



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.

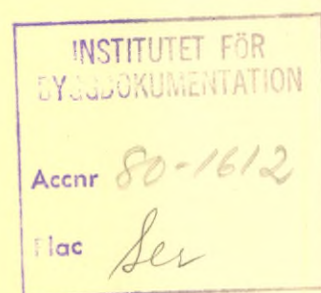
This work has been digitized at Gothenburg University Library and is free to use. All printed texts have been OCR-processed and converted to machine readable text. This means that you can search and copy text from the document. Some early printed books are hard to OCR-process correctly and the text may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



## Värmelagring i djupa slutna grundvattenmagasin

### Förstudie

Olof Andersson  
Gunnar Gustafson



K  
Gustafson

R101:1980

VÄRMELAGRING I DJUPA SLUTNA  
GRUNDVATTENMAGASIN

Förstudie

Olof Andersson  
Gunnar Gustafsson

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag  
790358-1 från Statens råd för byggnadsforskning  
till VIAK AB, Malmö.

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

R101:1980

ISBN 91-540-3310-1

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

LiberTryck Stockholm 1980 955228

## INNEHÅLL

FÖRORD .....	5	
SAMMANFATTNING .....	6	
BETECKNINGAR .....	11	
1	PROJEKTBAKGRUND .....	13
1.1	Lagringsbehovet .....	13
1.2	Lagringsalternativen .....	15
2	HYDROGEOLOGISKA FÖRUTSÄTTNINGAR FÖR MARKLAGRING .....	25
2.1	Jord- och bergmaterialet ur geologisk synvinkel .....	25
2.1.1	De geologiska processerna .....	25
2.1.2	Sveriges geologiska uppbyggnad i över- sikt .....	26
2.1.2.1	Urbergarterna .....	27
2.1.2.2	Sedimentbergarterna .....	28
2.1.2.3	Jordlagren .....	28
2.2	Vattnet i jord- och berglagren .....	29
2.2.1	Porositets- och permeabilitetsbegreppen .....	30
2.2.2	Akviferbegreppet .....	32
2.2.3	Akviferens hydrauliska egenskaper .....	34
2.3	Jord- och berglagrens termiska egenskaper ...	36
2.3.1	Värmetransporten .....	36
2.3.2	Värmelagringen .....	38
3	SYSTEM FÖR VÄRMEVÄXLING MED MARK .....	40
3.1	System med konduktiv värmeöverföring i rör eller slang .....	40
3.1.1	Teoretisk bakgrund .....	40
3.1.2	Tillämpningen .....	42
3.2	System för hydraulisk värmeöverföring med brunnar .....	47
3.2.1	Brunnens funktion .....	47
3.2.2	Formationsanalys genom provpumpning .....	49

3.3.3	Värmeöverföringen till och från formationen (termohydrauliska förlopp) .....	54
3.3.4	Några olika systemlösningar .....	56
4	AKVIFERLAGRINGENS FRÅGESTÄLLNINGAR OCH PROBLEMMOMRÅDEN .....	63
4.1	Den hydrogeologiska kartläggningen .....	63
4.2	Brunnsbyggandet .....	64
4.3	Igensättningsproblemet .....	69
4.4	Den termohydrauliska kontrollen .....	70
4.5	Värmeförlusten .....	75
5	DJUPLAGRINGENS DEFINITION OCH TILLÄMP- BARHET .....	77
6	NÅGRA BERÄKNINGSEXEMPEL .....	82
6.1	Systemlösningen .....	82
6.2	Fallet med sandstensakviferen i Skåne (Fall 1) .....	84
6.2.1	Förutsättningarna .....	84
6.2.2	Kostnadsberäkningen .....	87
6.3	Fallet med Alnarpsdalen (Fall 2) .....	88
6.3.1	Förutsättningar .....	88
6.3.2	Kostnadsberäkningen .....	90
6.4	Fallet med Visingsösandstenen (Fall 3) .....	91
6.4.1	Förutsättningarna .....	91
6.4.2	Kostnadsberäkningen .....	93
6.5	Sammanfattning av beräkningsexemplen .....	94
7	SAMMANFATTANDE KOMMENTARER .....	97
	BILAGA 1 Säsongsvärmelagring i akviferer .....	99
	CITERAD LITTERATUR .....	115

## FÖRORD

Ursprungligen skulle föreliggande rapport hetat "TRYCK-  
STTEGRINGSLAGRING AV SOLUPPVÄRMT VATTEN I DJUPA PORÖSA  
AKVIFERER MED TVÅBRUNNSSYSTEM OCH MELLANLIGGANDE VÄRME-  
CENTRAL", vilket också var rubriken på den PM som till-  
hörde projektansökan. Under utredningsarbetets gång vi-  
sade sig dock det som benämndes "tryckstegringslagring"  
vara svårdefinierat och har därför nu blivit benämnt  
"lagring i djupa slutna akviferer".

Förutom lagring i djupa akviferer och frågeställningarna  
runt denna lagringsform ges i rapporten en allmän över-  
sikt av de otal former för MARKLAGRING som under senare  
år förts fram som lagringsalternativ. Detta ligger egent-  
ligen utanför det ursprungliga projektet, men vi har an-  
sett det behövt med denna översikt för att kunna stäl-  
la "djuplagringen" i jämförelse med andra system.

## SAMMANFATTNING

I Sverige finns stora volymer jord- och berglager som kan användas för långtidslagring av värme. Under senare år har en lång rad idéer för sådan lagring växt fram, men bara ett fåtal har prövats praktiskt. Utan anspråk på fullständighet ges i rapportens inledning en översikt av olika systemlösningar för värmeväxling med mark. Två grupper kan urskiljas.

- Värmeöverföringen till och från marken sker konduktivt via ett vätskeburet rör-, slang- eller borrhålssystem. Systemet är användbart i både jord- och berglager. Bäst synes förutsättningarna vara i lerjordar, som normalt har hög vattenhalt kombinerat med dålig vattengenomsläpplighet. Detta innebär att värmelagringsförmågan är stor, samtidigt som värmeförluster genom det naturliga grundvattenflödet är minimalt.
- Värmeöverföring till och från marken sker hydrauliskt via brunnar och med (grund-)vatten som värmebärare. Systemet är i princip användbart i de vattengenomsläppliga jord- och berglager som bildar större sammanhängande formationer, exempelvis grusåsar och sandstenar. Dessa bildar naturligt avgränsade grundvattenmagasin, s k akviferer. Värmet lagras dels i värmebäraren - grundvatten som fyller ut akviferens porsystem - och dels i de fasta partiklar som bygger upp akviferen.

Eftersom olika jord- och bergarter har olika egenskaper varierar också förutsättningarna för marklagring med det geologiska mediets uppbyggnad och egenskaper. Av grundläggande betydelse är

- sammansättning avseende kornstorleks- och mineralfördelning
- uppbyggnad avseende porositet och struktur
- hydrauliska egenskaper med hänsyn till vattengenomsläpplighet (permeabilitet, transmissivitet) och lagringsför-



måga (magasinskoefficient)

- termiska egenskaper i form av värmelednings- och värmelagringsförmåga.

Med utgångspunkt från dessa parametrar kan anpassade värmelagringsystem utformas. För varje system kan också värmeöverföringsprocesserna nöjaktigt beräknas, liksom värmeförluster under lagringen. Förlusterna kan delvis styras med att lagret får en lämplig geometrisk utformning. Värmeförlustens storlek står annars i ett direkt samband med lagrets volym och temperaturnivå.

Mot bakgrund av dessa allmänna förutsättningar framstår lagring i djupt liggande akviferer som ett intressant marklagringsalternativ. Det är framför allt den goda termohydrauliska kontrollerbarheten och förhållandevis små värmeförluster som talar för djuplagringsalternativet. Vidare kan storskalighet uppnås samtidigt som de ekologiska effekterna bedömes vara försumbara.

Lämpliga akviferer finns både i berggrund och jordlager. Vad gäller berggrunden är det främst sandstenar som är av intresse. Sådana finns i Skåne, Västergötland, Östergötland, Närke, Dalarna samt på Öland och Gotland. Även Vätternsänkan samt delar av fjällkedjan hör hit.

Djupt nedsänkta akviferer i jordlagren utgöres främst av sand- och grusformationer täckta av ler- och siltavlagringar. Sådana finns här och var i dalgångar och kustområden samt i mellansvenska sänkan.

I rapporten har tre fall av djuplagring dimensionerats och kostnadsberäknats. Det har förutsatts att lagret ingår som del i en solvärmecentral där överskottsvärme lagras in sommartid och återvinnes vintertid.

Dimensionerande för lagrets storlek är ett normalårs lagringsbehov, vilket beräknas utgöra 70 % av det tänkta fjärrvärmens totala energibehov. Härtill kommer diverse förluster vilka i beräkningsexemplen satts till 20 %.

Det maximala effektbehovet vid uttag är en av de faktorer som bestämmer vilken kapacitet (vattenmängd/tidsenhet) lagret skall ha. En annan dimensionerande faktor är inlagringshastigheten. Denna bestäms primärt av tillgänglig inlagringstid, vilken i sin tur är beroende av antalet soltimmar och solfångarytan.

Själva lagringssystemet består av dubbla brunnar, en för hett och en för svalare vatten. I hetvattenbrunnen injekteras värme från solfångarna sommartid för vidare befordran till fjärrvärmenätets framledning vintertid. I den lågtempererade brunnen injekteras returvärmets vintertid och pumpas till solfångarna sommartid. Lagringssystemet är slutet och värmeöverföring till och från lagret sker via samma akvifer, vilket gör att grundvatten med ensartad beskaffenhet cirkulerar i systemet. Härvid kan vissa vattenkemiska problem elimineras.

I beräkningsexemplen har antagits att fjärrvärmenätet försörjs med solvärme till 100 % och att arbetstemperaturen i lagret hålls på sådan hög nivå att värmepump ej behöver tillgripas.

Nedan sammanfattas de parametrar som ingått i beräkningsexemplen.

<u>Lagerdimensionerande parametrar</u>	Fall 1	Fall 2	Fall 3
Antal hushåll	1000	500	250
Årligt energibehov (kWh/år)	$15 \cdot 10^6$	$7,5 \cdot 10^6$	$3,75 \cdot 10^6$
Dim utgående radiator-temp (°C)	60	50	45
Lagringsbehov varav (kWh/år)	$12 \cdot 10^6$	$6,3 \cdot 10^6$	$3,2 \cdot 10^6$
Värmeförlust (%)	20	20	20

		Fall 1	Fall 2	Fall 3
Max effektbehov	(kW)	$7 \cdot 10^3$	$3,5 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^6$
vid				
$\Delta T$	( $^{\circ}C$ )	30	20	20
Tillgänglig lagringstid				
(antal soltimmar)		1000	1200	1300
Lagrets arbetstemp	( $^{\circ}C$ )	90-60	70-50	60-45
Omgivningstemp	( $^{\circ}C$ )	38	11	12
Insvängningsförlust	(kWh)	$8 \cdot 10^6$	$12 \cdot 10^6$	$7,35 \cdot 10^6$
(endast första året)				

#### Lagerparametrar

Geologisk formation		Sand- sten	Sand	Sandsten
Typ av akvifer		Sluten	Sluten	Sluten
Djup till formationstak	(m)	1200	70	100
Mäktighet	(m)	40	40	100
Porositet	(%)	20	25	10
Transmissivitet	( $m^2/s$ )	$10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4}$
Dim lagringskapacitet	(kWh/ $m^3$ $^{\circ}C$ )	0,713	0,775	0,663
Dim lagringsvolym	( $10^3 m^3$ )	560	400	320
Dim brunnskapacitet	(l/s)	55	40	24
Antal brunnspår		1	2	2
Minsta avstånd mellan brunnarna	(m)	140	120	60
Värmeförlust 5:e års- cykeln	(%)	13	10	13

#### Lagringskostnad

Årlig kapitalkostnad	(öre/kWh)	6,5	5,1	8,0
Årlig driftskostnad	(öre/kWh)	2,0	2,5	3,4
Sammanlagd årlig kostnad av nyttiggjord lagrad energi	(öre/kWh)	9,0	7,6	11,4

Att nyttja djupa akviferer för långtidslagring synes vara både tekniskt genomförbart och ekonomiskt gynnsamt. Det skall dock framhållas att lagringssystemet inte kan ses isolerat. Den slutliga tekniska lösningen och därmed kostnaden är avhängigt hur lagret skall dimensioneras och fungera i ett totalt uppvärmningssystem.

Problemområdena är annars relativt värdefinierade. De mest svårhanterliga kommer förmodligen att vara av vattenkemisk och brunnsteknisk karaktär. Även vissa problem som rör värmeöverföringsprocesserna återstår att lösa.

Praktiska fältförsök bör vara nästa steg i utvecklingen för att utvärdera djuplagringsalternativet.

## BETECKNINGAR

A	(m <sup>2</sup> )	Area
B	(m)	Formationsmäktighet
b		Värmeöverföringskoefficient
C	(J/kg·°K)	Värmekapacitivitet
ρC	(J/m <sup>3</sup> ·°K)	Värmekapacitet
F	(w/m)	Värmeöverföring, värmeutbyte
g	(m/s <sup>2</sup> )	Jordacceleration
H	(m)	Mäktighet
h	(m)	Vattennivå, observationsrör
I	(m/m)	Gradient
K	(m/s)	Permeabilitet
L	(m)	Längdavstånd
n	(%)	Totalporositet
n <sub>e</sub>	(%)	Effektiv porositet
P <sub>H</sub>	(Pa)	Hydrostatiskt tryck
P <sub>F</sub>	(Pa)	Formationstryck
Q	(m <sup>3</sup> /s)	Flöde
q	(m <sup>3</sup> )	Flödesmängd
R <sub>O</sub>	(m)	Influensradie
r	(m)	Avstånd, radie
S	(m <sup>3</sup> /m·m <sup>2</sup> )	Magasinskoefficient
s	(m)	Avsänkning
s <sub>1</sub>	(m)	Residualavsänkning
S <sub>a</sub>	(m <sup>3</sup> /m·m <sup>2</sup> )	Magasinskoefficient, slutna akvifer
S <sub>y</sub>	(m <sup>3</sup> /m·m <sup>2</sup> )	Magasinskoefficient, öppna akvifer
T	(m <sup>2</sup> /s)	Transmissivitet
t	(s, min)	Tid
T <sub>O</sub>	(°C)	Temperatur formation
T <sub>1</sub>	(°C)	Inlagringstemperatur
u		Hjälpvariabel i Theis' brunnfunktion (W (u))
w	(%)	Vattenhalt, vatten
z	(m)	Längdkoordinat

$\alpha$	(m)	Hjälpsvariabel vid värmeförlustberäkningar
$\alpha\rho$	(Pa <sup>-2</sup> )	Formationens kompressibilitet
$\beta$	(Pa <sup>-2</sup> )	Vattnets kompressibilitet
$\theta$	(°C)	Temperatur
$\lambda$	(W/m·°C)	Värmeledningsförmåga
$\rho$	(kg/m <sup>3</sup> )	Densitet

SÄSONGSVÄRMELAGRING I MARK  
ALLMÄN ÖVERSIKT JÄMTE IDÉUTVECKLING AV LAGRING I DJUPA  
SLUTNA AKVIFERER (DJUPLAGRING)

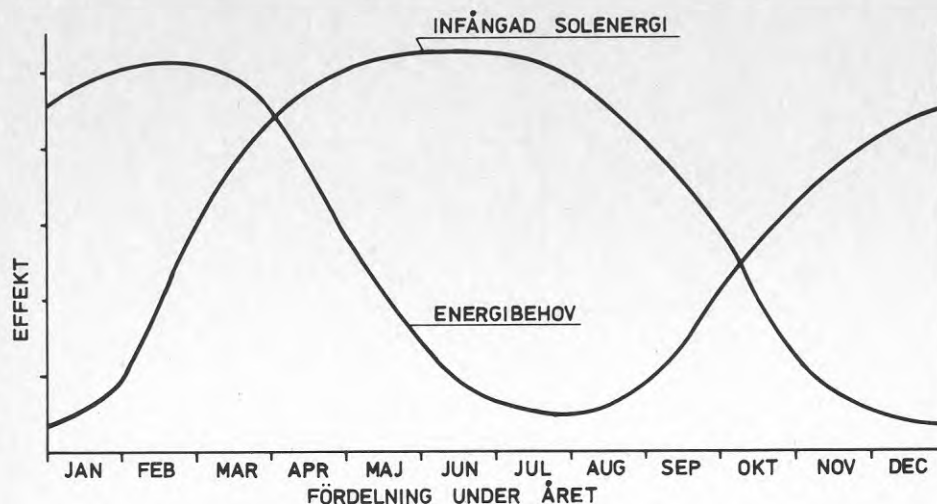
1. PROJEKTBAKGRUND

1.1 Lagringsbehovet

Flera av de energikällor som används idag består av solenergi i en eller annan form. Hit hör bl a olja, gas, kol och vattenkraft. Även några av de s k alternativa energiformerna kan föras hit, exempelvis torv och annan biomassa, vind- och vågkraft, ytjordvärme, för att nämna ett par aktuella. Alla dessa består av lagrad solenergi.

Den direkta icke-lagrade solinstrålningen kan vid en första anblick synas synnerligen attraktiv eftersom man då slipper en rad energiomvandlingssteg. Men redan steget att fånga upp solvärmens i solfångare innebär vissa problem. Fungerande solfångare med acceptabel verkningsgrad har visserligen funnits på marknaden en längre tid, men är för den skull inte färdigutvecklade. Bl a förekommer problem med åldringsprocesser, kondens och annat. Trots detta måste solfångarsidan bedömas att stå relativt nära sin optimala utformning och driftsäkerhet.

Större blir genast problemen då solenergin skall användas och sättas i system, det gäller då främst för bostadsuppvärmning. Eftersom solenergiflödet är som störst då uppvärmningsbehovet är som lägst ligger flödes- och behovskurvorna i motfas med varandra, FIGUR 1.



FIGUR 1 - Fäsförskjutning mellan solenergiflöde och uppvärmningsbehov under året

Detta förhållande är kanske det allra största hindret för att kommersiellt kunna utnyttja solvärme för uppvärmningsändamål. Lösningen på problemet är lagring under längre tid.

I princip gäller att hitta en lagringsform där sommaröverskottet från solfångarna (även annat överskottsvärme) kan lagras fram till och under vinterperioden, utan att alltför stora värmeförluster uppkommer.

Det är viktigt att hålla värmeförlusterna på låg nivå av två skäl, nämligen

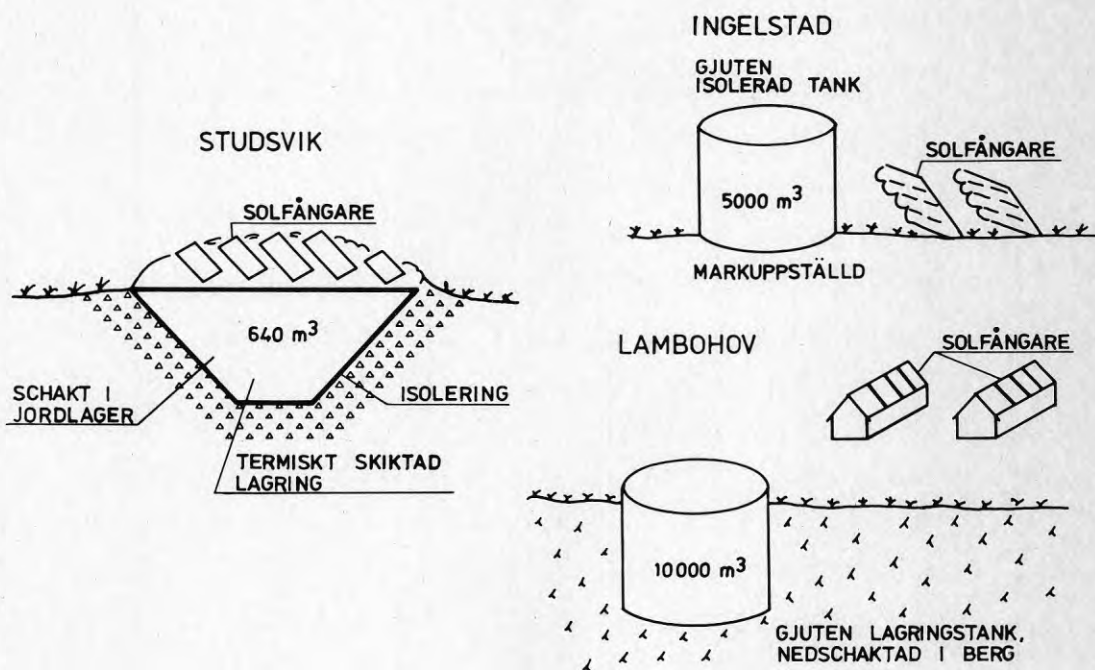
- förluster under lagring måste kompenseras med motsvarande inlagring, vilket i praktiken innebär ett större antal kvadratmeter solfångare,
- förlusterna verkar kvalitetsnedsättande i den meningen att energitätheten minskar.



## 1.2 Lagringsalternativen

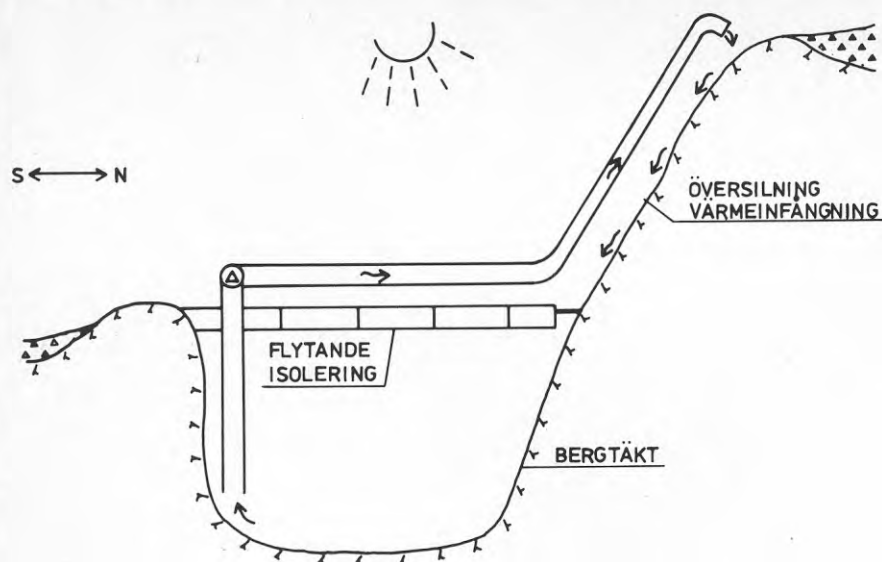
En rad olika systemlösningar för långtidslagring har under senare tid lagts fram från olika håll. Ännu så länge har endast lagring i vatten (s k solvärmecentraler) börjat prövas i större skala. Mest kända är de färdiga anläggningarna i Studsvik och Ingelstad samt Lambohov som snart står färdigt. I dessa fall sker lagringen i nedschaktad vattenbassäng (Studsvik), markuppställd cistern (Ingelstad) och delvis nedschaktad cistern (Lambohov), se FIGUR 2.

Som ett intressant alternativ till bassäng- och cisternlagringen skall nämnas värmelagring i sjömagasin.



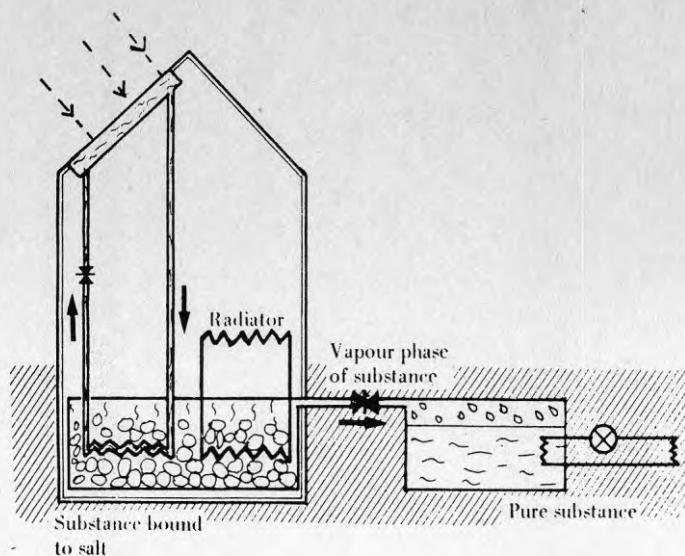
FIGUR 2 - Lagringsfunktionerna i några befintliga solvärmecentraler. (Principskiss bl a efter Roseen 1978 och Finn 1979)

Sjöarna kan vara naturliga eller också grävda dammar. Även nedlagda stenbrott, gruvhål och liknande numera vattenfyllda schakter kan inräknas. FIGUR 3 visar ett exempel. Inget av dessa alternativ har dock ännu prövats i praktiken.



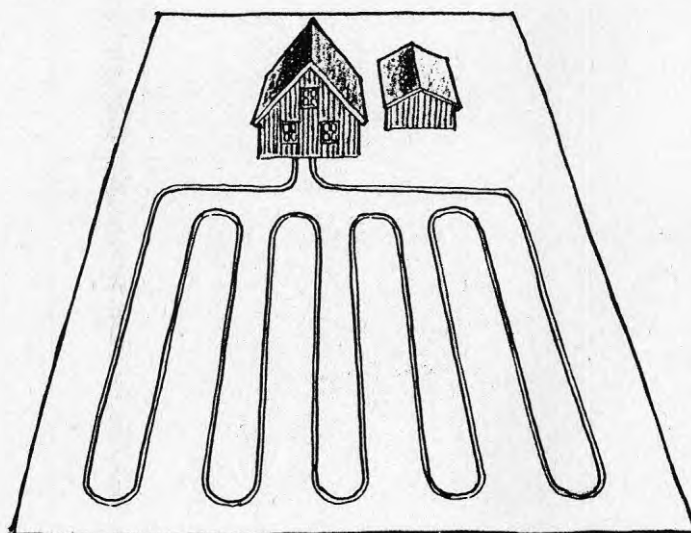
FIGUR 3 - Exempel på lagring i artificiell sjö (efter Gustafson 1979)

Oprövat i stor skala är också kemisk lagring. Denna kan indelas i sensibel värmelagringsform (kemiska reversibla fasomvandlingsprocesser, exempelvis is  $\leftrightarrow$  vatten  $\leftrightarrow$  ånga) och termokemisk lagringsform (energiom-sättning vid reversibla kemiska reaktioner, exempelvis släckt kalk  $\leftrightarrow$  bränd kalk). FIGUR 4 exemplifierar den kemiska energilagringen, vilken av de flesta bedömes ha stora utvecklingsmöjligheter.



