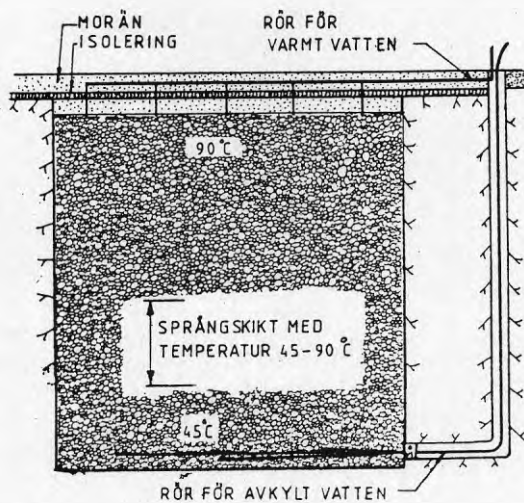
Ett alternativ till ett konventionellt, öppet bergrum är ett utsprängt värmelager i berg, där de lossprängda bergmassorna endast delvis lastas ut, ett s k blockfyllt värmelager. En riktigare benämning är "sprängstensfyllt lager" eftersom fyllningen består av sprängsten med varierande storlek med finmaterial, sten och block. Värmelagret kan exempelvis utföras som bergrum med flera parallella skepp, figur 1, eller som en grop i berget, figur 2 och 3.



Figur 1. Sprängstensfyllda bergrum.



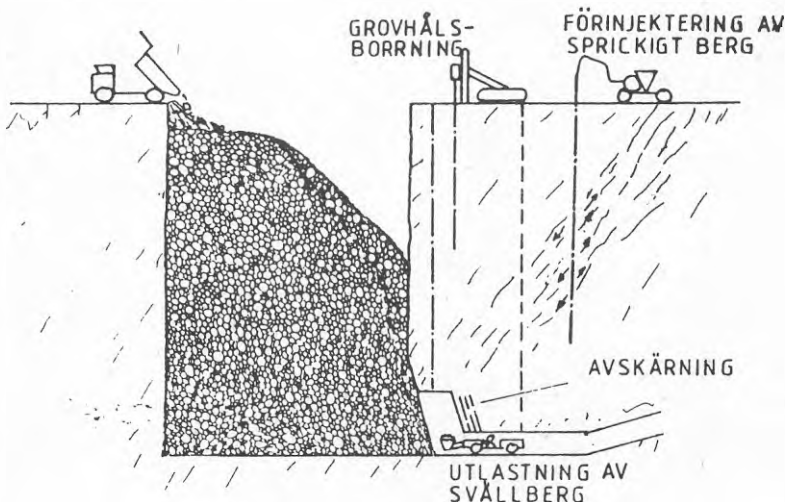
Figur 2. Sprängstensfylld berggrop med flytande isolering.



Figur 3. Sprängstensfylld berggrop med återställd markyta.
Språngskikt = övergångszonen mellan varmt och kallt vatten.

Lagringsmediet består dels av vatten, som är värmebärare och cirkulerar genom stenfyllningen, dels av den kvarlämnade sprängstenen.

De kvarlämnade sprängstensmassorna gör att bergutrymmet kan göras mycket högt, eftersom massorna stöttar bergväggarna. Inom gruvbrytningen har man sedan länge utnyttjat tekniken att stötta upp rasbenägna gruvutrymmen med sten- eller sandmassor. Mycket stora gruvrum kan skapas vid malmbrytning med hjälp av tekniken att under något skede av malmbrytningen utnyttja de lossprängda malm-massorna som stöd för gruvrummets väggar och tak. Därmed möjliggörs att brytningsarbetet kan utföras under relativt säkra förhållanden. Alternativt spränger man i stora malmer flera parallella rum med en bergpelare emellan. När malmen lastas ur, fylls bergrummen med icke malmförande gråberg, varefter man kan bryta malm-pelarna mellan rummen.

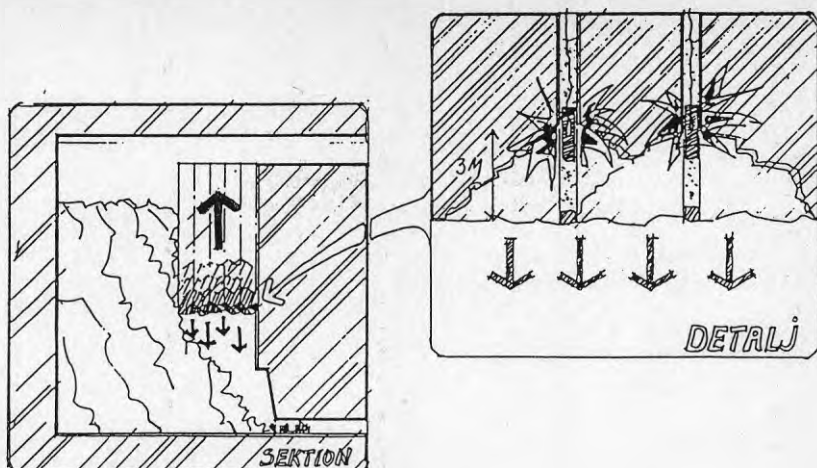


Figur 4. Skivpallbrytning av berggrop.

Eftersom behovet av förstärkning av väggarna elimineras, kan det sprängstensfyllda bergutrymmet utföras med mycket rationella drivningsmetoder. Som exempel kan nämnas skivpallbrytning med grovhål, figur 4, där det är vanligt att använda håldiametrar upp till 165 mm och hållängder mellan 50 och 100 m. Skivpallbrytning med grovhål är en vanlig brytningsmetod utomlands. Denna brytnings-teknik kommer att användas i forskningsgruvan i Kiruna.

En annan metod som kan användas i samband med grovhål är s k kratersprängning, där borrhålen successivt sprängs neråt mot ett öppet utrymme under pallen, figur 5.

Förutom minskade bergförstärknings-, borrhåls- och sprängnings-kostnader leder metoden till lägre utlastningskostnader för bergmassor. Utlastning av bergmassor kan i princip minskas med 40-50%.



Figur 5. Kratersprängning.

2. Problemområden

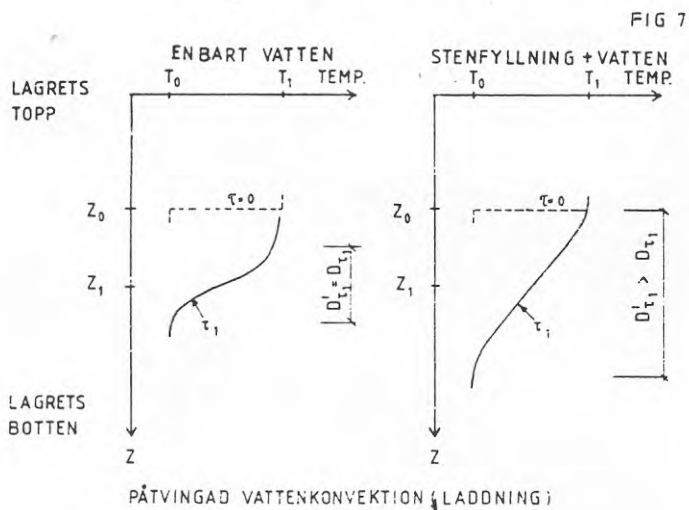
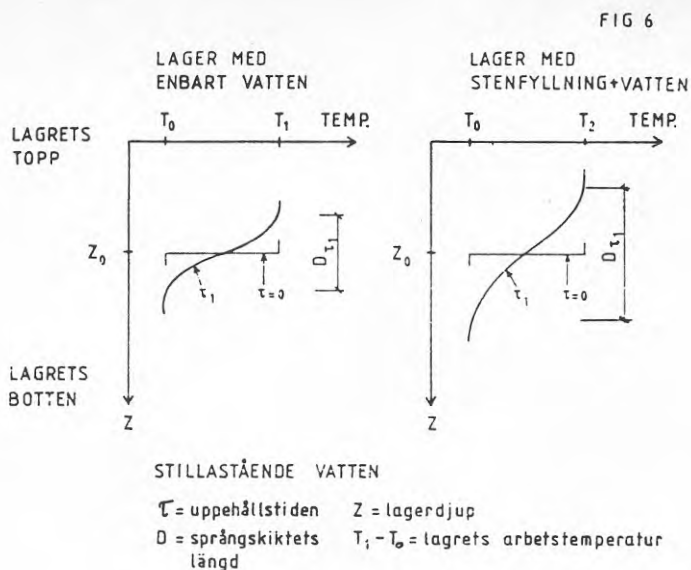
2.1 Sprängskikt

Nackdelarna med den sprängstensfyllda varianten av värmelager i berg är att värmelagringskapaciteten för en sprängstensfyllning med 40 % porositet är ca 70 % av ett vattenfyllt lager med samma volym och att sprängskiktet mellan varmt och kallt vatten blir större. En ökad utbredning av sprängskiktet medför en kvalitetsförsämring hos den lagrade värmemängden; lagrets effektiva volym minskar med större sprängskikt.

Ökningen av sprängskiktet beror på att vatten med stenfyllning har större värmeledningsförmåga än enbart vatten. Stenens värmeledning är nämligen större än vattnets. Vid en påtvingad vattenkonvektion genom stenfyllningen, vilken äger rum vid laddning eller urladdning, ökar sprängskiktet ytterligare i samband med att värme växlas till resp från stenarna.

Figur 6 visar principiellt sprängskiktet för ett värmelager med enbart vatten och ett lager med vatten- och stenfyllning. Då lagret är i vila och ingen påtvingad vattenkonvektion finns, sprids värme från den ovanliggande varmare delen till den underliggande kallare enbart genom molekylär diffusion.

Om man laddar eller urladdar lagret, blir förhållandena i princip som figur 7 visar. I figuren betraktar vi sprängskiktet efter samma tid (τ_1) som i figur 6, men denna gång har lagrets energimängd ökat. Sprängskiktet har transporterats en bit längre ner i lagret genom att lagret tillförts varmt vatten uppifrån. Samtidigt har kallt vatten tagits ur lagret vid botten. Inverkan av lagrets väggar på sprängskiktet har antagits vara försumbart. För det stenfyllda lagret har sprängskiktet ökat mest, eftersom värme växlas över till stenmaterialet. Hur stor denna ökning blir beror på laddningshastigheten $v_T = \frac{z_1 - z_0}{\tau_1}$ och stenmaterialets egenskaper.

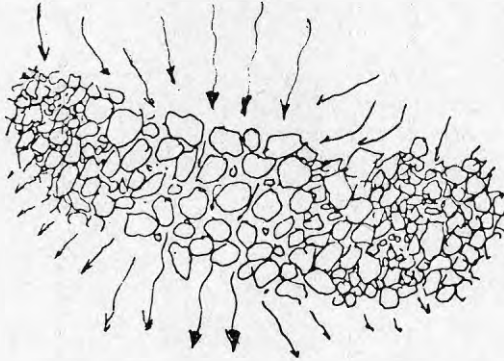


Figur 6. Principiell språngskiktsutveckling i ett öppet och i ett sprängstensfyllt lager vid stillastående vatten.

Figur 7. Samma lager som i figur 6. men med påtvingad vattenkonvektion genom lagret (laddning).

2.2 Skiktning

Ett annat problem som kan tänkas uppstå när vattnet strömmar genom stenfyllningen är att inhomogeniteter i stenfyllningen kan störa strömningsbilden. Om man tänker sig att en del av stenfyllningen innehåller en stor del finmaterial eller att vissa delar av stenfyllningen är bättre packade än andra, är det tänkbart att vattnet företrädesvis väljer att strömma genom andra delar av fyllningen, se figur 9. Man skulle då riskera att hela fyllningen inte deltar i värmeväxlingen med följd att sprängskiktet förlängs och blir lutande eller orege bundet.



Figur 9. Inhomogen stenfyllning. Vattnet "väljer" den lättaste vägen genom fyllningen.

Riskerna för dylika siktningsproblem kan dock betraktas som små vid säsongslagring. Anledningen är den relativt stora porvolymen (ca 40%) i kombination med de låga vattenhastigheterna. Detta minskar risken för att ojämn tryckgradienter bildas då vattnet strömmar genom fyllningen. De sprängningsmetoder som nämnts ovan bör också ge en homogenerare styckefallsfördelning än konventionell pallsprängning, eftersom laddningarna är likformiga, utan stora bottenladdningar.

2.3 Vattenkemi

De kemiska problem med varmvattenlagring i berg är komplexa. Vid hetvattenlagring i sprängstensfyllda lager ökas exponeringsytan berg/vatten. Jonutlakning i ett sådant lager är sannolikt också beroende av styckefall och porositet. Hög jonutlakning ger en korrosiv miljö och svårbedömda deponeringseffekter på värmväxlare.

Hittills har autoklavförsök utförts på ett stort antal små provkroppar vid institutionen för geologi vid CTH. Vid autoklavförsöken har man analyserat vattenkemin vid varierande temperaturer, vattenkvaliteter och olika bergarter.

Av dessa är det stenens storlek, form, värmekonduktivitet, volymvärmekapacitet, värmeövergångsmotståndet sten/vatten samt stenfyllningens porositet som har betydelse.

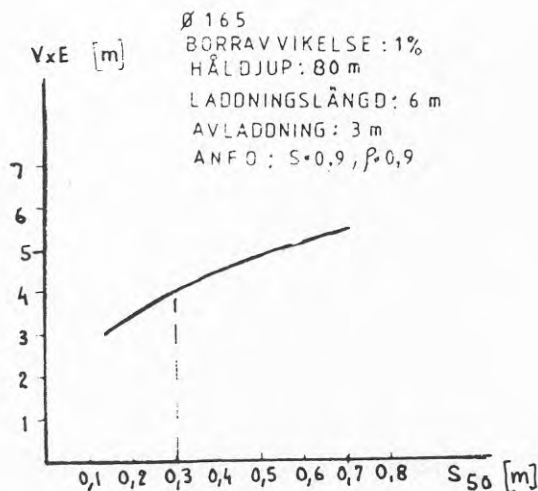
Genom förändringar i borrhings- och laddningsplaner kan stenstorleken (styckefallet) påverkas.

Genom att exempelvis borra spränghålen tätare kan man öka den specifika laddningen per volymenhet berg och därigenom erhålla en bättre sönderdelning av berget. En övergång till tätare hålsättning ökar dock kostnaden för borrning och sprängning.

En minskning av medelstenstorleken från 0,6 m till 0,3 m medför att hålsättningen måste minskas från ca 5 m till ca 4 m, vilket innebär ca 36 % mera borrning, se figur 8.

Mindre styckefall (stenstorlek) minskar sprängskiktet och trögheten hos lagret vid i- och urladdning.

Om lagret används för korttidslagring innebär detta en ökning av urladdningshastigheten v_T vilket innebär att sprängskiktet ökar p g a värmeväxlingen från sten till vatten (jmf figur 7). Men samtidigt minskar urladdningstiden och därmed den molekylära diffusionens andel av sprängskiktet (jmf figur 6). Om urladdningshastigheten exempelvis för ett 80 m högt lager och medelstenstorleken 0,5 m ökas från 1 m/dygn till 8 m/dygn ökar sprängskiktet från 10 m till 12 m p g a den interna värmespridningen.



Figur 8. Beräknad styckefall vid olika hålsättning.

Beräkningen är utförd för en berggrop som brytes med skivpallbrytning.

$V \times E =$ Borrhålens försättning \times hålavstånd.

Av dessa är det stenens storlek, form, värmekonduktivitet, volymvärmekapacitet, värmeövergångsmotståndet sten/vatten samt stenfyllningens porositet som har betydelse.

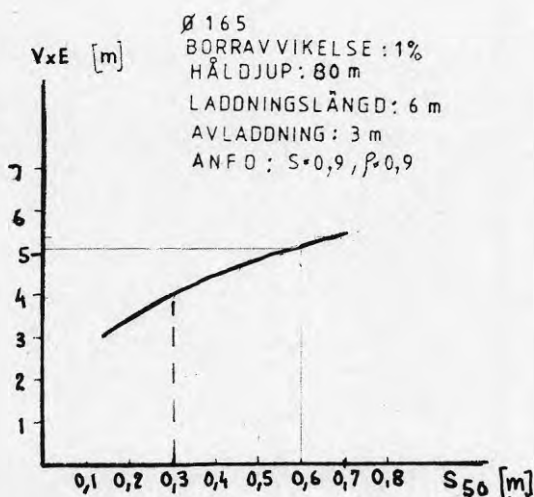
Genom förändringar i borrnings- och laddningsplaner kan stenstorleken (styckefallet) påverkas.

Genom att exempelvis borra spränghälen tätare kan man öka den specifika laddningen per volymenhet berg och därigenom erhålla en bättre sönderdelning av berget. En övergång till tätare hålsättning ökar dock kostnaden för borrning och sprängning.

En minskning av medelstenstorleken från 0,6 m till 0,3 m medför att hålsättningen måste minskas från ca 5 m till ca 4 m, vilket innebär ca 36 % mera borrning, se figur 8.

Mindre styckefall (stenstorlek) minskar sprängskiktet och trögheten hos lagret vid i- och urladdning.

Om lagret används för korttidslagring innebär detta en ökning av urladdningshastigheten v_T vilket innebär att sprängskiktet ökar p g a värmeväxlingen från sten till vatten (jmf figur 7). Men samtidigt minskar urladdningstiden och därmed den molekylära diffusionens andel av sprängskiktet (jmf figur 6). Om urladdningshastigheten exempelvis för ett 80 m högt lager och medelstenstorleken 0,5 m ökas från 1 m/dygn till 8 m/dygn ökar sprängskiktet från 10 m till 12 m p g a den interna värmspridningen.



Figur 8. Beräknad styckefall vid olika hålsättning.

Beräkningen är utförd för en berggrop som brytes med skivpallbrytning.

$V \times E$ = Borrhålens försättning x hålavstånd.

3. Teknikläge i korthet

3.1 Brytningsmetoder

De brytningsmetoder som nämnts under avsnitt 1 studeras nu i stor skala under svenska förhållanden. Metoderna har utomlands använts sedan början på 1970.

Vilken sprängningsmetod som kan användas under olika förhållanden kan vara beroende av t ex avståndet till vibrationskänslig bebyggelse. Vid korta avstånd till bebyggelse kan kratersprängning vara att föredra framför skivpallbrytning. Vid sprängning av gropar med ett inte alltför stort djup < 30 m kan konventionella sprängningsmetoder vara tillämpliga.

3.2 Språngskikt

Språngskiktets storlek är förutom värmespridningen inne i lagret även beroende av, in- och uttagsanordningar, temperaturskillnanden mellan bergväggar och vattnet + sprängstenen. Det senare problemet är jämförbart med lagring i öppna bergtrum. Vid urladdning av ett blockfyllt lager torde stenfyllningen i bottendelen, effektivt, motverka turbulenseffekter då avkylt vatten pumpas in i lagret.

Värmespridning inne i lagret har studerats teoretiskt och experimentellt vid CTH och LTH. Överensstämmelsen mellan teori och experimentresultat är mycket goda och torde kunna utgöra ett mycket gott underlag vid projektering av en demonstrationsanläggning.

3.3 Skiktning

Försöksresultat visar att skiktningssproblem p g a inhomogenitet knappast kan uppstå för aktuella laddnings- och urladdningshastigheter. Förutom en vertikal vattenkonvektion genom lagret uppstår en horisontell vattenkonvektion då vatten skiktat sig p g a densitetsskillnaden mellan vatten med olika temperaturer.

Vid försök i sprängstensfyllning från tunnelsprängningar har laddningshastigheter på ca 0,5 m/h använts utan tecken på inhomogen vattenströmning. I ett försök med stenfyllning 0-55 mm konstaterades inhomogen vattenströmning vid laddningshastigheten ca 1,1 m/h. Vattnets transporthastighet genom fyllningen var då ca 2 m/h.

3.4 Vattenkemi

Försök i autoklav och bassäng visar att jonutlakning sker mycket snabbt upp till en jämviktsnivå.

Denna jämviktsnivå uppnås sannolikt med alla lagringskoncept i berg under samma förhållanden med avseende på temperaturer, bergförhållanden och vattenkvalitet, men efter olika lång driftstid.

VÄRMELAGRING I GRUVA

Bergsingenjör Kjell Windelhed, Hagconsult AB

Grundidén med tekniken att utnyttja gruvor som säsongslager är att man på ett kostnadsmässigt fördelaktigt sätt får disponera ett redan utbrutet utrymme med stor volym. Som värmekälla kan exempelvis användas solvärme, spillvärme, sjö- eller åvärme. Det lagrade värmets kan sedan nyttiggöras i exempelvis ett fjärrvärmesystem.

Tekniken har dock den nackdelen att värmelagrets lokalisering ej bestäms med utgångspunkt från värmeunderlag utan från mineralförekomster. Ett annat i detta sammanhang betydelsefullt faktum är att lagret ej utformats för att ge minimala värmeförluster. Geometrin bestäms istället av mineraliseringarnas utbredning. Avgörande för en gruvans lämplighet för värmelagring är den metod som används vid malmuttaget. Om malmen till största delen tagits ut med hjälp av igensättningsbrytning går gruvan knappast att använda som värmelager. Brytningsrummen är då fyllda med finmaterial. Gruvor med stora öppna rum är lämpligast.

Vid en inventering som utförs av Hagconsult har påträffats 120 gruvor i syd- och mellansverige som ligger nära tätortsbebyggelse (högst 10 km avstånd). Den för värmelagring tillgängliga volymen i dessa gruvor överstiger 100.000 m³. Av dessa gruvor detaljstuderades 36 stycken som var särskilt lämpade för värmelagring.

I Ljusnarsbergsgruvan, Kopparbergs kommun, har vi med stöd från BFR utfört förstudie samt projektering. Arbetena har utförts i samarbete med Rejlers Ingenjorsbyrå. Ljusnarsbergsgruvan har enligt beräkningar en tillgänglig volym på ca 130.000 m³ och är vattenfylld till 30 m

under markytan. Gruvan som är 450 meter djup är tänkt att fungera som säsongslager.

Som värmekälla sommartid utnyttjas Garhytteån. Via värmepumpar försörjs ca 700 lägenheter i centrala Kopparberg. Överskottsvärmen lagras vid en temperatur om ca 50°C.

Vintertid utnyttjas gruvans uppvärmda vatten som värmekälla. Systemet är dimensionerat för att klara fjärrvärmeområdets halva effektbehov som totalt är 4,2 MW. Lager och värmepumpar svarar därmed för 85% av energibehovet, toppbelastningen tar en befintlig oljeeldad panncentral.

LJUSNARSBERGSGRUVAN I KOPPARBERG

Christer Langner, Elverkschef

Kjell Windelhed har under sitt föredrag beskrivit hur Ljusnarsbergsgruvan ser ut och hur gruvan ingår som säsongslager för energi i det system med värmepumpar m.m. som planeras för Kopparberg. Jag kommer inte att vidare gå in på projektets tekniska uppbyggnad, principer etc. utan kommer i stället att lämna en allmän beskrivning över de försök som har genomförts under sommaren 1982, ^{de} problem som vi har stött på och vilka konsekvenser som detta har fått för projektet.

Enligt den ursprungliga planen för projektet skulle gruvan laddas under sommaren 1982 med hjälp av värmepumpar. Försöket kom i slutligt utförande att genomföras så att åvatten tillfördes gruvan och gruvvatten utpumpades från botten på gruvan. Syftet var att dels fastlägga att strömningsvägarna i gruvan var de förväntade, dels att få en första indikation på värmeförlusterna i gruvan samt att kontrollera gruvans täthet. Försöket skulle genomföras under tidsperioden juli - september då åvattentemperaturen var som högst.

För att möjliggöra försöket utfördes under juni månad vissa installationer av pumpar och rörledningar dels i själva gruvan dels mellan gruvan och ån - en sträcka på c:a 300 meter. Installationen i gruvan tillhör den "permanenta" installationen och skall ingå i det slutgiltiga systemet medan åvattenledningen är provisorisk. Installationen i gruvan är synnerligen enkel och består av ett rör om ca 340 meter till gruvans botten och ett om ca 30 meter från gruvans topp. Detta arbete gick att genomföra utan större problem, montagetiden uppgick till ca 1 månad. Den totala kostnaden för dessa arbeten inkl. drift uppgår till knappt 0.6 Mkr.

I ett tidigare skede hade Länsstyrelsens Naturvårdsenhet kontaktats och gett klartecken till vattenbytet i gruvan under förutsättning att kraftverksägarna i vattendraget (ån) garanterade en viss minimivattenföring och att kalkning skulle ske för att motverka eventuellt negativa effekter från det utpumpade gruvvattnet. Löpande kontroll av åvattnet skulle även utföras.

En uppgörelse om en 15-årig nyttjanderätt av gruvan hade också träffats under

hand, mellan Boliden Mineral och Ljusnarsbergs kommun. Gruvan uppläts kostnadsfritt.

Pumpningens första fas påbörjades den 6 juli 1982 och pågick till den 2 augusti. Under denna tid höjdes vattennivån från ca 60 m till ca 30 m under markytan. Den inpumpade volymen var ca 50.000 m³ vilket var betydligt mer än vad som förväntats.

I mitten på juli månad inträffade en incident i form av ett ras av ett igenfyllt schakt, det s.k. Bondschaktet som är beläget ca 50 meter från det s.k. Gustavsschaktet där pumpningen pågick. Schaktet som varit fyllt med lösa massor bildade en krater med ca 30 m djup och ca 10 m i diameter. Enligt vissa teorier kan raset ha förorsakats av att de lösa massorna i schaktets botten blivit underminerade av den alltmer stigande vattennivån i gruvan. Raset medförde inga skador på person eller egendom.

Den 2 augusti påbörjades pumpningens andra fas med utpumpning av vatten från gruvans botten samtidigt som varmt åvatten om ca 20⁰ fylldes på i gruvans topp. Temperaturen på utpumpat vatten var ca 6⁰ och flödet var ca 90 m³ / tim. Pumpningen pågick t.o.m. 20 augusti då naturvårdsverket vid vite förbjöd vidare utpumpning av gruvvatten. Naturvårdsverkets agerande synes ha skett helt utifrån principiella ställningstaganden. Några toxiska effekter på miljön från det utpumpade gruvvattnet har ej kunnat skönjas. Höjningen av graden metallsalter i de vattenprover som tagits från ån anses inrymmas inom felmarginalerna för mätmetoden. Analyser^{vna} utfördes av VVL i Stockholm.

Så länge som pumpningen pågick registrerades dagligen vattentemperaturer på olika nivåer i Gustavsschaktet till vilket det varma vattnet tillfördes. Under hela provperioden tillfördes lagret en energimängd om ca 1.600 MWh. Temperaturmätning sker f.n. 1 gång i veckan.

I samband med liknande projekt har man att beakta bl.a. följande frågeställningar:

Nyttjanderätten till gruvan. För Ljusnarsbergsgruvan innebar detta ej några större problem. Detta torde bero på traditionen av mångårigt nära samarbete mellan kommunen respektive gruvrättsinnehavaren. Sannolikt har detta ömsesidiga beroendeförhållande flera paralleller, varför liknande uppgörelser

torde gå att uppnå för liknande projekt.

Vattenkemifrågor bör studeras. Beroende på typ av gruva får vattenkemin med hänsyn till miljöfaktorer och korrosionssynpunkter utredas för varje särskilt fall.

Gruvans täthet. Inga påvisbara problem hittills.

Volymbestämmning av gruvan kan vara svår. För Ljusnarsbergsgruvan kunde konstateras att vattenvolymen är betydligt större än vad som tidigare beräknats. Den maximala lagringstemperaturen har därför sänkts från 55^o till 35^o (lågtemperaturlager).

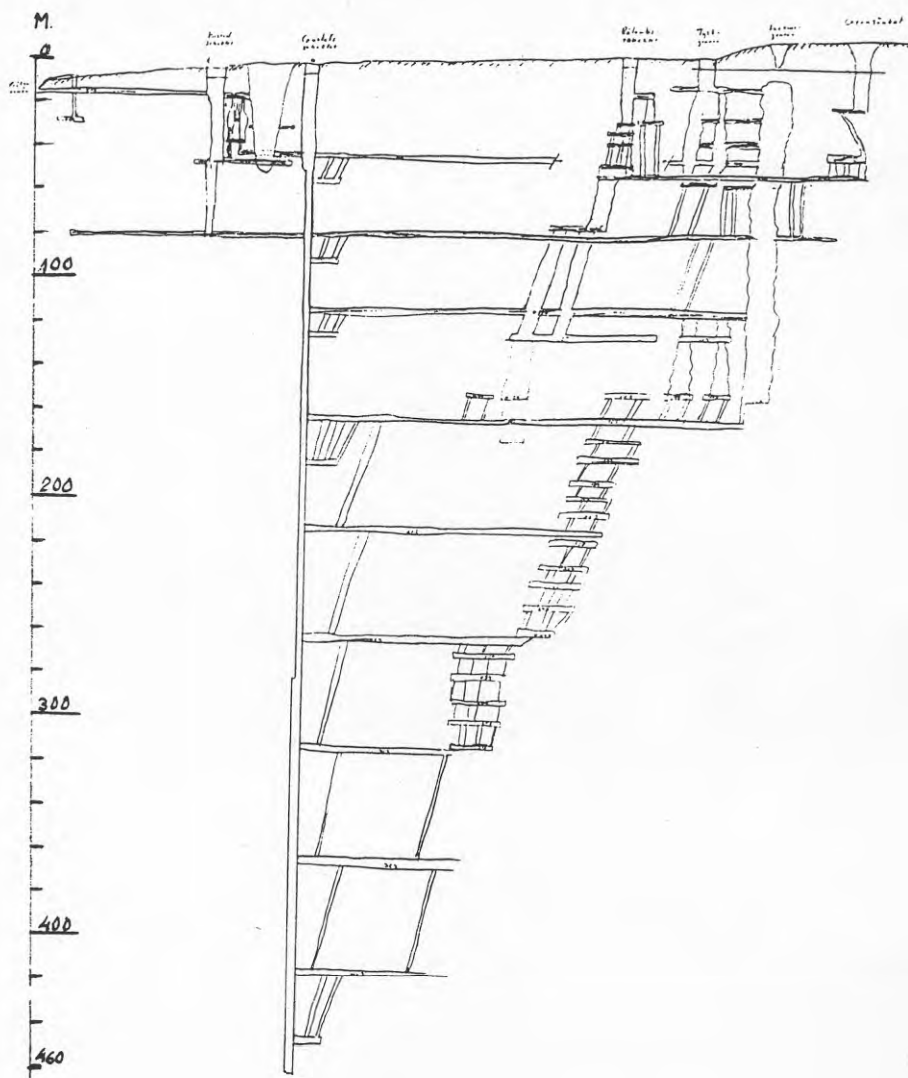
Irreversibla förluster genom avdunstningsförluster från gruvans vattenyta. Dessa förluster torde dock vara små i gruvor där man utnyttjat modern gruvbrytningsteknik.

Rasrisker från dåligt igenfyllda schakt.

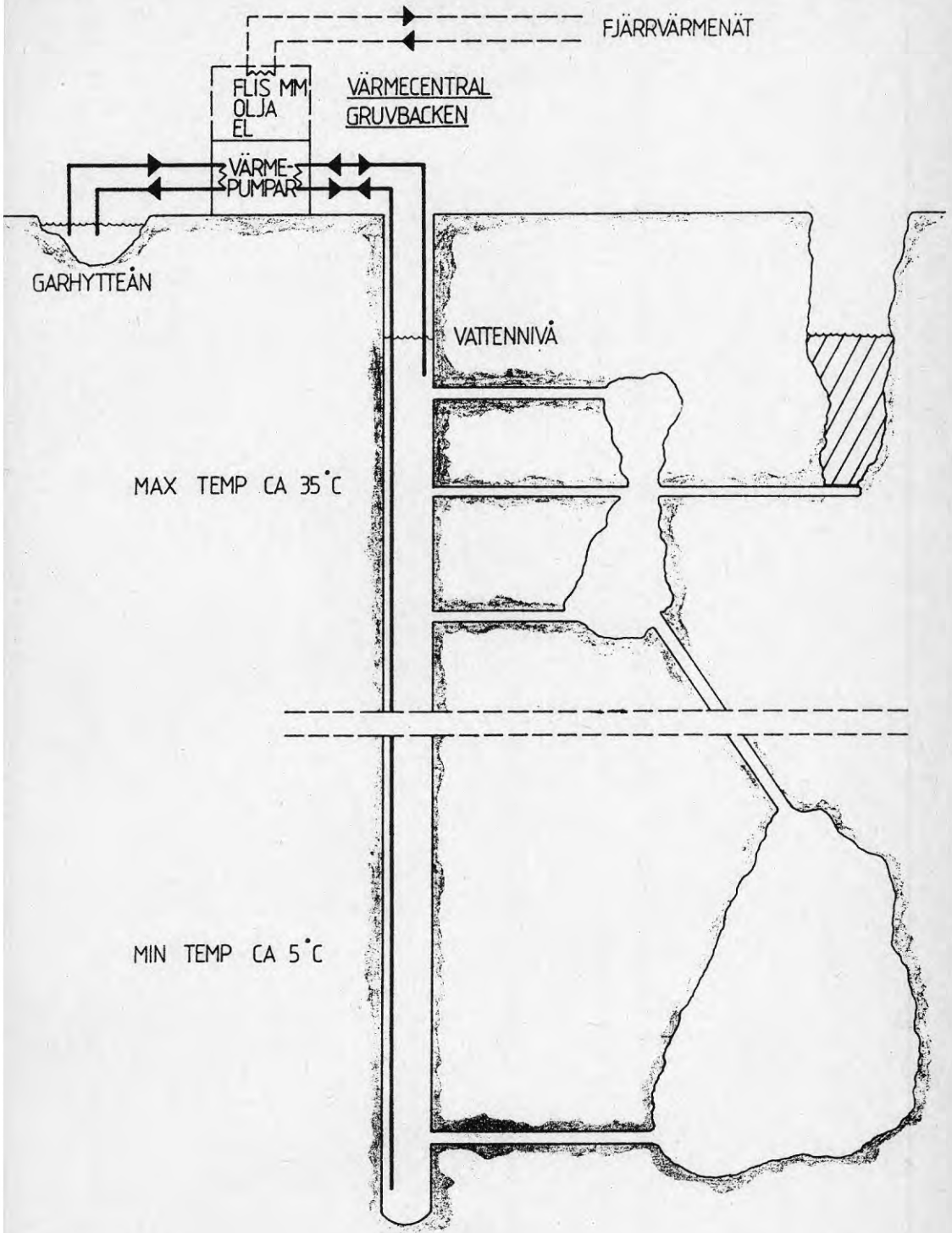
Sammanfattningsvis kan konstateras att lagring av energi i nedlagda gruvor bör ske vid relativt låga temperaturer dvs. < 55^o. Tekniken bör även vara tillämpbar på andra utnyttjade bergrum såsom tunnlar, f.d. skyddsrum, f.d. oljelager och liknande utrymmen (såväl inom som utom landet).

Att återanvända tidigare ursprängda bergrum innebär ett dubbelutnyttjande av gjorda investeringar. Kostnaderna för erforderliga installationer i gruvan kan också hållas låga. För Ljusnarsbergsgruvan innebär detta en kostnad exkl. VP på ca 0.10 kr/ lagrad årskilovattimme. De låga investeringskostnaderna kan medföra att man vid acceptabel verkningsgrad kan tillåta sig relativt korta avskrivningstider på projekten. Bergrummet behöver därför ej nödvändigtvis vara låst som värmelager under "hela sin livstid."

LJUSNARBERGSGRUVAN



PRINCIP FÖR GRUVVÄRMELAGRING I KOPPARBERG



BORRHÅLSLAGER

Föredrag vid lagringsseminariet 1-2 december 1982
hållt av Sören Andersson, Allmänna Ingenjörbyrå AB,
Stockholm.

