



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.



Värmelagring i berg med borrhålssystem

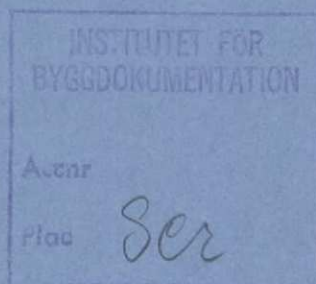
Pilotförsök i Luleå och förprojek-
tering av fullskaleanläggning

Sören Andersson

Alf Johansson

Bo Nordell

Tomas Åbyhammar



R15:1983

VÄRMELAGRING I BERG
MED BORRHÅLSSYSTEM

Pilotförsök i Luleå och förprojektering
av fullskaleanläggning

Sören Andersson
Alf Johansson
Bo Nordell
Tomas Åbyhammar

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag
810181-8 från Statens råd för byggnadsforskning
till Allmänna Ingenjörbyrå AB, Energiteknik.

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

R15:1983

ISBN 91-540-3878-3
Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm
LiberTryck Stockholm 1983

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

Förord	5
Sammanfattning	7
1. Inledning	11
1.1 Lagringsbehov	11
1.2 Utvecklingsläge	11
1.2.1 Allmänt	11
1.2.2 Borrhålslagret	12
2. Borrhålslagrets allmänna funktion och uppbyggnad	13
2.1 Funktionsprinciper	13
2.2 Cirkulationssystem	14
2.3 Lagrets storlek och form	14
2.4 Driftstrategier	15
3. Försökslagret	19
3.1 Lokalisering	19
3.2 Lagrets uppbyggnad och funktion	19
3.3 Mätssystem	24
3.3.1 Mätpunkter	24
3.3.2 Temperaturgivare	25
3.3.3 Datainsamling och registrering	26

4.	Förundersökning	28
4.1	Allmänt	28
4.2	Geologisk kartering	29
4.3	Seismiska undersökningar	29
4.4	Grundvattenobservationer	29
4.5	Kärnbörning	30
4.6	Permeabilitetsbestämning	33
4.7	Fysikaliska data för berg och jordtäcke	33
4.8	Grundvattenkemi	34
	4.8.1 Allmänt	34
	4.8.2 Laboratorieförsök	34
	4.8.3 Fältförsök	35
4.9	Ekologi	36
5.	Försöksresultat	37
5.1	Försök och jämförande beräkningar	37
5.2	Temperaturmätningar	38
5.3	Laddnings- och uttagseffekt	46
5.4	Inlagrad och uttagen energi	47
5.5	Driftstörningar och andra observationer	47
6.	Förprojektering av experiment- och demonstrationsanläggning	49
6.1	Bakgrund och sammanfattning	49
6.2	Driftstrategi	51
6.3	Dimensionering	52
6.4	Installationer	54
6.5	Anläggningskostnader	60
6.6	Driftekonomi	61
6.7	Ekonomi för ett fullstort borrhålslager	62
7.	Utvecklingsidéer	64
7.1	Avskärmning av grundvattenström	64
7.2	Cirkulationssystem	65
7.3	Hålplacering och ledningsdragning	66
	Referenser	68

FÖRORD

Projektet Borrhållslager i berg har omfattat installations- och värmetekniska fältförsök, utvärdering av dessa samt förprojektering av en experiment- och demonstrationsanläggning vid Högskolan i Luleå. Projektet har inneburit en bred, tvärfacklig insats. Energiverkets i Luleå positiva inställning och aktiva medverkan har varit av stor betydelse inte minst med tanke på projektets inriktning mot en experiment- och demonstrationsanläggning.

Följande personal har medverkat i projektet:

Sören Andersson,	AIB, Stockholm	projektledare
Bo Nordell	LUH, Vattenteknik	forskningsledare
Alf Johansson	LUH, "	installationer
Kurt Leijon	LUH, "	mätssystem
Roger Hermansson	LUH, Fysik	mätningar
Göran Säwe	LUH, "	mätningar
Björn Lindahl	LUH, Ekologi	ekologi
Tomas Åbyhammar	AIB, Stockholm	förprojektering
Lars Ljung	AIB, "	förprojektering
Anders Eriksson	AIB, "	förprojektering
Anders Forsén	Sv Energi System AB	förprojektering

Separata uppdrag har inom projektet genomförts av:

- Johan Claesson, Göran Hellström och Per Eskilson, Lunds Universitet, Institutionen för Matematisk Fysik, avseende matematiska beräkningsmodeller och utvärdering av mätdata.
- Tommy Claesson och Bo Ronge, CTH, Geologiska Institutionen, avseende vattenkemi och löslighetsförsök.
- Bengt Ludvig, LUH, bergmekanik, avseende lagerområdets geologi.
- Roger Lindfors och Gustaf Lindqvist, LUH, geofysik, avseende bestämning av bergartsegenskaper och seismiska mätningar
- Eva Cassel, LUH, VA-teknik, avseende vattenanalyser
- Sven Knutsson och Sven Juhlin, LUH, geoteknik, avseende bestämning av jordartsegenskaper

Anläggnings- och installationsarbeten har utförts av:

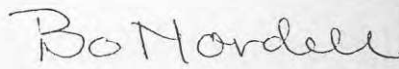
- Gällivare Berg- och betongborrning AB - kärnbör-
ning
- Luleå kommun, gatukontoret - borrning av grundvat-
tenobservationsrör
- Älvsby Bergentreprenader AB - borrning av försöks-
och temperaturmätningshål
- Svetstjänst AB - installationer

Projektet har genomförts under tiden mars 1981 till
april 1982.

Stockholm i maj 1982
AIB - ALLMÄNNA INGENJÖRSBYRÅN AB
Energi- och processteknik

Luleå i maj 1982
LUH - Tekn. Högskolan
i Luleå
Vattenteknik

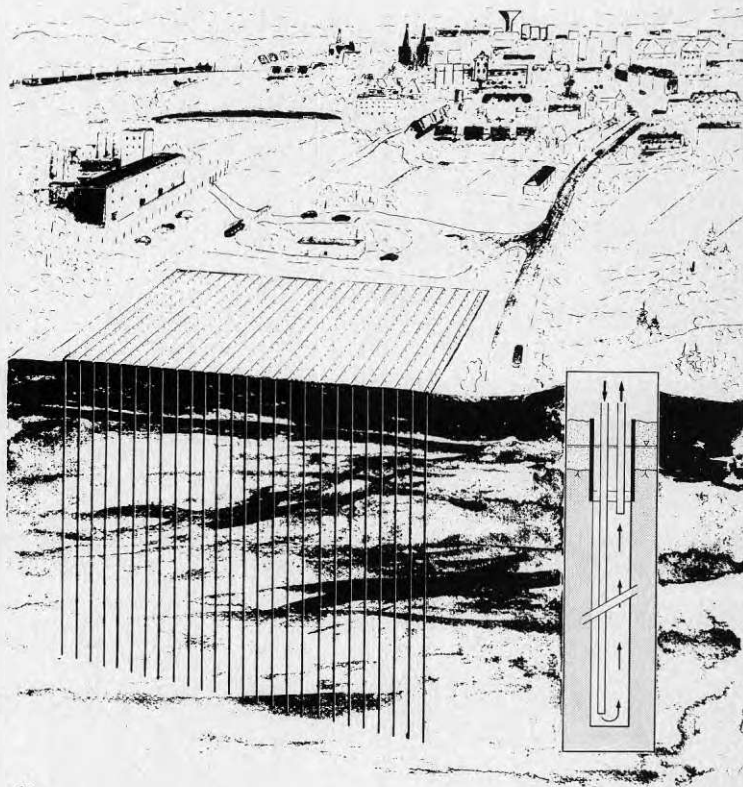

Sören Andersson


Bo Nordell

SAMMANFATTNING

Allmänt

Resultat från ett flertal pågående eller tidigare utförda teoretiska studier och praktiska försök indikerar att borrhålslagret, fig A, kan vara ett konkurrenskraftigt alternativ till andra storskaliga värmelagringsmetoder. Tillsammans med nämnda studier och försök visar de i denna rapport redovisade fältförsöken att borrhålslagret nu kan anses moget att i större skala testas i en experiment- och demonstrationsanläggning.



4

Fig A Borrhålslager. Sprängskiss.

Försöksanläggning

I denna rapport redovisade fältförsök har avsett säsongslagring av värme i borrhålslager. Försöken har genomförts i ett lager omfattande 19 försökshål och 10 hål för temperaturmätning. Försökshålens diameter är 52 mm och deras inbördes avstånd 1,3 m. Samtliga borrhål är 21 m djupa, varav 6 m i jord och 15 m i berg. I varje försökshål har installerats en kort och en lång polyetenslang med inre diametern 16 mm och godstjockleken 2 mm. Försökshålen är oinklädda. Fig B.

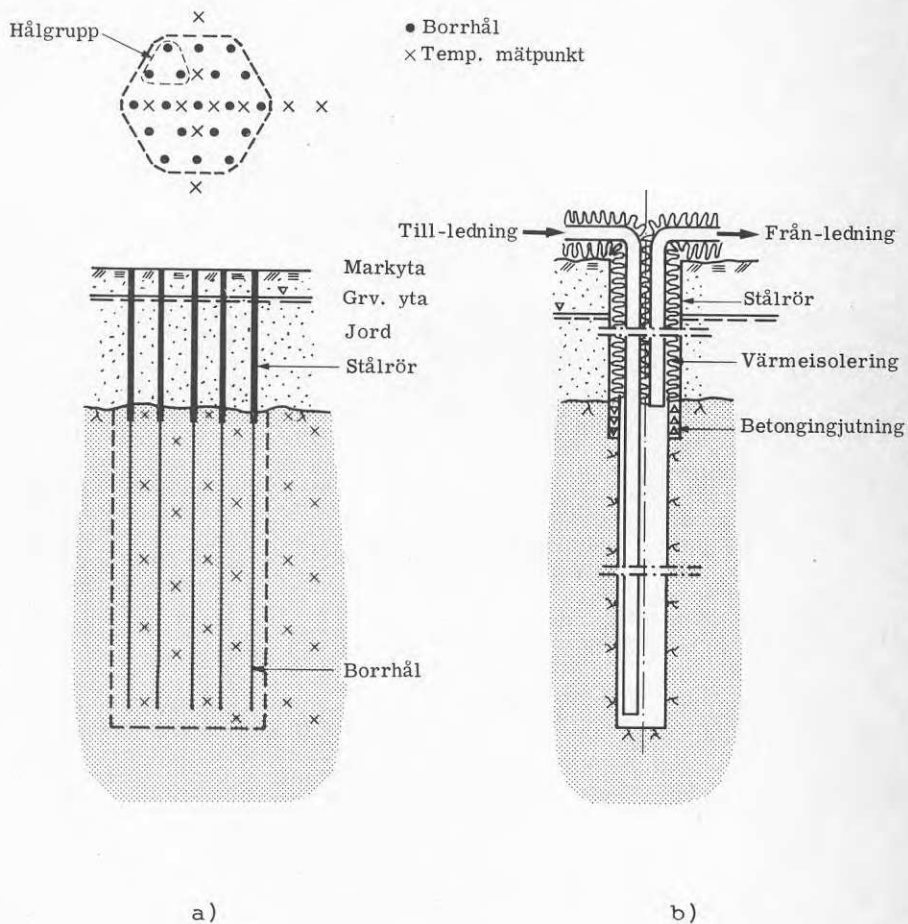


Fig B a) Plan och sektion av försökslaget
b) Sektion av försökshål utvisande isolering och slanginstallationer

Försökslagret laddas via en värmeväxlare, ansluten till en i närheten befintlig hetvattencentral på det kommunala fjärrvärmenätet. Vid värmeuttag kyls cirkulationsvattnet med vatten från en närbelägen brandpost.

Lagrets cirkulationssystem omfattar sex parallellkopplade hålgrupper med vardera tre hål. Centrumhålet är separat parallellkopplat med de sex hålgrupperna. Cirkulationen i lagret baseras på pumpning och hävertverkan mellan borrhålen.

I samband med lokalisering av försöksplatsen utfördes orienterande undersökningar omfattande bl a geologisk kartering och seismiska undersökningar. Efter slutgiltigt platsval kompletterades undersökningarna och har bl a omfattat observationer av grundvattenstånd, kärnbörning, permeabilitetsbestämning och bestämning av fysikaliska data för berg och överlagrande jord.

Parallellt med värmelagringsförsöken har i autoklav utförts löslighetsanalyser på bergartsmaterial från försökslagret.

Försöksresultat

Under försöken simulerades fem årscykler. Varje årscykel har omfattat följande faser:

- laddning	10 dygn
- vila	4 dygn
- uttag	6 dygn
- vila	4 dygn

Totalt 24 dygn

För att i ett försökslager under 24 dygn simulera ett värmetekniskt förlopp som i ett fullskaligt lager utspelas under ett år, krävs en nedskalning i längd till $\sqrt{24} / \sqrt{365}$, dvs 1:3,9. Försökslagret kan således betraktas som en med längdfaktorn 3,9 förminskad del av ett fullskalelager. Försökslagrets volym är 400 m³.

De under försöken uppmätta temperaturerna i berggrunden, såväl inom som utanför lagret, visar god överensstämmelse med beräkningar utförda enligt en vid Lunds Universitet framtagen tredimensionell matematisk modell. Den goda överensstämmelsen exemplifieras representativt i fig C, där kontinuerligt uppmätta temperaturer i berg och cirkulationsvattnet markerats med heldragna linjer och motsvarande beräknade värden med olika punktmarkeringar.

Bortsett från vissa initialsvårigheter som snabbt övervanns har samtliga installationer fungerat störningsfritt.

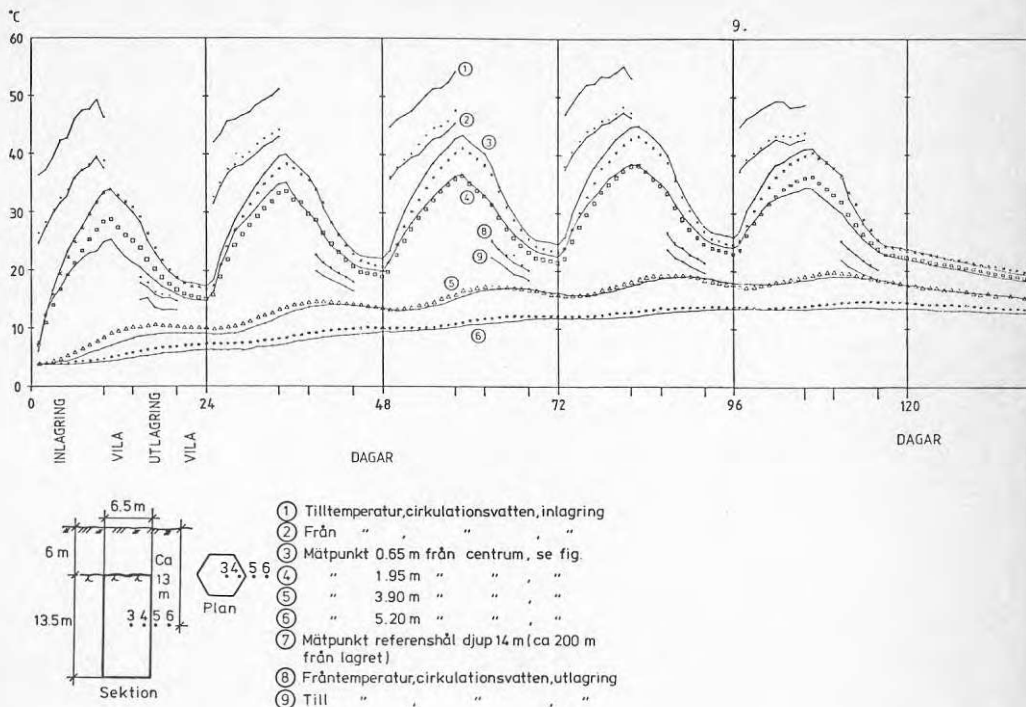


Fig C Uppmätta temperaturer (linjer) och motsvarande beräknade temperaturer (punktmarkeringar)

Experiment- och demonstrationsanläggning

Inom projektet har även utförts en förprojektering av ett borrhålslager avsett som en experiment- och demonstrationsanläggning. Lagret skall sommartid via fjärrvärmenätet laddas med överskottsvärme från kraftvärmeverket i Luleå. Vintertid skall lagret värma ett av husblocken vid Tekniska Högskolan. Lagret får kapaciteten 2,2 GWh och utföres med öppet cirkulationssystem.

1. INLEDNING

1.1 Lagringsbehov

Behov av storskalig värmelagring kan föreligga i samband med utnyttjande av solvärme och spillvärme eller vid effektutjämnning i fjärrvärmenät. I det sistnämnda fallet kan t ex ett säsongslager medge en längre utnyttjandetid för hetvattencentralen och en lägre installerad effekt. Ett säsongslager kan även medge en mer ekonomisk användning av värmepumpar, t ex vid utnyttjande av solvärmda mark- och vattensystem. Som ett extremfall kan även tänkas säsongslagring av värme producerad under vår - sommar av "överskottsel" som då kan erhållas till låg kostnad.

Bedömningar av maximalt erforderlig lagringskapacitet år 1990 har bl a gjorts vid ett arbetsseminarium i Älvkarleby i mars 1981, anordnat av IVA's kommitté för undermarksbyggande (1). Vid seminariet redovisades bl a följande schablonartade uppskattning av lagringskapacitet och fördelning på olika lagertyper.

<u>Lagertyp</u>	<u>Kapacitet</u>	<u>Volym</u>	<u>Antal</u>
Bergrum	1,0-1,5 TWh	20-30·10 ⁶ m ³	40-60 st
Borrhålslager	0,5-1,5 "	20-40·10 ⁶ "	20-40
Groplager	0,5-1,5 "	25-35·10 ⁶ "	50-70
Lagring i lera, torv	0,5-1,0 "	25-35·10 ⁶ "	100-200
Övrigt	0,5-1,0 "	-	-
	<u>3,0-6,5 TWh</u>		<u>210-370 st</u>

Den reella lagringsefterfrågan ansågs dock fram till 1990 bli avsevärt lägre än i tabellen redovisade 3,0-6,5 TWh. En utbyggnad fram till 1990 motsvarande 1 à 3 TWh bedöms mer sannolikt men även denna lägre utbyggnadstakt kan på grund av begränsad byggkapacitet för vissa typer av lager komma att ytterligare reduceras.

Det är dock uppenbart att även en låg utbyggnadstakt kommer att kräva en omfattande verksamhet avseende utveckling och anläggning av säsongslager för värme.

1.2. Utvecklingsläge

1.2.1 Allmänt

Ekonomiska och tekniska jämförelser mellan olika lagertyper är som regel svåra att göra. Värmelagret är endast en av många delar i ett värmesystem där systemfrågorna ofta är så komplexa att generella värderingar ej låter sig göras. Dessutom är värmelagringstekniken för några metoder endast i ett inledningsskede medan den

för andra metoder redan demonstrerats. Försiktighet bör därför iakttas beträffande bedömningar av olika koncepts förväntade ekonomiska och tekniska utfall.

1.2.2 Borrhålslagret

Borrhålslagret i berg har allmänt teoretiskt studerats av bl a Johansson B och Nordell B, 1980 (2), Andersson S, Eriksson A och Tollin J, 1981 (3) och Kadesjö H och Sintorn J, 1981 (4). Avancerade matematiska beräkningsmodeller har utvecklats vid Lunds universitet, Johansson M och Claesson J, 1979 (5) samt Hellström G, 1981 (6).

I samband med Södertuna-projektet studerar AIB för närvarande hur ett borrhålslagrets driftstrategi kan anpassas till ett större, till 80% solvärt, bostadsområde. AIB studerar vidare hur ett borrhålslager kan utnyttjas i kombination med värmepumpcentraler för sjövärm. Industriplanering - Anders Forsén och Högskolan i Luleå - utreder borrhålslagrets användning för säsongslagring av spillvärme från processindustri.

Praktiska försök i ett borrhålslager för en villa och vid låga temperaturer har utförts i Sigtuna, Platell O och Wikström H, 1981 (7).

Vid Vattenfalls laboratorium i Älvkarleby genomförs för närvarande fullskaleförsök i tre 110 m djupa borrhål. Försöken, som genomförs av Vattenfall och AIB, avser i första hand praktiska installations- och utförandefrågor vid slutna cirkulationssystem.

Vid Högskolan i Luleå har fältförsök och systemstudier genomförts i samarbete med Svenska Energi System AB och AIB. Arbetena, som redovisas i denna rapport, har bl a omfattat simulering av fem årscykler i ett till 1:4 nedskalat lager med öppet cirkulationssystem.

Resultat från ovan angivna studier och praktiska försök visar att borrhålslagret kan vara ett konkurrenskraftigt alternativ till andra storskaliga lagringsmetoder, Andersson S, Eriksson A och Nordell B, 1981 (8). Borrhålslagret bör därför nu anses moget att i större skala testas i en demonstrations- och experimentanläggning.

2. BORRHÅLSLAGRETS ALLMÄNNA FUNKTION OCH UPPBYGGNAD

2.1 Funktionsprinciper

Borrhålslagrets funktion har tidigare ingående beskrivits i bl a (2) och (3). I det följande behandlas därför funktionsprinciperna mycket kortfattat.

Borrhålslagrets funktion baseras på bergets värmelagrings- och värmeledningsförmåga. Värmen överförs till eller från berget med hjälp av vatten som cirkuleras genom ett stort antal borrhål, fig 2.1.