FIGUR 4 - Energilagring med s k kemisk värmepump i ett solvärmesystem. Principskiss (efter Stymne 1969)

En mångsidig lagringsform utgöres av s k "marklagring". Som en passiv sådan finns redan ytjordvärmesystemet på marknaden, FIGUR 5.

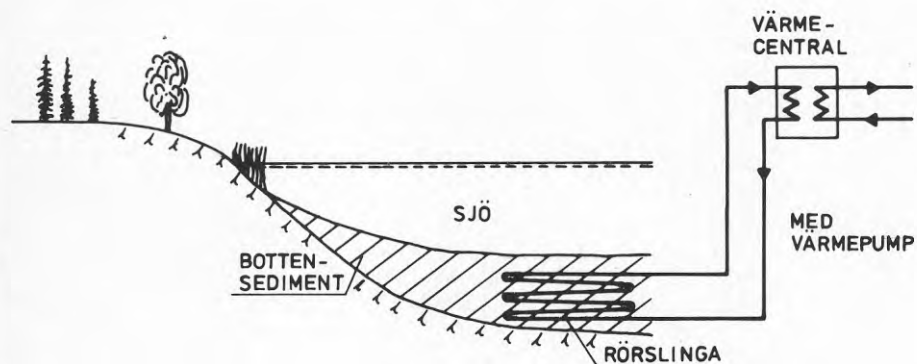


FIGUR 5 - Ytjordvärme. Slingor i marken med upptagning av passivt lagrad solenergi (efter AGA THERMIA). Kombinerat med solfångare kan marken återvärmes aktivt

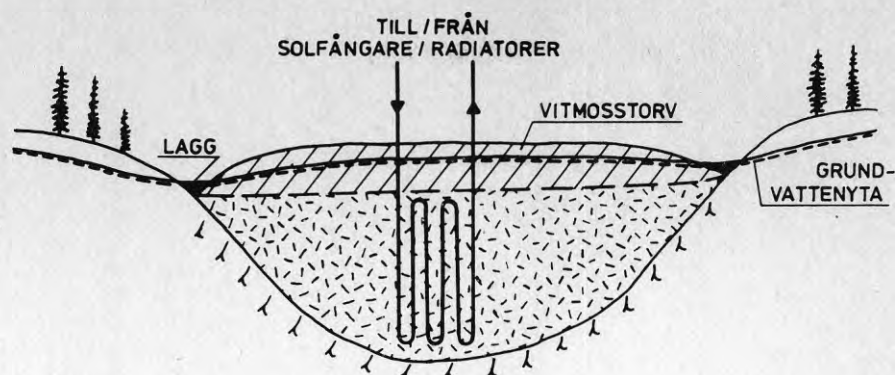
Systemet går i korthet ut på att vintertid och med hjälp av slingor i marken (helst i jordarter med hög naturlig vattenhalt, exempelvis lera) utvinna den värmeenergi som under sommartid passivt lagrats i den övre markprofilen. Särskilt stor värmemängd frigörs då vattnet i jordlagrens porer övergår till is (frysvärmnet). Värmet från marken koncentreras i värmepump innan det går in till husets radiatorer. Systemet har främst använts för uppvärmning av enskilda hus och flera års driftserfarenhet föreligger, vanligen med positivt utfall.

Några aktiva marklagringssystem i större skala har ännu inte testats praktiskt i Sverige. En rad idéer har dock blivit utvärderade teoretiskt och ibland experimentellt. Flera marklagringsformer står nu inför tillämplad prövning.

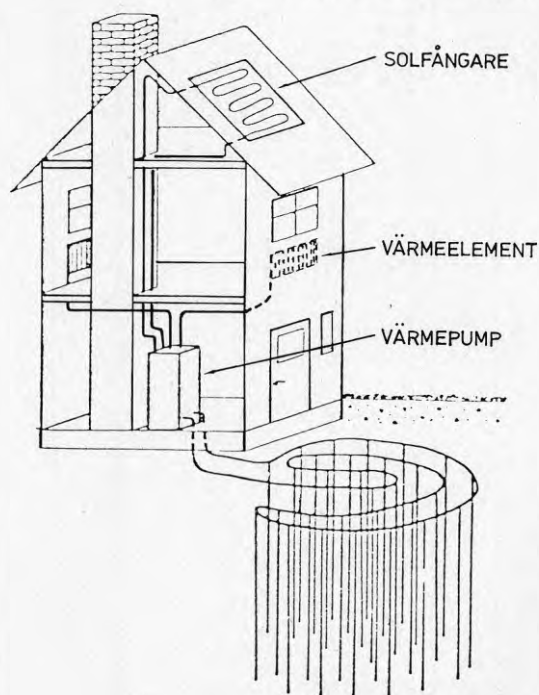
De idéer som kommit fram och som syftar till att utnyttja mark in situ kan summeras i följande figurkavalkad.



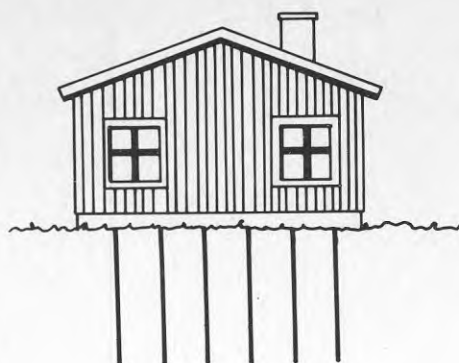
FIGUR 6 - Värmeväxling med bottensediment i sjöar och havsvikar. Inlagring sommartid kan ske både aktivt (genom rörslingan) eller passivt (genom naturligt värmeutbyte vatten/sediment)



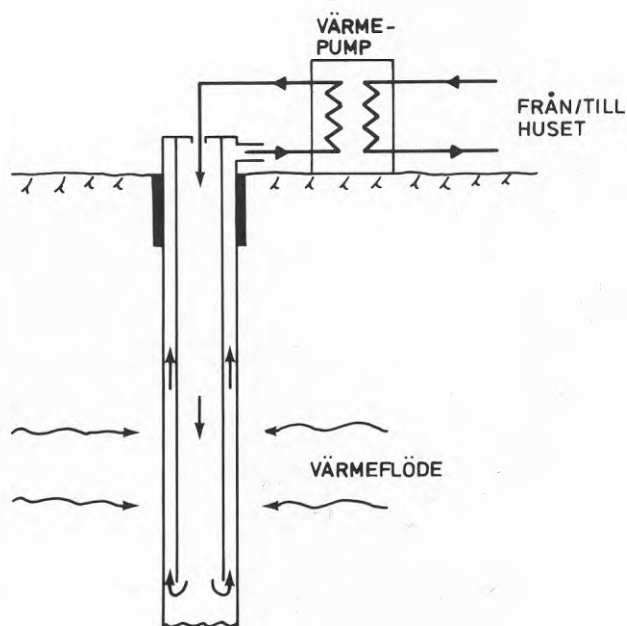
FIGUR 7 - Den igenväxta sjön, mossen, kan fungera som ett utmärkt lagringsmagasin. En högmosse är naturligt isolerad av ett lager vitmosstorv med extremt låg värmeledningsförmåga. Under vitmossan finns annan torv med hög värmelagringsförmåga. Inlagring sker aktivt sommartid via rørslinga eller liknande



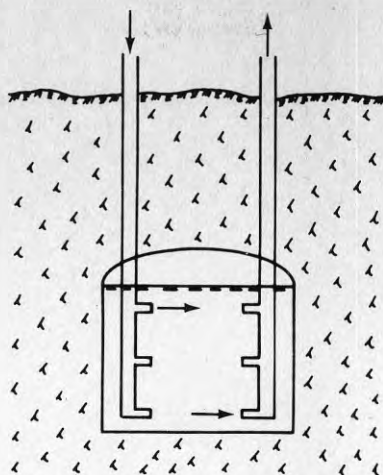
FIGUR 8 - Lagring i lera typ "jordackumulator" (efter Modin 1979). Värmeväxling med leran sker via vertikala rör i grupp och visst geometriskt mönster. En försöksanläggning är under uppförande i Göteborgstrakten



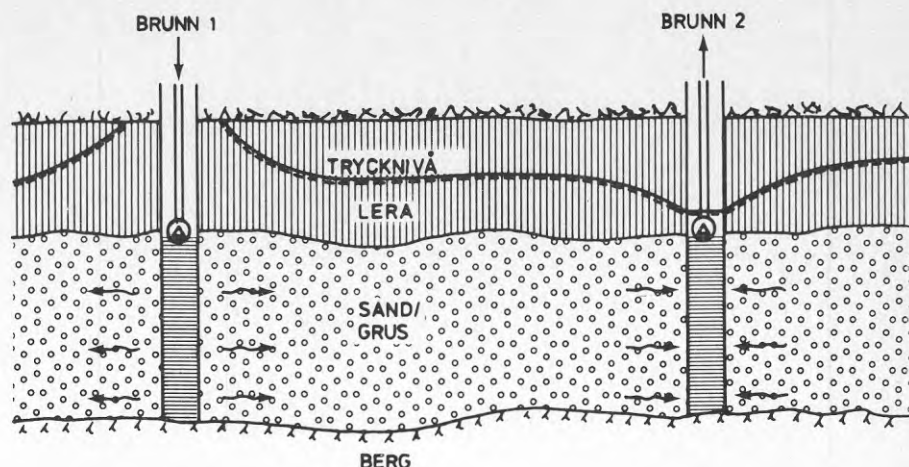
FIGUR 9 - "Jordackumulatorns" motsvarighet i berg består av ett större antal borrhål i berget genom vilka en bergmassa uppvärms och kyls vid inlagring resp uttag. Systemet förutsätter låga arbetstemperaturer då värmeförlusterna annars blir höga. Enligt modell "Sunroc" fordras att huset uppvärms med mycket låg framledningstemperatur



FIGUR 10 - En variant att utnyttja berget som värmekälla till värmepump är ett djupare borrhål där värmeväxlingen med berget sker längs en stor specifik yta och med ett värme flöde mot hålet. Efter vinterperiodens värmeuttag sker en passiv återställning. Alternativt kan systemet laddas aktivt med solfångare

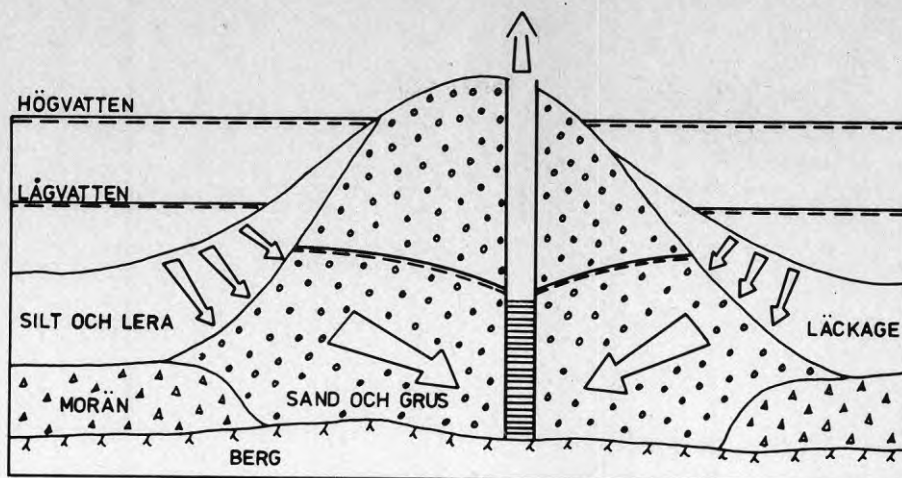


FIGUR 11 - Lagring i bergrum förutsätter bl a stor skala för att minimera värmeförlusterna. Vattnet ligger skiktat termiskt så att svalt bottenvatten kan tas ut för uppvärmning och återföras till högre nivå under inlagringsskedet. Lagringssystemet kopplas till solvärmecentral eller spillvärmekälla

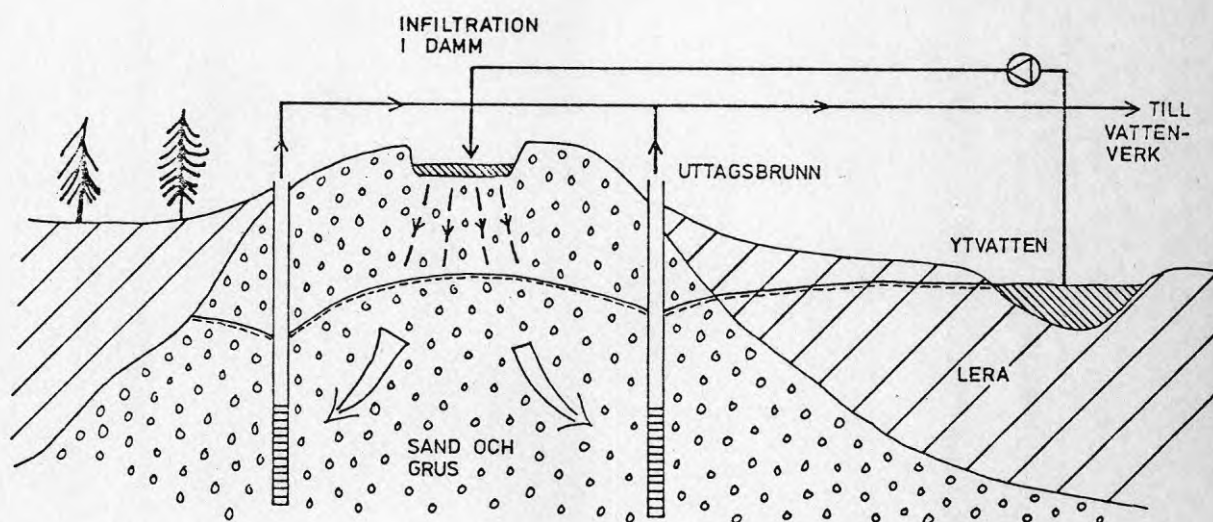


FIGUR 12 - Porösa jordlager som bildar grundvattenmagasin (akviferer) kan lämpa sig väl som lagringsmagasin, särskilt sådana som överlagras av lera eller silt. Figuren visar schematiskt en bit av en rullstensås i längsprofil. I brunn 1 pumpas soluppvärmt vatten ned sommartid samtidigt som vatten för uppvärmning tas ur brunn 2. Magasinet laddas runt brunn 1. Vintertid återvinns det varma vattnet genom pumpning ur brunn 1 samtidigt som returvattnet återinjekteras i brunn 2.

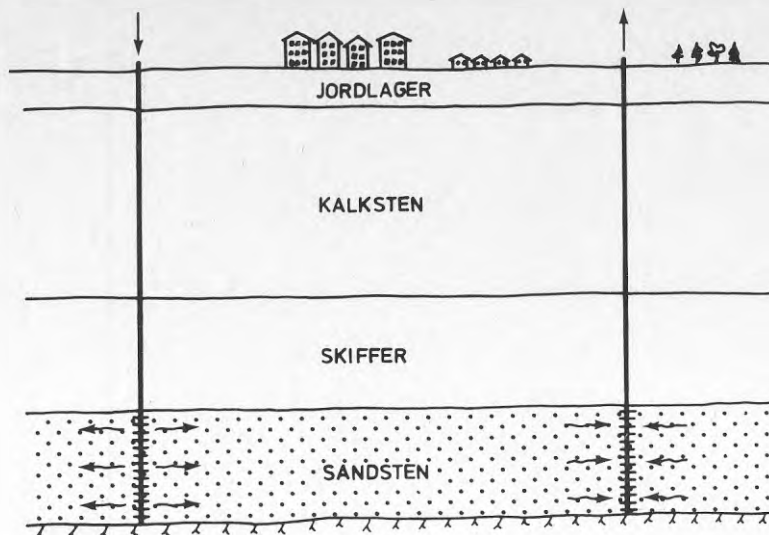




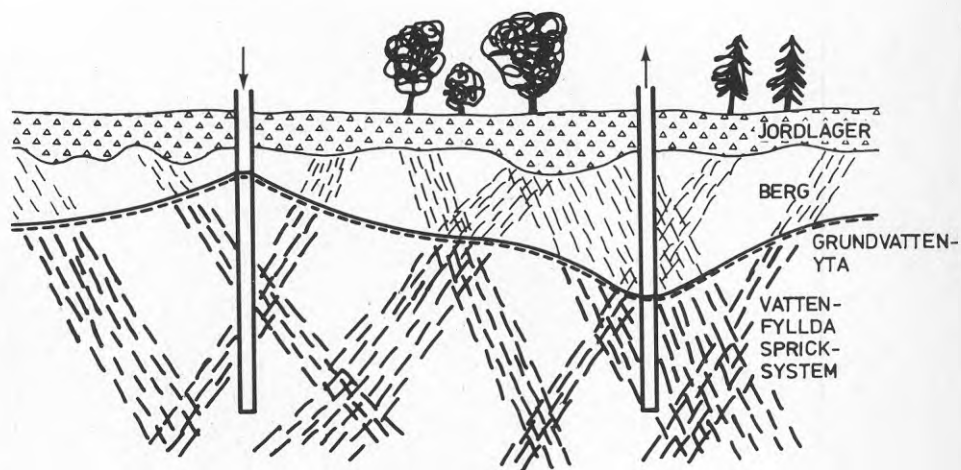
FIGUR 13 - Genom att pumpa bort svalt grundvatten ur ett grundvattenmagasin sommartid kan soluppvärmt ytvatten fås att infiltrera till magasinet. Detta kan sedan vintertid pumpas upp och utgöra värmesänka till värmepump (Gustafson 1979)



FIGUR 14 - En variant på samma tema är att låta sommaruppvärmt ytvatten infiltrera i damm för lagring till vinterperioden då det utvinns



FIGUR 15 - En del sedimentära bergarter har ofta stor porvolym och bildar då porakviferer. Genom att som i figuren utnyttja djupt liggande porösa sandstenar kan värmeförlusterna minimeras och lagring med höga temperaturer ske, varvid bl a den normala termiska gradienten spelar stor roll. Storskalighet kan på detta sätt uppnås



FIGUR 16 - I kristallint berg (exempelvis gnejs och granit) finns inga porer. Däremot är det ofta gensatt av spricksystem och bildar då sk sprickakviferer. Med relativt sett enkla och billiga brunnsutföranden kan lagringssystem åstadkommas. Å andra sidan är lagringskapaciteten vanligen lägre än för porakviferer

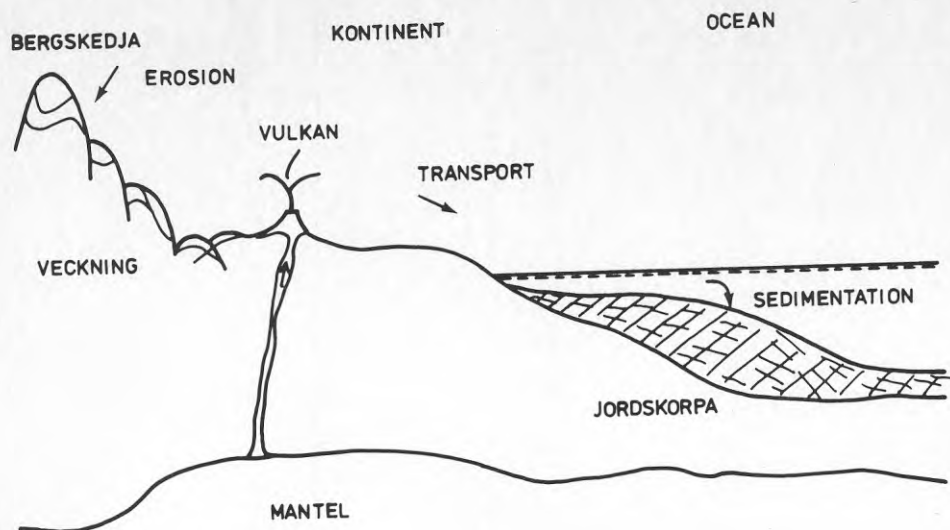
## 2 HYDROGEOLOGISKA FÖRUTSÄTTNINGAR FÖR MARKLAGRING

För att marklagring skall vara möjlig fordras att vissa grundläggande förutsättningar skall råda. Jord- och berglagren skall vara av viss uppbyggnad och beskaffenhet. Vidare skall deras hydrauliska och termiska egenskaper vara sådana att ett marklagringssystem är kontrollerbart. Utanför vad som behandlas i denna rapport måste därtill också hänsyn tas till miljö, konkurrerande nyttjandeintressen etc.

### 2.1 Jord- och bergmaterialet ur geologisk synvinkel

#### 2.1.1 De geologiska processerna

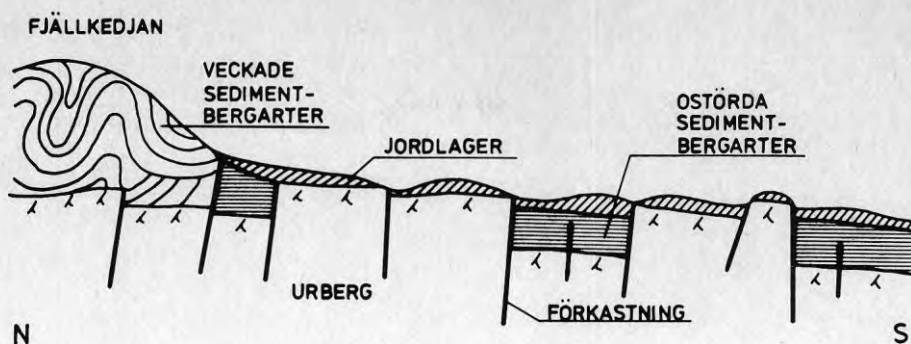
Under den geologiskt sett korta tid en mansålder är hinner inte särskilt stora förändringar ske i den fysiska miljön - som är naturligt förorsakade. Man kan därför missledas tro att berg och jord vilar i nära nog oföränderligt läge. Så är dock inte fallet. Jordskorpan utsätts dagligen för starka krafter, både nedbrytande och uppbyggande. Genom inre krafter som förorsakar vulkanism, förkastningar och andra jordskorperörelser förändras bl a topografin och fördelningen land-hav. Yttre krafter i form av vågor, vattendrag, glaciärer, vind, frost etc bryter ner och eroderar bort jord- och berglagren och erosionsmaterialet avsätts och bygger upp nya geologiska formationer. FIGUR 17 ger en förenklad bild av processerna.



FIGUR 17 - De omdanade geologiska processerna

### 2.1.2 Sveriges geologiska uppbyggnad i översikt

De allra äldsta delarna av jordklotets yttre fasta hölje, jordskorpan, innehåller avlagringar och formationer alltifrån jordens tidigaste historia och fram till nu. I Sverige bildar urberget den äldsta bergytan. Här och var överlagras urberget av sedimentära bergarter, som exempelvis i Skåne, på Öland och Gotland, vissa delar i Östergötland, Västergötland, Närke och Dalarna samt i hela fjällkedjeregionen. Slutligen har främst inlandsisarna givit upphov till de jordlager som bildar markyta där berget inte går i dagen. FIGUR 18 illustrerar den principiella geologiska uppbyggnaden.

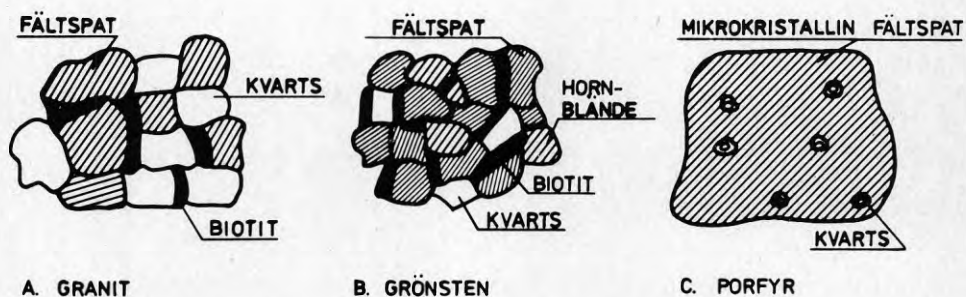


FIGUR 18 - Sveriges geologiska uppbyggnad i principprofil i ungefärlig riktning N-S

#### 2.1.2.1 Urbergarterna

Sveriges berggrund består till ca 75 % av urberg. Detta består till övervägande del av s k kristallina sura djupbergarter, varav gnejs och granit är de vanligaste bergartstyperna. Sporadiskt förekommer s k grönstenar, vilka är ett samlingsnamn för basiska mörkare bergarter som exempelvis gabbro och diorit. Underordnat ingår en del mycket gamla vulkaniska bergarter i urberget, främst porfyryer av olika sammansättning. Härtill kommer också en del s k gångbergarter av vilka diabaser är mest vanligt.

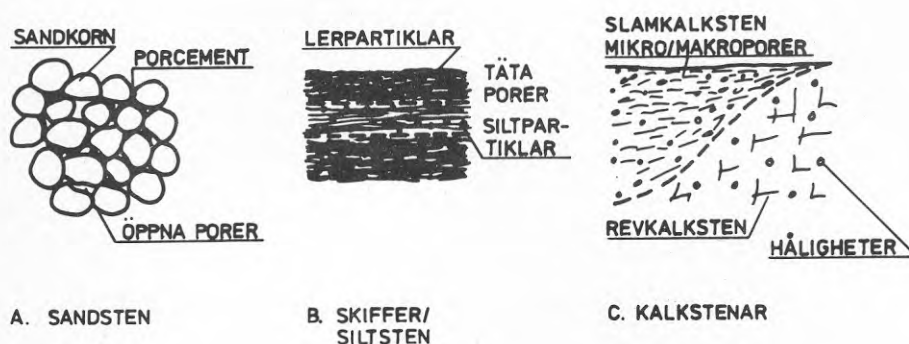
Gemensamt för alla dessa bergartstyper är den kristallina uppbyggnaden, vilket innebär att ett eller flera mineral i kristallin form bygger upp bergarten, se FIGUR 19.



