



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 konstgjorda grundvattenmagasin

Förstudie

Sören Andersson m fl

INSTITUTET FÖR BYGGDOKUMENTATION	
Accnr	80-1237
Plac	Ser

K  
01/1

R78:1980

VÄRMELAGRING I KONSTGJORDA GRUNDVATTENMAGASIN

Förstudie

Sören Andersson m fl

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag  
780021-8 från Statens råd för byggnadsforskning  
till Allmänna Ingenjörbyrå AB, Stockholm.

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

R78:1980

ISBN 91-540-3290-3

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

LiberTryck Stockholm 1980 054106

## INNEHÅLL

		<u>Sid</u>
	SAMMANFATTNING	5
1	INLEDNING	9
1.1	<u>Allmänt</u>	9
1.2	<u>Förstudiens omfattning och genomförande</u>	10
2	FUNKTIONSSÄTT	11
2.1	<u>Allmänt</u>	11
2.2	<u>Värmekapacitet</u>	12
2.3	<u>Termohydraulik</u>	13
2.3.1	Orientering	13
2.3.2	Temperaturfronten och vattnets hastighet	13
2.3.3	Permeabilitet	14
2.3.4	Termisk dispersion	15
3	INFILTRATIONS- OCH UTTAGSANORDNINGAR	17
3.1	<u>Allmänt</u>	17
3.2	<u>System med övre och undre vattenfördelningslager</u>	17
3.3	<u>Magasin med brunnar utan vattenfördelningslager</u>	19
3.4	<u>Installationer</u>	23
4	VÄRMEFÖRLUSTER	25
4.1	<u>Allmänt</u>	25
4.2	<u>Verkningsgrad</u>	25
4.2.1	Verkningsgradens beroende av laddnings- och urladdningsförloppen	26
4.2.2	Verkningsgradens beroende av magasinets form och storlek	28
4.2.3	Verkningsgradens beroende av tjockleken hos täckande jordlager	29

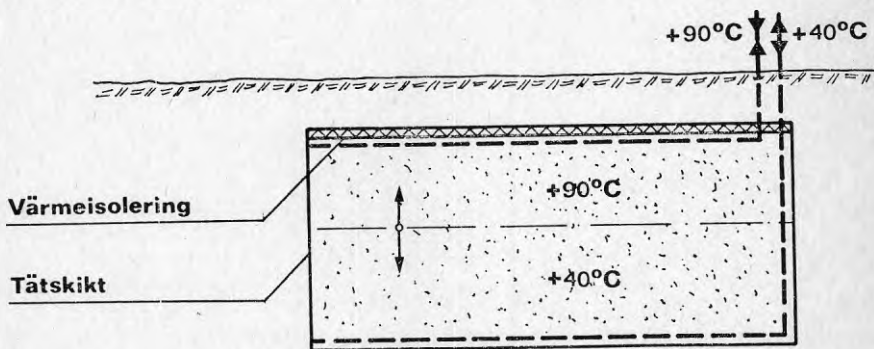
4.2.4	Verkningsgradens beroende av omgivande marks termiska egenskaper	30
4.2.5	Verkningsgradens beroende av inlagd isolering	31
4.2.6	Verkningsgradens beroende av magasinets arbetstemperaturer	35
4.3	<u>Uttagstemperaturer</u>	35
5	MAGASINSTYPER. GEOLOGISKA FÖRUTSÄTTNINGAR	37
5.1	<u>Allmänt</u>	37
5.2	<u>Magasin i naturliga, vattentäta lager</u>	37
5.2.1	Magasin i berg	37
5.2.2	Magasin i lera	37
5.2.3	Naturliga grundvattenmagasin	38
5.3	<u>Magasin med vatten- och värmeisolerande lager</u>	38
5.3.1	Typval	38
5.3.2	Nedschaktat magasin	39
5.3.3	Nedschaktat - invallat magasin	40
5.3.4	Magasin i avskärmat grus - sandskikt	40
5.4	<u>Värmeisolering</u>	41
5.5	<u>Vattenisolering</u>	42
5.5.1	Folier	42
5.5.2	Bentonitskärm	42
6	ANLÄGGNINGSKOSTNADER	45
6.1	<u>Allmänt</u>	45
6.2	<u>Utschaktat och återfyllt magasin</u>	45
6.3	<u>Magasin, avgränsat med slitsmurar</u>	47
6.4	<u>Kostnadsjämförelse med andra kapacitiva lagringsmetoder</u>	48
	LITTERATURFÖRTECKNING	51



## SAMMANFATTNING

### Orientering

Ett konstgjort grundvattenmagasin, s k hålrumsmagasin, för värmelagring i jord-vatten kan åstadkommas genom urschaktning, anbringande av tät- och isolerskikt, inläggning av erforderliga rörsystem samt återfyllning med lämpligt jordmaterial.



Hålrumsmagasin. Principskiss

Eftersom magasinet är fyllt med jordmaterial behövs inga speciella bärande byggnadskonstruktioner för väggar och tak. Ovanförliggande markyta kan utnyttjas på lämpligt sätt med tanke på det värmeflöde som, beroende på isoleringsgrad, alltid kommer från magasinet.

### Funktionssätt

Magasinet, vars porvolym i normalfallet hela tiden är vattenfylld, laddas genom att varmt vatten tillföres magasinets övre del samtidigt som en lika stor volym kallt vatten bortföres ur magasinets undre del.

Lämpligt utformade rörsystem och/eller fördelningslager av material med stor genomsläpplighet ger förutsättningar för en jämn genomströmning av magasinet. Urladdning sker via det omvända förloppet.

Vid laddning strömmar det varma vattnet ner genom magasinet varvid värme successivt överförs till mineralkornen. Vattnet kyls genom denna värmewäxling men fortsätter strömma med oförändrad hastighet. Temperaturfronten, dvs den linje eller plan ovanför vilken vattentemperaturen är lika med den inmatade temperaturen, rör sig i vattenströmmens riktning men med en hastighet som kan visas vara ungefär hälften av vattnets hastighet. För att erhålla en fullständig laddning måste således magasinet genomströmmas två gånger.

Temperaturfronten blir på grund av termisk dispersion ej ett skarpt markerat plan utan en övergångszon bildas med tiden vars tjocklek i vertikalled också är avhängig bl a det vattenmättade jordmaterialets temperaturlledningstal.

Eftersom vattenhastigheten i magasinet normalt är mycket liten, storleksordningen  $5 \cdot 10^{-6}$  m/s, kan även vid relativt grovt fyllnadsmaterial hela detta materials värmelagringsförmåga utnyttjas även vid förhållandevis snabba laddningar eller urladdningar.

Beroende på fyllnadsmaterialets porositet och specifika värme kan ett vattenfyllt hålrumsmagasins värmekapacitet uppgå till 2.3 å 2.8 MJ/m<sup>3</sup>, °C (0.64 å 0.78 kWh/m<sup>3</sup>, °C) Motsvarande värde för ett rent vattenmagasin är 4.2 MJ/m<sup>3</sup>, °C (1.2 kWh/m<sup>3</sup>, °C).

### Verkningsgrad

Magasinets verkningsgrad definierad som förhållandet mellan uttagen värmemängd över viss temperatur och inmatad värmemängd är beroende av ett flertal faktorer såsom magasinets arbetstemperaturer, volym, geometriska form, förläggningsdjup, isoleringsförhållanden etc.

För ett oisolerat cirkulär cylindriskt magasin, helt omgivet av vattenmättat moränmaterial och med ett förläggningsdjup på 5 m, kan verkningsgraden för olika kombinationer av magasinshöjd och radie utläsas ur nedanstående diagram.

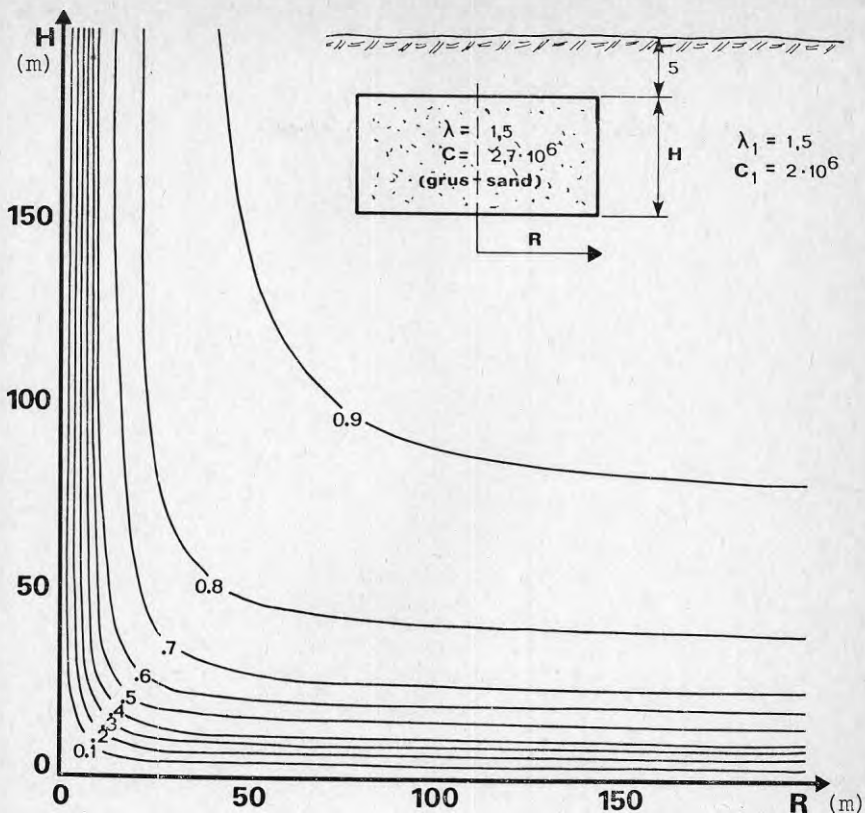
Av diagrammet framgår t ex att verkningsgraden för ett magasin med  $R = 25$  m och  $H = 25$  m, dvs med volymen 50 000 m<sup>3</sup>, uppgår till ca 0.6. Med en isolering vid magasinets övre delar kan denna verkningsgrad ökas avsevärt.

En sänkning av arbetstemperaturerna från 40 - 90 °C till t ex 20 - 70 °C medför på grund av den mindre temperaturdifferensen mot omgivningen en ökning av ovan angiven verkningsgrad för oisolerat magasin från 0.6 till 0.8.

Diagrammet visar nödvändigheten av att vid oisolerade magasin och höga lagringstemperaturer använda sig av stora lagringsvolymmer.

Med förutsättningar enligt diagrammet kan även visas att för en given volym fås maximal verkningsgrad vid  $H/R 1.5$ . De naturliga markförhållandena kommer dock troligen att i de flesta fall framtvinga en mer utbredd, plattare, magasiniform. Härför talar även utförda byggkostnadskalkyler. En låg verkningsgrad på grund av värmetekniskt ogynnsam form kan dock förbättras genom tilläggsisolering i första hand vid markytan.





Verkningsgraden som funktion av magasinet höjd och radie. Oisolerat magasin. Arbetstemperatur  $40 - 90^{\circ}\text{C}$ . Magasinet helt omgivet av vattenmättad morän med värmeledningstalet  $\lambda = 1,5 \text{ J/m, s, }^{\circ}\text{C}$  och värmekapaciteten  $c = \text{J/m}^3, ^{\circ}\text{C}$ .

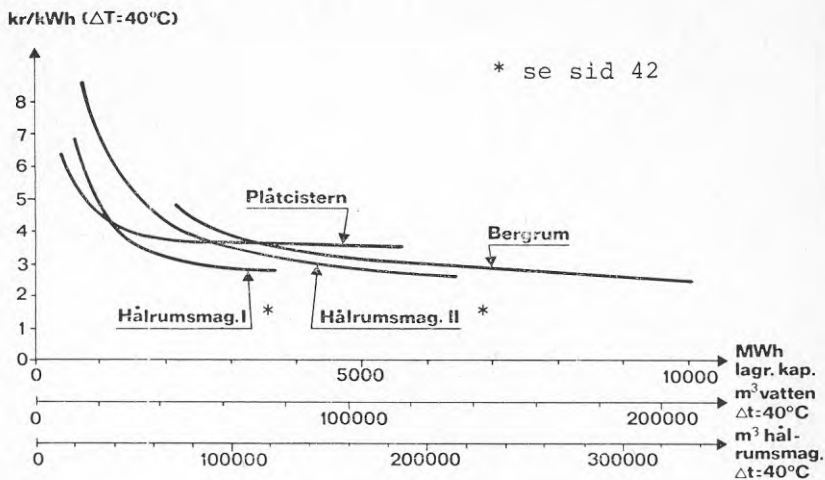
#### Jämförelse med andra kapacitiva lagringssystem

Vid magasinvolymerna större än ca  $80\,000 \text{ m}^3$ , motsvarande  $50\,000 \text{ m}^3$  vid renodlade vattenmagasin, synes hålrumsmagasinet vara ekonomiskt intressant jämfört med t ex bergrum eller isolerad plåtcistern.

Vid kostnadsjämförelse med t ex en isolerad stål-cistern bör även beaktas den fördel ur estetisk och markutnyttningssynpunkt som hålrumsmagasinet erbjuder. Större varmvattencisterner kan dessutom i många fall behöva förses med skyddsinvallningar. Å andra sidan bör även beaktas den osäkerhet - läckagerisk - som hålrumsmagasinet inneslutning innebär.

Nu existerande tätfolier utgör en begränsning eftersom deras livslängd avtar snabbt med ökande temperatur. Långtidsanvändning av folier vid temperaturer över  $+70^{\circ}\text{C}$  kräver utveckling av nya material.

Inlagring respektive uttag vid olika temperaturskikt, dvs på olika djup i magasinet, kan även åstadkommas vid hålrumsmagasin men kräver då rörsystem på olika nivåer, ev i kombination fördelningslager.



Anläggningskostnader för olika kapacitiva lagringssystem. Utnyttjad temperaturdifferens  $40^{\circ}\text{C}$ . En lagringscykel per år.