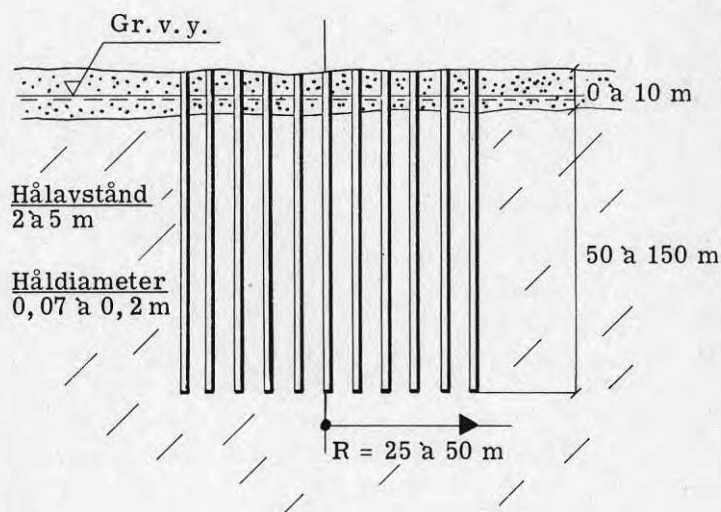


Fig 2.1 Sektion av cirkulär cylindriskt borrhålslager
Principskiss

Värmelagringsförmågan hos t ex gnejs och granit uppgår till ca $0,6 \text{ kWh/m}^3 \cdot \text{C}^\circ$, dvs hälften av motsvarande värde för vatten.

Lagrets funktionsdata såsom laddnings- och uttagseffekt, energi- och temperaturverkningsgrad bestäms av borrhålsavstånd, borrhålsdiameter, lagerstorlek, driftstrategi etc (2), (3), (5).

2.2 Cirkulationssystem

Det värmebärande vattnet cirkuleras genom borrhålen i öppna eller slutna system, fig 2.2. Borrhålen kan enskilt eller i grupper parallellkopplas eller seriekopplas.

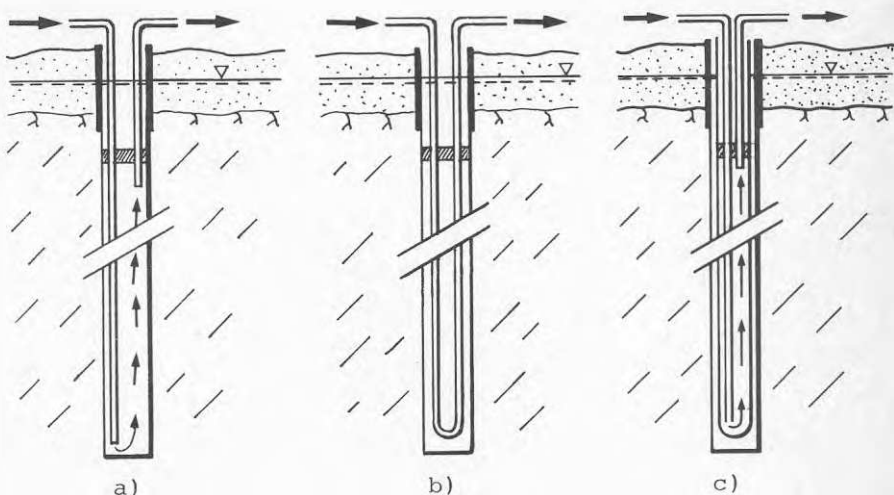


Fig 2.2 Cirkulationssystem
a) öppet system b) och c) slutna system

Borrhålet kan även förses med ett foderrör som cementeras och/eller pressas mot bergväggen. Metoden medger god värmeöverföring till och från berget men innebär höga anläggningskostnader. Mycket tunnväggiga foderrör trycks lätt ihop om borrhålet skulle tömmas på vatten.

Det följande avrapporterade fältförsöket har genomförts med öppet cirkulationssystem enligt a) i fig 2.2.

2.3 Lagrets storlek och form

Ett borrhållslager saknar konstgjord värmeisolering, möjligen med undantag av överytan. Det är därför med hänsyn till värmeförlusterna väsentligt att lagrets volym är tillräckligt stor för att möjliggöra acceptabla energi- och temperaturverkningsgrader.

En minsta "ekonomisk" lagerstorlek kan ej generellt fastställas. Allmänt kan dock konstateras att åtminstone vid höga lagringstemperaturer bör en lagerstorlek knappast understiga $100\ 000\ m^3$.

Lagrets verkningsgrad påverkas även av lagrets form. Speciellt vid stora lagervolymer har dock måttliga avvikelser från "liksidiga" lager ingen praktisk betydelse.

Erforderlig lagerstorlek som funktion av antalet uppvärmda småhus framgår schematiskt av fig 2.3.

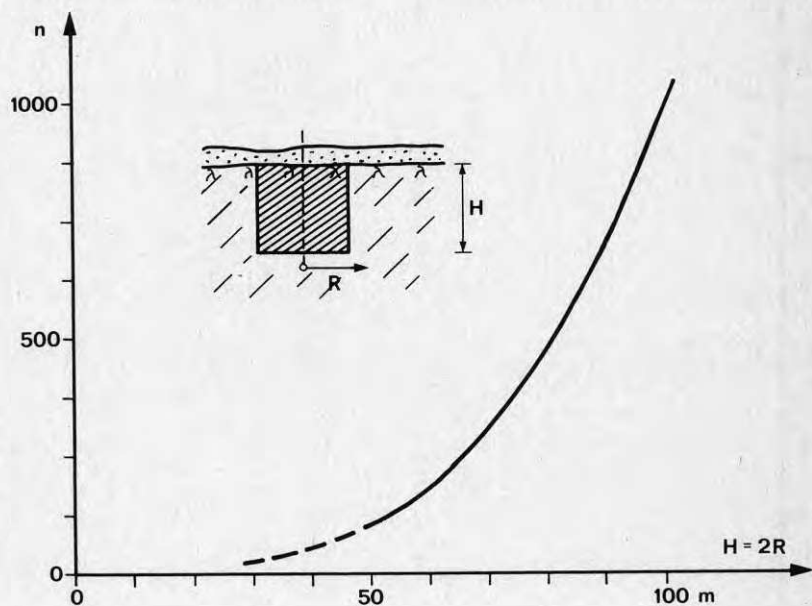


Fig 2.3 Lagerstorlek som funktion av lagringskapacitet (antal småhus) vid en antagen effektiv temperaturdifferens på 35°C mellan laddat och oladdat lager

2.4 Driftstrategier

Olika driftstrategier kan tillämpas vid såväl laddning som uttag. I det enklaste fallet laddas resp urladdas i princip hela lagervolymen samtidigt. Samtliga borrhål genomströmmas då av lika stora flöden med lika temperatur.

Vid en annan strategi, med bättre temperatur- och energiverkningsgrad, laddas lagret från centrum och radiellt utåt. Uttag sker i omvänd riktning med start i lagrets perifer delar. I princip innebär detta att borrhålen är seriekopplade och att vatten leds från borrhål till borrhål i radiell riktning. En praktisk tillämpning av denna strategi kan vara att indela lagret i olika temperaturzoner, fig 2.4.

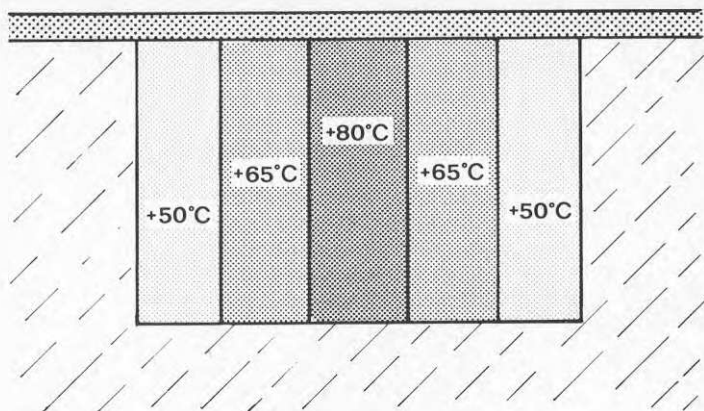


Fig 2.4 Temperaturzoner i cirkulär cylindriskt borrhållslager, sektion. Principskiss

En driftstrategi som medger utnyttjande av mer eller mindre distinkta temperaturzoner förutsätter dock mycket stora lagervolymer (många borrhål). En radiell seriekoppling av borrhålen vid mindre lager leder endast till en jämnt fallande temperatur från lagrets centrum och radiellt utåt. Även vid små lager erhålles dock med denna strategi mindre förluster och således en bättre temperatur- och energiverkningsgrad, fig 2.5.

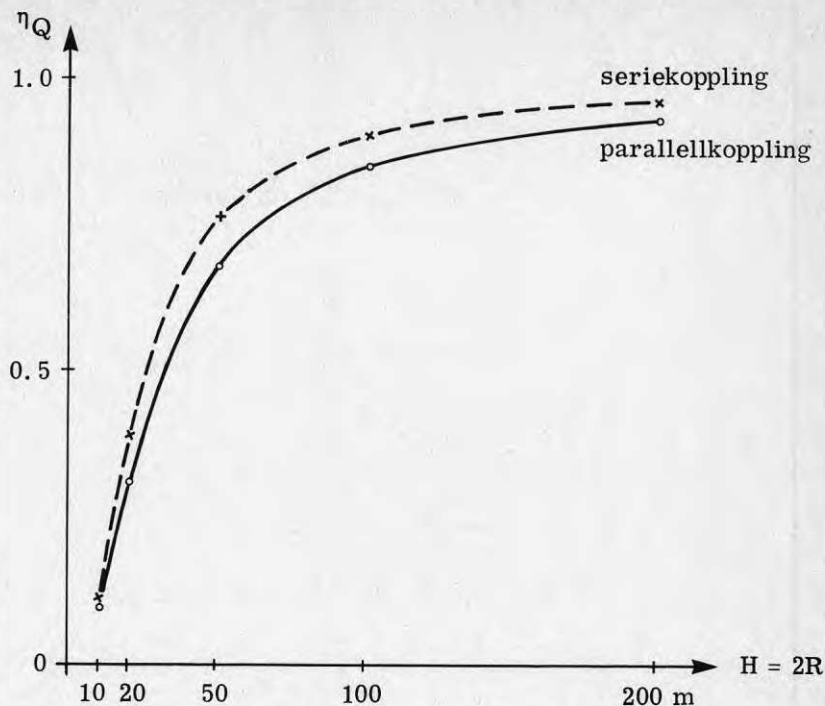


Fig 2.5 Energiverkningsgrad som funktion av lagerstorlek och driftstrategi

Diagrammet är baserat på följande förutsättningar:

- —○— samtliga borrhål parallellkopplade
- ---x--- lagret uppdelat i 4 seriekopplade zoner, vardera med samma antal borrhål
- 5:e årscykeln
- borrhålsavstånd 4 m
- värmeledningstal $\lambda = 3,5 \text{ W/m,K}$
- lagringscykeln omfattar 3 mån laddning (konst $+70^\circ\text{C}$), 3 mån vila, 3 mån uttag (konst $+10^\circ\text{C}$ på inmatat vatten) samt 3 mån vila.

I fig 2.6 åskådliggöres energiverkningsgradens känslighet för variationer hos bergets värmeledningstal, λ , avstånd mellan borrhålen, d , samt det relativa cirkulationsflödet uttryckt som $Q_f/4R^2H$. Känslighetsanalysen har gjorts utgående från $H_f = 2R = 100 \text{ m}$, $\lambda = 3,5 \text{ W/m,K}$, $d = 4 \text{ m}$ och $Q_f = 5 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}$.

3. FÖRSÖKSLAGRET

3.1 Lokalisering

I samband med ett av Norrlandsfonden och Norrbotten-delegationen finansierat projekt "Utveckling av teknik för energilagring i mark" (9) observerades borrhåls-lagret som ett tekniskt och ekonomiskt intressant lag-ringsalternativ. Med hänsyn bl a till projektets kom-mersiella inriktning och till det förhållande att lämp-lig berggrund för borrhålslager torde finnas på de flesta platser inriktades arbetet mot denna lagertyp.

En försöksplats lokaliserades norr om Högskolan i Lu-leå, ca 200 m från de närmaste byggnaderna. Avgörande för lokaliseringen var bl a

- allmänt gynnsamma geologiska och topografiska indikationer
- närhet till befintligt fjärrvärmenät
- närhet till Högskolan och dess tekniska resur-ser
- möjligheten att i fortsatta projektetapper an-lägga ett lager i experiment- och demonstra-tionssyfte varvid valda delar av Högskolan skulle kunna förses med värme från lagret.

Inom ovan nämnda projekt borrades även de 19 cirkula-tionshål och 10 observationshål som utgör stommen i det nedskalade försökslagret.

3.2 Lagrets uppbyggnad och funktion

Försökslagret består av 19 försökshål med diameter 52 mm för laddning och uttag samt 10 borrhål för tempera-turmätning. Samtliga borrhål är 21 m djupa, varav 6 m i jord och 15 m i berg. Jordgenomgången är skyddad med hjälp av foderrör som nedborrats ca 0,2 m och fastgju-tits i berget. Bergborrningen har sedan utförts genom foderrör och ingjutning, fig 3.1.

I varje försökshål har monterats två 20/16 mm polyeten-slangar. Den längsta slangen går till djupet 13 m under bergytan medan den korta endast når strax under berg-ytan. Den nedersta delen av borrhålet, mellan 13 och 15 m under bergytan, är avsedd för uppsamling av slam och nedfallande sten etc.

Försökshålen har placerats i hörnen av liksidiga tri-anglar med sidan, dvs borrhålsavståndet, 1,3 m. Tempe-raturmätningshålen har placerats såväl mellan försöks-hålen som utanför själva lagerkroppen, fig 3.1.

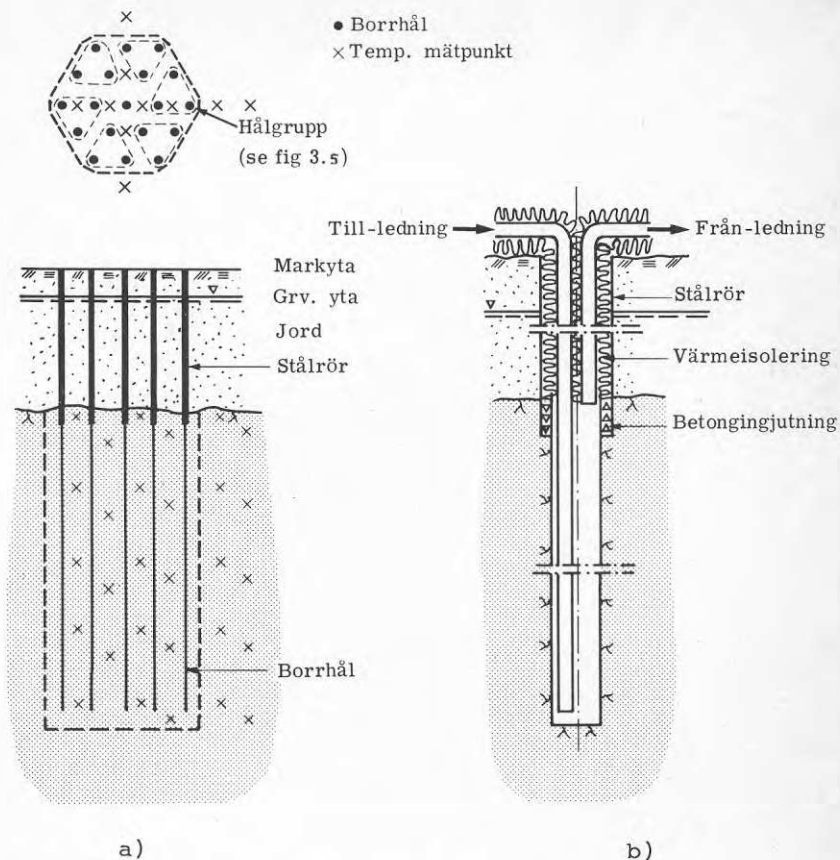


Fig 3.1 a) Plan och sektion av försökslagret
b) Sektion av borrhål, utvisande isolering och slanginstallationer

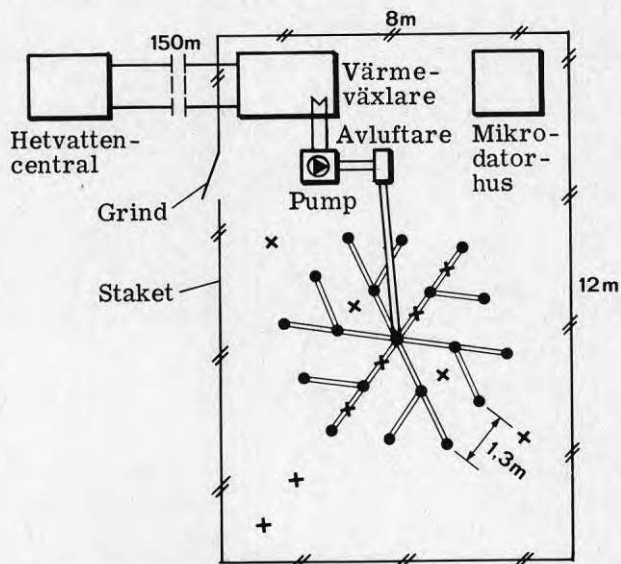
En dimensionsanalys av den allmänna värmeledningsekvationen visar att längd- och tidsskalorna i modell och verklighet bestäms av sambandet

$$\frac{1}{l_1} = \sqrt{\frac{T}{T_1}}$$

För att i försökslagret under 24 dygn simulera ett värmetekniskt förlopp som i ett fullskaligt lager utspelas under ett år krävs således en nedskalning i längd till $\sqrt{24/365}$, dvs 1:3,9. Försökslagrets borrhålsavstånd, 1,3 m, motsvarar då i full skala 5,1 m och lagervolymen 400 m³ motsvarar 24.000 m³.

Försökslagret laddas via en värmeväxlare, ansluten till en i närheten befintlig 3 MW hetvattencentral till det kommunala fjärrvärmenätet. Vid värmeuttag kyls cirkula-

tionsvattnet med hjälp av vatten från en närbelägen brandpost. Försöksanläggningens installationer och allmänna utformning framgår översiktligt av fig 3.2 och 3.3.



- Borrhål för lagring och uttag för värme
- × Borrhål för temperaturmätningar i jord och berg

Fig 3.2 Försöksanläggningens installationer och allmänna utformning

Lagrets cirkulationssystem omfattar sex parallellkopplade grupper med vardera tre hål. Centrumhålet är separat parallellkopplat med de sex hålgrupperna.

Centrumhålet och hålgrupperna är via avluftare och flödesfördelare anslutna till lagrets pump och värmeväxlare, fig 3.5.

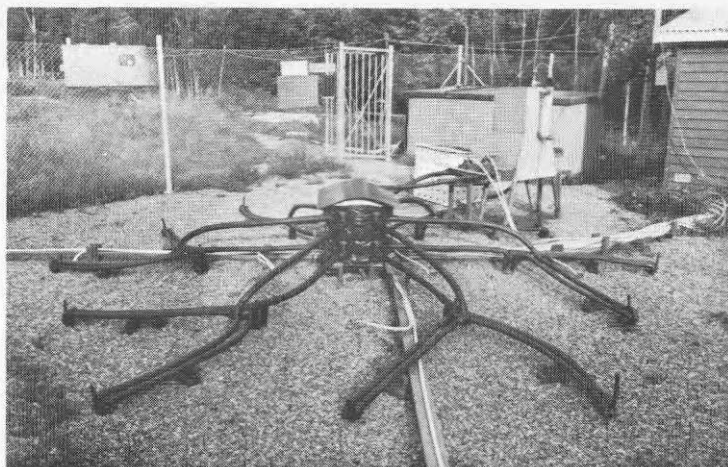


Fig 3.3 Försöksanläggningen

Cirkulationssystemet har utexperimenterats och testats i laboratorieförsök, fig 3.4.

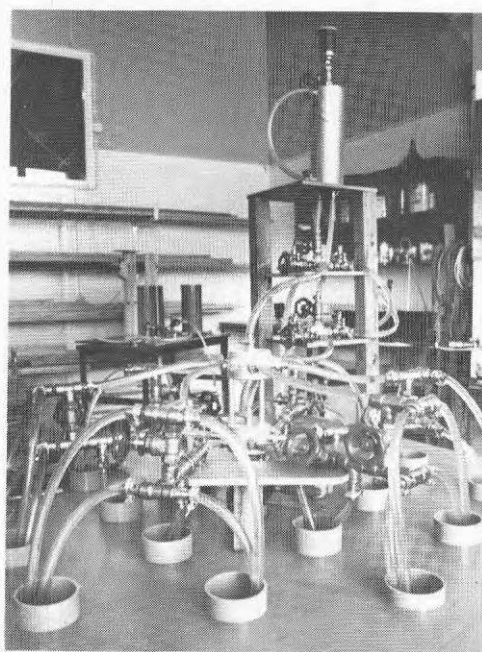


Fig 3.4 Testarrangemang för cirkulationssystemet

Som framgår av fig 3.5 är cirkulationen i lagret baserad på hävertverkan. Hävertprincipen medför den stora fördelen att flödet mellan borrhålen styrs automatiskt och ett borrhål riskerar ej att överfyllas. Det är dock av avgörande betydelse att inga luft- eller gasfickor bildas så att häverten bryts. För att förhindra detta och samtidigt medge en enkel uppstartning av cirkulationen har en luftsluss i form av en strypbricka placerats i särskilda grenrör. Se fig 3.5 och 3.6. Strypbrickan tillåter ett passerande flöde på någon procent av det totala flödet genom häverten.