FIGUR 19 - Några vanliga urbergarters uppbyggnad

### 2.1.2.2 Sedimentbergarterna

De sedimentära bergarterna är uppbyggda av de partiklar som genom erosionens inverkan frigjorts från urberget. Partiklarna är av olika storlek och form och bygger därför upp sediment med varierande struktur. De grövsta bildar sandsten och de finkorniga skifferar, FIGUR 20. Kalkstenar har särskilda bildningsbetingelser. Här har det organiska livet i havet stått för materialet, ofta i kombination med kemiska kalkutfällningar.



FIGUR 20 - Några vanliga sedimentära bergarter

### 2.1.2.3 Jordlagren

Bland jordlagren skiljer man mellan sorterade och osorterade jordarter. I klassificeringen tas också hänsyn till kornstorleksfördelning och bildningssätt. De sorterade jordarterna indelas något förenklat efter kornstorlek i grus-, sand-, silt- och lersediment. De vanligaste sand- och grusavlagringarna utgöres av isälvsavlagringar i form av åsar eller deltan, vanligen lokaliserade till större dalgångar. I låg terräng under den högsta kustlinjen och som utfyllnad i dalsänkor, i sjöar och hav utbreder sig stora arealer med silt- och lersediment. Ett bra exempel är den mellan-svenska sänkan.

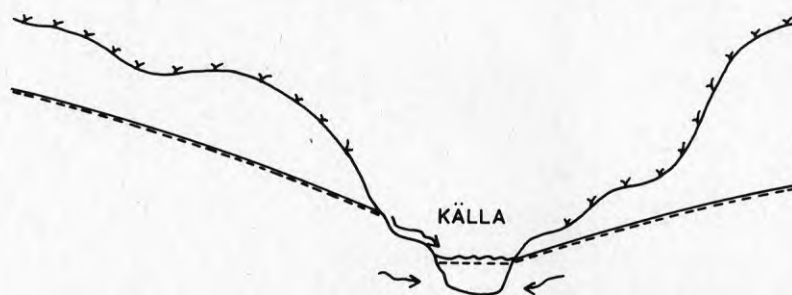
Den i särklass vanligaste landisavlagringen består av morän. Denna jordart är osorterad och innehåller olika kornfraktioner, se FIGUR 21.



FIGUR 21 - Några vanliga jordarter

## 2.2 Vattnet i jord- och berglagren

Den del av nederbörden som inte avdunstar eller avrinner på markytan tränger ned i marken och når slutligen den vattenmättade zonen - grundvattenytan. Under denna zon utfylls alla porer och sprickor med vatten - grundvatten. Liksom vattnet i ytvattensystemen söker sig till havets nivå genom floder och bäckar, letar sig grundvattnet fram under markytan i genomsläppliga lager och läcker så småningom ut i vattendrag, sjöar eller hav. Ibland kan grundvattenflödet nå markytan i en koncentrerad punkt och ger då upphov till ett källflöde, FIGUR 22.



FIGUR 22 - Exempel på källflöde

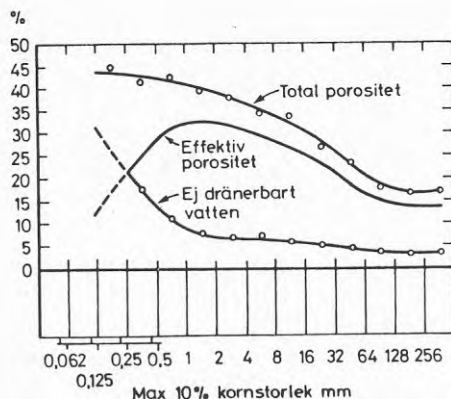
Hur grundvattnet bildas, magasineras och dräneras styrs primärt av jord- och berglagrens uppbyggnad och topografiska läge samt sekundärt av deras hydrauliska egenskaper.

De grundläggande hydrauliska egenskaperna kan enklast beskrivas med hjälp av två storheter, nämligen porositet och hydraulisk konduktivitet (permeabilitet eller vattengenomsläpplighet).

### 2.2.1 Porositets- och permeabilitetsbegreppen

Ett annat ord för porositet är hålrumsfaktorn,  $n$ , vilken uttrycker den sammanlagda volymen hålrum eller porer i procent av den totala jord- eller bergartsvolymen.

Även om porvolymen teoretiskt är lika stor för en bestämd volym lika stora sfäriska korn i olika kornfraktioner skiljer sig porositeten avsevärt i naturliga sedimentära avlagringar. Som FIGUR 23 visar ökar porositeten med minskad kornstorlek.

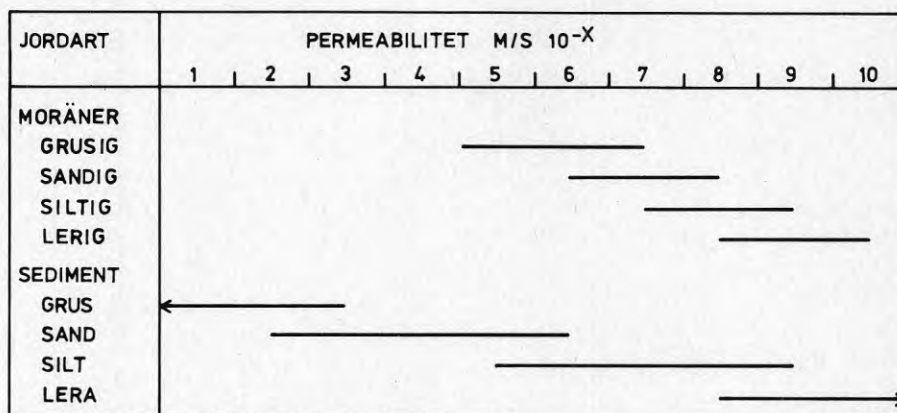


FIGUR 23 - Total porvolym, dränerbar volym samt icke dränerbar volym som funktion av kornstorleken



Diagrammet visar också hur den av tyngdkraften dränerbara volymen minskar med minskad kornstorlek samtidigt som den vattenhållande förmågan ökar (kapillärt och hygroskopiskt kvarhållet).

Att en jord- eller bergart har stor porvolym innebär således inte att den har hög vattengenomsläpplighet. Tvärtom innebär stora porer men liten total volym ett mindre flödesmotstånd än då porerna är små och många. Det är med andra ord i första hand den effektiva porositeten som bestämmer flödesegenskaperna. Andra faktorer som påverkar materialets genomsläpplighet är bl a kornform, struktur, porcontinuitet, vattnets temperatur och viskositet.



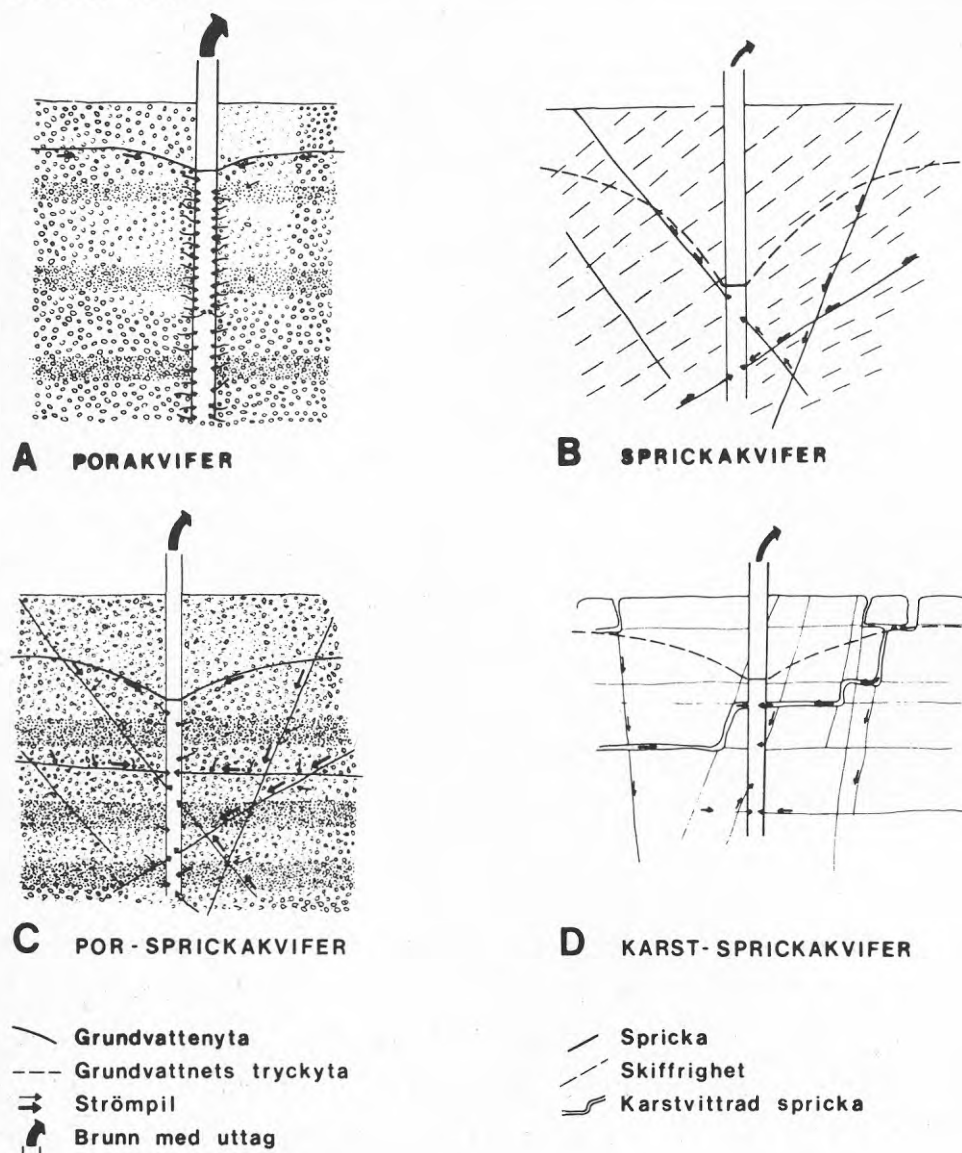
FIGUR 24 - Några vanliga permeabilitetsvärden hos olika jordarter

Genomsläppligheten brukar betecknas som permeabilitet eller hydraulisk konduktivitet uttryckt i m/s och kan bestämmas genom att mäta flödesmängd per tidsenhet genom en viss tvärsnittsarea av materialet och vid känd hydraulisk gradient. Permeabilitetens förhållande till några olika jordarter illustreras i FIGUR 24.

### 2.2.2 Akviferbegreppet

Då en geologisk formation har porer och/eller sprickor med så stor mängd dränerbart vatten att den kan nyttjas för grundvattenuttag brukar den benämnas akvifer. Ungefär samma betydelse ligger i begreppet grundvattenmagasin.

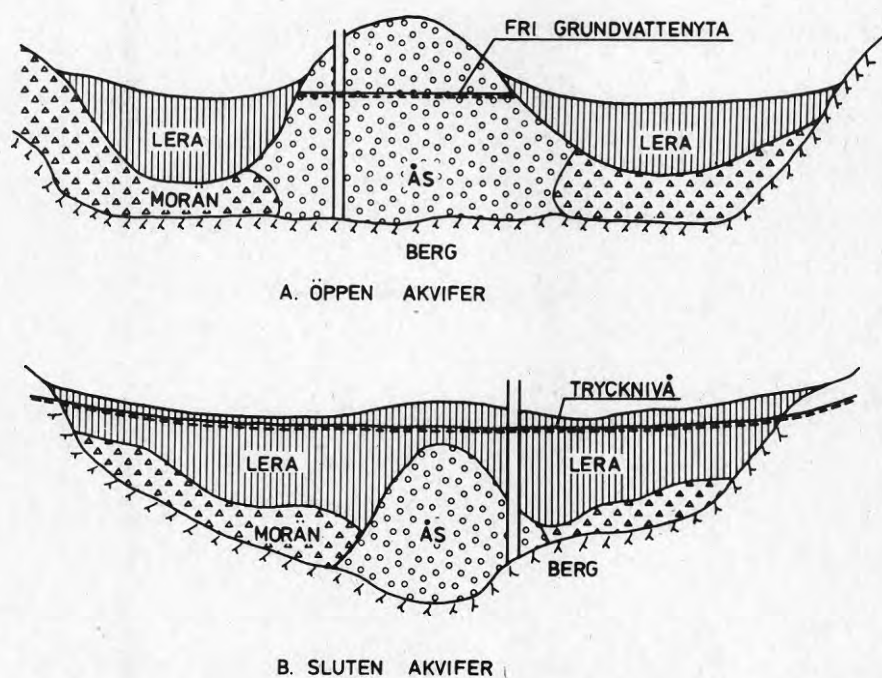
Beroende på om den geologiska formationen har porer eller sprickor skiljer man mellan porakvifer och sprickakvifer, eller en kombination av dessa, se FIGUR 25.



FIGUR 25 - Brunnar i olika por- och sprickakviferer  
 (Nordberg/Persson 1979)

Normalt kan betydligt större mängder vatten per magasinvolym hanteras i en porakvifer jämfört med sprickakviferen. Även brunnskapaciteten brukar vara avsevärt högre.

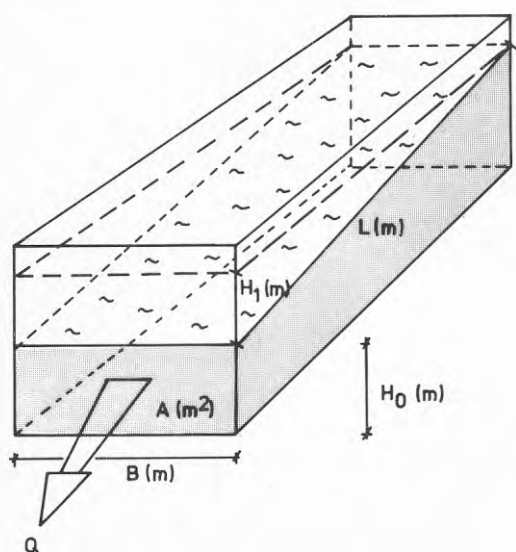
Akvifererna kan vara öppna eller slutna. En öppen akvifer begränsas uppåt av en fri grundvattenyta, medan den slutna akviferen står under tryck under ett tätande lager. Grundvattenytan består i det senare fallet av en trycknivå, se FIGUR 26.



FIGUR 26 - Öppen och slutna åsakvifer. Båda akvifer-typerna är vanligt förekommande i svenska dalgångar

### 2.2.3 Akviferens hydrauliska egenskaper

Genom geologisk kartläggning och provpumpning kan en given akvifer beskrivas hydrauliskt. Akviferens vattengenomsläpplighetsförmåga definieras i transmissiviteten (T) som ett mått på hur mycket vatten som vid en viss gradient kan flöda genom den vattenförande formationen och beräknas som summan av permeabiliteterna i den heterogent uppbyggda formationen. Härledning enligt Darcy's lag för ett homogent media framgår av FIGUR 27.



$$V = K \cdot I \quad (\text{Darcy's lag})$$

$$V = \frac{Q}{A} ; A = B \cdot H_0$$

$$I = H_1 / L$$

$$K = \frac{Q}{B \cdot H_0 \cdot I}$$

$$T = K \cdot H_0 \quad (\text{Transmiss def})$$

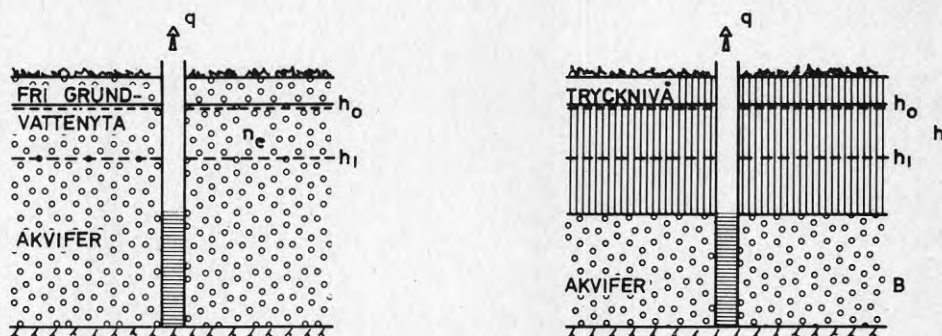
$$T = \frac{Q \cdot H_0}{B \cdot H_0 \cdot I}$$

$$T = \frac{Q}{B \cdot I}$$

FIGUR 27 - Transmissivitet i ett homogent media är en funktion av genomströmningsmängd genom viss yta och vid viss gradient

För att beskriva hur stor mängd vatten som per volymenhet kan lagras respektive tillföras en akvifer har magasinskoefficienten (S) definierats som en viktig akviferegenskap.

Magasinskoefficienten definieras som den vattenvolym som frigörs per horisontell ytenhet i en akvifer vid en enhetssänkning av dess grundvattenyta eller trycknivå under inverkan av tyngdkraften, se FIGUR 28.



A. ÖPPEN AKVIFER

B. SLUTEN AKVIFER

$$S_y = n_e$$

där

$n_e$  = dränerbar porvolym i % av total volym

$$S_a = B \rho g n (\alpha_p + \beta)$$

där

$\rho$  = densitet  
 $g$  = tyngdacceleration  
 $n$  = total porositet  
 $\alpha_p$  = kompressibilitet, porsystem  
 $\beta$  = kompressibilitet, vatten

För båda gäller

$$q \cdot t = \int_A S \cdot (h_0 - h) dA$$

FIGUR 28 - Magasinskoefficienten i öppen och sluten akvifer

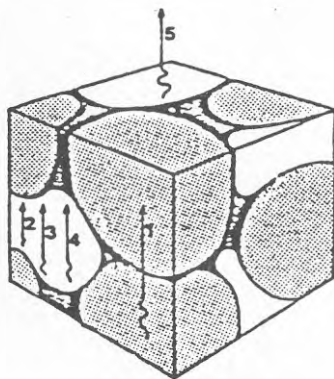
En avsänkning av trycknivån i en sluten akvifer innebär en betydligt mindre erhållen vattenmängd jämfört med motsvarande sänkning av den fria grundvattenytan i en öppen akvifer.

### 2.3 Jord- och berglagrens termiska egenskaper

Beroende på jord- och bergmaterialets geologiska uppbyggnad (mineralsammansättning, porositet, sprickighet, struktur, vattenhalt m m) besitter de också olika termiska egenskaper.

#### 2.3.1 Värmetransporten

För att ge ett mått på ett materials värmeöverförings-egenskaper används begreppet värmekonduktivitet. I en porös jord- eller bergmassa styrs värmeöverföringen av flera mekanismer varav FIGUR 29 visar några.



1. Ledning i jordpartiklar och vätska
2. Ledning i luft
3. Strålning från partikel till partikel
4. Diffusion av ånga
5. Konvektion i luft

FIGUR 29 - Principen för värmeöverföring i poröst icke vattenmättat material. I vattenmättat material tillkommer fri konvektion i vatten (efter Johansen 1975)

I kristallint tätt berg är värmeöverföringen främst en funktion av de i bergarten ingående mineralen. I exempelvis en granit har kvartsen ett högt konduktivitetsvärde medan fältspat och glimmer har betydligt lägre.

Värmekonduktiviteten brukar tecknas som ett  $\lambda$ -värde med sorten  $W/m^{\circ}C$ .

Generellt för jord- och bergmaterial gäller följande tumregler:

- I porösa vattenmättade material styrs konduktiviteten främst av porvolymens vatten och den fasta fasens kvartshalt.

$$\lambda = \lambda_1^n \cdot \lambda_2^{(1-n)} \quad (1)$$

där

$\lambda_1$  = vattnets värmekonduktivitet (0,57 W/m°C)

$\lambda_2 = 7,7^K \cdot 2,0^{(1-K)}$  där K = kvartshalt ( $\lambda_K = 7,7$ )

n = porositet

- I porösa icke vattenmättade material styrs konduktiviteten främst av porvolymens luft

$$\lambda = \lambda_L \cdot n^{-2,5} \quad (2)$$

där

$\lambda_L$  = luftens värmekonduktivitet (0,023 W/m°C)

n = porositet

- I ickeporösa material, främst kristallina bergarter, styrs värmekonduktiviteten av de i materialet ingående mineralkomponenterna.

För eruptiva djupbergarter gäller:

$$\lambda = \lambda_1^K \cdot \lambda_2^{FG} \cdot \lambda_3^{[1-(K+FG)]} \quad (3)$$

där

K = kvartshalt ( $\lambda_K = 7,7$  W/m°C)

FG = fältspat- och glimmerhalt ( $\lambda_{FG} \approx 2,0$  W/m°C)

$\lambda_3$  = övriga mineral ( $\lambda_o \approx 3,0$  W/m°C)

För kalksten gäller:

$$\lambda = \lambda_1^{\text{Ca}} \cdot \lambda_2^{1-\text{Ca}} \quad (4)$$

där

Ca = kalkhalt

$\lambda_{\text{Ca}} = 3,6 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

$\lambda_2 \approx 3,0 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

För sprickakviferer gäller:

$$\lambda = \lambda_1^{\text{M}} \cdot \lambda_2^n \quad (5)$$

där

$\lambda_1^{\text{M}}$  = bergartens  $\lambda$  enligt ekv (3) eller (4)

$\lambda_2$  = vattnets värmekonduktivitet ( $0,57 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ )

n = sprickporositet

Slutligen skall nämnas att organiska jordarter (torv, gyttja, dy etc) har starkt avvikande egenskaper jämfört med berg och mineraljordar. På grund av dessa jordarters normalt sett höga vattenhalter ligger  $\lambda$ -värdena nära eller strax över  $\lambda$ -värdet för vatten ( $0,6-1,0 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ).

### 2.3.2 Värmelagringen

Då man vill uttrycka hur mycket värme som per volymenhet kan lagras i ett material används begreppet värmekapacitivet (C). Liksom tidigare beskrivits vad avser värmekonduktiviteten är lagringskapacitivet beroende av lagringsmediets sammansättning och vattenhalt.

Även om vissa skillnader finns mellan olika mineralers lagringskapacitet kan de approximativt sättas likvärda ( $\sim 0,8 \text{ J/g}^\circ\text{C}$ ). Större betydelse har vattenhalten ( $4,2 \text{ J/g}^\circ\text{C}$ ).



Om värmekapacitiveteten multipliceras med materialets volymvikt erhålles värmekapacitet  $\rho c$  med sorten  $J/m^3 \cdot ^\circ K$ .

För ett poröst vattenfyllt medium kan denna beräknas som

$$\rho c = C_1 \cdot \rho_1 \cdot n + C_2 \rho_2 (1-n) \quad (6)$$

där

$\rho_1$  = vattnets densitet ( $kg/m^3$ )

$\rho_2$  = bergartens densitet ( $kg/m^3$ )

$C_1$  = vattnets värmekapacitivetet ( $J/kg^\circ K$ )

$C_2$  = bergartens värmekapacitivetet

$n$  = porositet

För ett delvis luftfyllt system med vattenhalten,  $w$ , erhålles

$$\rho c = C_1 \cdot \rho_1 \cdot w + C_2 \rho_2 (1-n) + C_3 \rho_3 (n - \rho \cdot w / \rho_1) \quad (7)$$

där

$\rho_3$  = luftens densitet ( $kg/m^3$ )

$C_3$  = luftens värmekapacitivetet ( $J/kg^\circ K$ )

Organiska jordarter som torv, gyttja och dy har på grund av extremt hög vattenhalt i vattenmättat tillstånd en värmelagringsförmåga som ligger nära vattnets, vanligen 3-4  $J/g^\circ C$ .

### 3 SYSTEM FÖR VÄRMEVÄXLING MED MARK

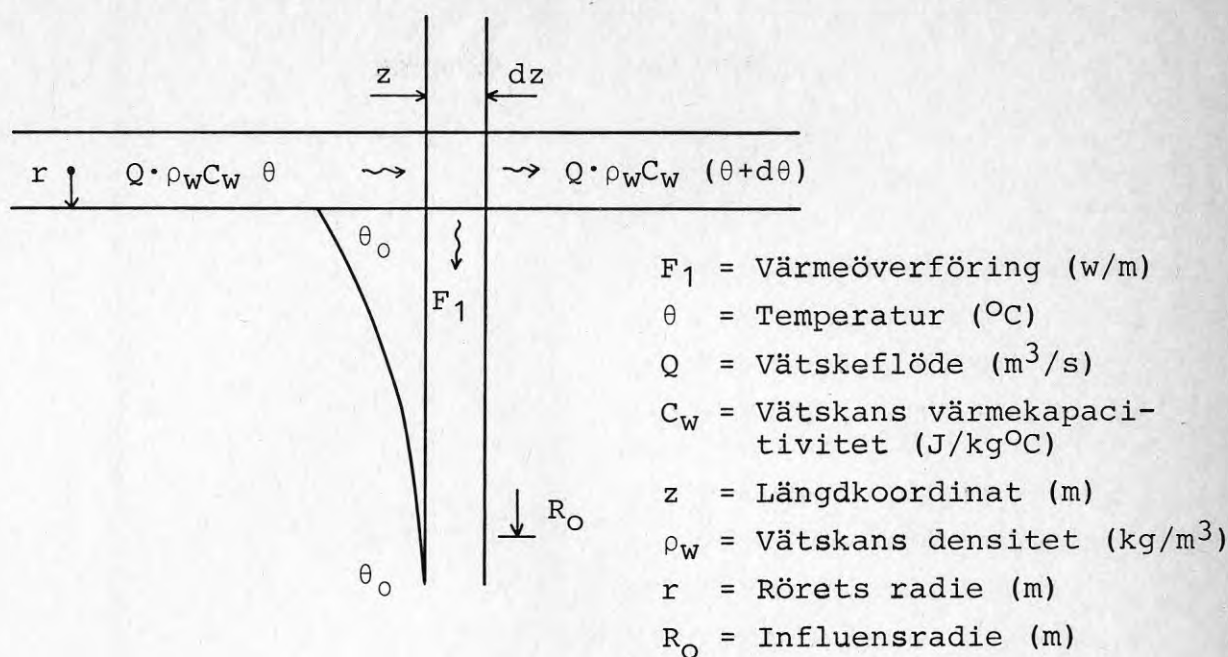
Med markvärmväxling menas system där marken och dess beskaffenhet är av avgörande betydelse för de förlopp som uppträder vid inlagring, lagringstid samt uttag. Man kan skilja mellan två principiella system

- värmväxling med mark under markytan, där värmeöverföring till och från marken sker konduktivt genom vätskeburet rörsystem, konduktiv värmeöverföring,
- värmväxling med mark under markytan där värmeöverföringen till och från marken sker hydrauliskt i brunns- eller rörsystem med vatten som värmebärare, hydraulisk värmeöverföring

#### 3.1 System med konduktiv värmeöverföring i rör eller slang

##### 3.1.1 Teoretisk bakgrund

Då en varm vätska cirkulerar i ett nedgrävt rörsystem överförs värme konduktivt till den omgivande marken. Hur stort värmeflödet blir bestäms av bl a den hastighet varmed vätskan cirkuleras, temperaturnivå vätska-omgivning, rörets dimension samt rörmateriallets och marklagrens termiska egenskaper, FIGUR 30.