1. ORIENTERING

1.1 Funktion och tillämplighet

Borrhålslagret fig 1, är i första hand lämpligt för säsongslagring. Eftersom konstgjorda värmeisoleringar saknas, utom möjligen mot markytan, måste lagret ha en stor volym för att uppnå en acceptabel verkningsgrad. En minsta volym torde vara av storleksordningen några hundratusen m³. Ett borrhålslager är dock relativt enkelt att bygga ut och storleken kan således succesivt anpassas till ett växande behov.

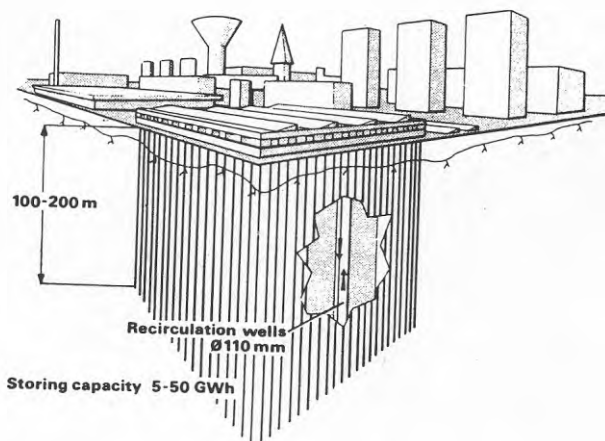


Fig 1. Borrhålslager. Principskiss.

Eftersom borrhålslagrets funktion huvudsakligen bygger på värmeledning i berget är lagret värmetrögt i jämförelse med t ex vattenfyllt bergrum. Lagertypen är därför mest lämplig för lagringscykler där laddning - uttag sker utan alltför stora svängningar runt avsedda medelvärden.

En tät borrhålsplacering medger dock ett optimalt utnyttjande även vid kortare lagringscykler.

Borrhåslagrets arbetstemperaturområde är egentligen ej begränsat, men har normalt förutsatts ligga inom intervallet 10 - 90°C. Temperaturer över 100°C förutsätter tryckavtätade, alternativt igengjutna, borrhål och dessutom en tillräckligt stor bergtäckning för att balansera ångtrycket.

Ett borrhåslager kan generellt anläggas var som helst i svensk kristallin berggrund. Det förhållande att tätorter ofta är belägna i områden med stora, täckande jorddjup torde inte innebära någon större begränsning från anläggningssynpunkt. Vid kommersiellt utnyttjande har lagret en sådan storlek att totalkostnaden bör kunna belastas med de anslutningskostnader som uppstår vid förläggning av lagret på optimal plats.

Miljömässigt torde ett borrhåslager innebära en mindre störning än många andra lagertyper.

1.2 Kostnader

Hittills genomförda studier indikerar att borrhåslagret såväl tekniskt som kostnadsmässigt utgör ett mycket intressant alternativ till andra lagertyper.

Konkreta erfarenhetsvärden saknas eftersom ännu inget borrhåslager av någon nämnvärd storlek utförts. Enligt en i studien "Borrhåslager i berg för säsongslagring av värme", R66:1981, genomförd kostnadsanalys för ett lager med kapaciteten 32 GWh, har anläggningkostnaden beräknats till 1.1 kr/kWh med en fördelning enligt fig 2.

100 %	Totalkostnad	35 Mkr
12 %	Projektering m m	4 Mkr
31 %	Värmepumpar 3 x 2.8 MW	11 Mkr
31 %	Rörinst. + värmeväxlare, styr- o reglersystem etc	11 Mkr
26 %	Markarbeten + borrhning 560 hål, diam 150 mm, djup 100 m.	9 Mkr

Fig 2. Borrhåslager. Exempel på kostnadsfördelning. Lagerkapacitet 32 GWh. (R66:1981)

Ovan angivna kostnadsfördelning skall endast ses som en exemplifiering. Beroende på såväl lagrets interna cirkulationssystem som på det värmesystem som lagret skall ingå i, torde relativt stora avvikelser från den i fig 2 redovisade fördelningen kunna erhållas.

2. UTVECKLINGSLÄGE

2.1 Allmänt

Ett borrhålslager kan byggas med känd och i stor utsträckning även beprövad teknik. Ett omfattande teoretiskt underlag finns tillgängligt i form av analyser och datormodeller utvecklade vid i första hand tekniska högskolan i Lund. I samband med borrhålslagerstudierna för Södertuna och Luleå har datorprogrammen kompletterats med grafiska rutiner så att 'tredimensionella', diagram kan erhållas, utvisande t ex temperaturförhållandena som funktion av tiden i och utanför lagret. Denna redovisningsteknik har underlättat förståelsen för de många gånger komplexa värmetekniska förloppen, t ex vid stratifierad lagring.

Med undantag för försökslagren i Sigtuna (42 hål, diam 102 mm, djup ca 20 m) och Luleå (19 hål, diam 52 mm, djup 19 m) har ännu inget borrhålslager byggts.

Det första borrhålslagret av någorlunda representativ storlek byggs för närvarande i Luleå (120 hål, diam 150 mm, djup 65 m). Lagret kommer att tas i drift sommaren 1983 och kommer att studeras inom ett flerårigt uppföljnings- och utvärderingsprojekt.

Konkreta erfarenheter från anläggande och drift av borrhålslager föreligger således endast i begränsad omfattning. Det är därför naturligt att viss osäkerhet råder avseende arbetsmetoder, parameterintervall, utformning av delsystem etc. I det följande diskuteras översiktligt de huvudområden där p g a olika problemställningar ett fortsatt utvecklingsarbete och/eller erfarenhetsåterföring synes angeläget.

2.2 Borrningsteknik och foderrör

Vid djupa borrhålslager kan hålens rakhet, eller rättare deras parallellitet, ha betydelse för ett optimalt utnyttjande av den perforerade bergvolymen. Med normal sänkhammarbörning kan avvikelser på flera meter från lodlinjen erhållas redan vid borrhålsdjup mindre än 100 m. Förhållandet kan exemplifieras med en av de precisionsuppmätningar som gjorts vid de tre 100 m djupa försökshålen i Älvkarleby, fig 3. Redovisade avvikelser är representativa för alla tre försökshålen.

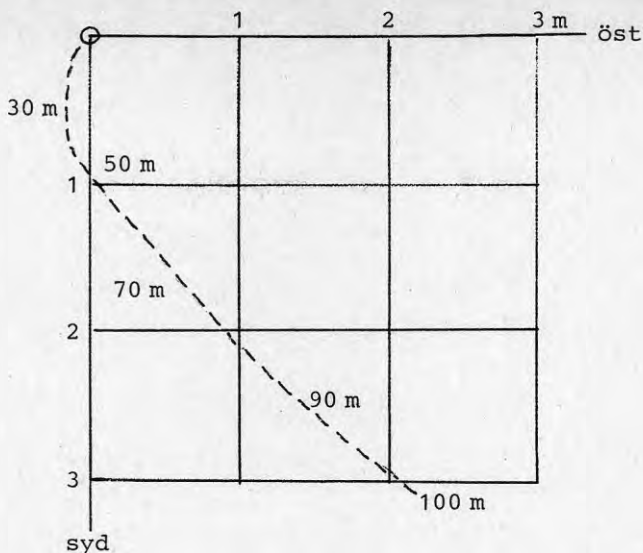


Fig 3. Sidoavvikelse från lodlinjen genom borrhålets ansättningspunkt. Håldiameter 165 mm.

Det synes angeläget att utveckla borrhållstekniken så att man utan nämnvärd merkostnad kan borra raka hål, även vid djup på 100 m eller mer.

Vid cirkulationssystem, där borrhålen ej igengjutes, måste forderrören genom jordtäcket skyddas mot korrosion. Utvändigt kan detta enkelt ske med hjälp av katodiskt skydd. Invändigt är det mer problematiskt p g a de i foderröret insatta cirkulationsrören. Plaströr är vid stora, täckande jorddjup alltför ömtåliga med hänsyn till den kraftiga mekaniska påverkan de utsätts för såväl vid neddrivning som vid den efterföljande bergborrningen.

2.3 Grundvattenströmning

Bergets permeabilitet kan bestämmas genom provtryckning och vattenförlustmätning redan i de undersökningshål som görs i samband med lagrets lokalisering. Den hydrauliska gradienten kan mätas eller uppskattas varefter den genom lagervolymer strömmande grundvattenmängden kan bestämmas. Ett stort antal genomförda permeabilitetsmätningar på olika platser och djup och i olika slags berggrund indikerar att den naturliga grundvattenströmningen ej innebär något större problem för ett borrhållslager. Efter cyklisk uppvärmning - avsvälning av lagret uppstår dock troligen förändringar

i spricksystemet. Eventuellt uppstår nya sprickor och kommunikationsvägar. Det kan antas att denna inverkan i första hand berör själva lagervolymen och således ej innebär ökad genomströmning genom lagret.

En ökad genomströmning av spricksystemet inom lagret förbättrar vid parallellkopplade borrhål lagrets funktion. Vid stratifierad lagring, seriekopplade borrhål, tenderar däremot en intern grundvattenrörelse att flacka ut temperaturkurvorna. Härav följer också att en avsiktligt genomförd uppspräckning av bergmassan inom lagret endast har positiv inverkan vid icke stratifierad lagring.

2.4 Värmeöverföring fluid - berg

Utformningen av borrhålslagrets cirkulationssystem är av avgörande betydelse för värmeöverföringsförmågan mellan cirkulerande fluid och omgivande berg. Ett stort antal systemlösningar kan tänkas, såväl av sluten som öppen typ. Några exempel framgår av fig 4.

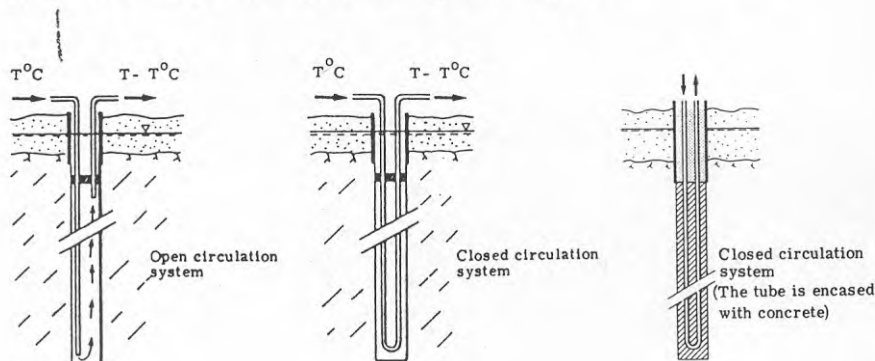


Fig 4. Cirkulationssystem. Principskisser

Vid öppna system, då fluiden strömmar i direkt kontakt med bergytan i borrhålet kan värmeövergången relativt säkert beräknas utgående från rådande strömningskarakteristika. Vid ett slutet system, då ett U-rör eller annan ledare är omgiven av i princip stillastående vatten är beräkningen av värmeöverföringen mer osäker. Svårbedömda konvektionsströmmar och konvektionsceller i den mycket långa vattenpelaren har stor inverkan på systemets värmeöverföringsförmåga. Tillämpliga erfarenhetsvärden saknas till stor del.

Dimensionering av cirkulationssystemet måste i vissa fall utföras så att termisk kortslutning undviks. Detta kan ske genom att den ena ledaren utföres med viss termisk isolering.

2.5 Hålavstånd

Avståndet mellan borrhålen är av stor betydelse dels för lagrets värmetekniska funktion, dels för anläggningskostnaden. Parameterstudier visar att något entydigt, optimalt borrhålsavstånd ej kan fastställas. Olika optimala värden erhålles beroende på t ex val av driftstrategi och inbördes värdering av energi- resp temperaturverkningsgrad.

Optimeringskurvorna är emellertid för samtliga fall ganska flacka med optimun vid borrhålsavstånd på 3 å 6 m.

2.6 Kemiska utfällningar

Förutom resultat från begränsade fält- och laboriemätningar i samband med korttidssimulering av fem års-cykler i det lilla försökslagret i Luleå saknas erfarenheter av kemiska utlösningar och utfällningar vid drift av borrhålslager.

Förhållandena vid ett öppet cirkulationssystem kan möjligen liknas vid de som gäller för öppet berggrum. En jämförelse mellan ett berggrum på 100 000 m³ och ett borrhålslager på 200 000 m³ (som vid samma temperatursving har ungefär samma lagringskapacitet) visar att

- den bergyta som i ett borrhålslager är i direkt kontakt med vatten är endast 30 % av motsvarande yta i ett öppet berggrum
- den i ett borrhålslager (med öppet system) cirkulerande vattenvolym är endast ca 0,2 % av vattenvolymen i ett motsvarande, öppet berggrum
- förhållandet bergkontaktyta/vattenvolym är för ett borrhålslager ca 130 ggr större än för ett öppet berggrum.

Några slutsatser med ledning av ovanstående är dock ej självklara. De vattenkemiska frågorna bör därför noggrant studeras vid kommande projekt.

För ett borrhålslager med slutet cirkulationssystem, t ex U-rör, kan risk finnas för beläggningar på U-rören som märkbart försämrar värmeöverföringsförmågan.

2.7 Driftstrategi

Ett borrhålslager kan konstrueras för olika driftstrategier. Exempel på sådana strategier kan vara parallellkopplade borrhål (dvs i stort sett samma temperatur i hela lagret), seriekopplade borrhål (varvid kontinuerligt stratifierad lagring kan erhållas), zoner med inom varje zon parallellkopplade borrhål etc.

Ett stratifierat lager, där temperaturen normalt är högst i lagrets mitt, får en högre verkningsgrad än ett icke stratifierat. Stora, stratifierade lager medger även vissa möjligheter att vid varje tillfälle ladda eller uttaga värme i de delar av lagret som erbjuder de bästa mottagnings- eller uttagsförhållandena.

Temperaturstratifieringen i ett borrhålslager kan förstärkas genom intern värmepumpning, varigenom lagrets värmeförluster kan minimeras samtidigt som lagret under längre tid kan bibehålla en kall zon. En sådan kall zon möjliggör exempelvis direkt inlagring av kortvariga solvärmepulser med hög effekt. Borrhålslager avsedda för lagring av solvärme torde dock komma att förses med bufferttankar för effektutjämning.

BFRs EXPERTSEMINARIUM OM HÖGTEMPERATURLAGRING I
MARK OCH VATTEN

Göteborg, 1 - 2 december 1982

BORRHÅLSLAGER

Peter Margen, Studsvik Energiteknik AB

Historik

Borrhålslager är en variant av djupa marklager med vertikala kylkanaler. Denna typ av lager föreslogs av Ove Platell (Sunstore KB) under första hälften av 70-talet, då han även lade grunden till den teoretiska dimensioneringsfilosofin.

På senare tid har intresset i djupa marklager ökat starkt så att idag ett halvt dussin grupper bearbetar olika aspekter. Det ökade intresset visar att alltfler har upptäckt den goda ekonomi som denna typ av lager erbjuder när det gäller långtidslagring.

Varför är borrhålslager ekonomiskt intressanta?

Figur 1 visar varför ekonomin blir god. Ett borrhål med kylkanal och uppsamlingsledning kostar omkring 140 kr/m. Beroende på avståndet mellan kanalerna - 3.5 à 4 m - som väljs som funktion av tillgänglig laddnings- och urladdningstid - värms och kyls 3.5^2 à $4^2 = 12$ à 16 m^3 berg per m kanal.

Sålunda blir kostnaden av lagret per m^3 mellan 140/12 och 140/16 = 12 à 9 kr/ m^3 . Även om i praktiken andra poster måste läggas till för projektering, värmeväxlare, anslutningsledningar, ränta under byggnadstiden m m, kan man ofta få en total kostnad på 15 à 20 kr/ m^3 för ett högtemperaturutförande, något lägre för ett lågtemperaturutförande. Dessa kostnader är mycket låga jämfört med andra lagertyper, även när de uttrycks per kWh/år lagrad energi.

Dock bör observeras att borrhålslagret såsom det hittills föreslagits är termiskt trögt, dvs kan i huvudsak användas för långtidslagring. Är uppgiften att korttidslagra måste kanalerna läggas så nära varandra att lagret blir dyrare än konkurrerande typer.

Tekniskt underlag

Figur 2 visar en del projekt som ger underlag för denna lagertyp. Det första är Sigtunalagret på 10 000 m^3 som nu varit i drift under 4 år. Såsom Figur 3 visar stämmer beräkningsresultaten och mätresultaten väl överens.

Luleålagret är intressant eftersom det kommer att visa driften vid relativt hög temperatur (70°C) och Stora Skuggan genom att det bl a demonstrerar en mycket billig kanalkonstruktion.

Mera grundläggande egenskaper demonstreras genom kanalförsöken i Studsvik, Stora Skuggan samt vid Älvkarleby.

Även demonstrationsprojekten för bergrum (Avesta och Lyckebo) har direkt intresse genom att de bl a

belyser de vattenkemiska frågorna, beläggning av värmväxlarytor m m.

I princip finns genom alla dessa projekt underlag för att åta sig byggandet av borrhålslager. Dock finns givetvis kvar önskemål om att ytterligare förbättra prestanda och sänka de specifika kostnaderna.

Vidareutvecklingsbehovet

Inom Studsvik och Sunstore KB har vi av denna anledning ägnat bl a följande frågor intresse:

- 1) att minska värmeöverföringsmotståndet mellan det strömmande vattnet och borrhålsväggen. I vår konstruktion för Göteborg har t ex detta åstadkommit genom att ordna en mycket tunn vattenspalt mellan ledröret och borrhålsväggen. Eftersom vattnet har låg hastighet och sålunda laminär strömningsbild bidrar den smala spalten väsentligt till minskningen av motståndet jämfört med t ex den mycket breda spalten för Luleålagret.
- 2) För att dels lämna markytan orörd (så att lagret även kan anläggas under befintlig bebyggelse eller naturskyddad miljö), dels kunna utnyttja lagret även för korttidslagring har vi i Göteborgskonstruktionen förutsatt tunnlar under grundvattennivån från vilka borrhålen borrar. Tunnelarna är vattenfyllda i normal drift och tjänstgör sålunda som korttidslager. Dessutom undviks behovet att penetrera ett ytlager av jord och dåligt berg, vilket undviker kostnaden för foderrör och minskar kostnaden för borrhning.

- 3) Vi har utgått ifrån flexibla led rör av temperaturbeständig plast som kan levereras i rullar av full längd. Detta leder till en mycket kort installationstid av kanalen jämfört med styva led rör som måste skarvas (ofta svetsas) på platsen. Jämfört med led rör av stål undviks dessutom korrosionsproblemet. Dessa drag illustreras av Figur 4.

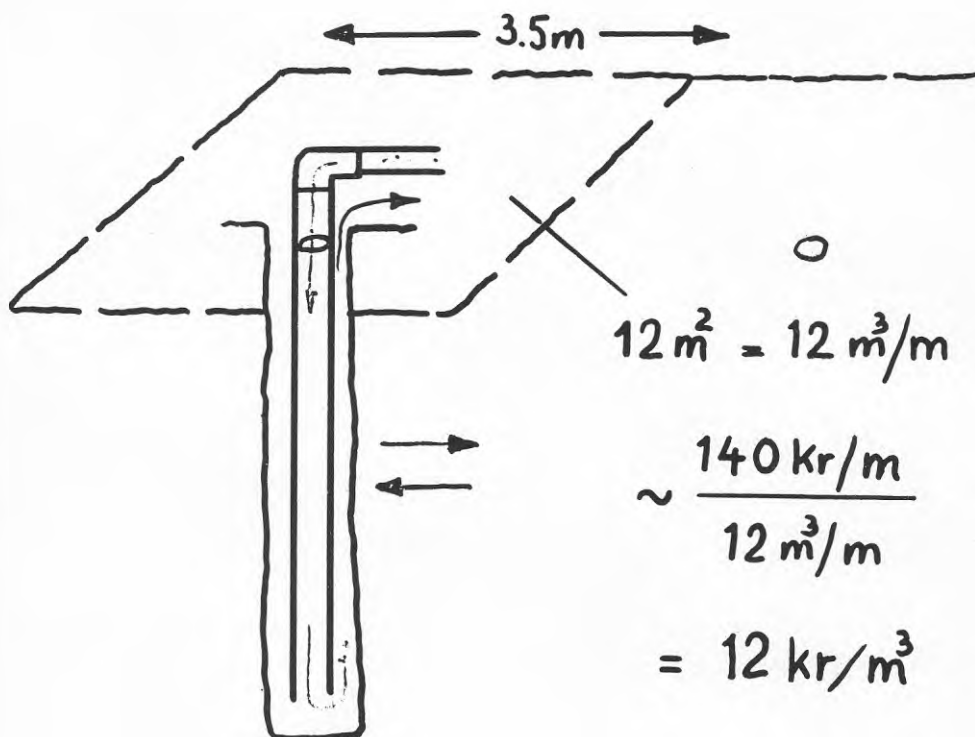
Ekonomiska jämförelser

Första dagen jämfördes kostnaderna av detta borrhålslager med kostnaderna för vattenfyllda bergrum och blockfyllda bergrum för Göteborgsprojektet. Många kan ha blivit förvånade över att man ej kom fram till större kostnadsskillnader. Orsaken är dock helt enkelt den att de tre lagren ej jämfördes för samma laddnings- och urladdningsförhållanden. Borrhålslagret hade en specifik kostnad per m^3 som var ca en faktor 6 lägre av det vattenfyllda bergrummet och ca en faktor 4 lägre än det blockfyllda bergrummet. Visserligen har vatten högre specifik värme per m^3 än berg, men även när man korrigerar för detta får borrhålslagret, om samtliga lager laddas med vatten av samma temperatur (t ex $104^{\circ}C$) och urladdas med vatten av samma temperatur (t ex $48^{\circ}C$), en specifik kostnad per kWh årligen urladdad energi som är en faktor 3 resp 2 lägre än kostnaden för det vattenfyllda resp blockfyllda bergrummet. Detta kom inte fram i jämförelsen eftersom bergrumsalternativet antagit en temperatur på ca $120^{\circ}C$ för laddning och 5° för urladdning, sålunda mera än dubbelt så stort temperatursvinn än för borrhålslagret.

Sammanfattningsvis får konstateras att borrhålslagret torde vara den idealiska lösningen för prob-

lemet att långtidslagra värme. Genom kompletteringen med vattenfyllda tunnlar som bara behöver uppta ca 3 % av lagrets volym kan man dessutom få bra korttidslagringssegenskaper som ett komplement. Behöver man dock bara korttidslagra energi, då skall man välja annan lagertyp.

BORRHALLSLAGER - SMA, BILLIGA
INGREPP I BERGET



Figur 1.

ERFARENHETER BORRHÅLSLAGER

		I drift:		
Sigtuna	10 000 m ³	1978		Goda drifterfarenheter
Luleå 1	några 100 m ³	1981		Oinklädda kanaler ca 40°C
Luleå 2	100 000 m ³	1983		Oinklädda kanaler ca 70°C
Stora Skuggan	180 000 m ³	1984		ca 12 kr/m ³
Studsvik	} Enskilda kanaler		} försök	
Stora Skuggan				
Älvkarleby				
Avesta	15 000 m ³	våren 1982	} Bergrum; vattenkemi	
Lyckebo	100 000 m ³	vintern 1982/83		

Figur 2.

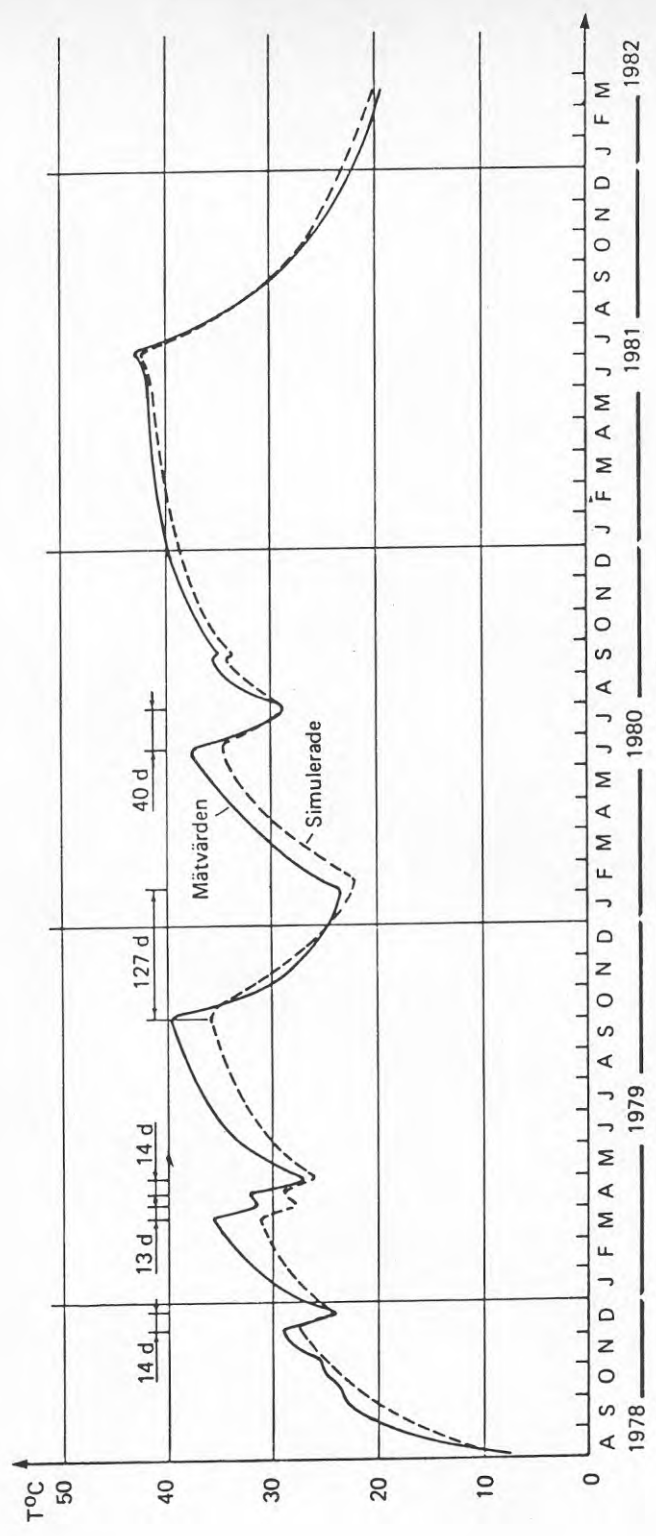
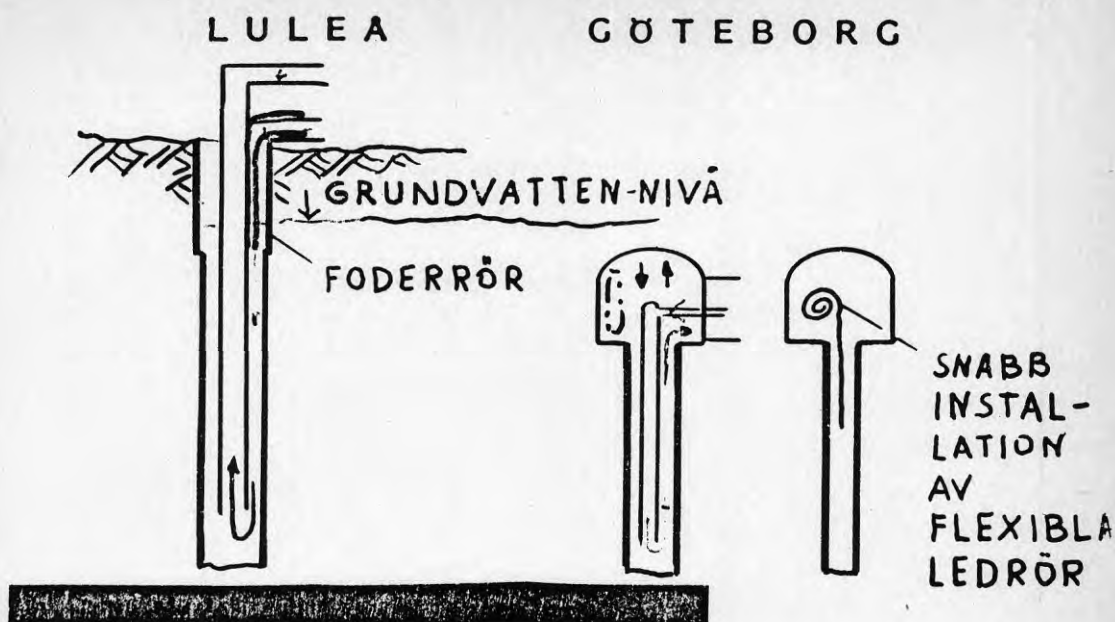


Figure 3.

Temperaturen i Sigtuna borrhållslager på en central axel 16.5 m under marknivån



- ① INGEN PÅVERKAN OVAN MARK (X)
- ② INGEN FODERKOSTNAD FÖR ÖVRE SKIKT &
LÅGRE BORRNINGSKOSTNAD
- ③ TUNNEL = RETURLEDNING
- ④ TUNNEL = KORTTIDSLAGER (4)

EXTRA TUNNEL KOSTNAD

MEN

BARA 3/8 AV VOLYMEN

Figur 4.

TEORI OCH BERÄKNINGAR:

TERMISKA ANALYSER

Johan Claesson

Byggnadsteknik, matematisk fysik, LTH, Lund

Analys, datormodeller, problem och forskningsuppgifter rörande de termiska förloppen i marken i och kring ett markvärmelager skall här översiktligt behandlas. Översikten gäller även i stort för lågtemperaturvärmelager.

I DATORMODELLER

Hos oss i Lund har följande datormodeller för markvärmelager utvecklats.

1. Duct Storage Model

Denna modell är tillämpbar på borrhålslager i berg och på lerlager med ett slangsystem. Andra typer där man har ett regelbundet kanalsystem i marken täcks också. Modellen arbetar med en "global" temperaturfördelning och överlagrade lokala lösningar runt kanalerna. För värmebärarfluiden i kanalerna finns en successiv energibalans genom ett godtyckligt antal delområden i värmelagret. En lokal analytisk lösning för att ta hand om värmeöverföring mellan kanaler och mark utnyttjas också.

2. Stratified Storage Temperature Model

Denna modell är tillämpbar på bergrum, tankar och gropar som är fyllda med vatten eller med en blandning av vatten och sten. Temperaturen i vattentanken är stratifierad med varmest vatten längst upp.

3. Aquifer Storage Model

Modellen förutsätter givna, geometriskt förhållandevis enkla vattenflöden, medan temperaturförloppet är tredimensionellt. Grundversionen avser radiellt, tidsvariabelt flöde kring en brunn. En annan version avser ett brunnspar, där vattenflödet är av "dipol-karaktär".

4. Superposition Bore-Hole Model

Denna modell kan användas för en eller flera bergvärmebrunnar, där vattencirkulationen är sluten. Utanför brunnarna råder ren värmeledning. Modellen kan också användas för en "exakt" simulering för ett borrhålsvärmelager.

Gemensamt för alla modellerna är att inmatningstemperatur och vattencirkulation är godtyckligt tidsvariabla. Modellerna ger temperatur på det vatten som lämnar lagret. Programmen är förhållandevis snabba. En simulering med 500 noder kräver runt 3 - 60 sekunder för en årscykel (UNIVAC 1108).

Inom ramen för ett IEA-samarbete om stora solvärmecentraler används programmen som subprogram till en modell för hela energisystemet (TRNSYS) och till en optimeringsmodell (MINSUN). Detta arbete pågår i samarbete med Studsvik.

II SIMULERING AV FÄLTFÖRSÖK

Beräkningsmodellerna har testats mot några fältförsök och laboratorieexperiment. Dessa är:

- a. Blockfyllt berggrum, Geoteknik, Chalmers
- b. Vattentank. Ingelstad
- c. Sprickakvifer, Landskrona
- d. Akvifervärmelager, Auburn, USA
- e. Borrhålslager, Porsön, Luleå

Överensstämmelsen mellan beräkning och mätning har genomgående varit god. Vi har därför gott förtroende för beräkningsmodellerna så länge de används inom ramarna för sina givna förutsättningar.

III ANALYTISKA STUDIER. TERMISKA ANALYSER

Under de senaste åren har många delproblem analyserats och lösts. En lista över de viktigaste ges nedan. För närmare information hänvisas till matematisk fysik, LTH, Lund.

Miljöpåverkan. Temperaturstörning nära markytan.

Stationär värmeförlust från värmelager.

Periodiska förlopp.

Transient temperaturuppbyggnad.

Steady-flux analys för borrhålslager (heat-transfer length).

Blockfyllt bergum; makrodispersion.

Parameterstudier för värmeförlust i akviferlager.

Parameterstudier för räckvidd vid återinjektering av grundvatten.

Analytiska formler för tunn akvifer på stort och på litet djup.

Break-through time.

Densitetsflöden och frontkantringstakt i akvifer.

Energibrunn: Formel för möjligt värmeuttag. Pulsanalyser.

Influens mellan brunnar.

IV SPECIELLA PROBLEM. FORSKNINGSBEHOV

Följande speciella problem kräver vidare forskningsinsatser:

- Borrhålslager. 1. Styrd temperaturstratifiering med olika temperaturzoner.
2. Lokal värmeöverföring fluid-mark.
- Akvifer. 1. Temperaturspridning, värmeförluster p g a inhomogeniteter (skiktad akvifer, linser). Här krävs teori, laboratorieförsök och fälterfarenheter.
2. Utveckling av termiska modeller för komplicerade brunnskonfigurationer.
3. Termohydrauliska analyser: Upconing, downconing. Stabilisering av termisk front med motpumpning.
- Bergum. 1. Temperaturstratifiering.
2. Temperaturspridning i blockfyllda bergum.
- Miljöpåverkan. Grundvattentemperaturer, temperaturstörningar nära markytan.

Värmeförluster p g a yttre grundvattenflöden.

Korttidstester i fältanläggningar för bestämning av parametrar.

V SAMMANFATTNING

Forskningsläget rörande de termiska förloppen i markvärmelager är tillfredsställande. Analysmetoder och utveckling av beräkningsmodeller torde ligga väl framme relativt fältförsök, förstudier och projektering. Det är angeläget att de många fältförsöken följs och dokumenteras ordentligt. En viktig uppgift är att få en bättre och mer lättillgänglig redovisning av analysmetoder, användning av beräkningsprogram och praktiska fälterfarenheter. Slutligen erfordras enligt listan ovan vidare insatser för vissa delproblem. På det teoretiska området behövs därför en fortsatt insats på ungefär nuvarande nivå under de närmaste åren då många fältförsök pågår.

Forskningsbehoven kan sammanfattas i följande tre punkter:

1. Uppföljning av fältförsök
2. Dokumentation av beräkningsmodeller, analyser av fälterfarenheter.
3. Specifika insatser för vissa delproblem.
Exempel: Inhomogeniteter i akviferer, metodik för korttidstester i fältanläggningar.

ERFARENHETER VUNNA INOM AVESTAPROJEKTET FRAM TILL
ÅRSSKIFTET 1982-1983

Inledning

Hetvattenlagret i Avesta är som bekant en ren forskningsanläggning och det forskningsprogram som fastställdes speglar främst de projektansvarigas farhågor rörande möjliga hot mot lagrets funktion.

Principen för hetvattenlagring sådan den studeras i Avesta, vilken beskrivits tidigare i denna skrift, är att lagra hetvatten i oinklädda bergrum. Hetvattnet, vilket ingår i ett konventionellt fjärrvärmesystem, har en temperatur som pendlar mellan 70 °C-115 °C med en periodtid av en vecka. Vid laddning tillförs hetvattnet via en värmeväxlare till lagrets övre del och omvänt, vid urladdning bortförs hetvattnet via samma värmeväxlare från lagrets övre del. Principen bygger således på ett antal förutsättningar, vilka studeras inom det pågående forskningsprogrammet. Dessa förutsättningar är

1. De relativa värmeförlusterna är små.
2. Det heta vattnet som tillförs i lagrets topp kommer att flyta ovanpå det kallare och temperatursprångskiktet dessa vattenmängder emellan förblir någorlunda tunt.
3. Deponering av lösta bergmineral i värmeväxlarna med försämrad funktionsduglighet för värmeväxlarna som följd får inte gå för snabbt.
4. Bergrummets väggar och tak får inte undergå fortskridande deformationer, med åtföljande rasrisk, till följd av den pulserande temperaturbelastningen.
5. Temperaturhöjningen i marken får inte ha menlig inverkan på växtligheten ovanpå lagret.