I ovanstående diagram redovisade kostnader är beräknade utgående från renodlad säsonglagring, dvs magasinets kapacitet utnyttjas endast en gång per år. Samtliga magasinstyper kan dock även användas för t ex dygns- eller veckolagring.

### Slutsatser

Tekniskt, ekonomiskt och inte minst miljömässigt synes hålrumsmagasinet kunna utgöra ett intressant alternativ till andra lagringssystem.

Fortsatta studier och pilotförsök erfordras för att fastlägga metodens konkurrensduglighet.

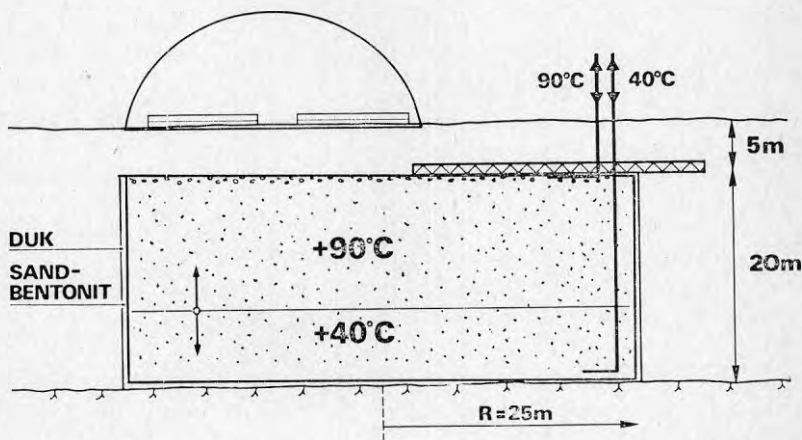
Bland de områden som bör bli föremål för fortsatta undersökningar må nämnas

- filterteknik i kombination med in- och uttagsanordningar
- utförande av vattentäta avgränsningar
- utfällningar i cirkulationssystemet.

## 1 INLEDNING

1.1 Allmänt

Ett på konstlad väg avgränsat och värmeisolerat grundvattenmagasin, här kallat hålrumsmagasin, kan t ex erhållas genom urschaktning eller ett utnyttjande av grustag, schakter eller fördjupningar i markytan samt anbringande av tät- och isolerskikt, inläggning av erforderliga rörsystem samt återfyllning av jordmaterial. Se Figur 1.



**HÅLRUMSMAGASIN 40 000 m<sup>3</sup>**  
KAPACITET 1,4 · 10<sup>6</sup> kWh

Figur 1. Hålrumsmagasin för värmelagring

Kostnaderna för magasin utförda på ovan antydda sätt och i volymintervallet 10 å 100 000 m<sup>3</sup> kan under gynnsamma betingelser vara lägre än motsvarande kostnader för t ex värmeisolerade plåt- eller betongcisterner. Jämfört med ett sk gropmagasin, som är enbart vattenfyllt, bedöms kostnaderna vara av samma storleksordning. Hålrumsmagasinet bör dock kunna erbjuda större markanvändningsmöjligheter än gropmagasinet. Denna förstudie avser att belysa tekniska och ekonomiska förutsättningar för anläggande av hålrumsmagasin för värmelagring. Vattenkvalitéfrågor hos cirkulationsvattnet har ej varit möjligt att behandla inom uppdragets kostnadsram.

1.2 Förstudiens omfattning och genomförande

Förstudien har i huvudsak omfattat följande utredningsmoment

- termohydrauliskt funktionssätt
- infiltrations- och uttagsanordningar
- värmeförluster och verkningsgrad
- magasinstyper
- anläggningskostnader.

Utredningsmomenten redovisas i det följande under respektive rubrik.

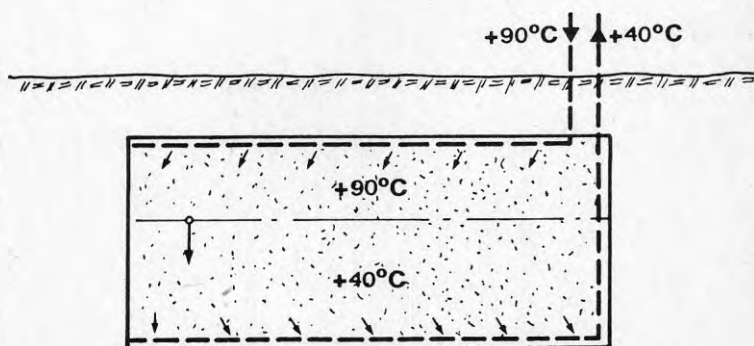
Projektarbetet har bedrivits under medverkan av

tekn lic	Sören Andersson	AIB (projektledare)
professor	Klas Cederwall	KTH
tekn dr	Johan Claesson	LTH
geolog	Anders Eriksson	AIB
civ ing	Göran Hellström	LTH
ing	Nils Persson	AIB
tekn lic	Bengt Åberg	Stocksund

2.1 Allmänt

Magasinet har i denna förstudie förutsatts utnyttjas som utskiftningslager. Utskiftning innebär att då t ex varmt vatten uttages ur magasinet så tillföres samtidigt lika mycket avkyllt vatten. Magasinets porvolym är under de olika driftfaserna hela tiden fyllt med vatten.

Under laddning tillföres varmt vatten via ett övre infiltrationsystem samtidigt som avkyllt vatten uttages vid magasinets nedre del. Se Figur 2.

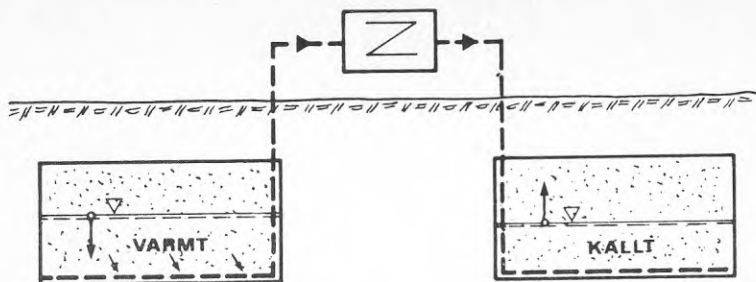


Figur 2. Laddning av utskiftningslager. Principskiss

Då den i Figur 2 antydda horisontala temperaturfronten nått magasinets nedre del är magasinet laddat. Vid urladdning tas varmt vatten ut via det övre rörsystemet samtidigt som motsvarande mängd avkyllt vatten tillföres via det nedre.

Hålrumsmagasinet kan även utnyttjas som magasinstömningslager. Vid urladdning tömmas då magasinet på vatten. Efter användning, dvs avkylning, överföres vatten till ett annat, lika stort magasin. Se Figur 3. Alternativt avledes det avkylda vattnet till recipient.

I jämförelse med utskiftningslagret medger ett magasinstömningslager troligen väsentligt enklare in- och uttagsanordningar men kräver å andra sidan, beroende på att den i jordmaterialet lagrade värmen ej kan tas ut, en ca fyra gånger så stor magasinvolym. Eftersom magasinvolymen är en dominerande kostnadsfaktor har metoden ej närmare behandlats i denna förstudie.



Figur 3. Urladdning av magsinstömningslager. Principskiss

## 2.2 Värmekapacitet

Under förutsättning att magasinets fyllnadsmaterial ej är alltför grovt kan detta materials värmelagringsförmåga utnyttjas även vid relativt snabba laddningar eller urladdningar.

Beroende på fyllnadsmaterialets porositet och specifika värme kan därför ett vattenfyllt hålrumsmagasins värmelagringsförmåga uppgå till 2.3 å 2.8 MJ/m<sup>3</sup>, °C (0,64 å 0,78 kWh/m<sup>3</sup>, °C). Motsvarande värde för ett rent vattenmagasin är 4.2 MJ/m<sup>3</sup>, °C (1.2 kWh/m<sup>3</sup>, °C).

Värmekapaciteten hos några olika material och ämnen framgår av nedanstående tabell.

<u>Ämne</u>	<u>MJ/m<sup>3</sup>, °C</u>
Vatten	4.2
Olja	1.5
Makadam	1.5*
Tegel	1.0*
Järnskrot	2.7*
Grusfyllning, vattenmättad	2.7
Morän, vattenmättad	2.0

\* under antagande av 30% porositet

Vattnets värmekapacitet är som synes mycket god i jäm-



förelse med andra ämnen. Trots en viss begränsning i fråga om högre temperaturintervall på grund av ångtryck torde vatten vara att betrakta som ett optimalt storskaligt lagringsmedium.

Beträffande fyllnadsmaterial torde av praktiska och ekonomiska skäl endast de naturliga materialen sten - grus - sand vara lämpliga.

## 2.3 Termohydraulik

### 2.3.1 Orientering

Den teoretiska behandlingen av de termohydrauliska förloppen vid strömning i porösa medier är mycket komplicerad. (1), (2), (3), (4), (5). I det följande redovisas därför endast de samband och ekvationer som är av väsentlig betydelse för förståelsen av magasinets funktionssätt. En mer omfattande termohydraulisk studie återfinns i AIB's utredning Värme- lagring i naturliga grundvattenmagasin (1) samt i LTH's A computational model with a simplified linear water flow (6).

### 2.3.2 Temperaturfronten och vattnets hastighet

Under t ex laddningsfasen, då varmt vatten strömmar nedåt genom magasinet, överföres värme successivt till mineralkornen. Vattnet kyls genom denna värmewäxling men fortsätter att strömma med oförändrad nettohastighet  $v_n$ . Temperaturfronten, dvs det plan ovanför vilket vattnets temperatur är lika med den inmatade temperaturen, rör sig i vattenströmmens riktning med en hastighet  $v_T$  som är lägre än  $v_n$ . Resonemanget är här förenklat. Termisk dispersion medför "utspridning" av värmefronten. Jfr pkt 2.3.4.

Förhållandet mellan vattnets och temperaturfrontens hastighet kan approximativt skrivas

$$\frac{v_n}{v_T} = 1 + \frac{1-n}{n} \cdot \frac{c_s \cdot \rho_s}{c_w \cdot \rho_w} \quad (\text{ekv 1})$$

För normala värden på porositeten  $n$ , värmekapaciteten  $c_s$  J/m<sup>3</sup>,°C (för jordmaterialet) resp.  $c_w$  J/m<sup>3</sup>,°C (för vattnet) samt densiteten  $\rho_s$  respektive  $\rho_w$  fås  $v_n \approx 2 v_T$ . Vattenfronten rör sig således ungefär dubbelt så fort som värmefronten.

Sambandet mellan vattnets nettohastighet  $v_n$  och hastighet  $v$  enligt Darcy's lag kan skrivas

$$v_n = \frac{v}{n_{\text{eff}}} \quad (\text{ekv 2})$$

där  $v = k \cdot I$  (Darcy's lag) (ekv 3)

och  $n_{\text{eff}}$  är den ur strömningssynpunkt effektiva porositeten hos fyllnadsmaterialet.  $k$  är jordmaterialets permeabilitet och  $I$  den hydrauliska gradienten i strömningens riktningen.

### 2.3.3 Permeabilitet

Permeabilitetskoefficienten  $k$  i Darcy's lag är främst jordartsberoende men varierar också med temperaturen. Empiriska  $k$ -värden finns angivna på formen (i det här fallet för temperaturen  $10^{\circ}\text{C}$ ).

$$k_{10^{\circ}} = 5 \cdot 10^3 \cdot d_{10}^2 \text{ m/s} \quad (\text{ekv } 4)$$

där  $d_{10}$  är den ur strömningssynpunkt representativa korndiametern mätt i m, (lika med den diameter som vid siktning svarar mot 10% passerande viktmängd).

För olika fraktioner gäller  $k_{10^{\circ}}$ -värden enligt nedanstående tabell,

Fraktion	Kornstorleksgränser mm	Permeabilitet $k_{10^{\circ}}$ m/s
Fingrus	6 - 2	$10^{-1}-10^{-3}$
Grovsand	2 - 0.6	$10^{-2}-10^{-4}$
Mellansand	0.6 - 0.2	$10^{-3}-10^{-5}$
Grovmo	0.2 - 0.06	$10^{-4}-10^{-6}$
Finmo	0.06 - 0.02	$10^{-5}-10^{-7}$
Mjåla	0.02 - 0.002	$10^{-7}-10^{-9}$

Permeabilitetskoefficientens temperaturberoende kan skrivas

$$k = k_0 \cdot \frac{\rho g}{\mu} \quad (\text{ekv } 5)$$

där  $\mu$  är den dynamiska viskositeten och  $k_0$  är en permeabilitetsfaktor som enbart beror av jordmaterialets porositetsegenskaper.

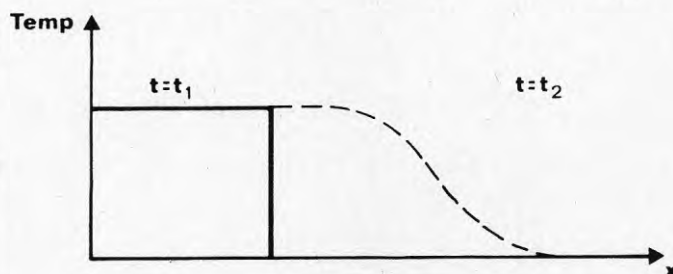
Temperaturberoendet kan för ett och samma jordmaterial exemplifieras med uttrycken

$$k_{50^{\circ}} = 2.3 \cdot k_{10^{\circ}}$$

$$k_{90^{\circ}} = 4.3 \cdot k_{10^{\circ}}$$

### 2.3.4 Termisk dispersion

Temperaturfronten, dvs den fiktiva skiljeytan mellan kallt och varmt vatten, är i verkligheten en övergångszon vars utbredning bestäms av den termiska dispersionen. Dispersionen medför att temperaturfronten successivt flackas ut i strömningsriktningen. Figur 4.



Figur 4. Temperaturfrontens förändring mellan två tidpunkter  $t_1$  och  $t_2$

Temperaturfördelningen vid temperaturfronten beskrivs av normalfördelningsfunktionen. Ett mått på frontens utspridning fås av standardavvikelsen  $\sigma$ , jfr Figur 5.