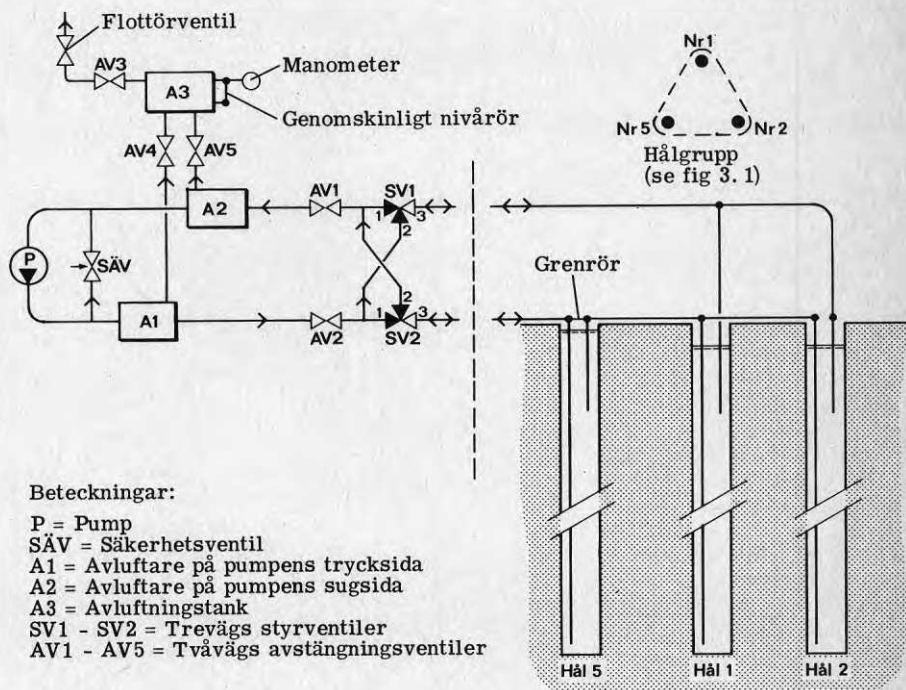


Fig 3.5 Avluftnings- och cirkulationssystem
Principskiss

Nivåskillnaden, 10-30 cm, mellan vattenytorna i de olika försökshålen orsakar vattenrörelser i bergets naturliga spricksystem. Under laddningsperioden är grundvattennivån högst i lagrets centrum vilket orsakar en strömning mot lagrets periferi. Vid värmeuttag då cirkulationsriktningen är den motsatta sker strömningen mot lagrets centrum. Dessa strömningförhållanden ökar lagrets in och uttagningseffekt eftersom värmetransporten via grundvattnet hela tiden adderas till värmetransporten i berget via ledning.

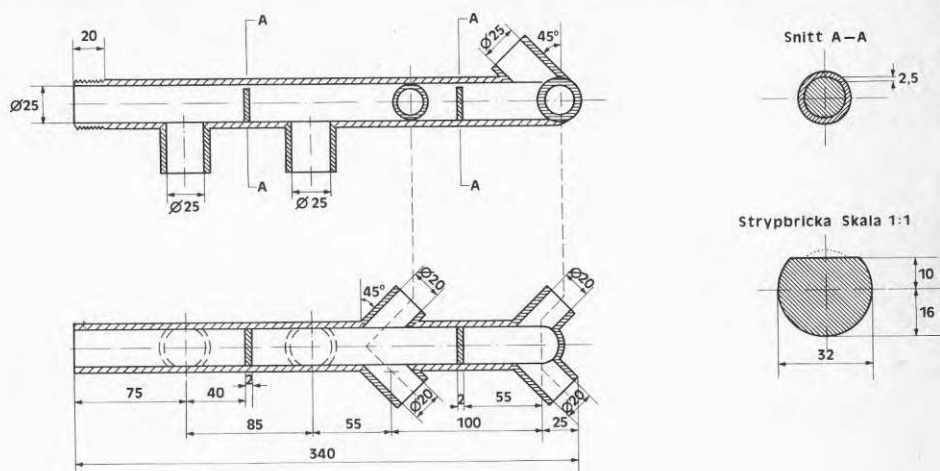


Fig 3.6 Grenrör med luftsluss, jfr fig 3.5

3.3 Mätssystem

3.3.1 Mätpunkter

Under försöken har varje timma registrerats 61 temperaturmätningar. Flödesmätning utfördes kontinuerligt med pulsräknare. Flödes- och temperaturmätning har utförts i samlingsledningen mellan lager och värmeväxlare och har således registrerat det totala energiflödet till och från lagret. Marktemperaturerna har uppmätts i berg och ovanförliggande jordlager, såväl inom som utanför själva lagerkroppen. Temperaturgivarna placerades i särskilda temperaturmätningshål, fig 3.7. Hålen fylldes därefter med sand för att förhindra egenkonvektion.

Temperaturmätningar har under drift även utförts i försökshålen med hjälp av termoelement monterade på mätband. Vidare har temperaturmätningar utförts i ett referensborrhål som ej påverkats av lagrets uppvärmning.

Grundvattennivån inom och utanför lagret har uppmätts med hjälp av lyslod.

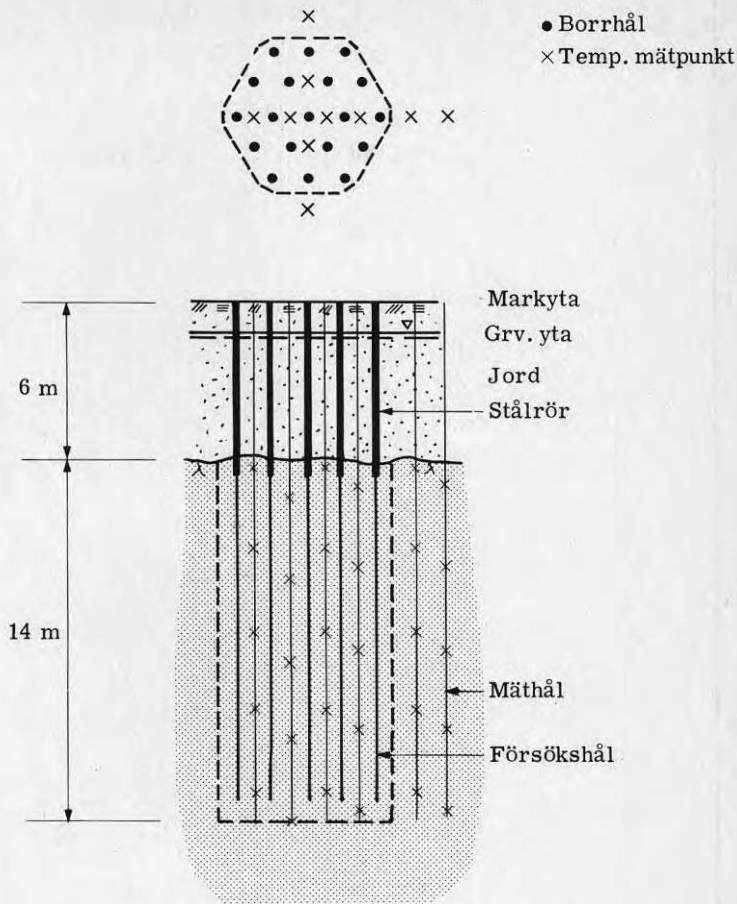


Fig 3.7 Temperaturgivarnas placering. Vertikalt avstånd mellan givare i samma borrhål är 3,25 m

3.3.2 Temperaturgivare

Temperaturgivarna utgöres av koppar-konstantan termoelement som inkopplats i rörstycken som i sin tur monterats som skarvstycken i en slang, se fig 3.8.

I försöken använd inkapsling och montering av temperaturgivare har visat sig mycket tillförlitlig. Samtliga temperaturgivare har fungerat utan anmärkning. Detta förhållande är värt att observera eftersom studium av liknande mätprojekt visar att svårigheter ofta uppstår vid denna typ av mätning.

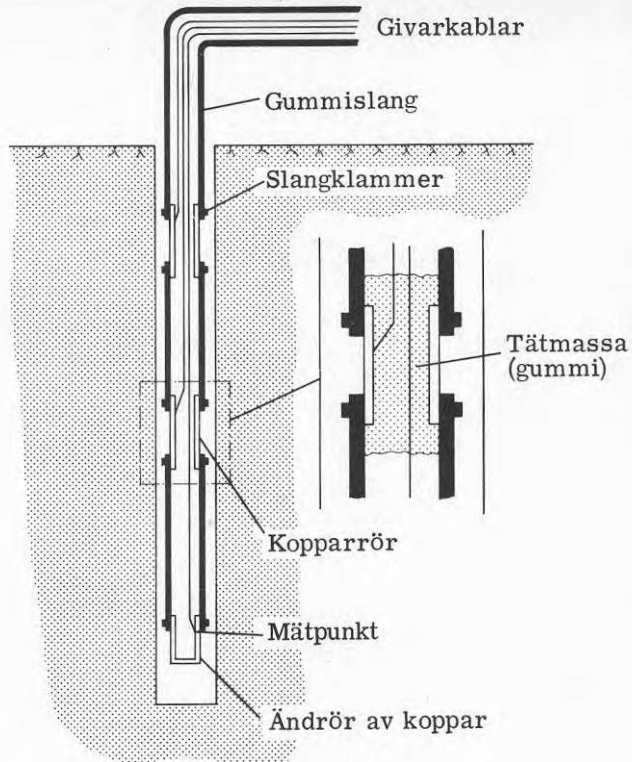


Fig 3.8 Temperaturgivarnas inkapsling och montering i borrhål. Borrhålen fyller med sand efter montering

3.3.3 Datainsamling och registrering

För datainsamling har använts en mikro dator, ZAMPO Z80, med två floppydiskar och dataskärm. I systemet har även ingått ett antal dataprogram med vars hjälp lagrets funktion kunnat kontrolleras. Programmen har t ex möjliggjort att på dataskärmen ta fram mätvärden från valfri tidpunkt eller att för en given tidsperiod skriva ut mätvärden för valfri mätpunkt.

Mätsystemets principiella uppbyggnad framgår av fig 3.9.

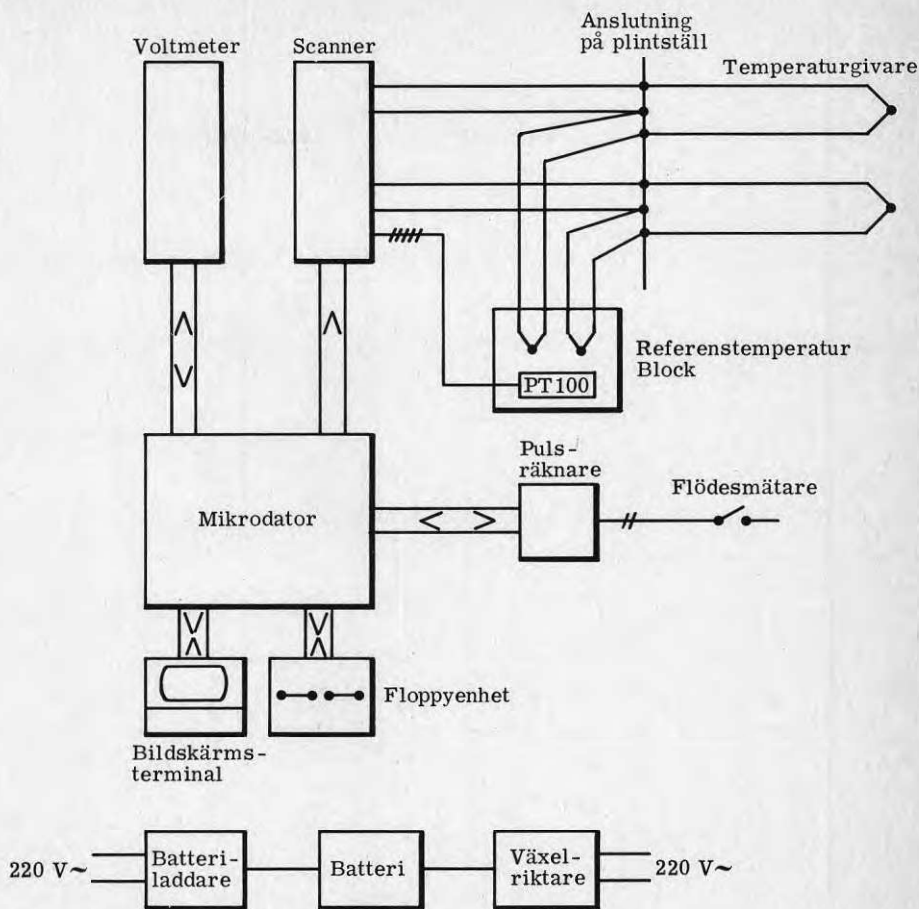


Fig 3.9 Försöksvärmelagrets mätsystem.
Principskiss

4 FÖRUNDERSÖKNING

4.1 Allmänt

I samband med lokalisering av försöksplatsen, fig 4.1, utfördes orienterande undersökningar omfattande bl a geologisk kartering och seismiska undersökningar.

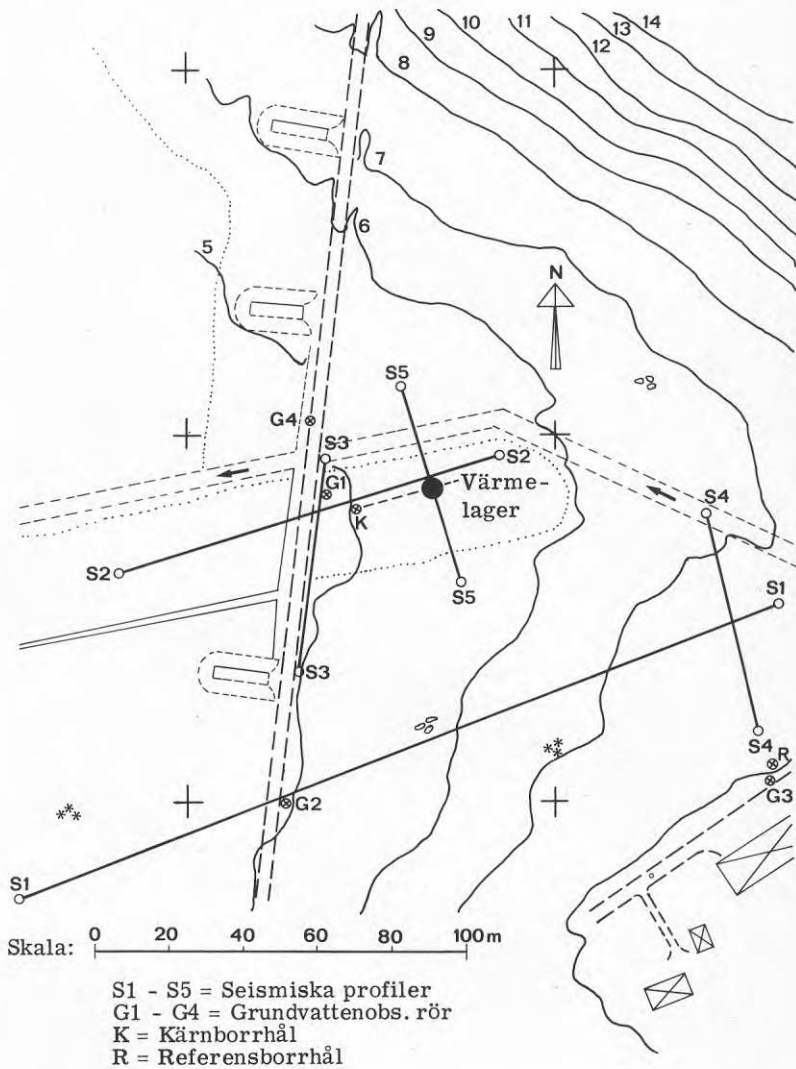


Fig 4.1 Värmelagrets lokalisering. Terrängförhållanden

Efter fastställd lokalisering kompletterades undersökningarna och har bl a omfattat grundvattenobservationer, kärnbörning, permeabilitetsbestämning och bestämning av värmetekniska data för berg och överlagrande jord. Parallellt med värmelagringsförsöken har i autoklav utförts löslighetsanalyser på bergartsmaterial från lagret. Även förberedande ekologiska studier har utförts.

4.2 Geologisk kartering

Berggrunden i lagerområdet utgörs av slirig medelkornig gnejs, överlagrad av huvudsakligen mjällig lera, typ svartmocka. Berg i dagen saknas i omedelbar närhet av lagerplatsen. 80 m sydväst om lagerplatsen kan i ett utsprängt dike konstateras att gnejsen är starkt förskiffrad. Förskiffringsplanen är orienterade N5/74°W.

På Porsöberget, ca 400 m norr om lagerplatsen, är gnejsen migmatiserad. Förskiffringsplanen stryker i N65E och stupar mellan 65N och vertikalt.

Den geologiska karteringen finns närmare beskriven av Ludvig B, 1981 (10).

4.3 Seismiska undersökningar

För att kartlägga jorddjup och krosszoner inom försöksområdet utfördes seismiska mätningar i fem profiler, fig 4.2.

De seismiska profilerna visar bl a att jordtäckningens mäktighet i lagerområdet är mellan 5 och 10 m och att själva lagerplatsen ej genomtväras av några större krosszoner. Senare utförda borrningar har visat god överensstämmelse med de jorddjup som indikerats vid den seismiska undersökningen.

4.4 Grundvattenobservationer

För grundvattenobservationer borrades fyra observationsrör G1, G2, G3 och G4, se fig 4.1. Differenserna mellan grundvattenytans nivå i de olika observationsrören indikerar tillsammans med jordlagerdjupen en strömningsriktning hos grundvattnet enligt fig 4.3. Den uppmätta gradienten är ca 2 ‰.

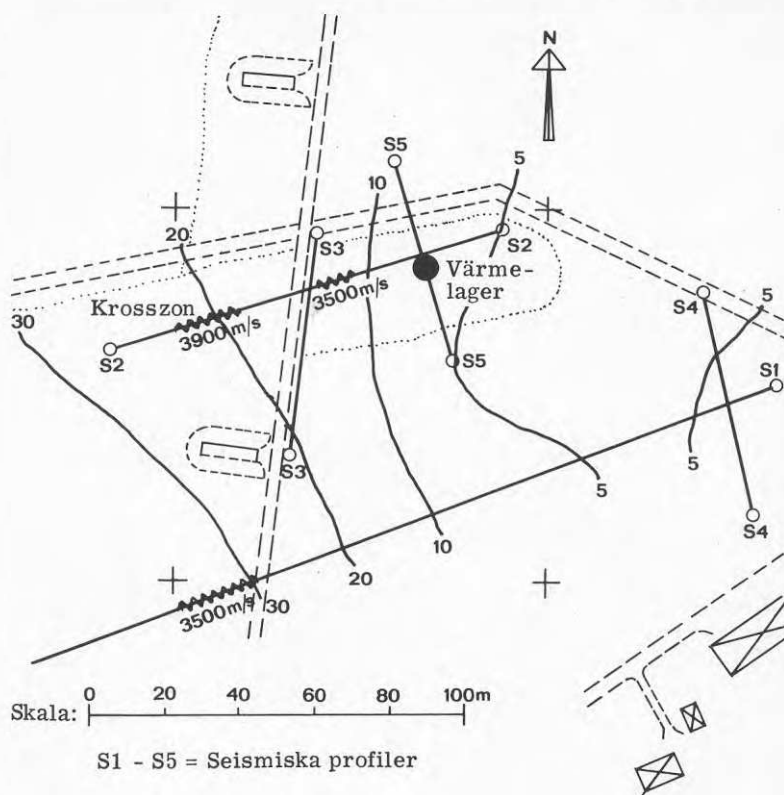


Fig 4.2 Seismiska profiler inom försöksområdet
Isolinjer visar jordtäcket tjocklek

4.5 Kärnborrning

Ett 48 m långt kärnborrhål med 32 mm kärna ansattes 23 m väster om lagret och riktades snett in under lagret. Hålet borrades parallellt med den seismiska profilen nr 2, se fig 4.1.

Under borrningen har kärnorientering utförts med Atlas Copcos kärnorienterare. Kärnkartering har utförts varvid sprickornas läge och egenskaper registrerats. Ludvig B, 1981 (10).