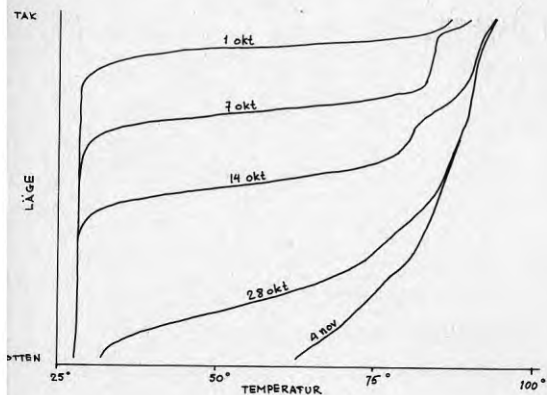
Förutsättningarna 1-5 ovan är identiska med de forskningsområden som fastlagts. Den första av dessa punkter är inte uppfylld, vilket varit bekant redan under anläggningens planering. Skälet till detta är att bergrumsvolymen ($15\ 000\ m^3$) är för liten. Den femte punkten kommer inte att undersökas eftersom Avesta kommun ämnar att bygga en torvhanteringsanläggning rakt ovanpå lagret. För de tre återstående punkterna (2-4) finns f n (december 1982) preliminära resultat.

Preliminära resultat

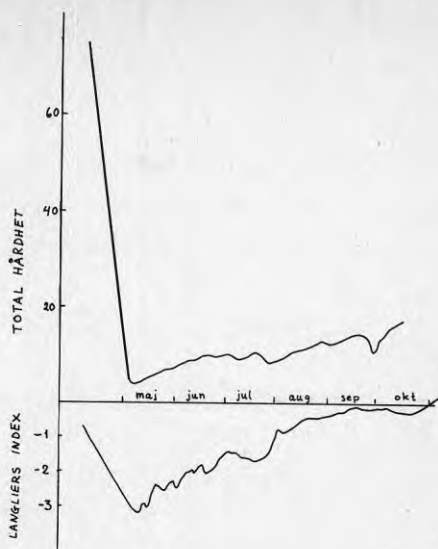
1. Skiktningen av vattnet i bergrummet

Det finns flera faktorer som inverkar ogynnsamt på skiktningen av vattnet. Det är helt klart att under den första uppvärmningsfasen, innan berget ännu har hunnit nå någon jämviktstemperatur, äger ett betydande "kallras" rum i vattnet utmed väggarna. Denna naturliga konvektion av värme stör i hög grad skiktningen. Vidare ger den rena diffusionen av värme mellan vattenmängderna en övre gräns för skärpan i språngskiktet.

Ett problem vid laddningen med hetvatten utgör den avvikelse som alltid måste finnas mellan börvärdet samt ärvärdet för det inmatade vattnets temperatur. Om temperaturen varierar kraftigt vid laddning är det naturligt att befara omblandning av vattnet i lagret. Skulle temperaturvariationerna vara små vid laddning skulle de ansatser till naturlig konvektion som därvid uppkommer kunna neutraliseras av diffusionen som strävar att utjämna temperaturskillnaderna. Detta senare synes ej vara fallet. Temperaturvariationer av måttlig storlek ($\sim 5^\circ$) har visat sig ha påtaglig inverkan på språngskiktets utseende. Figur 1 visar detta.



Figur 1



Figur 2

2. Utlakningen av mineral i vattnet

Bergrummet fylldes med avhärdat vatten från Avesta kommuns vattenledningsnät. Avhärdningen som på intet vis är kostnadsfri har emellertid inte helt oväntat visat sig ha begränsat värde eftersom de fysikaliska villkoren för deponering i värmeväxlarna uppnåddes redan efter 6 månader. Detta visas i figur 2. När Langliers index byter tecken från minus till plus finns förutsättningen att mineral skall kunna fällas ut trots att totala hårdheten fortfarande är låg.

3. Förskjutningarna i berget

Temperaturhöjningen i berget ger upphov till förskjutningar. Mätningar har visat att berget i rummets tak lyfte sig 0,5 mm till följd av själva utsprängningen. När temperaturen i vattnet var som störst (50 °C) under första

simulerade årscykelns höjde sig taket ytterligare 0,5 mm. Samtidigt trycktes väggarnas nedre del in 1 mm. När temperaturen i vattnet efter första årscykelns slut sänkts till 28 °C återgick takets läge till det som var fallet före uppvärmningen, dvs vid 6 °C, under det att väggarnas nedre del fortsatte att tryckas in något till. Samtliga deformationer får betraktas som små.

4. Temperaturgivarahaveri

Ett resultat av stor betydelse som inte är uppnått genom någon medveten strävan är de erfarenheter som nu finns om de temperaturgivare som installerats i vattnet. Det har visat sig att samtliga PT 100-givare som suttit inuti en hylsa fastlödd vid en MI-kabel har havererat. Haveriet har orsakats av undermåliga lödningar i förening med korrosionsangrepp från det heta vattnet. Dessa haverier var mycket oväntade i all synnerhet som de dels kom mycket snart efter det att temperaturen hade börjat höjas, dels därför att konstruktionen med en givare helt integrerad med en rostfri kabel betraktats som helt säker.

Konsekvenser av de preliminära resultaten

De erfarenheter som hittills föreligger gör det möjligt att dra vissa slutsatser. Dessa slutsatser är viktiga eftersom skikttningsproblem och deponeringsproblem i hög grad påverkar ett värmelagers funktionsduglighet och dess ekonomi.

Det har konstaterats att skiktningen inte helt betett sig som önskat. Tyvärr är orsaken till detta oklar. Det synes därför vara i hög grad angeläget att skikttningsfenomenet studeras i laboratorium, dvs under helt kontrollerade yttre villkor. En sådan undersökning skulle i bästa fall kunna klarlägga inverkan av väggtemperaturen och väggtemperaturgradienten samt känsligheten för temperaturvariationer

i inloppsvattnet. Kunskaper vunna på detta sätt skulle göra det möjligt att bedöma funktionen av ett planerat bergrumslager tämligen oberoende av hur detta tänks bli utformat.

Likartat är förhållandet vad gäller deponeringsfenomenen. En generell studie av deponering under kontrollerade former skulle kunna ge kunskaper av så allmän karaktär att deponeringsriskerna vid ett planerat bergrumslager skulle kunna bedömas utifrån kemisk analys av de aktuella bergarterna.

När det gäller bergets deformationer är dessa hittills små. Ett fenomen som tillmätts särskilt intresse, nämligen bergets olika elasticitet vid på- och avlastning, kan tydligt skönjas. Detta "hysteresis"-fenomen, vilket skulle kunna ge upphov till fortskridande deformationer vid cyklisk lastväxling, måste ägnas fortsatt uppmärksamhet och detta låter sig inte göras på något annat sätt än genom studier i full eller "nästan full" skala av byggda bergrum.

Slutligen måste understrykas betydelsen av att mätgivare, vilka placeras i aggressiv miljö, väljs med största omsorg samt att de rutinemässigt kan bytas ut. Skälet till detta är givetvis att signaler från givarna skall användas i de reglersystem som styr det värmesystem varav lagret är en del.

T I L L A M P N I N G

VÄRMELAGER I FJÄRRVÄRMESYSTEM

Bakgrund

I ett fjärrvärmesystem kan det finnas många skäl för att lagra energi. I system där ett oljeeldat kraftvärmeverk står för den huvudsakliga energi-produktionen har man tidigare haft anledning att ansluta hetvatten-ackumulatörer, vilka främst använts som korttidslager vid tider då el-behovet överstigit värmebehovet. I takt med att elproduktionen vid kraftvärmeverken minskar genom kärnkraftsutbyggnaden, så minskar för närvarande den ursprungliga betydelsen av dessa lager. På lång sikt kommer dock elproduktionen vid fjärrvärmeverken att återupptas i takt med att kärnkraften avvecklas. Elproduktionen kommer då att till största delen ske vid fastbränsleeldade pannor och behovet av värmelager kan åter bli aktuellt.

En annan anledning att lagra energi i ett fjärrvärmesystem är det ständigt varierande effektbehovet, såväl över året som över dygnet. Beroende på uppbyggnaden av produktionsanläggningarna kan lagret användas som korttidsutjämnning för att ersätta toppeffektanläggningarna eller som långtids-lager vid utnyttjande av kontinuerliga energikällor där under vissa tider produktionen överstiger behovet.

Variationer av fjärrvärmebehovet

Knappt 1/3 av den årligt producerade energin i ett fjärrvärmesystem används för tappvarmvatten. Här ligger således behovet någorlunda konstant över året, medan dygnsvariationerna är mycket stora. Värmebehovet styrs relativt väl av utomhustemperaturen med måttliga dygnsförändringar och stora årstidsvariationer.

I figur 1 visas varaktighetskurvor månadsvis av effektbehovet i fjärrvärmenätet i Uppsala. Även månadsvisa medelvärden är markerade. Som framgår av figuren är effektvariationen störst i januari; från 120 - 550 MW och minst i juli; 20 - 120 MW.

Som exempel på den dygnsvisa effektvariationen visas i figur 2 fjärrvärme-effekten inmatad i Uppsalas fjärrvärmenät under en vecka i november 1982. I figuren är även värmepumpens andel inritad. Figuren visar stora förändringar över dygnet, t ex från 160 till 280 MW under endast några timmar. I figuren kan man dock inte utläsa om någon höjning av temperaturen i nätet gjorts, vilket kan bidra till vissa av variationerna. Denna typ av statistik finns för Uppsalas del ännu inte tillgänglig för hela år, då det startades under hösten 1982.

Energikällor med lagringsbehov

Genom övergången från olja till andra energikällor har behovet av värmelager fått en ökad betydelse. Detta gäller främst den ökade användningen av spillvärme, som i vissa fall kan användas direkt men oftast utnyttjas med hjälp av en värmepump, samt utnyttjning av sopförbränning. Beträffande spillvärmens tillgång är olik beroende på källan men är i de hittills utnyttjade anläggningarna relativt konstant över året. I t ex ett avloppsreningsverk är flödet störst vid snösmältningen och lägst under sommaren medan temperaturen har det omvända förloppet.

I en sopförbränningsanläggning är energiproduktionen också relativt konstant över året. Här gäller en negativ alternativ kostnad om inte soporna kan brännas utan måste tas om hand på annat sätt. Dessutom är en sopförbränningsanläggning en tämligen kostnadskrävande investering medan bränslet är billigt vilket tillsammans motiverar en lång utnyttjningstid per år.

Solenergi är den tredje energikällan som kan kräva användning av värme-lager. Om ingen annan kontinuerlig energikälla finns under sommaren, så kan solenergin svara för ca 10 % av årsbehovet i ett större fjärrvärme-system. Här finns alltid ett energibehov och fjärrvärmenätet kan i viss mån utnyttjas som dygnsutjämning. I mindre system ökar dock lagringsbehovet drastiskt och för en större utnyttjning av solenergi krävs alltid någon form av lager eftersom tillgång och behov har negativt samband.

Ekonomi idag

För att utnyttja värmelager i fjärrvärmesystem krävs egentligen bara en enda sak - lönsamhet. Kostnaden för energin som lagras skall tillsammans med lagringskostnaden ställas mot en alternativ energikälla. Toppeffekt-utjämningen spelar här den viktigaste rollen men är svår att generellt bedöma då hänsyn måste tas till de enskilda produktionsanläggningarna. Nedan görs endast en redovisning av de rörliga energikostnaderna (för solenergi redovisas investeringskostnad).

I figur 3 visas energikostnaderna för några energislag som utnyttjas eller planeras att utnyttjas i Uppsala. Den billigaste energin fås från sopförbränningen med ca 3 öre/kWh åtföljt av spillvärmen från värmepumpen vid ca 5 öre/kWh. Detta kan jämföras med kostnaden för de lagringsbara energikällorna; fastbränsle (kol, biomassa, torv) med ca 9 öre/kWh och olja vid ca 20 öre/kWh. Kostnaden för solenergi är idag alldeles för hög för att kunna konkurrera ekonomiskt. Beroende på temperaturkrav och avskrivningstider varierar kostnaden för solenergi i fjärrvärmetillämpning mellan 30-60 öre/kWh, en kostnad som idag är alldeles för hög men säkert kommer att sjunka. I figur 3 finns även kostnader för värmelagring vid olika avskrivningstider och olika investeringskostnader angivet. Investeringskostnaden för lagret anges i kronor per årligt utnyttjad kilowattimme (kr/kWh/år) och energikostnaderna fås vid 4 % realränta med 10 resp 30 års avskrivningstid.

Hur ser det ut i framtiden?

En viktig förändring som kommer att öka potentialen för värmelager i fjärrvärmesystem är introduktionen av lägre temperaturer i nätet. Detta innebär en större temperaturdifferens mellan lager och nät, ett effektivare lager och lägre värmeförluster. Dessa lågtemperatursystem har en maxtemperatur av 70-95^o istället för dagens 120^o. Returtemperaturen sjunker från 70 till 45^o. Dessa temperaturer används nu endast i nya, mindre system och målet är en sänkning även i de stora befintliga systemen.

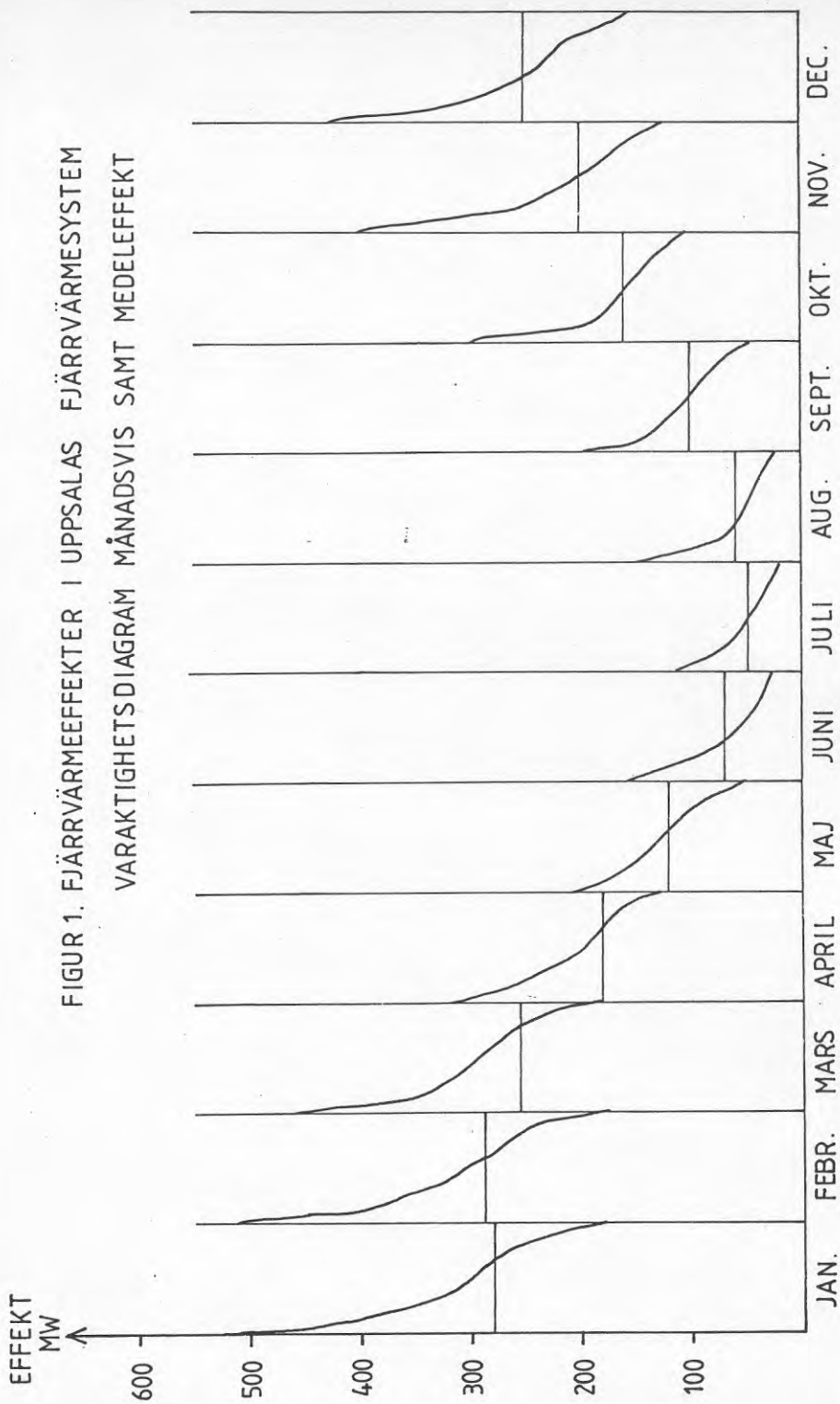
En större utnyttjning av spillvärme och sopförbränning kommer att kräva lagringsmöjligheter och så småningom när kärnkraften avvecklas kan det även bli aktuellt att korttidslagra energi från kraftvärmeverken.

Solenergi är idag alldeles för dyrt men kommer i framtiden att bli mer konkurrenskraftigt när utveckling skett av system och komponenter samtidigt som kostnaden för andra energikällor ökar. Solvärmelager kan dessutom utnyttja en lång avskrivningstid eftersom åtminstone inte bränslet kommer att sina.

De viktigaste faktorerna vid bedömningen av utnyttjning av värmelager i fjärrvärmesystem är avslutningsvis:

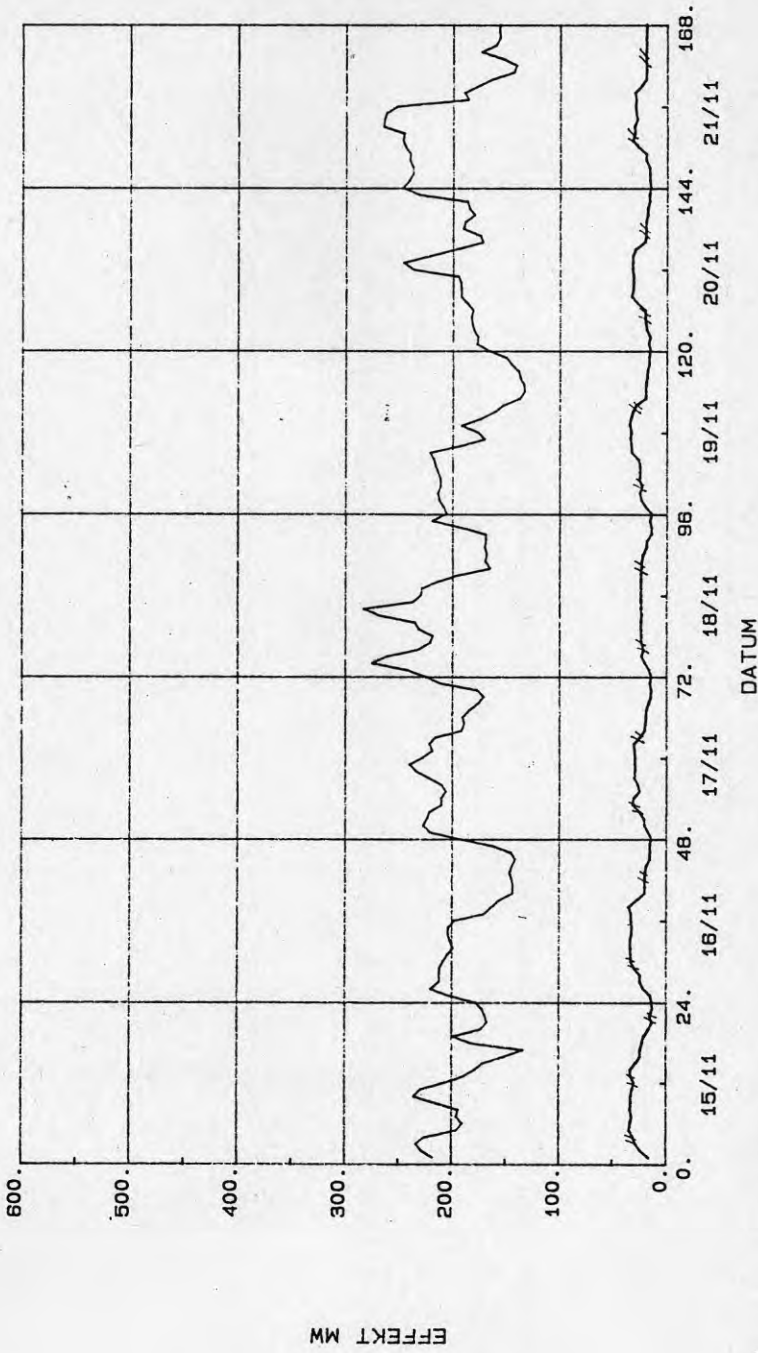
- * effektbehov
- * energikällor
- * produktionsanläggningar
- * temperaturer

FIGUR 1. FJÄRRVÄRMEEFFEKTER I UPPSALAS FJÄRRVÄRMESYSTEM
VARAKTIGHETSDIAGRAM MÅNADSVIS SAMT MEDELEFFEKT



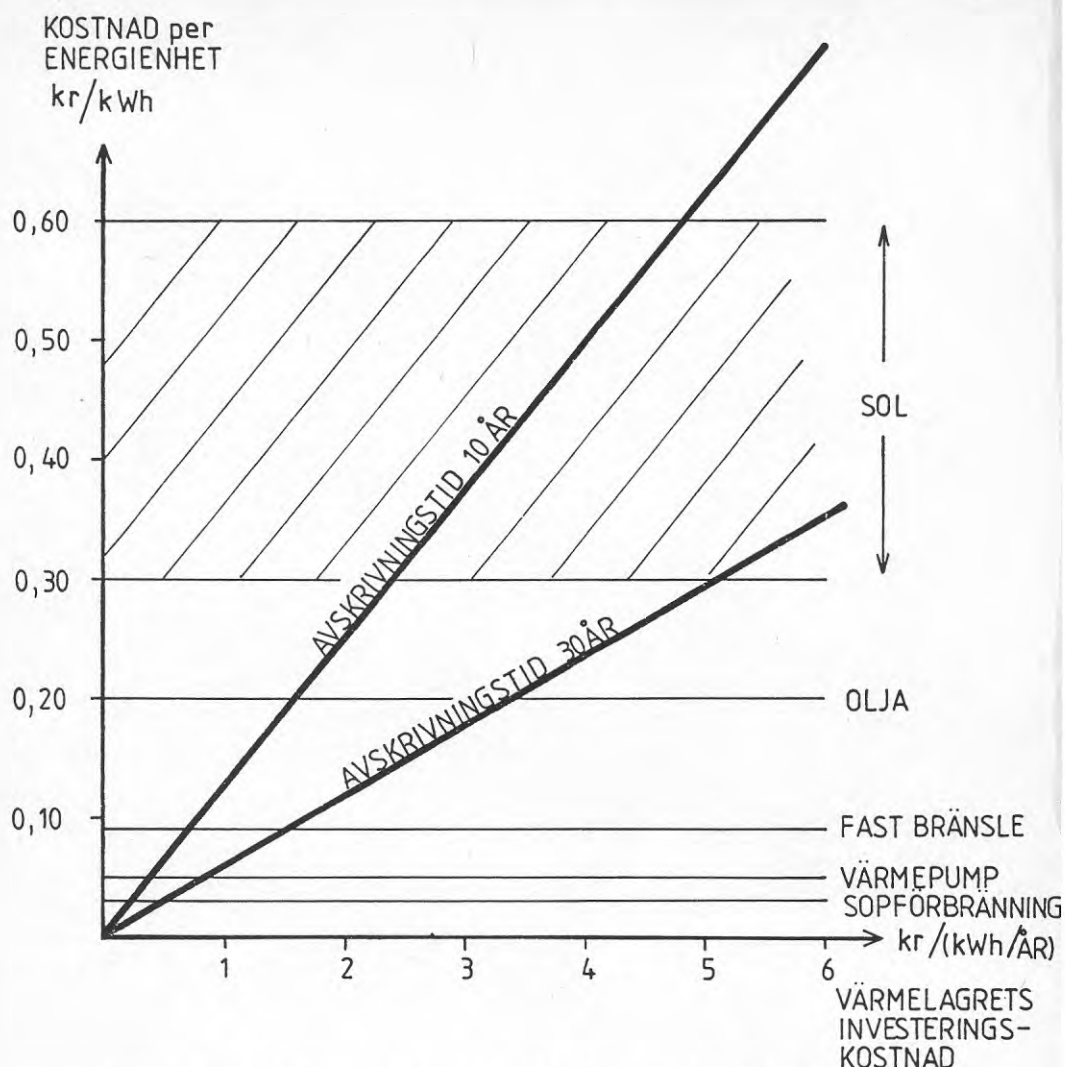
UKAB

Figur 2. FJÄRRVÄRMEEFFEKTER HUVUDNÄT
TIMMEDELVÄRDEN 821115-821121



— TOT EFFEKT
—#— VÄRMEPUMP

VECKOPERIOD
821115-821121
DATUM BÖRJAR KL.07



FIGUR 3. JÄMFÖRELSE MELLAN ENERGIKOSTNADER 1982 FÖR OLIKA ENERGIKÄLLOR OCH ENERGIKOSTNAD FÖR VÄRMELAGER VID OLIKA INVESTERINGSKOSTNADER OCH AVSKRIVNINGSTIDERNA 10 RESP. 30 ÅR, VID 4% REALRANTA.

Säsongslagring av värme i mark vid hög temperatur.
Behov och möjlig utbyggnadstakt

av Hans Hydén, VBB Stockholm.

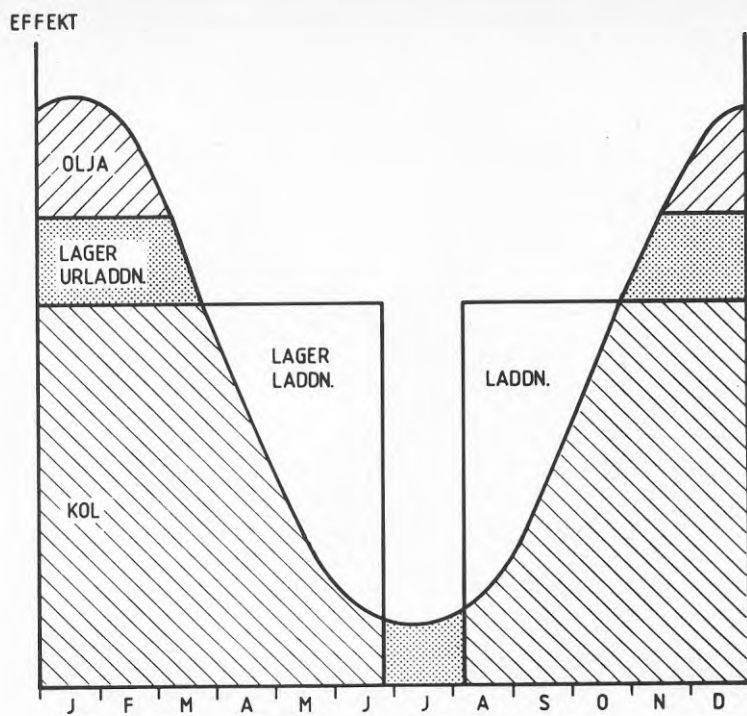
Högtemperaturlager har sin naturliga plats främst i större anläggningar för produktion av fjärrvärme och kraftvärme. De kan motiveras i kombination med spillvärme, sopförbränningsvärme och fastbränsleeldning. Lagring vid hög temperatur i kombination med värmepump är ej självklart intressant speciellt i de fall där det i systemlösningen ingår vintervärmepump.

Lagring av spillvärme och sopförbränningsvärme i lager av borrhålstyp bör kunna ge god lönsamhet. Även i system kol-olja-lager kan man finna kombinationer med lönsamhet genom att kolet via lagret kan ersätta olja. Lagring av 15-20 % av årsenergibehovet har vid en preliminär bedömning visat sig vara rimligt, se Figur 1, om kostnaderna för lagring är de som f n synes kunna uppnås med borrhålslager, se Figur 2.

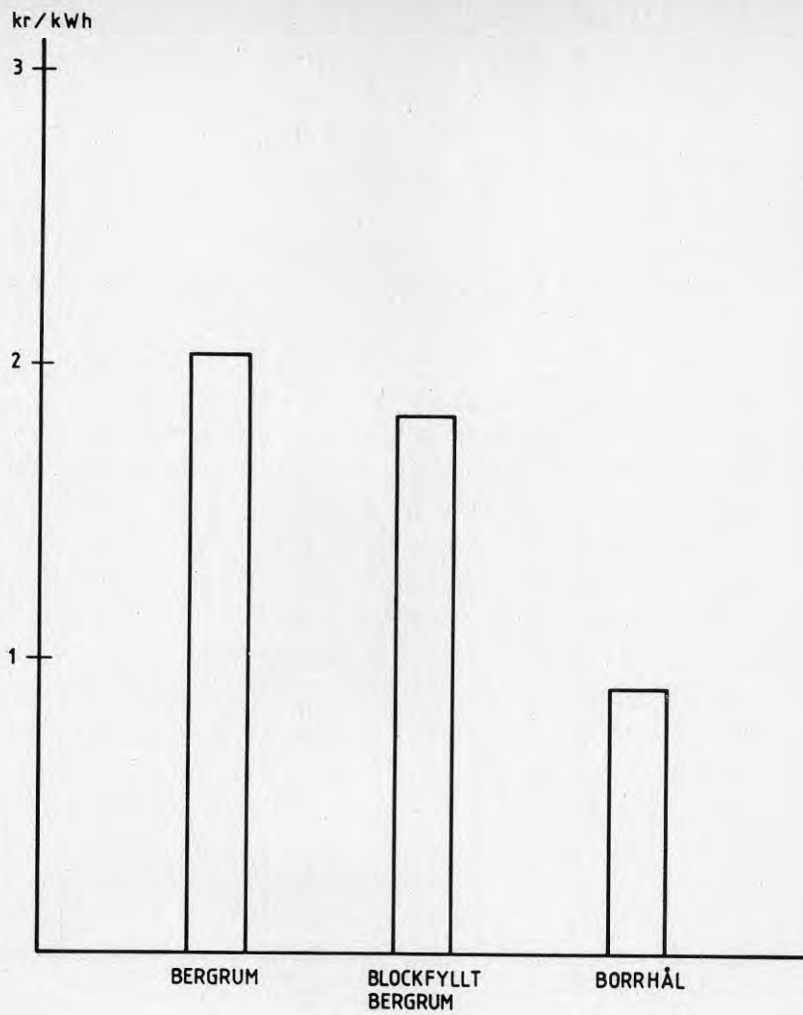
I Sverige finns en produktionseffekt för fjärrvärme på ca 14 000 MW. Den planerade årliga ökningen är ca 1 000 MW. Antalet pannor större än 50 MW är ca 70 st. För 80-talet planeras ca 30 kolpannor för fjärrvärmeproduktion och för 90-talet planeras ca 30 koleldade kraftvärmelanläggningar. I samband med konvertering av befintliga oljepannor finns en potential för värmelagring i storleksordningen 5 TWh och i samband med utbyggnader ytterligare ca 0,4 TWh/år. Den senare siffran motsvarar 8 lager per år i den storlek som studerats för Göteborg (ca 50 GWh/år). Den praktiska potentialen är kanske 5 sådana lager per år.

Ett borrhålslager innebär en måttlig anläggningsinsats. Ett borrhållslager kan producera 50-100 m borrhål per dag (2 skift). Med 200 arbetsdagar per år kräver 1 000 000 m borrhål 50-100 borrhållslager. Dagens låga borrhållspriser kan stiga vid ökad efterfrågan men eftersom det är fråga om ett begränsat antal anläggningar med möjligheter till rationalisering av arbetet är risken begränsad.

Värmepumpstödda högtemperaturlager (>50°C) kan ha en nisch i mindre fjärrvärmenät och stora blockcentraler. Den utbyggnadsvärda potentialen är svårbedömbär. Lönsamheten hänger troligen starkt samman med tillgången på billig sommarel.



Figur 1 Driftstrategi system olja-kol-lager



Figur 2 Kostnader för lager av storlek 50 GWh.
Temperatursving ca 40°C.

PM

OM JURIDISKA ASPEKTER AVSEENDE HÖGTEMPERATURLAGRING
UNDER MARK

Vid lagring av värme i mark eller vatten utnyttjas antingen själva marken eller också vattnet i marken som värmebärare. Mark och vatten utgör tillsammans jord i juridiska hänseenden. Jord är fast egendom.

Fastighetsindelningen och dess betydelse

All jord i vårt land är indelad i fastigheter. Till jorden hör vattnet på och i marken. Avgörande för fastighetsindelningen är marken på vars yta fastigheternas gränser är utmärkta. Fastigheternas gränser gäller i sidled mot andra fastigheter. I fastigheterna ingår enskilt vatten närmast stranden. (Utanför enskilt vatten finns allmänt vattenområde i havet och i våra stora sjöar som icke ingår i själva fastighetsindelningen.) Fastigheternas gränser sträcker sig lodrätt från markytan uppåt och nedåt i riktning mot jordens medelpunkt. Fastighetsgränserna konvergerar sålunda nedåt och fastighetens yta minskar sålunda nedåt och divergerar uppåt. De rättigheter som tillkommer en viss fastighet får inte utövas utanför fastigheternas gränser utan särskild överenskommelse med grannen. Detta gäller både över och under markytan.

Den omständigheten att fastigheters areal minskar på större djup har inte någon större praktisk betydelse. Om man räknar med en jordradie på 636 mil $(\frac{4\ 000}{2} \times 636)$

innebär ett djup från markytan från 6,4 km endast en promille av jordradien, dvs en fastighet med en yta av 1 000 x 1 000 m är på 6,4 kilometers djup 999 x 999 m. (Skillnaden mellan fastighetsstorleken på markytan och på kartan, som tangerar jordklotet framgår av exempelvis ekonomiska kartbladet där kartytan 5 x 5 km inte utgör 25 m² på jordytan, utan en mindre area som finns antecknad

på ekonomiska kartbladet längst ned i vänstra hörnet.

Även om minskningen respektive ökningen av fastigheter-
nas areor inte har praktisk betydelse i normala samman-
hang är det emellertid utomordentligt viktigt att no-
tera fastighetsgränsernas läge över och under mark-
ytan vid utförande av brunnar och lager för värmeenergi
under markytan.

Rätten till energi

Lagstiftning saknas i vårt land om rätten till energi
om man undantar bestämmelserna i vattenlagen om rätten
att utnyttja vattnets lägesenergi i kraftverk, vilket
tillkommer strömfallets ägare. Den energi som finns i
marken eller i vatten i marken får i avsaknad av särskilda
bestämmelser anses tillkomma ägaren till marken.

Rätten till mark

Mark och vatten på och i marken utgör jord som är indelad
i fastigheter. Rätten att nyttja marken tillkommer
fastighetsägaren eller den till vilken fastighetsägaren
har upplåtit rätten att nyttja marken. Rätten till
energin i marken är emellertid inte självklar och det
finns exempel på lagstiftningar där markägaren inte
disponerar över innehållet i marken. Sålunda kan
"var och en" efter vederbörligt tillstånd av berg-
mästaren öppna gruva och bryta malm till vissa metaller
och svavelkis, varvid fastighetens ägare endast har rätt
att få ersättning för den mark som tages i anspråk för
gruvan, men däremot inte ersättning för själva malmen.
Likaså kan enligt minerallagen koncession för utvinning
av olja, gas, stensalt, alunskiffer, stenkol och vissa
leror, uran och toriumhaltigt mineral samt torv för
energiutvinning meddelas annan än fastighetsägaren, var-
vid fastighetsägaren enbart har rätt att få ersättning
för den mark som tagits i anspråk, däremot inte för
fyndigheten som sådan. Ifråga om energi får man emeller-
tid utgå ifrån att tillsvidare den värmeenergi som finns
i marken tillkommer fastighetsägaren. Det kan emeller-

tid inte uteslutas att åtminstone den geotermiska värmen kan bli en allmän egendom.