FIGUR 30 - Konduktiv värmeöverföring ( $F_1$ ) från rör eller slang till omgivande marklager

Med hänvisning till FIGUR 30 kan värmeförlusten  $F_1$  från röret bestämmas som

$$F_1 = -Q \cdot \rho_w \cdot C_w \cdot \frac{d\theta}{dz} \quad (8)$$

Dessa förluster motsvaras av ett radiellt värme-flöde från röret. Om temperaturhöjningen når avståndet  $R_0$  ut i marken gäller följande samband:

$$\theta_0 - \theta = \frac{-F_1 dz}{2\pi\lambda dz} \ln \frac{R_0}{r} \quad (9)$$

Om ekv (8) och (9) sammansätts erhålles:

$$\theta_0 - \theta = \frac{Q\rho_w C_w \cdot \frac{d\theta}{dz}}{2\pi\lambda} \cdot \ln \frac{R_0}{r} \quad (10)$$

sätt

$$\alpha = \frac{Q \rho_w C_w \cdot \ln R_o/r}{2\pi\lambda} \quad (11)$$

där

$\alpha$  är hjälpvariabel (m) vilket ger

$$\theta + \alpha \frac{d\theta}{dz} = \theta_o \quad (12)$$

med följande lösning

$$\theta = \theta_1 e^{-z/\alpha} + (1 - e^{-z/\alpha}) \theta_o \quad (13)$$

Om  $L$  = rörets längd, erhålles

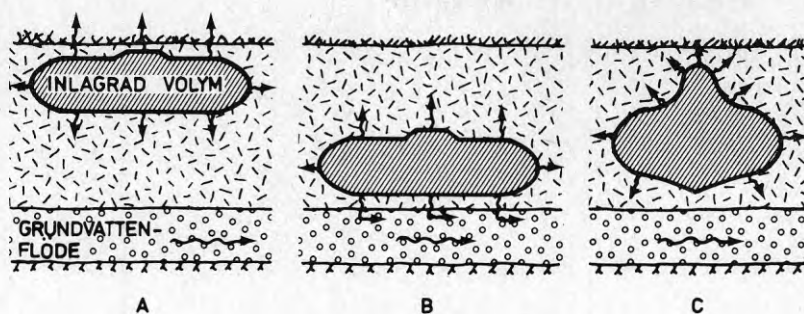
$$\theta_L = \theta_1 e^{-L/\alpha} + (1 - e^{-L/\alpha}) \theta_o \quad (14)$$

Det är sålunda möjligt att med hjälp av beräkningsmodeller optimera flödes- och temperaturparametrar i förhållande till marklagrens värmeledningsförmåga.

### 3.1.2 Tillämpningen

När väl värmen överförs till marklagret måste hänsyn tas till randvillkoren som i detta fall utgöres av lagervolymens geometri och omgivningens värmeledande egenskaper.

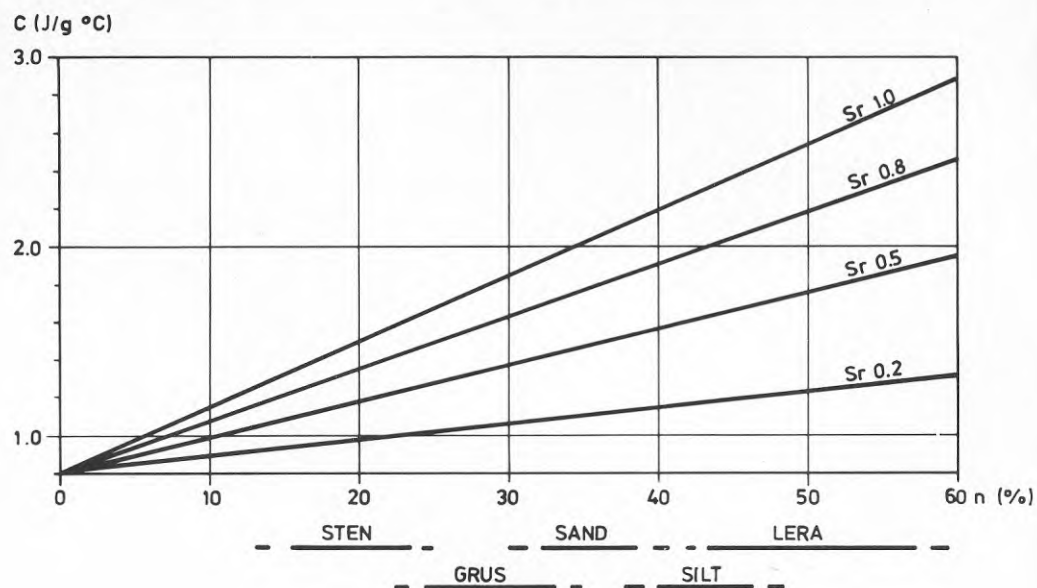
Randvillkoren är viktiga främst för värmeförlustens storlek under lagringstiden. Särskilt stor roll spelar avståndet till markytan liksom geometrin i förhållande till markyteplanet. Betydelsefullt är också hur lagret förhåller sig till naturligt grundvattenflöde, FIGUR 31.



FIGUR 31 - Markytan och grundvattenflödet inverkar på värmeförlusterna från en lagervolym

- A Stora förluster till markytan
- B Stora förluster till förbi-flödande grundvatten
- C Förlusterna minimerade med rätt placerat lager och avpassad geometri

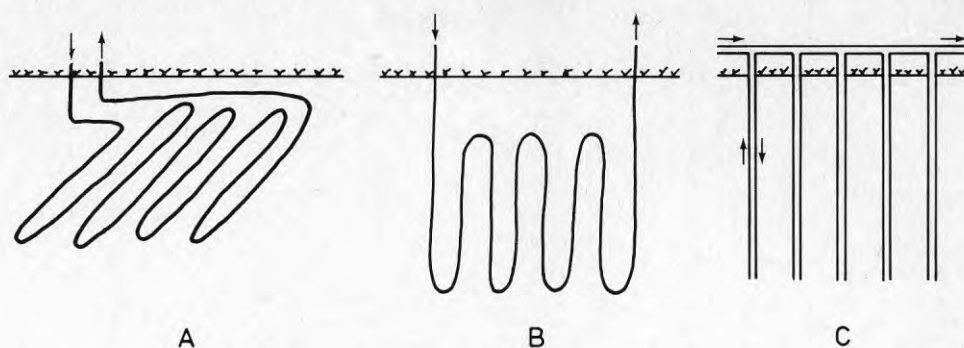
Hur mycket värme som per volymenhet lagringsmedia kan lagras bestäms av värmekapacitiveteten ( $C$ ). Eftersom minerogent material i stort sett har likvärdig lagringsförmåga ( $\sim 0,8 \text{ J/g}^\circ\text{C}$ ) har jordens eller bergets vattenhalt avgörande betydelse ( $C_w = 4,2 \text{ J/g}^\circ\text{C}$ ), FIGUR 32.



FIGUR 32 - Ett minerogent materials teoretiska värmekapacitivitet ( $C$ ) som funktion av porositet ( $n$ ) och vattenmättnadsgrad ( $Sr$ )

Som framgår av figuren har finkorniga sediment, i första hand lera, den största värmelagringsförmågan. Även silt och finsand har betydande kapacitet, i vart fall i vattenmättat tillstånd, men eftersom permeabiliteten ökar med ökad kornstorlek ökar risken för förluster pga grundvattenflöden då man går uppåt i fraktionerna.

Det är därför inte oväntat att just lerjordarna rönt störst uppmärksamhet som lagringsmedium. Förekomsten av lerjordar i tätbefolkade delar av Sverige är dessutom stor. I princip tre system för utformning föreligger, FIGUR 33.

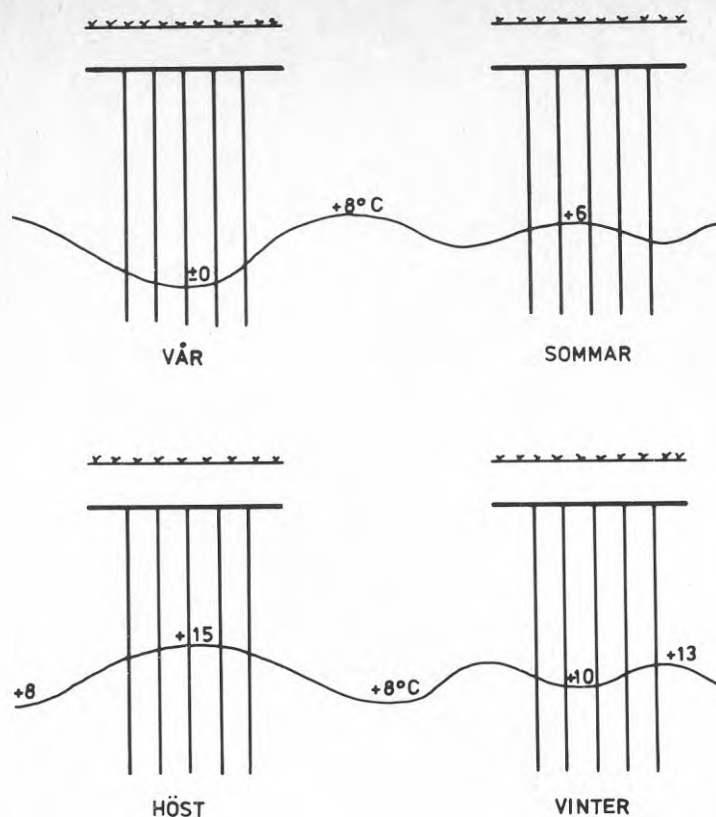


FIGUR 33 - Värmeväxlingens principiella utformningar

- A Horisontalt liggande rørslinga strax under markyta
- B Vertikalt nedtryckt rørslinga
- C Vertikalt drivna dubbelmantlade rör i knippe

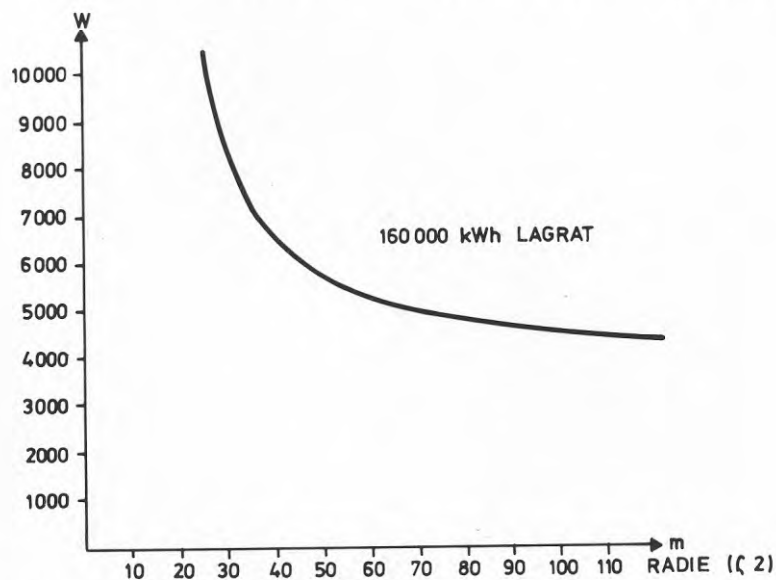
Alternativen B och C ger mindre värmeförluster till markytan än A. Alternativ B förutsätter relativt löst lagrad lera medan de båda andra är tillämpbara även i andra jordarter, alternativ C även i berg, men då som borrhål.

Enligt Modin (1979) fås den lämpligaste formen för värmeackumulatören med vertikala rör ordnat i knippen med cylindrisk form sett ovanifrån. Genom att i första hand utnyttja cylinderns centrum för in- och uttag hålls en buffert med relativt sett lägre temperatur mot omgivningen, FIGUR 34.



FIGUR 34 - Lågtemperaturackumulatorns driftsförhållande under årets olika årstider (efter Modin 1979)

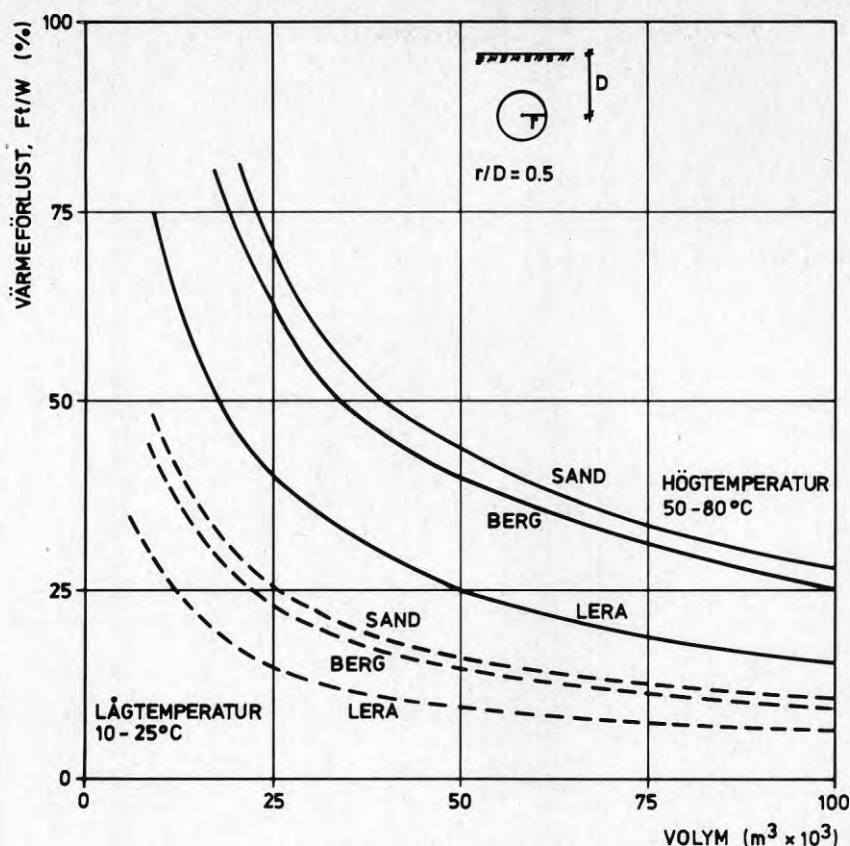
Akkumulatorns storlek är av stor betydelse för värmeförlustens storlek. Volymsberoendet visas i FIGUR 35.



FIGUR 35 - Akkumulatorns förluster till omgivande mark vid varierande avstånd till normal ( $8^{\circ}\text{C}$ ) marktemperatur i lera (efter Modin 1979)



Samma sak gäller för lagring i andra material än lera,  
FIGUR 36.



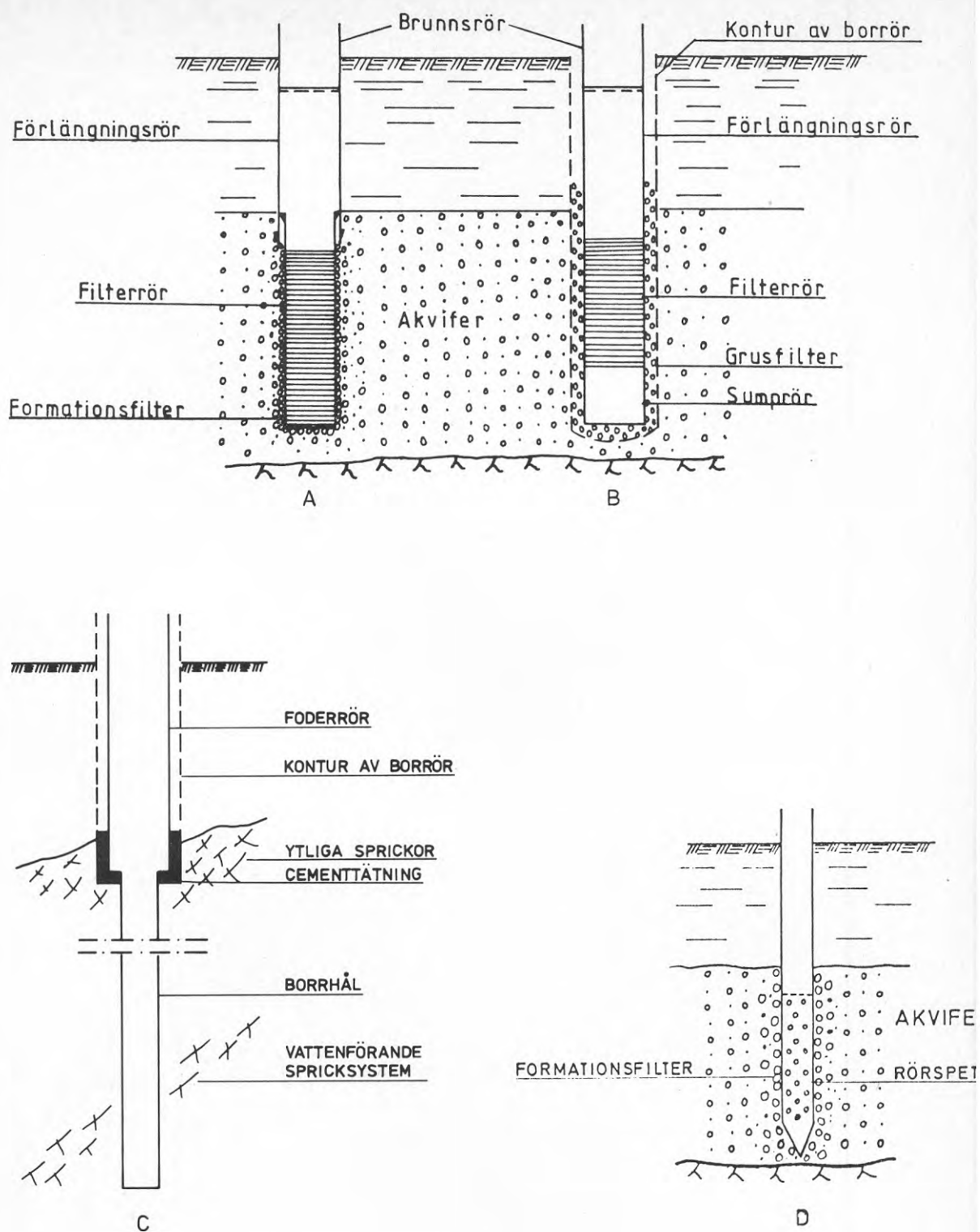
FIGUR 36 - Värmeförlusternas volymsberoende i olika material (efter Gustafson 1979)

Här ses också hur värmeförlusterna är beroende av temperaturnivåerna. Det är alltså förhållandevis gynnsammare att ur värmeförlustsynpunkt lagra vid låga temperaturer.

### 3.2 System för hydraulisk värmeöverföring med brunnar

#### 3.2.1 Brunnens funktion

Genom brunnar kan vätska från- resp tillföras en geologisk formation. Detta sker genom pumpning eller injicering. I det förstnämnda fallet fås en hydraulisk trycksänkning som sprider sig radiellt ut från brunnen och i det senare fallet en tryckhöjning. Själva brunnen utgör den hydrauliska kontakten med formationen och det är således genom brunnen som värmeöverföringen hanteras och kontrolleras. Beroende på rådande geologiska och hydrauliska förhållanden utformas brunnar olika. Figur 37 visar några vanliga brunnstyper i vårt land.

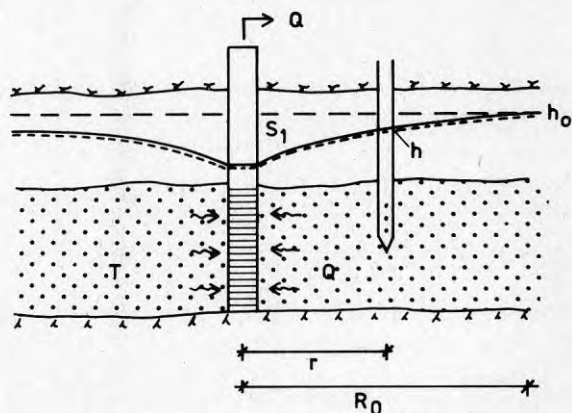


FIGUR 37 - Några vanliga brunnstyper

- A och B Grusfilterbrunnar
- C Bergborrad brunn
- D Enkel rörspetsbrunn

### 3.2.2 Formationsanalys genom provpumpning

Den kapacitet varmed en vätska kan till- och frånföras en formation genom brunnen bestäms främst av formationens hydrauliska egenskaper. Detta förutsätter att brunnen anpassats till formationen. Genom att utföra provpumpningar kan dessa parametrar beräknas. En provpumpning innebär att man bortför en bestämd mängd vätska per tidsenhet,  $Q$ , samtidigt som man mäter den hydrauliska trycksänkningen,  $s$ , i brunnen och i formationen.



FIGUR 38 - Avsänkningen i ett slutet grundvattenmagasin

Trycksänkningen i formationen mäts i  $s$  k observationsrör vilka är placerade på känt avstånd,  $r$ , från brunnen, FIGUR 38.

När en brunn pumpas kommer grundvattennivån kring och i brunnen att avsänkas. Avsänkningen,  $s$ , är störst i brunnen och på tillräckligt avstånd,  $R_0$ , kan ingen avsänkning märkas. Då avsänkningen är störst i brunnen kommer enligt Darcy's lag vatten att flöda mot denna. Vid stationära förhållanden kommer flödet mot brunnen genom en tänkt cylinder kring denna alltid att vara lika med den uppumpade vattenmängden,  $Q$ .

Av Darcy's lag följer då att gradienten är omvänt proportionell mot radien, vilket i sin tur medför att avsänkningstratten blir brantare ju närmare brunnen man kommer.

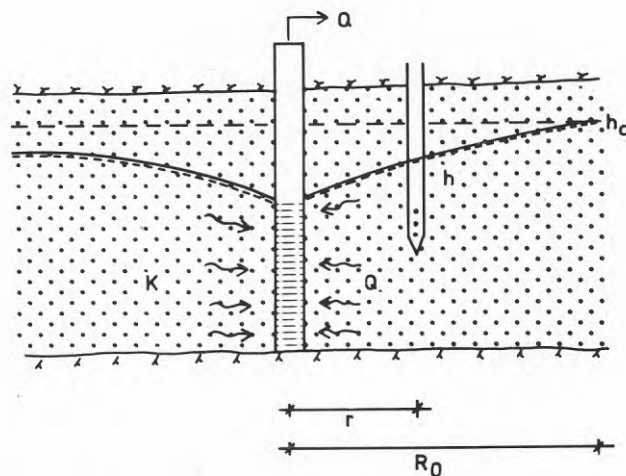
Man kan också, med utgångspunkt från Darcy's lag, visa att avsänkningstratten blir brantare ju lägre transmissivitet (se avsnitt 2.2) formationen har. I klartext innebär detta att ju sämre genomsläpplighet formationen har, ju större blir avsänkning.

I ett slutet grundvattenmagasin (avsnitt 2.2) styrs således pumpningskapaciteten,  $Q$ , av bl a avsänkningens storlek,  $s$ , och formationens genomsläpplighet,  $T$ . Följande samband råder, se FIGUR 38, enligt Thiem:

$$s = h_0 - h = \frac{Q}{2\pi T} \cdot \ln \frac{R_0}{r} \quad (14)$$

Denna ekvation förutsätter att sk stationära förhållanden råder, dvs att avsänkningstratten har nått sin maximala utbredning.

I ett öppet grundvattenmagasin (se avsnitt 2.2) utnyttjas akviferen ända upp till grundvattennivån. Detta medför att transmissiviteten minskar när nivån sänks. Detta fall kan lösas om permeabiliteten är likformigt fördelad över akviferen, dvs  $T_0 = K \cdot h_0$ . Vidare antages att flödet är horisontellt, vilket inte helt stämmer intill brunnen.



FIGUR 39 - Avsänkning i ett öppet grundvattenmagasin

Följande samband råder:

$$s = h_0^2 - h^2 = \frac{Q}{\pi K} \cdot \ln \frac{R_0}{r} \quad (15)$$

Det skall uppmärksammas att ekvationerna (14-15) gäller för stationära tillstånd, dvs då avsänkningstratten nått sin maximala utbredning för ett bestämt Q-värde.

Under icke-stationära förhållanden, dvs trattens utbredning i tid och rum, medtages avsänkingsförloppet i flödesekvationerna.