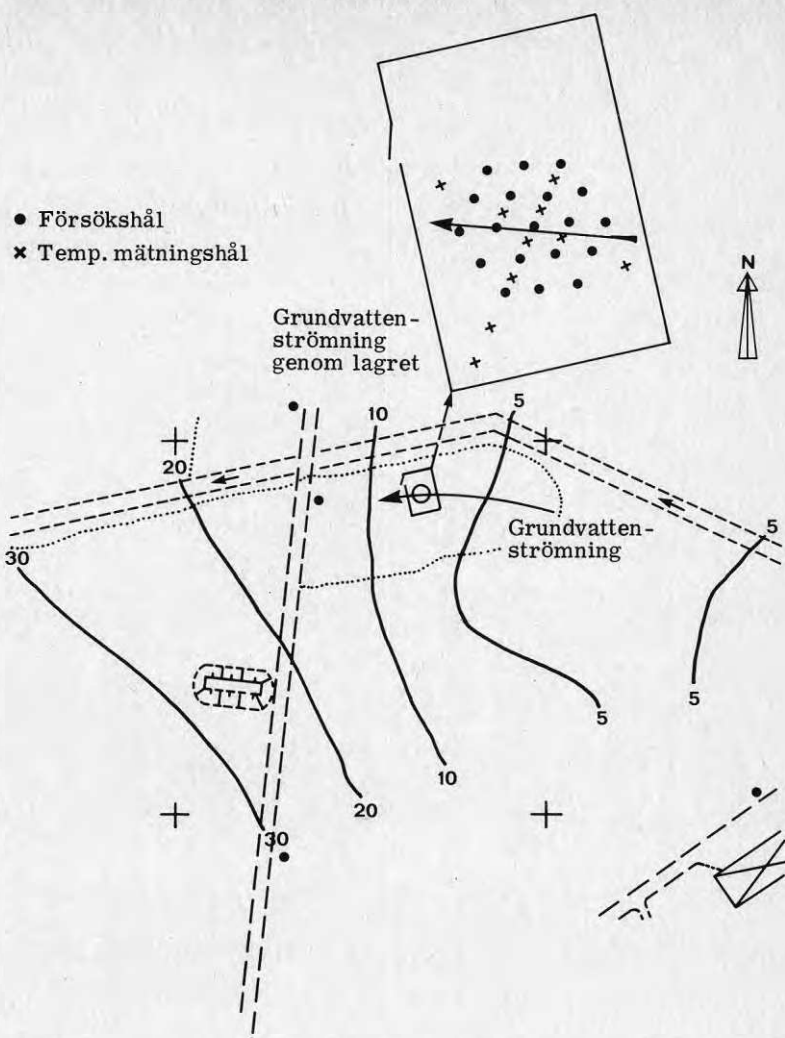


Fig 4.3 Grundvattenströmmens riktning i lagerområdet. Isolinjer visar jordtäckets tjocklek

Bergarterna i kärnan utgörs huvudsakligen av grå, medelkornig gnejs. Tolv sprickzoner med en sammanlagd bredd av 2,7 m skär kärnborrhålet. Flertalet av dessa zoner har bildats genom uppsprickning längs förskiffringsplanen. Förskiffringsplanen stryker i N30E med vertikal stupning. Sprickzonerna innehåller lermineral och biotitskikt och kan därför antas vara måttligt vattengenomsläppliga.

I fig 4.4 visas en profil längs kärnbrorhålet med sprickzoner i borrhkärnan extrapolerade till bergytan. De sprickzoner som har antagits genomtvära värmelagret är endast 10-12 cm breda utom en som är 55 cm bred.

Ingen av de breda krosszoner som registrerats vid de seismiska mätningarna har påträffats i kärnbrorhålet. Detta styrker den geologiska tolkningen att dominant sprick- och krosszoner följer förskifningsplanen som stupar brant och stryker i NS-NNE.

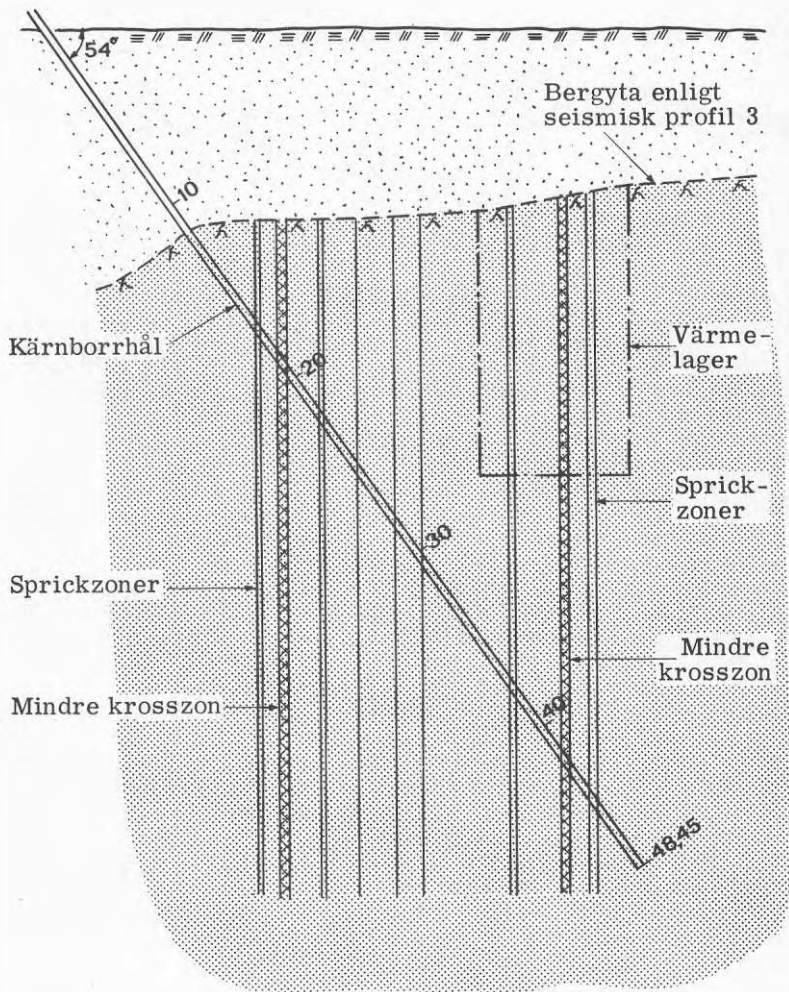


Fig 4.4 Profil längs kärnbrorhålet

4.6 Permeabilitetsbestämning

Bergets permeabilitet har bestämts genom hydraulisk provtryckning, Marton M och Andersson A, 1981 (11). Provtryckningen genomfördes med kallt vatten innan laddnings- och uttagsförsöken påbörjades.

Provtryckningen har utförts så att vatten pressats in i lagrets centrumhål under konstant övertryck varvid grundvattennivåns förändring i de perifera hålen registrerats. Provtryckningen har utförts som enkel manchett-tryckning över hela borrhållslängden. Permeabiliteten har därvid med konventionella beräkningsmetoder bestämts till storleksordningen $2 \cdot 10^{-7}$ m/s.

Det bör observeras att eftersom provtryckningen skett över hela borrhålet i ett steg kan den uppmätta permeabiliteten teoretiskt tänkas ha orsakats av en enda spricka. Det uppmätta värdet överensstämmer dock väl med ett flertal andra mätningar utförda på olika ställen i Sverige och på ringa djup under bergytan (3).

Spricksystemets vattengenomsläpplighet då lagret är uppvärmt kan avvika avsevärt från vad som uppmäts vid provtryckningen. Ett varmt vatten har lägre viskositet och möjliggör därmed större flöden vid i övrigt oförändrade förhållanden. Då lagret är uppvärmt påverkas emellertid även spricksystemet, troligen så att sprickvidderna minskar, vilket då tenderar att minska vattengenomsläppligheten. Det är därför av intresse dels att studera hur nu genomförda uppvärmnings-avkylningscykler påverkat spricksystemet, dels att studera vattengenomsläppligheten i ett uppvärmt lager.

4.7 Fysikaliska data för berg och jordtäck

Vid förundersökningen har ett antal fysikaliska data uppmäts. Erhållna data redovisas nedan.

BERG

Bergart:	slirig medelkornig gnejs
Värmekapacitet:	$2,03 \text{ MJ/m}^3, \text{K}$
Värmeledning:	$3,7 \text{ W/m, K}$
Densitet:	2742 kg/m^3
Hydraulisk konduktivitet:	$2 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$
Initialtemperatur:	$3,5^\circ\text{C}$

JORD

Jordart:	svartmokka
Jordtäckets tjocklek:	6,0 m
Grundvattennivå:	0,7 m under markytan
Värmekapacitet:	$3,49 \text{ MJ/m}^3, \text{K}$
Värmeledningstal:	$0,75 \text{ W/m, K}$
Skrymdensitet:	1540 kg/m^3
Hydraulisk konduktivitet:	$10^9 - 10^{11} \text{ m/s}$ (bedömt värde)

4.8 Grundvattenkemi

4.8.1 Allmänt

För ett värmelager av typ borrhållager, speciellt med öppet cirkulationssystem, är grundvattenkemin intressant med tanke på dels korrosivitet, dels utfällningsrisker i rörsystem och apparater.

Det kemiska jämviktstillstånd som normalt råder mellan berget och grundvattnet förändras då temperaturen höjs. Bergskiktet närmast vattenfasen påverkas kemiskt genom utlakning av joner från bergarten till vattnet. Cirkulationsvattnet får härigenom en ändrad kemisk sammansättning. För de flesta bergartsbildande mineral, med undantag för karbonatföreningar, ökar lösligheten med ökande tryck och temperatur.

Utlakningsdata från rena mineralfaser kan ej generellt sammanställas till relevanta data för en bergart där dessa mineral ingår. Bergarternas mineral samverkar på ett så komplext sätt att empiriska jonutlakningsdata måste tas fram för den bergart i vilken ett värmelager är tänkt att anläggas.

I syfte att närmare studera förhållandet vid försökslagret i Luleå har såväl laboratorie- som fältförsök genomförts, Claesson T och Ronge B, 1982 (12). I det följande redovisas kortfattat några av resultaten från dessa försök.

4.8.2 Laboratorieförsök

Vid löslighetsbestämningarna i laboratoriet har använts autoklaver i vilka bergartsmaterialet fått reagera med vatten vid olika temperaturer. Bergartsmaterialet har tagits från borrhärlor från Luleålagret. Borrhärlorna har sågats till 60 mm långa stavar för att få definierbara reaktionsytor.

För att i möjligaste mån efterlikna det cykliska uppvärmningsförlopp som Luleålagret undergår har nedanstående undersökningsprogram genomförts under laboratorieförsöken, tabell 4.1.

Samtliga försök har genomförts vid temperaturerna 50, 75, 100, 125 och 150°C. Vattnet har analyserats med avseende på Al, Ca, Fe, Mn, Mg, Na och Si. Som exempel från försöken visas i fig 4.5 kiselhalten vid olika temperaturer för resp lagringscykel.

Cyk- ler	U*	A*	U	A	U	A	U	A	U	A	Tids- åtgång dagar	
1	X	X	Analys								24	
2	X	X	X	X	Analys							48
3	X	X	X	X	X	X	Analys				72	
4	X	X	X	X	X	X	X	X	Analys			96
5	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	Analys 120	

*Där U betecknar upphettning samt vila under värme i 14 dagar och A betecknar avkylning samt vila under kyla i 10 dagar

Tabell 4.1 Undersökningsprogram motsvarande de fem årscyklerna i Luleålagret

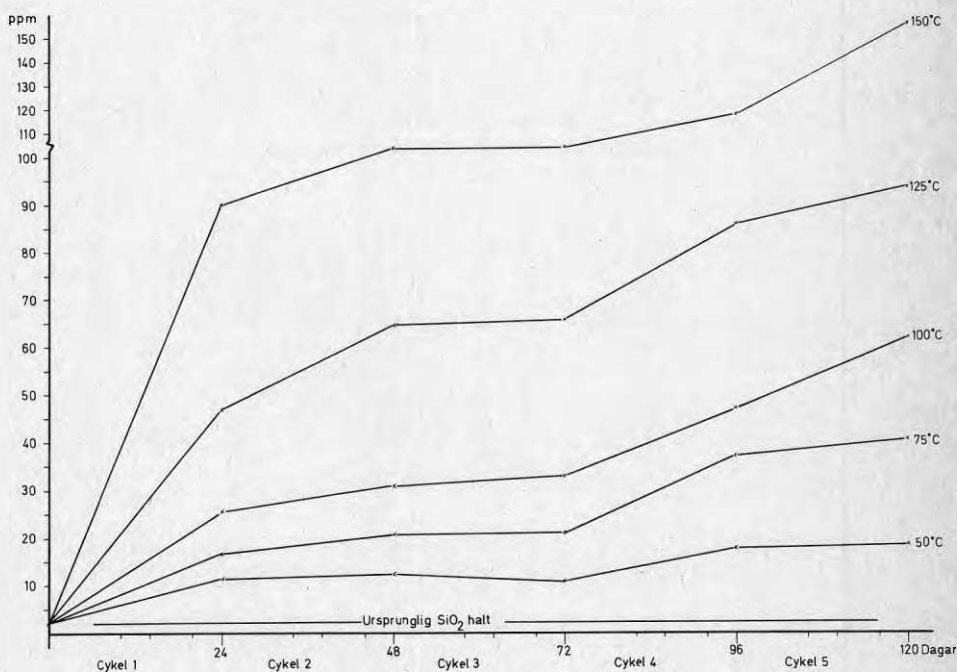


Fig 4.5 I vattnet löst kisel som funktion av temperaturen under resp lagringscykel

4.8.3 Fältförsök

Under värmelagringsförsöket har fyra vattenprov per cykel uttagits och analyserats. Vattenproverna har uttagits från cirkulationsvattnet efter resp period av laddning, vila, uttag och vila.

Vattenproverna har analyserats vid Högskolan i Luleå med avseende på pH, konduktivitet, syrehalt, vätekarbonat, fosfat och nitrat. Katjonsbestämningar samt klorid, sulfat och TOC har utförts vid Chalmers Tekniska Högskola.

Utgående från gjorda analyser kan följande konstateras:

- pH-värdena har höjts från 7,0 till 7,8
- konduktiviteten har höjts från 400 till 550 uS/cm
- anmärkningsvärt stor höjning av fosfathalten, från <0,1 till 0,5 å 1,0 mg/l
- kraftig variation i järnhalten under försökens gång men stabilisering mot försöksperiodens slut. Stark rödfärgning av cirkulationsvattnet observerades under de tre första försöken.

Överensstämmelsen mellan laboratorieförsöket och fältförsöket avseende katjonutlakningen får anses god. Laboratorieförsökets 50-gradersnivå motsvarar fältförsökets katjonhalter och laboratorieförsöken bör därför ge en god bild av vad som kan förväntas vid en höjning av vattentemperaturen.

Grundvattnet vid Luleålagret uppvisar förhöjda halter av SO_4 , Cl, PO_4 och Na och måste i samband med upphettning betraktas som korrosivt. För temperaturer under $100^\circ C$ och med här konstaterad vattenkvalitet bör dock ett stål av kvalitet SIS 2333 kunna användas för ledningar. Från kemisk synpunkt är vidare polyten en helt godtagbar plast som ledningsmaterial.

4.9 Ekologi

Värmelagring i borrhålsmagasin kommer sannolikt att beröra endast begränsade ytor och marklager. Biologiska, synliga effekter som uppkommer på grund av värmelagring torde vara av lokal karaktär och av begränsad omfattning. Den allvarligaste, förutsebara effekten torde vara ett successivt utdöende av viss vegetation. Positiva effekter, såsom ett ökat värmefflöde mot markytan i lagrets närhet, kan i vissa fall möjligen utnyttjas för växthus o dyl.

I samband med planerade fullskaleförsök bör de ekologiska effekterna följas och analyseras. Bl a i syfte att erhålla visst utgångsmaterial för sådana undersökningar har temperaturmätningar utförts såväl i försökslagrets jordtäckte som i motsvarande opåverkade referenspunkter.

5 FÖRSÖKSRESULTAT

5.1 Försök och jämförande beräkningar

Försöksperioden påbörjades den 3 juli 1981 och avslutades den 31 oktober 1981. Under denna period simulerades fem årscyklar. Varje årscykel har omfattat följande faser:

Laddning	10 dygn	(i fullskalelager	5 månader)
Vila	4 dygn	"	" 2 "
Uttag	6 dygn	"	" 3 "
Vila	4 dygn	"	" 2 "
<u>Totalt</u>	<u>24 dygn</u>	<u>(i fullskalelager</u>	<u>12 månader)</u>

Lagringscyklernas fördelning på laddnings- och uttagsperioden är vald med tanke på framtida solvärmeproduktion. Beträffande tids- och längdskalning se avsnitt 3.2.

Lagringscyklerna genomfördes kontinuerligt utan avbrott. Inlagringstemperaturen, dvs tilloppsvattnets temperatur vid laddning, varierade något under försökens gång beroende på ojämn belastning på den anslutna hetvattencentralen. Frånsett dessa mindre variationer steg inlagringstemperaturen allteftersom returvattentemperaturen steg. Temperaturdifferensen mellan inlagrings- och returvatten hölls dock relativt konstant, 8 à 10°C. Vid det utnyttjade totala flödet genom lagret på ungefär 1 l/s motsvarar denna temperaturdifferens en total laddningseffekt på 33 à 42 kW. Temperaturdifferens och effekt är dock avsevärt högre vid varje cykels start.

Under uttagsfaserna har värmen kylts bort i värmeväxlare ansluten till en brandpost. Värmeväxlaren visade sig emellertid vara underdimensionerad varför avsedda värmeuttag ej uppnåddes.

Under den 120 dygn långa driften av försökslagret har ca 250.000 mätvärden avseende temperatur och flöden registrerats.

Jämförelsen mellan uppmätta och beräknade värden har gjorts med hjälp av en tredimensionell, rotationssymmetrisk beräkningsmodell, utvecklad vid institutionen för matematisk fysik vid Lunds Universitet. Claesson J och Eskilson P, 1982 (13). Indata till beräkningsmodellen är inloppstemperatur och flöde för cirkulationsvattnet. Som resultat fås hela temperaturfältet i och omkring lagret vid godtycklig tidpunkt.

I det följande redovisas och diskuteras några av de försöksresultat som bedömts vara av speciellt intresse för att belysa lagrets funktion.

5.2 Temperaturmätningar

Uppmätta temperaturer i bergrunden, såväl inom som utanför lagret, visar generellt god överensstämmelse med beräkningar gjorda enligt den ovan angivna tredimensionella matematiska modellen (13).

Den goda överensstämmelsen exemplifieras representativt i fig 5.1 där uppmätta temperaturer i cirkulationsvatten och berg markerats med heldragna linjer och motsvarande beräknade värden med punkter. Förekommande avvikelser kan ha sin orsak i olika värmeledningsegenskaper i olika bergpartier men torde i första hand bero på en värmetransporterande vattenströmning i bergets spricksystem. Eftersom beräkningsmodellen endast beaktar värmetransport genom ledning kommer temperaturen i verkligheten att sprida sig snabbare i berget än vad beräkningsmodellen visar.

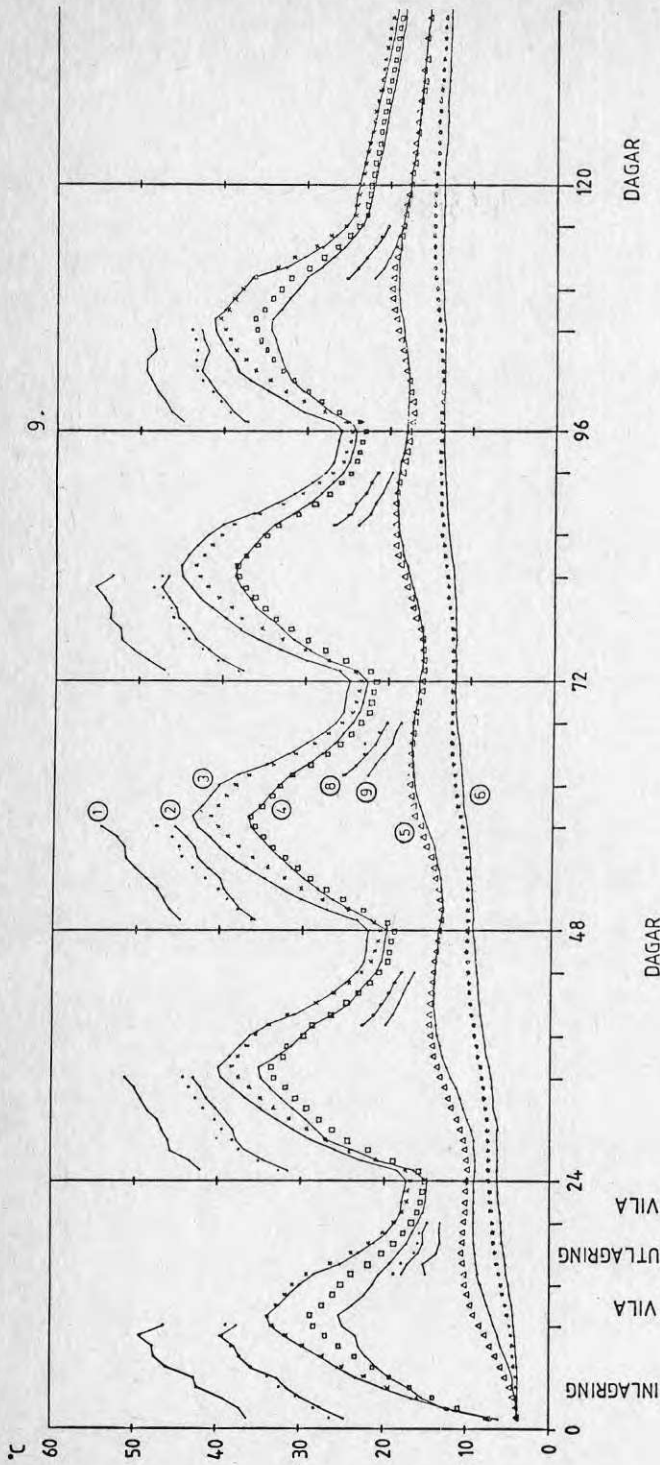
Indikationen på spricksystemets betydelse för värmetransporten inom lagret erhöles under första cykeln då temperaturen steg snabbare i några perifera hål än i lagrets centrum. Effekten avtog under de följande cyklerna vilket kan förklaras av att sprickorna tryckts ihop vid bergmassans uppvärmning.

I fig 5.1 kan även observeras hur de olika lagertemperaturerna går mot stationära värden. Energitillförseln stördes dock under den femte cykeln vars temperaturkurvor annars torde ha varit nästan identiska med motsvarande kurvor under fjärde cykeln.