Rätt till vatten

Rätten till vatten kan vara antingen offentlig eller enskild. I den gamla romerska rätten var ytvatten i regel offentligt, dvs tillkom staten eller det allmänna. I den nordiska rätten ingår vattnet på marken i fastigheterna, dock vid havet och i de stora sjöarna sträcker sig enskilt vatten inte mer än 300 m från stranden. Ifråga om grundvatten som i vårt land lagreglerades först år 1939 är vattnet enskilt och tillkommer fastighetsägaren, vilket också är fallet även inom den romerska rättens område. Endast ett fåtal länder har grundvattnet såsom en offentlig egendom.

Rätten till vatten på och i grunden tillkommer fastighetsägaren, men är inte någon äganderätt. Man har avsiktligt vid 1917 års lagstiftning om vatten, med komplettering år 1939 om grundvatten, inte uttalat att rådigheten över vattnet utgör en äganderätt. Enligt nuvarande vattenlag har man rätt att "råda över det vatten" som finnes på grunden (VL 1:1). (På motsvarande sätt äger man "tillgodogöra sig vatten som finns under markens yta" om man äger fastigheten (VL 1:15)). Även enligt det förslag till ny vattenlag som föreligger i proposition har fastighetsägaren enbart rätt att "råda över" vattnet på grunden och i förarbetena har detta närmare preicerats som rätt

att tillgodogöra vattnet,

att vidtaga olika åtgärder i vattnet i nyttigt syfte,

att ta bort eller minska skadliga verkningar som vattnet kan medföra.

Anledningen till att man på detta sätt har skiljt vattenrätten från en äganderätt är den att det vatten som finns på eller i grunden ständigt skiftar genom grundvattenströmningar och andra strömningar och att äganderätten därför har preciserats som en rätt att råda över vattnet när det finns på fastigheten.

Begränsningar i fastighetsägarens rättigheter

Även om fastighetsägaren har äganderätten till marken och rådigheten över vattnet på och i marken är han underkastad vissa begränsningar vid användandet av sin fastighet.

Enligt jordabalken (3:1) skall var och en vid nyttjande av sin eller annans fasta egendom taga skälig hänsyn till omgivningen. Detta innebär att man inte får bruka sin fastighet så att det finns risk för inverkan på grannfastigheten. Det finns regler om hur man skall förfara när exempelvis en rot eller gren tränger in på grannfastigheten, när man skall utföra grävning eller hur man skall förfara när en byggnad tränger in på grannfastigheten. Man får sålunda inte gräva eller spränga eller ta ut vatten på sin fastighet i sådan omfattning att grannfastigheten påverkas.

Miljöskyddslagen är tillämplig på bland annat användning av mark som kan medföra förorening av vattendrag och användning av mark som kan medföra störning för omgivningen genom luftförorening, buller, skakning, ljus eller annat sådant om störningen ej är tillfällig. Utsläpp av vatten på fastigheten eller i marken efter värmeutvinning är sålunda en verksamhet som kan vara underkastad prövningsplikt enligt miljöskyddslagen. Enligt miljöskyddslagen skall vissa anläggningar förprövas och andra anmälas innan de får utföras. Förteckning över sådana anläggningar finns i miljöskydds-förordningen, som i bilaga B har en förteckning över sådan miljöfarlig verksamhet för vilken det gäller anmälnings-

plikt hos länsstyrelsen. Ifråga om anläggning för lagring av värme i mark, vattendrag, sjö eller annat vattenområde eller i grundvatten för en tillförd energimängd överstigande 3 000 MWh skall anmälan ske till länsstyrelsen innan anläggningen påbörjas.

Dessa bestämmelser i bilaga B till miljöskyddsförordningen är för övrigt de enda som för närvarande finns i vår lagstiftning om energilagring i mark. I förarbetena till förslaget till ny vattenlag uttalas att bestämmelserna i lagen om vattenföretag gäller "även bortledande av vatten ur en grundvattentillgång för att tillgodogöra vattnets värmeenergi" i specialmotiveringen till förslaget till ny vattenlag.

Naturvårdslagen kan tillämpas för att föreskriva begränsningar och skyddsåtgärder för all slags verksamhet som väsentligt kan inverka på naturmiljön. Sålunda finns särskilda bestämmelser till skydd för naturmiljön vid täkt av sten, grus, sand, lera, jord, torv eller andra jordarter som innefattar skyldighet att införskaffa länsstyrelsens tillstånd för annan täkt än för husbehov. Skyldighet att söka tillstånd för energiuttag finns icke, men om sådan verksamhet påverkar naturmiljön kan naturvårdslagen komma i tillämpning.

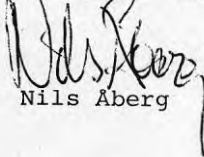
Hälsovårdsstadgan och lokal hälsovårdsordning behandlar särskilda åtgärder mot vatten och luftföroreningar. Lagen kan vara aktuell för vissa typer av slutna system med giftig antifrysvätska i cirkulationssystemet, t ex glykol, när fara finns för förorening av dricksvatten vid läckage. Hälsovårdsnämnden har möjlighet att under vissa förutsättningar lämna lokala föreskrifter, som t ex kan innebära att tillstånd eller anmälan krävs för en viss åtgärd inom ett visst område.

Särskilda bestämmelser för energiutvinning ur vatten
Vattenlagen reglerar bl a byggande i vatten och grundvattenuttag. Som byggande i vatten räknas varje åtgärd under högsta högvattenytan i vattenområde och bortledning av vatten ur vattenområde. För byggande i vatten inklusive bortledning av vatten och grundvattenuttag erfordras i princip vattendom. I fråga om grundvattenuttag erfordras inte vattendom om uttaget är mindre än 300 m³/dygn eller om grundvattenuttaget på sannolika skäl förnärmar allmän eller enskild rätt.

Bestämmelserna om grundvattentäkt skall också tillämpas när vatten tillföres grunden genom infiltration i syfte att erhålla grundvatten i tillräcklig mängd. Detta gäller emellertid inte återföring av grundvatten efter en energiutvinning då syftet inte i detta fall är att öka grundvattenmängden. Vattenlagen är sålunda inte tillämplig på återföring av grundvatten efter energiutvinning.

Vid anordnande av grundvattentäkt är man skyldig att göra anläggningen så att ändamålet kan utan skälig kostnad vinnas med minsta intrång och olägenhet för annan (VL 2:43). Grundvattentillgång som utnyttjas måste fortsättningsvis utnyttjas och hållas i stånd. Vill man ta vattentäkt ur bruk får man detta, men om den åtgärden kan medföra fara för allmän eller enskild rätt skall vattendomstolens tillstånd inhämtas (VL 2:59). Möjligheter finns att expropriera rätt att ta vatten för allmänt behov på enskild fastighet (VL 2:60).

Vällingby den 11 april 1983


Nils Åberg

LAGRINGSSTUDIER I GÖTEBORG

LAGRINGSSTUDIE I GÖTEBORG - FÖRUTSÄTTNINGAR

Gunnar Nilsson
Energiverken i Göteborg

SAMMANFATTNING

En jämförande studie av stora värmelager i berg pågår i Göteborg.

Förutsättningarna är att lagret inte bör överskrida lagringskapaciteten ca 50 GWh och att överkottsvärme i huvudsak tas från raffinaderierna, BP-Volvo-Systemet, SHELL III och vid RYA-verket sedan de planerade avloppsvärmepumparna tagits i drift. Resultaten av lagringsstudien presenteras i september 1983.

BAKGRUND

Den anslutna fjärrvärmeeffekten i Göteborg var 1982 ungefär 1400 MW. Energimängden som levererades till förbrukarna var ca 2300 GWh. Ca 35 % av energin kommer från SHELL raffinaderiet via tunneln under Göta Älv, och från sopförbränning. Resterande 65 % utgörs av oljeeldning.

Under 1982 presenterade Energiverken i Göteborg en värmeförsörjningsplan gällande fram till början av 1990. Värmeplanen innebär bl a att stora mängder spillvärme skall tillvaratas, att fjärrvärm nätet byggs ut och sammankopplas, att stora värmepumpar installeras för att tillvarata värme ur avloppsvatten och att viss övergång till koleldning kommer att ske.

I Göteborg finns unika tillgångar på stora mängder spillvärme och inom 5 år kommer ytterligare 25 % av energiförbrukningen att tas från spillvärme. Spillvärmekällorna är kontinuerliga över året medan efterfrågan finns på vintern. Enda sättet att tillvarata spillvärmens effektivt över hela året är således att säsongslagra spillvärme från sommar till vinter.

Under våren 1982 påbörjades en jämförande studie av tre olika lagringskoncept. De lagringsformer som innefattades i studien var borrhålslager, öppna bergrum och blockfyllda bergrum. Utvärdering av de tre lagringskoncepten kommer att utföras under 1983.

LAGRET I DET PLANERADE VÄRMEFÖRSÖRJNINGSSYSTEMET

Spillvärmesystemet

Spillvärmekällorna finns alla på Hisingen inom ett ganska begränsat område. För närvarande tas värme från SHELL via den 3,5 km långa tunneln under Göta Älv. Den utnyttjade energin är ca 555 GWh med en effekt på ca 80 MW. Från SHELL kan ytterligare 13 MW tas vid en temperatur på 47/30°C.

BP levererar idag spillvärme till VOLVO. Under sommartid finns ett

överskott på ca 50 GWh vid en effekt på 17 MW och en temperatur på 124°C. Vid BP finns förutom ovannämpt system värme vid lägre temperaturer, BP I med 14 MW vid 108/30°C och BP II med 28 MW vid 58/30°C.

Företräde kan BP I, BP II och SHELL III ge 69 MW vid en temperatur på 58°C. I förutsättningarna ingår att en stor värmepumpanläggning kommer att byggas för att ta tillvara på denna resurs. Under sommartid finns dock inget behov av värme från denna värmepump, varför den kan användas för att ladda ett eventuellt värmelager.

En värmepumpanläggning är under utförande vid RYA-verket och totalt skall 135 MW utvinnas ur avloppsvattnet. Värmepumparna kan under sommartid användas för att ladda lagret.

Slutligen skall en hetvattencentral på 170 MW byggas för att ge spetsvärme under den kallaste tiden. Produktionen av hetvatten vid VP-Rya och VP-raff kan ju inte åstadkomma temperaturer överstigande 100°C.

Spillvärmesystemet framgår av figur 1.

Lagrets storlek och läge

Inom projektets vana utfördes en sammanställning av data från ett antal tidigare utförda anläggningar inom området och ur geologisk synpunkt finns flera tänkbara platser som kan rymma ett stort värmelager. Tillslvidare har förutsatts att lagret byggs under Ryaskogen eftersom det har ett centralt läge i spillvärmesystemet. Om berggrunden under Ryaskogen inte kan utnyttjas av miljöskäl, då skogen är naturskyddat område innebär en förflyttning till annan geologisk lämplig lokal att kostnaden för ledningar som förbinder lagret till spillvärmesystemet ökar något men att det drabbar alla tre alternativen ungefär lika.

Den teoretiska tillgängliga spillvärmemängden är 400 GWh under ca 3000 timmar från maj till september. Av flera skäl har lagrets lagringskapacitet begränsats till ca 50 GWh. Ett lager med denna kapacitet betingar ansenlig investeringskostnad och eftersom projektet har "pilotkaraktär" har det inte ansetts rimligt att i det första stadiet projektera ett större lager. Alla tre alternativen kan dock byggas ut, om man så senare önskar det.

Andra förutsättningar för projektet

I princip kan de olika spillvärmekällorna användas var för sig eller i olika kombinationer med varandra. Vilken spillvärmekälla som i verkligheten kommer att användas för uppladdning av lagret beror på bl a framtidsresultat av de prisförhandlingar som kommer att föras med raffinaderierna. Det väsentliga i denna studie är dock att de olika koncepten kan jämföras under samma förhållanden.

Eftersom den tidigare nämnda hetvattencentralen behövs för temperaturspetsning kan lagret inte påräknas ge någon besparing i effektutbyggnad.

Den ekonomiska livslängden för lagret har satts till 10 år och

efter denna tid får lagret påräknas ett restvärde om det kan utnyttjas för andra ändamål. Den till synes korta livslängden motiveras med att det kan vara svårt att förutse lagrets framtida situation i energiförsörjningen och framförallt hur prisutvecklingen på energi kommer att bli.

Slutligen kan det påpekas att lagret kan ge väsentliga förbättringar i det framtida värmeförsörjningssystemet men att de energimängder som innefattas i denna lagringsstudie fortfarande är mycket små i hela fjärrvärmesystemet i Göteborg. Studien har finansierats av Byggeforskningsrådet.

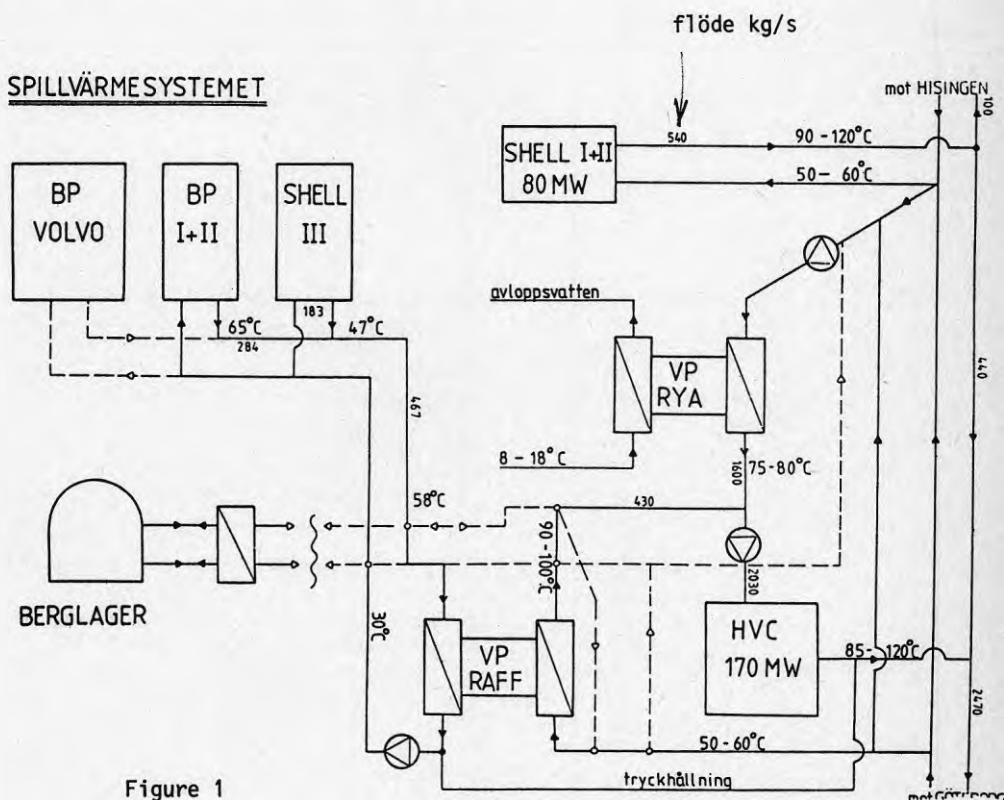


Figure 1

BFR-ENERGIVERKEN, GÖTEBORG
 SPILLVÄRMELAGRING I BERGRUM
 FÖRSTUDIE - Gunnar Gustafson, Anders Eriksson & Magnus Liedholm

Sammanfattning

Under 1979-1980 genomfördes av VIAK en förprojektering av ett bergrum för värmelagring i Partille. Höga kostnader för solfångare medförde att projektet inte kom till utförande.

I samband med att lagring av spillvärme från raffinaderierna i Göteborg diskuterats hade uppdatering av den tidigare förprojekteringen föreslagits för att bilda delunderlag för ett beslut om framtida lagringsmetod för spillvärme.

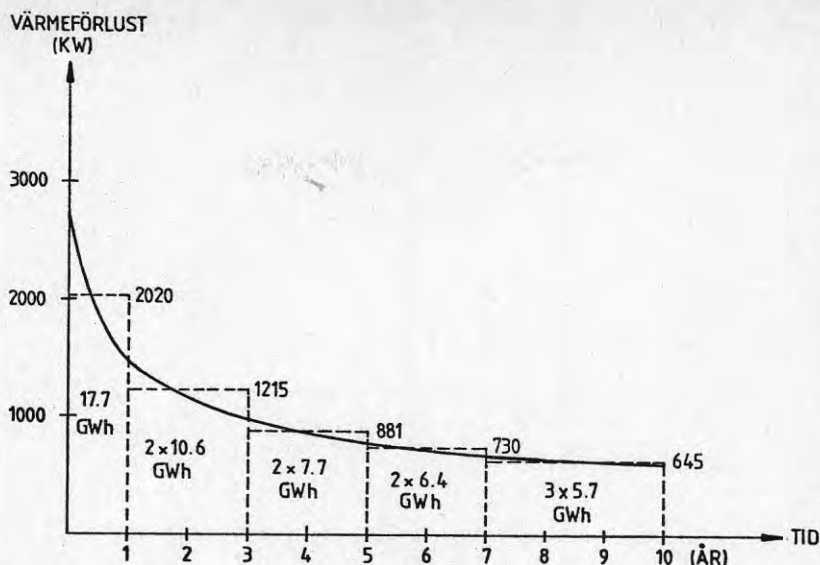
Av BFR har VIAK erhållit medel att utreda ett lagringsalternativ i bergrum där Energiverken, Göteborg skulle ge förutsättningarna och medverka som huvudman för tre olika lagringsalternativ. Ett bergrum för energilagring kan betraktas som ett relativt enkelt och robust system med hög tillgänglighet och gott restvärde.

I arbetet som har karaktären av förstudie eller programfas skulle bergrummet lokaliseras till ett lämpligt område, baserat på kända geologiska data och med hänsyn till Energiverkens fjärrvärmenät. En preliminär layout skulle presenteras och värmeförluster och en lämplig driftstrategi skisseras på tekniska och ekonomiska grunder. En översiktlig kostnadskalkyl skulle dessutom utföras för en total ekonomisk bedömning av lagringssystemets ekonomi.

Genom analys av tillgängliga värmekällor och tänkbara värmesystem visas att ett trycksatt berglager med temperaturintervallet 35-119 °C är ett intressant alternativ till ett berglager med lägre (≤ 100 °C) temperatur. För ett berglager med nominellt 50 GWh energilagring motsvarar detta en lagervolym av ca 530 000 m³.

Ett flertal faktorer bestämmer berglagrets layout bl.a. rationell produktionsteknik, bergmekanik, geologiska och hydrogeologiska förhållanden. Det här studerade alternativet för layout utgörs av fyra skepp med bredd 20 m, höjd 30 m och längd 215 m. Avståndet mellan skeppen är 25 m. En transportort passerar mellan de två mittersta skeppen till samtliga skepps olika pallnivåer. En konventionell layout som denna beräknas medföra ca dubbelt så stor värmeförlust som lagring i en sfär av motsvarande volym. Värmeförlusterna från bergrummet uppstår på grund av värmeöverföring och värmeledning i berget, läckage av vatten och förbiströmande vatten. Värmeledningen till berget har beräknats med programmet ENERGY i CHALMFEM-biblioteket. Som tekniska och fysikaliska parametrar har valts $\lambda = 3.2$ W/m °C, $C = 800$ J/Kg °C och $\rho = 2700$ Kg/m³.

Under uppvärmningsåret åtgår 66.6 GWh för uppvärmning av vatten från +8 °C - 119 °C. Under denna period förloras 5.6 GWh som värmeförluster. Uppvärmning av berget mellan rummen till den cykliska medeltemperaturen +77,5 °C kräver 20,3 GWh, varav 2/3 uppskattas till första året, dvs 13,5 GWh. Totalt beräknas 85,7 GWh krävas första året för att uppnå +119 °C. Det första årets förluster, 17,7 GWh fördelas på uppvärmningsfasen 32%, lagringsfasen 48% och urladdningsfasen 20%. Följande figur visar energiförlusten mot omgivningen under de första 10 åren.



Till ledningsförlusterna adderas förlusten genom utläckage och förbiströmmande vatten. Förbiströmmande vatten och utläckage uppskattas motsvara förluster om ca 1% varje år av lagrad volym vilket motsvarar ca 5% av ledningsförlusterna i medeltal under 10-årsperioden.

Den årliga cykliska temperaturvariationerna i berget kan beräknas från den cykliska variationen i lagret. Denna variation beräknas vara negligerbar på ca 18-20 m avstånd från bergrumsväggarna.

Markytans temperatur beräknas ha ökat med ca 0,3°C efter 10 års drift med angivna tekniska och fysiska parametrar och medelbergtäckning av 45 m.

Värmelagrets storlek har angetts till 50 GWh. Lämplig spillvärmekälla är BP-Volvo med +124°C i framledningstemperatur och en effekt på 17,3 MW. Uppladdningstiden är 3000 timmar under perioden 15 maj - 15 september. För att kompensera för de stora förlusterna under de första åren kompletteras uppvärmningen då med billig energi från värmepumpar.

Värmesystemet är mycket enkelt och består av en bergrumkrets där bergrummets vatten vid uppladdning pumpas från botten av bergrummet via värmeväxlare, där uppvärmning sker, åter till bergrummet där det förs in i toppen. Vid urladdning sker det omvända och värme avges till fjärrvärmenätet.

Med en tillgänglig temperatur av +124°C på spillvärmekällan räknas med en max temp av +119°C i bergrummet. Vid urladdningen avges värme vid två temperaturnivåer. Från +119 till +60°C direkt till fjärrvärmenätet och från +60 till +35°C till en värmepump. Hur stor värmemängd som avges till respektive, avgörs till

stor del av hur bra skiktning som erhålles. Skiktningen beror i sin tur av bergets isolerande förmåga och därmed kallras från väggar samt inlopps- och utloppsanordningarnas utseende. Vattnets värmeledningsförmåga är dålig och påverkar språngskiktet i mindre omfattning. F n finns inga praktiska erfarenheter av hur bra skiktning som kan förväntas varför vi får avvakta resultat från Avesta och Lyckebo. I beräkningarna har dock antagits att värme avges i lika delar till fjärrvärmenätet direkt och via värmepump. Detta kan anses som ett konservativt antagande.

I förutsättningarna ingår att kol- och oljepriser stiger snabbare än el-priset, i reala termer mellan 2-4%, under perioden 1982 t o m 1995. Lönsamhetskalkylen beräknas enligt annuitetsmetoden med 14% ränta och 10 års avskrivning.

Totala investeringskostnaden har beräknats för två alternativ i 1984 års penningvärde.

Västra Biskopsgården	83,7 Mkr
Rya Skog	76,8 Mkr

vilket ger en årlig annuitet av 16,1 resp 14,7 Mkr.

Driftkostnaden består av underhåll och el för drift av värmepumpar och övriga pumpar.

Driftkostnaden varierar p g a el-priset under perioden med en lägsta kostnad 1988 med 1,6 Mkr och är som högst första året, då man har kompletteringsvärme från värmepumpar, med 3,9 Mkr. Observera att värmeförbrukningen för BP-Volvo är här satt till 0 kr enl förutsättningarna.

Intäkterna utgörs av inbesparad olja, E05, som betingar ett pris av 1 480 kr/m³ 1982. Med en pannverkningsgrad på 0,9 och beräknad urtagbar energimängd från värmelagret beräknas intäkten årsvis för perioden 1985 - 1994. Den ökar från 8,2 Mkr första året till 25,6 Mkr sista året.

Jämföres kostnader och intäkter fås negativa åresresultat de sex första åren och positiva de fyra sista åren. Genom att omräkna delårsresultaten till nuvärde finner man ett negativt resultat på 12,1 Mkr för Västra Biskopsgården och likaledes ett negativt resultat på 5,2 Mkr för Rya Skog.

En känslighetsanalys visar att kapitalkostnaden och oljeprisets utveckling har störst avgörande. El-prisets förändring är mindre betydelsefull då den endast utgör ca 10% av totala kostnaden.

LAGRINGSSTUDIE GÖTEBORG — ALTERNATIV BLOCKFYLLDA BERGRUM

Ingvar Bogdanoff, Ulf Lindblom & Tibor Ritzl, Hagconsult AB

Spillvärmescenariot för Göteborgs kommun innebär bl a ökade spillvärmemängder från raffinaderierna liksom värme från anloppsvattnet i Rya kommer att tillföras fjärrvärmenätet. Genom att lagra delar av denna värme under sommarhalvåret kan spillvärmener utnyttjas i nätet istället för att gå förlorad. Därigenom kan olja (och eventuellt kol) inbesparas. Hagconsult AB har presenterat ett principförslag till hur sådan lagring tekniskt kan utföras samt vilka ekonomiska konsekvenser den leder till under tioårsperioden 1985-94. En sammanfattning av förslaget lämnas här.

Vid anläggningsarbetena tillämpas väl beprövad gruvteknik för att bryta ut stora hålrum snabbt och till låg kostnad, Figur 1. På detta sätt kan man komma ifrån de i detta sammanhang alltför "exklusiva" och dyra traditionella bergrummen. Samtidigt kan man åstadkomma ett lager, där bergstabiliteten inte åsidosätts. Lagret har vidare hög lagringskapacitet och är följsamt vid snabba i- och urladdningar.

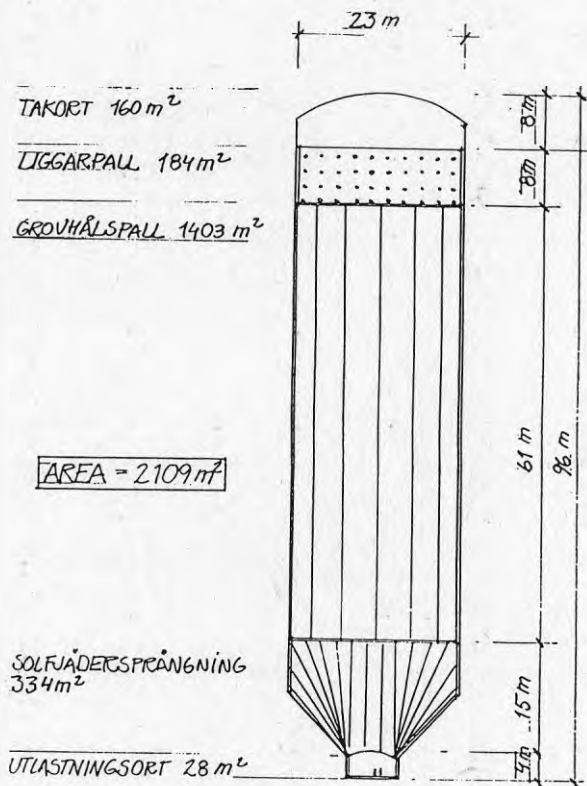


Fig. 1. Brytningsmoment som ingår i utsprängningen.

Sprängstensmassorna i bergrummet stabiliserar rummet samtidigt som de har en god värmelagringskapacitet, Figur 2. Den huvudsakliga värmekapaciteten har dock vattnet, som volymmässigt utgör mer än 50% av lagervolymen. Den stora vattenvolymen och blockens begränsade storlek (som kontrolleras vid sprängningen) gör att lagret kan laddas och urladdas snabbt allteftersom tillgång och värmebehov finns.

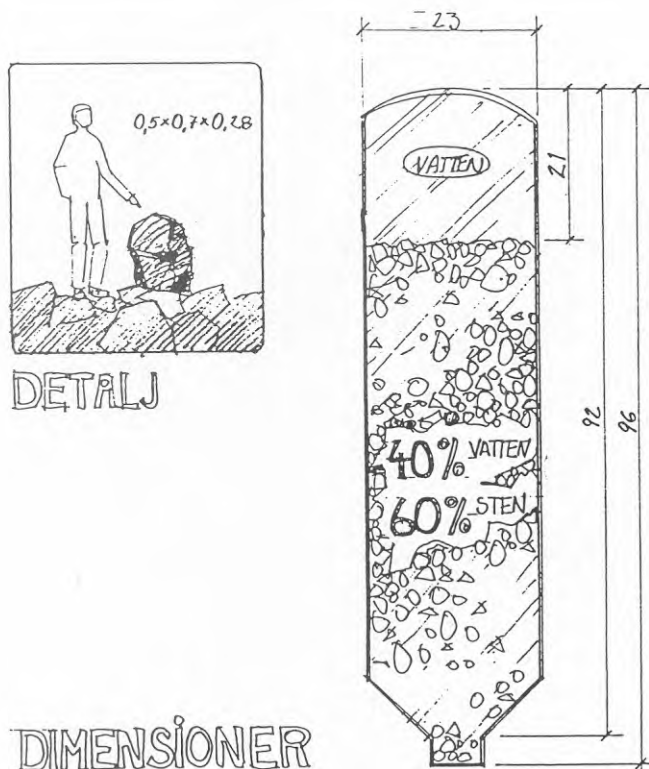


Fig. 2. Tvärsektion av ett lagerskepp.

Varje lagerskepp är 105 m långt.

Den totala vattenvolymen är 53%.

Detaljen visar medelstenstorleken i lagret.

Som visas i Figur 3, består anläggningen av en 900 m nedfarts-tunnel, fyra 105 m långa sprängstensfyllda bergrum med tvärsnittet 23 x 96 m, ett vertikalt schakt, ett pumprum/värmeväxlarrum beläget under jord samt förbindelsetunnlar. Den 890.000 m³ stora lagringsvolymen upptar i plan en yta av endast 105 x 150 m.

Lagret fungerar som en skicktackumulatör, där det varma vattnet "flyter" ovanpå det kalla. Vid inladdning sjunker varmvattnet mot botten, där kallt vatten tas in. Vid urladdning reverseras pumpningen. Genom att bergrumstaken ligger på 35 m djup, 20 m under grundvattenytan, kan övertryck på 2 bar tolereras. Temperaturer på upp till 120^o kan därför användas.

Enligt förslaget arbetar lagret med renat avloppsvatten från Rya, se Figur 4.

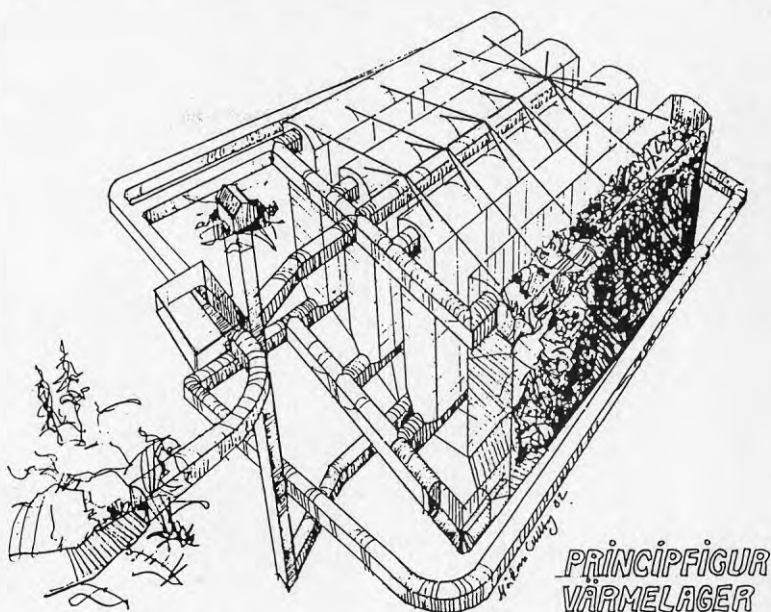


Fig. 3. Färdigt lager med pumprum/värmeväxlarrum under jord. In- och uttag av vatten sker genom borrhål från rörtunneln i lagrets topp och botten.

Inlagring såväl som utlagring sker i följande steg:

- (1) Efter första fyllningen med Ryavatten vid $+10^{\circ}\text{C}$ ökas temperaturen till $+40$ ä 50°C genom värmeväxling mot fjärrvärmenätets returledning, eller alternativt mot spillvärme mot raffinaderierna (behöver ej värmepumpas).
- (2) Härifrån höjs temperaturen till ca 110°C genom värmeväxling mot relativt högvärdig spillvärme från BP/Volvo-systemet. Visst tillskott av värme direkt från BP erfordras.
- (3) Härefter följer ca 11 veckors vilopaus, 15/9 - 10/12, varvid medeltemperaturen i lagret sjunker till 102°C .
- (4) Under tiden 10 december - 12 februari sänks temperaturen i lagret från 102°C till ca 25°C genom värmeväxling mot fjärrvärmenätet. Detta vatten blandas sedan med ingående vatten till Rya-värmepumparna.
- (5) Urladdningsperioden avslutas 12 februari - 15 mars med att kvarstående värme i lagret, med varierande temperaturer från 20°C vid periodens början till ca 7°C vid dess slut, blandas ut med avloppsvattnet.

Fördelen med inblandning av varmt spillvatten före värmepumparna under den angivna tiden ligger i att dessas förångare då har kapacitet att uppta den tillsatta, extra värmemängden och lyfta

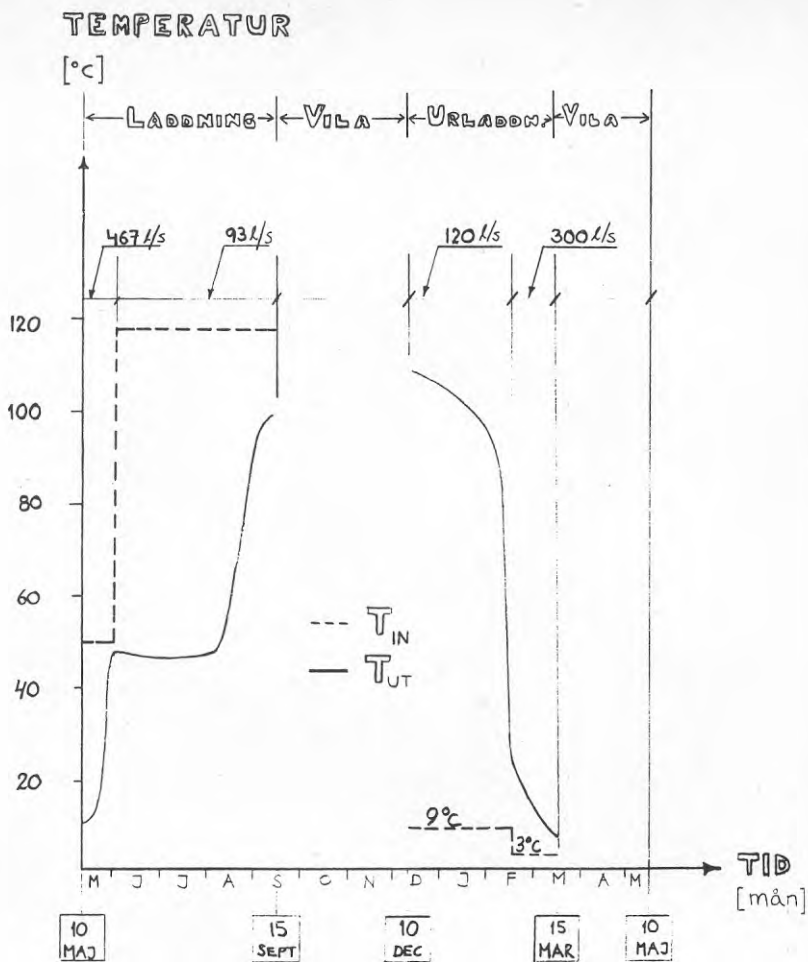


Fig. 4. Årscykel.
Temperatur hos inmatat och uttaget vatten.

den till den högre temperaturen i kondensorn. Genom ett enkelt regelsystem optimeras mixningen med hänsyn till rådande spillvattenflöde och temperatur, Figur 5, samt till lagertemperaturen, så att bästa effektbättring hos värmepumparna uppnås. Inkoppling av lagret vid de olika driftsförhållandena framgår av Figurerna 6-8.