Förutsatt att vissa villkor avseende magasinets randvillkor är uppfyllda gäller följande ekvation:

$$s = h_0 - h = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-x}}{x} dx = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (16)$$

$W(u)$  benämnes oftast Theis' brunnsfunktion där  $u$  är en dimensionslös hjälpvariabel och tecknas

$$u = \frac{r^2 \cdot S}{4T \cdot t} \quad (17)$$

där

$r$  = radien till observationspunkten

$S$  = magasinskoefficienten (avsnitt 2.2)

$t$  = pumptiden

Ekvation (15) kan serieutvecklas med avseende på  $u$  enligt

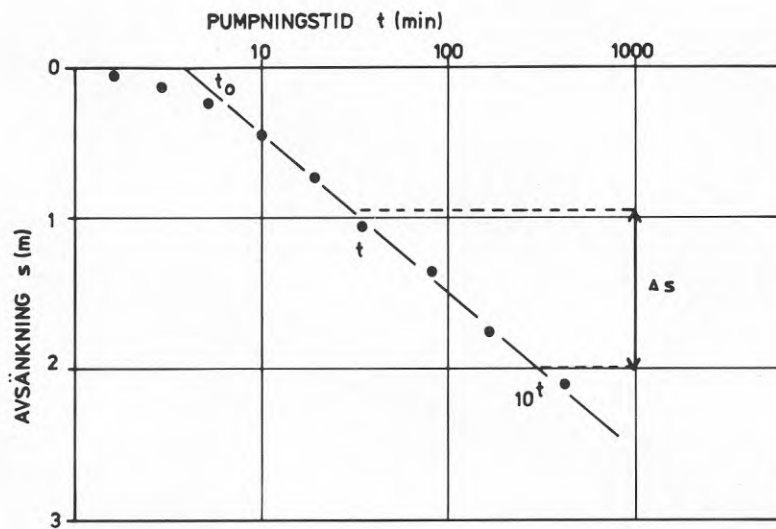
$$W(u) = -0,5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2} + \frac{u^3}{3 \cdot 3} \quad (18)$$

Om  $u$  är litet, dvs för små radier eller långa pumpningstider får endast de två första termerna någon betydelse. Detta är som regel alltid fallet i och nära brunnen och brunnsfunktionen kan förenklas till:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} (-0,5772 - \ln u), \quad u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (19)$$

$$u < 0,05$$

En mätserie i brunnen under en pumpning kommer således att beskriva en rät linje i halvlogaritmisk avbildning, FIGUR 40.



FIGUR 40 - Tid-avsänkning vid pumpning. Halvlogaritmisk avbildning

Om tiden mätes i minuter kan ekvation (19) skrivas som:

$$s = 0,183 \frac{Q}{T} \log \frac{135 T t}{r^2 S} \quad (20)$$

Vid tiden  $10 t$  är avsänkningen:

$$s_{10} = 0,183 \frac{Q}{T} \log \frac{135 T \cdot 10 t}{r^2 S} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \Delta s = s_{10} - s &= 0,183 \frac{Q}{T} \left( \log \frac{1350 T t}{r^2 S} - \right. \\ &\quad \left. - \log \frac{135 T t}{r^2 S} \right) \quad (22) \end{aligned}$$

eller

$$T = 0,183 \frac{Q}{\Delta s}$$

Vid tiden  $t_0$  är avsänkning noll eller:

$$0 = \log \frac{135Tt_0}{r^2S} \quad (24)$$

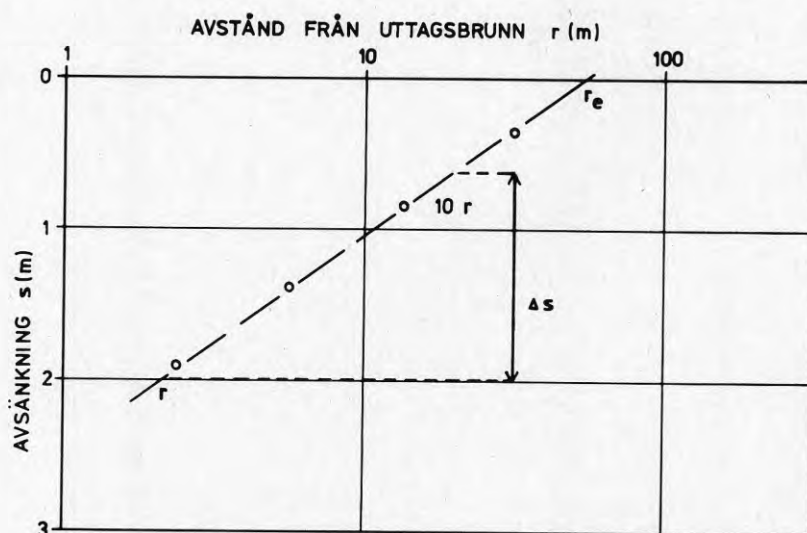
$$S = \frac{135 T t_0}{r^2} \quad (25)$$

Ekvation (25) kan utnyttjas för att beräkna ett approximativt värde för influensradien (avsänkningstrattens utbredning) vid varje tidpunkt:

$$R_0 \approx \sqrt{\frac{135Tt}{S}} \quad (26)$$

Om data från flera observationsrör på olika avstånd från uttagsbrunnen föreligger kan dessa utnyttjas för att bestämma magasinparametrarna,  $T$  och  $S$ , se avsnitt 2.2.

Ett avstånd-avsänkingsdiagram visas i FIGUR 41.



FIGUR 41 - Avstånd-avsänkning, halvlogaritmisk avbildning

Ekvation (20) ger:

$$\Delta s = s_r - s_{10r} = 0,183 \frac{Q}{T} \left( \log \frac{135Tt}{r^2 S} - \log \frac{135Tt}{100r^2 S} \right) = 0,366 \frac{Q}{T} \quad (27)$$

$$T = \frac{0,366Q}{\Delta s} \quad (28)$$

På avståndet  $r_e$  är avsänkningen noll:

$$0 = \log \frac{135Tt}{r_e^2 S} \quad (29)$$

$$S = \frac{135Tt}{r_e^2} \quad (30)$$

Det är således möjligt att med relativt kortvariga prov-pumpningar dels beräkna en formations hydrauliska egenskaper men också kunna göra en beräkningsprognos av vilka flöden det går att arbeta med liksom den del av magasinet som påverkas av uttag eller injicering. Sådana frågeställningar är centrala då varmvatten skall tillföras, lagras och åter tas ut under kontrollerade former.

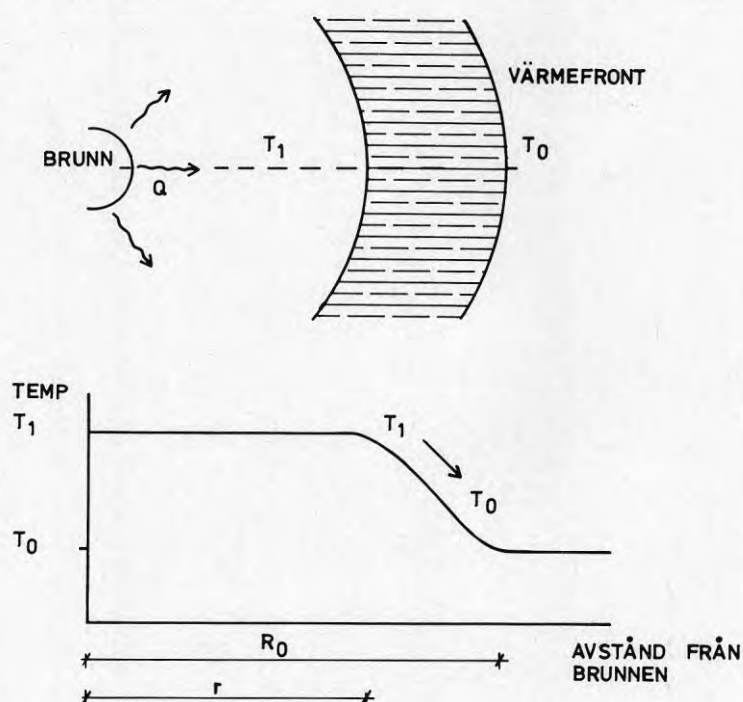
### 3.3.3 Värmeöverföringen till och från formationen (termohydrauliska förlopp)

Om man genom en brunn skall överföra varmt vatten till eller från en porös formation måste en flödesgradient skapas. Detta sker via pumpning eller injicering. De hydrauliska förloppen och hydrogeologiska förutsättningar här för har behandlats i föregående avsnitt och vi skall nu se på värmeöverföringsprocesserna.

Vid både inlagring och uttag sker en värmeöverföring mellan det vatten som flödar i porerna och det fasta materialet. Detta innebär i praktiken att en sektion runt en brunn successivt värms respektive kyls då vätskan passerar förbi. Till slut uppnås ett läge då vätskan



och de fasta partiklarna har samma temperatur varvid värmeutbytet upphör. Hur fort detta sker är bl a beroende av aktuella temperaturnivåer, flödes hastighet, porositet och de olika mediernas termiska egenskaper. Detta leder till att man radiellt från brunnen får en diffus värmefront som flyttar sig i tiden med en hastighet som bestämmes främst av flödet och avståndet till brunnen, FIGUR 42. Om flödet till eller från brunnen hålls konstant minskar frontens hastighet med ökad radie.



FIGUR 42 - Delar av brunn sedd ovanifrån jämte temperaturprofil i snitt.

Under injektion med temperaturen  $T$  utbildas en värme-  
front med temperaturen  $T_1 - T_0$ . Hur bred fronten blir,  
 $R_0 - r$ , bestämmes främst av flödesmängden  $Q$  och avståndet  
till brunnen  $R_0$ .

De värmeöverförande processerna sker således i värme-  
fronten. Dessa är dock komplexa och inte helt kända. I  
sin enklaste form kan värmeutbytet skrivas som:

$$F = b \cdot (T_s - T_f) \quad (31)$$

där

$T_s$  = fasta materialets temperatur

$T_f$  = vätskans temperatur

$b$  = värmeöverföringskoefficient

Själva värmetransporten sker genom flera samverkande mekanismer där konvektion och dispersion spelar störst roll.

Hastigheten varmed värmefronten ( $V_F$ ) rör sig står i ett visst förhållande till den hastighet varmed vattnet flödar ( $V_W$ ) vilket kan skrivas:

$$\frac{V_W}{V_F} = 1 + \frac{1-n}{n} \cdot \frac{C_s \cdot \rho_s}{C_W \cdot \rho_W} \quad (32)$$

där

$n$  = porositet

$C_s$  = värmekapacitivet för fast material

$C_W$  = värmekapacitivet för vatten

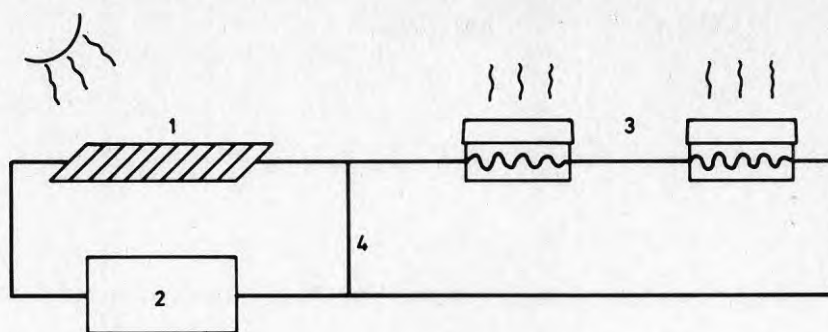
$\rho_s$  = densitet för fast material

$\rho_W$  = densitet för vatten

För de flesta sand- och grusformationer fås att  $V_W \approx 2 V_F$ , vilket innebär att vattenhastigheten genom värmefronten är ungefär dubbel mot värmefrontens egen hastighet.

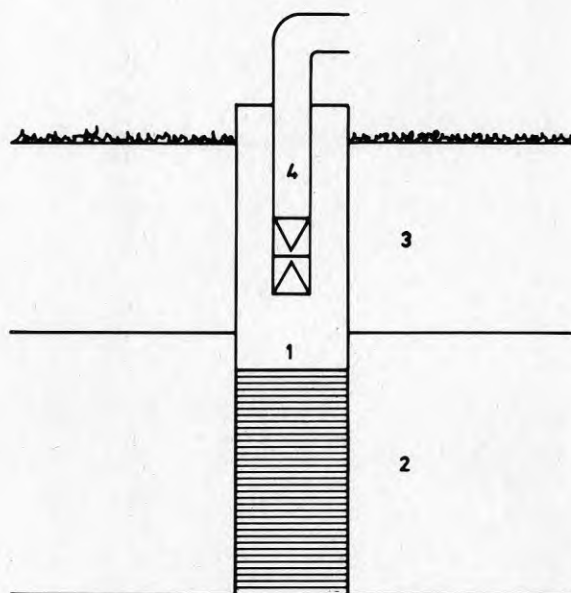
#### 3.3.4 Några olika systemlösningar

Ett system för värmelagring inbegriper en rad olika delfunktioner. Primärt finns ett ovanjordsystem bestående av i princip fyra huvudkomponenter, nämligen värmekällan, värmecentralen, abonnenten och distributionssystemet, FIGUR 43.



FIGUR 43 - Ovanjordssystemets huvudkomponenter  
 1 Värmekällan, 2 Värmecentral  
 3 Abonnenter, 4 Distributionsnät

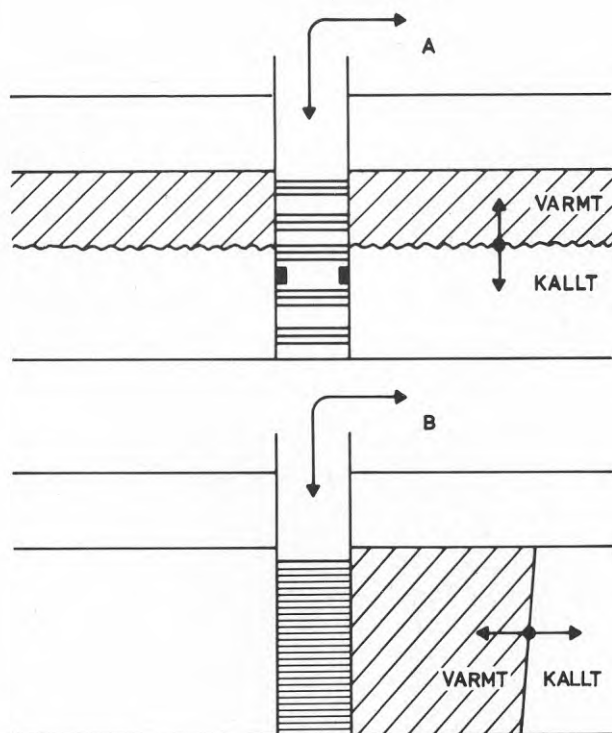
Ovanjordssystemets hjärta är värmecentralen. Här regleras systemet avseende flöden, temperaturnivåer etc. Det är också till värmecentralen som lagringssystemet kopplas. Vid aktuell marklagring kan detta betecknas som underjordsystem, vars komponenter framgår av FIGUR 44.



FIGUR 44 - Underjordsystemets huvudkomponenter  
 1 Brunn, 2 Lagringsaktiv formation  
 3 Isolerande formation, 4 Distribu-  
 tionssystem

Vi skall här koncentrera oss på underjordsystemet och betrakta några möjliga alternativ för hur ett sådant kan utformas. Vi skall vidare bortse från varianter som kan uppkomma till följd av komplexa hydrogeologiska förhållanden och endast beröra de principiella systemlösningarna.

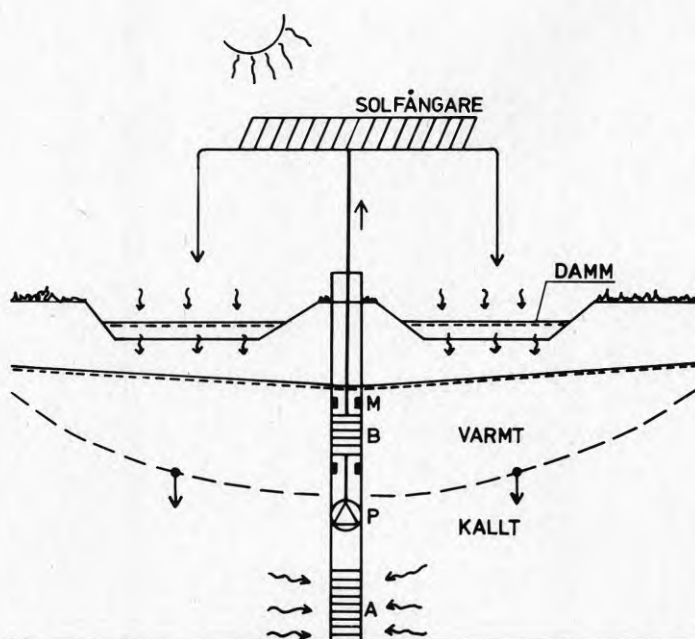
Det finns då två huvudprinciper enligt vilka det varma vattnet kan till- och fränföras formationen. Det ena fallet är genom horisontell förflyttning av värmefronten och det andra genom vertikal sådan, FIGUR 45.



FIGUR 45 - Horisontell (A) och vertikal (B) värmefrontsförflyttning i porös formation. I stället för vertikal brunn för alternativ A kan horisontella dränrör eller liknande användas

Den horisontella varianten kräver en mer avancerad brunnsteknisk lösning än den vertikala. Vidare kan värmeförlusten förväntas bli högre till följd av stor kontaktyta uppåt. Å andra sidan fås en stabil termisk skiktning. I fallet med vertikal temperaturfront kommer förr eller senare den termiska instabiliteten leda till sk konvektion vilket innebär att det varma vattnet strävar efter att uppnå en horisontell skiktning. Denna process som är tidsberoende innebär ett av problemområdena vid akviferlagring (se avsnitt 4.4). De försök med lagring i akviferer som gjorts utomlands pekar mot att vertikal temperaturfront är att föredra vid de lagringstider som är aktuella. Detta är också inriktningen på den fortsatta forskningen.

Även om horisontallagringen har vissa appliceringar i öppna grunda akviferer - en tänkbar sådan visas i FIGUR 46 - skall huvudintresset här inriktas på den vertikala lagringen.

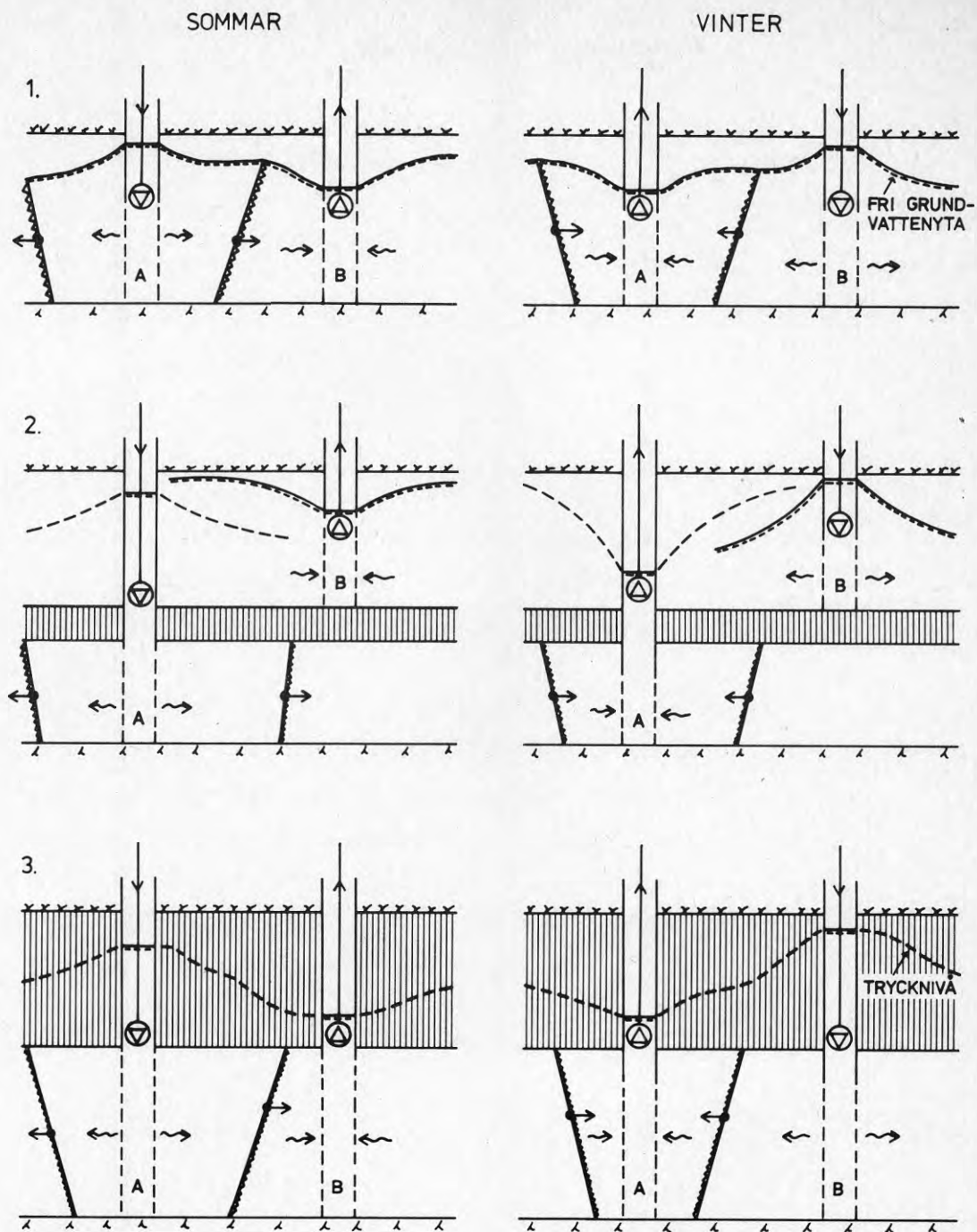


FIGUR 46 - Horisontell inlagring av soluppvärmt vatten genom infiltration i damm till en öppen porakvifer. Vid inlagring tas vatten för uppvärmning från akviferens undre del via brunnfilter A. Vid uttag vintertid nyttjas filter B. M = manschett, P = pump (høj- och sänkbar)

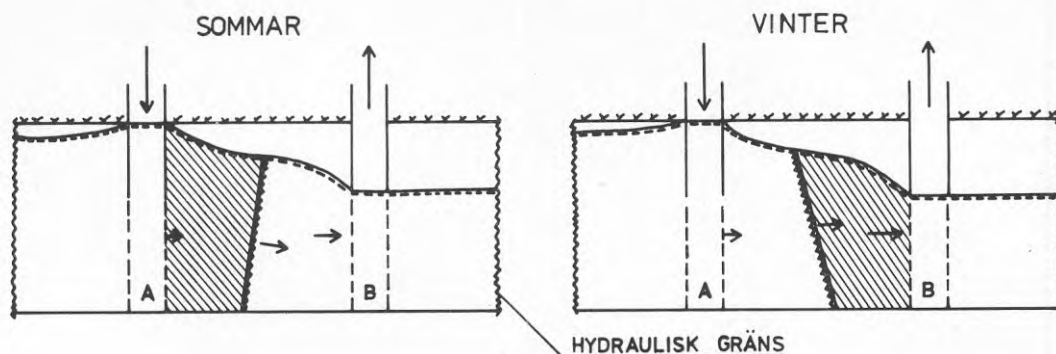
Samma figur får illustrera hur man med hjälp av en brunn kan lagra och återvinna värme. Skillnaden blir att dammarna tas bort och brunnen kompletteras tekniskt så att uttag ur företrädesvis nedre brunnsfiltret (A) kan ske samtidigt som inlagringen i formationen genom det övre filtret (B). Vid uttag råder det omvända förhållandet. Istället för en horisontell förflyttning av värmefronten nedåt/uppåt, som i figuren, fås en förflyttning i sidled.

I princip samma system kan tillämpas med brunnsfunktionen uppdelad i två eller flera brunnar. FIGUR 47 visar några tvåbrunnssystem i olika akviferer vid sommar- och vinterperiod. Man skall här lägga märke till hur lagringen kan styras hydrauliskt i det fall båda brunnarna är nedförda i samma formation. Denna systemlösning innebär en dubbellagring, en högtemperaturlagring via brunn 1 och en lågtemperaturlagring via brunn 2. Genom den sistnämnda lagras returvattnen från radiatorer. Systemet fordrar brunnar som konstruerats så att både pumpning och injektering kan utföras.

Ett annat tvåbrunnssystem går ut på att låta det varma vattnet strömma från en injektionsbrunn till en uttagsbrunn, FIGUR 48.



FIGUR 47 - Tvåbrunnssystem för lagring och uttag av varmvatten i öppen (1), öppen och sluten (2) samt sluten akvifer (3). Figurerna visar schematiskt situationen under sommar (vänster) och vinter (höger). Värmefronten kontrolleras hydrauliskt. Runt brunn A lagras högtemperaturvatten (från solfångare) och runt brunn B lågtempererat vatten (retur från radiatorer)



FIGUR 48 - Lagring via genomströmning. Under sommaren injiceras varmvatten i brunn A, samtidigt som vatten för uppvärmning tas ur brunn B. Vid vintersäsongens början har värmefronten nått brunn B som då börjar producera varmt vatten. Returvattnet injiceras i brunn A.

Denna systemlösning ställer stora krav på kunskap om formationens hydrauliska egenskaper så att uttagsbrunnen hamnar på rätt avstånd från injektionsbrunnen. Vidare fordras för att värmeförlusterna skall hållas inom rimlig nivå att magasinet är avgränsat hydrauliskt som figuren visar.



#### 4 AKVIFERLAGRINGENS FRÅGESTÄLLNINGAR OCH PROBLEMOMRÅDEN

Beroende på lagringsbehovets storlek, rådande hydrogeologiska förhållanden och yttre förutsättningar kommer varje projektering med akviferlagring att få anpassad utformning. Några av frågeställningarna och problemområdena som då måste beaktas behandlas översiktligt i detta kapitel.