Värdet på  $\sigma$  kan visas vara i huvudsak beroende av den tid som sammanhänger med temperaturfrontens förflyttning i x-led samt av det vattenmättade jordmaterialets temperaturledningstal  $a$ . För de termohydrauliska förhållanden som normalt råder i ett värmemagasin av här ifrågakvarande typ gäller approximativt

$$\sigma = \sqrt{at} \quad (\text{ekv 6})$$

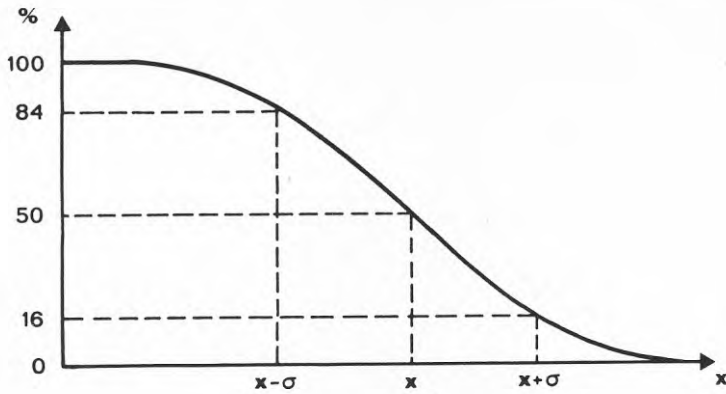
där  $a = \frac{\lambda}{c_0}$  och  $t$  den tid som motsvarar frontrörelsen.

$\lambda$  är den termiska konduktiviteten för det vattenmättade porösa materialet och  $c_0 = n c_w \delta_w + (1-n) c_s \delta_s$ .

Ekv (6) förutsätter att den kinematiska dispersionen kan försummas i förhållande till den dispersion som orsakats av termisk konduktivitet.

För tiden  $t = 4$  månader, dvs  $1 \cdot 10^7$  s och ett temperaturledningstal  $a = 5.6 \cdot 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s fås  $\sigma = 2.4$  m.

Temperaturfronten kommer således genom ren värmespridning i det vattenmättade materialet att undergå en relativt stor utspridning.



Figur 5. Temperaturfördelningen vid en temperaturfront som förflyttar sig sträckan  $x$  från ett läge där den ursprungligen var skarp. 100% respektive 0% svarar mot ursprungstemperaturerna på båda sidor om fronten.

### 3.1 Allmänt

Infiltrations- och uttagsanordningar bör bl a utföras så att vatten- och därmed värmeströmmar blir jämnt fördelade över hela magasinet. Problemställningen kan något förenklat sägas vara att finna en optimalt gles fördelning av brunnar, infiltrationsrör etc.

I det följande skall två olika infiltrations- och uttagssystem analyseras, främst ur termohydraulisk synpunkt. Vid båda systemen förutsätts magasinet i princip arbeta utan övertryck, dvs magasinet trycknivå ligger i nivå med dess övre begränsning.

### 3.2 System med övre och undre vattenfördelningslager

Systemet förutsätter att magasinet åstadkommit genom urgrävning och återfyllning alternativt genom uppfyllning mellan anlagda eller naturliga begränsningar. Magasinet kan då förses med ett nedre och ett övre fördelningslager av material med hög vattengenomsläpplighet, t ex singel eller makadam. Se Figur 6.

I vardera fördelningslagret inplaceras anordningar för infiltration respektive uttag av vatten. Anordningarna kan t ex utgöras av enkla, horisontala slitsade rör.

Fördelningslagren åtskiljs från den övriga magasinutfyllningen genom filter, t ex av fiberduk. Om fördelningslager och filter utföres så att hela magasinstrytan täcks kan övrigt fyllnadsmaterial väljas inom vida gränser. De krav som ur termohydraulisk synpunkt måste ställas på fyllnadsmaterialet är att dess permeabilitet är jämn, dvs lika stor över hela magasinet, och att den dessutom uppgår till ett visst minsta värde.

Kravet på jämn permeabilitet är väsentligt med tanke på risken för lokala strömningskoncentrationer. Sådana strömningar skulle kunna kortsluta magasinet och förorsaka en rundpumpning utan att hela magasinets värmelagerings- eller värmeavgivningsförmåga utnyttjas.

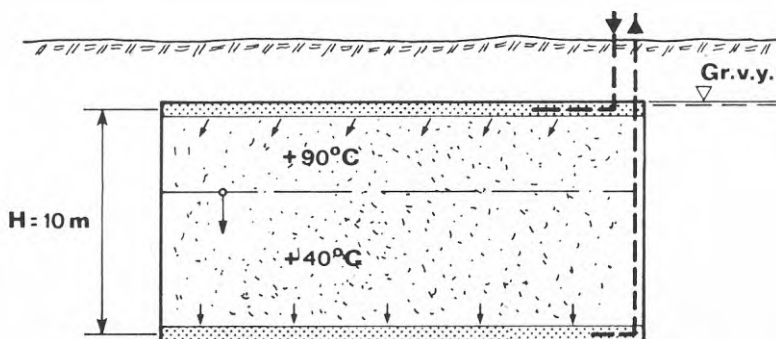
Kravet på en minsta permeabilitet hos fyllnadsmaterialet föranleds av önskemålet att ej utnyttja en alltför stor hydraulisk gradient för att transportera vattnet genom magasinet. Förutom ett större pumparbete kan en stor hydraulisk gradient i vissa fall medföra risk för att fyllnadsmaterialet i eller ovan magasinet lyfts upp eller luckras upp av porvattentrycket vid urladdning, dvs då vattenströmmen är uppåtriktad. Beroende på den naturliga grundvattenytans läge kan en stor hydraulisk gradient också medföra ökande påfrestningar på den vattentäta duk eller folie som avskiljer magasinet från omgivande mark.



### Exempel

För att bestämma storleksordningen av minsta erforderliga permeabilitet betraktas följande exempel.

Ett värmemagasin har effektiva höjden 10 m och är inplacerat så att den omgivande naturliga grundvattentytan sammanfaller med magasinets övre begränsning. Figur 6.



Figur 6. Laddning av magasin med horisontala vattenfördelningslager

I exemplet antas att ett högsta tryckfall mellan in- och uttagssida får uppgå till 1 m vattenspelare. (Detta värde kan bestämmas av förhållandet vid pumparnas sug sida eller av önskemålet att begränsa påfrestningarna på magasinets omgivande tätningsfolie.)

Med magasinshöjden 10m fås då en tillåten hydraulisk gradient  $I = 0.1$ .

Laddning respektive urladdning antages pågå kontinuerligt under 4 månader. Temperaturfronten skall således förflyttas 10 m på 4 månader, vilket motsvarar en medelhastighet  $v_T = 1 \cdot 10^{-6}$  m/s. Med tanke på toppbelastningar såväl vid laddning som urladdning kan antagas att den maximala hastigheten uppgår till ca 3 ggr detta värde, dvs

$$v_{T_{\max}} = 3 \cdot 10^{-6} \text{ m/s.}$$

Erforderlig vattenhastighet, definierad enligt Darcy's lag, blir då ungefär

$$v_{\max} = \frac{2}{3} v_{T_{\max}} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ m/s.}$$



Med en högsta tillåten hydraulisk gradient  $I = 0.1$  fås ett minsta tillåtet värde på permeabiliteten hos fyllnadsmaterialet i magasinet.

$$k_{\min} = \frac{v_{\max}}{I} = \frac{2 \cdot 10^{-6}}{10^{-1}} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$$

Eftersom magasinet tänkes arbeta med en lägsta temperatur på  $+40^{\circ}\text{C}$  kan  $k$ -värdet vid  $10^{\circ}\text{C}$ , dvs den temperaturen vid vilken normalt  $k$ -värden anges, få minskas till  $1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ . Jfr pkt 2.3.3.

Permeabiliteten  $k_{100} = 1 \cdot 10^{-5}$  svarar mot ett jordmaterial med en effektiv kornstorlek

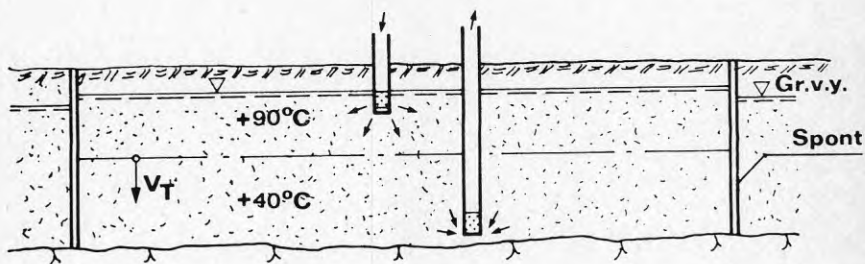
$$d_{10} = \sqrt{\frac{k_{10}}{5 \cdot 10^3}} = \sqrt{\frac{10^{-5}}{5 \cdot 10^3}} = 4.5 \cdot 10^{-5} \text{ m} = 0.045 \text{ mm}$$

Om i ovanstående exempel  $I_{\max}$  begränsas till 0.01, dvs en högsta tryckdifferens i magasinet på 0.1 m, fås på motsvarande sätt

$$k_{100} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s och } d_{10} = 0.14 \text{ mm}$$

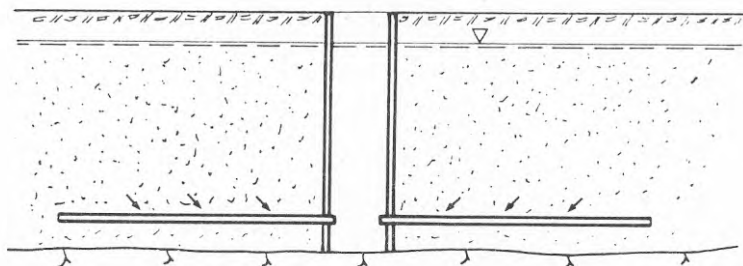
### 3.3 Magasin med brunnar utan vattenfördelningslager

Infiltration och uttag enbart via brunnar kan, om vissa hydrauliska villkor uppfylles, i princip ske oavsett typ av magasin. Systemet är av speciellt intresse då en naturlig avlagring skall utnyttjas utan föregående urgrävning och återfyllning. I ett sådant fall är det omöjligt att utföra i varje fall det undre fördelningslagret. Figur 7.



Figur 7. Laddning av magasin via brunnar utan fördelningslager

Brunnen kan även utföras som en horisontalfilterbrunn, dvs en schaktbrunn varifrån ett antal filterrör drivs ut i radiell riktning. Figur 8. Brunnstypen torde dock vara oekonomisk för ifrågavarande magasinstyper och kommer därför ej att vidare behandlas i denna förstudie.



Figur 8. Horisontalfilterbrunn

I värmelager som saknar fördelningslager måste fyllnadsmaterialets permeabilitet vara avsevärt högre än i värmemagasin som har sådana lager. Detta kan förklaras med att vattenströmmarna blir koncentrerade mot brunnarna, vilket vid låg permeabilitet leder till stora strömningsmotstånd.

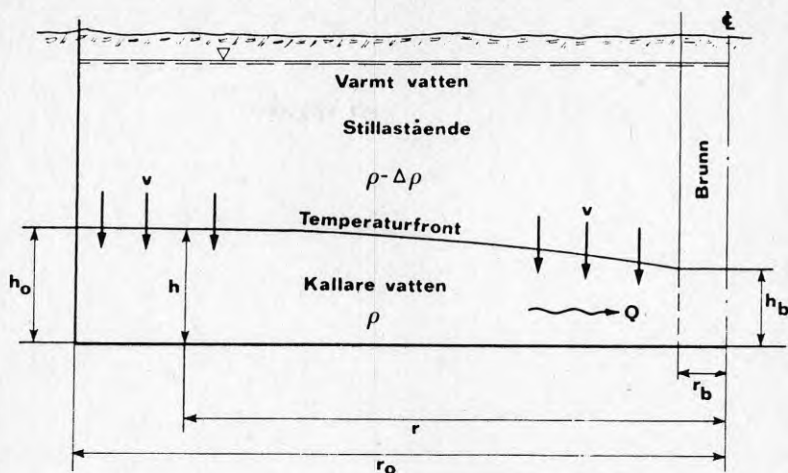
För att belysa strömningsförhållandena i ett värmemagasin med brunnar betraktas ett fall enligt Figur 9, där det kallare bottenvattnet strömmar mot en brunn under en i det närmaste stillastående volym av varmare vatten. Detta förhållande kan anses råda när temperaturfronten ligger nära magasinets botten. På grund av flödet  $Q$  in mot brunnen kommer vattnet vid temperaturfronten att kontinuerligt röra sig nedåt med en hastighet  $v$ . Som en approximation kan antas att  $v$  är konstant över hela magasinetsarean.

Värmemagasinet antages ha cirkulär planform med radien  $r_0$ . I magasinets mitt är en brunn med radien  $r_b$  placerad. Brunnen har silrör endast till höjden  $h_b$ . Det kallare vattenskiktets höjd är vid brunnen  $h_b$  och vid magasinsskanten  $h_0$ .

Det kan nu visas att temperaturfrontens form överensstämmer med den form som den fria grundvattenytan skulle ha haft om inget varmt vatten funnits utan det kallare vattenskiktet i stället hade gränsat direkt mot luft och samtidigt jordmaterialets permeabilitet  $k$  hade utbytts mot en permeabilitet

$$k^1 = k \cdot \frac{\Delta \delta}{\delta} \quad (\text{ekv 7})$$

$\delta$  = det kallare vattnets densitet och



Figur 9. Sektion genom värmemagasin. Endast den nedre infiltrations- och uttagsbrunnen är markerad

$\Delta\delta$  = skillnaden mellan densiteterna för det kallare (40<sup>o</sup>) vattnet och det varmare (90<sup>o</sup>).

Vattnets densitet varierar med temperaturen enligt följande tabell:

Temp °C	$\delta$ kg/m <sup>3</sup>
0	999.87
4	1000.0
10	999.73
20	998.2
40	992.2
60	983.2
80	971.8
100	958.4

För temperaturfrontens form gäller då ekvationen

$$h^2 = h_0^2 - \frac{Q}{\pi \cdot k^1} \cdot \left[ \ln \frac{r_0}{r} - \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{r^2}{r_0^2} \right) \right]$$

(ekv 8)

Härvid har antagits att  $r_b \ll r_o$  så att vattenhastigheten vid temperaturfronten kan skrivas

$$v = \frac{Q}{\pi r_o^2}$$

Ovanstående ekvationer gäller även för ett varmt vattenskiakt som strömmar mot en brunn och som ligger ovanpå ett i det närmaste stillastående skikt med kallare vatten.  $\delta$  är då det varma vattnets densitet.