Maximalt utnyttjat skulle värmepumpsystemet i Rya kunna producera 294 GWh under tiden 10 december - 15 mars och då ersätta olja. Den tillgängliga värmemängden i avloppsvattnet är dock endast 218 GWh eftersom medeltemperaturen är så låg som ca 8-9°C under denna tidsperiod. Mot slutet av perioden är dessutom flödet tidvis mycket lågt. Lagret fungerar då även som vattenreserv till värmepumparna. Denna reserv motsvarar ca 800.000 m³ vatten, eller ca 300 l/s under drygt en månad.

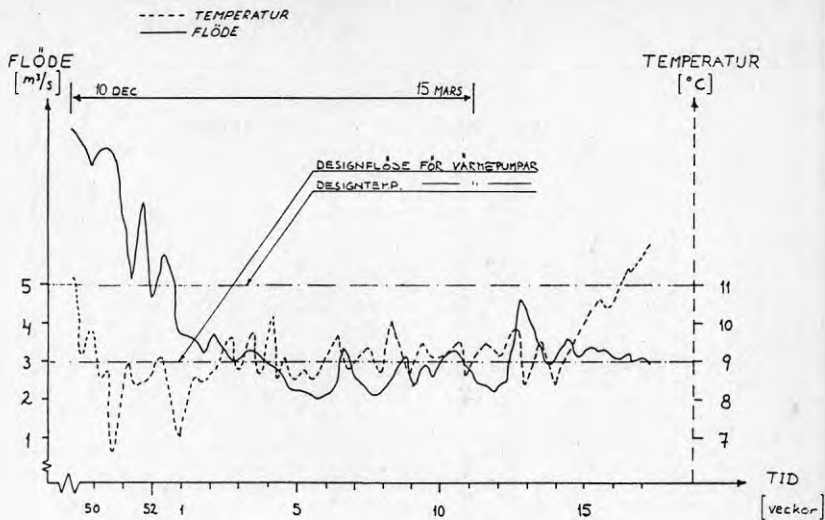


Fig. 5. Temperatur och flöde hos avloppsnätet år 1980.

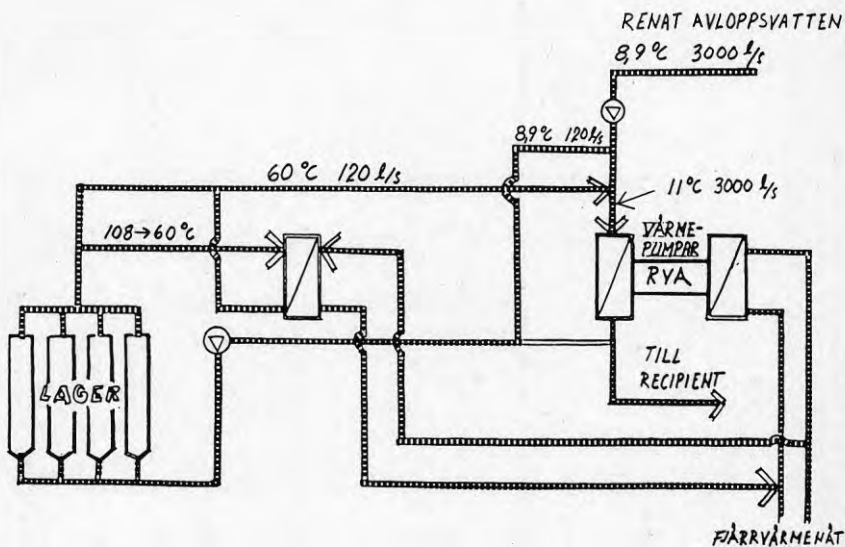


Fig. 6. Värmeväxling av högvärdig värme till fjärrvärmenät och samtidig uppvärmning av avloppsvatten till värmepumpar.

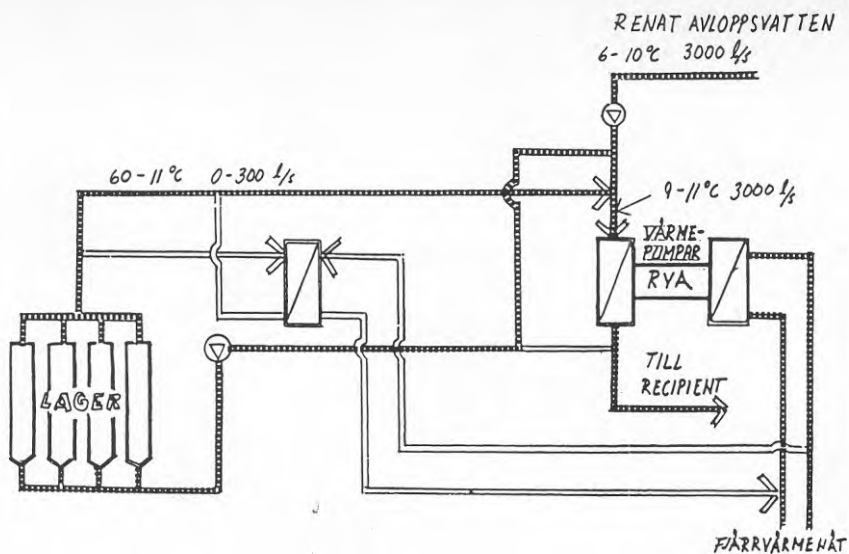


Fig. 7. Lågvärdig värme från lagret blandas med ingående vatten till värmepumpar.

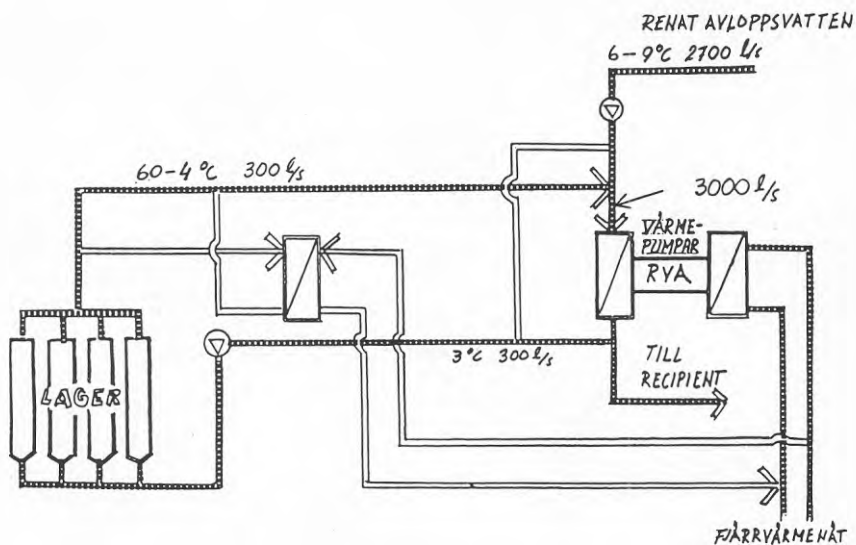


Fig. 8. Lagret ersätter temperatur och vattenvolym när tillrinningen till avloppsnätet sinar.

Genom utspädning av avloppsvattnet med uppvärmt vatten från värmelagret, kan värmepumparnas produktionskapacitet tas i anspråk för att producera ytterligare 42 GWh värme under perioden 10 december - 15 mars. Därvid inbesparas ca 4.200 m³ olja.

Med oljeprisuppräkning blir värdet (per 1985) av den olja som inbesparas under 1985 - 1994 totalt 295 MKr, vilket kraftigt överstiger kapital- och driftskostnaderna för värmelagret. Dessa uppgår under drifttiden till ca 128 MKr. Inget restvärde har förutsatts.

Värmelagret synes därför såväl tekniskt som ekonomiskt vara en mycket lämplig investering för Göteborgsenergi.

Per Ingre

1983-01-03

BFR:S EXPERTSEMINARIUM OM HÖGTEMPERATURLAGRING
UNDER MARK, GÖTEBORG, 1 - 2 DECEMBER 1982

Manuskript på anförande Lagringsstudie
Göteborg - Borrhålslager

Bild 1

Inledningsvis vill jag visa principen för borrhålslager. Med små ingrepp utnyttjas en stor bergvolym för värmelagring. I Göteborgsstudien är kostnaden för borrhålsdelen inklusive ledrör och fördelningsrör ca 12 kr/m^3 bergvolym.

Bild 2

Den föreslagna konstruktionen består av tre koncentriska tunnlar med bredden 10 m och medelhöjden 6.5 m ordnade i form av en fyrkant omkring ett centralt schakt. Berget mellan tunnlarna är 10 m brett. Medelsidolängden av tunnlarna är 40 m för den innersta tunneln, 80 m för den mellersta och 120 m för den yttersta. Totalt uppnås på detta sätt 960 m tunnellängd.

Höjden i varje tunnel är tillräcklig för att kunna arbeta med en standard-borrmaskin, 5 m hög. Med en sådan maskin anläggs 150 m djupa borrhål med diametern 115 mm i 5 rader i varje tunnel. Avståndet mellan raderna är 2.25 m vid tunnelnivån och 4.5 m vid borrhålens botten. Eftersom värmen som leds från borrhålen till berget kan transporteras genom ett avstånd på ca 2.4 m från den yttersta kanalraden i varje skepp, når man hela bergvolymen med undantag av små kilar mellan skeppen. Den verksamma delen av bergvolymen (exklusive tunnlarna och berget omkring tunnlarna) är $2.65 \times 10^6 \text{ m}^3$. Tunnlarna ligger helt under grundvattennivån, vilket i det aktuella förläggingsområdet innebär ca 20 m under marknivå. Därigenom uppnås tryckutjämning mellan grundvattnet och vattnet i borrhålen,

1983-01-03

vilket begränsar riskerna för läckage. Av denna anledning kan oinklädda borrhål utan foder användas - förutsatt att man undviker större sprickzoner och injekterar i zoner där viss sprickbildning förekommer. Tunnlarnas tak är förstärkta för att undvika risken för stenras. Vill man i ett visst stadium utöka lagrets kapacitet adderas en tunnel 4 utanför tunnlarna 1, 2 och 3 som den streckade linjen på bilden visar. Tunnlarnas längd och volym ökar då med 67 % och urladdningsenergin med ungefär samma procentsats. Inga ytterligare investeringar i värmeväxlare, pumpar eller anslutningsledningar krävs.

Bild 3

Figuren visar principen för rördragningen. En förbindelsetunnel leder rören från utrustningskammaren till de olika tunnlarna. Rörledningssystemen som står i direkt förbindelse med vattnet i tunnlarna avslutas i tunnelmynningarna i punkterna A_1 , A_2 , A_3 , B_1 , B_2 , B_3 . För ledrören till kanalerna däremot matas vattnet från ledningarna i förbindelsetunneln till en rörslinga i varje tunnel vid punkterna A_1 , A_2 , A_3 , B_1 , B_2 , B_3 . Vattnet pumpas ut längs pilarna vid laddning. Rören består av rostfritt stål 2343 (samma material som valts för rörsystemet i Avestabergrummet), för att undvika korrosionsproblem. Från de centrala rörslingorna i varje tunnel fördelas vattnet till tunnlarnas ledrör genom flexibla PEX-rör av liten diameter. Själva ledrören av PEX har en utvändigt diameter av 90 mm. Spridare håller avståndet från borrhålsväggen. Genom att använda upprullbara flexibla rör i ett stycke kan installationen genomföras på mycket kort tid.

1983-01-03

Värmeväxlarna är av platt typ, med rostfria plattor av 2343 (samma material som för Avesta-bergrummet). Fyra enheter med en total konduktans av $12 \text{ MW}/^{\circ}\text{C}$ har förutsatts.

Ventilarrangemanget omkring pumparna medger att flödesriktningen ändras vid övergång från laddning till urladdning.

Bild 4

Figuren visar ett principschema över rörledningssystemet. Värmeväxlare skiljer fjärrvärmevattnet (primärsystemet) från vattnet i kontakt med tunnlarna och borrhålen (sekundärsystemet). Tunnelarna nås av sekundärledningar vid tre punkter:

- a) Ledrören till kanalerna dit sekundärvattnet pumpas vid laddning av borrhåls-lagret.
- b) Tunnelarnas golvnivå från vilken vattnet återförs vid laddning av borrhåls-lagret.
- c) Tunnelarnas taknivå dit vatten pumpas när själva tunnelarna skall laddas med varmvatten.

Med detta principschema kan borrhålen användas som långtidslager och tunnelarna helt oberoende som korttidslager. Vid laddning av tunnelarna med hetvatten genom ledningssystem c) suger man ut kallare vatten från tunnelarnas nedre del genom ledningssystem b). Vid urladdning av borrhåls-lagret eller tunnelarna reverseras strömnings-riktningen. Som synes på schemat är varje tunnel ansluten individuellt med egna ventiler som ligger i den luftfyllda utrustningskammare där även värmeväxlarna och pumparna placeras. Den finns under grundvattennivån för att undvika kavitationsproblem i pumparna.

1983-01-03

Bild 5

Diagrammet visar årstidsvariationerna i medel-effektbehovet år 1990 samt fjärrvärmevattnets returtemperatur för Göteborgs fjärrvärmenät. Dessutom har inverkan av en kall period redovisats med brutna linjer. Av figuren framgår att det finns ett tillgängligt överskott av spillvärme under sommarhalvåret, vilket genom lagring skulle kunna utnyttjas under årets kallare period. De av energiverket för denna utredning specificerade laddnings- och urladdningsperioderna finns angivna i figuren. Lagret utnyttjas som korttidslager, då medeleffekten är ungefär den samma som antingen max spillvärmeeffekt eller max kol- och spillvärmeeffekt. Vid dessa tillfällen kan värmebehovets dygnsvariationer utnyttjas för att ersätta olja eller kol med kol respektive spillvärme.

Bild 6

Av figuren framgår systemlösningen för laddning av lagret vid 28 MW, då spillvärmen kommer från BP-Volvo och BP-1, vilka är de spillvärmekällor som har högsta temperaturen av de tillgängliga. För Shell I och II höjs temperaturen från det normala (90°C) till 100°C på bekostnad av en viss minskning i den återvunna effekten (från normalt 80 MW till 77 MW). Sålunda blir $31 - 3 = 28$ MW disponibelt för laddning av lagret om 80 MW skall tillföras fjärrvärmesystemet. Medeltemperaturen för vattnet som leds till lagrets primärsida är 104°C . Med det för lagret valda dimensionerade vattenflödet, 4 000 t/h och den maximala tillåtna temperaturen för PEX-rören 95°C , erhålls en inloppstemperatur på 95°C till lagrets sekundärsida och en utloppstemperatur på 89°C .

I medeltal fordras en laddningsenergi på ca 78 GWh/år för den för lagret aktuella urladdningsenergin. Vid en laddningstid på 3 000 h/år

1983-01-03

fordras sålunda en medeleffekt på 26 MW. Effekten varierar dock under laddningen, dvs börjar med ett relativt högt värde när lagret fortfarande är kallt så att stora temperaturskillnader är disponibla för värmeöverföringen, för att sedan avta successivt. I början av laddningscykeln erfordras sålunda större effekt än 28 MW, särskilt under de första åren då omgivande berg ännu inte är anvärmt och förlusterna är störst. En högre laddningseffekt uppnås genom att utnyttja värmepumparna vid Rya.

Bild 7

Kopplingen för urladdning av magasinet. Ett returvattenflöde motsvarande lagrets dimensionerade flöde, 4 000 t/h, strömmar genom lagrets primärsida, och ett lika stort flöde genom sekundärsidan. Vid t ex 20 MW urladdningseffekt värms vattnet 4°C, från t ex 55° till 59°C. Det förvärmade (59°C) vattnet delas i två flöden, av vilket det ena sänds vidare till Shell I och II via ledningen Rya - Shell och det andra passerar värmepumparna vid Rya. Vid behov eftervärms vattnet som levereras av värmepumparna till fjärrvärmesystemets framledningstemperatur genom den oljeeldade pannan vid Rya.

Observera att för borrhålslagret, till skillnad från de två andra redovisade lagertyperna, behövs inte någon värmepump under urladdning.

Bild 8

Årscykeln som använts vid de värmetekniska beräkningarna för att bestämma lagrets laddnings- och urladdningsenergi samt värmeförluster har gjorts upp med ledning av de förutsättningar som erhållits av energiverken. Beräkningarna har utförts med hjälp av ett dataprogram utvecklat vid Institutionen för matematisk fysik vid Lunds universitet. Programmet har använts på en

1983-01-03

cylindrisk bergvolym med samma effektiva volym ($2.65 \times 10^6 \text{ m}^3$) som för referenslagret exklusive tunnlar och med 150 meters djup. Databeräkningarna har sedan korrigerats manuellt för skillnader mellan det verkliga lagret och beräkningsmodellen.

Bild 9

Resultatet av beräkningarna för en 16-årsperiod framgår av figuren som visar de okorrigerade värdena. Korrigerat visar det sig att medelurladdningsenergin för 10 år är 61.1 GWh/år samt att förlusterna uppgår till 12.5 GWh/år.

Bild 10

Den tidigare diskuterade möjligheten att utnyttja lagrets tunneldel som korttidslager illustreras av denna figur. Korttidslagring kan utnyttjas under 99 dygn för ersättning av olja med kol samt 40 dygn för ersättning av kol med spillvärme. Den möjliga olje- respektive kolersättningen har beräknats till 10.3 respektive 2.9 GWh/år till ett nuvärde av 6 MSEK för 10-årsperioden.

Bild 11

Bränslebesparingen genom långtidslagring för samma 10-årsperiod framgår av denna tabell. Med korrigerad och fördelning av urladdningsenergin på olja och kol fås nuvärdet till 69 MSEK.

Bild 12

En sammanställning av investeringskostnaderna beräknade i prisnivå 1982 redovisas i tabell, vilket visar att den beräknade totalkostnaden uppgår till 54.3 MSEK då hänsyn tagits till ränta under en beräknad byggtid på 18 månader. Årskostnader för drift och underhåll har antagits till 0.5 % för bergtekniska arbeten, 1.0 % för rörledningar och 2.0 % för värmepumpar, pumpar och ventiler. Om hänsyn tas till drivkraft till värmepumparnas elkonsumtion vid laddning fås årskostnaden till 7.96 MSEK vid en avskrivningstid på 10 år.

1983-01-03

Nuvärdet av investeringar samt drift och underhåll under 10 år blir 52.3 MSEK.

Investeringskostnaden per kWh för urladdningsenergin blir för referenslagret 0.89 SEK/kWh, vilket är under den av BFR uppsatta målsättningen. Observera att detta åstadkommit med en temperatur av ingående fjärrvärmevatten för laddning på endast 104°C , en temperatur som fem olika spillvärmekällor kan leverera, och fjärrvärmesystemets returvattentemperatur för urladdning (högst 48°C), vilket gör lagret oberoende av värmepumpar vid urladdning. Skillnaden mellan dessa temperaturer (56°C) är mindre än hälften av den som de övriga lagren beräknats för.

Bild 1

BORRHALLSLAGER - SMA, BILLIGÄ
INGREPP I BERGET

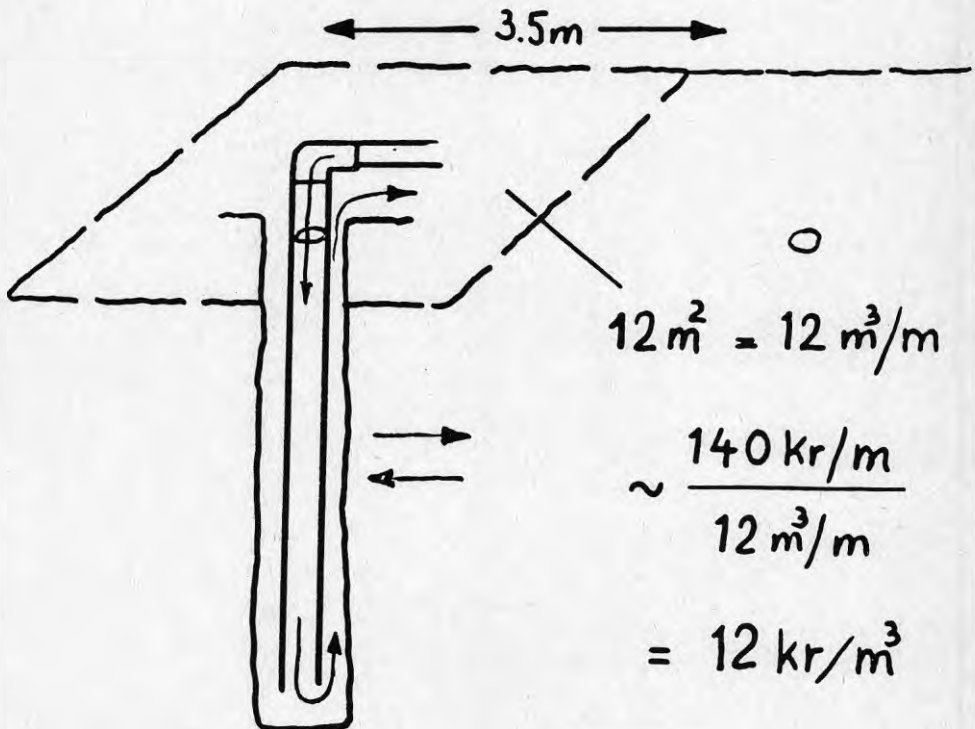
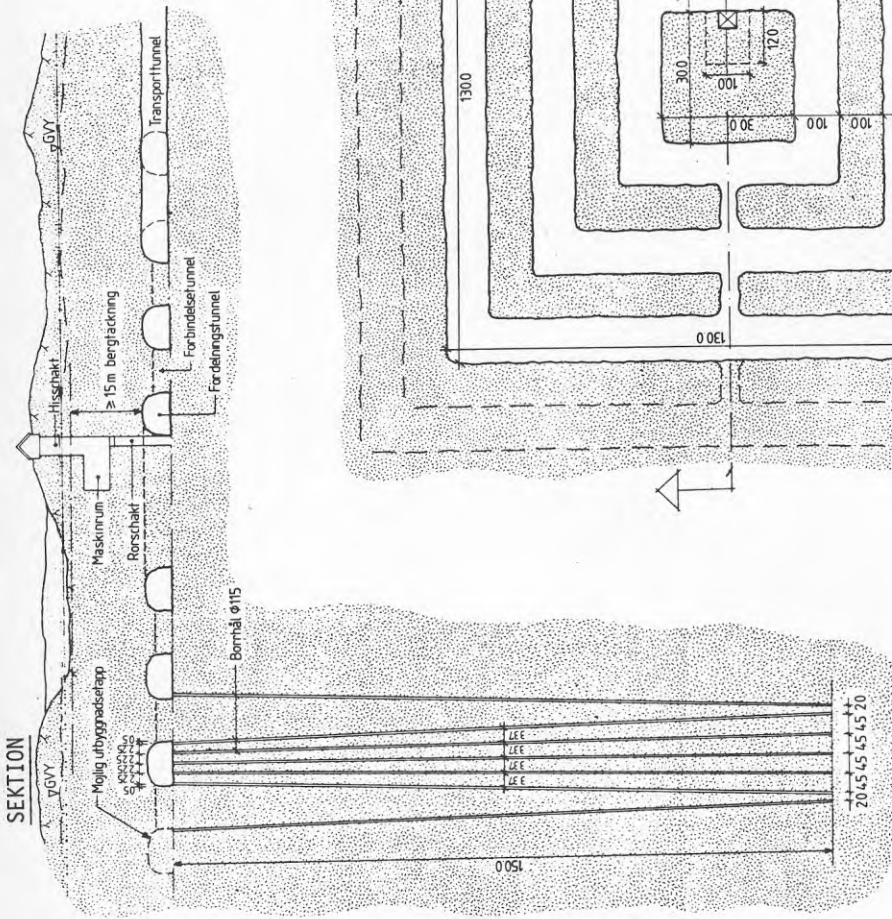
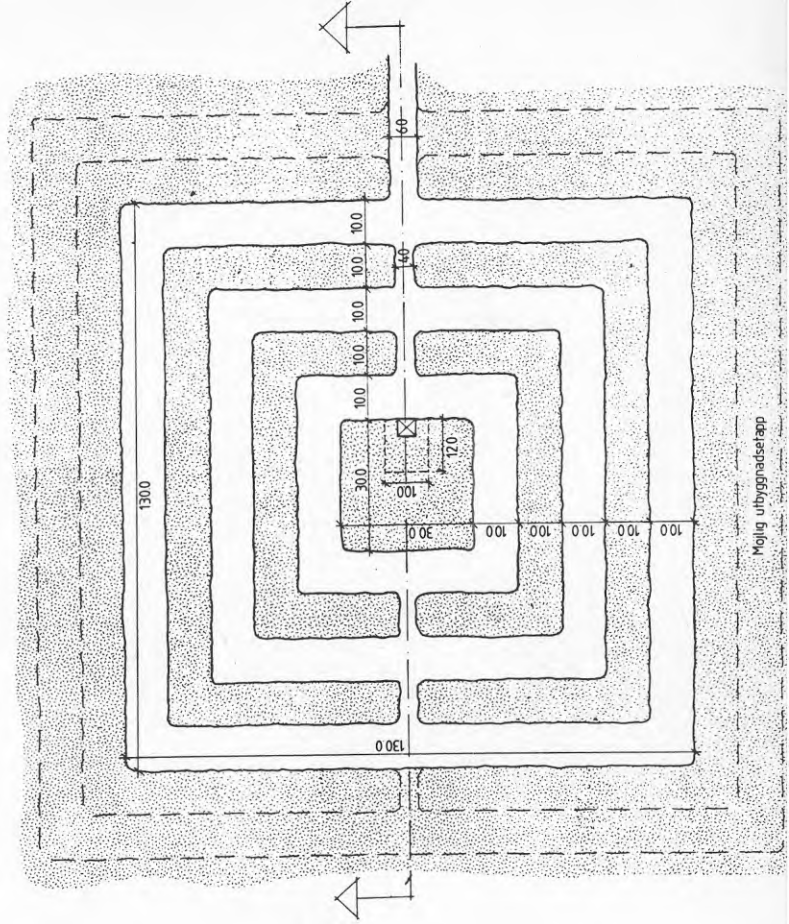


Bild 2



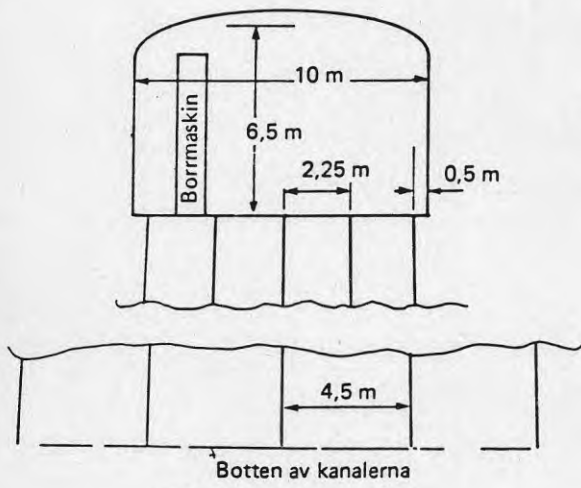
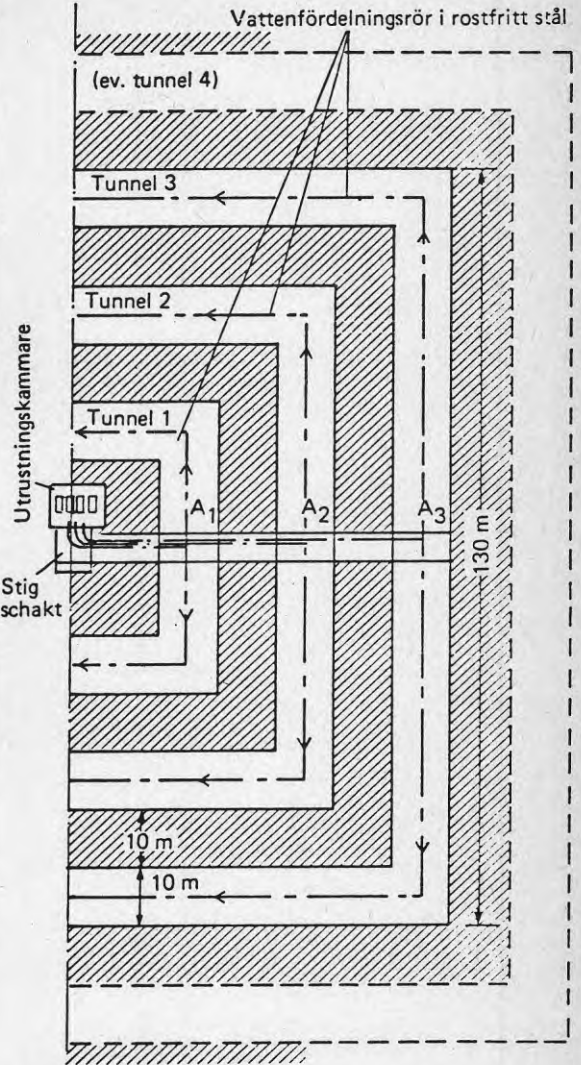
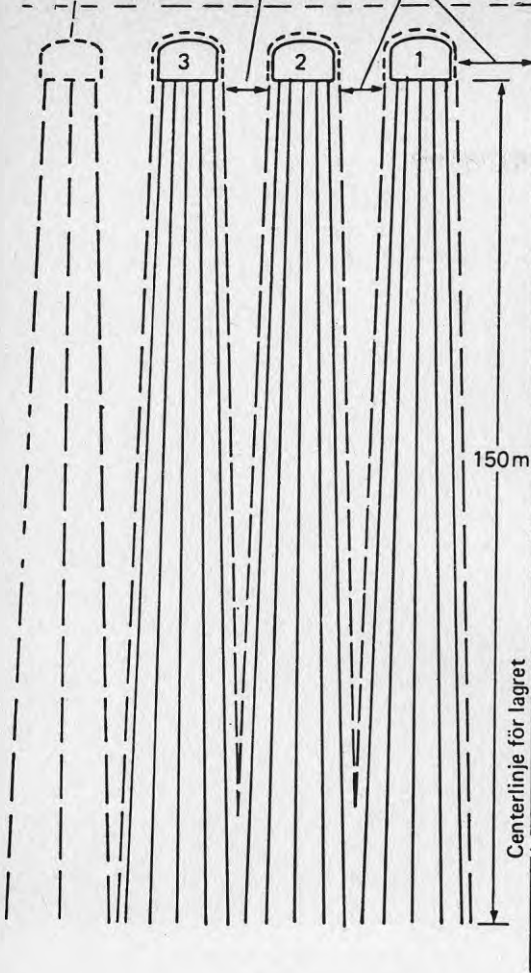
PLAN



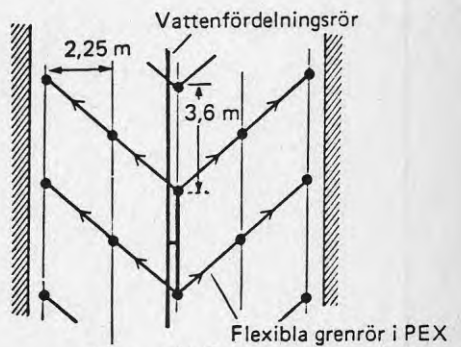
Extra tunnel för större lager
Ej utnyttjad del av bergvolymen

Grundvattennivå

Bild 3

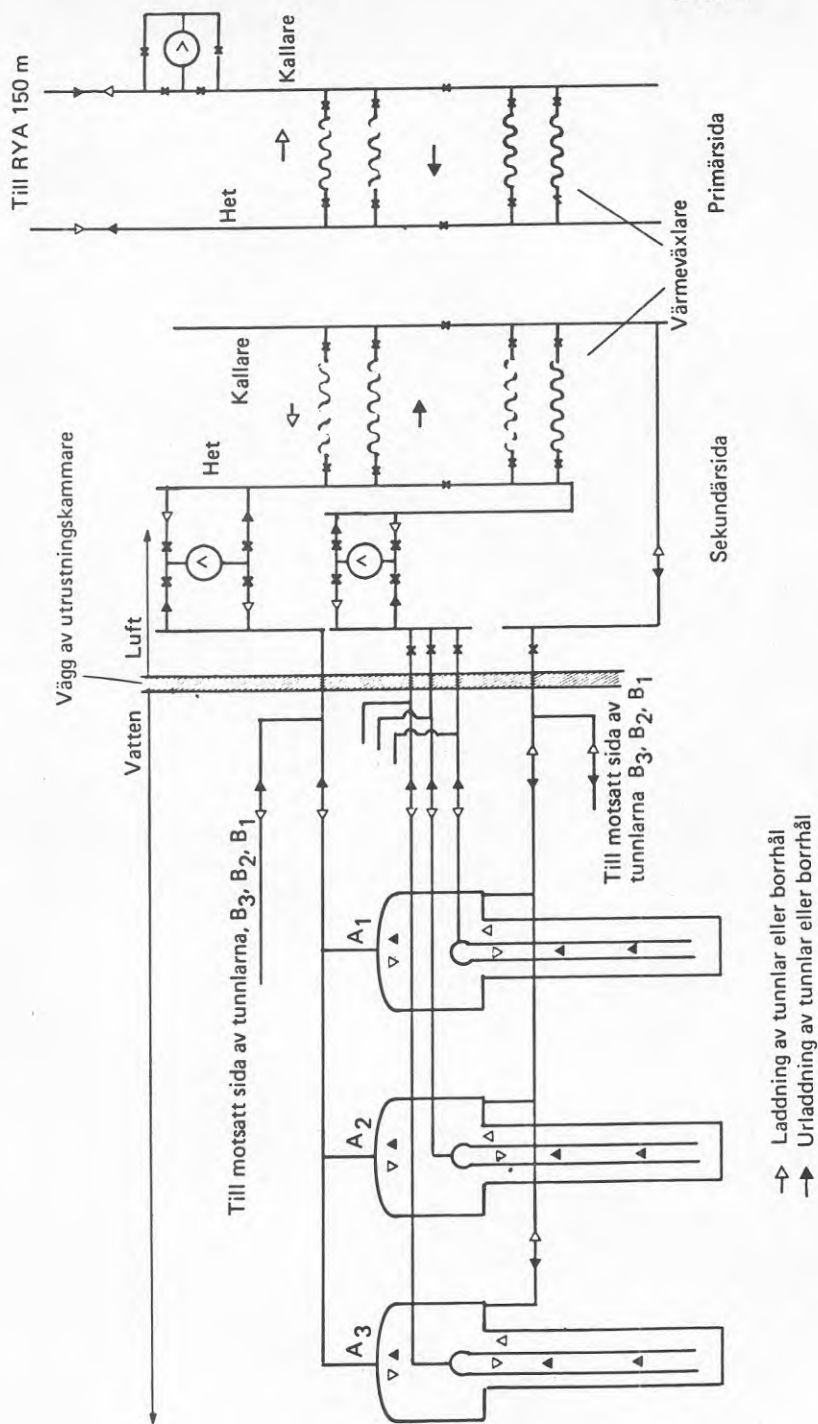


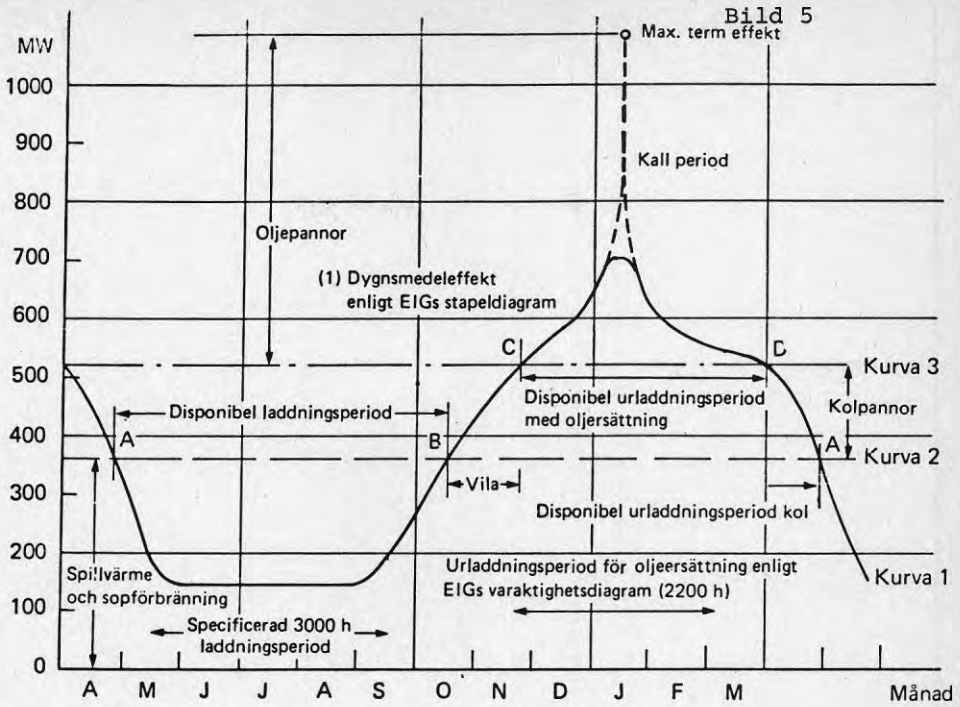
Tvårsnitt genom halva lagret (principskiss)