##### 4.1 Den hydrogeologiska kartläggningen

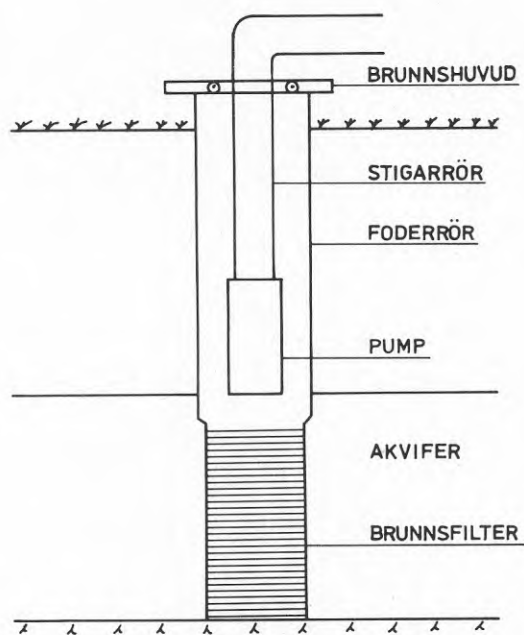
Även om en ur energilagringssynpunkt gynnsam formation i och för sig kan vara lokalisering för exempelvis en byggnadsplanering måste man tills vidare utgå ifrån att lagringsbehovet redan är knutet till ett geografiskt begränsat område. Detta innebär att den första undersökning som behövs för ett med byggnadsplan fastställt område är en utredning av rådande geologiska och hydrogeologiska förhållanden. Sättet varpå sådana utredningar bör göras överensstämmer i stort med konventionell metodik för grundvattenprospektering. I korthet innebär denna följande moment:

- genomgång av geologiskt kartmaterial
- flygbildsrekognosering
- fältkontroll med brunnsinventering
- upprättande av hydrogeologisk karta
- rekognoseringsborrning
- anläggning av provisorisk, alternativt permanent brunn
- provpumpning med kemisk-fysikalisk magasinsanalys
- utvärdering och beskrivning av akviferen

På grundval av framkomna resultat kan sedan ett lagringssystem projekteras med en eller flera brunnar.

#### 4.2 Brunnsbyggandet

Brunnar nedförda i porakviferer görs i två steg. Det första består av själva håltagningen vilket sker med någon form av borrhning. Det andra utgör byggandet av brunnen vari ingår brunnsfilter för kontakt med formationen, foderrör för utestängning av ovanliggande formation(er) samt anordning för pumpning och injektering av vattnet (vanligen dränkbar pump med stigarrör upphängt i foderröret), FIGUR 49.



FIGUR 49 - Exempel på brunnskomponenter

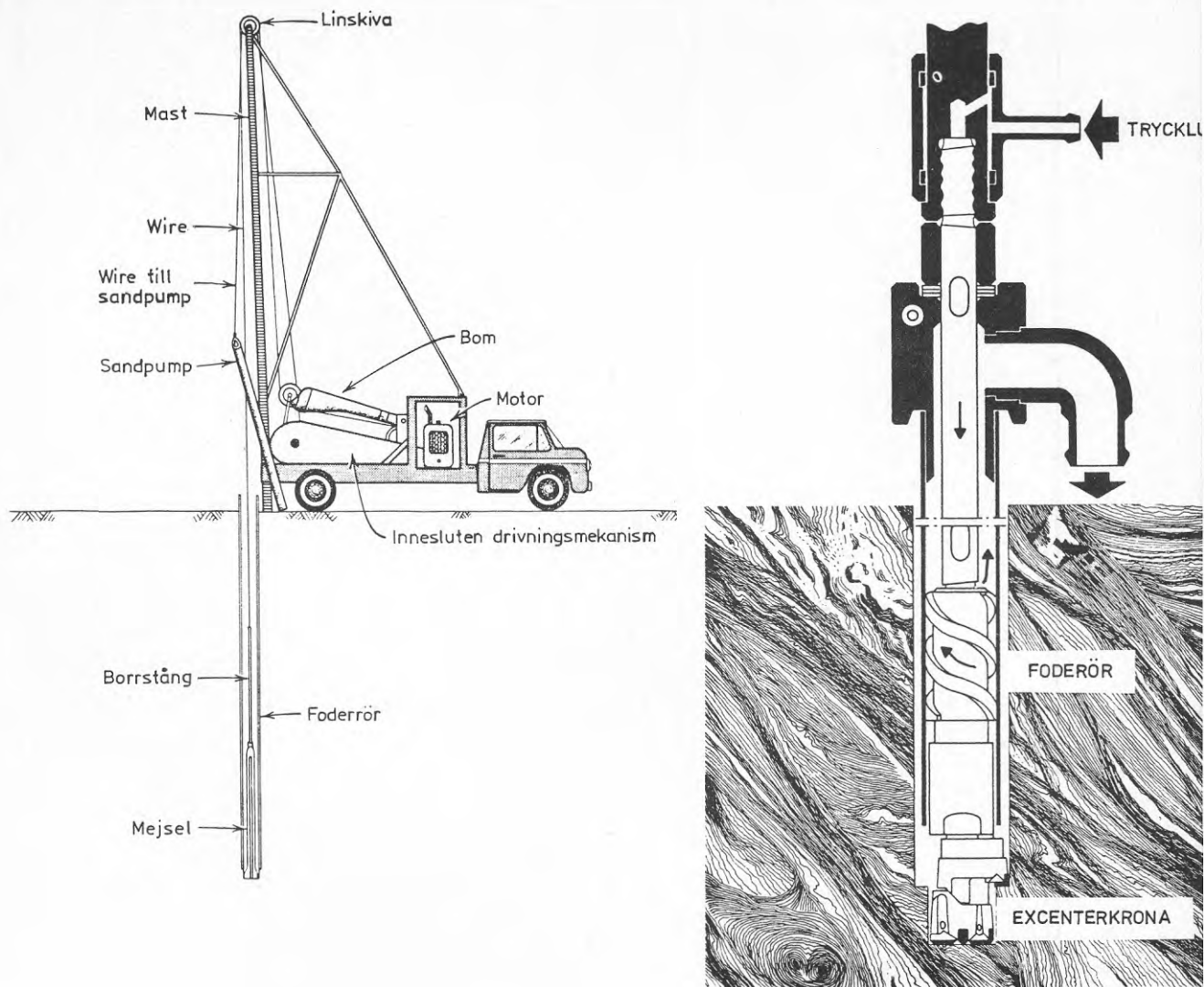
Vid några av de borrhmetoder som finns att tillgå på marknaden drivs foderröret samtidigt som håltagningen sker. Detta är fallet vid exempelvis linstötborrhning och excenterborrhning, FIGUR 50. Vid rotationsborrhning med direkt eller omvänd spolning, FIGUR 51, har man ett öppet oinfodrat hål efter borrhningens genomförande. Vid borrhning i lösa formationer måste borrhålsväggen stabiliseras för att hindra inrasning innan brunnsfilter och foderrör kommit på plats.

Att välja rätt borrh metod vid varje tillfälle är viktigt både ur ekonomisk och teknisk synpunkt. Vi bortser från den ekonomiska och ser på hur valet av borrh metod kan påverka brunnens utformning och kapacitet.

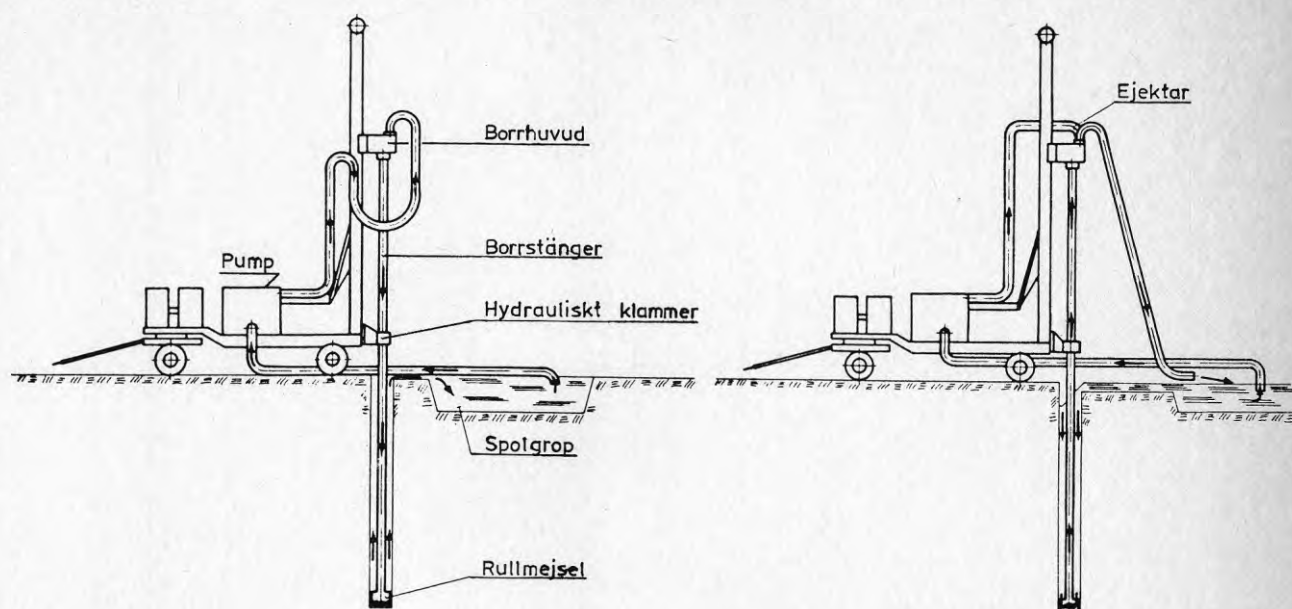
För att en brunn skall bli bra fordras att kontakten med formationen är optimal. Två teser gäller:

- brunnsfiltret skall vara placerat så att det utnyttjar hela det önskvärda akvifersnittet. Icke önskvärda avsnitt skall utestängas,
- brunnsfiltret skall ha en slitsvidd och inströmningsarea som utestänger formationspartiklarna, men så lättvindigt som möjligt släpper igenom vattnet.

För att dessa krav skall uppfyllas måste akviferens uppbyggnad avseende bl a kornstorleksfördelningen, kornform och sorteringsgrad dokumenteras vid borrhningen. Detta sker genom uttag och analys av prover. Vidare måste lagergränserna fastställas med tillräcklig noggrannhet. Detta uppnås också bl a genom provtagning, men i vissa fall kan mer avancerad registrering under borrhningen behövas, bl a genom borrsjunkningsmätning. Det finns också möjlighet att efter borrhningen utföra s k borrhålsloggning med geofysiska instrument. Man för då ned sonder i borrhålet och mäter exempelvis borrhålsväggens resistivitet, elektriska självpotential, densitet, porositet etc och kan på så vis få en förbättrad bild av lagerföljden.

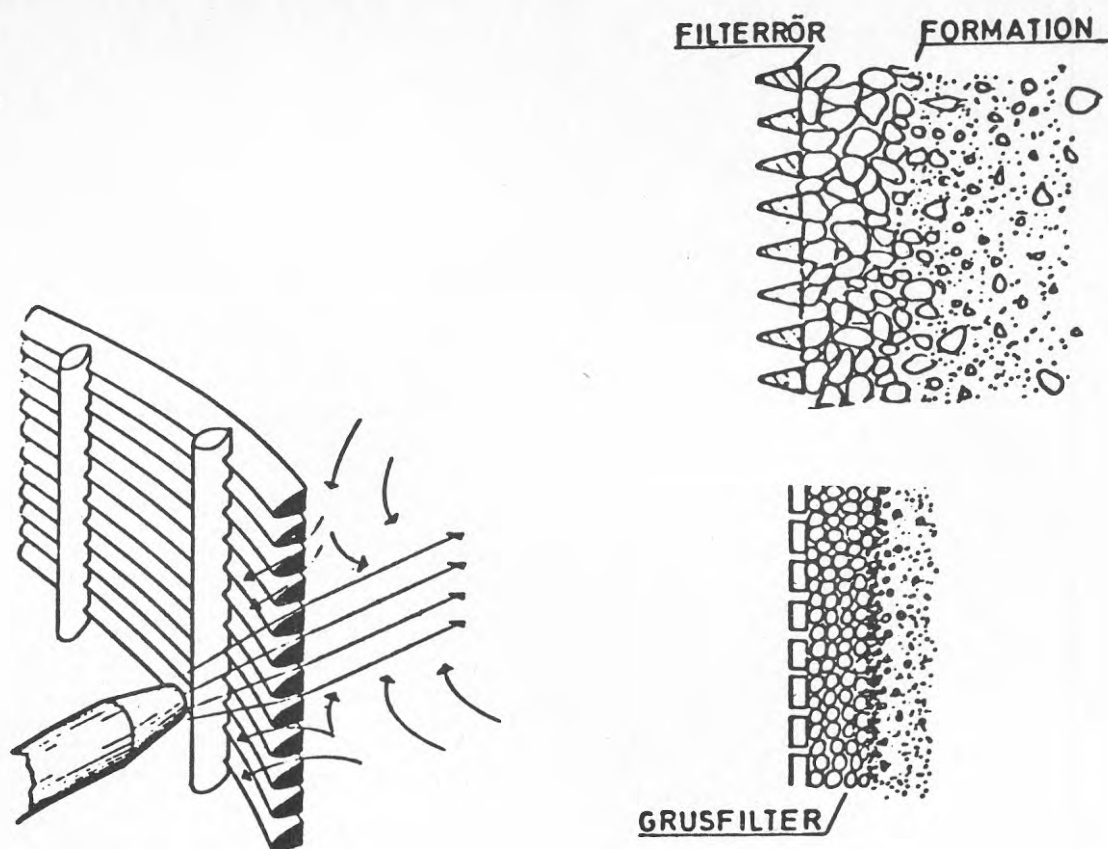


FIGUR 50 - Linstötbörning (vänster) och excenterbörning enligt ODEX-metoden (höger). Det genom-borrade materialet hämtas upp med sandpump respektive spolas upp med tryckluft. Foder-rör drivs kontinuerligt (Från Davis/DeWiest 1967 och Atlas Copco 1975)



FIGUR 51 - Rotationsborrning med direkt (vänster och omvänd (höger) spolning. Det genomborrade materialet spolas upp med borrhväska. Borrning sker i oinfodrat hål. Prover tas från spolvattnet. (Efter Andersson 1980)

Borrhålsdokumenteringen bildar underlag för hur brunnsfiltret dimensioneras och på vilken nivå det skall placeras. Filterröret kan ha många utseenden. Det mest optimala ur hydraulisk synpunkt är att använda en kontinuerligt slitsad rörlängd, FIGUR 52. Slitsvidden anpassas till formationens kornstorlek så att endast de minsta partiklarna tillåts passera. Härvid fås en urtvättning av finpartiklar närmast brunnen vilket bidrar till en hög brunnskapacitet. Denna urtvättning kan förstärkas genom sk rensning. Det grova filtergruset mellan formation och filterrör kan också anläggas artificiellt, som figuren visar.

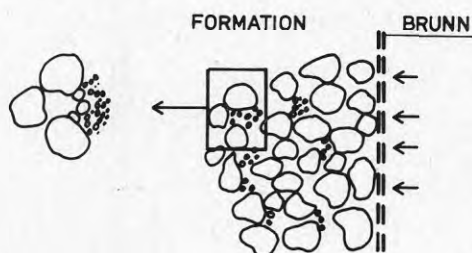


FIGUR 52 - Kontinuerligt slitsat brunnsfilterrör varigenom rensumpning med jetspolning sker (vänster). Vid rensumpning tvättas finpartiklarna bort och ett formationsgrusfilter fås runt filterröret (övre höger). Grusfilter kan också anbringas artificiellt (nedre höger).  
(Efter Gustafson 1980)

Det är särskilt viktigt att anlägga formationsanpassade brunnar med väl utförd rensumpning då vatten skall injekteras, dvs pressas in i formationen eftersom risken för igensättning då är relativt sett större än då flödet är riktat mot brunnen.

#### 4.3 Igensättningsproblemet

Som kanske det allra största problemområdet inom akviferlagringen anges i den utländska litteraturen igensättning av injektionsbrunnar. Med igensättning menas då att brunnen bjuder ett allt större injekteringsmotstånd vilket beror på en permeabilitetsnedsättning runt brunnen. Som berörts ovan kan en orsak till detta vara att finpartiklar börjar vandra i de större porutrymmena och att dessa så småningom ansamlas i "flaskhalsar" och successivt gör passagerna täta, FIGUR 53.



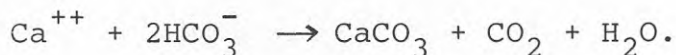
FIGUR 53 - Igensättning vid injektion till följd av partikelvandring. Bryggor av finpartiklar byggs upp mellan större partiklar

Detta är en företeelse som äger rum i brunnens omedelbara närhet eftersom flödes hastigheten här är störst. Denna typ av igensättning kan vanligen åtgärdas genom rens pumpning. Finpartiklarna kan dels finnas i formationen men kan också tillföras som suspension i det vatten som förs till brunnen. Det är därför viktigt att halten suspenderade partiklar i infiltrationsvattenet hålls låg.

En annan orsak till igensättning är rent kemiska utfällningar. Sådan igensättning förekommer både vid injektion och pumpning. Allt yt- och grundvatten innehåller lösta ämnen i mer eller mindre utsträckning. Under kon-

stanta miljö-, tryck- och temperaturförhållanden befin-  
ner sig jonerna i kemisk jämvikt med varandra. Då vatt-  
net omsätts ändras det konstanta tillståndet och jäm-  
vikten rubbas.

Om exempelvis trycket sänks kan koloxid avgå, vilket  
förhöjer vattnets pH-värde. Härvid minskar lösligheten  
av  $\text{CaCO}_3$  (kalciumpkarbonat), vilket ger kalkutfällning



Normalt har dock temperaturförändringar en större in-  
verkan än trycket. För att åter exemplifiera med  $\text{CaCO}_3$   
så minskar lösligheten med ökad temperatur. Detta gör  
att kalk kan fällas vid en temperaturhöjning. Sådana  
utfällningar fäster på brunnskomponenterna och på for-  
mationens partiklar och kan således förorsaka igensätt-  
ning både i formationen och i filtret. Just kalkutfäll-  
ningar kan åtgärdas med syrabehandling. Vanligt är ock-  
så järn- och manganutfällningar. Även sådan kan inom  
rimliga gränser behandlas med starka syror.

Vattenkemiska problem kan i hög grad undvikas redan  
vid utformningen av en anläggning. Det finns ett otal  
exempel på utfällnings- och korrosionsproblem som upp-  
stått då vatten av olika kvalitet blandats med varand-  
ra men exemplen är få då ett och samma vatten användes  
inom ett separat system. Därför bör lagringssystemet  
alltid vara förlagt till en och samma akvifer och dess-  
utom vara skilt från beröring med ovanjordsystemet så-  
som visats i avsnitt 3.3.4. (Se även FIGUR 61.)

#### 4.4 Den termohydrauliska kontrollen

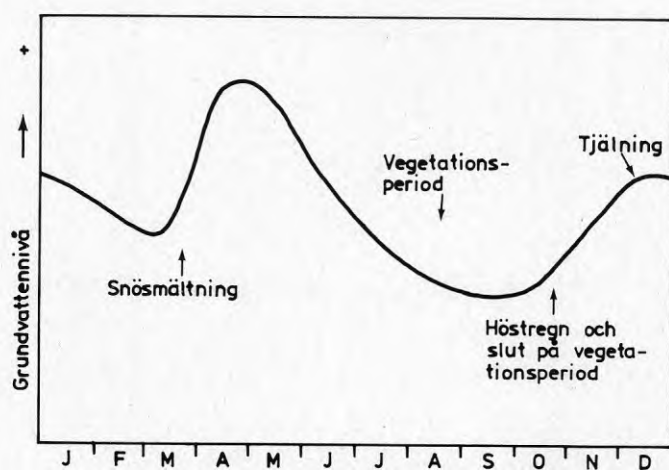
Den bakgrundsteori som getts i föregående kapitel är  
vad gäller de termohydrauliska förloppen starkt förenk-



lade. De beräkningsmodeller som tas fram utgår bl a ifrån att mediat vari lagringen skall äga rum är homogent och därtill geometriskt renodlat. Vidare är modellerna oftast tvådimensionella. I praktiken måste man förvänta sig heterogena förhållanden och beräkningsmodeller kan därför i ett inledande stadie bara svara för en orienterande vägledning.

Jag skall här diskutera några faktorer som inte ingått i presenterade modellanalyser men som i ett praktiskt utförande kommer att spela stor roll för kontrollerbarheten av ett värmelager.

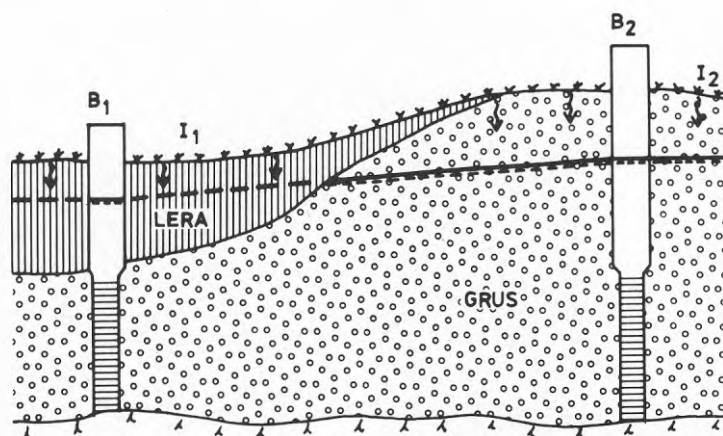
En akvifer har under naturliga förhållanden en mer eller mindre stor vattenomsättning. Under främst vår (snösmältning) och höst (höstregn) fylls akvifererna på med nybildat grundvatten, FIGUR 54. I och med nytillskottet höjs grundvatten- eller trycknivån och den naturliga dräneringen från akviferen ökar. När detta inträffar under lagring finns således förutsättningar för att delar av den inlagrade energin kan dräneras bort. Förutsättningarna härför är störst då akviferen ligger topografiskt högt och då den är ytlig och öppen.



FIGUR 54 - Schematisk framställning av grundvattnets nivåvariation under ett klimatiskt normalår. Nybildning av grundvatten sker normalt vid vårens snösmältning och höstens regn

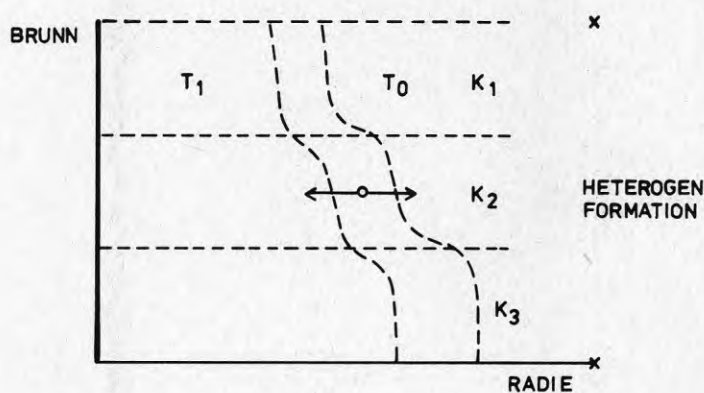
Djupt liggande slutna akviferer har mycket liten eller försumbar sådan naturlig omsättning. Den naturliga dräneringen, där den finns, kan emellertid styras med hjälp av brunnarna. Dessa måste då placeras på lämpligt sätt så att hänsyn tas till rådande hydrauliska gradienter. För att åstadkomma en kontrollerbar lagringsform fordras därför att en provpumpning och hydraulisk magasinanalys utförs i samband med projekteringen.

Nybildningen av grundvatten, vars storlek bl a är nederbördsberoende, kan normalt inte styras. Särskilt för ytliga öppna akviferer kommer denna faktor att inverka negativt på den inlagrade temperaturen. För djupa slutna akviferer kommer effekten att ha mindre betydelse. Det nybildade och svala grundvattnet kommer att ha en kylande inverkan i värmelagrets övre del, vilket i praktiken innebär en viss kvalitetsförsämring, alltså temperatursänkning. Däremot påverkas inte värmeförlusten. För ett värmelager med tvåbrunnssystem kan kvalitetsförsämringen motverkas genom att "hetvattenbrunnen" placeras där infiltrationen är som lägst, FIGUR 55.



FIGUR 55 - Placering av brunnar för värmelagring med hänsyn till bl a naturlig grundvattenbildning genom infiltration. Infiltrationskoefficienten  $I_1 < I_2$ .  $B_1$  är "hetvattenbrunnen" och  $B_2$  är "lågtemperaturbrunnen"

Under teoretiskt ideella förhållanden kommer värmefrontens utbredning vid inlagring att bilda en cirkel runt brunnen, som FIGUR 42 visar. Eftersom helt homogena förhållanden inte existerar i verkligheten kommer fronten vid tillämpningen att utbredas olikformigt. FIGUR 56 visar hur permeabilitetsvariationen i lageruppbyggnaden schematiskt inverkar på temperaturfronten i ett tvådimensionellt snitt.



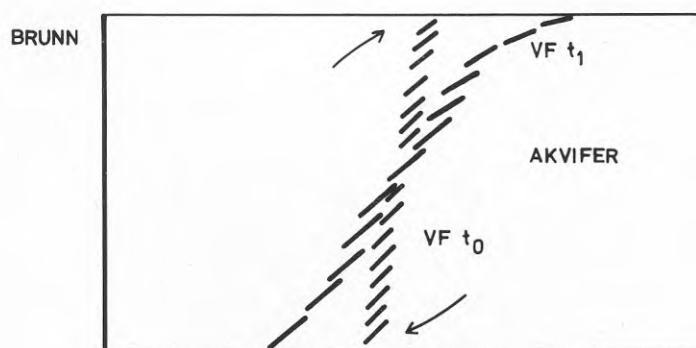
FIGUR 56 - Inverkan av formationens permeabilitetsvariationer ( $K$ -värden) på värmefrontens geometri ( $K_1 < K_2 < K_3$ ).  $T_1$  = inlagringstemperatur,  $T_0$  = omgivningstemperatur. Figuren är schematisk

Konsekvenserna av formationernas heterogena uppbyggnad kommer att variera från fall till fall. I sämsta fall kan ökade värmeförluster bli följden liksom kvalitetsnedsättning. Förhållandena kan också ge motsatt effekt. Figurexemplet torde vara ett sådant fall. Här bidrar lagrets avsmalning uppåt till att värmeförlusten uppåt minimeras.

I princip är det möjligt att anpassa flödesfaktorn till och från olika avsnitt i brunnen och formationen så att

en värmefront med önskvärd utformning fås. För att åstadkomma detta fordras dock en mycket detaljerad information om lageruppbyggnaden, liksom avancerade brunnstekniska lösningar.