### Exempel

Vattenhastigheten vid temperaturfronten antages vara  $2 \cdot 10^{-6}$  m/s. Vidare antages att  $r_o = 10$  m,  $r_b = 0.1$  m,  $h_b = 0.3$  m och  $h_o = 1.1$  m.  $Q = v \cdot \pi r_o^2 = 0.63$  l/s.

Enligt ekv (8) kan för ovan angivna värden  $k^1$  beräknas till  $7.3 \cdot 10^{-4}$  m/s.

Om det kalla vattnets temperatur är  $+40^\circ\text{C}$  och det varma  $+90^\circ\text{C}$  fås  $\delta = 992.2$  och  $\Delta\delta = 26.9$ .

Enligt ekv (7) blir då

$$k_{40^\circ\text{C}} = k^1 \cdot \frac{\delta}{\Delta\delta} = 7.3 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{992.2}{26.9} = 2.7 \cdot 10^{-2}$$

Enligt ekv (7) kan nu  $k_{40^\circ}$  omräknas till  $k_{10^\circ}$  enligt

$$k_{10^\circ} = \frac{k_{40^\circ}}{1.99} = \frac{2.7 \cdot 10^{-2}}{1.99} = 1.4 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$$

Detta k-värde svarar slutligen mot ett jordmaterial med

$$d_{10} = \sqrt{\frac{1.4 \cdot 10^{-2}}{5 \cdot 10^3}} = 1.65 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 1.65 \text{ mm}$$

Ovanstående räkneexempel visar således att för ett värmemagasin utan fördelningslager erfordras att fyllnadsmaterialets permeabilitet är ungefär tre tiopotenser större än den minsta permeabilitet som kan accepteras vid magasin med fördelningslager. Jfr pkt 3.2.

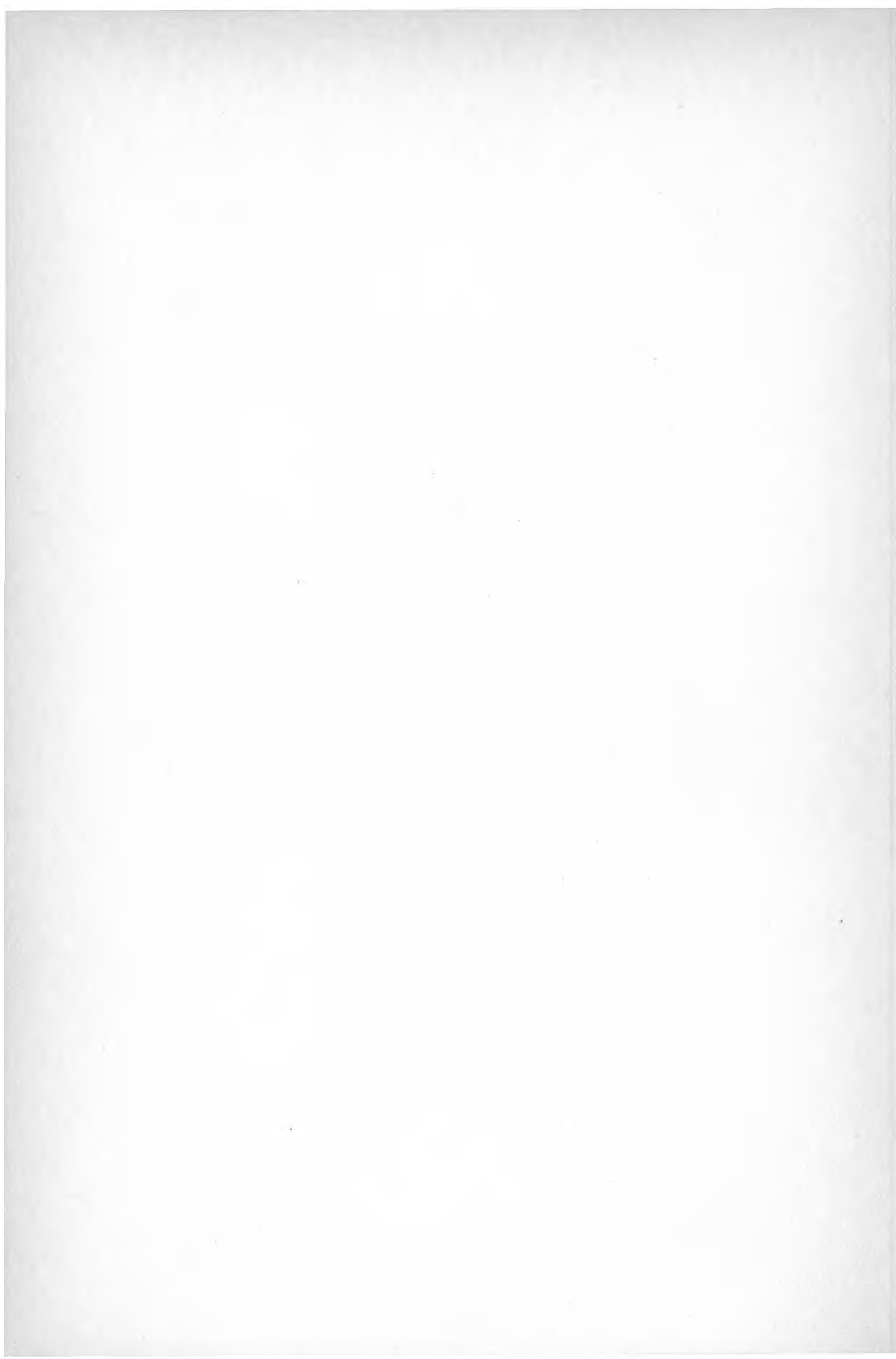
### 3.4 Installationer

Värmemagasinet förutsättes i denna studie fungera som ett slutet system. Värme tas från magasinet via värmeväxlare. Laddningsvärme från solfångare eller spillvärmekälla tillföres magasinet antingen direkt eller via separat värmeväxlarkrets.

Uttagsanordningar i form av t ex slitsrör måste utformas och placeras så att fullständig vattentillförsel säkras även vid maximala uttag. Jfr pkt 3.2 och 3.3. Om möjligt bör pumpen placeras så lågt att den alltid antingen står under tryck alternativt att sughöjden minimeras. De yttre installationerna kan därför lämpligen placeras i ett apparathus beläget intill magasinet och helt eller delvis nedsänkt i marken.

Med undantag för styr- och reglerutrustningen torde i övrigt de yttre installationerna vara desamma som erfordras vid lagring i t ex stålcisterner.

Fördelningslagrens tjocklek respektive höjden hos brunnarnas slitspartier reducerar den aktiva magasinvolymen eftersom "temperaturfronten" p g a blandning av kallt och varmt vatten ej kan tillåtas komma alltför nära magasinets övre resp. undre uttagsnivå.





#### 4.1 Allmänt

Vid värmelagring i ett hålrums- eller slutet grundvattenmagasin uppstår insvängningsförluster, stationära förluster samt temperaturförluster.

Insvängningsförlusterna motsvarar den energimängd som åtgår för att i initialskedet höja omgivande marklagers temperatur till stationär medelnivå, dels höja magasinets temperatur till lägsta arbetstemperatur.

De stationära värmeförlusterna motsvarar värmeflödet ut från magasinet och bestäms bl a av de temperaturer som råder under en årscykel längs magasinets begränsningsytor mot omgivande jord. För varje del av magasinets yta gäller ett visst pulserande temperaturförlopp under året. Detta motsvarar en medeltemperatur på vilken det är överlagrat en periodisk variation under året. Den periodiska temperatursvängningen ger ett pulserande in- och utflöde av värme. Nettoutflödet från denna periodiska variation är noll. Den stationära värmeförlusten, eller den i fortvarighets-tillståndet årliga totala värmeledningsförlusten, ut från magasinet bestäms därför av årsmedeltemperaturerna vid markytan respektive magasinets begränsningsytor och omgivning.

Temperaturförluster sker, förutom i samband med värmeledning från magasinet, genom intern värmeledning inom magasinet. Denna temperaturutjämnning inom magasinet ger en kvalitetsförsämring, temperaturförlust, trots att inga egentliga värmeförluster uppstått.

Värmeförluster på grund av nederbörd har i rapporten förutsatts kunna undvikas genom att magasinets överyta, eller dess isolering, alltid är försedd med vattenavvisande täckning.

#### 4.2 Verkningsgrad

Nedan återgivna diagram och beräkningsresultat är hämtade från "Heat losses and temperature fields for heat storage aquifers. A computational model with a simplified linear water flow", Johan Claesson och Göran Hellström. (6)

Värmeförlustens storlek från ett magasin kan t ex åskådliggöras genom att betrakta magasinets verkningsgrad  $\eta_R$ . Vid en sådan betraktelse ställs värmeförlusten i relation till magasinets totala, utnyttjningsbara, lagringskapacitet.

$$\eta_R = \frac{E_{ut}}{E_{in}}$$

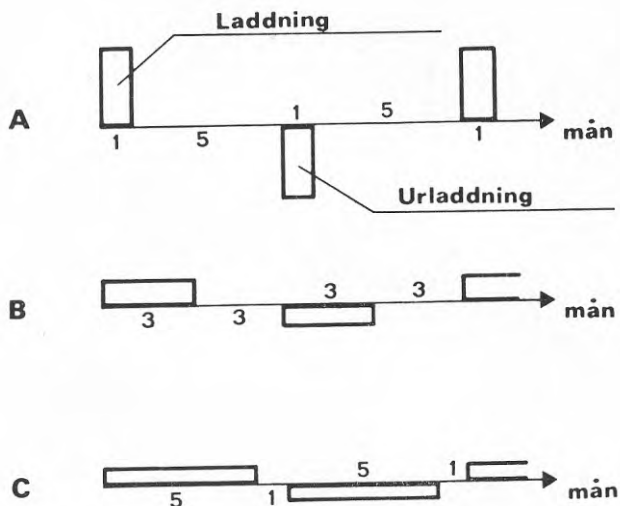
$E_{ut}$  är den energi, som relaterad till en lägsta användbar referenstemperatur, kan utvinnas ur magasinet under urladdningsperioden. Om temperaturen på det uttagna vattnet understiger referenstemperaturen är således energiuttaget lika med noll.

Laddningsenergin är på motsvarande sätt beräknad på differensen mellan aktuell laddningstemperatur och referenstemperatur.

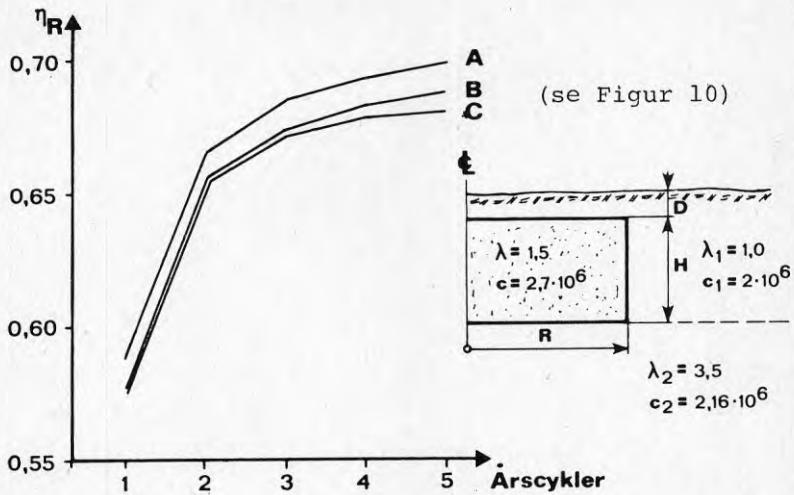
För att belysa inverkan av olika magasinparametrar har verkningsgraden  $\eta_R$  beräknats för de fem första, årslånga lagringscyklerna. Härvid har antagits att magasinet laddas med vatten av  $+90^\circ\text{C}$  som vid urladdning kyls till  $+40^\circ\text{C}$  (referenstemperatur) och återförs till magasinet. Magasinet har i samtliga fall antagits ha formen av en vertikal, rät cylinder med radien  $R$ , höjden  $H$  och belägen på djupet  $D$  under markytan. Som framgår bl a av Figur 11 har stationärt tillstånd praktiskt taget uppnåtts efter 5 lagringscykler.

#### 4.2.1 Verkningsgradens beroende av laddnings- och urladdningsförloppen

För att undersöka värmeförlusternas och därmed verkningsgradens beroende av laddnings- och urladdningsförloppen har beräkningar genomförts för följande i Figur 10 angivna årscyklar.