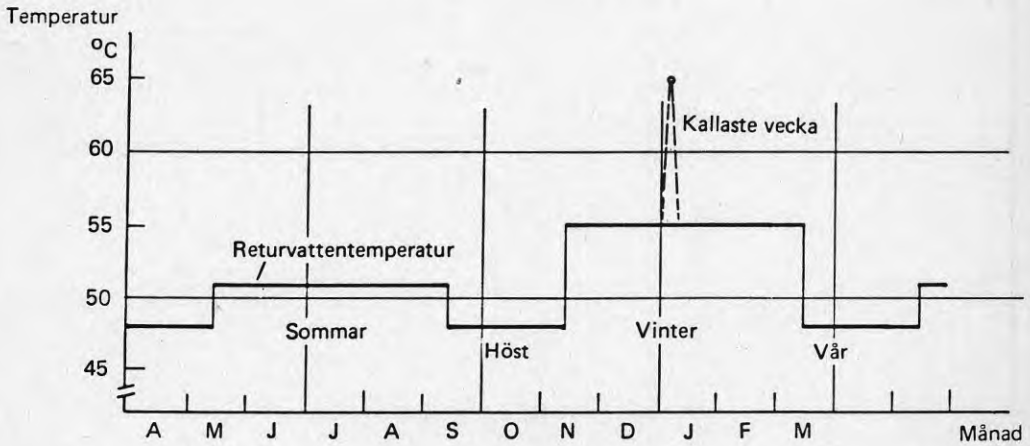
Plan sektion genom tunnarna (halva lagret) (principskiss)

Bild 4





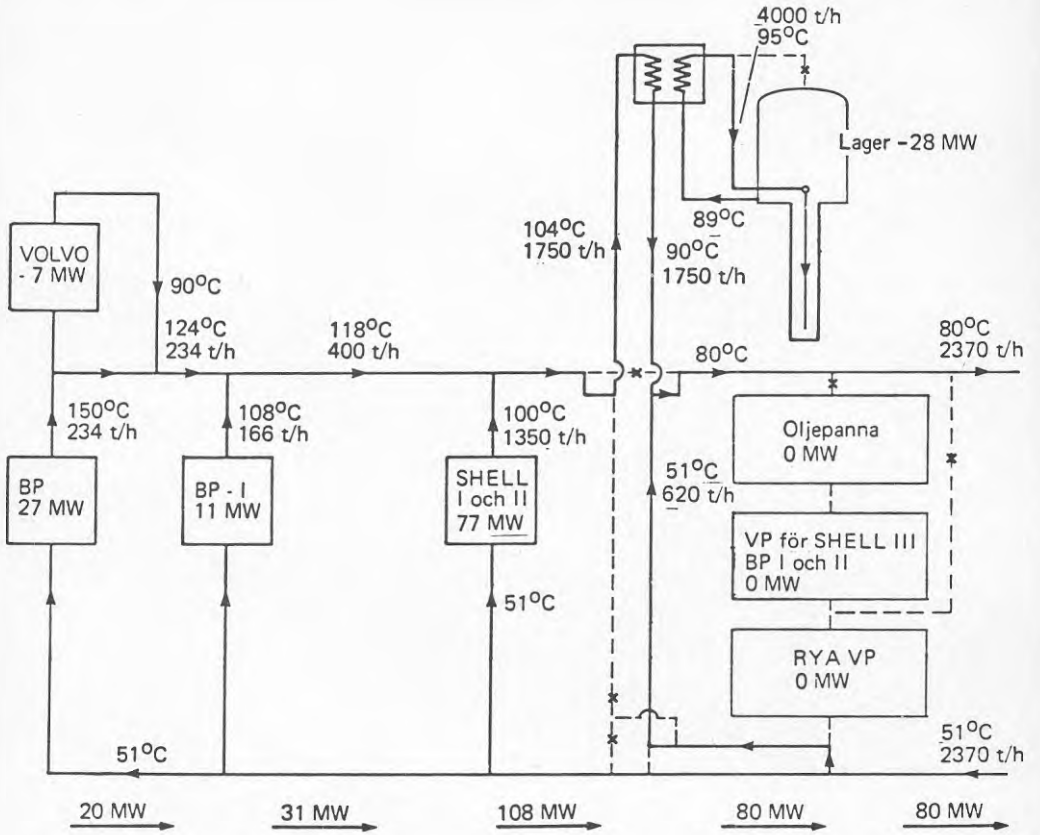
a) Värmebehovet och produktionseffekt



b) Fjärrvärmesystemets returvattentemperatur

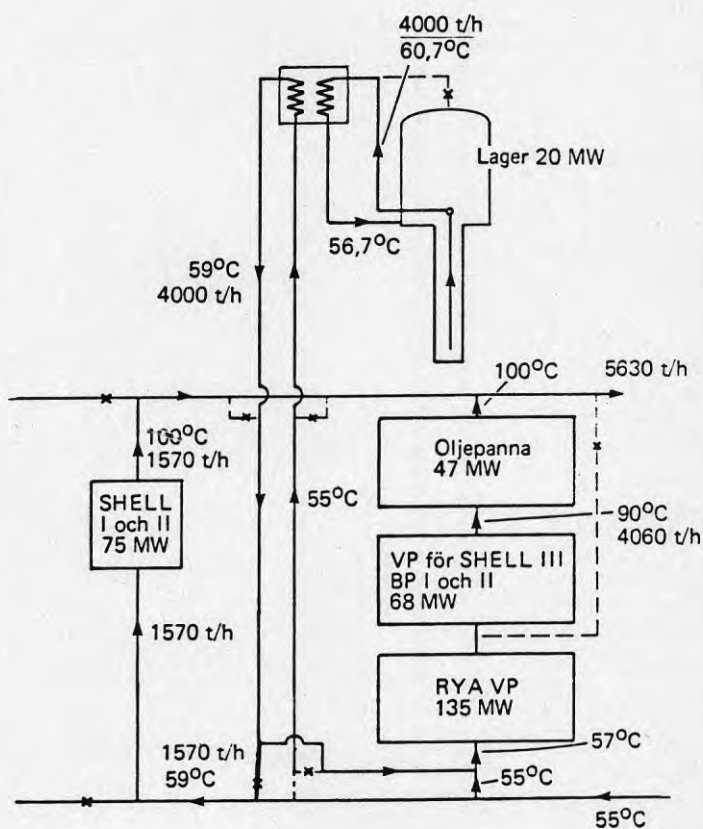
Årstidsvariationer

Bild 6



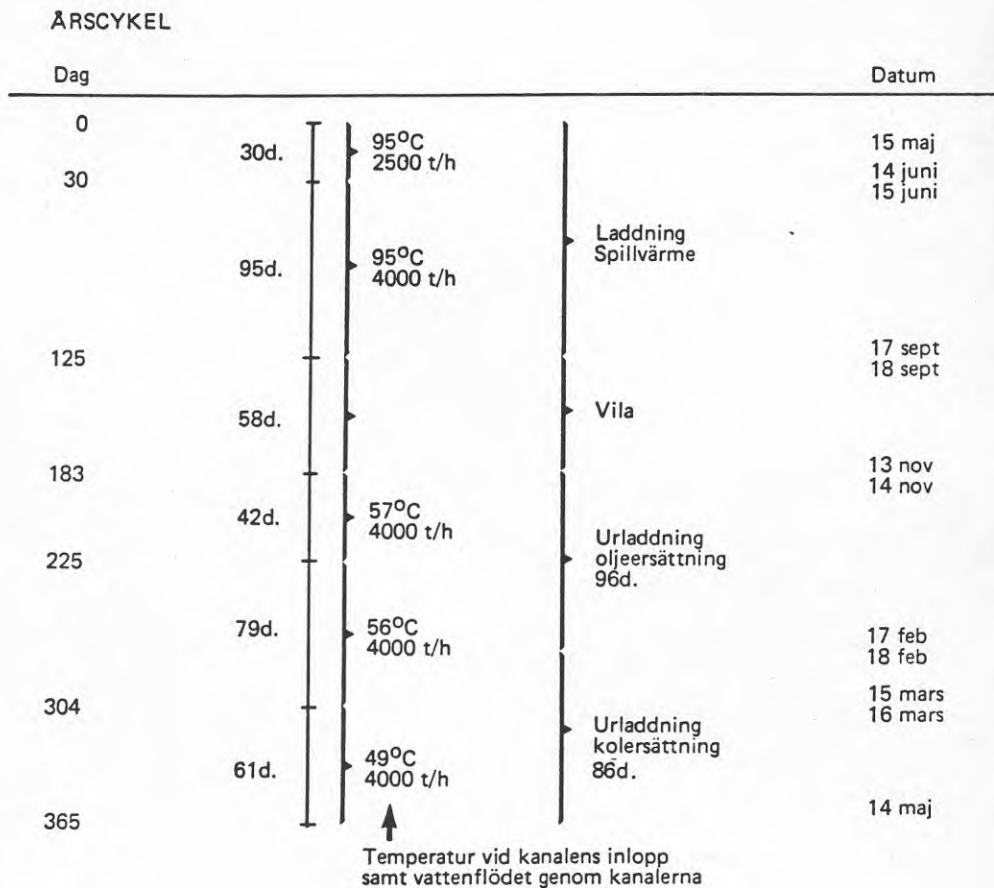
Laddning vid största effekt utan värmepump = 28 MW

Bild 7



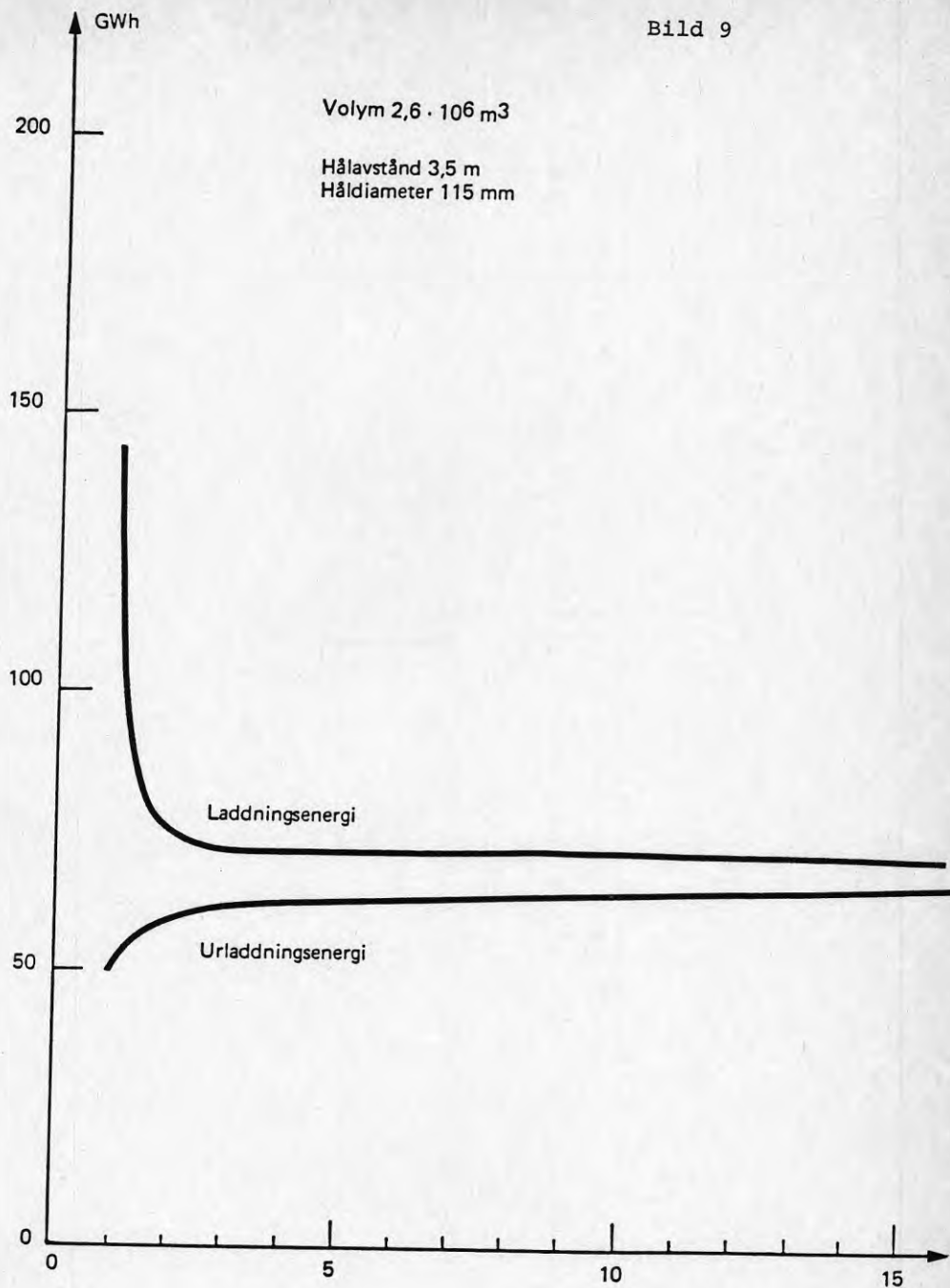
Urladdning vid 20 MW

Bild 8



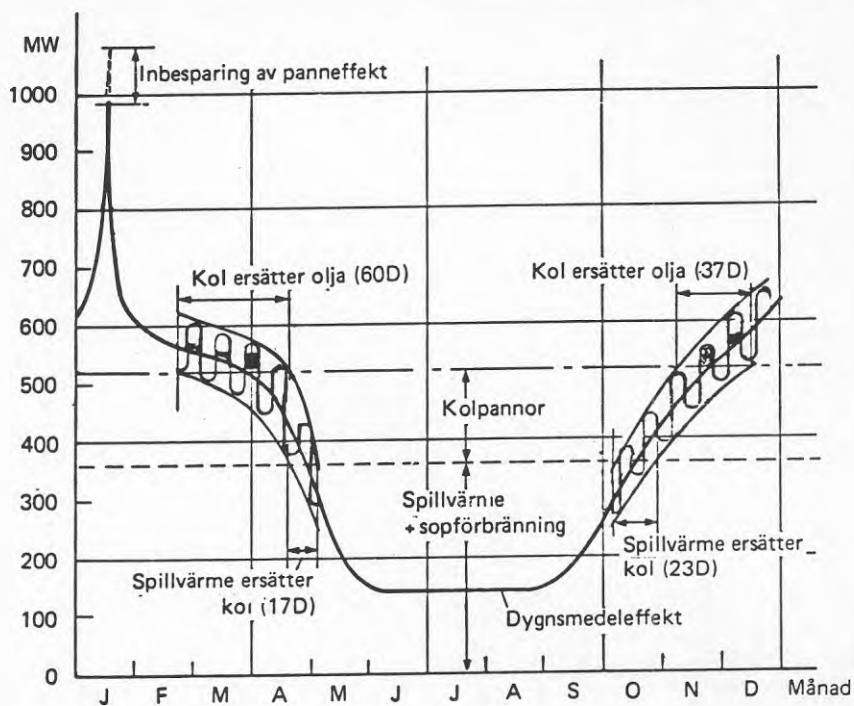
Årscykel som ligger till grund för databeräkningar.
Laddning, urladdning, temperatur och flöden samt
ersatta energislag

Bild 9



Resultat av dataprogramkörning för cylindriskt lager.
Bergvolym $2,65 \times 10^6 \text{ m}^3$, 3,5 m kanaldelning (se Tabell 2)

Bild 10



Möjlig minskning i bränslekostnad genom korttidslagring

Bild 11

Tabell Urladdningsenergin och värdet av bränslebesparing

	Totalt	Andel	Andel
	GWh/år	olja	kol
		GWh/år	GWh/år
1. Urladdningsenergi, medelvärde under de första 10 driftåren enligt Tabell 2	61.5	46.3	15.2
2. Korrektioner för:			
2.1 variationer i kanaldelning	-3.2	-2.4	-0.8
2.2 ökande värmeförluster pga grundvattenflöden o större randyta	-1.2	-0.9	-0.3
2.3 energi lagrad i vatten i huvudtunnlar	+3.0	+2.5	0.5
2.4 energi lagrad i berg omkring huvudtunnlar	+1.0	+0.8	0.2
Total korrektion	-0.4	0	-0.4
3. Korrigerad urladdningsenergi	61.1	46.3	14.8
4. Ekvivalent 1982 års värde av bränslebesparing	kr/MWh	155	95.3
5. Värdet av bränslebesparing	Mkr/år	7.18	1.41
Totalt		8.59	
6. Värdet av bränslets medelrealpris 1985/86 till 1994/95:			
Beaktas 3 års realprisstegringar för bränslet till start av urladdningen första året och i medeltal 5 år därefter till mittpunkten av den 10-åriga driftperioden, ökar bränslebesparingens värde med ca faktorn $(1.11/1.08)^8$	Mkr/år		13.2
7. Nuvärdet 1982 av bränslebesparing	Mkr		69
$10 \times 13.2 \times (1.08/1.14)^8$			
(Eller $85.9 \text{ Mkr} (1.11/1.14)^8$)			

Tabell Investerings- kapital- och driftkostnader

	Berg- tekniska arbeten	Rörled- ningar, ledrör	Värme- växlare, pumpar,	Övrigt & tota-
A. INVESTERINGAR, Mkr				
1. Kanaler, 200 000 m				
a) Borrhål à 96 kr/m	19.2			19.2
b) Ledrör, spridare, Installation à 37 kr/m		7.4		7.4
2. Tunnlar, takförstärkningar, injektering	13.0			13.0
3. Fördelningsrör*		2.1		2.1
4. Värmeväxlare*, 12 MW/°C à 100 kr			1.2	1.2
5. Pumpar och ventiler*			3.5	3.5
6. Anslutningsledning (2 rör), 150 m à 7 200 kr			1.1	1.1
7. Projektering, upphandling, kontroll				2.0
8. Oförutsett (5 %)	1.5	0.6	0.3	2.5
9. Totalt	33.7	10.1	6.1	52.1
10. Realränta under 18 månaders byggnadstid, 5.55 % x 1.5/2 = 4.16 %	1.4	0.4	0.3	2.2
11 Totalt inklusive ränta under byggnadstiden	35.1	10.5	6.4	54.3
* inklusive installation				

Bild 12.2

Tabell	Forts	Berg- tekniska arbeten	Rörled- ningar, ledrör	Värme- växlare, pumpar, ventiler	Övrigt & totalt
B. ÅRSKOSTNADER Mkr/År					
12.	Kapitalkostnad vid 5.55 % real- ränta, 10 år = 13.3 %/år av 54.3 Mkr				7.23
13.	Underhåll, a) %/år b) Mkr/år	0.5 0.18	1.0 0.10	2.0 0.13	0.41
14.	Värmepumpsel (2.4×10^3 MWh x 140 kr/Mwh)/ 1.01^6				<u>0.32</u>
15.	Totala årskostnader 1985-95				7.96
C. NUVÄRDET: 1982 (Mkr)					
17.	Investering $54.3 \times 1.0555^{-2.5}$				47.5
18.	Underhåll $10 \times 0.41 \times 1.0555^{-8}$				2.7
19.	Driftel $10 \times 0.32 \times 1.0555^{-8}$				<u>2.1</u>
20.	TOTALT (17) + (18) + (19) eller (15) x 10×1.0555^{-8}				52.3
D. SPECIFIK KOSTNAD					
1.	Investeringskostnad per kWh urladd- ningsenergi: 54.3 Mkr/61.1 GWh				<u>0.89 kr/kWh</u>

SYNPUNKTER PÅ HÖGTEMPERATURLAGER I ALLMÄNHET OCH SÅDANA FÖR
ENERGIVERKEN I GÖTEBORG I SYNNERHET

Gösta Rosenblad, Prof em
Jordvärmegruppen
Chalmers tekniska högskola

Sammanfattning

De årliga läckageförlusterna i ett högtemperaturlager är givetvis av stor betydelse för funktionen. Emellertid förekommer i sådana lager också förluster av typen inre termodynamiska, dvs förekommande också i helt isolerade system. I anslutning till tre olika föreslagna typer av högtemperaturlager avsedda att lösa samma lagringsproblem mellan oljeraffinaderierna i Göteborg och Energiwerken därsammastädes behandlas mera ingående verkan av sådana inre termodynamiska förluster. För en av lagertyperna, där ett detaljerat underlag föreligger, har verkan av dessa inre förluster närmare beräknats. De visar sig vara av den storleksordningen att de bidrar till att sänka utgående värmes kvalitet mer än dubbelt så starkt som lagrets värmeläckageförluster gör. Det är därför anmärkningsvärt att denna typ av förluster aldrig tidigare har beaktats och kvantifierats eller ens diskuterats.

Här nedan framförda synpunkter är resultat av deltagande i symposium om högtemperaturlager den 1 och 2 december 1982 i Göteborg och i samband därmed gjorda noteringar. Dessutom har jag haft tillfälle att ta del av Studsvik Report/EI-82/190: "Sunstorelager för lagring av spillvärme i Göteborg", Margen och Ingre, daterad 1982-12-06.

Större delen av här framförda synpunkter har mognat först efter genomgång och bearbetning av materialet enligt ovan. De förelåg vid seminariet långtifrån i den form, som följer, och har alltså inte framförts vid seminariet.

Även om det vid konferensen anfördes kostnadsuppgifter för de tre klart olika och därför ur ekonomisk synpunkt svårjämförbara alternativen så skall här icke alls ställning tas till kostnadsfrågor. I stället skall behandlas mer principiella synpunkter på hur lager rätteligen bör värderas och pekas på de klart olika egenskaper som de tre alternativen till högttemperaturlager erbjuder.

Lageralternativen

A) Bergrumslager

Lagervolym om 500 000 m³ i öppna bergrum, typ oljelager.
Lagerkapacitet 50 GWh mellan 120 och 35°C.

$$\text{Kontroll: } \frac{500\,000 \cdot 1000 \cdot 4.2 \cdot (120-35)}{3600 \cdot 10^6} = 49.6 \text{ GWh}$$

Lagrets värmeförlust i jämvikt (10 år) vid en övertemperatur i medeltal under året av $(120+35)/2 - 7.5 = 70^{\circ}$ är 665 kW som skall vara 10% av inlagrat värme.

$$\text{Kontroll: } \frac{665 \cdot 8760}{50 \cdot 10^6} = 11.7\%$$

Siffran 10% var i underkant, 12% mera sann.

Lagret avses urladdas genom temperatursänkning i två steg

90 → 55 via vvx till fjärrvärmenätet

55 → 35 via värmepump till fjärrvärmenätet.

B) Blockstenslager

88 600 m³, 60% sprängsten, 40% vatten.

Sprängstendimensioner 0.5 x 0.7 x 0.28 m

Lagerkapacitet 82.6 GWh mellan 100 och 3°C.

$$\text{Kontroll: } \frac{886\,000 \cdot 1000 \cdot (0.6 \cdot 2.38^* + 0.4 \cdot 4.2) \cdot (100-3)}{3600 \cdot 10^6} = 74.2 \text{ GWh}$$

* Enligt Studsvik

Med inlagring 120°C blir det tillräckligt för både lagerförluster och 82.6 GWh/år!

Vid urladdning sker temperatursänkning i två steg varvid först tas ur

100-60⁰ via vvx till fjärrvärmenätet
60-3⁰ för stegring av ingående Ryavatten
till detta verks värmepumpar från 8 till 11⁰C.

C) Borrhålslager

2 650 000 m³ kanaldelning 3.5 m Ø = 115 mm.

Lagerkapacitet: Inladdning 70 GWh, urladdning 61 GWh (efter 10 år),
skillnaden = lagerförlust, 13%.

Medeltemperaturändringen kan beräknas med att denna över ett halvt år motsvarar en värmemängd av (70+61)/2=65.5 GWh. Därav fås:

$$\Delta\theta = \frac{65.5 \cdot 10^9 \cdot 3600}{2650000 \cdot 2.38 \cdot 10^6} = 37.4^{\circ}\text{C}$$

Vid föredraget nämndes - om jag minns rätt - att temperatursprånget i lagret var 38⁰. Figur 12 av 6/12 antyder 39⁰.

Vidare nämndes, enligt mina noteringar, urladdning 14/11-17/2 direkt men 18/2-15/3 via värmepump. Detta är något som icke avspeglas i redogörelsen av 82-12-06 där det sägs att vid höga laddningseffekter värmepumparna vid Rya måste hjälpa till men att laddningsenergin i form av drivel är en försumbar andel av kostnaden. Vidare sägs här att lagret urladdas till ca 50⁰ genom de lägre returtemperaturerna efter ca 15/3.

Frågan om urladdning, dvs om ett lagers nedkylning via värmepump, kommer nedan att diskuteras mera allmänt. Enligt min uppfattning speglar nyanseringen från 1/12 till 6/12 en riktig utveckling.

Bedömning av ett lager

Från flera håll under konferensen skymtade fram att ett lager borde få kosta högst 1 kr per årligen inlagrad eller uttagen kWh. För att komma ner till denna siffra eller t o m underskrida den ligger det nära till hands att på konstlat sätt kyla ner lagret.

Så föreslås t ex för bergumslagret nedkylning med värmepump från 55 till 35^o och i fallet blockstenslager nerkyllning med avloppsvattnet från Rya-verkets värmepumpar till 3^o. Att på liknande sätt manipulera den övre temperaturgränsen är svårare och har inte förekommit på annat sätt än att i borrhålslagret temperaturen begränsats uppåt till 95^oC med hänsyn till använda plastmaterials termiska egenskaper.

Den sänkta nedre temperaturgränsen är lockande för leverantören, som därmed kan erbjuda dels ett lager med lägre specifik kostnad dels ett lager med lägre värmeförluster - och detta helt utan några ekonomiska insatser. Jag förutsätter nämligen att en eventuell värmepump för nedkylning måste ordnas och drivas av beställaren liksom att det ej för leverantören innebär några kostnader att tillföra lagret vatten från Rya-pumparnas avlopp.

Skall en specifik kostnadssiffra för ett lager diskuteras så skall den vara baserad på den maximala temperaturskillnad som uppnås enbart utgående från spillvärmekällornas temperaturer och fjärrvärmenätets fram- och returtemperaturer. Detta är emellertid icke tillräckligt för att bedöma ett lagers ekonomiska utbyte. Två faktorer tillkommer, varav den första, lagrets utläckningsförlust, är av viss, men dock underordnad betydelse. Den tycks vid lager av här aktuella storlek vara runt 15% för en årscykel. Viktigare är däremot den förlust i värmekvalitet som lagret medför. Detta är en typ av förlust som är av en djupare termodynamisk karaktär än värmeläckageförluster och kanske mindre påtaglig men icke dess mindre starkt realistisk. Den är också mycket olika vid de tre här diskuterade lagertyperna, men vid ingendera av de båda lagersymposierna i december 1982 framskyntade något därom ens från företrädare för sådan typ av lager som har påtagliga fördelar härvidlag. Innan en sådan diskussion måste emellertid närmare diskuteras begreppet termodynamiska förluster till skillnad från termiska sådana.

Termodynamiska förluster

I en balans över till- och bortfört värme uppstår oftast en restpost som är av karaktären värmeläckage genom systemets gränser. Sådana förluster kan teoretiskt sett elimineras genom isolering,

vilket är trivialt. Därmed kan denna typ av förluster också anses vara eliminerad från diskussionen även om den finns kvar och måste beaktas i realiteten.

Men också ett helt isolerat system kan tänkas undergå förluster i möjlighet att uträtta "något nyttigt". Utgå som exempel från ett system bestående av 1 kg vatten i form av spillvärme vid en temperatur av 120°C. Vi skulle med detta kunna värma ett returvatten av 50°C till säg 65°C och skulle då få en kvantitet sådant vatten som vore $1 + (120-65)/(65-50) = 4.67$ kg. Vore spillvärmets temperatur 100°C skulle kvantiteten endast bli $1 + (100-65)/(65-50) = 3.33$ kg och vore spillvärmets temperatur 65°C skulle vi bara kunna sända ut i fjärrvärmenätet detta enda kg. Ju högre temperatur dvs kvalitet på spillvärmets dess mer kan det avlasta andra försörjningsalternativ. Som mått på ett termodynamiskt systems kvalitet kan införas ett begrepp exergi, e kJ/kg, motsvarande det av tekniskt arbete som ett system maximalt skulle kunna uträtta. Det visar sig också i de allra flesta fall att detta exergivärde väl motsvarar det ekonomiska värdet på den värmemängd över omgivningens tillstånd som systemet representerar.

Det kan lätt härledas - men uteslutes här - en formel för att beräkna exergin hos en massa av visst tillstånd och därmed också exergiskillnaden mellan in- och utlagrat värme. Denna skillnad ställd i relation till inlagrad exergi kan betraktas som en exergiverkningsgrad och är ett mått på kvalitetsförlusten mellan in- och utlagring.

För de här aktuella temperaturerna kan oftast bortses från förändringar i specifika värmets med temperaturen. För vatten gäller i så fall:

$$e = 4.2(T_1 - T_0 - T_0 \cdot \ln \frac{T_1}{T_0}) \text{ kJ/kg}$$

T_1 K är aktuell temperatur

T_0 K är ostörd omgivnings temperatur som i fortsättningen sättes till 280 K representerande ungefärligen ostört bergs temperatur och årlig luftmedeltemperatur. Det kan framhållas att i de flesta processindustriella sammanhang räknas T_0 till 288 K.

Exergin 3600 kJ motsvarar 1 kWh och bör ha ett värde i storleksordningen därav.

De inre eller termodynamiska förlusterna är av följande slag.

1) Vid värmeövergång - som alltid sker från varmare till kallare medier minskar aldrig så välisolerade systems totala exergi.

Vid värmeövergång i en värmeväxlare avtar exergin trots ideal isolering så länge temperaturskillnader förekommer i värmeväxlaren.

2) Vid blandning av medier av olika temperatur är blandningens exergi lägre än komponenternas.

3) Vid yttre men också inre friktion t ex i samband med strömning när pumpenergi (=exergi) övergår i värme avtar summa exergi.

4) Vid koncentrationsutjämnningar minskar exergin. Det är dock mindre aktuellt vid högtemperaturlager.

Alla dessa förändringar kan bara ske i en riktning, varför de ofta kallas irreversibla eller icke omvändbara tillståndsförändringar. Som ingenjörer kämpar vi för att i möjligaste mån minska verkningarna av sådana förlopp t ex genom isolering, möjligast goda tätning, friktionsminskande smörjning osv. Irreversibiliteter som aldrig helt kan undvikas är avvikelser från tänkta ideala förlopp.

Irreversibiliteter vid här aktuella lagertyper

Sedan de viktigaste förloppen vid termodynamiska förluster definierats skall här diskuteras hur sådana påverkar de olika lagertyperna.

Till en början skall tas upp den starka nedkylningen av restvärmets i blockstenslagret med vatten av 7° som ger 3 grader högre temperatur vid Rya-pumparnas förångare. Vattentemperatur efter värmeväxlare torde därvid vara 60° .

Ett kg vatten av 60° kylt till blandningstemperaturen 10° med vatten av 7° ger med enkel kalorimetri

$$1 + (60-10)/(10-7) = 17.7 \text{ kg blandvatten av } 10^{\circ}.$$

Exergi före blandning

$$1 \cdot 4.2(60 - 7 - 280 \ln \frac{333}{280}) = 18.7 \text{ kJ/kg}$$

Exergi efter blandning

$$17.7 \cdot 4.2 (10 - 7 - 280 \ln \frac{283}{280}) = 1.2 \text{ kJ per 1 kg vatten av } 60^{\circ}\text{C}.$$

$$\text{Exergiverkningsgraden } \frac{1.2}{18.7} = 6.4\%$$

Den blandningen är tydligen rena ruinen. Icke nog därmed. Temperatursänkningen av lagret medför dessutom utökad värmeströmning från tidigare varma väggar och stenblock till det kalla Rya-vattnet, som värms några grader till en ointressant temperatur. De så småningom närmast emot lagret nedkylda väggarna och blocken kommer sedan att kyla ner en del inkommande varmt vatten till likaledes ointressanta temperaturer.

Att kyla lagret genom blandning är en klar värdeförstörelse. Om den enligt föredraget beräknade oljebesparingen med blockstenslagret är baserad på nedkyllning $100-3^{\circ}\text{C}$ så är bara $100-60$, dvs 41% effektiva och oljebesparingen i motsvarande grad lägre.

Den fortsatta diskussionen av blockstenslagret kommer att avse ett lagret med uttag $100-60^{\circ}$ utan ytterligare kylning.

Nedkyllning med värmepump som föreslås för bergrumslagret är en process med måttliga icke-reversibiliteter om nedkyllningen görs med rimliga temperaturer, 10 högst 15° dvs 60 till 45 å 50° men det är en utbyggnad med härför särskilt avsedd värmepump som det blir beställarens ensak att anskaffa och driva. Den hör i egentlig bemärkelse inte till lagret.

Termodynamiska synpunkter på lageralternativen

I den fortsatta diskussionen skall bergrumslager och borrhålslager ställas emot varandra.

Bergrumslagret

har vid nedkyllningen begränsad till 60° inre förluster, genom interna värmeströmmar. Dessa finns dels i skiljeytan mellan det undre kallare och det övre varmare skiktet, dels i bergväggarna på

båda sidor om nämnda skikt. Förlusterna kan minskas genom ett högt bergrum, men om höjden överstiger kantlängden börjar utläckningsförlusterna att öka.

Ett bergrumslager har två klara fördelar relativt övriga lagertyper nämligen

- a) Större delen av lagret kan tömmas vid en temperatur nära inlagringstemperaturen.
- b) Lagret kan vid rätt dimensionerade värmeväxlare täcka stora effekttoppar.

Som sammanfattning kan konstateras att denna typ av lager utförd i tillräckliga dimensioner väl kommer att ta hand om kvaliteten på inlagrat värme dvs kommer att ha hög exergiverkningsgrad.

Borrhålslager

Det är nödvändigt för ett borrhålslager att arbeta med termodynamiska förluster. Det är ju genom temperaturutjämnning från ett hål, som värmets distribueras ut och in i lagret.

Följande lilla räkneexempel demonstrerar kvalitetsförlusten av en temperaturutjämnning:

Två utåt isolerade block av berg på vardera 1 m^3 , det ena av temperaturen 100° det andra 50°C bringas i termisk kontakt med varandra. Detta resulterar i 2 block båda med temperaturen 75°C . Hur stor är förlusten i värmekvalitet härav?