En särskild termohydraulisk problemställning utgöres av den s k kantringseffekten. Härmed förstås en vertikal värmefronts benägenhet att kantra eller vända sig. Fenomenet har sin upprinnelse i att fronten är termiskt instabil till följd av temperaturens inverkan på främst vattnets densitet. Det yttrar sig så att det relativt sett varma och lättare frontvattnet vill breda ut sig i värmelagrets ovandel samtidigt som svälare och tyngre omgivande vatten söker sig in i lagrets botten, FIGUR 57.



FIGUR 57 - Kantring av värmefronten (VF) som tenderar breda ut sig mot akviferens tak. Figuren visar schematiskt värmefrontens läge vid tidpunkten  $t_0$  (efter inlagring) och  $t_1$  efter viss tids lagring

Problemet har analyserats ingående av Hellström et al (1979). Av denna rapport framgår att fenomenet är främst beroende av akviferens mäktighet, dess permeabilitet samt lagringstiden. Modellanalyserna visar att kantringseffekten blir lägre ju mindre transmissivitet (permeabilitet x mäktighet) akviferen har. Vid transmissivitetsvärden lägre än  $10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s är effekten försumbar för den lagringstid som är aktuell.

Det skall dock påpekas att de beräkningsmodeller som använts inte tagit hänsyn till formationernas heterogena uppbyggnad. En formation som exempelvis består av växellagring mellan fin- och grovkornigt material kommer att ge helt annorlunda kantringsförlopp.

#### 4.5 Värmeförlusten

En frågeställning som blivit mycket studerad i beräkningsmodeller är hur stor del av den inlagrade energin som under lagringstiden försvinner i form av konduktiv värmeförlust. Några faktorer som påverkar värmeförlusten vid lagring i lera, bergrum etc, nämligen värmelagrets storlek och form, har tidigare berörts, se avsnitt 3.1.2.

Form- och volymsberoendet gäller även vid akviferlagring.

Av principiellt större betydelse är dock i vilken geologisk situation akviferen befinner sig. Med hjälp av modeller och på grundval av en del utländska tillämpade försök kan ett par viktiga teser slås fast.

För det första är det fördelaktigt att lagringen sker i slutna akviferer (se FIGUR 26). Den isolering som ett tätande lager ovanpå akviferen innebär är sannolikt nödvändig för att hålla förlusterna på rimlig nivå.

Försök som gjorts i Frankrike, Tyskland och Schweiz visar att endast 20-40 % av inlagrad energi kan återfås då lagring sker i öppna grunda akviferer medan försök i bl a USA med lagring i slutna men fortfarande relativt grunda akviferer ger betydligt bättre resultat, 60-80 % (Tsang 1978).

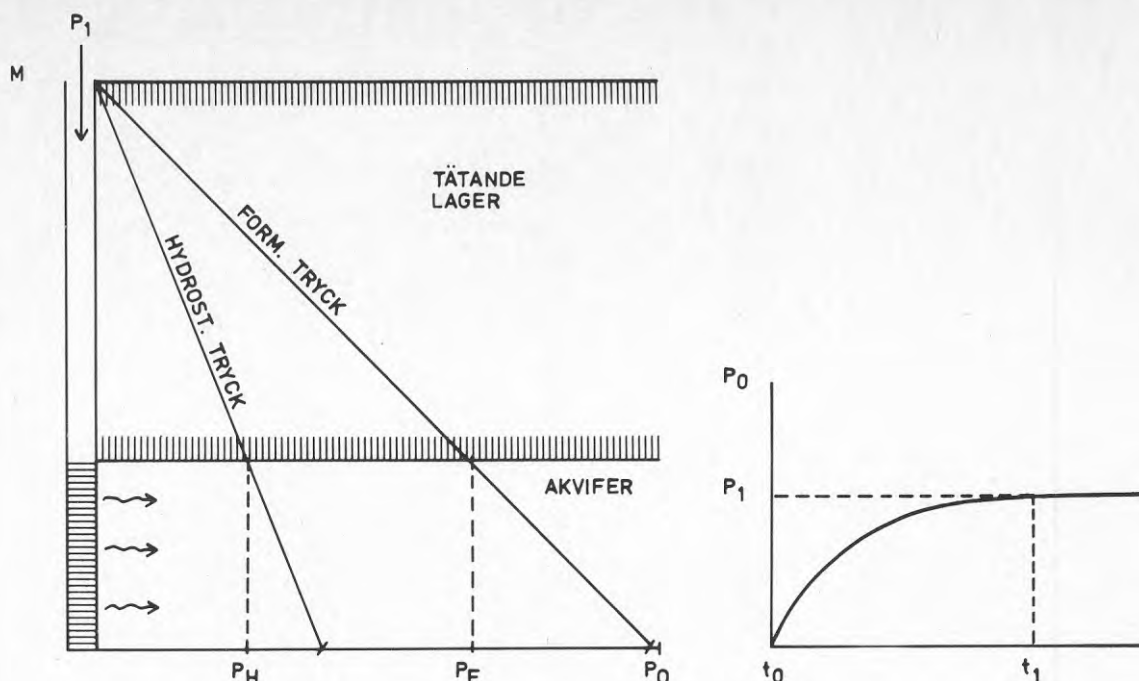
Några praktiska försök med lagring i djupa akviferer har inte rapporterats, men man kan med modellberäkningar klart fastslå att förlusterna minskar med ökat djup. Detta är främst en effekt av att värmegradienten till markytan minskar med ökat lagringsdjup, men bidragande är också att den naturliga geotermiska gradienten ger en horisontellt lägre temperaturgradient mellan lager och omgivning ju djupare ner lagret befinner sig. Den geotermiska gradienten brukar sättas till  $3^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ . De beräkningar som gjorts för exemplifieringen till denna rapport visar att 75-90 % återvinns, se BILAGA 1. Här framgår också temperaturnivåns betydelse samt hur antalet lagringscykler påverkar andelen återvunnen energi.

5 DJUPLAGRINGENS DEFINITION OCH TILLÄMPBARHET

Mot bakgrunden av vad som allmänt diskuterats i de föregående kapitlen finns det mycket som talar för lagring i djupa slutna akviferer. Det är framför allt positiva effekter på den termohydrauliska kontrollerbarheten samt den mot djupet minskade värmeförlusten under lagringscykeln som tidigare påtalats. För att beskriva vad djuplagring egentligen innebär och vilka förutsättningar den kan inrymma följer här en beskrivande definition.

Med djuplagring avses nyttjandet av sådana akviferer som

- är slutna (FIGUR 26)
- har ett överliggande tätande lager vars vertikala formationstryck är större än den hydrostatiska tryckhöjning som orsakas av injekteringen då injekteringsmotståndet byggs upp till akviferens hydrauliska randvillkor (FIGUR 58)
- har sådan transmissivitet (permeabilitet x mäktighet) att sekundära termohydrauliska störningar som exempelvis kantring är små eller försumbara (FIGUR 57)
- har sådan lagringskapacitet att lagringssystem för minst 100 bostadsekvivalenter kan utföras (lagring med återvinning av minst  $10^6$  kWh)
- har sådan kornstorleksfördelning att formationsanpassade brunnar med en injekterings- och uttagskapacitet av minst 5 l/s kan anläggas, vilket innebär en brunnseffekt vid  $\Delta t 30^{\circ}\text{C}$  (utnyttjat temperaturintervall) av drygt 500 kW
- under en lagringscykel har så små värmeförluster att värmeöverföringen från lagringssystem till radiator-system kan ske med plattvärmväxling och att sekundär temperaturhöjning med hjälp av värmepump således inte är en förutsättning (FIGUR 61).



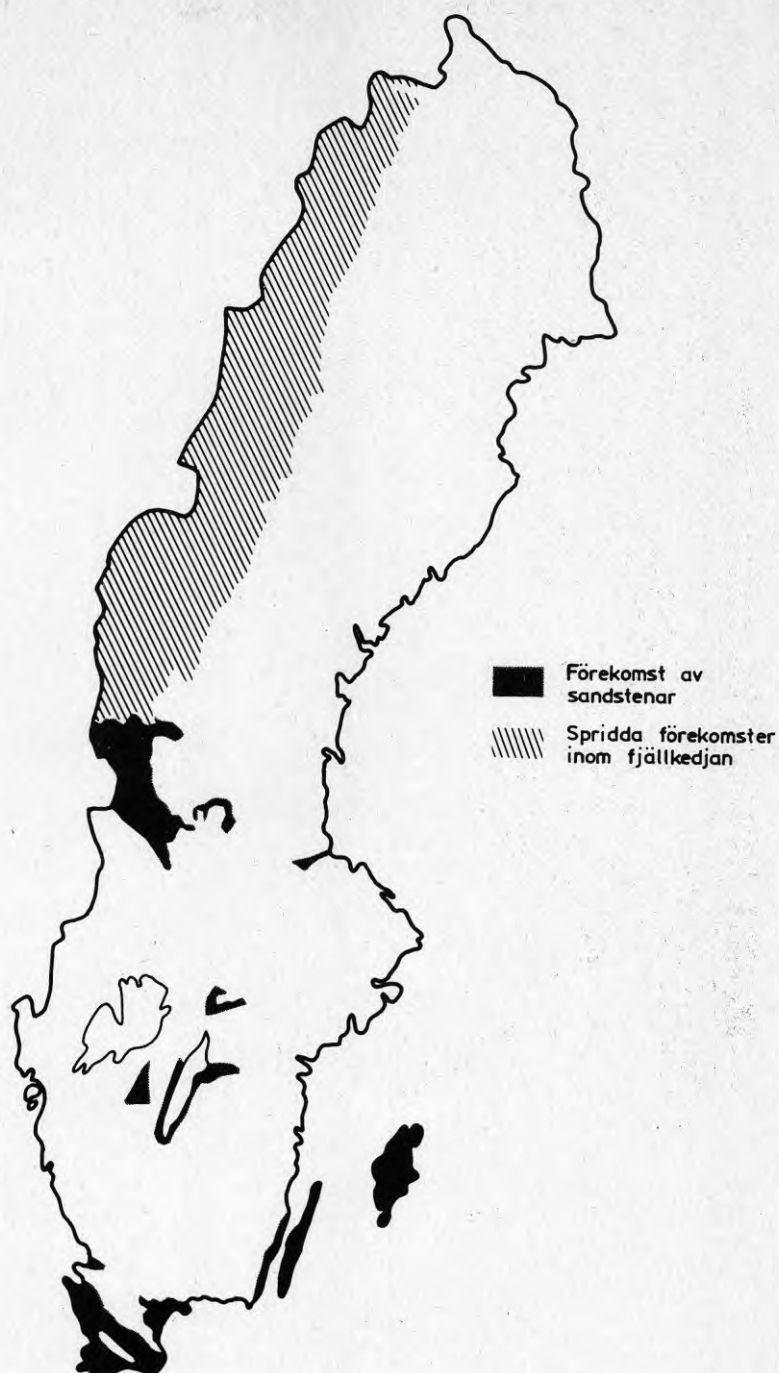
FIGUR 58 - Vid inlagring i en sluten akvifer gäller att injekteringstrycket  $P_1 < P_F - P_H$  för att inte lyftning eller genombrott av tätande lager skall ske.  $P_1$  uppnås efter viss tids injicering vid tiden  $t_1$  vilket motsvarar formationens randvillkor (Efter Catz and Coats 1968)

Som framgår av definitionspunkterna går det inte att ange några djup i meter till akviferer som är lämpade för djuplagring. Eftersom geologiska, hydrogeologiska och yttre förutsättningar alltid varierar från plats till plats blir avgränsningen till ytliga, slutna akviferer flytande.

Erfarenhetsmässigt vet man dock att de ovan som definition givna förutsättningarna gäller för flera regioner i Sverige. Utan att i detalj gå in på var de geologiska förutsättningarna är rådande vill jag i alla fall peka på ett par geologiska företeelser i regioner som redan nu kan bedömas vara av intresse. (En landsomfattande kartläggning av akviferer är under utarbetning i NES regi.)



- Sedimentära sandstenar, vilka främst finns i landets kambro-silurumråden, FIGUR 59



FIGUR 59 - Områden i Sverige med förekomst av sandstenar till relativt stora djup (efter Magnusson et al 1963)

- Kvartära sand- och grusavlagringar täckta av finsedi-  
ment finns huvudsakligen i dalgångar, sänk- och kust-  
områden under högsta kustlinjen (havets högsta nivå  
vid landisavsmältningen), FIGUR 60. Härtill kommer  
vissa förekomster i Skåne.



FIGUR 60 - Högsta kustlinjen under vilken sand- och grusavlagringar med övertäckande finsedi-  
ment kan förekomma (Magnusson et al 1963)

Man vågar på dessa grunder påstå att djuplagring som system är tillämpligt lite varstans i landet och i flera tätbefolkade regioner.

För en akvifer som fyller definitionskraven återstår emellertid andra frågeställningar som måste beaktas. Det kanske största hindret torde vara det konkurrerande intresse som kommunala, industriella eller enskilda vattenuttag utgör. Om uttagen är stora finns de normalt reglerade i vattendom och därmed kan aktuell akvifer eller delar av denna svårligen tas i anspråk för andra ändamål.

Några miljöeffekter av betydelse till följd av djuplagring har ännu så länge inte påtalats från något håll och sådana torde knappast heller förekomma. Värmelagret är ju djupt nedsänkt under markskiktets biologiska liv och några för marken främmande ämnen hanteras inte i lagringssystemet. Dessutom är markanspråken små. Vad som fordras är ett par brunnsöverbyggnader på några tiotal kvadratmetrar vardera.

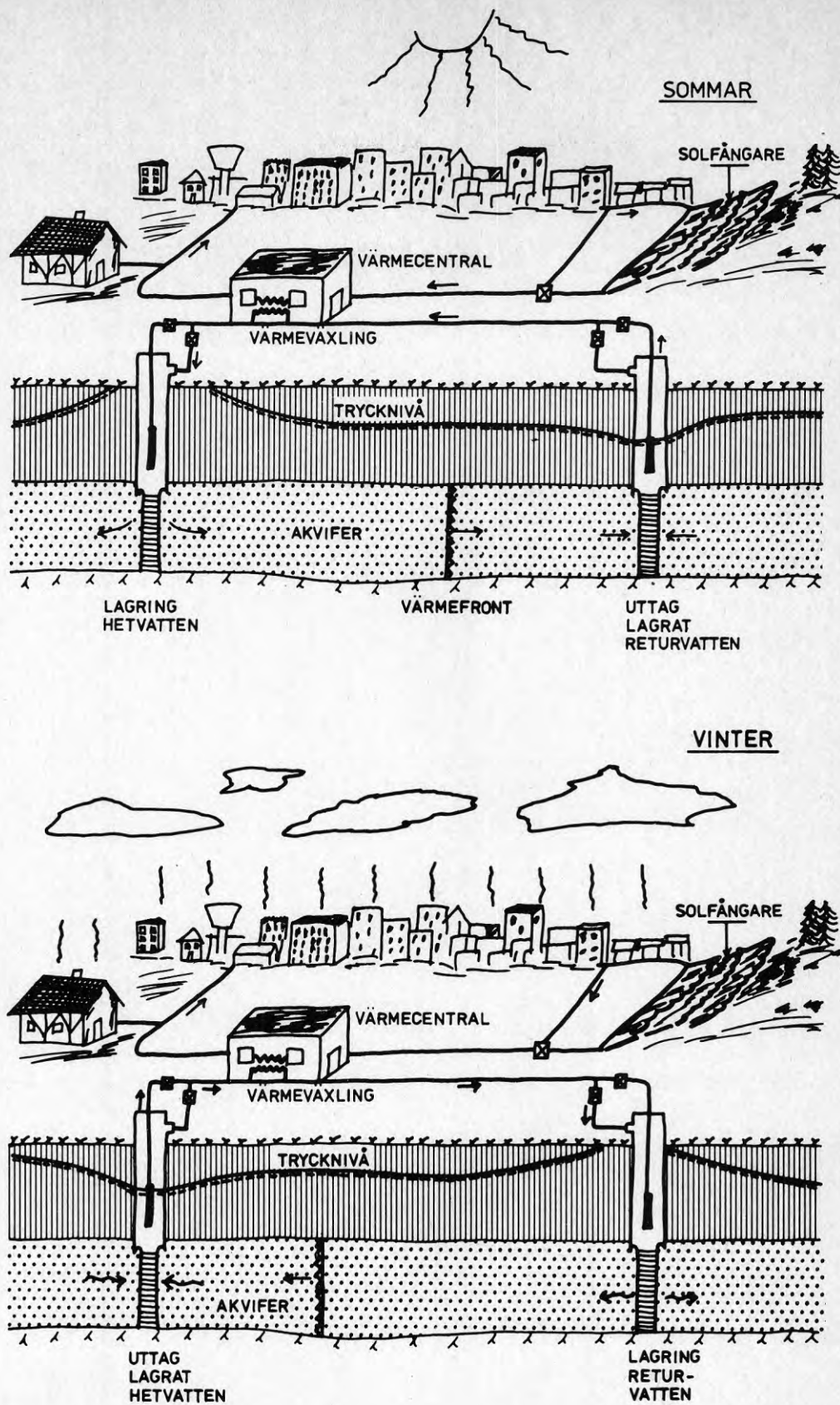
## 6 NÅGRA BERÄKNINGSEXEMPEL

För att visa hur djuplagringen kan te sig i praktiken redovisas tre exempel som vad gäller lagringsenheten bygger på ett verkligt underlag. Ovanjordsystemet med värmecentral och abonnenter är konstruerade. Uppgifter om lagerföljder, lagrens termiska och hydrauliska egenskaper samt temperaturnivåer, lagringsbehov m m har bearbetats i matematisk beräkningsmodell inom ramen för "Värmelagring i mark" vid Institutionen för Matematisk Fysik vid LTH, Lund. Denna rapport bifogas som BILAGA 1.

### 6.1 Systemlösningen

Det förutsättes i beräkningsexemplen att lagring sker med soluppvärmt vatten från solfångare i stor skala. Det system som enligt min bedömning har den bästa tekniska utformningen och verkningsgraden illustreras av FIGUR 61. Hjärtat i systemet utgöres av värmecentralen. Här sker värmeväxlingen mellan solfångar/radiatorslingan och lagringssystemet. Härifrån regleras och distribueras också vattnet till och från solfångare och hus.

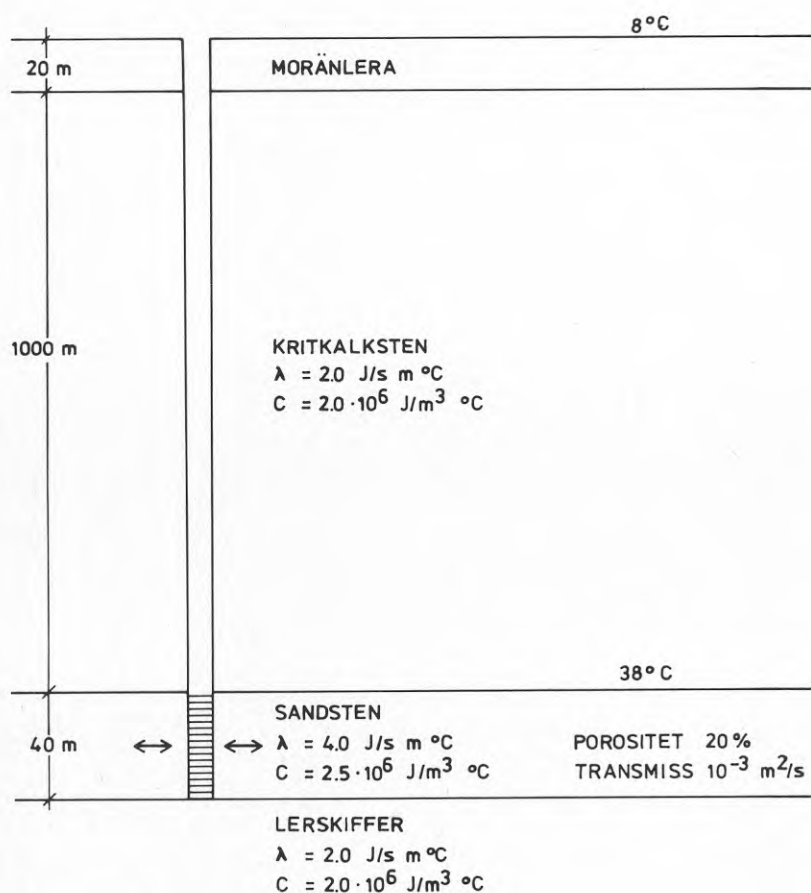
Lagringsdelen har två brunnar, en för hett vatten och en för svalare vatten. I hetvattenbrunnen injekteras respektive uppfördras vatten från solfångare respektive till radiatorerna (efter värmeväxling). I den lågtempererade brunnen injekteras returvatten (av varierande temperatur) samt uppfördras vattnet till solfångarna. Värmeväxling mellan yt- och lagringssystem ingår som en nödvändighet för att undvika vattenkemiska problem. I beräkningsexemplen har även hänsyn tagits till den sk insvängningsförlusten. Denna kan förenklat beskrivas som den del av akviferuppvärmningen som inte återvinns under den första lagringsscykeln. Den skall därför betraktas som en engångskostnad under anläggningens intrimningsperiod, se kostnadskalkyl under beräkningsexemplen.



FIGUR 61 - Systemlösningen använd i beräkningsexemplet

6.2 Fallet med sandstensakviferen i Skåne (Fall 1)6.2.1 Förutsättningarna

I Skåne finns ett par porösa sandstensformationer av kretaceisk ålder. Beroende på geografiskt läge varierar djupet till sandstenarna mellan ca 200 och 2000 m. I beräkningsexemplet har antagits ett djup av 1000 m. Sandstenen har givits de ungefärliga hydrauliska och termiska egenskaper och den mäktighet som har dokumenterats gälla för den underkretaceiska cenomansandstenen (Bjelm et al 1977, 1979). Ingångsdata framgår av FIGUR 62. Endast lagret runt hetvattenbrunnen har varit föremål för beräkning.



FIGUR 62 - Ingångsdata för beräkningsexempel 1

Två fall har analyserats i beräkningsmodell, dels laddning med 90<sup>o</sup>-igt vatten och dels 70<sup>o</sup>-igt. Laddningsperioden har satts till 3 månader, lagring i laddat tillstånd 3 månader samt därefter 3 månaders uttag. Innan nästa cykel påbörjats har lagret en viloperiod av 3 månader. Beräkningsresultat av lagringseffektivitet etc framgår av BILAGA 1. För nedan gjorda exemplet har 90<sup>o</sup>-alternativet valts. I övrigt gäller följande förutsättningar:

- Värmecentral med solfångare är dimensionerad för 1000 hushåll med ett totalt årligt energibehov för uppvärmning och tappvarmvattenberedning motsvarande  $15 \cdot 10^6$  kWh.
- Utgående temperatur till radiatorer och värmeväxlare för tappvarmvatten är lägst 60<sup>o</sup>C.
- Lagringsbehovet utgör 70 % av det totala värmebehovet eller ca  $10^7$  kWh. Härtill kommer värmeförluster under lagringsperioden vilka maximalt uppgår till 20 % (se BILAGA 1) vilket totalt ger  $12 \cdot 10^6$  kWh per år.
- Det maximala effektbehovet är  $7 \cdot 10^3$  kW vid  $\Delta T$  30<sup>o</sup>C.
- Inlagring kan ske under 1000 timmar vilka infaller under sommarhalvåret (april-september).
- Värmelagrets arbetstemperatur är 90-60<sup>o</sup>C.
- Insvängningsförluster efter första året antages ligga inbakade i den 20 %-iga värmeförlusten liksom förluster i värmeväxlare och distributionssystem och beräkningen gäller för den 5:e årscykeln.

Med utgångspunkt från dessa data kan lagringsvolym och erforderliga brunnskapaciteter beräknas.

Värmelagringsförmågan är för det fasta materialet ca  $18 \text{ kWh/m}^3$  och för porvattnet ca  $35 \text{ kWh/m}^3$  då temperaturen höjs  $30^\circ\text{C}$ . Per kubikmeter akvifer kan således lagras  $0,8 \times 18 + 0,2 \times 35 = 21,4 \text{ kWh/m}^3$ . Då det totala lagringsbehovet är  $12 \cdot 10^6 \text{ kWh/år}$  fås den erforderliga lagringsvolymen till ca  $560\,000 \text{ m}^3$ . Då akviferen är 40 m mäktig motsvarar volymen en cylinder med radien ca 70 m.

Brunnarna bör således placeras med ett minsta avstånd från varandra runt 200 m för att de båda lagren inte skall störas termiskt.

Båda brunnarna hanterar i princip samma vattenmängder vid samma tidpunkter. Den högsta kapaciteten de skall ha bestämmas bla av det maximala effektbehovet. Detta har satts till  $7 \cdot 10^3 \text{ kW}$  då  $30^\circ$  av det till radiatorerna utgående vattnet utnyttjas. Om vattnets värmeinhåll är  $1,17 \text{ kWh/m}^3$  och grad blir värmeuttaget från magasinet  $1,17 \cdot 30 \approx 35,0 \text{ kWh/m}^3$ . Vid effektbehovet  $7 \cdot 10^3 \text{ kW}$  blir erforderlig maximal brunnskapacitet  $200 \text{ m}^3/\text{tim}$  eller ca 55 l/sek.

Den andra dimensionerande faktorn är inlagringshastigheten. Om inlagrad energimängd  $12 \cdot 10^6 \text{ kWh}$  skall fördelas på 1000 timmars inlagringstid och då lagrets arbetstemperatur är  $30^\circ\text{C}$  fås en erforderlig flödeskapacitet genom solfångare och brunn runt 120 l/sek. Genom att använda fördröjningsmagasin (vilka ändå behövs för dygns- eller korttidslagring) kan inlagringstiden förlängas till minst 2000 timmar. Man kommer då i paritet med dimensioneringen utifrån effektbehovet.

Teoretiskt betraktat är brunnar med här angiven maxkapacitet möjliga att utföra i aktuell sandsten varför vi utgår från att endast ett brunnspar behövs.



### 6.2.2 Kostnadsberäkningen

De stora kostnaderna för lagringssystemet ligger på borrhning och utförande av brunnarna. De brunnsdjup som här erfordras är ovanliga i Sverige och sannolikt måste oljeborrhustrustning från utlandet tillgripas. Beroende på transportkostnader och annat har därför inte någon detaljerad kostnadsberäkning kunnat utföras.