Figur 10. Alternativa årscyklar för laddning och urladdning



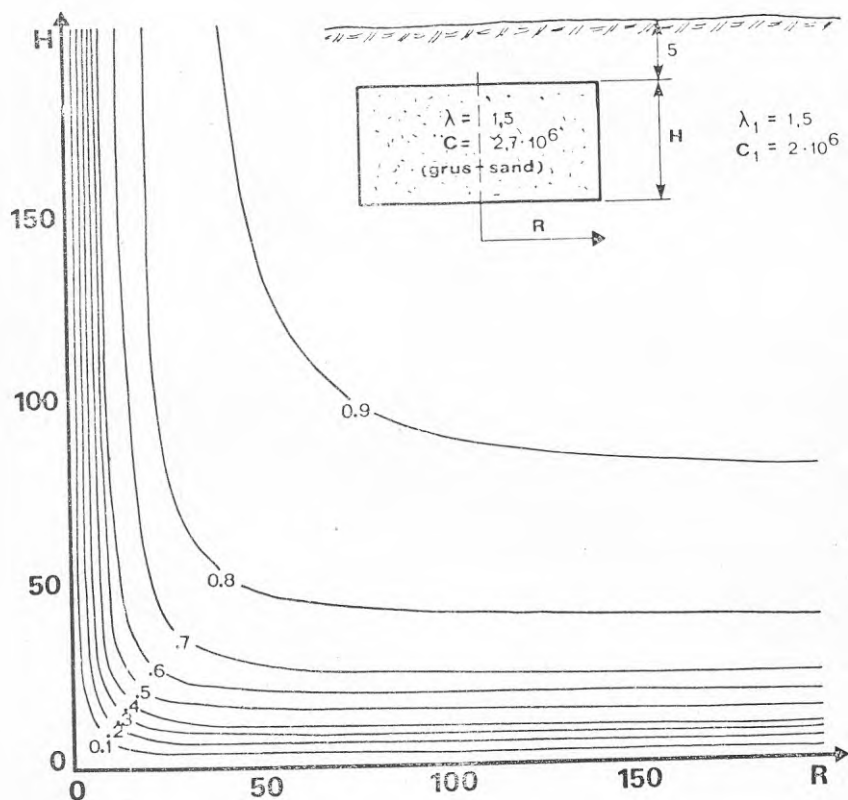
Figur 11. Verkningsgradens beroende av laddnings- och urladdningsförloppen

I ovanstående diagram har magasinet förutsatts bestå av en vattenfylld sand-grugblandning med värmeledningstalet  $\lambda = 1.5 \text{ J/m, s, }^\circ\text{C}$  och värmekapaciteten  $c = 2.7 \cdot 10^6 \text{ J/m}^2, ^\circ\text{C}$ . Magasinet vilar på berg med  $\lambda_2 = 3.5$  och  $c_2 = 2.16 \cdot 10^6$  och är i övrigt omgivet av torr morän med  $\lambda_1 = 1.0$  och  $c_1 = 2 \cdot 10^6$ . (Jämför pkt 4.2.4.)

Som framgår av diagrammet i Figur 11 är verkningsgradens beroende av laddnings- och urladdningsperiodernas längd relativt liten. I de följande diagrammen har antagits att laddning och urladdning sker enligt alternativ B, dvs magasinet laddas under tre månader, vilar orört i tre månader, urladdas under de därpå följande tre månaderna och vilar sedan åter i tre månader innan laddning ånyo påbörjas.

#### 4.2.2 Verkningsgradens beroende av magasinet form och storlek

För att överskådligt belysa verkningsgraden som funktion av magasinet höjd  $H$  och radie  $R$  har  $\eta_R$  beräknats från grunddata enligt Figur 12.



Figur 12. Verkningsgraden som funktion av magasinet höjd och radie. Diagrammet hänför sig till 5:e lagringscykeln. (Diagrammet bör ej användas då  $H$  och  $R$  är mindre än 5 m.)

Magasinet förutsätts vara helt omgivet av morän och placerat så att ett täckande jordlager på 5 m erhålles.

Det är intressant att notera att för t ex en magasins-höjd  $H = 30$  m ökas verkningsgraden snabbt med växande radie från noll till  $R = 20$  m. En ytterligare ökning av radien medför därefter endast en svag förbättring av verkningsgraden. Med hjälp av Figur 12 kan konstateras att t ex ett magasin med höjden  $H = 20$  och radie = 100 m har en verkningsgrad  $\eta_R = 0.65$ . Om motsvarande

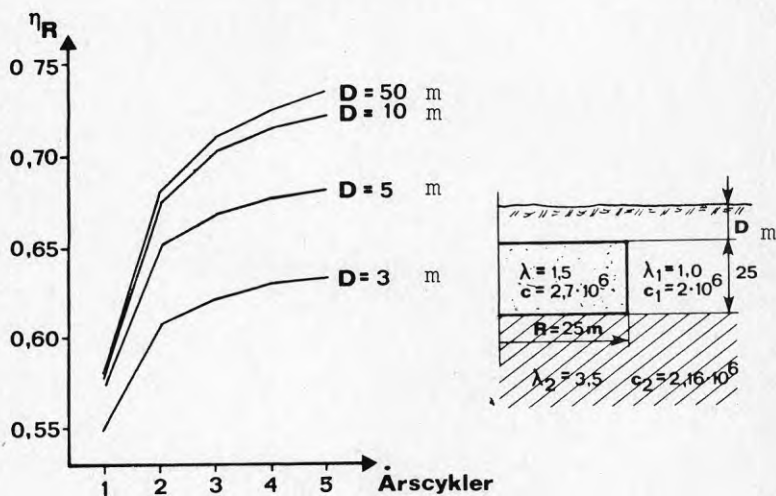
magasinsvolym i stället uppdelas på två lika höga magasin,  $H = 20$  m och  $R = 70$  m, förblir verkningsgraden praktiskt taget densamma,  $\eta_R = 0.65$ . Konstanterandet kan vara av intresse i samband med val mellan ett eller flera magasin.

Ur Figur 12 kan även utläsas att för en given magasinsvolym fås maximal verkningsgrad då höjden  $H$  är ungefär  $1.5 \times R$ . Förhållandet blir större vid mindre jordtäckning än den i figuren förutsatta (5 m), eftersom magasinet då bör ges mindre avledningsyta direkt mot markytan.

Diagrammet i Figur 12 påvisar även nödvändigheten av att använda stora lagringsvolym, i varje fall då dessa ej är försedda med särskild värmeisolering.

#### 4.2.3 Verkningsgradens beroende av tjockleken hos täckande jordlager

När det täckande jordlagret är tunnt, ca 5 m, är värmeförlusterna från magasinet i stort sett omvänt proportionella mot jordlagrets tjocklek. Vid tjocklekar över 10 m avtager snabbt jordtäckningens verkningsgradshöjande inverkan. Se Figur 13.

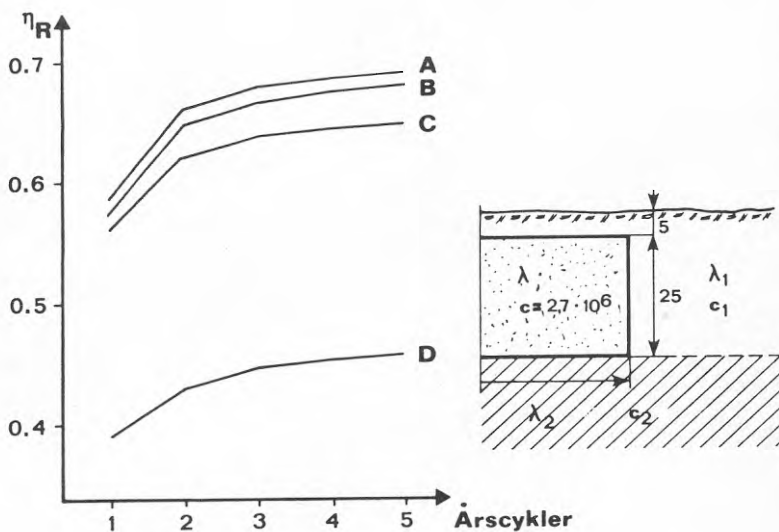


Figur 13. Verkningsgraden som funktion av tjockleken hos täckande jordlager

#### 4.2.4 Verkningsgradens beroende av omgivande marks termiska egenskaper

Verkningsgraden  $\eta_R$  har beräknats för fyra olika fall A, B, C och D. Se figur 14.

- A. Magasinet är helt omgivet av morän. Moränen antages vattenmättad under magasinets bottennivå och har då värmeledningstalet  $\lambda_2 = 1.5 \text{ J/m s } ^\circ\text{C}$  och värmekapaciteten  $c_2 = 2.00 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$ . I övrigt är den omgivande moränen torrmed  $\lambda_1 = 1.0$  och  $c_1 = 2.00 \cdot 10^6$ .



Fall	$\lambda$	$\lambda_1$	$c_1$	$\lambda_2$	$c_2$
A	1,5	1,0	$2,00 \cdot 10^6$	1,5	$2,00 \cdot 10^6$
B	1,5	1,0	$2,00 \cdot 10^6$	3,5	$2,16 \cdot 10^6$
C	1,0	1,5	$2,00 \cdot 10^6$	3,5	$2,16 \cdot 10^6$
D	1,5	3,5	$2,16 \cdot 10^6$	3,5	$2,16 \cdot 10^6$

Figur 14. Verkningsgraden beroende av omgivande marks termiska egenskaper.  $H = 25 \text{ m}$ ,  $D = 5 \text{ m}$ ,  $R = 25 \text{ m}$



- B. Magasinet vilar på granitisk berggrund med  $\lambda_2 = 3.5$  och  $c_2 = 2.16 \cdot 10^6$  och är i övrigt helt omgivet av torr morän.
- C. Lika som B men omgivet av vattenmättad morän med  $\lambda_1 = 1.5$  och  $c_1 = 2 \cdot 10^6$ .
- D. Magasinet är helt omgivet av granit.

Av diagrammet, Figur 14, framgår att en placering av ett värmelager på berg men i övrigt omgivet av morän är i det närmaste likvärdig med en placering helt i morän.

En placering helt i granit är klart ofördelaktig ur verkningsgradssynpunkt. Bl a beroende på höga anläggningskostnader torde dock en sådan placering ej vara aktuell för ett hålrumsmagasin.

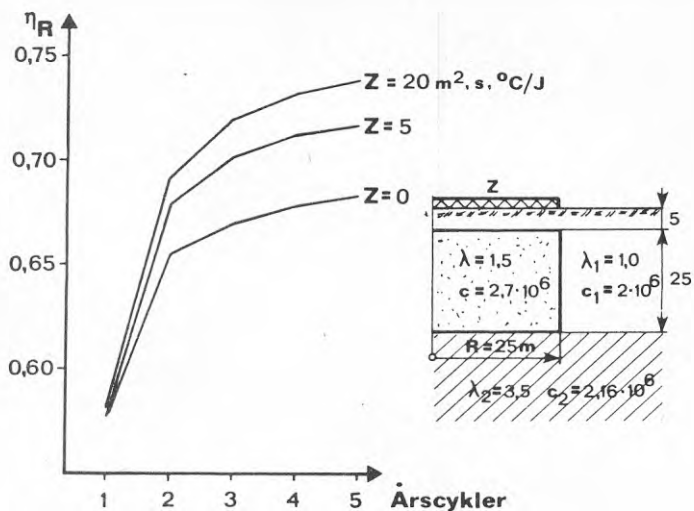
#### 4.2.5 Verkningsgradens beroende av inlagd isolering

Ett alltför tunnt täckande markskikt inverkar starkt negativt på verkningsgraden. Jfr Figur 13. I det fall magasinet dessutom har en liten höjd  $H$  torde ett utförande med inlagd värmeisolering vara nödvändig. Det bör observeras att just kombinationen liten täckning och liten magasinshöjd, av praktiska skäl, med hänsyn till t ex bergytans läge, kan förutses utgöra en begränsande förutsättning vid hålrumsmagasin.

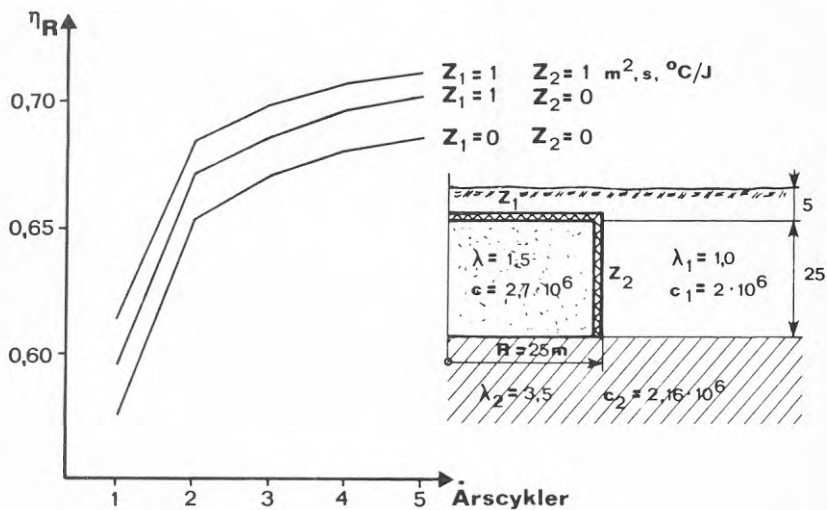
Ett näraliggande sätt att värmeisolera består i att täcka markytan ovanför magasinet med lämpligt material. Inverkan härav framgår av Figur 15. I figuren inlagda isoleringsvärden  $Z = 5$  respektive  $20 \text{ m}^2 \text{ s} \cdot \frac{^\circ\text{C}}{\text{J}}$ , svarar mot 0.2 respektive 0.8 m mineralull eller cellplast.

Magasinet kan även värmeisoleras direkt vid sina begränsningsytor. Speciellt vid mindre magasin torde isolering vara nödvändig även vid de vertikala begränsningsytorna.

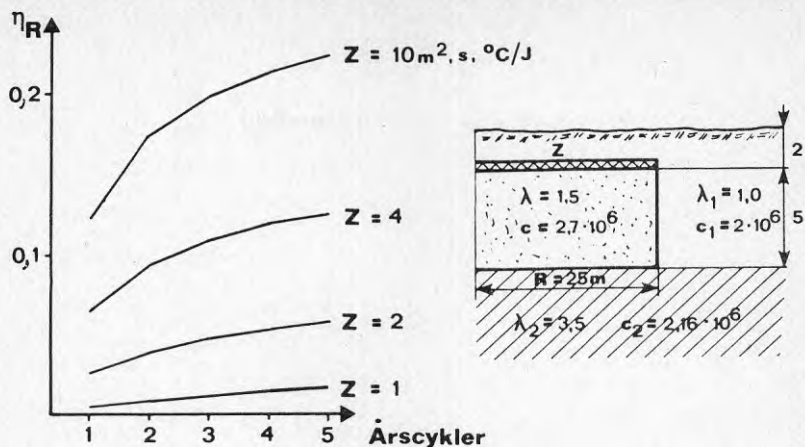
Sambanden mellan verkningsgrad och isolering vid värmemagasin med varierande höjd och marktäckning framgår av Fig 16-20.