Uppmätta resp beräknade radiella temperaturprofiler genom lagret på djupet 13 m, dvs 7 m under bergytan, exemplifieras i fig 5.2 med förhållandena vid laddningens påbörjan i tredje cykeln samt i fig 5.3 vid denna laddnings slutförande 10 dygn senare.

Motsvarande radiella temperaturprofiler vid uttag exemplifieras i fig 5.4 med förhållandena vid uttagets början i tredje cykeln samt i fig 5.5 vid detta uttags slutförande 6 dygn senare.

Uppmätta temperaturer i och omkring lagret exemplifieras i fig 5.6, 5.7 och 5.8 med isotermer vid laddningsfasens slut (dygn 58), vid uttagsfasens start (dygn 63) samt vid vilofasens slut (dygn 72).



- ① Tilltemperatur, cirkulationsvatten, inlagring
 ② Från " " " "
 ③ Mätpunkt 0.65 m från centrum, se fig.
 ④ " " 1.95 m " " "
 ⑤ " " 3.90 m " " "
 ⑥ " " 5.20 m " " "
 ⑦ Mätpunkt referenshål djup 14 m (ca 200 m från lagret)
 ⑧ Fråntemperatur, cirkulationsvatten, utlagring
 ⑨ Till " " " "

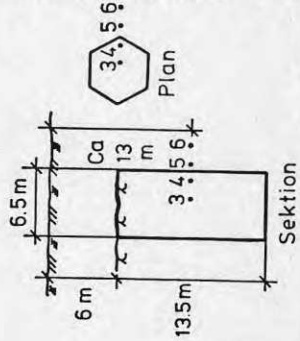


Fig 5.1 Uppmätta (heldragna linjer) resp beräknade (punktmarkeringar) temperaturer i försökslagret

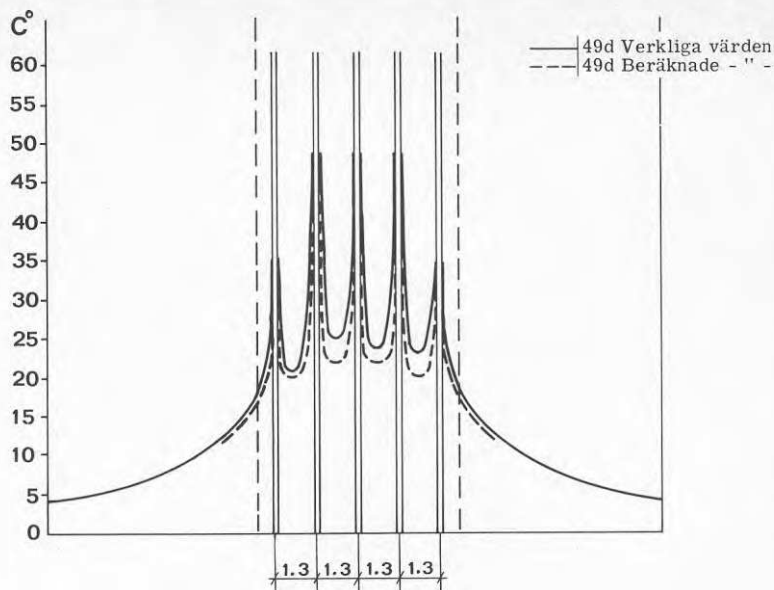


Fig 5.2 Uppmätta resp beräknade temperaturer vid start av tredje lagringscykelns laddningsfas (dygn 49) Djup 7 m under bergyta

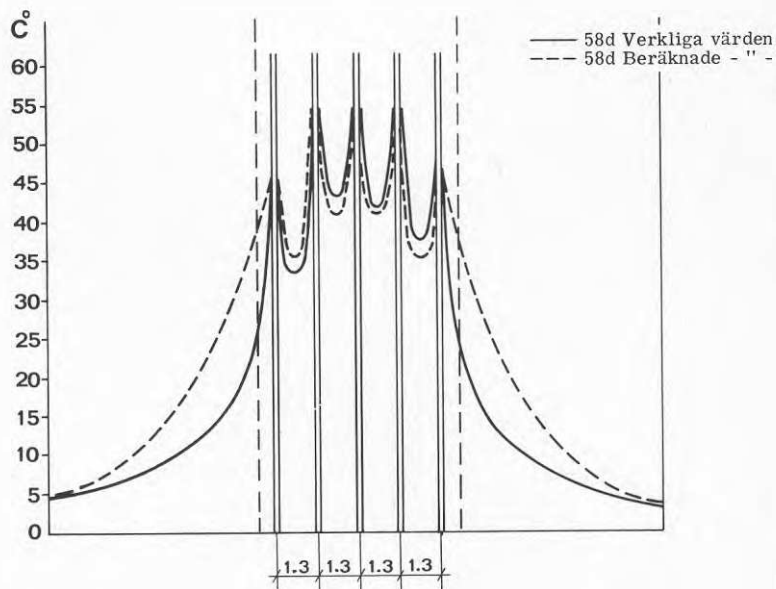


Fig 5.3 Uppmätta resp beräknade temperaturer vid avslutning av tredje lagringscykelns laddningsfas (dygn 58) Djup 7 m under bergytan

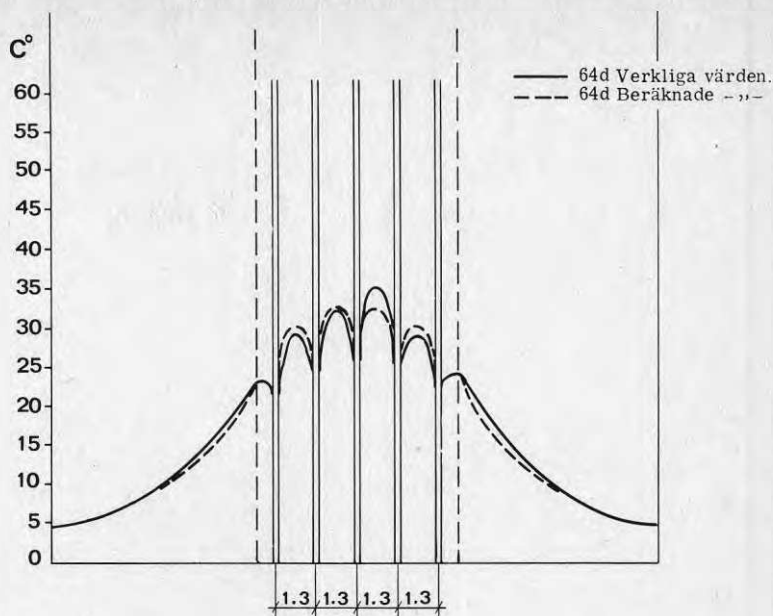


Fig 5.4 Uppmätta resp beräknade temperaturer vid start av tredje lagringscykelns uttagsfas (dygn 63). Djup 7 m under bergytan

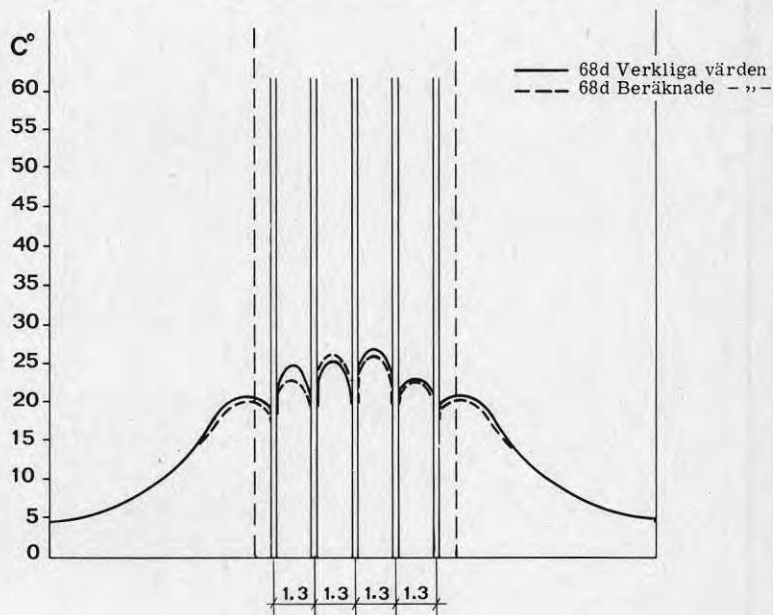


Fig 5.5 Uppmätta resp beräknade temperaturer vid avslutning av tredje lagringscykelns uttagsfas (dygn 68) Djup 7 m under bergytan

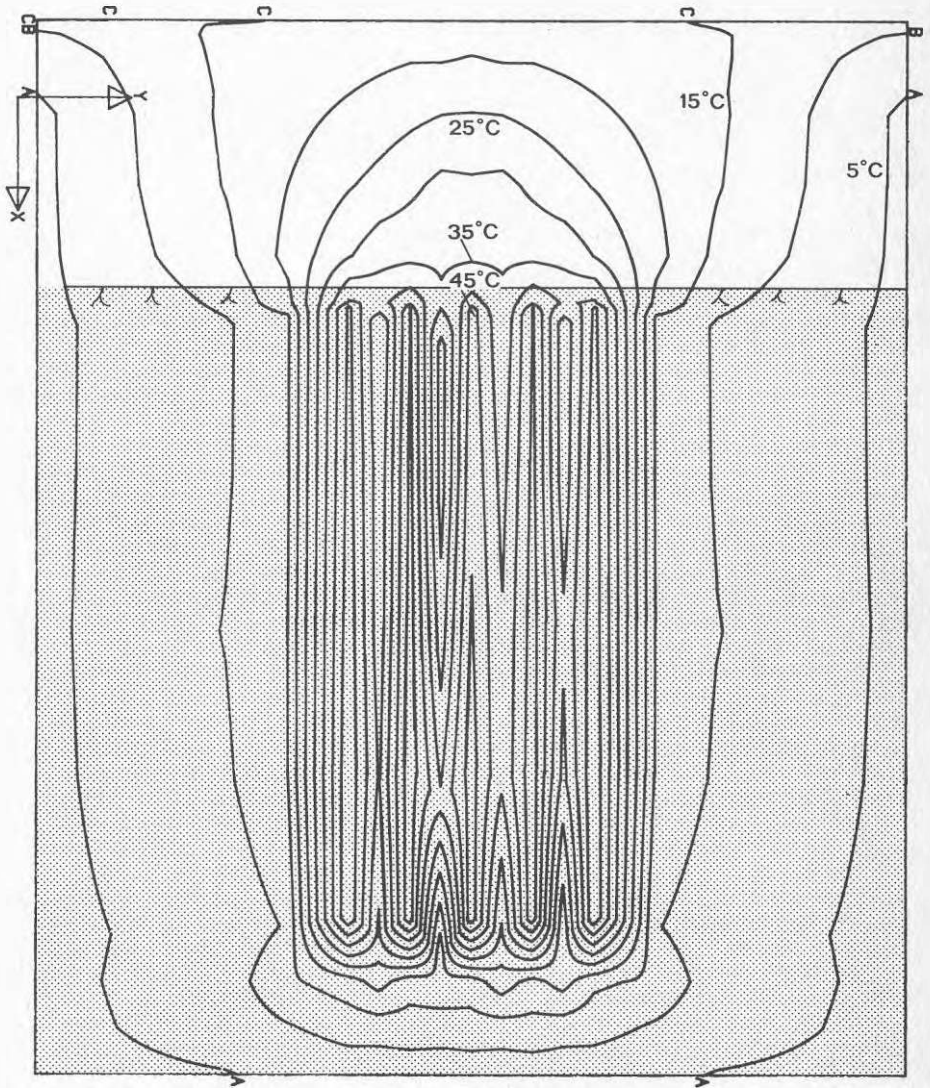


Fig 5.6 Uppmätta temperaturer, åskådliggjorda med 5°C -isotermer, vid slutet av laddningsfasen i 3:e lagringscykeln (dygn 58)

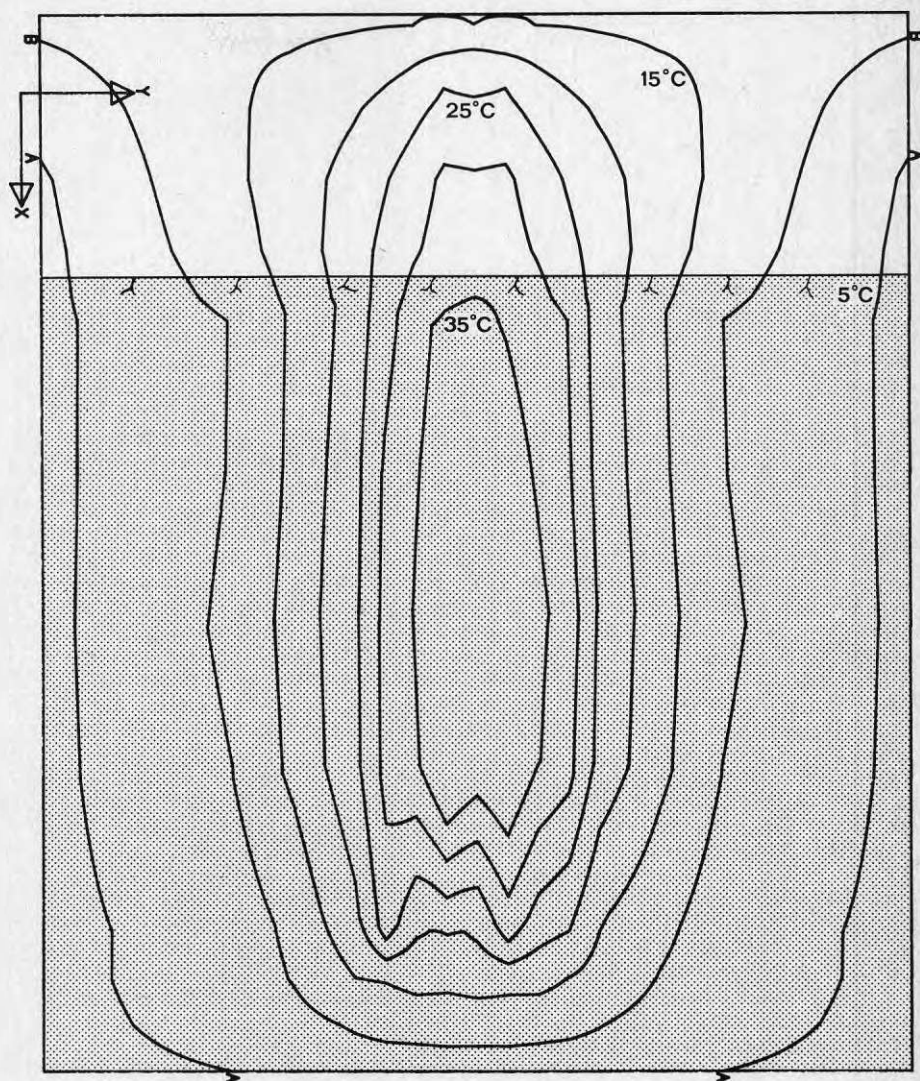


Fig 5.7 Uppmätta temperaturer, åskådliggjorda m 5°C-isotermer, vid slutet av uttagsfasen i 3:e lagringscykeln (dygn 63)

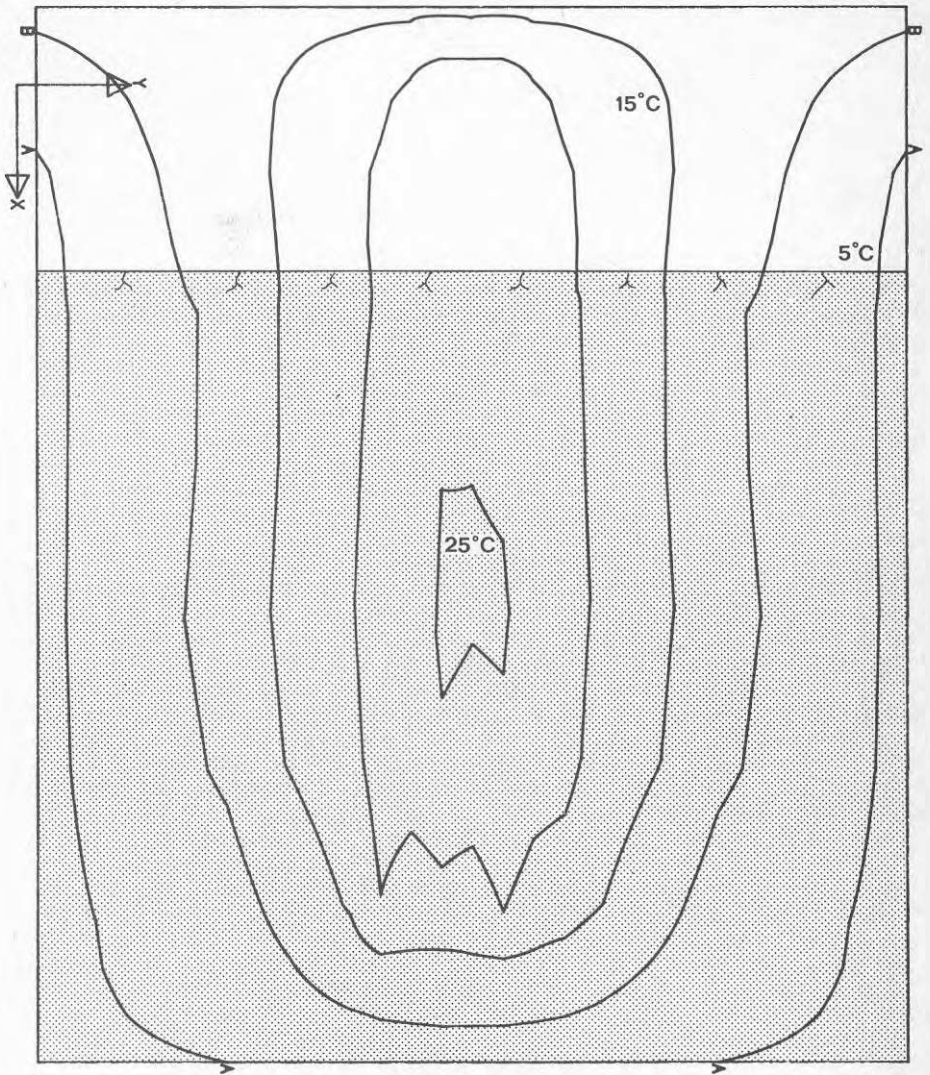


Fig 5.8 Uppmätta temperaturer, åskådliggjorda med 5°C-isotermer, vid den kalla viloperiodens slut i 3:e lagringscykeln (dygn 72)

Cirkulationsvattnets avkylning (vid laddning) resp uppvärmning (vid uttag) under passagen genom borrhålen illustreras i fig 5.9 resp 5.10. Borrhålen 1 och 5's läge framgår av fig 3.5.

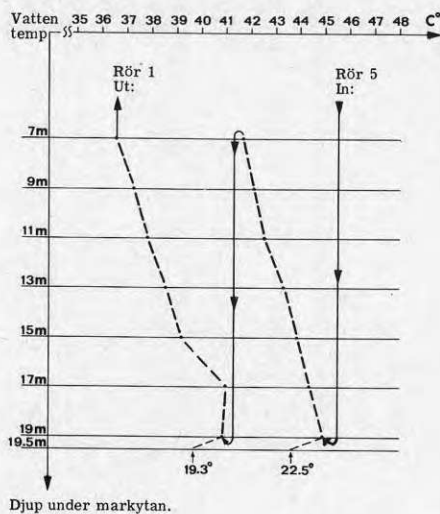


Fig 5.9 Temperaturfall hos cirkulationsvattnet vid passage genom borrhål nr 5 och 1. Laddningsfas i 2:a lagringscykeln (dygn 27)

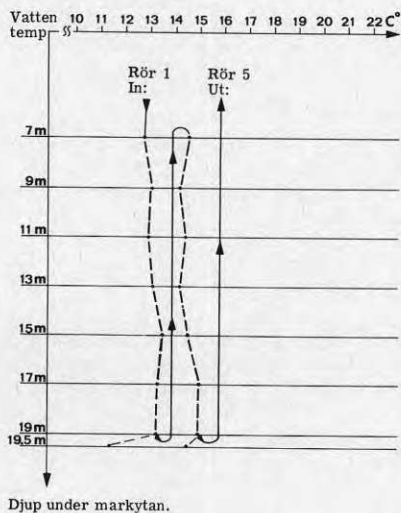


Fig 5.10 Temperaturhöjning hos cirkulationsvattnet vid passage genom borrhål nr 1 och 5. Uttagsfas i 1:a lagringscykeln (dygn 6)

Borrhålsvattnets temperatur under vilofasen illustreras i fig 5.11 med förhållandena i 3:e lagringscykelns första viloperiod.

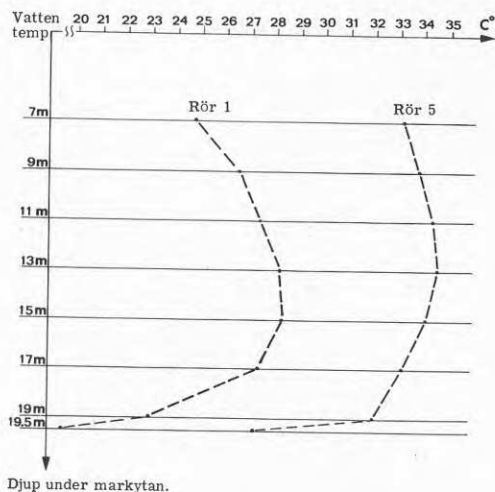


Fig 5.11 Vattentemperatur i borrhål nr 1 och 5 under första viloperioden i 3:e lagringscykeln (dygn 62)

5.3 Laddnings- och uttagseffekt

Ett borrhålslagars laddnings- och uttagseffekt per borrhålsmeter är i huvudsak en funktion av bergets värmeledningsförmåga och temperaturdifferensen mellan cirkulationsvattnet och omgivande berg. Någon principiell skillnad mellan laddnings- och uttagsförloppen finns ej vilket innebär att laddnings- och uttagseffekterna är lika vid lika temperaturdifferenser mellan cirkulationsvattnet och berg.