Före den termiska kontakten gäller:

$$e_a = 2380(100 - 7 - 280 \cdot \ln 373/280) = 30220 \text{ kJ}$$

$$e_b = 2380(50 - 7 - 280 \cdot \ln 323/280) = 7140 \text{ kJ}$$

$$e_a + e_b = 37.36 \text{ MJ}$$

Efter termisk kontakt gäller:

$$\Sigma e = 2 \cdot 2380(75 - 7 - 280 \ln 348/280) = 33910 \text{ kJ}$$

Exergiverkningsgraden är $33.9/37.4 = 0.91!$

En viktig synpunkt vid ett borrhålslager är att hela den per ytenhet lagrade energin har att passera den lilla yta, som hålet representerar. För att få rimliga irreversibilitetsförluster tvingas man att hålla relativt sett låga effekter.

En markant skillnad i förhållande till bergrumslager är också att kvaliteten på uttaget värme sjunker med uttaget, dvs man får vid uttaget en successivt sjunkande temperatur på uttaget värme.

Det är uppenbart att ett borrhålslager kommer att erbjuda en avsevärt lägre exergiverkningsgrad, dvs sämre kvalitet på uttaget värme än ett bergrumslager.

Ove Platell, som ju här i landet började studera bergrumslager, har sedan länge och med emfas framhållit vikten av att vid bergrumslager arbeta med små temperatureffekter och långa tidsrymder, vilket torde vara enda möjligheten att hålla nere kvalitetsförlusterna i lagret. Men å andra sidan medför det att läckageförlusterna ökar. Bergrumslager liksom för övrigt alla typer av högtemperaturlager för säsongslagring måste ha sådana dimensioner att läckageförlusterna relativt sett kan hållas låga.

I Studsviks rapport av 82-12-06 ges i figur 12 ett diagram över temperaturförlopp och effekter vid in- och utlagring. I figur 11 kan avläsas att det inladdas 72 GWh det fjärde året och tas ut 62 GWh. Härigenom, främst ur figur 12, ges en möjlighet att beräkna in- och utlagrad exergi och därmed lagrets exergiförlust däremellan, inkluderande läckageförlusten. Den på så sätt beräknade exergiförlusten och främst härur beräknad exergiverkningsgrad är ett mått på hur lagret kvalitetsmässigt behandlar inlagrad värmeenergi. Beräkningen ger följande resultat.

$$\text{Inlagrat: } 494.6 - 435.8 = 58.8 \text{ TJ} = 16.33 \text{ GWh}$$

Den första siffran representerar det ingående vattenflödets exergi, den andra det utgåendes.

Uttagen exergi är på samma sätt:

$$275.0 - 241.0 = 34.0 \text{ TJ} = 9.43 \text{ GWh}$$

Exergiverkningsgraden således 58%.

Värmeläckaget är $10/72 = 14\%$, dvs räknat som exergi 2.27 GWh. Förlusterna på grund av övriga icke-reversibiliteter, praktiskt taget helt orsakade av värmeströmmar i temperaturgradienternas riktning, utgör $16.33 - 9.43 - 2.27 = 4.63$ GWh eller 28%.

Slutligen skall framhållas att resultatet är beräknat på vattnet i lagret och att det alltså icke inkluderar de icke-reversibiliteter som orsakas av värmeväxlarna. De torde öka de totala kvalitetsförlusterna bedömningsvis till ca 45%.

Blockstenslagret

är i mångt och mycket till dess egenskaper en mellanform i förhållande till de båda övriga. Därmed icke sagt att det kvalitetsmässigt ligger mitt emellan dessa lagertyper. I själva verket ligger det relativt nära bergrumslagret. Förutom de triviala läckageförlusterna har blockstenslagret liksom bergrumslagret icke-reversibiliteter i skiktet mellan kallare och varmare vatten. De gör sig dock mera gällande i blockstenslagret på grund av att värmeledningstalet för stenen är ca 3.2 W/mK (Studsvik 6/12 bil.2) men för vatten bara 0.65. Inverkan härav kan minimeras genom att före urladdningen hålla lagret fullt ända ner i botten. Därmed reduceras tiden för värmeövergång mellan varmt och kallt vatten till de ca tre månaderna som urladdningen varar. Samma strategi kan givetvis användas vid bergrumslager.

När det gäller värmeläckaget i bergväggarna vid skiktet för temperatursprånget råder exakt samma förhållande mellan bergrums- och blockstenslager. De nämnda siffrorna över värmeledningstalen för berg och vatten antyder vikten av dessa irreversibiliteter.

I blockstenslagret skall ca hälften av den lagrade energin tas upp i och åter avges från stenblocken. Härvid uppkommer inre förluster av samma slag som vid borrhålslagret. En närmare analys visar dock att de är av en liten storleksordning.

Man kan som en medeltransportväg för värmen efter temperaturutjämning betrakta den vägsträcka som hälften av det värme, som skall laddas in eller ut, har att ledas. Vid borrhålslager med kantlängden 3.5 m blir denna vägsträcka $3.5 \cdot \sqrt{2.5}/4 = 1.38$ m om man

bortser från hålradien. Vid blockstenslagret skall värmen transporteras in och ut från blockets yta. För ett block med dimensionerna $0.5 \times 0.7 \times 0.28$ kan medeltransportvägen för halva värmemängden beräknas till 0.044 m.

Om man dessutom beaktar att vid borrhålslagret temperaturgradienten stiger inåt emot hålet genom vilket värme skall till- eller bortföras medan vid blocklagret temperaturgradienterna måste vara små och ytterligare fallande emot blockets centrum så inses att denna typ av icke-reversibilitet för ett blockstenslager måste vara obetydlig.

Blockstenslagret torde uppvisa något sämre temperaturer vid urladdning än bergrumslagret främst på grund av ökad värmeledning i skiktet för temperatursprånget men naturligtvis också på grund av icke-reversibiliteterna i stenblocken. Dock måste lagrets karaktärliga klart närmare bergrummets än borrhålets.

Allmänna synpunkter

Tyvärr saknas i skrivande stund underlag för att för bergrumslager eller blockstenslager göra liknande beräkningar över exergiförloppet som för borrhålslagret. Man kan dock fastslå att de båda förstnämnda lagren på ett avsevärt effektivare sätt tar hand om och bevarar inlagrat värmes kvalitet.

På seminariet om högttemperaturlager nämndes "klumpsiffror" för kostnaderna varvid kunde konstateras att avsevärda skillnader förelåg. Den här gjorda diskussionen av möjliga inre förluster i ett lager förklarar i hög grad dessa kostnadsskillnader.

Det har också tydligt visats att en bedömning av ett lager efter en specifik kostnad t ex kr per årligen uttagen kWh bör undvikas. Det föranleder termodynamiskt okloka förslag med som resultat felaktiga beräknade årsresultat.

Ett beaktande av ett lagers kvalitetsförluster bör inte försummas vid alla bedömningar. I det här specifika fallet har inre kvalitetsförluster vid borrhålslagret befunnits vara dubbelt större än de årliga läckageförlusterna.

Göteborg 1983-01-10

G. Rosén

SEMINARIET I GÖTEBORG

Betydelsen av exergiverkningsgraden för ett energilager - särskilt för Göteborg

Peter Margen, STUDSVIK ENERGITEKNIK AB

Prof Rosenblad tar upp kvalitetsförsämringen mellan inlagrad och urladdad energi i ett lager och mäter den genom exergiverkningsgrad. Det är givetvis viktigt att man är uppmärksam på kvalitetsförsämringen, eftersom den i vissa fall kan påverka ekonomin. När det gäller de högtemperaturtillämpningar som detta seminarium behandlar, har den dock oftast ingen som helst betydelse för ekonomin, och i övriga fall beränsad betydelse.

I de fall som här behandlas har man oftast en högtemperaturkälla av billig energi såsom en spillvärmekälla, en sopförbränningsanläggning eller en kolpanna som kan ladda lagret genom överkapacitet sommartid, utan den minsta påverkan på energikostnaden, huruvida man lagrar vid den maximala temperaturen för energikällan eller en lägre temperatur. Därför används vanligtvis den maximala temperatur som denna typ av källa orkar med.

Utnyttjas den urlagrade energin på ett fjärrvärmesät som i övrigt vanligtvis har pannor eldade med olja (i vissa fall även fast bränsle) utnyttjas den

urlagrade energin för att minska förbrukningen av dessa bränslen - vanligtvis då olja. Ett högtemperaturlager med hög exergiverkningsgrad kan i vissa fall värma en brukdel av fjärrvärmereturledningsvatten direkt till den önskade framledningstemperaturen. Ett energilager med låg exergiverkningsgrad förvärmer istället returledningstvattnet som sedan eftervärms av hetvattenpannorna. I båda fallen inbesparas dock exakt lika mycket bränsle - vanligtvis olja. Själva exergiverkningsgraden saknar i dessa fall helt betydelse för ekonomin.

Har systemet utöver de ovan beskrivna anläggningarna även en avloppsvärmepump, kan avloppsvärmepumpen värma returvattnet till vanligtvis ca 80°C när det finns ett energilager med mycket hög exergiverkningsgrad på systemet som själv kan värma returledningstvatten till 80°C. Energilagret med låg exergiverkningsgrad förmår däremot bara att förvärma returledningstvattnet som sedan eftervärms av värmepumpen - såsom fallet är i Göteborg. Huruvida detta har eller inte har någon konsekvens för värmepumparnas drivelförbrukning beror på antalet steg i vilket värmningen av vattnet i värmepumpen sker, enligt följande exempel:

Antal steg	Ökning i drivelbeovet KWh el/kWh urlagrad energi
1	0
2	0.027
5	0.048

se bifogad Figur 1 och beräkning Tabell 1.

I Göteborgsfallet används värmepumpar med 2 steg och jag känner inte till i vilken utsträckning man eventuellt kan öka antalet steg genom seriekoppling av flera enheter. Hur som helst torde ökningen i

drivelförbrukningen på grund av användning av ett lager med låg exergiverkningsgrad ligga mellan 0.027 och 0.048 kWh el/kWh urlagrad energi.

Direktiven för utvärdering av Göteborgslagret var att man skulle beakta 10 års drift. Under dessa tio års drift var det angivna priset för drivel lika högt i genomsnitt som priset på bränslet som lagret (och drivenergin) ersatte. Av denna anledning saknar ökningen i drivelbehovet betydelse för denna utvärdering.

Även om man dock varit beredd att utsträcka utvärderingsperioden till en 20-årsperiod och antagit att under den andra tioårsperioden, 1995 - 2005, elpriset varit två gånger så högt som priset på bränsle som ersatts genom extra drivenergi, hade detta påverkat nuvärdet av nettoenergibesparingen dock endast med ca 1 á 1.5 % (eftersom de sista 10 åren ju väger mindre i en nuvärdesberäkning än de 10 första åren, då ingen skillnad förelåg). Sålunda har även under sådana förhållanden exergiverkningsgraden försumbar betydelse jämfört med andra skillnader mellan lagren, framför allt den väsentligt lägre investeringskostnaden per kWh urlagrad energi för borrhållslagret när samtliga lager jämförs under samma förhållanden beträffande temperatur för vattnet disponibelt för lagring resp urladdning.

Övriga synpunkter

Prof Rosenblad har inte presenterat lagren på ett jämförbart sätt. För borrhålslagret anges den energi som med dataprogram beräknats att man kan ladda ur. För de övriga lagren anges produkten av volymen specifik värme och temperaturskillnad mellan vatten disponibelt för laddning och urladdning. Här bortser man sålunda dels från temperaturskillnaderna i värmeväxlarna som fordras för laddning och urladdning, dels inverkan av värmeförlusterna från den tidpunkt då lagret är färdigladat till den tidpunkt då det är urladdat. Till sist anges ett temperaturintervall mellan laddningsvatten och urladdningsvatten på $120 - 35 = 85^{\circ}\text{C}$ för bergrum, $100 - 3 = 97^{\circ}\text{C}$ för blockfyllda bergrum och bara 37 à 39°C för borrhålslagret. Som Rosenblad påpekar har man lite glädje av att kyla lagret till en temperatur lägre än returledningstemperaturen. Skulle man dock ha viss glädje av detta, kan man tillämpa principen för samtliga lagertyper.

Korrigeras kalkylerna för en gemensam returvatten-temperatur under den tid då olja kan ersättas, nämligen 58°C , reduceras inte bara energilagringens förmågan av bergrumsalternativen, men deras procentuella värmeförluster ökar väsentligt. Även omblandningsförlusterna ökar väsentligt. Exergiverkningsgraden blir sålunda betydligt lägre än Rosenblad antar. Som sagt har detta dock ingen betydelse för ekonomi i sig själv, däremot att ökningen i de procentuella värmeförlusterna har betydelse.

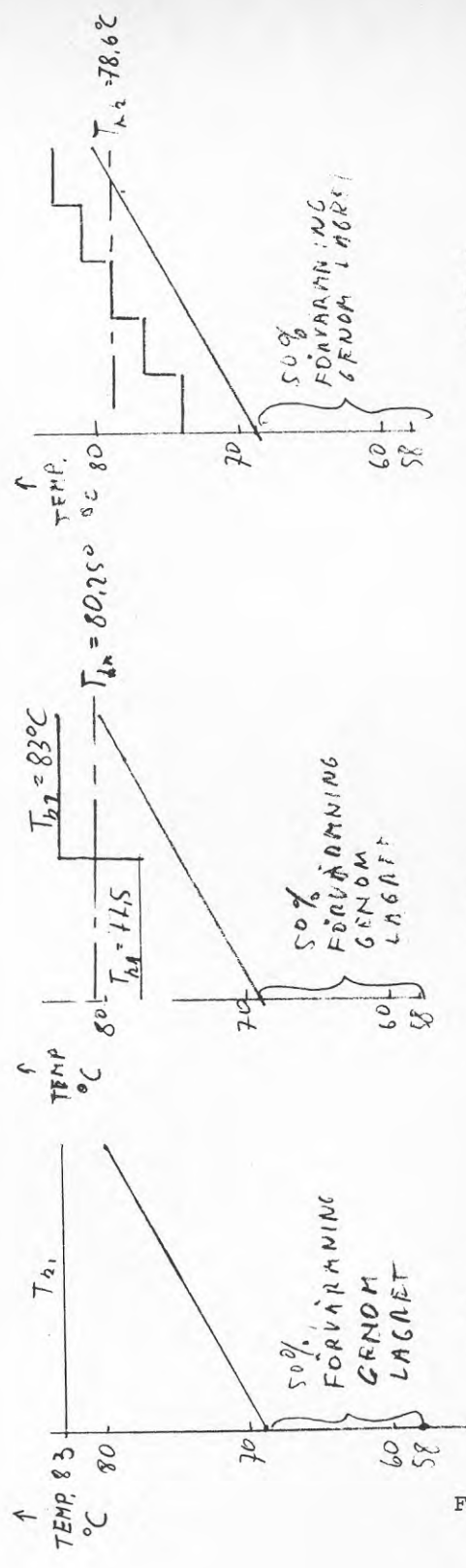
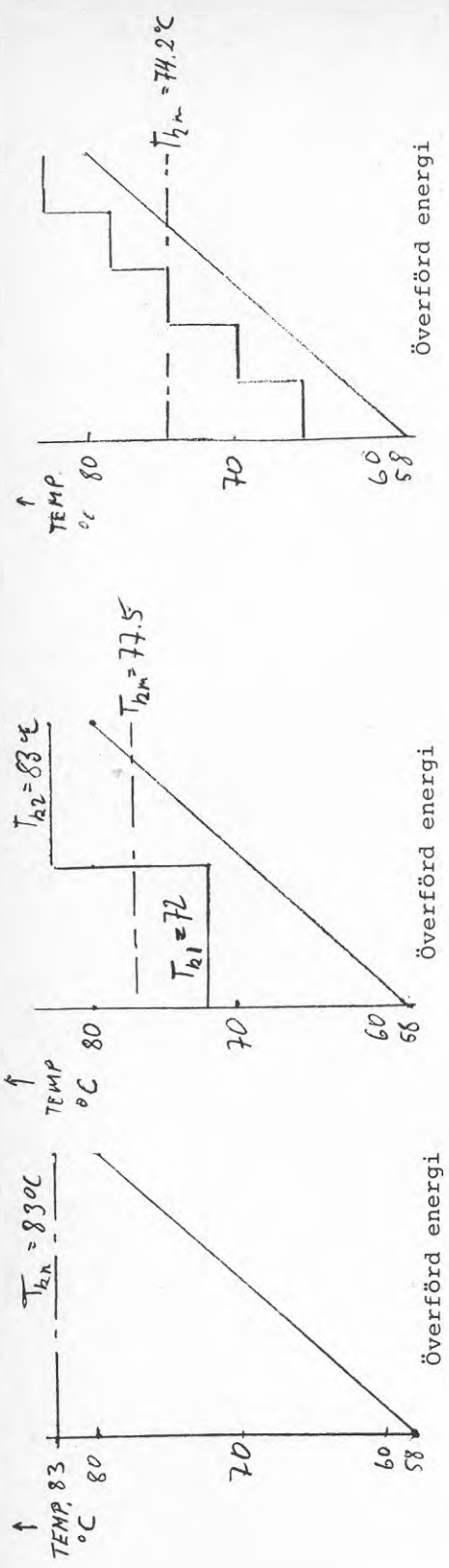
Tabell 1. Inverkan av 50 % förvärmning av fjärrvärmvattnet genom lager på driveleenergi-
behovet av värmepump utnyttjad för eftervärmning.

Antaganden: Returledningstemperatur = 58°C
Framledningstemperatur = $T_1 = 80^\circ\text{C}$ (temp efter värmepump)
Medeltemperatur för förångningsvärme = $20^\circ\text{C} = T_a$

Antal steg för värmepumpvärmning, N	1		2		5	
	utan	med	utan	med	utan	med
1. Medeltemperatur för kondenseringsvärme, T_{km} (se Figur 1)*	83	83	77.5	80.25	74.2	78.6
2. Värmeffaktor = $0.65 \times \text{Carnt värmeffaktor} = 0.65 (T_{km} - T_a)/(273 + T_{km})$	2.845	2.845	3.017	2.938	3.127	2.984
3. Höjning i värmeffaktorn pga förvärmningen		0		0.079		0.143
4. Ökning i driveleenergi per kWh levererad av lagret = $(3)/(2) \text{ kWh/}^\circ\text{C}$		0		0.027		0.048

* Kan beräknas ur $T_{km} = 3 + (T_1 + T_2)/2 + (T_1 - T_2)/2N$ °C

$T_2 = 58^\circ\text{C}$ utan förvärmning, 69°C med förvärmning.



Figur 1.

1 STEG VÄRMEPUMPA

2 STEG VÄRMEPUMPA

5-STEGET VÄRMEPUMPA

Överförd energi →

Överförd energi →

Överförd energi →

SAMMANFATTANDE ANALYS

Ulf Lindblom, Hagconsult AB och Chalmers tekniska högskola,
Göteborg

Krav på lager

Högtemperaturlagring under mark är en relativt storskalig operation, främst aktuell i anslutning till fjärrvärmeproduktion. Det kan finnas flera skäl till att värmelagringen blir lönsam i fjärrvärmesystem. Tidigare försågs ibland oljeeldade kraftvärmeverk med hetvattenackumulatörer, som hade till uppgift att korttidslagra överskottsvärme. Sådan överskottsvärme produceras när elbehovet överstiger värmebehovet. I takt med att kärnkraften avvecklas, kommer återgång att ske till elproduktion vid fjärrvärmeverken. I framtiden kan därför värmelagring vid kraftvärmeproduktion åter bli aktuell.

Den för tillfället dominerande anledningen att lagra värme i fjärrvärmesystem är den ständigt varierande efterfrågan på värme. Ett värmelager kan kopplas in under kort tid för att klara spetsbelastningarna. Man kan då inbespara dyrbara topeffektpannor.

Ett annat syfte kan vara att utnyttja värmekällor mer kontinuerligt över året och lagra in överskottsvärme under den varmare delen av året (säsongslagring).

Ett tredje skäl att bygga ett värmelager kan vara att ta hand om spillvärmekällor med oregelbundet leveransmönster, såsom viss typ av industrispillvärme, sopförbränningsvärme och värme från värmepumpar, som arbetar på ytvatten eller uteluft.

För god ekonomi ställer man ofta kravet på lagret att klara såväl korttids- som långtidfunktionen.

I detta seminarium har i huvudsak behandlats lagringssystem i berg.

Berget som lagringsmedium

Lagringsförmåga

Lagringssystemen i berg arbetar med två media, berg och vatten. Lagringsförmågan blir beroende av värmekapaciteterna för berg och/eller vatten. Dessa visas i Figur 1(a).

Johan Claesson har i olika sammanhang klargjort problematiken på följande sätt:

Låt oss tänka oss ett värmelager i form av en kub med hundra meters sida i berggrunden. Lagret värms från $+8^{\circ}\text{C}$ till $+100^{\circ}\text{C}$. Om kuben består av berg är det möjligt att lagra in $0.57 \times 92 = 50$ GWh värme. Om den istället består av enbart vatten går det att lagra in $1.15 \times 92 = 100$ GWh värme. Om kuben vore fylld med stenblock och hålrummen utgjorde 50% av utrymmet, skulle lagringskapaciteten bli 75 GWh.

De tre fallen representerar relationen specifik lagringskapacitet för alternativen borrhålslager (fast berg), öppet bergrum (vatten) och blockfyllt bergrum (blandning berg och vatten).

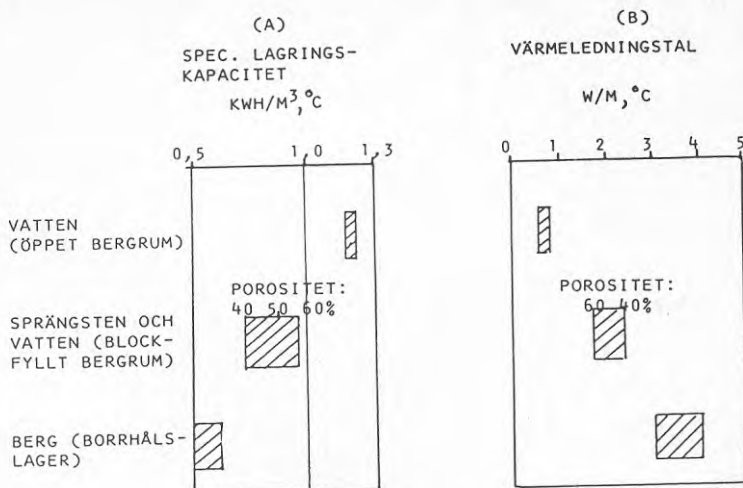


Fig. 1. Termiska egenskaper hos berg och vatten.
 (a) specifik lagringskapacitet
 (b) värmeledningstal

Värmeförluster

När en volym av en bergmassa utnyttjas för värmelagring, kommer en viss del av värmen att läcka ut till omgivande berg och gå förlorad. Hur stor denna värmemängd är beror dels på formen och storleken på lagret och dels på bergets värmeledningsförmåga och värmekapacitet. Värmeläckaget avklingar med tiden till en konstant nivå, om samma lagringstemperaturer används.

Värmeförlusterna till berget beror, förutom av värmekapaciteten, också på värmeledningsförmågan i berget. Storleken på denna visas av Figur 1(b).

På ett illustrativt sätt har Johan Claesson visat volymsberoendet hos värmeläckaget:

Om vi återgår till vår kub med 100 meters sida, vilken vi värmer till 100°C, kommer avklingningen av temperaturen att ske långsamt. Detta visas av den översta kurvan i Figur 2. Hade kuben varit fylld med vatten hade förloppet varit ändå långsammare genom vattnets lägre värmeledningsförmåga.

Minskar vi nu kubens storlek, ökar värmeförlusterna markant. En bergkub med 10 meters sida förlorar hela 50% av sin värme redan på två månader (40% om den är vattenfylld). Förhållandevis större värmeförluster inträffar vid lagerutformningar, som avviker från kubisk form. Värmelager i berg måste med andra ord vara stora, helst över en miljon kubikmeter, för att värmeförlusterna skall bli rimliga.

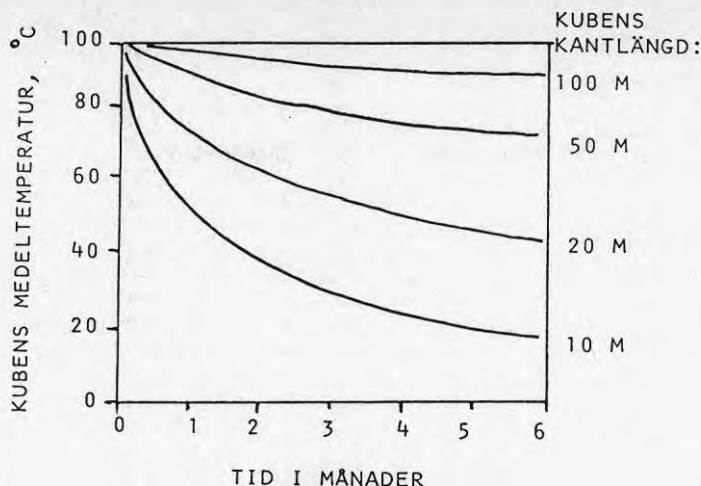


Fig. 2. Temperaturavklingning i kubiska värmelager i berg.

Värme kvalitet

Vad är värme kvalitet? Den kan närmast beskrivas som förmågan hos en varm massa att uträtta något nyttigt. I vårt fall kan vi för- enklat säga att kvalitetsförluster uppkommer genom sänkning av temperaturnivån vid lagringen. Dessa irreversibla förluster brukar kvantifieras genom användande av det s k exergi-begreppet. Gösta Rosenblads analys av lagringssystemet återges här i korthet:

Exergin hos en kropp med värmekapaciteten C_s kJ/kg, K vid tempera- turen T_1 K är i relation till en referenstemperatur för ostörd omgivning T_0 K (som här sätts lika med bergtemperaturen; under denna temperatur anses värmen som värdelös):

$$e = C_s \left(T_1 - T_0 - T_0 \ln \frac{T_1}{T_0} \right) \text{ kJ/kg}$$

Låt oss studera vad en ren temperaturutjämning i berg leder till för kvalitetsförluster (2). Antag att vi har två utåt helt isole- rade kuber med 1 meters sida, det ena 100°C och det andra 50°C . Exergin hos dessa är 30 MJ respektive 7 MJ.

Om de båda blocken bringas i termisk kontakt får vi två block med temperaturen 75°C , vardera med exergin 17 MJ. Exergiverknings- graden blir

$$\frac{2 \cdot 17}{30 + 7} = 0.92$$

Kvalitetsförlusten är alltså ca 8% enbart genom temperaturutjäm- ningen i berget.

Vad som emellertid mer intresserar oss vid värmeförvaring i berg är den kvalitetsförlust vi får genom att vattentemperaturen vid uttag är lägre än den vattentemperatur vi en gång laddade lagret med.

Låt oss återgå till vårt exempel i Figur 4 med den vattenfyllda kuben med 100 meters sida och 100°C temperatur. Antag för enkelhets skull att lagret skall blandas med och värme ett returvatten av 50°C till säg 65°C. Om temperaturen efter lagringen gått ner till 95°C, skulle man kunna producera ca 3 Mm³ 65°C vatten till nätet. Om genom större värmeförluster temperaturen på utgående vatten sjunkit till 80°C, skulle man endast kunna producera 2Mm³ 65°C vatten och om temperaturen gått ner ända till 65°C kunde man endast sända ut de 10⁶ m³ som lagret innehåller. Med andra ord, ju högre temperatur, d v s kvalitet, på utgående lagringsvatten, desto mer kan det avlasta andra försörjningsalternativ (2).

Tre lagringssystem i berg

Seminariet sysselsatte sig i huvudsak med följande tre lagringsalternativ, som utnyttjar den fasta berggrunden:

- o öppna bergrum
- o blockfyllda bergrum
- o borrhålslager

Diskussionen, som bygger på kostnader för byggande av lagret samt på de värmetekniska prestanda och begränsningar som de olika lagren har beroende på utformning och verkningssätt, är en sammanfattning av de synpunkter som framkom under seminariet.

Öppna bergrum

För byggande av stora bergrum har utvecklats en teknik som på ett nära optimalt sätt utnyttjar entreprenadmaskiner och övriga resurser. Tekniken innebär att man medelst en relativt stor nedfartstunnel i lutning 1:10 ä 1:7 bereder sig tillträde till den bergvolym där lagret skall placeras, Figur 3. Själva bergrummet sprängs ut i tre eller fyra steg: överst sprängs ett tunnelgalleri, som sedan bildar själva takpartiet i rummen. Efter förstärkning av takpartiet tas resten av rummen ut medelst pallsprängning, vanligen i två etapper. Vid gott berg brukar man kunna ta ut tunnelsektioner med 20 m bredd och 30 m höjd utan större bergmekaniska problem. Vid sämre berg kan man av förstärkningskostnaderna tvingas begränsa tvärsnittsarean.

Erfarenheterna av lagring av uppvärmd olje i stora bergrum är i stort sett goda med endast enstaka fall av rapporterade taknedfall orsakade av uppvärmningen. Värmelagrens utformning är liksom oljebergrum som långsträckta tunnlar och kostnaden ligger på ca 100 kr/m³.

Eftersom lagringskapaciteten för rent vatten är 1.2 kWh/m³, °C, Figur 1(a), blir den specifika lagerkostnaden vid en grads temperatursprång i lagret teoretiskt

$$\frac{100}{1.2} \text{ kr/kWh .}$$

Används exempelvis 50°C temperatursprång blir lagerkostnaden ca 1.7 kr/kWh.

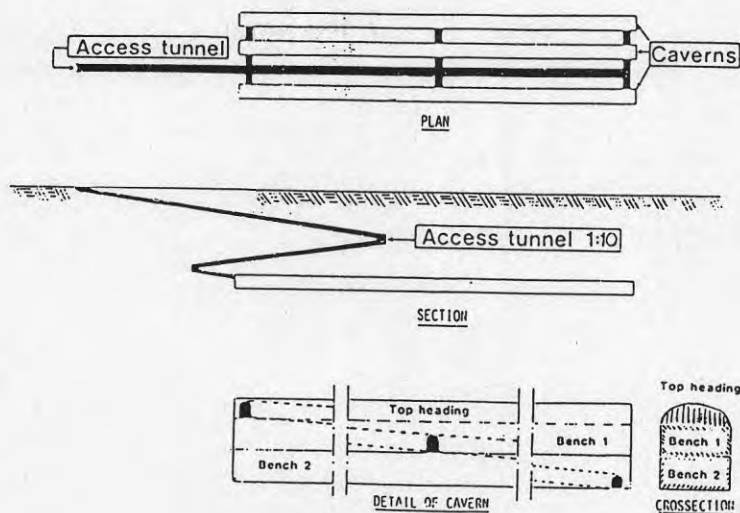


Fig. 3. Teknik för sprängning av stora, öppna berggrum.

Den teoretiska kapaciteten kommer aldrig att uppnås p g a yttre och inre förluster i lagret, se vidare nedan. Genom förläggning av berggrummet under grundvattenytan kan övertryck som uppkommer vid lagertemperaturer över 100°C tolereras.

Blockfyllda berggrum

Ett alternativ till stora, öppna berggrum är att tillämpa modern gruvbrytningsteknik och spränga rum i berget, vilka successivt återfylls med sprängmassor. Genom att återfyllnaden stabiliserar väggarna, kan rummen göras mycket höga, vilket är fördelaktigt från värmelagringssynpunkt.

Tekniken innebär att man bereder sig tillträde till berggrummens botten via en nedfartstunnel från markytan. Från mindre tunnlar nederst i de blivande rummen borrar och sprängs hål riktade solfjädersformigt uppåt, Figur 4. Tunnelsektionen utvidgas härvid uppåt till full berggrumsbredd.

Vid ovandelen av rummen drivs ett galleri med full rumsbredd och därunder en liggarpall. Dessa massor lastas ut genom nedfartstunneln. Taket förstärks om så erfordras på samma sätt som vid ett konventionellt berggrum.

Från botten av liggarpallen borras långa grovhål (t ex \varnothing 165 mm, längd 80 m) till kontakt med den utsprängda solfjädern nederst i rummen. Endast så mycket av sprängstenen lastas ut efter grovhåls-sprängningen, att de översta ca 20 m av rummet förblir tomt. Ett exempel på tvärsnitt av rummet visas i Figur 5.

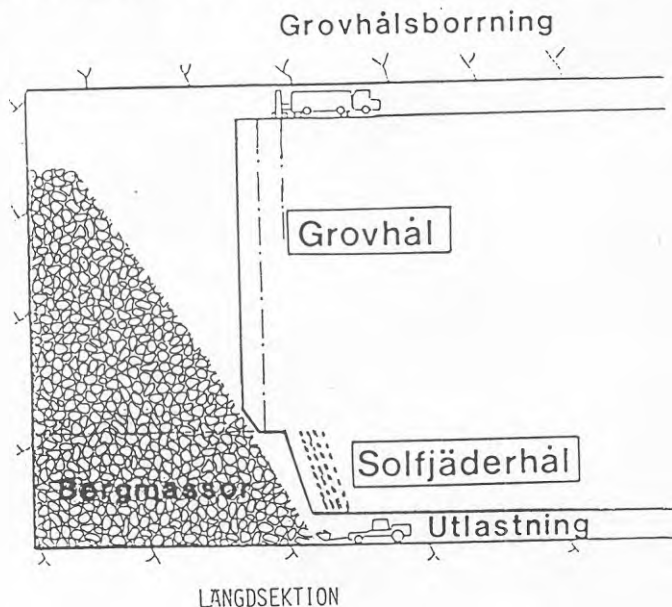


Fig. 4. Teknik för sprängning av blockfyllda bergrum.

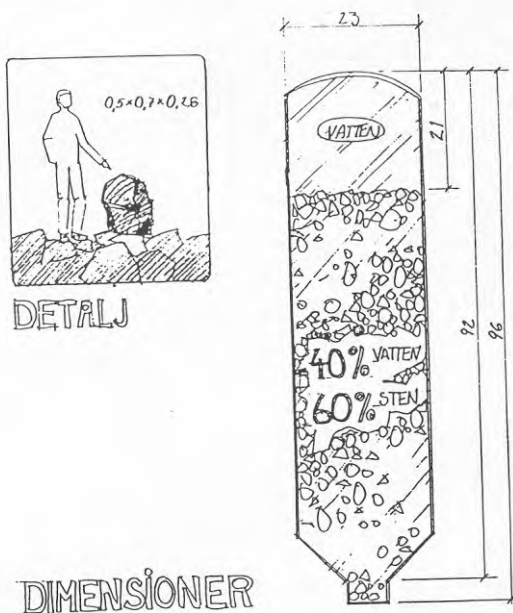


Fig. 5. Exempel på tvärsnitt för blockfyllt bergrum.

För att åstadkomma ett så kompakt (kubiskt) lager som möjligt, kan flera rum läggas parallellt i berget. Kostnaden för lagret kan anges till ca 45 kr/m³. Lagringsmedium är här vatten och berg och lagringskapaciteten beror på porositeten. Som ett normalvärde kan anges 0.85 kWh/m³, °C. Den specifika lagerkostnaden vid en grads temperatursprång blir teoretiskt

$$\frac{45}{0.85} \text{ kr/kWh}$$

och vid t ex 50°C temperatursprång ca 1.1 kr/kWh.

I verkligheten blir kostnaden högre genom yttre och inre värmeförluster i lagret. Genom förläggning under grundvattenytan kan övertryck tolereras i bergrummen.

Borrhålslager

Ett borrhålslager består av en serie parallella grovhål (Ø = 100-150 mm) borrhade med sänkhammarborr till 100-150 m djup i berget, Figur 6. Borrhålslagrets funktion bygger helt på värmeledning i berget. Det är således värmetrögt jämfört med vattenbaserade lager i bergrum. Lagertypen är därför mest lämplig för längre lagringscykler, typ säsongslagring. En viss anpassning till kortare lagringscykler kan dock göras med tätare borrhålsplacering. Som framhölls av både Andersson och Margen bör man dock inte välja borrhålslager om huvudsyftet är ett annat än säsongslagring.