Figur 15. Verkningsgraden beroende av isolering vid markytan.  $H = 25 \text{ m}$ ,  $R = 25 \text{ m}$ ,  $D = 5 \text{ m}$



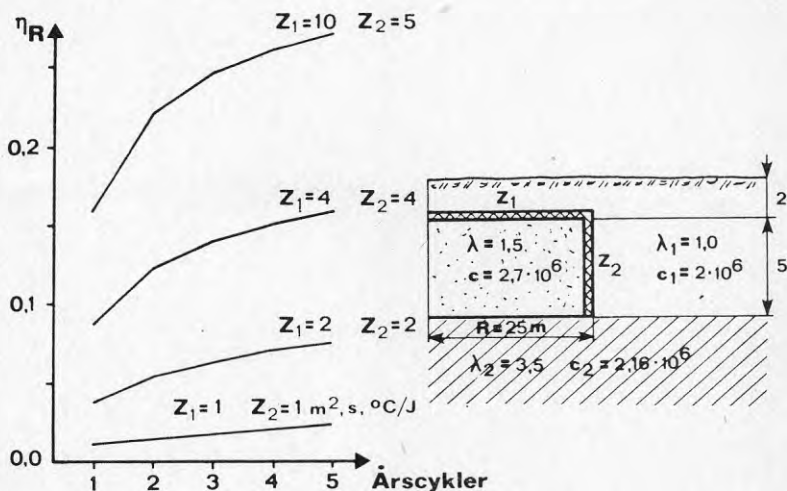
Figur 16. Verkningsgraden beroende av inlagd isolering.  $H = 25 \text{ m}$ ,  $R = 25 \text{ m}$ ,  $D = 5 \text{ m}$



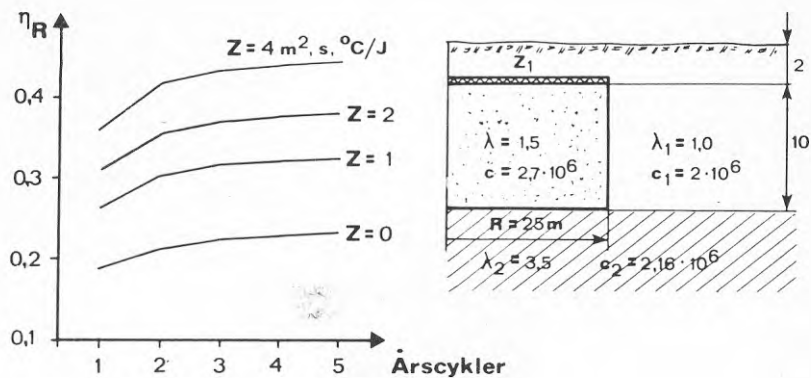
Figur 17. Verkningsgraden beroende av vid överytan inlagd isolering.  $H = 5$  m,  $R = 25$  m,  $D = 2$  m

Ett oisolerat värmemagasin med radien 25 m, höjden 5 m och täckande marklager på 2 m har enligt Figur 17 verkningsgraden noll. Även med en isolering av överytan motsvarande 0.4 m mineralull begränsas verkningsgraden till ungefär 22%.

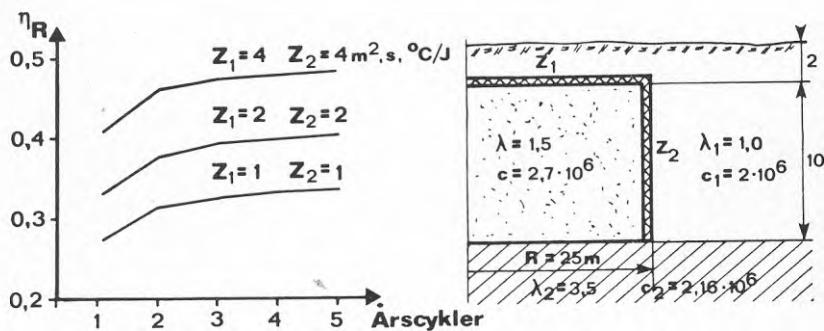
En jämförelse med Figur 18 visar att en sidoväggsisolering motsvarande 0.2 m mineralull endast ökar den ovan nämnda verkningsgraden från 0.22 till 0.27. Magasinets extremt ogynnsamma form accentueras i detta fall dessutom av det täckande marklagrets ringa tjocklek.



Figur 18. Verkningsgraden beroende av isolering vid överyta och sidoväggar.  $H = 5$  m,  $R = 25$  m,  $D = 2$  m



Figur 19. Verkningsgradens beroende av vid överytan inlagd isolering.  $H = 10 \text{ m}$ ,  $R = 25 \text{ m}$ ,  $D = 2 \text{ m}$



Figur 20. Verkningsgradens beroende av isolering vid överyta och sidoväggar.  $H = 10 \text{ m}$ ,  $R = 25 \text{ m}$ ,  $D = 2 \text{ m}$

#### 4.2.6 Verkningsgradens beroende av magasinets arbetstemperaturer

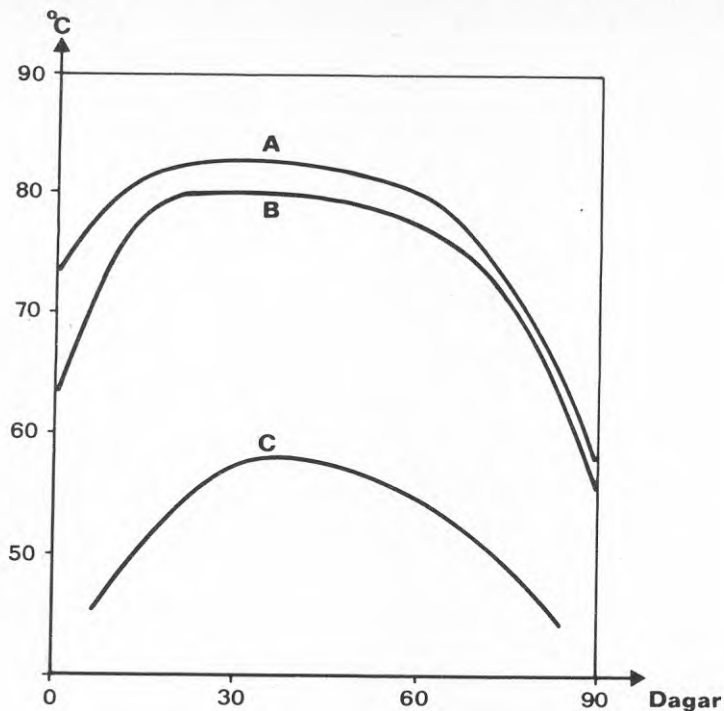
I pkt 4.2.1 - 4.2.5 redovisade verkningsgrader är beräknade utgående från att magasinet arbetar mellan  $+90^{\circ}\text{C}$  och  $+40^{\circ}\text{C}$ . Om dessa temperaturgränser sänks kommer verkningsgraden att öka eftersom värmeförlusten mot omgivningen minskar vid lägre magasinstemperaturer.

I ovan angivna exempel kan magasinet sägas ha en medeltemperatur under året på ca  $+65^{\circ}\text{C}$ . Omgivande marks medeltemperatur uppgår till ca  $+5^{\circ}\text{C}$ . Medeltemperaturdifferensen som ger värmeförlusten är således ca  $60^{\circ}\text{C}$ . Om i stället magasinet arbetar mellan  $+60^{\circ}\text{C}$  och  $+10^{\circ}\text{C}$  får magasinet en medeltemperatur på ca  $35^{\circ}\text{C}$  och således en förlustbestämmande temperaturdifferens mot omgivningen på endast  $30^{\circ}\text{C}$ . Jämfört med det högre arbetstemperaturfallet blir värmeförlusten endast ca hälften.

För att kunna utnyttja magasinet ned till en så låg temperatur som t ex  $+10^{\circ}\text{C}$  krävs användning av värmepump. Huruvida kostnaderna härför uppvägs av besparingen på grund av de minskade värmeförlusterna har ej behandlats i denna förstudie.

#### 4.3 Uttagstemperaturer

Uttagstemperaturen som funktion av tiden har beräknats för två oisolerade magasin, ett med höjden 25 m och ett med höjden 10 m. Laddnings- och urladdningsperioderna har i båda fallen varit desamma som tidigare använts vid beräkningarna, dvs 3 månaders laddning - 3 månaders vila - 3 månaders urladdning, etc. Laddning har antagits ske med vatten av  $+90^{\circ}\text{C}$ . Se Figur 21.



Figur 21. Uttagstemperaturen under 5:e lagringscykeln vid olika magasin.

A: H = 25 m, R = 25 m, D = 5 m, isolerat på översidan motsvarande 20 m<sup>2</sup>, s, °C/J (0.8 m mineralull)

B: H = 25 m, R = 25 m, D = 5 m, oisolerat

C: H = 10 m, R = 25 m, D = 5 m, oisolerat



### 5.1 Allmänt

Med avseende på de geologiska förutsättningarna kan hålrumsmagasinen utföras antingen som naturligt täta magasin eller som magasin med tätningsslager. Beroende på dimensionen, förläggningsdjup etc kan även konstgjorda värmeisolerande lager krävas.

### 5.2 Magasin i naturliga, vattentäta lager

Naturligt täta magasin dvs utan tätskikt kan under gynnsamma betingelser tänkas utföras i t ex berg, lös lera eller moränlera.

#### 5.2.1 Magasin i berg

Erforderlig magasinvolym åstadkommes med hjälp av försiktig sprängning. Bergmaterialet kan krossas till lämplig fraktion, t ex 8 - 32 mm, och användas som fyllnadsmaterial i magasinet.

Beroende på grundvattenytans läge kan magasinet täthetsprovas genom uppfyllnad eller urpumpning av vatten.

Som framgår av Figur 14 är dock magasin i berg mindre lämpliga än magasin i jord på grund av stora värmeförluster förorsakade av bergets höga värmeledningstal.

#### 5.2.2 Magasin i lera

Magasin i lös lera har goda förutsättningar att bli täta utan speciella åtgärder. Mäktiga lager av lös lera finns huvudsakligen i södra och mellersta Sverige. I Norrland förekommande mjälajordarterna kan även tänkas vara användbara i detta sammanhang.

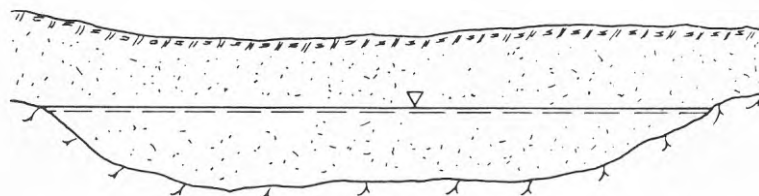
Geotekniska problem avseende stabilitet, sättningar, termisk påverkan på leran, hydrauliska grundbrott, etc måste ägnas stor uppmärksamhet vid utförande av magasin i lösa lerjordar.



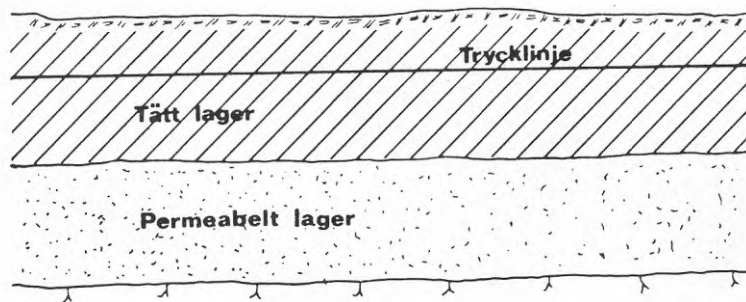
Figur 22. Hålrumsmagasin i lera. Principskiss

### 5.2.3 Naturliga grundvattenmagasin

De naturliga grundvattenmagasinen erbjuder i vissa fall möjligheter till värmelagring utan att särskilda tätningslager utföres. Såväl öppna som slutna grundvattenmagasin kan användas.



Figur 23. Öppet grundvattenmagasin



Figur 24. Slutet grundvattenmagasin

Grundvattenmagasinens användning som värmelager finns närmare belyst i AIB's utredning "Värmelagring i naturliga grundvattenmagasin". (1)

## 5.3 Magasin med vatten- och värmeisolerande lager

### 5.3.1 Typval

Utformningen av ett hålrumsmagasin bestäms i första hand av markförhållandena, såsom t ex djupet till fast berg, grundvattenstånd etc. I det följande redovisas översiktligt tre typmagasin,

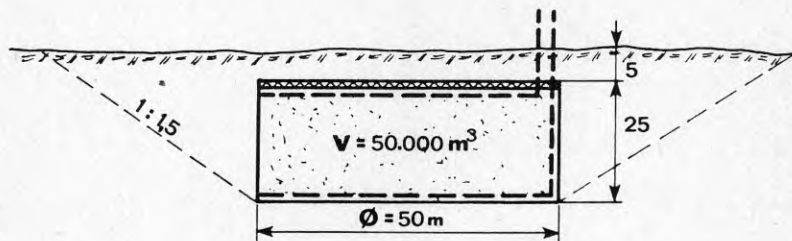
- helt nedschaktat alt. placerat i naturlig sänka

- nedschaktat - invallat
- avskärmat sand - eller grusskikt på tätt underlag.

De tre valda magasinstyperna torde tillsammans omfatta flertalet av de problemställningar som kan tänkas föreligga vid projektering och utförande av ett hålrumsmagasin.

### 5.3.2 Nedschaktat magasin

I mark med stort djup till berg kan ett hålrumsmagasin utformas enligt Figur 25. Utschaktat material kan i gynnsamma fall användas som magasinbefyllning. Jfr pkt 3.2. Sortering kommer normalt att erfordras för att undvika inhomogena eller täta partier.

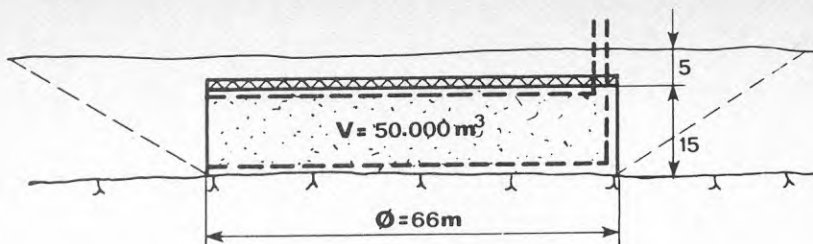


Figur 25. Hålrumsmagasin i gruslager vid stort djup till berg. Principskiss

Efter utschaktning och bottenavjämning läggs det vattentäta membranet ut på botten och hålls upp i vertikalläge vid den blivande sidobegränsningen. Återfyllning sker sedan samtidigt innanför och utanför det vertikala membranet som successivt rullas ut uppåt.