I försöket uppmätta laddnings- och uttagseffekter framgår av fig 5.12.

De i fig 5.12 visade, låga uttagseffekterna förklaras med att den kylare som använts vid försöken endast kunde sänka cirkulationsvattnets temperatur med 2-3°C.

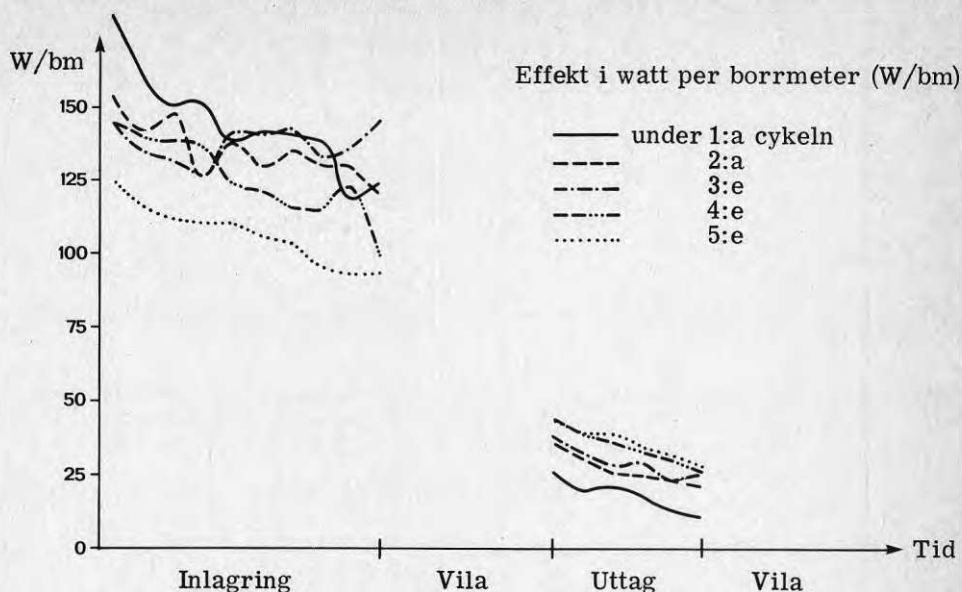


Fig 5.12 Lagrets värmeeffekt per borrhålsmeter vid laddning resp uttag. Angivna effekter är dygnsmedelvärden för samtliga borrhål

5.4 Inlagrad och uttagen energi

Totalt tillfördes värmelagret 37 MWh under de fem lagringscyklerna. Energитillförseln var störst under den 1:a cykeln, 8,0 MWh, för att avta till 7,3 MWh under den 4:e cykeln. Störningar i hetvattencentralen medförde att endast 6,2 MWh tillfördes under den 5:e cykeln.

Det totala energiuttaget uppgick till 4,2 MWh. Under den 4:e cykeln, med relativt stationära förhållanden, uppgick energiuttaget till 1,2 MWh mot tillförda 7,3 MWh. Värmelagrets energiverkningsgrad uppgick således under 4:e cykeln till ca 16%. Motsvarande värde för 5:e cykeln var 18%.

De låga verkningsgraderna beror i första hand på den begränsade lagervolymer som innebär mycket stora värmeförluster i relation till lagrets energiinnehåll. Den underdimensionerade kylningen har också bidragit till den låga verkningsgraden genom att lagrets temperatur-sänkning under uttagsperioden begränsats. Även den relativt korta uttagsperioden har medverkat till den låga verkningsgraden.

5.5 Driftstörningar och andra observationer

Under laddningsperioden i den 1:a lagringscykeln uppstod avluftningsproblem orsakade av otäta kopplingar.

Felaktigheterna rättades till under den följande viloperioden. Samtliga installationer har därefter i stort sett fungerat störningsfritt.

Under den första laddningsperioden sipprade cirkulationsvatten över från några borrhål i lagrets centrum. Det höga vattenståndet i dessa hål förklaras dels av ovan nämnda avluftningsproblem, dels av densitetsskillnaden mellan det uppvärmda vattnet och det omgivande kalla grundvattnet. Densitetsskillnaden kan beräknas motsvara 0,2 m vattenpelare.

Cirkulationsvattnet var ljusrött under de tre första lagringscyklerna. Färgningen är ej definitivt förklarad men både organiska ämnen och järn skulle kunna orsaka en sådan rödfärgning. Färgen försvann helt vid den fjärde cykelns start.

Energitillförseln stördes under den 5:e cykeln på grund av service- och underhållsarbeten i hetvattencentralen. Se 5.2.

Ekologiska effekter kan knappast studeras i ett så tids- och lokalbegränsat försök som detta. Endast två meter utanför lagret står emellertid ett 6-7 m högt aspträäd. Ingen påverkan har kunnat observeras i form av t ex senare lövfällning.

Snödjupsmätningar i en profil genom lagrets centrum har utförts vid två tillfällen. Som framgår av fig 5.13 har uppvärmningen märkbart minskat snödjupet nära lagret.

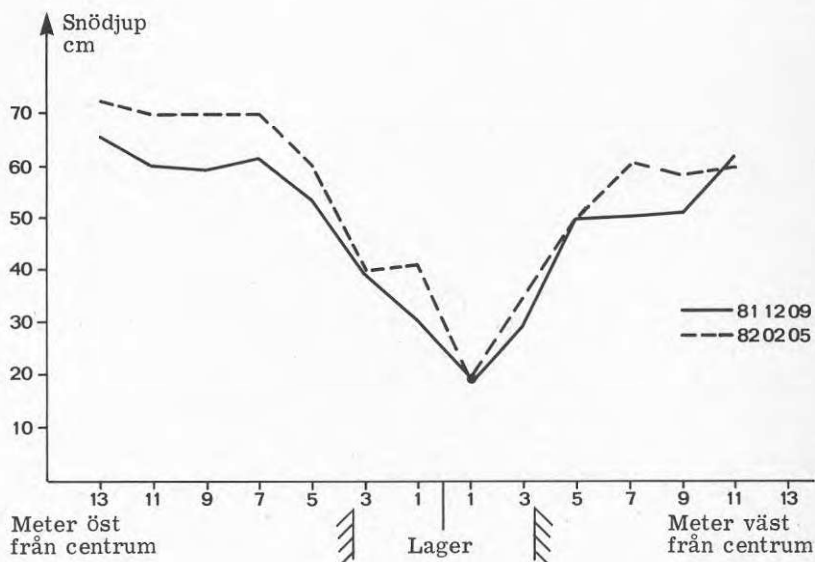


Fig 5.13 Snödjupet i profil genom lagrets centrum vintern 1981-82

6 FÖRPROJEKTERING AV EXPERIMENT- OCH DEMONSTRATIONSANLÄGGNING

6.1 Bakgrund och sammanfattning

Bakgrund

Inom SSAB i Luleå produceras brännbar gas vilken leds till Luleå Kraft ABs (LUKAB) kraftvärmeverk för samtidig produktion av el och värme. Under hela sommarhalvåret uppkommer ett överskott av värme från kraftvärmeverket förutsatt att en masugn är i drift. Fjärrvärmedistributionen i Luleå bedrivs i Luleå Energiverks (LEAB) regi.

Byggnaderna vid Luleå Högskola försörjs med värme från fjärrvärmenätet. För experiment- och demonstrationsanläggningen planeras att den största byggnaden F eller "Gula Huset" betjänas av värmelagret eftersom lagret då kan ges en lämplig storlek där fullskaleteknik kan provas och demonstreras till rimliga kostnader. Ett lämpligt markområde där lagret kan placeras finns i nära anslutning till byggnaden.

Byggnadens värmebehov är ca 2,7 GWh/år.

Sammanfattning

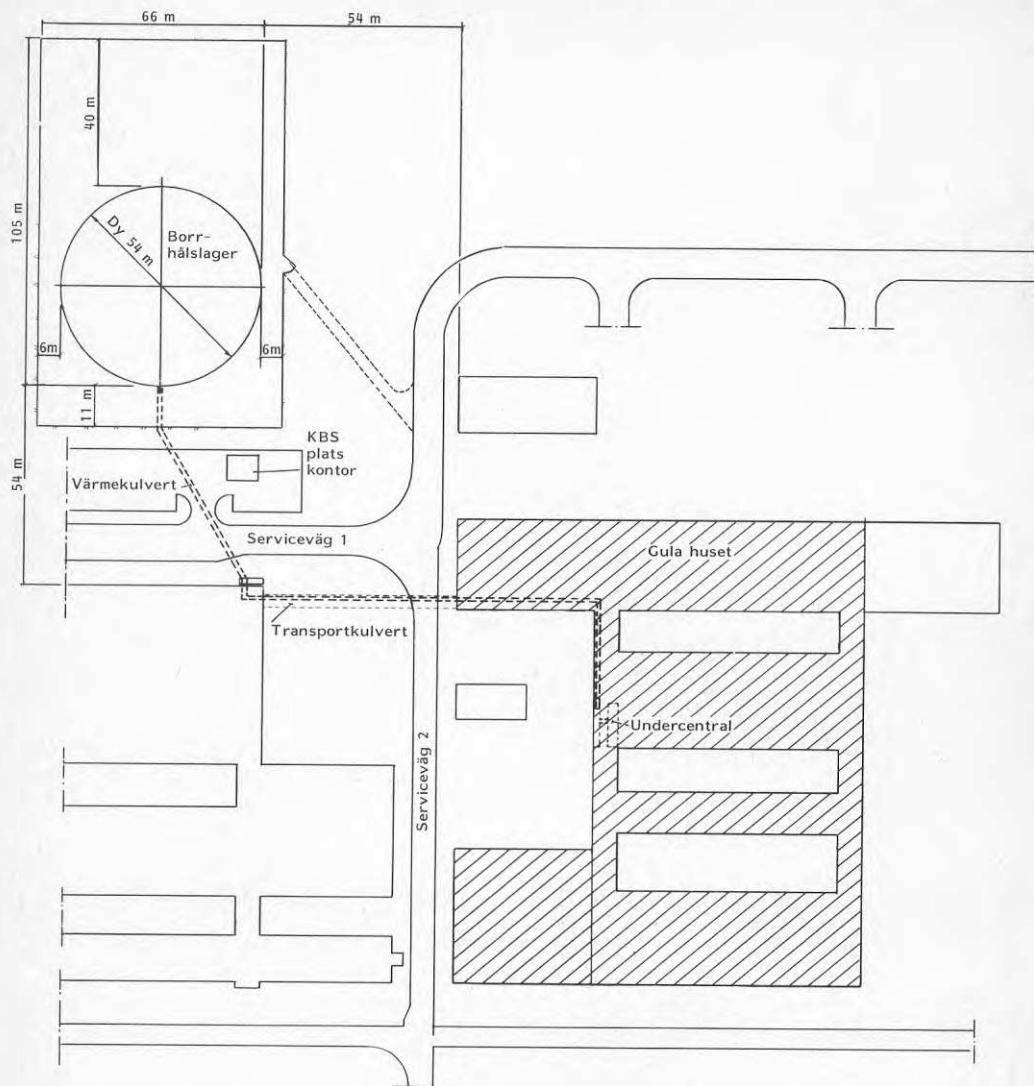
Värmelagret består av en cirkulär cylindrisk bergkropp med volymen $100\ 000\ \text{m}^3$ med en diameter av 50 m. I berget borrar 144 st vertikala hål vars aktiva längd är 50 m. Hålens diameter är 150 mm. Värme till- och bortförs genom att lagrets vatten cirkuleras mellan borrhålen och olika värmeväxlare. Systemet är av sköppen typ. Lagrets placering vid byggnaden framgår av figur 6.1. Lagret utförs så att en radiell värmegradient kan upprätthållas. Medeltemperaturen i lagrets bergmassa ändras ca 35°C under urladdningen.

Värmetillförsel sker genom att lagrets naturliga vatten värmes via fjärrvärmesystemet. Den maximala laddningseffekten är 1,5 MW. Uppladdningen bör pågå i ca 6 månader per år.

Värmeuttag sker genom att lagrets vatten avger värme till byggnadens sekundärvärmeväxelsystem, se figur 6.4. Vid behov höjs temperaturen med hjälp av en värmepump.

Den maximala uttagseffekten är 600 kW. Värmepumpen ger en effekt av 300-400 kW.

Sekundärvärmeväxelsystemen kommer inte att påverkas av anslutningen. Den nu befintliga undercentralen kan alltid omedelbart ersätta eller komplettera lagret.



Figur 6.1 Lagrets placering

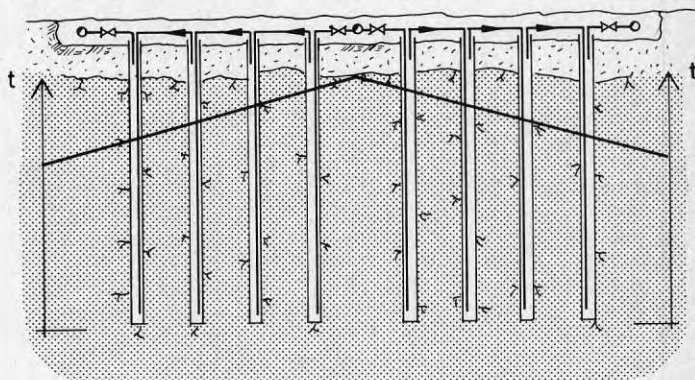
Planerade ungefärliga basdata:

	<u>GWh/år</u>
Laddningsenergi	2,8
Förlust 40%	1,2
Uttagen energi	1,6
Nyttiggjord drivenergi	0,4
Levererad värme	2,0
Byggnadens värmebehov	2,7
Täckningsgrad	74%

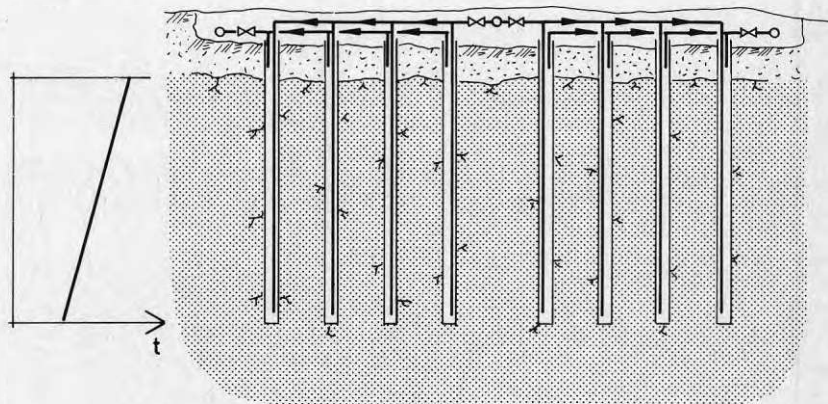
Beräkningar för ett fullstort värmelager om 20 GWh indikerar att lagret blir lönsamt vid en annuitet av 8%.

6.2 Driftstrategi

Lagret kan arbeta med eller utan temperaturgradient mellan olika delar av den samlade borrhålslängden. Temperaturgradienten kan vara radiell vilket åstadkommes genom att vätsketransporten genom borrhålen seriekopplas i radiell riktning, fig 6.2. En gradient i vertikalled kan erhållas om vattenflödet genom borrhålen hålls lågt och värmemotståndet i vattentillförselledningens vägg är högt, se fig 6.3. Värmeöverföring mellan tillförselledningen och borrhålets vatten minskar den gradient som uppnås.



Figur 6.2 Radiell temperaturgradient



Figur 6.3 Vertikal temperaturgradient

Fördelarna med en termisk gradient är i korthet att högvärdig värme behålls längre tid i lagret under uttag och att kallt returvattnet kan kyla lagret i större utsträckning. Härigenom minskar behovet av värmepumpning. Vidare minskar lagrets värmeförluster approximativt till hälften eftersom temperaturskillnaden mot omgivningen minskar.

Mot bakgrund av ovanstående har ett lager med en radiell temperaturgradient valts för projektet.

Den styrande temperaturnivån vid inlagring är fjärrvärmenätets framledningstemperatur, vilken normalt under sommaren är 70°C . Den maximala inlagringseffekten, 1,5 MW, kan endast utnyttjas under inlagringsperiodens början. Därefter begränsas effekten av värmeöverföringsmotståndet i berget. Vattnet tillförs i lagrets mittzon och passerar genom fyra seriekopplade borrhål ut mot lagrets periferi, fig 6.2. Lagrets centrum värms således först. Temperaturen i periferin är alltid lägre än lagrets medeltemperatur. Vid värmeuttag cirkulerar vattnet i motsatt riktning, utifrån och in.

Vid säsongens början kan hela byggnadens effektbehov tillgodoses utan värmepumpning. Vid stigande effekt- och temperaturbehov och sjunkande temperatur från lagret måste värmepumpen startas, fig 6.4.

Värmepumpen körs med sådan kapacitet att byggnadens hela effektbehov fortfarande kan tillgodoses. När värmepumpen och lagret inte förmår leverera tillräcklig effekt öppnas de befintliga reglerventilerna i undercentralen och toppeffekt tas direkt från fjärrvärmenätet. Vid uppvärmningssäsongens slut kan ingen värme växlas direkt. Hela effekten levereras via värmepumpen.

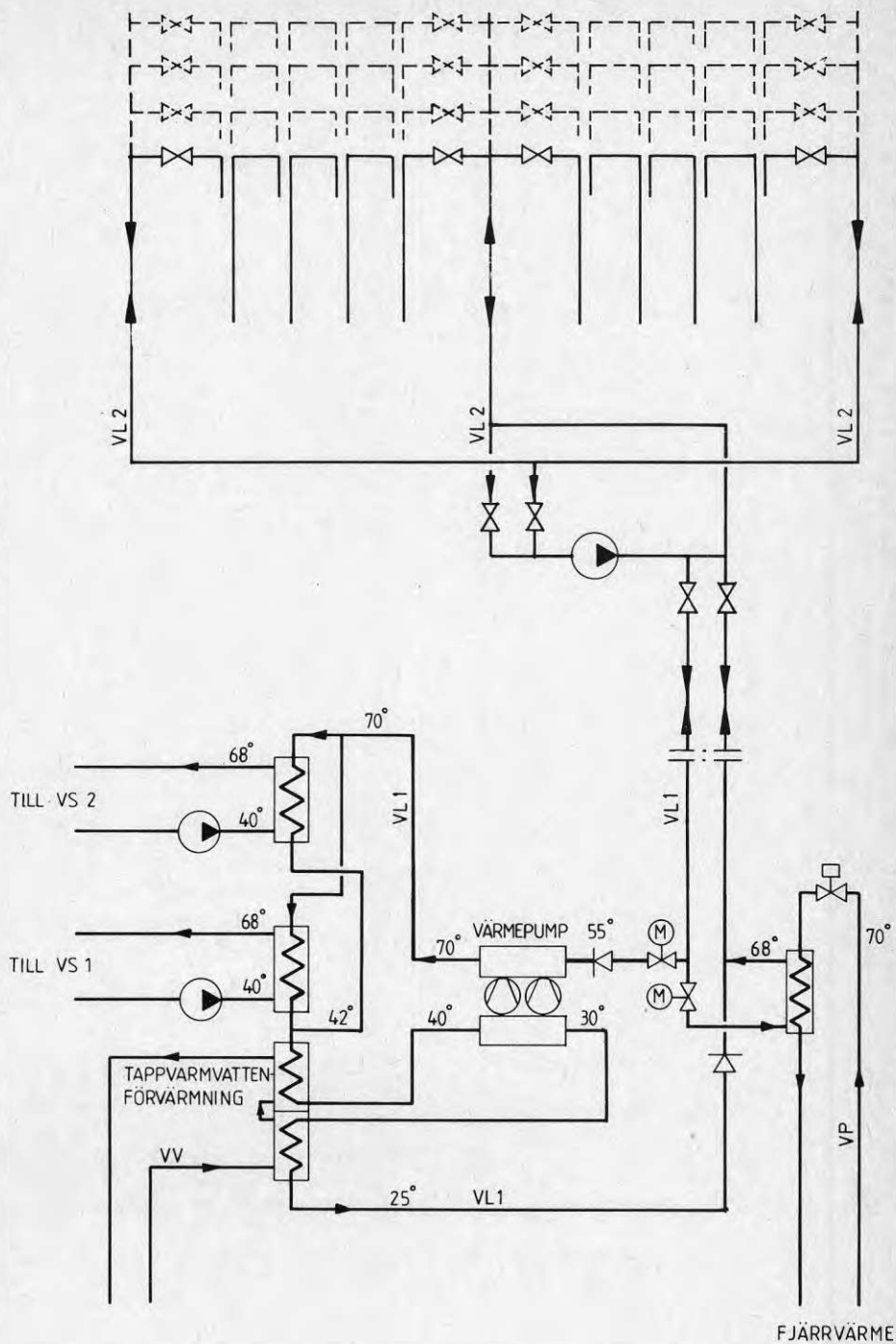
6.3 Dimensionering

Med hänsyn till byggnadens totala värmebehov, ca 2,7 GWh, lagrets värmeförluster och den energimängd som kan tillföras byggnaden med den tillgängliga effekten från lagret, behövs lagret ha en kapacitet av ca 2,2 GWh. Värmekapaciteten för berget är ca $2200 \text{ kJ/m}^3, ^{\circ}\text{C}$. Om lagrets medeltemperatur kan svänga 35 grader mellan ca 25°C och ca 60°C måste den aktiva bergvolymen vara 10^6 m^3 . Om det aktiva lagret ges samma diameter som höjd blir denna 50 m. Som framgår nedan är ett borrhålsavstånd av 4 m lämpligt. Den sammanlagda aktiva borrhåls-längden är 7200 m. Vid ett maximalt effektuttag av 75 W/m blir totaleffekten 500 kW.