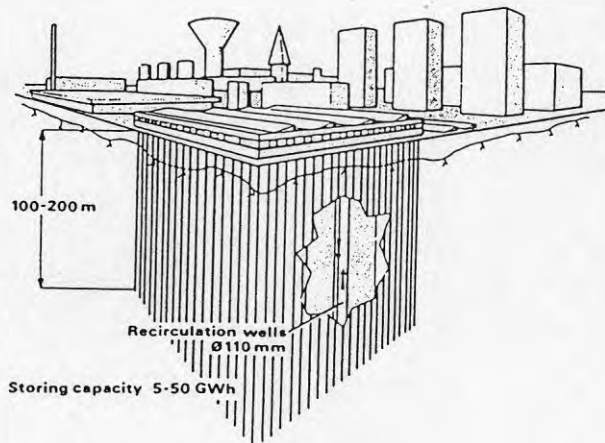


Fig. 6. Borrhålslager.

Lagerfunktionen bygger på värmeväxling mellan cirkulerande vatten och borrhålsvägg. I princip förekommer tre system.

- o slutna (hålet ev. ingjutet med betong)
- o öppna, röruttag
- o öppna, fri avrinning

av vilka det sista förutsätter att borrhålen utgår från en vattenfylld tunnel eller grop.

Temperaturområdet brukar begränsas uppåt till 100°C eftersom högre temperaturer kräver tryckavtätning eller igengjutning av hålen, stort förläggningsdjup för att balansera ångtrycket samt omöjliggör användandet av billiga plastmaterial för rörinstallationer.

Vid djupa borrhålslager (över 100), som eftersträvas ur förlustsynvinkel, kan hålavvikelserna bli betydande med normal sänkhammarborrning. Visserligen kan man med precisionsmetoder borra i det närmaste raka hål, men borrhålskostnaderna ökar då samtidigt.

Då borrhålskostnaderna ligger vid ca 100 kr/m och rördragning i hålet vid omkring 60 kr/m blir kostnaderna för ett stort borrhålslager med hål c/c 3.5 m

$$\frac{160}{3.5^2} = 13 \text{ kr/m}^3$$

Med rörinstallationer torde denna siffra öka till 20 kr/m³. Värme kapaciteten för berg visades i Figur 1(a). Härur framgår, att den specifika lagerkostnaden vid en grads temperatursprång teoretiskt blir ca

$$\frac{20}{0.57} \text{ kr/kWh}$$

och vid t ex 50°C temperatursprång 0.7 kr/kWh.

Det skall påpekas att vi här talar om temperatursprång i berget och ej i det in- och utpumpade vattnet som i fallet bergrumslagring. Vidare är inre och yttre förluster ej medräknade.

Så långt teknik och kostnader för byggande av värmelagren. Vi skall nu närmare studera värmetekniska prestanda för de tre lagertyperna.

Prestanda för de tre lagertyperna

Tidigare har nämnts att de båda bergrumsalternativen erbjuder möjlighet till kombinerad korttids- och säsongslagring av värme, medan ett rent borrhålslager inte bör användas för korttidslagring.

En speciell tillämpning av värmelager i bergrum vid samtidigt spillvärmeutnyttjande och värmepump på ytvatten (avloppsvatten, sjövattnet) skall här nämnas. Om det finns god tillgång på billig spillvärme sommartid kan det vara ekonomiskt motiverat att sänka temperaturen vid urladdning av bergrumslagret genom att under vintermånaderna blanda lagervatten med ingående vatten till värmepumpens förångare. Detta förfarande föreslogs för användning i Göteborgs fjärrvärmenät i samband med blockfyllt värmelager.

De värmetekniska karaktäristika som i fortsättningen skall diskuteras för de tre lagertyperna är värmeförluster, d v s utläckning av energi till omgivande berg samt kvalitetsförluster, eller skillnaden i temperatur mellan vattnet vid inlagring och urladdning av lagret.

Värmeförluster

Medan blockfyllda bergrumslager och borrhålslager med hänsyn till värmeförluster kan ges en gynnsam, "kubisk" form, är detta betydligt svårare med öppna bergrum av tunneltyp. Borrhålslagrens läge nära markytan leder till större värmeläckage uppåt, jämfört med berg-rumsalternativen.

Beräkningar visar att de årliga utläkningsförlusterna i medeltal för den första tioårsperioden i stora värmelager är

öppna bergrum	15%
blockfyllda bergrum	10%
borrhålslager	15%

Kvalitetsförluster

Tidigare har diskuterats den negativa inverkan en temperatursänkning kan ha på värmelagrets förmåga att avlasta andra försörjningsalternativ i fjärrvärmesystemet.

Det skall dock påpekas att om den urladdade energin utnyttjas på returledningen i ett fjärrvärmenät, med olje- eller fastbränsleeldade pannor för eftervärmning, så kommer bränslesparingen inte att påverkas av temperaturnivån på urladdningsenergin. I andra fall, exempelvis vid eftervärmning med värmepump, kommer temperaturnivån däremot att påverka uppvärmningskostnaderna.

Ekonomiska och driftstekniska bedömningar av det ekonomiska värdet av kvalitetsförluster berördes ej vid seminariet. Gösta Rosenblad gjorde dock i ett skriftligt bidrag efter seminariet en kvantifiering av exergiförlusterna för de tre systemen. Det kan vara lämpligt att först erinra sig var värmeförluster förekommer i fjärrvärmesystem i allmänhet och i värmelager i synnerhet. De senare beskrivs av Figur 7.

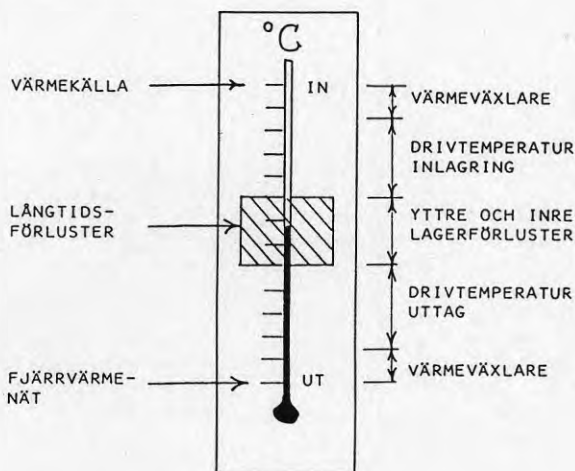


Fig. 7. "Förlusttermometer" för värmelager.

Den principiella skillnaden mellan vattenbaserade lager och borrhålslager är att de senare kräver temperatursprång, "drivtemperaturer", för att in- och utlagring skall vara möjlig. De arbetar alltså med inre exergiförluster, medan sådana förluster i bergrumsfallen begränsas till sammanblandning av varmt och kallt vatten i lagret.

Skiljeytan mellan kallt och varmt vatten i bergrum visas av Figur 8. Det framgår att en betydligt mer diffus övergångszon, "språngskikt", uppträder vid blockfyllda lager, vilket reducerar volymen "fullvärdigt" värme. Typiska värden på språngskiktet efter 100 dagars lagringstid kan vara ca 5 meter för ett öppet bergrum och ca 13 meter för ett blockfyllt lager. Eftersom ett öppet bergrum kan vara drygt 25 meter högt och ett blockfyllt drygt 80 meter, innebär detta att minst 85% av lagret kan tömmas vid en temperatur nära inlagringstemperaturen, d v s vid en exergiverkningsgrad nära 100%.

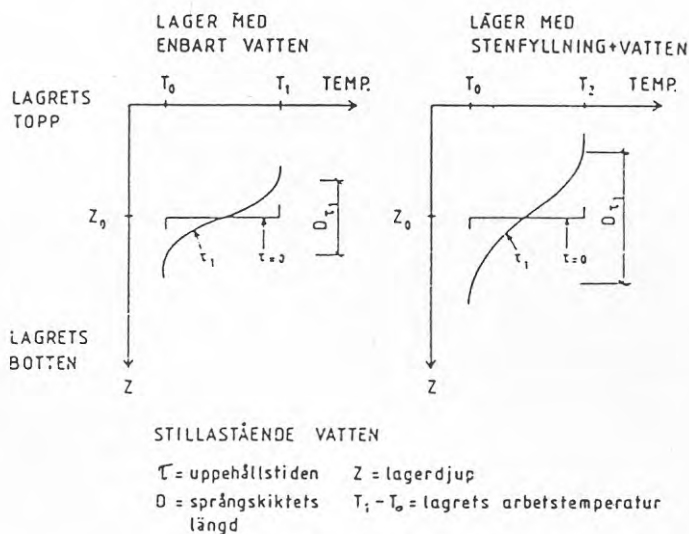


Fig. 8. Övergångsskikt mellan varmt och kallt vatten i öppna och blockfyllda bergslager.

För borrhålslager är kvalitetsförlusterna av en helt annan storleksordning. För rimliga hålavstånd torde temperaturförlusterna genom enbart drivtemperatur kunna uppgå till 30°C. Därtill kommer exergiförluster genom temperaturutjämning i berget. Totala exergiverkningsgraden kan komma att ligga neremot 50%

Avgörande för vilket system man bör välja är således eventuella andra försörjningssystem, som lagret skall avlasta liksom behovet att kunna mottaga och leverera kortvariga värmelaster med hög effekt. Räknat i specifik kostnad per lagrad energienhet, utan hänsyn till temperaturer eller effekter, är borrhålslagret klart billigast, följt av blockfyllt lager och bergrum.

B I L A G O R

DELTAGARLISTA
FORSKAR- och EXPERTSEMINARIUM
GÖTEBORG

1-2 december 1982

Sören Andersson
Allmänna Ingenjörbyrå AB
Box 5511
114 85 Stockholm
tel. 08- 63 00 20

Thore Berntsson
CTH
Inst för värmeteknik o.
maskinlära
412 96 Göteborg
tel. 031-81 01 00

Sten Bjurström
BeFo
Box 5501
114 85 Stockholm
tel. 08-63 50 20

Ingvar Bogdanoff
Hagconsult AB
Box 382
401 26 Göteborg
tel. 031-19 77 17

Torbjörn Boström
BFR
St. Göransgatan 66
112 30 Stockholm
tel. 08- 54 06 40

Arne Boysen
Hidemark Danielsson Ark HB
Järntorget 78
111 29 Stockholm
tel. 08-765 06 92

Gunnar Busk
AB Jacobson & Widmark
Box 1214
181 23 Stockholm
tel. 08-767 00 60

Bernt Bäckström
CTH
Inst för geologi/jordvärmegr.
412 96 Göteborg
tel. 031-81 01 00

Johan Claesson
Matematisk fysik
Lunds Tekniska Högskola
220 07 LUND 7
tel. 046-12 46 20

Sven-Allan Eklund
Statens Vattenfallsverk
162 87 Vällingby
tel. 08-739 50 00

K. Gösta Eriksson
CTH
Inst för geologi
412 96 Göteborg
tel. 031-81 01 00

Kjell Eriksson
Energiverken i Göteborg
Box 53
401 20 Göteborg
tel. 031-62 60 00

Lennart Finn
Rejlers Ingenjörbyrå AB
Box 2007
103 11 Stockholm
tel. 08-14 32 60

Gunnar Gustafsson
VIAK
Mölnadalsvägen 85
412 85 Göteborg
tel. 031-81 31 20

Göran Hellström
Matematisk fysik
Lunds Tekniska Högskola
220 07 Lund 7
tel. 046-12 46 20

Hans Hydén
VBB AB
Box 5038
102 41 Stockholm
tel. 08-22 85 80

P. Ingre
Studsvik Energiteknik AB
611 82 Nyköping
tel. 0155-800 00

Per-Olov Karlsson
Statens Vattenfallsverk
162 87 Vällingby
tel. 08-739 50 00

Elisabeth Kjellsson
Uppsala Kraftvärme AB
Box 125
751 04 Uppsala
tel. 018-16 28 58

Christer Langner
Ljusnarsbergs kommun
Smältargatan 1
714 00 Kopparberg
tel. 058- 114 20

Ulf Lindblom
Hagconsult AB
Box 382
401 26 Göteborg
tel. 031-19 77 17

Anders Lindström
AB Jacobson & Widmark
Box 382
401 26 Göteborg
tel. 031-80 40 40

Sven-Erik Lundin
BFR
St. Göransgatan 66
112 33 Stockholm
tel. 08-54 06 40

Peter Margen
Studsvik Energiteknik AB
611 82 Nyköping
tel. 0155- 800 00

Carl-Olof Morfeldt
Hagconsult AB
Box 1214
181 23 Lidingö
tel. 08-767 91 90

Lennart Mukka
LKAB
981 86 Kiruna
tel. 0980-710 00

Gunnar Nilsson
Energiverken i Göteborg
Box 53
401 20 Göteborg
tel. 031-62 60 00

Lisbeth Pettersson
LKAB
981 86 Kiruna
tel. 0980-710 00

Hans Pilebro
Skånska Cementgjuteriet
182 25 Danderyd
tel. 08- 753 80 00

Göran Rehbinder
Statens Vattenfallsverk
162 87 Vällingby
tel. 08-739 50 00

R. Roseen
Studsvik Energiteknik AB
611 82 Nyköping
tel. 0155-800 00

Gösta Rosenblad
CTH
Inst för geologi/jordvärmegruppen
412 96 Göteborg
tel. 031-81 01 00

Stefan Sandsten
Byggnadsstyrelsen
106 43 Stockholm
tel. 08- 14 10 40

Björn Svedemar
STU
Box 43200
100 72 Stockholm
tel. 08-744 51 00

Björn Svedinger
VIK
162 10 Vällingby
tel. 08-87 00 80

Torsten Wiking
VBB AB
Box 5938
102 41 Stockholm

Kjell Windelhed
Hagconsult AB
Box 1214
181 23 Lidingö
tel. 08-767 91 90

Nils Aberg
VIAK AB
Box 519
162 10 Vällingby
tel. 08- 87 00 80

Nils Önnheim
Energiverken i Göteborg
Box 53
401 20 Göteborg
tel. 031-62 60 00

BFR-PROJEKT OM HÖGTEMPERATURLAGRING UNDER MARK

Sammanställningen avser:

Bidrag till FoU-projekt
(L) Lån till experimentbyggnadsprojekt
som BFR beviljat t o m 1982-12-31

Projekt nr	Projekttitel	Projektledare	Belopp tkr
<u>Värmelagring i gropmagasin/tankar</u>			
770814-5	Solvärmeverket i Växjö	Lennart Finn Växjö	(L)
780942-5	Solfångare, värmepump och gropmagasin med sprängsten	Th Abrahamsson Göteborg	()
780973-3	Solvärmecentral för Hög-landsområdet i Örnsköldsvik. Förstudie	Nils Dafgård Stockholm	140
780974-9	Soluppvärmd villa på värmemagasin. Förstudie till experimentbyggande	Nils Persson Jönköping	90
781225-5	Styrgruppen för utveckling av solvärmecentraler	Erik Gabrielsson Göteborg	743
790205-7	Passiv solenergi från glas-täckt gata och avloppsvärme kv Nya Esle, Eslöv	Malte Nilsson Eslöv	564
790746-8	Utvärdering av solvärmecentral Lambohov	Kjell Norbäck Falun	786
790890-2	Projekt fliseldning med värmelagring i branddammar - tillämpningsstudie	Lars Inge Knutsson Skövde	102
800069-3	Solvärmecentralen i Studsvik	Rutger Roseen Nyköping	(L)
810096-5	Solvärmecentral med säsongslager för 500 lägenheter i Södertuna. Planering - förprojektering	Björn Hedlund Södertälje	960
811468-2	Soluppvärmning med vattenackumulator i mark	Göran Hultmark Göteborg	80 (L)
811469-7	Soluppvärmning med vattenackumulator i mark. Mätning och utvärdering	Göran Hultmark Göteborg	133
820257-6	Korttidslagring av vattenburen värme - systemstudier	Jonas Hallenberg Falun	115

Projekt nr	Projekttitel	Projektledare	Belopp tkr
820273-6	Experimentdrift med Studsviks solvärmecentral	Bengt Perers Nyköping	164
821268-4	Värmeackumulatorsystem för småhus - utvärdering	Hilding Brosenius Södertälje	25
821529-2	Groplager med och utan värmeisolering vid Lambohovs solvärmecentral. Mätning - utvärdering	Gunnar Söderlund Stockholm	149

Projekt nr	Projekttitel	Projektledare	Belopp tkr
	<u>Värmelagring i bergrum</u>		
790348-2	Solvärmecentral för 500 lägenheter i Uppsala - lagring i vatten. Dokumentation av projektering	Lars Åstrand Uppsala	30
790442-9	Värmelagring i bergrum - planeringsekonomiska konsekvenser	Lars Föjer Göteborg	70
790694-0	Solvärmelagring i bergrum	Leif Lund Göteborg	665
791123-7	Solvärmecentral Södertuna för ca 500 lägenheter. Förstudie	Björn Hedlund	150
791186-0	Säsongslagring av solvärme i gruva i Kopparberg. Förstudie	Christer Langner Kopparberg	75
791668-0	Lyckebo. Solvärme med säsongslagring i bergrum för 500 lägenheter	Lars Åstrand Uppsala	18 450 (L)
800020-0	Avestaprojektet - försöksanläggning för värmelagring i bergrum	Tord Lindbo Stockholm	5 500 (L)
800022-1	Avestaprojektet - försöksanläggning för värmelagring i bergrum	Sten Bjurström Stockholm	500
800289-9	Transport och lagring av spillvärme i befintlig bergtunnel i Kramfors. Förstudie	Staffan Stillesjö Stockholm	56
800727-3	Säsongslagring av värme i gruva i Kopparberg, förprojektering och fullskaleprov	Erik Söderman Kopparberg	300
810096-5	Solvärmecentral med säsongs-lager för 500 lägenheter i Södertuna. Planering - förprojektering	Björn Hedlund Södertälje	960
810584-4	Gruvor som värmelager - Inventering	Kjell Windelhed Stockholm	70

Projekt nr	Projekttitel	Projektledare	Belopp tkr
811157-9	Befintlig bergtunnel i Gullspång som lager för sjövärm. Mätning och utvärdering	Anders Ericsson Örebro	170
811602-8	Säsongslagring av sjövärm i gruva för fjärrvärmenät i Kopparberg - lån	Lennart Finn Växjö	10 800 (L)
820637-3	Lagring av spillvärm i bergtrum och borrhålslager i Göteborg. Förstudie	Kjell Eriksson Göteborg	410
820659-6	Säsongslagring av sjövärm i gruva för fjärrvärmenät i Kopparberg. Mätningsetapp I	Hans Gransell Nyköping	155
820673-5	Säsongslagring av solvärm i bergtrum för 550 bostäder. Utvärdering av solvärmecentral Lyckebo i Uppsala	Göran Reh binder Stockholm	1 060
821057-3	Lagring av sjövärm i gruva för fjärrvärmesystem i Nora - Förstudie	Kjell Windelhed Stockholm	100
821167-6	Värmeutvinning och värme-lagring i nedlagd gruva i Ely, Minnesota, USA. Principförslag	Gunnar Gustafson Göteborg	100
821534-6	Värmeväxlare vid hetvatten-lagring i bergtrum i Lyckebo - labförsök	Bo Ronge Göteborg	114

Projekt nr	Projekttitel	Projektledare	Belopp tkr
	<u>Borrhålslager i berg</u>		
780067-5	Sunstore solenergiprojekt	Ove Platell Hans Wikström Lars-Ake Nöjd Stockholm	3400
780203-1	Marklagerstudier för Sunroc-systemet	K.Gösta Eriksson CTH	300
780518-7	Solenergiprojektet Stora Skuggan. Förstudie	Åke Linde Stockholm	350
780794-7	Säsongslagring av värme i berg - Förstudie av borrhålslager för ca 1000 lägenheter	Håkan Kadesjö Västerås	180
790020-8	Systemstudier av lågtemperaturvärmeavgivnings-system vid drift tillsammans med Sunroc marklager och solfångare	Ove Platell Malmö	120
790087-2	Förutsättningar för vidareutveckling av energilagring i djupjordsystem med avseende på teknik, ekonomi och planeringsaspekter	Thomas Nilsson Stockholm	75
790729-2	Anläggning för värmeackumulering i berg - Förstudie	Sven Ake Larson CTH	31
791050-2	Geofysisk loggning i borrhål för energilagring	K.Gösta Eriksson CTH	26
791694-1	Värmelagring i berg med hjälp av oinklädda borrhål. Förstudie	Sören Andersson Stockholm	143
810181-8	Värmelagring i berg med borrhålssystem. Fältförsök i Luleå	Sören Andersson Stockholm	730
810196-7	Hydrock - anläggning för ackumulering av värme i berg	Sven Ake Larson CTH	480
810223-5	Koniska värmelager i berg med borrhålsteknik. Förstudie	Alf Lindmark Linköping	64
810759-2	Sunstore experimenthus i Sigtuna. Mätning och utvärdering, etapp II B	Lars-Ake Nöjd Nyköping	419

Projekt nr	Projekttitel	Projektledare	Belopp tkr
810880-8	Södertuna solvärmecentral - Värmelagring i berg med borrhålslager	Sören Andersson Stockholm	256
810919-2	Säsongslagring av solenergi genom borrhålslager i berg med Sunstore-teknik vid Stora Skuggan i Stockholm. Förprojektering	Lars-Åke Nöjd Nyköping	400
811012-6	Borrhålslager i berg för spillvärme från processin- dustrin i Munksund. Förstudie	Anders Forsén Luleå	75
811248-6	Säsongslagring av värme ut- vunnen genom värmepumpning på sommarvarmt ytvatten	Sören Andersson Stockholm	50
820308-9	Borrhålsvärmelager i berg vid Luleå högskola	Torgny Selberg Luleå	4800 (L)
820396-7	Borrhålsvärmelager i berg vid Högskolan i Luleå. Mätning och utvärdering	Bo Nordell Luleå	1220
820637-3	Lagring av spillvärme i berg- rum och borrhålslager i Göteborg. Förstudie	Kjell Eriksson Göteborg	410
820804-9	Sunstore solenergiprojekt - Slutrapportering	Lars-Åke Nöjd Nyköping	178
820849-9	Inglasad gård som solfångare och säsongsvärmelagring i borrhålslager för flerfa- miljshus i Gubbängen - Pro- jektplanering	Johnny Kellner Stockholm	25
821119-2	Överglasad gård och borrhåls- värmelager för flerbostads- hus i Gubbängen, Stockholm - Energi- och byggnadsprojek- tering typ SUNCOURT	Mats Thorén Stockholm	440
821240-8	Säsongslagring av solvärme i berg med borrhålslager vid Stora Skuggan, Stockholm	Rolf Mårtensson Stockholm	2800

Projekt nr	Projekttitel	Projektledare	Belopp tkr
	<u>Allmänt</u>		
771029-7	Utveckling av beräkningsmodeller för lagring av värme i jorden och för utvinning av jordvärme. Studium av termodynamiska principer och möjligheter för jordlagringssystem direktkopplade till värmepump och solfångare	Johan Claesson Lund	400
790042-1	Ingenjörsgelogisk loggning i kristallin berggrund	K.Gösta Eriksson Göteborg	25
790245-1	Lagring av spill- och solvärme i jord. Djupjordvärme	Ulf Lindblom Göteborg	125
790311-8	Värmetransport i skilda jord- och bergarter	Silas Gustafsson Göteborg	115
790827-3	Inverkan av förhöjd temperatur på finkornig jord - Förstudie - geoteknik	Roland Pusch Luleå	10,3
791050-2	Geofysisk loggning i borrhål för energilagring och energiutvinning. Etapp 1	K.Gösta Eriksson Göteborg	292
791305-0	Värmelagring i mark. Teoretiska analyser och beräkningsmodeller	Johan Claesson Lund	870
800048-6	Geotekniska konsekvenser av värmelagring i finkornig jord - laboratorieprov	Roland Pusch Luleå	75
800279-8	Termisk-tekniska egenskaper i lera vid värmelagring - Lindälvs skolan, Kungsbacka	K.Gösta Eriksson Göteborg	226
801381-8	FEM-analys för beräkning av värme i mark. Möjligheter och utvecklingsbehov	Nils-Erik Wiberg Göteborg	60
801465-0	Fältundersökningsmetoder vid tillämpad markvärmeteknik - nulägesbeskrivning	Olof Andersson Malmö	105
810113-2	Värmelagring i lera - värmeledning, värmeväxling och geoteknisk påverkan	Ulf Lindblom Göteborg	685
810113-2	Värmelagring i lera - värmeledning, värmeväxling och geoteknisk påverkan	Göran Sällfors Göteborg	227

Projekt nr	Projekttitel	Projektledare	Belopp tkr
810671-8	Värmeöverförande egenskaper i jord och berg	K.Gösta Eriksson Göteborg	406
820743-4	Jordarters termiska och fysikaliska egenskaper för jordvärmesystem. Svensk-franska seminarier i Göteborg och Grenoble	K.Gösta Eriksson Göteborg	60
820895-2	Frysning av lera vid värmeuttag ur mark. Förstudie av geo-problem och termiska möjligheter	K.Gösta Eriksson Göteborg	57
821398-9	Termiska analyser och modeller för markvärme - ramanslag	Johan Claesson Lund	1210

HÖGTEMPERATURLAGRING UNDER MARKVärmelagring i gropmagasin/tankar

- R80:1979 Thore Abrahamsson
SOLFANGAR-OCH VÄRMEPUMPANLÄGGNING MED GRUNDVATTEN
SOM VÄRMEACKUMULATOR
Förstudie: vårdskola i Borås
- R82:1979 Lennart Finn
SOLVÄRMEVERK INGELSTAD I VÄXJÖ
Projektering och byggförberedelser
- R8:1980 Frank Andersson, Mats Länsberg
FJÄRAS CENTRUM
Projektering av solvärmesystem med värmepump
- R37:1980 Nils Persson
SOLUPPVARMD VILLA PÅ VÄRMEGASIN
Förstudie till experimentbyggande
- R41:1980 Gunnar Nordfeldt, Rolf Pettersson, Yngve Karlsson
SUN-SEC: SERIEANPASSAT SOLHUS
Förstudie till energi-experiment
- R49:1980 Lars Olof Matsson
SOLVÄRMEANLÄGGNING ANSLUTEN TILL FJÄRRVÄRMENÄT
Förstudie i Gävle
- R117:1980 Helena Willman, Henry Willman
ACKUMULATORSYSTEM FÖR SOLUPPVARMNING AV MINDRE
BYGGNADER MED TILLSKOTTSVÄRME FRÅN FASTA IN-
HEMSKA BRÄNSLEN
- D21:1980 Rutger Roseen, Bengt Perers
A SOLAR HEATING PLANT IN STUDSVIK
Design and first-year operational performance
- D36:1980 Kjeil Norbäck, Jonas Hallenberg
A SWEDISH GROUP SOLAR HEATING PLANT WITH
SEASONAL STORAGE
Technical-economic description of the Lambohov project
- G36:1980 TÄTNING OCH ISOLERING AV BEHÅLLARE FÖR SÄSONGLAGRING
AV SOLVÄRME I VATTEN
Seminarium i oktober 1979
- R48:1981 Lars Olof Matsson
SOLVÄRME FÖR LARSBERGSOMRADET PÅ LIDINGÖ
Förstudie
- R50:1981 Lars Jensen
SOLVÄRME FÖR INDUSTRIBYGGNAD I KUNGSBACKA
Mätresultat och utvärdering
- R53:1981 Erik Gabrielsson, Birger Ludvigson, Jan-Olof Dalenbäck
SOLVÄRMECENTRALER I STUDSVIK, LAMBOHOV OCH INGELSTAD
Sammanfattande erfarenheter fram till årsskiftet 1980/81

- R59:1981 Bengt Perers, Rutger Roseen
SOLVÄRMECENTRALEN I STUDSVIK
Resultat 1980
- R146:1981 Ken Dahlstrand, Ingvar Edelborg
ATT ANVÄNDA BRÄNDDAMMAR FÖR VÄRMELAGRING
Utredning för ett framtida fjärrvärmesystem
i Tidaholm
- D5:1981 Jan-Olov Dalenbäck, Erik Gabrielsson, Birger Ludvigsson
THREE SWEDISH GROUP SOLAR HEATING PLANTS WITH SEASONAL
STORAGE
A summary of experience from the Studsvik, Lambohov
and Ingelstad plants up to the end of 1980
- R20:1982 Peter Margen m fl
STORA SOLVÄRMESYSTEM
Geoteknik, områdesplanering, ekonomi
- R114:1982 Per Gabrielsson, Sven-Göran Olsson
SOLVÄRMESYSTEM I BEFINTLIG BEBYGGELSE
Förstudie: HSB-Vänersborg

Värmelagring i bergrum

- R161:1980 Nils Dafgård, Bengt Rydén, Göran Werner
SOLVÄRMECENTRAL FÖR HÖGLANDSOMRADET I ÖRNSKÖLDSVIK
Förstudie
- G13:1980 Christer Schwab
TUNNELS AND ROCK CAVERNS
- R28:1981 Tomas Bruce, Björn Hedlund, Olle Nilsson m fl
SOLVÄRMECENTRAL SÖDERTUNA FÖR CA 500 LAGENHETER
Förstudie
- R58:1981 Bo Sundman, Erik Söderman, Kjell Windelhed
SÄSONGLAGRING AV SOLVÄRME I GRUVA I KOPPARBERG
Förstudie
- R113:1981 Jan Nordling, Staffan Stillesjö, Hans Åkesson
TRANSPORT AV SPILLVÄRME GENOM BERGTUNNEL TILL
KRAMFORS FJÄRRVÄRMENÄT
Förstudie
- Vattenfall/
BeFo 1981:1 AVESTAPROJEKTET - Försöksanläggning för hetvatten-
lagring i bergrum
BESKRIVNING AV ANLÄGGNING OCH FORSKNINGSPROGRAM
- Vattenfall/
BeFo 1981:2 G. Reh binder - AVESTAPROJEKTET
NÅGRA TREDIMENSIONELLA VÄRMEBERÄKNINGAR
- Vattenfall/
BeFo 1981:3 G. Reh binder - AVESTAPROJEKTET
VÄGRÖRELSE I GRÄNSYTAN VID TERMISK SKIKTNING
- Vattenfall/
BeFo 1981:4 AVESTAPROJEKTET
HYDROGEOLOGISKA FÖRHÅLLANDEN INOM ANLÄGGNINGSSOMRADET.
ETAPP I

- R68:1982 Erik Söderman, Kjell Windelhed
SÄSONGLAGRING AV SJÖVARME I GRUVA I KOPPARBERG
Förprojektering
- R97:1982 Torgny af Forselles, Kjell Windelhed
GRUVOR SOM VÄRMELAGER
Inventering i Syd- och Mellansverige
- R116:1982 Jonas Hallenberg, Anders Ericsson
BERGTUNNEL SOM LÅGTEMPERATURLAGER FÖR SJÖVARME
Förstudie i Gullspång

Borrhålslager i berg

- Geol.inst.
CTH
Delrapport 1
1978 Thomas Rihm
MARKLAGERSTUDIER FÖR SUNROC-SYSTEMET
- Geol.inst.
CTH
Delrapport 2
1979 Thomas Rihm
MARKLAGERSTUDIER FÖR SUNROC-SYSTEMET
- R124:1980 Sven Ake Larson m fl
ACKUMULERING AV VÄRME I BERG
Litteraturstudier, teknik och ekonomi
- R66:1981 Sören Andersson, Anders Eriksson, Johan Tollin
BORRHÅLSLAGER I BERG FÖR SÄSONGLAGRING AV VÄRME
Förstudie
- R98:1981 Håkan Kadesjö, John Sintorn
SÄSONGLAGRING AV VÄRME I BERG
Förstudie av borrhålslager för cirka 1000 lägenheter
- R100:1981 Ove Platell, Hans Wikström
SUNSTORE-PROJEKTET 1977-1980
Solvärmesystem med låg temperatur och säsongslagring
för uppvärmning av lokaler

Allmänt

- R70:1978 Bo Carlsson, Hans Stymne, Gunnar Wettermark
LAGRING AV VÄRME
En översikt över metoder och möjligheter
- Geol.inst.
CTH
Inst.rapport
B132 - 1979 Jan Sundberg
METODER FÖR BESTÄMNING AV TERMISKA PARAMETRAR
I BERG OCH JORD
- Geol.inst.
CTH
Inst.rapport
B141 - 1979 Urban Fält, Gunnar Gustafson
UNDERSÖKNING AV FÖRUTSÄTTNINGARNA FÖR ENERGI-
LAGRING I JORD OCH BERG GENOM GEOFYSISK BORR-
HÅLSLOGGNING - EN METODINVENTERING

- Earth Heat Pump Group
CTH - 1979
- NORDIC SYMPOSIUM ON EARTH HEAT PUMP SYSTEMS
- R134:1980
- Gunnar Gustafson, Erik Norling m fl
ENERGIGEOLGISK KARTERING
Metodstudie
- R148:1980
- Silas Gustafsson, Ernest Karawacki, Arnold Lundén
VÄRMETRANSPORT I JORD- OCH BERGARTER, KONSTRUKTIONSMATERIAL OCH VÄTSKOR
- D19:1980
- Stellan Atterkvist
SWEDISH ENERGY STORAGE PROJECTS 1979
Research development Full-scale experiments
- CTH
Kurskomp.
1980
- Nils-Erik Wiberg
VÄRMELEDNING OCH ENERGILAGRING
Beräkning med finita elementmetoden
- Geol.inst.
CTH
Inst.rapport
B157 - 1980
- Urban Fält
GEOFYSISK LOGGNING I KRISTALLIN BERGGRUND
Inventering av problem och förutsättningar
- LTH
1980
- Johan Claesson, Bengt Efring, Göran Hellström
LUNDAGRUPPEN FÖR VÄRMELAGRING I MARK
PUBLIKATIONSLISTA 1977-1980
- T1:1981
- Björn Svedinger
VÄRME I JORD, BERG OCH VATTEN
Utvinning och lagring
- T23:1981
- MILJÖKONSEKVENSER VID VÄRMEUTVINNING OCH VÄRMELAGRING I MARK OCH VATTEN
Utredning av Statens naturvårdsverk på uppdrag av Byggeforskningsrådet
- D4:1981
- Peter Margen
SEASONAL THERMAL STORAGE
Swedish practice, developments and cost projections
- Jordvärme-gruppen CTH
Inst.rapport
nr 3 - 1981
- Ingvar Rhen
REGISTRERING AV VATTENHALT I JORD GENOM MÄTNING AV DEN ELEKTRISKA KAPACITANSEN
- T42:1982
- Byggeforskningsrådets referensgrupp för energi-geologisk kartering
ATT UTVINNA OCH LAGRA VÄRME I MARK OCH VATTEN
Metodik för inventering och redovisning av naturförutsättningar

- D22:1982 International Energy Agency (IEA) solar heating and cooling programme task VII
CENTRAL SOLAR HEATING PLANTS WITH SEASONAL STORAGE
Basic design data for the heat distribution system
- Jordvärme- Jan Sundberg
gruppen CTH METODER FÖR BESTÄMNING AV VÄRMEÖVERFÖRANDE EGENSKAPER
Inst.rapport I JORD OCH BERG
nr 5 - 1982
- G2:1983 Bygghorskningsrådets Miljökonsekvensgrupp
MILJÖKONSEKVENSER AV VÄRMEUTVINNING OCH VÄRMELAGRING
I MARK OCH VATTEN
förslag till forskningsprogram





**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag
811449-5 från Statens råd för byggnadsforskning
till Stiftelsen Bergteknisk Forskning, BeFo,
Stockholm.**

R104: 1983

ISBN 91-540-3993-2

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Art.nr: 6700804

**Abonnemangsgrupp:
W. Installationer**

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

Cirkapris: 45 kr exkl moms