Vid begränsat djup till fast berg måste magasinet ges en plattare utformning, Figur 26.

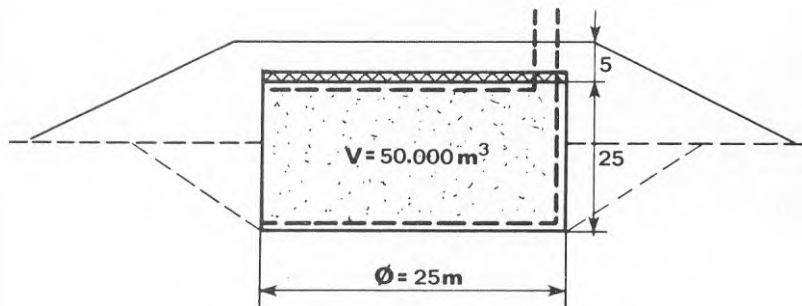
Ett magasin med utformning enligt Figur 26 har lägre verkningsgrad, storleksordningen 10%, än vid en utformning enligt Figur 25. Orsaken härtill är främst den större avkylningsytan uppåt, men även bergets högre värmeledningsförmåga jämfört med t ex morän, grus eller sand.



Figur 26. Hålrumsmagasin vid begränsat djup till berg. Principskiss

### 5.3.3 Nedschaktat - invallat magasin

Magasin av denna typ kan bli aktuell dels då djupet till fast berg är litet, dels då utschaktat material ej lämpar sig som återfyllning i magasinet eller då arbeten under grundvattenytan vill undvikas.



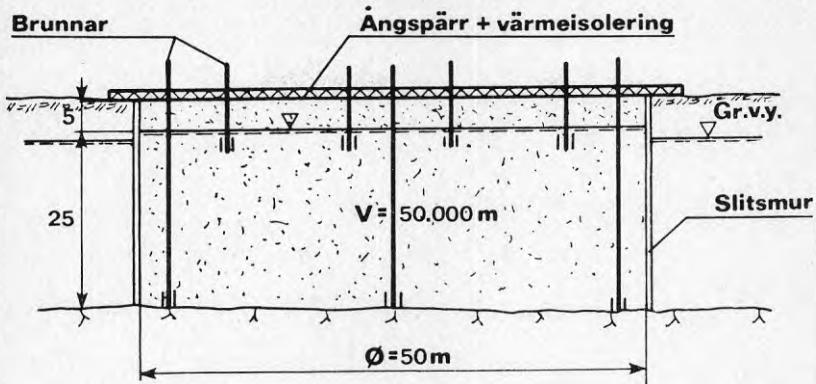
Figur 27. Nedschaktat - invallat magasin. Principskiss

Schakt- och invallningsdjup optimeras med hänsyn till byggnadskostnader och värmeförluster.

### 5.3.4 Magasin i avskärmat grus - sandskikt

Då lera eller tätt berg överlagras av lämpliga friktionsjordar kan magasinet åstadkommas utan utgrävning och återfyllning. Saknas naturliga sidobegränsningar helt eller delvis kan dessa utföras som slitsmurar med bentonit, tät spont etc.

Vid denna typ av magasin måste de undre in- och uttagsanordningarna utföras i form av brunnar. Brunnarnas placering är beroende av jordmaterialets permeabilitet. Jfr pkt 3.3. Även de övre in- och uttagsanordningarna kan utföras i form av brunnar. Alternativt



Figur 28. Hålrumsmagasin i gruslager på tät botten. Sidobegränsningar utförda in situ. Principskiss

görs en schakt ned till magasinets överyta, varefter fördelningsrör och/eller fördelningslager kan läggas in. Samtidigt kan magasinets överyta förses med såväl tätskikt som värmeisolering.

#### 5.4 Värmeisolering

Magasinet kan värmeisoleras med ett flertal material såsom t ex markskiva av mineralull, cellplast, lergranulat, slagg etc. Gemensamt för ovan nämnda isolermaterial är att de måste hållas torra för att ha god isoleringseffekt. Dessa material kan därför endast användas över den naturliga grundvattenytan.

Vid isolering på lägre nivå, t ex av magasinets väggar, måste dränering utföras. Dräneringen måste vidmakthållas genom pumpning, vilket, förutom relativt dyrbara arrangemang, även medför ökade driftkostnader. Dräneringen medför dessutom större läckagerisk på grund av den ökade tryckskillnaden mellan magasinet och omgivningen jämfört med t ex ett jämviktsläge då grundvattenytan står i nivå med magasinets överyta.

Andra material, som t ex skumglas, är täta och deras isolerförmåga således oberoende av om isoleringen ligger under eller över grundvattenytan.



## 5.5 Vattenisolering

### 5.5.1 Folier

Vattenisoleringen kan enklast anordnas genom inläggning av en folie eller membran som svetsas eller klistras i fogarna.

En översiktlig marknadsstudie har visat att det för dagen ej finns lämpliga material som stoppar för långtidsanvändning vid temperaturer över  $+70^{\circ}\text{C}$ .

Vid högre temperaturer begränsas foliernas livslängd av s k termooxidativ nedbrytning, dvs folien angrips av luftsyre. Syreangreppet sker snabbare ju högre temperaturen är.

En butylgummiduk kan konstateras ha en livslängd av 8 å 10 år vid varierande drifttemperaturer mellan  $+40^{\circ}\text{C}$  och  $+70^{\circ}\text{C}$ .

Långtidsprovning av ett flertal olika folier pågår i Studsvik med stöd från Nämnden för Energiproduktionsforskning.

### 5.5.2 Bentonitskärm

Vattenisoleringen kan även utföras med hjälp av bentonit. En 15% inblandning av natriumbentonit i sand ger på grund av bentonitens svällning en vattengenomsläpplighet av storleksordningen  $k = 10^{-11}$  m/s, dvs ca 100 000 gånger tätare än den ursprungliga sanden. Sand-bentonitblandningen påverkas ej av de temperaturer som kan komma i fråga vid denna typ av lagring.

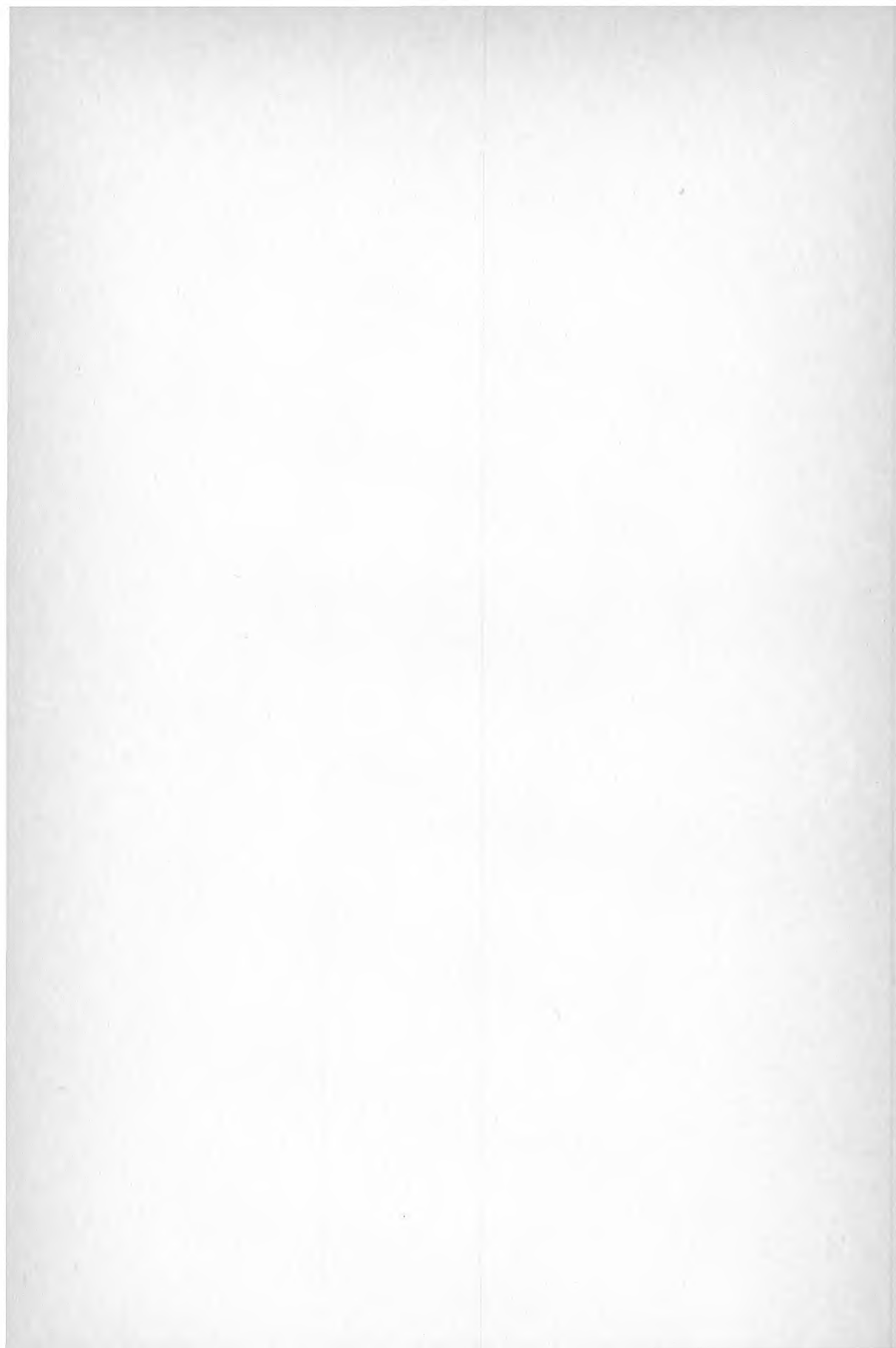
Bentonitens svällningsförmåga är reversibel, dvs bentoniten kan torka och åter ta upp vatten utan att dess svällningsförmåga ändras.

Om ett magasin med höjden 25 m och  $R = 25$  m ( $50\,000\text{ m}^3$ ) tänks avgränsat av en 0.5 m tjock botten och vägg av sand-bentonit kan det årliga läckaget teoretiskt beräknas uppgå till ca  $70\text{ m}^3$ , dvs 0.1% av magasinets volymen. Härvid har grundvattenytan antagits ligga i nivå med magasinets botten. I den mån magasinet utföres odränerat och grundvattnet utövar ett mottryck blir läckaget ytterligare reducerat.

En korrekt sand-bentonitblandning kan utan större svårigheter appliceras på ett utgrävt magasinets bottenyta. Svårigheterna ökar då magasinets väggar skall utföras. Arbetsförfarandet måste vara sådant att sand-bentonitväggen blir jämntjock och sammanhängande, samtidigt som fyllnadsmaterial inom och utanför magasinet måste anbringas och packas så att sidoförskjutning eller materialinträngning ej uppstår. Möjligen kan en dubbel ringform användas. Vid fyllningen lyfts formen kontinuerligt som vid glidformgjutning.



Då magasinet åstadkommes utan utgrävning och återfyllning kan sidoavgränsningarna utföras som slitsmurar med bentonit. En förutsättning är då naturligtvis att magasinets botten utgörs av täta marklager.



### 6.1 Allmänt

Den totala anläggnings- och driftkostnad som kan accepteras för ett värmelager är helt beroende av i vilket system värmelagret ingår samt på vilket sätt lagret utnyttjas, främst med avseende på antalet laddningscykler per år. Beräkningar måste genomföras från fall till fall.

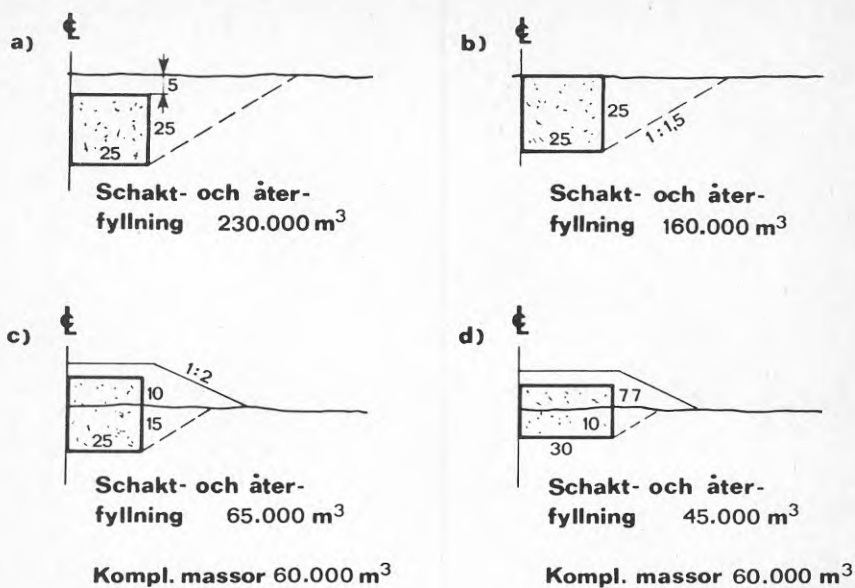
Vid t ex fullständig solvärmeförsörjning, dvs ett system helt utan panncentral eller annan reservvärmekälla, är värmelagring en absolut nödvändighet. En högsta acceptabel kostnad kan då ej beräknas på vanligt sätt utan kostnaden bestäms i stället av konkurrenssituationen mellan olika lagringsmetoder. Vid kapacitiv lagring av värme innebär detta en kostnadsjämförelse mellan olika magasin typer såsom cisterner, bergrum, sjömagasin, gropmagasin etc.

### 6.2 Utschaktat och återfyllt magasin

För att medge en översiktlig optimering av schakt- och fyllnadsvolymer studeras ett magasin med volymen 50 000 m<sup>3</sup>. Magasinet har formen av en cylinder med radien 25 m och höjden 25 m. Figur 29. För att belysa inverkan på schakt- och fyllnadsvolymer vid ett mera utbredd magasin med samma volym har även ett fall med radien 30 m och höjden 17.7 m medtagits. Utschaktade massor har förutsatts kunna återanvändas som magasin-fyllnad.