Ovanstående data har optimerats genom att flertal körningar av lagrets datormodell. Förloppen under de första årscyklerna visas i fig 6.5 och 6.6. Förlusten beräknas vid fortfarighet uppgå till mellan 20 och 40%.

Inverkan av borrhålsavståndet på förlusterna belyses i fig 6.6. För att reducera lagrets kostnad bör borrhålsavståndet väljas stort. Stort borrhålsavstånd innebär dock låg temperaturverkningsgrad (dvs värme kommer att levereras vid en betydligt lägre temperatur än inlagringstemperaturen). Datormodellen visar att större borrhålsavstånd än 4 m är olämpligt vid de aktuella förutsättningarna.

BORRHÅLSLAGER



Figur 6.4 Principschema för borrhålslager, värmeväxlare och värmeväxlare i undercentral

För att kunna leverera den avsedda årsenergimängden måste värmepumpskapaciteten vara så stor att hela effektbehovet kan tillgodoses utom vid extremt låga utomhustemperaturer. Dimensionerande blir förhållandena på eftervintern när lagret levererar värme vid låg temperatur.

6.4 Installationer

Värmeväxlarna som för in värmen i byggnadens värmesystem dimensioneras så att ca 50% av full effekt eller 500-600 kW kan överföras. Temperaturdifferenserna i värmeväxlarna begränsas till några få grader. Detsamma gäller för värmeväxlaren för tillförd effekt från fjärrvärmenätet till lagret. Värmeväxlarna och värmepumpen placeras vid undercentralen. I mån av plats och behov förvärms också tappvarmvatten till byggnaden.

Vid sammankoppling av borrhålen har 36 st parallella stråk i radiell riktning med fyra borrhål i vardera stråket funnits lämpligt. Temperaturhöjningen vid den maximala effekten 600 kW blir då ca 6 grader per hål och ca 24 grader över hela lagret. Vid vätsketransport mellan hålen måste vattnet lyftas. En pump i varje hål är orealistiskt ur kostnads- och tillförlitlighetssynpunkt.

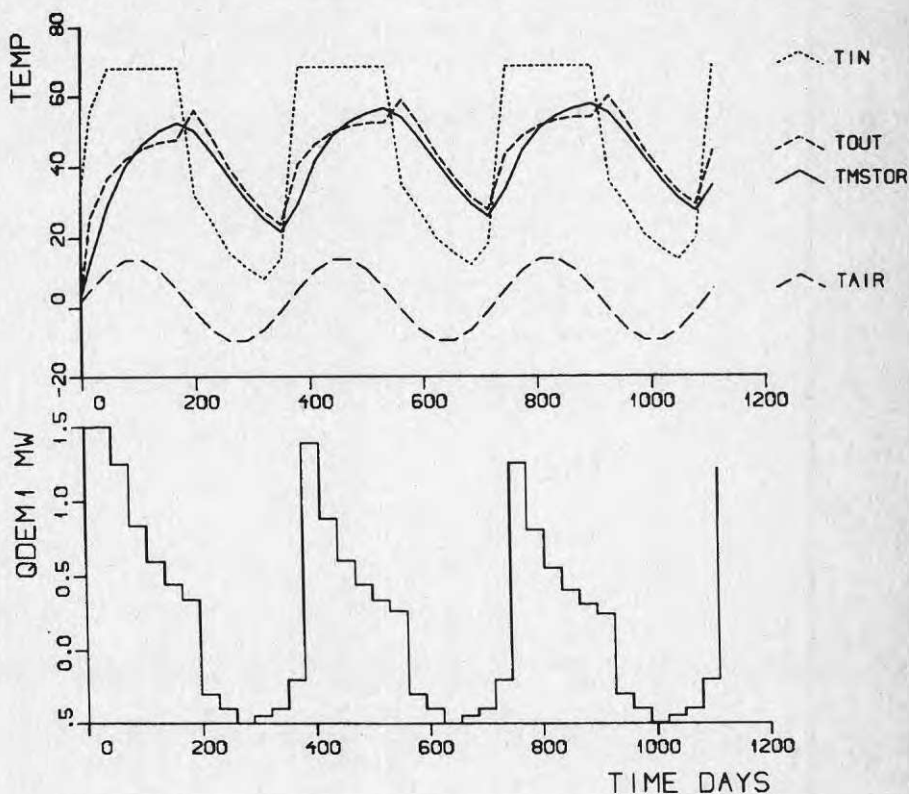
Transporten kan ske genom att en hävert aktivt upprätthålls, figur 6.8. Den nödvändiga transportpotentialen för att motverka strömningsmotståndet erhålls av en central pump. Vätskenivåerna blir olika längs lagrets radie. Rören dimensioneras så att strömningsmotståndet är litet. Metoden kräver att grundvattenytan inte ligger extremt lågt och att högsta vattentemperaturen begränsas. Alternativt kan vätsketransporten ske genom att hålen tätas mot atmosfären och trycksätts så att en eller ett fåtal pumpar ovan markytan kan klara transportarbetet, figur 6.9. Metoden kräver god täthet i berget, speciellt i dess övre delar. Rören mellan borrhålen kan också grävas ned till en nivå under lägsta vattenytan, vilket leder till ett omfattande schaktningsarbete.

Figur 6.8 visar vattennivåer vid strömning genom ett lager med homogen temperatur. I ett verkligt lager höjs nivåerna i borrhålen eftersom det varma vattnet har en lägre densitet. I det aktuella fallet varierar nivån från ursprunglig grundvattenyta till en nivå knappt 2 m över denna. Högsta ursprunglig grundvattenyta bör således inte ligga högre än 2 m under markytan.

Valet av cirkulationssystem kan ske först sedan de geologiska och hydrologiska förhållandena är kända.

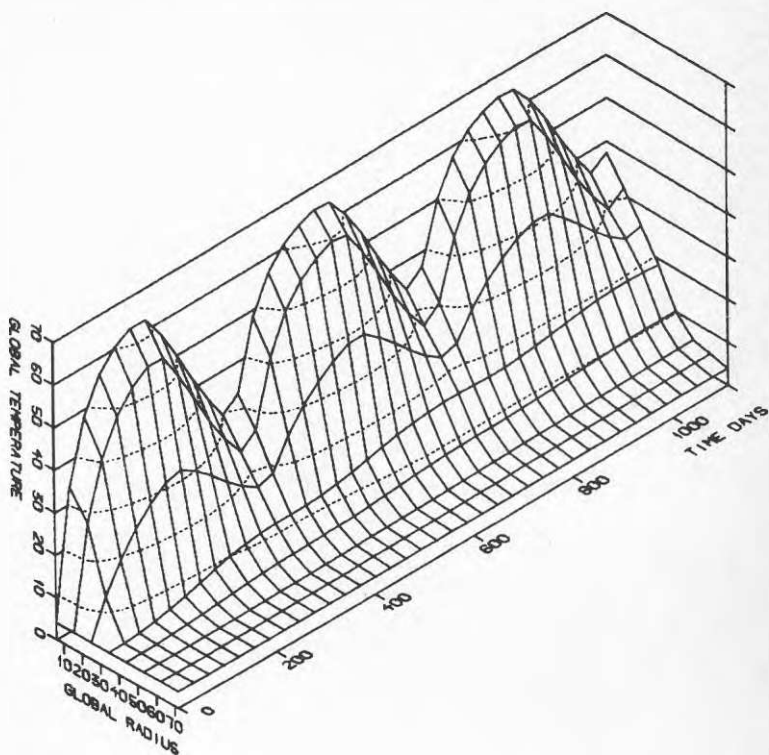
Pumpar och rör för värmetransport från lagret och till undercentralen i byggnaden dimensioneras för en tempe-

raturdifferens av 24 grader och temperaturer mellan 5 och 80°C. Rördiametrarna för vätsketransport inom lagret, 36 slingor om 4 borrhål, blir ca 50 mm vid kravet att tryckfallet skall begränsas till ca 0,1 mvp/borrhål. Röret för värmetransport mellan lagret och undercentralen dimensioneras för inlagringseffekten 1,5 MW och 24 graders temperaturdifferens. Flödet blir 15 l/s och vid rördiametern 100 mm blir tryckfallet 24 mm/m eller totalt ca 10^5 Pa i 220 m rör.

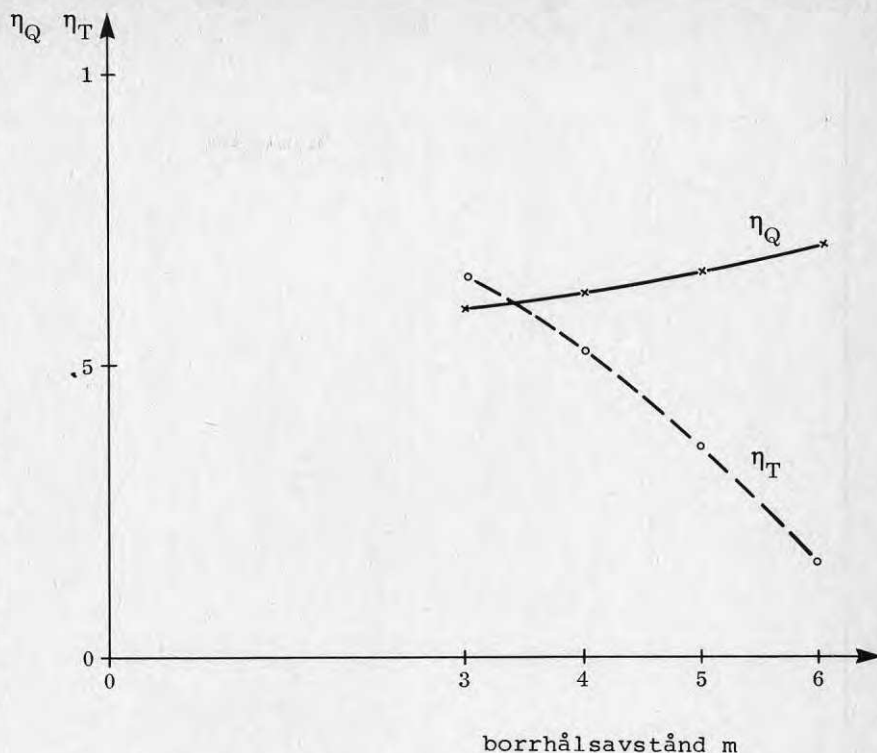


- 6.5 Lagrets medeltemperatur (TMSTOR), in och utgående vattentemperatur, lufttemperatur samt effekt (QDEM1) som funktion av tiden. Kurvorna gäller för ett lager med storleken $H = 2R = 50$ m och borrhålsavståndet 4 m.

GLOBAL TEMPERATURE VERSUS RADIUS AND TIME



Figur 6.6 Temperatur som funktion av avstånd från lagrets centrum och tid. Lagrets radie är 25 m. (Global temperatur avser att den lokala temperaturvariationen kring varje borrhål är utjämnad.)



Figur 6.7 Inverkan av borrhålsavståndet på energi-
verkningsgraden η_Q och temperaturverknings-
grad η_T . Kurvorna gäller för tredje
årscykeln. Vid fortvarighet erhålls mindre
förluster.

Diagrammet i fig 6.7 är baserat på följande förutsättningar:

- lagerstorlek är $H = 2R = 50,4$ m; Volym = 10^5 m³
- lagret är uppdelat i 4 seriekopplade radiella zoner
- lagringscykeln omfattar 6 mån laddning och 6 mån uttag med varierande given effekt
- laddningen sker med avtagande effekt (från 1,5 MW till 0,5 MW) samt med temperaturbegränsning till max 68°C)
- effektuttag sker utan temperaturbegränsning

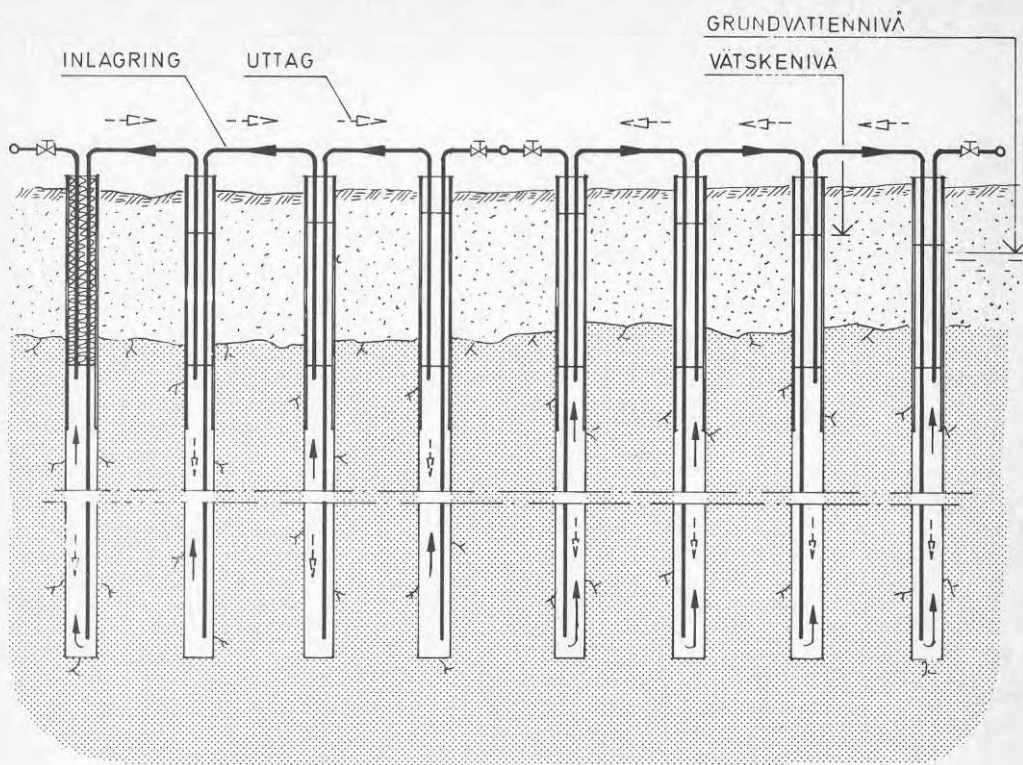


Fig 6.8 Hävertsystem för vätsketransport inom lagret

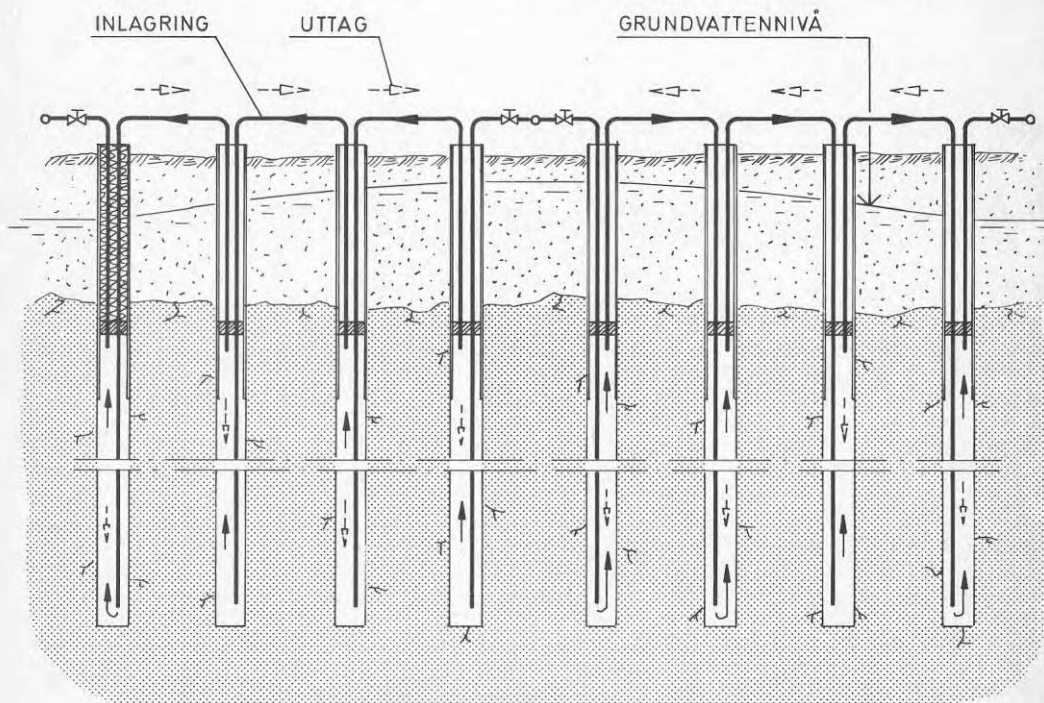


Fig 6.9 Trycksystem för vätsketransport inom lagret

Bilderna 6.10 - 6.11 visar olika layout för hålens placering i lagret. Layout och exakt koppling av vätskeströmmarna avgörs vid en detaljerad projektering.

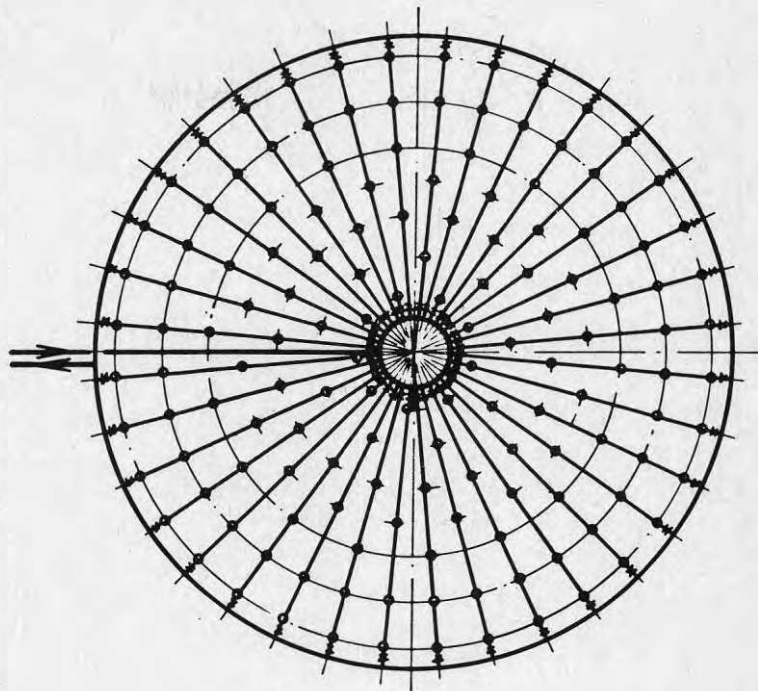


Fig 6.10 Strikt radiell layout

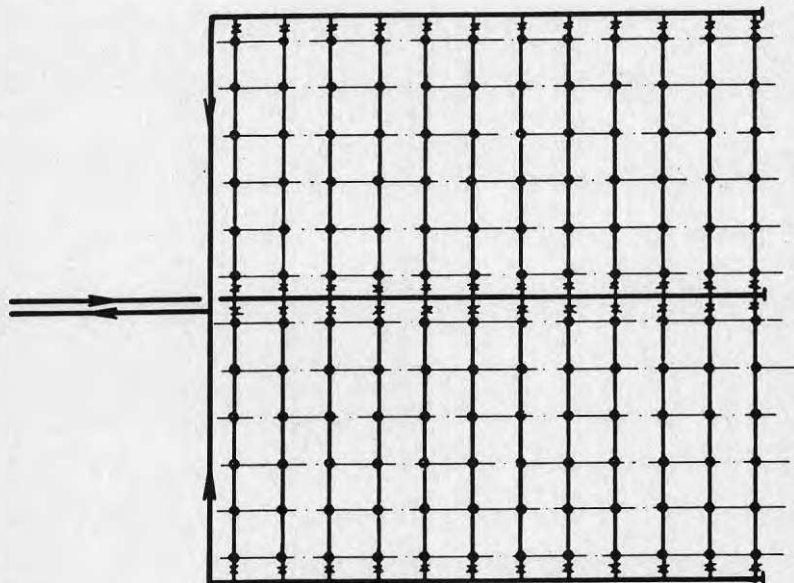


Fig 6.11 Kvadratisk layout, enkelt utbyggbar

6.5 Anläggningskostnader

Material och komponenter har specificerats varefter kostnaderna har beräknats i samråd med entreprenörer.