En utformning och inplacering enligt fall d), Figur 29, medför minsta schakt- och fyllnadsarbete. Ett ännu mer utbredd magasin kan möjligen innebära ytterligare minskade schaktarbeten. Det skulle dock samtidigt medföra en än större avvikelse från den värmetekniskt optimala formen.

Följande kostnader har beräknats för ett magasin på 50 000 m<sup>3</sup>, i princip utformat enligt alternativ d) nedan. Magasinet antages försett med undre och övre vattenfördelningslager av grovt grus skilt från det övriga magasinet medelst fiberduk. På båda sidor runt tätmembranet har förutsatts ett 0.3 m tjockt sandlager som skydd mot mekanisk åverkan. Även mellan sandlagret och fördelningslager har fiberduk inlagts.



Figur 29. Schakt- och fyllnadsvolymer. Principskiss

Kostnadsnivå 1979 inkl mervärdesskatt.

		<u>kr</u>
Schakt och uppläggning	45 000 m <sup>3</sup> à 10:-	450
Bottenavjämning	3 000 m <sup>2</sup> à 3:-	10
Övre och undre fördelningslager. 2 x 1 m.	5 700 m <sup>3</sup> à 65:-	370
Fiberduk. 4 lager.	11 400 m <sup>2</sup> à 10:-	110
Tätmembran	9 000 m <sup>2</sup> à 80:-	720
Sandlager, 0.3 m runtom	5 400 m <sup>3</sup> à 60:-	320
Magasinsfyllning (återanvändning av schaktmassor)	43 000 m <sup>3</sup> à 20:-	860
Återfyllning och uppfyllning	22 000 m <sup>3</sup> à 10:-	220
Värmeisolering inkl vattenavledning	4 400 m <sup>2</sup> à 200:-	880
Markplanering		40
Pump-, värmväxlings- och rörinstallationer inkl reglerutrustning och apparatur		400

Initialuppvärmning av kringliggande mark	100
Projektering, markundersökning etc	400
Oförutsett	<u>500</u>
	5 380

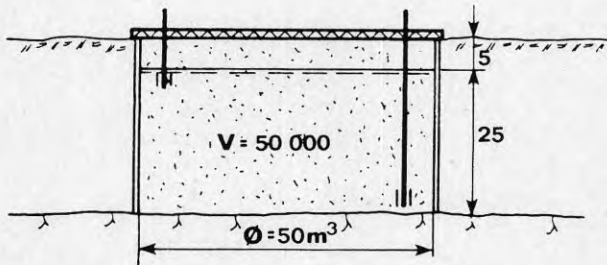
Magasinets anläggningskostnad kan således uppskattas till ca 5.4 Mkr eller kr 108:-/m<sup>3</sup>.

På motsvarande sätt har anläggningskostnaden för magasin på 25 000 m<sup>3</sup> och 100 000 m<sup>3</sup> beräknats till ca 180 kr/m<sup>3</sup> respektive 85 kr/m<sup>3</sup>.

Kostnadsbilden är beroende av ett stort antal faktorer, främst schaktmassornas duglighet som magasin-fyllning.

6.3 Magasin, avgränsat med slitsmurar

Ett cylindriskt magasin med volymen 50 000 m<sup>3</sup>, se Figur 30, har kostnadsberäknats enligt följande. Kostnadsnivå 1979 inkl mervärdesskatt.



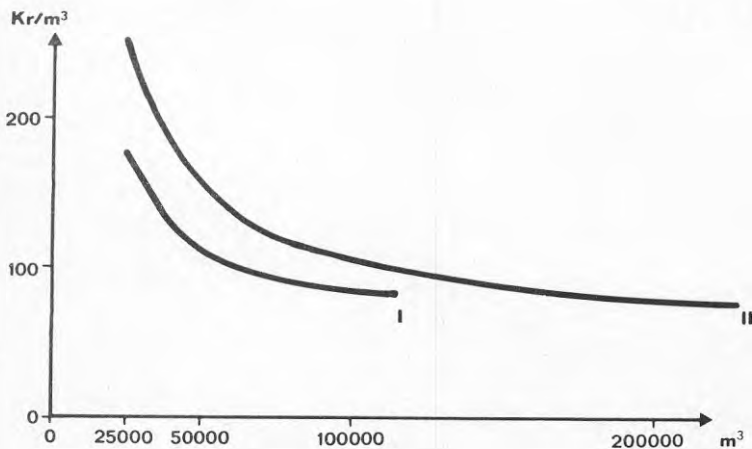
Figur 30. Magasin avgränsat med slitsmurar

		kkkr
Slitsmur (bentonit)	4 700 m <sup>2</sup> à 1 200:-	5640
Markplanering		50
Värmeisolering inkl vattenavledning	2 000 m <sup>2</sup> à 200:-	400
Brunnar, 10 st		200
Pump-, värmeväxlings- och rörinstallationer inkl reglerutrustning och apparatrum		400

Initialuppvärmning av kringliggande mark	100
Projektering, markundersökning etc	500
Oförutsett	<u>500</u>
	7790

Anläggningskostnaden för ett magasin av denna typ och med volymen 50 000 m<sup>3</sup> kan således uppskattas till ca 7.8 Mkr eller 155 kr/m<sup>3</sup>.

För magasin på 25 000 m<sup>3</sup>, 100 000 m<sup>3</sup> resp 200 000 m<sup>3</sup> har motsvarande kostnad beräknats till 250 kr/m<sup>3</sup>, 105 kr/m<sup>3</sup> resp 80 kr/m<sup>3</sup>.



Figur 31. Anläggningskostnad för hålrumsmagasin.  
 I Återfyllt magasin med tätfolie  
 II Naturligt magasin avskiljt med slitsmur (bentonit)

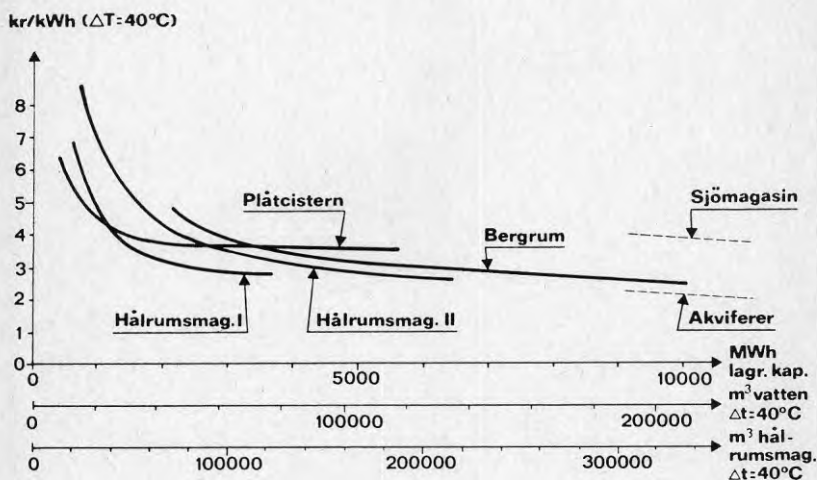
#### 6.4 Kostnadsjämförelse med andra kapacitiva lagringsmetoder

De under pkt 6.3 beräknade anläggningskostnaderna bör betraktas som relativt grova uppskattningar. Kostnadsbilden, Figur 31, kan starkt påverkas av såväl den lokala topografin som t ex av tillgängliga fyllnadsmassors lämplighet som magasinmaterial. Som framgår av Figur 31 tenderar det naturliga slitsmuravskiljda hålrumsmagasinet att vid stora volymer bli billigare än återfyllda, membraniserade magasin.



För att möjliggöra en direkt kostnadsjämförelse mellan olika lagringssystem har i Figur 32 anläggningskostnaden redovisats i kr/kWh lagringskapacitet (en cykel per år). I samtliga fall har den nyttiggjorda temperaturdifferensen antagits vara  $40^{\circ}\text{C}$ . Vidare har värmelagringsförmågan hos ett hålrumsmagasin antagits vara  $0.75 \text{ kWh/m}^3, ^{\circ}\text{C}$  och för vatten  $1.2 \text{ kWh/m}^3, ^{\circ}\text{C}$ .

Kostnaden för drift och underhåll samt värmeförluster har för de olika systemen antagits vara av samma storleksordning uttryckt som procent av anläggningskostnaden vid respektive volymstorlek. Diagrammet i Figur 32 avser därför endast anläggningskostnaden för respektive system.



Figur 32. Anläggningskostnader för olika kapacitiva lagringssystem. Utnyttjad temperaturdifferens  $40^{\circ}\text{C}$ . En lagringscykel per år

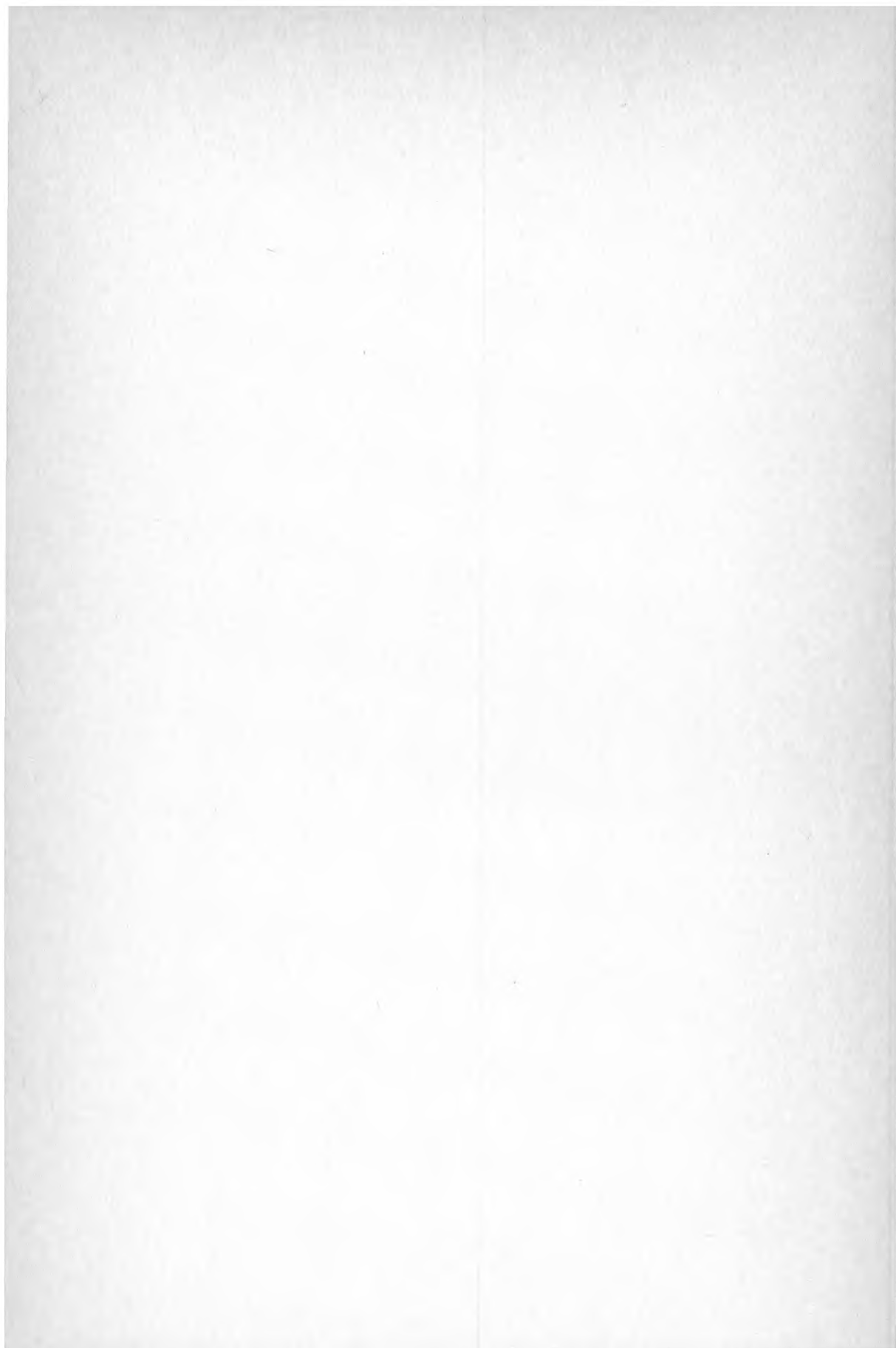
Som framgår av Figur 32 synes hålrumsmagasinen ekonomiskt intressanta jämfört med såväl bergrum som isolerade stålcisterner vid vattenvolymer större än ca  $50\,000 \text{ m}^3$ .

I diagrammet antydda kostnader för sjömagasin och akviferer är mycket osäkra. Båda systemen har sina ekonomiska optima vid avsevärt större lagringsvolymmer än vad diagrammet i Figur 32 omspannar.



## LITTERATURFÖRTECKNING

1. Värmelagring i naturliga grundvattenmagasin.  
Allmänna Ingenjörskyrån AB, 1978.
2. Dynamics of fluids in porous media.  
J. Beay, New York, 1972.
3. Drawdown due to pumping from an unconfined  
aquifer.  
R.E. Glover, M.W. Bittinger, Journal of the  
Irrigation and Drainage Division, ASCE,  
Sept 1960.
4. Ground water movement.  
R.E. Glover, United States Department of  
the Interior, Bureau of Reclamation,  
Washington, 1966.
5. Ground water hydrology.  
D.K. Todd, New York, 1967.
6. Heat losses and temperature fields for  
heat storage aquifers. A computational model  
with a simplified linear water flow.  
J. Claesson & G. Hellström, Lund Institute  
of Technology, 1978.



**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag  
780021-8 från Statens råd för byggnadsforskning  
till Allmänna Ingenjörbyrån AB, Stockholm.**

**R78: 1980**

**ISBN 91-540-3290-3**

**Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm**

**Art.nr: 6700178**

**Abonnemangsgrupp:  
W. Installationer**

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

**Cirkapris: 20 kr exkl moms**