Mark och bygg:		kk
Geologiska förundersökningar		260
Borrning i berg (∅ 150 mm)		
144 hål, 50 m djupa, 7200 m å 110 kr		790
144 hål, 5 m i jord, foderrör 2500 kr/hål		360
10 borrhål för temperaturmätning, 100 m		140
Schaktning och planering		95
Staket 350 m å 150 kr		50
Vägar och körytor		20
Schaktning för kulvert 50 m		10
Återställning av ovanstående		25
Pumpgrop		45
Täckning av lagrets överyta		60
Inbyggnad i transportkulvert		20
		<u>1875</u>
Oförutsett 30%		520
Projektering		360
		<u>kk 2800</u>

	kk	
Mekaniska installationer:	<u>Inköp</u>	<u>Installation</u>
Värmepump 3-400 kW värmeeffekt	350	50
Cirkulationspumpar i rörsystemen (se fig 6.4):		
VS1	10	3
VS2	10	3
VL1	40	8
VL2	15	3
Värmeväxlare i systemen:		
VP rörvärmväxlare 70 m ²	80	15
VS1 plattvärmväxlare 50 m ²	60	15
VS2 plattvärmväxlare 50 m ²	60	15
VV plattvärmväxlare 20 m ²	30	8
Flyttning av befintliga system		30
Kostnader för rör och komponenter exkl pumpar samt montage i de olika rörsystemen:		
VP stål, 15 m rör	10	15
VS1 och VS2 stål, 70 m rör	30	30
KV koppars, 8 m rör	2	2
VV koppars, 12 m rör	4	4
VL1 SS stål 2343, 370 m rör	180	150
VL2 ABS plast, 9700 m rör	300	150
Hjälpssystem	20	20
	<u>1200</u>	<u>520</u>
Summa		1720
Oförutsett 30%		520
Projektering		210
Summa för mekanisk utrustning		<u>2500 kkr</u>

Elektrisk utrustning:

	<u>kr</u>
Kraftmatning:	
Värmepump	75
Övrigt	50
Styrustrustning för systemen (reglercentral, ställdon, givare, installation):	
VP	20
VS1	20
VS2	20
VL1 och VL2	30
Förreglingar	30
Start-, stopp- och larmutrustning	50
Signalkabel mellan lager och undercentral, 20 ledare 200 m å 10 kr	40
	<u>335</u>
Oförutsett 30%	100
Projektering	45
Summa för elutrustning	<u>480 kkr</u>

Sammanställning av anläggningskostnader: kr

Bygg och mark	2800
Mekaniska installationer	2500
Elinstallationer	480
Total anläggningskostnad	<u>5800 kkr</u>

Dessutom krävs att lagret tillförs en energimängd vid start så att fortfarighet med konstanta årliga förluster uppnås. Denna energimängd har beräknats till ca 3 GWh. Med de priser som anges i 6.6 motsvarar detta 30 000 kr.

6.6 Driftekonomi

Vid beräkning av driftkostnader har följande kostnader antagits:

Köpt värme	10 kr/MWh
Levererad värme	220 kr/MWh
Köpt energi	220 kr/MWh

Årliga driftkostnader:	<u>kr/år</u>
Köpt värme 2,8 GWh	28
Köpt el 450 MWh	99
Tillsyn och underhåll 2% av 5,6 Mkr	<u>112</u>
Summa driftkostnader	239

Årliga intäkter och kostnader

Levererad energi 2 GWh	440
Årliga driftkostnader	239
Årligt driftöverskott	201
Årliga kapitalkostnader vid 8% annuitet på 5,6 Mkr	<u>470</u>

Årlig förlust 260

Värmekostnad vid 8% annuitet och ovanstående 35 Öre/kWh.

6.7 Ekonomi för ett fullstort borrhålslager

För att belysa investeringsbeloppets utveckling vid ökande anläggningsstorlek har uppskalningsexponenten uppskattats för olika anläggningsdelar enligt:

$$K = k \cdot a^b$$

K = kostnad för den större enheten

k = kostnad för den mindre enheten

a = uppskalningsfaktor

b = uppskalningsexponent

Nedan har investeringsbeloppet för ett 10 gånger större lager beräknats utifrån det aktuella 2 GWh-lagret. Skalfaktorn är alltså 10. I tabellen anges uppskalningsexponenten. Höga tal (t ex för borrhning) anger små fördelar i den stora skalan.

Investeringsbeloppet för det större lagret blir 25 Mkr. Den motsvarande uppskalningskoefficienten är 0,65. Detta värde är mycket vanligt för t ex processanläggningar men torde inte vara giltigt för ännu större lager. Ytterligare kostnadssänkning för det större lagret kan nås om de minskade värmeförlusterna beaktas.

	2 GWh	Uppskalnings- exponent	20GWh
Mark och Bygg:			
Borrhningar	1,15	0,9	9,1
Övrigt	<u>1,65</u>	0,3	<u>3,3</u>
	2,8		12,4
Mekaniska installationer:			
Värme pump	0,40	0,8	2,5
Värmeväxlare	0,28	0,7	1,4
Kulvert och pumpar	0,32	0,6	1,3
Rör i lagret	0,45	0,9	3,6
Övrigt	<u>1,05</u>	0,4	<u>2,6</u>
	2,5		11,4

	<u>2 GWh</u>	<u>Uppskalnings- exponent</u>	<u>20GWh</u>
Elektrisk utrustning	0,48	0,4	1,2
Summa investering Mkr	5,8	(0,63)	25
Specifik investering	2,9	kr/kWh	1,3

De årliga kostnaderna för det större lagret kan beräknas utifrån förutsättningarna i 6.6. Nedan har antagits att de specifika driftkostnaderna är oförändrade. Kalkylen visar att lagret når lönsamhet vid låga förräntningskrav.

Intäkter och kostnader*:

Levererad energi	0,44	1	4,4
Driftkostnader	-0,24	1	-2,3
Kapitalkostnader vid 8% annuitet	-0,47	-	-2,0
	<u>-0,27</u>		<u>0,1</u>

Värmekostnad vid 8% annuitet och ovanstående kostnader (öre/kWh)	35	22
--	----	----

Kostnaderna för det större lagret sjunker ytterligare om de minskade värmeförlusterna beaktas. Om förlusterna minskar från 40 till 20% blir lagringsförmågan 27 GWh och värmekostnaden 16 öre/kWh.

* Förutsättningarna ges i 6.6

7 UTVECKLINGSIDEEER

7.1 Avskärmning av grundvattenström

En grundvattenström genom lagret kan öka värmeförlusterna. Detsamma gäller för en grundvattenström genom det täckande jordlagret ovanför lagret. Konventionella åtgärder för att minska eller förhindra en sådan grundvattenströmning är t ex injektering av bergets spricksystem, anläggning av brunnar för hydraulisk kontroll genom förbipumpning av grundvattnet, spontning etc.

En enklare och billigare lösning kan i vissa fall vara att anlägga ett slutet täckdike runt lagret, fig 7.1.

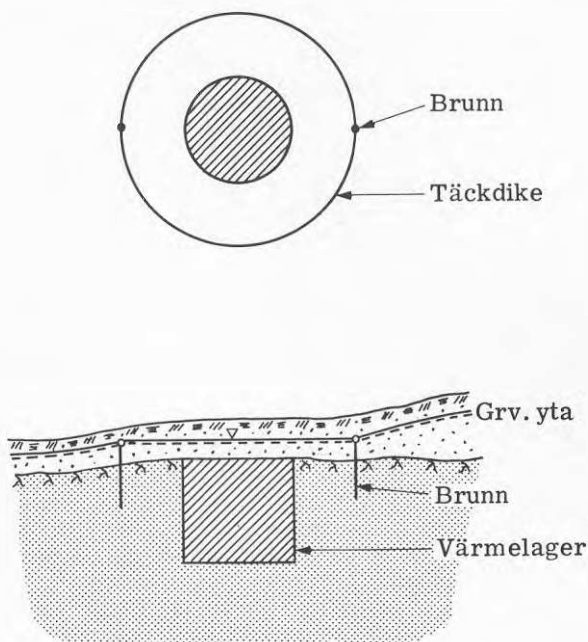


Fig 7.1 Plan och sektion av värmelager omgivet av slutet täckdike. Principskiss

Täckdiket kan även anslutas till bergborrade brunnar för att utjämna gradientskillnaden i jord och berg. Systemet kräver inga pumpinstallationer för att upprätthålla en horisontal grundvattenyta över lagret. En förutsättning är dock att gynnsamma infiltrationsförhållanden är för handen.

7.2 Cirkulationssystem

I försökslagret har cirkulationssystemet baserats på hävertprincipen. Bortsett från några otätheter som enkelt åtgärdades i början av försöksserien har detta system fungerat utan problem.

Hävertsystemets tillämpning i ett stort lager kan dock innebära vissa svårigheter eftersom antalet skarvar, anslutningar etc mångdubblas, innebärande risk för att luft tränger in i systemet. Vid djupt belägen grundvattenyta kan hävertsystemet överhuvudtaget ej användas.

Ett cirkulationssystem som behåller sughävertens fördelar med självstyrd cirkulation kan utformas enligt fig 7.2.

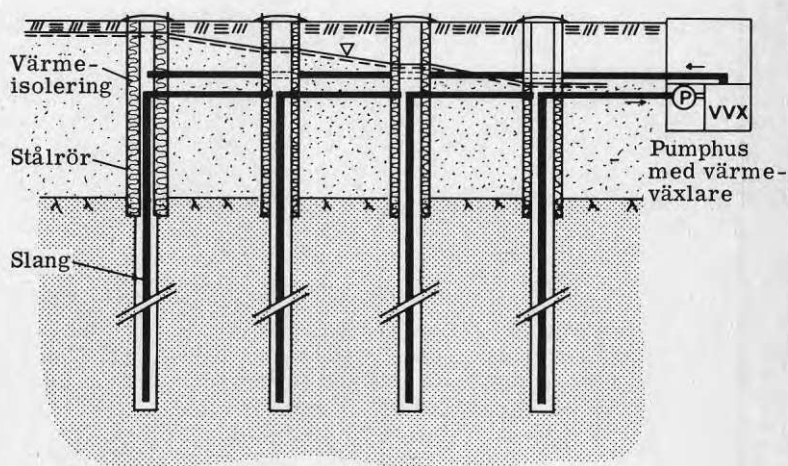


Fig 7.2 Öppet cirkulationssystem vid djupt liggande grundvattenyta. Principskiss

Den vattenströmning i bergets spricksystem som orsakas av grundvattengradienten inom lagret får samma riktning som cirkulationen mellan borrhålen. Systemet möjliggör seriekoppling av ett flertal borrhål. En nackdel är att detta system i vissa fall kräver omfattande schaktningensarbeten, eventuellt t o m under grundvattenytan. Denna nackdel kan undvikas om cirkulationssystemet trycksätts. Oinklädda borrhål kan fortfarande användas men en tät packer måste monteras, lämpligen i foderröret och på några meters djup under bergytan.

På grund av övertryck i borrhålet relativt det normala grundvattentrycket uppstår en strömning i bergets spricksystem bort från lagret, dvs en vattenförlust uppstår. Beräkningsmodeller för vatten- och värmeförluster orsakade av övertryck i oinklädda borrhål, är

under utveckling. Preliminära resultat från dessa beräkningar indikerar att berggrundens hydrauliska konduktivitet ej bör överstiga $K = 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}, \text{m}^2$. Kristallin berggrund i Sverige synes ofta uppfylla detta villkor, åtminstone om lagret förläggs med sin övre begränsning på tillräckligt djup under bergytan. Krosszoner och markanta sprickor måste vid detta system under alla förhållanden undvikas eller åtgärdas.

Vattenförlusterna i det trycksatta systemet kan i gynnsamma fall undvikas eller minskas genom att vatten sugas från de perifera hålen.

7.3 Hålplacering och ledningsdragning

En av borrhåslagrets fördelar är att det vid behov relativt enkelt kan byggas ut. Symmetriska hålplaner underlättar en sådan utbyggnad.

En hålplan som kopierar uppbyggnaden av solrosens fröhus är symmetrisk och resulterar dessutom i korta ledningslängder, fig 7.3 - 7.5. Med undantag för lagrets centrala delar blir ledningslängden minimerad under förutsättning att fram- och returledning krävs till varje borrhål.

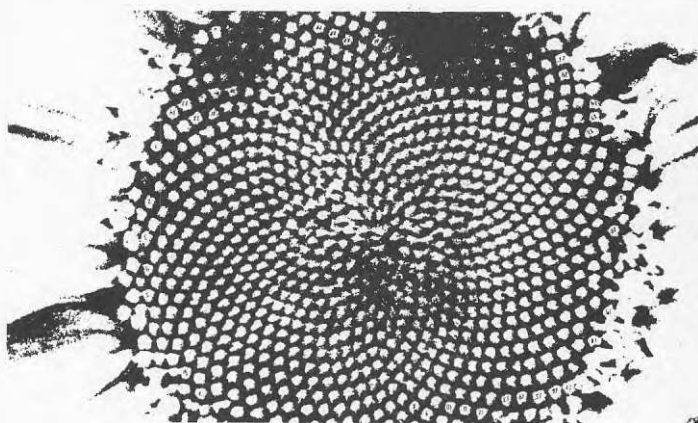


Fig 7.3 Solrosens fröhus. Foto ur Växternas värld, Lanzara P, Nordstedt 1979

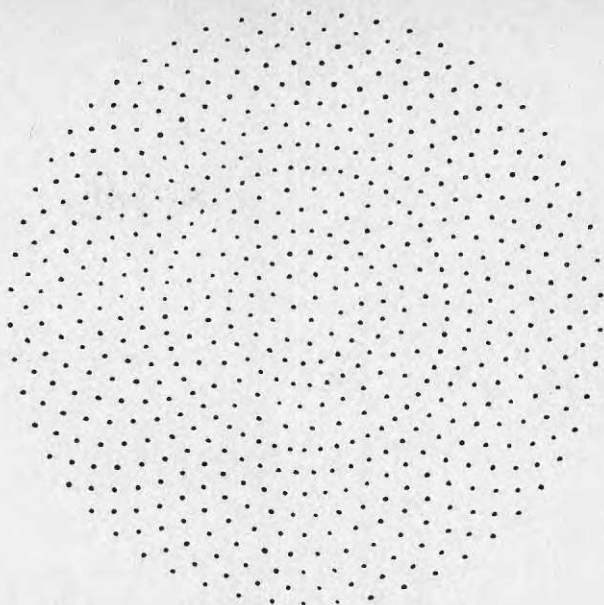


Fig 7.4 Borrplan för 596 borrhål. Borrplanen kopierar uppbyggnaden av solrosens fröhus

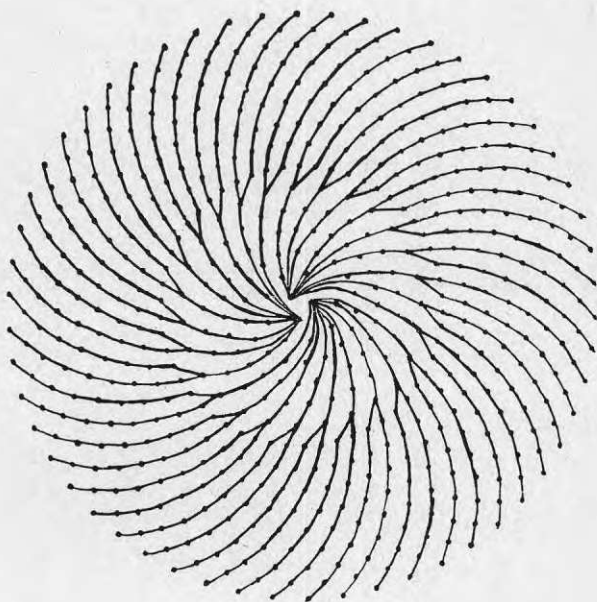


Fig 7.5 Ledningsdragning i borrhålslager med borrplan enligt fig 7.4. Samma borrplan medger ett flertal symmetriska cirkulationssystem

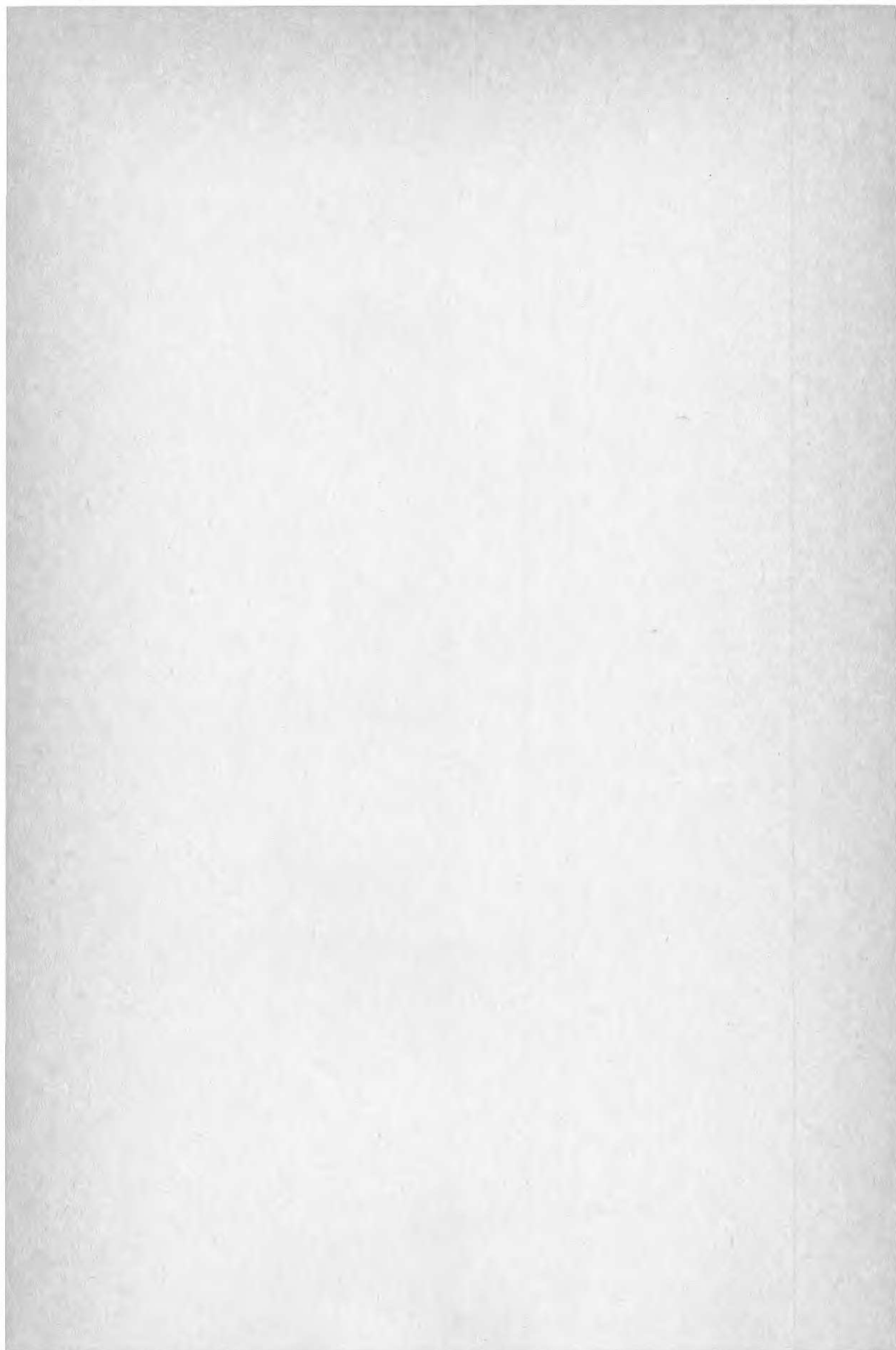
REFERENSER

1. IVA. Undermarkens roll i Sveriges framtida energiförsörjning. Rapport från arbetsseminarium i Älvkarleby 5-6 mars 1981. Rapport 209 Ingenjörsvetenskapsakademien.
2. Johansson B och Nordell B, 1980
Berglager, en anläggning för säsongslagring av värme. Högskolan i Luleå, forskningsrapport TULEA 1980:14
3. Andersson S, Eriksson A och Tollin J, 1981
Borrhålslager för säsongslagring av värme. BFR R66:1981
4. Kadesjö H och Sintorn J, 1981
Säsongslagring av värme i berg. Förstudie av borrhålslager för ca 1000 lägenheter. BFR R98:1981
5. Johansson M och Claesson J, 1979
Continuous heat source model for ground heat storage. BFR D34:1980
6. Hellström G, 1981
Dimensionering av rörsystem för värmelagring i mark. Nov 1981. Inst för matematisk fysik, Lunds Universitet.
7. Platell O och Wikström H, 1981
Sunstoreprojektet 1977-1980. Solvärmesystem med låg temperatur och säsongslagring för uppvärmning av lokaler. BFR R100:1981.
8. Andersson S, Eriksson A och Nordell B, 1981
Heat storage in rock - multiple well system. Research report TULEA 1981:28.
9. AIB / Högskolan i Luleå, Dec 1980
Utveckling av teknik för energilagring i mark. Rapport avseende utvecklingsarbete för Norrlandsfonden och Norrbottendelegationen.
- 10.* Ludvig B, 1981
Beskrivning av bergmassan kring värmelager i berg vid högskolan i Luleå. Högskolan i Luleå, rapport BM 1981:10
- 11.* Marton M och Andersson A, 1981
Permeabilitet i berg. Provtryckning av värmelagret - Porsön. Högskolan i Luleå, examensarbete. 1981:030 E

* Rapport utarbetad för separat uppdrag inom projektet

- 12.* Claesson T och Ronge B, 1982
Vattenkemi. Värmelagring i berg - fältförsök i Luleå. Geologiska Institutionen / Chalmers Tekniska Högskola / Göteborgs Universitet. Undersökningsrapport
- 13.* Claesson J och Eskilson P, 1982
Värmelagring i berg - fältförsök i Luleå. Simulering av temperaturförlopp. Inst för matematisk fysik, Lunds Universitet.

* Rapport utarbetad för separat uppdrag inom projektet



**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag
810181-8 från Statens råd för byggnadsforskning
till Allmänna Ingenjörbyrå AB, Energiteknik, Stockholm**

R15:1983

ISBN 91-540-3878-3

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Art.nr: 6700715

**Abonnemangsgrupp:
W. Installationer**

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

Cirkapris: 30 kr exkl moms