Med erfarenhet från bl a kostnader för geotermiska brunnar kan dock en grov uppskattning göras. Denna hamnar i storleksordningen 4-5 miljoner kronor för färdig anläggning, vilket medför en årlig kapitalkostnad runt 500 000:- eller 5 öre/kWh nyttiggjord lagrad energi.

Insvängningsenergin, vilket innebär en första uppvärmning av magasinet från ca 40-60°C uppgår till  $20 \cdot 0,2 \cdot 1,7 + 20 \cdot 0,8 \cdot 0,6 = 14,3 \text{ kWh/m}^3$  lagringsvolym, vilket totalt gör  $560\ 000 \times 14,3 = 8 \cdot 10^6 \text{ kWh}$ . Insvängningen förutsättes ske med transportabelt oljeaggregat med energipriset 12 öre/kWh. Kostnaden för uppvärmningen blir således  $(0,12 \times 8 \cdot 10^6) = \text{ca } 1\ 000\ 000$  eller 100 000:-/år vid 40 års kapitalavskrivning. Utslaget per kWh nyttiggjord lagrad energi blir kostnaden 1 öre.

Anslutning till värmecentral har skattats till ca 500 000 vilket ger en årlig kapitalkostnad av 50 000 eller 0,5 öre per kWh.

Driften som förutom el till pumpar omfattar underhåll och skötsel har uppskattats till 200 000:- per år varav elkostnad utgör 50 000:- eller ca 2 öre per kWh.

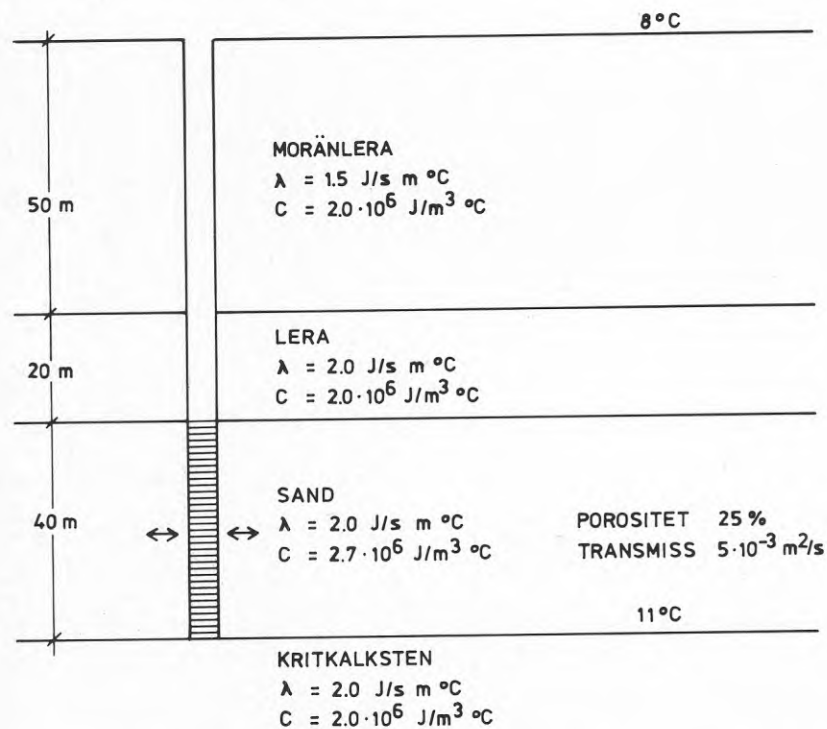
Sammantaget ger detta en årlig lagringskostnad för nyttiggjord lagrad energi av ca 9 öre per kWh.

### 6.3 Fallet med Alnarpsdalen (Fall 2)

#### 6.3.1 Förutsättningar

För att exemplifiera med lagring i en kvartär sand- och gruslavlagring har jag valt att använda den s k Alnarpsdalen. Denna utgöres av en ca 2 km bred dalgång som sträcker sig från Abbekås (öster om Ystad) i sydost till Landskrona i nordväst. Dalgången vars botten ligger ca 60 m u h är utfylld med jordlager till en mäktighet av normalt ca 80-120 meter. Jordlagren är ovanligt lagenligt uppbyggda och består av överst ett femtiotal meter tätande lerjordarter varunder följer en ungefär lika mäktig sekvens välsorterad sand.

Lagerföljden schematiskt samt termohydrauliska data för beräkningen framgår av FIGUR 63. Alnarpsdalens uppbyggnad och lagrens hydrauliska egenskaper är mycket välkända, bl a till följd av dess utnyttjande för stora grundvattenuttag. Den matematiska modellberäkningen framgår av BILAGA 1.



FIGUR 63 - Ingångsdata för beräkningsexempel 2

Analogt med tidigare gäller följande förutsättningar för beräkningen:

- Anläggningen dimensioneras för 500 hushåll med energibehovet  $7,5 \cdot 10^6$  kWh per år
- Utgående temperatur till radiatorer, lägst  $50^\circ\text{C}$
- Lagringsbehovet sätts till 70 % av det totala energibehovet och de totala värmeförlusterna 20 % vilket ger totalt  $6,3 \cdot 10^6$  kWh per år. (Värmeförlusten från magasinet är 10 % av det femte året, se BILAGA 1)
- Det maximala effektbehovet är  $3,5 \cdot 10^3$  kW vid  $\Delta T 20^\circ\text{C}$
- Inlagring kan ske 1200 timmar under sommarhalvåret
- Värmelagrets arbetstemperatur är  $70-50^\circ\text{C}$ .

Systemlösning enligt FIGUR 61 tillämpas. Akviferens lagringskapacitet beräknas till  $0,30 \times 20 \times 1,17 + 0,7 \times 20 \times 0,6 = 15,5 \text{ kWh/m}^3$ . Då lagringsbehovet är  $6,3 \cdot 10^6$  kWh fås en erforderlig lagringsvolym av ca  $400\,000 \text{ m}^3$ , vilket motsvarar en cylinder med radien ca 60 m. Brunarna bör då ha ett inbördes avstånd av minst 150 m.

Analogt med tidigare exempel är det maximala effektbehovet dimensionerande för brunnskapaciteten. Med effektbehovet  $3,5 \cdot 10^3$  kW blir denna  $3500/23,4 = 150 \text{ m}^3/\text{tim}$  (ca 40 l/sek). För att få denna kapacitets erfordras sannolikt dubbla brunnspar. Detta hänger samman med sandens relativt låga permeabilitet.

### 6.3.2 Kostnadsberäkningen

I detta fall kan kostnaden för borrhning och brunnsbyggnad beräknas utifrån erfarenheter från andra projekt med brunnsbyggnad. Prisingivelsen är väl tilltagna.

Borrhningskostnad, rotationsborrning 450 m 12"	150 000:-
Foderrör 300 m 9 5/8"	100 000:-
Brunnsfilter 150 m 7"	150 000:-
Renspumpning, tester	50 000:-
Pumpar, brunnsöverbyggnader	100 000:-
Projektering, kontroll	100 000:-
Diverse förbrukningsmaterial	50 000:-
Oförutsett	<u>100 000:-</u>
Totalt	800 000:-

Om kostnader för anslutningen med ledningar till värmecentralen beräknas till ca 200 000:- fås ett belopp av 1 000 000 för hela lagringssystemet.

Den årliga kapitalkostnaden blir vid 20 års avskrivningstid med annuiteten 11,75 % ca 120 000:-.

Första årets insvängningsförlust (akviferens uppvärmning till arbetstemperatur) då akviferen värms från 10°C till 50°C motsvarar kostnaden för  $12 \cdot 10^6$  kWh. Om insvängningskostnaden skall tas före första årets inlagringsperiod (för att slippa ett års extra kapitalkostnad för hela uppvärmningssystemet) bör insvängning ske med transportabelt oljeaggregat under vinterperiod. Energikostnaden för detta kan beräknas till 12 öre/kWh då aggregatets verkningsgrad är 80 % och tjockoljekostnaden 1 100:-/m<sup>3</sup>. Totalt rör det sig således om ca 1 500 000:-. Med en annuitet av 10 % (ca 40 års avskrivning) fås en årlig kostnad av 150 000:-.

Den sammanlagda årliga kapitalkostnaden blir således ca 270 000:- (120 000 + 150 000).

Driftskostnaden omfattar dels svårbestämbara poster som skötsel, drift och underhåll och dels ren energikostnad för uppfodrings- och injekteringspumpar.

Med ett elpris inklusive fast och rörlig kostnad samt skatt motsvarande 18 öre/kWh samt installerad pump-effekt av ca 40 kW fås vid ett 50 %-igt effektutnyttjande en kostnad av ca 30 000:-. Om kostnaden för skötsel, tillsyn och underhåll uppskattas till 100 000:- fås den totala driftskostnaden 130 000:-. Kapital och drift under ett år blir således ca 400 000:-. Utslaget på den under året lagrade och åter nyttjade energin ( $5,25 \cdot 10^6$  kWh) blir kostnaden per kWh 7-8 öre.

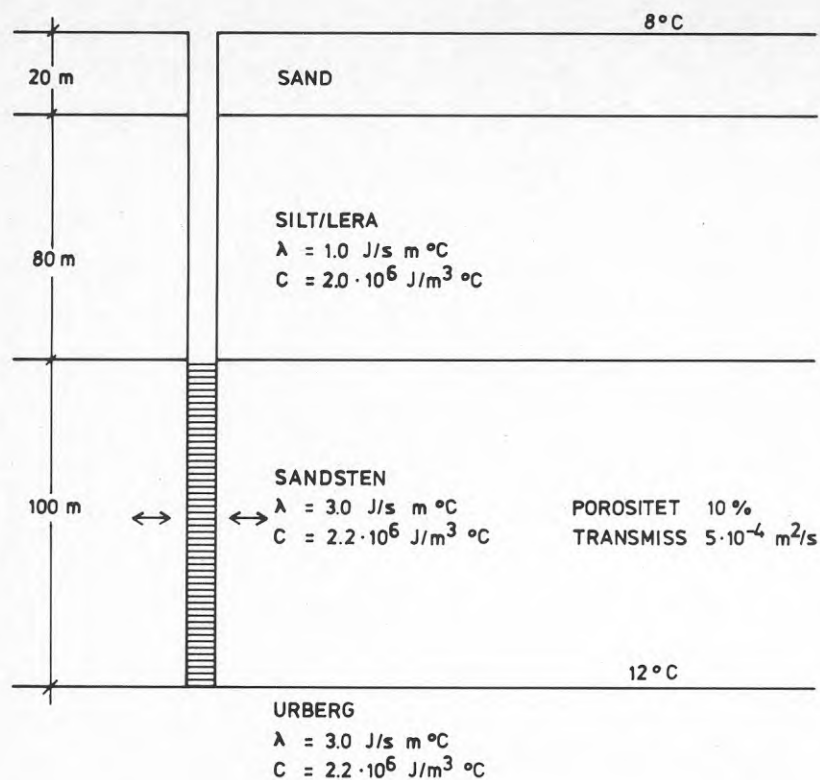
#### 6.4 Fallet med Visingsösandstenen (Fall 3)

##### 6.4.1 Förutsättningarna

I Vätternsänkan finns en lagerföljd med mycket gamla sedimentära bergarter. Förekomsten som tros vara uppemot 2000 meter mäktig består av sandstenar underst varpå följer skifferar. Utbredningen framgår i stora drag av FIGUR 59.

I trakten av Jönköping och Huskvarna saknas skiffern. Här bildar sandstenen berggrundsytta. Tidigare utvanns grundvatten för både Jönköpings och Huskvarnas vattenförsörjning ur sandstenen. Idag tas vattnet från Vättern.

För beräkningen har ett väldokumenterat borrhål använts. Lagerföljd samt ingångsdata finns angivna i FIGUR 64. Den matematiska modellberäkningen framgår av BILAGA 1.



FIGUR 64 - Ingångsdata för beräkningsexempel 3

Härutöver gäller följande förutsättningar:

- Anläggningen dimensioneras för 250 hushållsekvivalenter med energibehovet  $3,75 \cdot 10^6 \text{ kWh/år}$
- Utgående temperatur till radiatorer är lägst  $45^\circ\text{C}$
- Lagringsbehovet utgör 70 % av det totala energibehovet och de sammantagna värmeförlusterna 20 %, vilket ger  $3,2 \cdot 10^6 \text{ kWh/år}$ .

- Det maximala effektbehovet sätts till  $2 \cdot 10^6$  kW vid  $\Delta T$   $20^\circ\text{C}$
- Värmelagrets arbetstemperatur är  $45-60^\circ\text{C}$
- Inlagring kan ske 1300 timmar under sommarhalvåret

Systemlösning enligt FIGUR 61 tillämpas. Akviferens lagringskapacitet kan beräknas som  $0,10 \times 15 \times 1,17 + 0,90 \times 15 \times 0,6 = 9,95 \text{ kWh/m}^3$ . Utgående från lagringsbehovet kan erforderlig lagringsvolym beräknas till drygt  $320\,000 \text{ m}^3$ , vilket motsvarar en cylinder med radien ca 30 meter och 100 meters höjd. Detta medför att brunnarna bör ha ett avstånd av minst 75 m från varandra.

Brunnskapaciteten sätts till den mängd vätska som behöver hanteras vid maximalt effektbehov och blir  $2000/23,4 = 85 \text{ m}^3/\text{tim}$  eller ca 24 l/sek.

Även i detta fall fodras sannolikt dubbla brunnspår.

#### 6.4.2 Kostnadsberäkningen

Vid kostnadsberäkningen för brunnarna har antagits att sandstenen är så konsoliderad att brunnfilter ej är nödvändigt.

Borrningskostnad, rotationsborrning,	
800 m 12 "	300 000:-
Foderrör, 400 m 95/8"	120 000:-
Renspumpning, tester	50 000:-
Pumpar, brunnsöverbyggnader	100 000:-
Projektering, kontroll	80 000:-
Diverse förbrukningsmaterial	50 000:-
Oförutsett	100 000:-
Totalt	<u>800 000:-</u>

Med kostnader för ledningar och anslutning till värme-central nås högt räknat 1 000 000:- eller samma belopp som för föregående fall.

Analogt med tidigare beskrivet förfaringssätt blir in-svängningskostnaden för akviferuppvärmning från 10°C till 45°C motsvarande priset för  $7,35 \cdot 10^6$  kWh, vilket med 12 öre/kWh blir ca 900 000:-. Detta belopp ges 40 års avskrivningstid vilket medför en årlig kapitalkostnad av ca 90 000:-. Kapitalkostnaden för lagringsenheten med 20 års avskrivning ger 120 000 per år. Den sammantagna kapitalkostnaden blir således 210 000:-/år.

Driftskostnaden sätts till 90 000:-, varav elkostnaden utgör ca 20 000:-.

Årskostnaden för nyttiggjord lagrad energi blir då  $300\,000:- / 2,625 \cdot 10^6$  - eller ca 11,5 öre/kWh.

#### 6.5 Sammanfattning av beräkningsexemplen

Tre fall har beräknats med utgångspunkt från känd geologi och i relativ storskalighet (250-1000 hushåll).

Som systemlösning har använts ett tvåbrunnssystem, illustrerat i FIGUR 61. Försörjningsgraden beräknas vara 100 %, vilket innebär att tillskottsvärme inte behövs under årets kallaste dagar.

I två av fallen bedöms att dubbla brunnspår behövs och i ett fall enkelt brunnspår. Skulle tillskottsvärme från panncentral tillföras dessa båda fall och lagret dimensioneras för halva effektbehovet erfordras endast enkla brunnspår.

För att beräkna termohydrauliska förlopp, förluster under lagringscykeln från hetvattenlagret, detta lagers termiska mognad med antalet cyklar, frontstabilitet m m



har de olika fallen analyserats med hjälp av matematisk modell av Lundaprojektet "Värmelagring i mark" vid Lunds Tekniska Högskola. Resultat i rapportform redovisas i BILAGA 1.

Vid kostnadsberäkningen har priset för nyttiggjord energi efter lagring tagits fram. Härvid har, förutom anläggning för brunnar, även medtagits engångskostnad för lagringsmagasinets första uppvärmning samt beräkning elkostnad för pumpar under drift och slutligen en grovt uppskattad kostnad för skötsel och underhåll.

De olika kostnadsposterna redovisas i TABELL 1

Kostnadspost	Kostnad per kWh		
	Fall 1	Fall 2	Fall 3
1    Årlig kapitalkostnad			
1.1 Brunnar	5,0	1,9	3,8
1.2 Ansl till värme- central	0,5	0,3	0,8
1.3 Insvängning	1,0	2,9	3,4
2    Årlig driftskostnad			
2.1 El till pumpar	0,5	0,6	0,8
2.2 Skötsel, underhåll	1,5	1,9	2,6
3    Kapital + Drift	9,0	7,6	11,4

TABELL 1 - Kostnadsöversikt angivet i öre/kWh nyttiggjord lagrad energi

Ett sätt att visa lagringskostnad utan hänsyn till exempelvis drift är att ange anläggningskostnader per  $m^3$  lagringsvolym. I ett sådant läge kommer djuplagringsalternativet på en framskjuten plats.

För cisternlagring enligt FIGUR 2 ligger kostnaden på 300-500:-/ $m^3$ . För lagring i bergrum, FIGUR 11, har kostnaden beräknats till storleksordningen 50:-/ $m^3$ .

De i denna rapport redovisade lagringssystemen ger kostnader som ligger mellan 5 och 10:-/ $m^3$  inklusive insvängnings- och anslutningskostnad.

Jord- och berglager kan utnyttjas både för energiproduktion och för lagring.

En rad olika system härför har under senare år förts fram men mycket få av dessa har prövats i praktiken.

Säsongslagring av soluppvärmt vatten (alternativt spillvatten) i djupa akviferer synes vara en väg att gå för att lösa det s k lagringsproblemet.

De problemområden som man kan räkna med i en sådan lagringsform måste anses relativt väldefinierade. De mest svårhanterliga problemen kommer förmodligen att vara av vattenkemisk natur samt brunnsteknisk vad avser injektering.

Den kostnadsbild som framräknats i beräkningsexemplen tyder på att lagringsformen har god ekonomisk konkurrenskraft jämfört med andra lagringssystem. Det skall dock framhållas att lagringen inte kan ses isolerat. Den slutliga tekniska lösningen och därmed också kostnaden för densamma är avhängigt hur sammankopplingen sker till det totala värmesystemet med bl a solfångare, styr- och reglersystem och anpassad VVS-armatur. Det sistnämnda har legat utanför ramen för vad som avhandlats i denna rapport.

En naturlig vidareutveckling av djuplagringsalternativet bör därför vara att studera förutsättningarna för denna sammankoppling. Samtidigt bör något eller några separata lagringsförsök utföras där termohydrauliska reella data kan tillföras de numeriska beräkningsmodellerna. Detta skulle också ge nödvändig erfarenhet av hur en anläggning skall drivas med hänsyn till vattenkemiska och andra problem.



SÄSONGSVÄRMELAGRING I AKVIFERER  
(Projektledare: Olof Andersson, VIAK AB)

Teoretisk studie av effektivitet, uttagstemperaturer och frontstabilitet för tre fall.

Mats Johansson, Johan Claesson

Denna studie har i samarbete med VIAK-projektet gjorts inom ramen för Lundaprojektet "Värmelagring i mark" vid institutionerna för matematisk fysik och byggnadskonstruktionslära vid LTH, Lund.

Lund 1979-11-26

## Problem

Att undersöka möjligheterna att använda vissa grundvattenförande geologiska skikt, akviferer, för säsongslagring av värme. Värme föres till lagret genom att grundvatten pumpas upp ur ett borrhål, varefter det värms och åter pumpas ned till samma skikt genom ett annat borrhål några hundra meter från det första. Uttag av värme sker genom att pumpa vattnet i den motsatta riktningen.

Tre speciella formationer har varit aktuella att studera:

- |        |                        |          |
|--------|------------------------|----------|
| Fall 1 | Sandstensskikt i Skåne | (Fig. 1) |
| Fall 2 | Alnarpsdalen           | (Fig. 2) |
| Fall 3 | Visingsöformationen    | (Fig. 3) |

## Beräkningsförutsättningar

Beräkningarna är utförda med hjälp av ett datorprogram som är utarbetat av Göran Hellström vid Institutionen för Matematisk Fysik, LTH. En rapport 'Linear flow model', vari modellen och datorprogrammet närmare beskrives, kommer inom kort att färdigställas.

Det förutsättes att det berörda området är homogent, samt att det råder cylindersymmetri runt varje rör. Således anses de båda rör som krävs för ett värmelager av denna typ ligga så långt ifrån varandra att deras ömsesidiga påverkan kan försummas. Vattenflödet ut från, eller in mot, ett rör antages vara perfekt horisontellt och radiellt. Flödet är jämnt fördelat i djupled längs hela rörets längd. Täthetsinducerade vattenflöden med åtföljande kantring av den vertikala temperaturfronten försummas. Dessa effekter diskuteras i ett följande avsnitt. Det vatten som pumpas ut från ett rör pressar successivt bort vattnet utanför och uppfyller ett cylinderformat område.

För de aktuella beräkningarna har de olika jordartsskikten ansetts ha de fysikaliska egenskaper som givits i figur 1-3. Vid beräkningsstarten har en linjärt stigande temperaturfördelning antagits med  $8^{\circ}\text{C}$  vid markytan och en ökning med  $0.03^{\circ}\text{C}/\text{m}$  vertikalt nedåt.

Upp- och urladdning av akvifererna har skett enligt följande: 3 månaders konstant tillförsel av vatten med viss temperatur, 3 månaders lagring utan vattenpumpning, 3 månaders uttag med samma flöde som under uppladdningen samt 3 månaders vila innan nästa årscykel påbörjats. För var och en av de tre beskrivna akvifererna har två olika laddningsstrategier studerats. Dessa sex fall har samtliga simulerats för fem år.

Fall	Flöde vid laddning och urladdning (m <sup>3</sup> /s)	Vattentemperatur vid laddning (°C)
1a Skånsk sandsten	0.015	90
1b Skånsk sandsten	0.020	70
2a Alnarpsdalen	0.010	90
2b Alnarpsdalen	0.015	70
3a Visingsöformationen	0.010	90
3b Visingsöformationen	0.015	60

### Resultat

Figur 4 visar temperaturprofiler i radiell led i mitten av akviferen enligt fall 1a. De streckade linjerna är från första året efter 4.5 månader, d.v.s. mitt i lagringsperioden, och efter 10.5 månader, d.v.s. mitt i viloperioden. De heldragna linjerna avser samma tidpunkter under femte året. I figur 5 visas för samma akvifer kurvor motsvarande dem i figur 4 då laddningen ändrats från fall 1a till fall 1b.

Figur 6 visar isotermer för fall 1a efter 4.5 månader för det femte året. I figur 7 visas isotermerna ett halvår senare. Ur figurerna framkommer tydligt resultatet av att man har pumpat upp vatten. Vattnet i akviferen har förflyttats närmare röret medan områdena närmast över och under akviferen fortfarande är uppvärmda.

I figur 8 - figur 10 visas hur temperaturerna på det uttagna vattnet varierar under de tre månadernas uttag. Den streckade linjen anger omgivningstemperaturen på det djup som akviferen befinner sig.

Figur 8 visar uttagstemperaturerna från den skånska sandstensakviferen. De tre övre kurvorna ger temperaturerna under det 1:a, 3:e och 5:e årets uttag då laddningen skett enligt fall 1a. Den undre kurvan visar uttagstemperaturen 5:e året vid laddning enligt fall 1b.

Figur 9 visar temperaturen på det under det 5:e året uttagna vattnet ur akviferen i Alnarpsdalen. Den övre kurvan gäller laddning enligt fall 2a, den undre enligt fall 2b.

Figur 10 visar temperaturen på det under det 5:e året uttagna vattnet ur Visingsöakviferen. Den övre kurvan gäller laddning enligt fall 3a, den undre enligt fall 3b.

Om man som ett mått på akviferens lagringseffektivitet under en cykel använder kvoten mellan uttagen och inmatad energi erhålles värden enligt nedan. Energiinnehållet är här grundat på skillnaden mellan vattnets temperatur och akviferens omgivningstemperatur (38, 12 respektive 11°C).

Fall	År:	1	2	3	4	5
1a		0.78	0.83	0.85	0.86	0.87
1b		0.80	0.84	0.86	0.87	0.88
2a		0.82	0.86	0.87	0.88	0.89
2b		0.84	0.87	0.89	0.90	0.90
3a		0.74	0.79	0.81	0.83	0.84
3b		0.78	0.83	0.85	0.86	0.87

#### Kommentarer

Som framgår av tabellen ökar effektiviteten för samtliga fall med cirka 10% från första till femte året. Effektiviteterna torde fortsätta att öka ännu ett antal år men med en allt lägre takt.

Att variera temperaturnivån på det inmatade vattnet är en fråga om ren skalning av de redan erhållna resultaten. Sådana skillnader i temperaturnivå kommer således ej att påverka akviferens effektivitet.



Variationer i pumphastigheten, och därigenom i mängden inmatat vatten, inverkar främst genom att denna mängd kommer att ange storleken på lagringscylindern. De relativa förlusterna från ett stort lager är mindre än de från ett litet varför en stor vattenmängd medför en högre effektivitet. Akviferens form och värmeledningsförmågan i och omkring akviferen har också betydelse för förlusterna.

Vid en jämförelse av de tre studerade akvifererna finner man att Alnarpsdalen (fall 2) klarar sig bäst. Det beror främst på att den har den lägsta värmeledningsförmågan. Den något lägre effektiviteten för Visingsöformationen (fall 3) beror på att den genom sin stora höjd har en mindre lämplig form. Laddning enligt 3a d.v.s. 10 l/s under 3 månader ger en radie på lagringscylindern på knappt 22 meter vilket ska jämföras med höjden 100 meter. Det skånska sandstensskiktet (fall 1) klarar sig trots sitt höga  $\lambda$  (= 4.0 J/sm<sup>0</sup>C) bättre än fall 3 på grund av sin lämpligare form.

### Densitetsflöden

De givna resultaten är baserade på en förenkling av grundvattenflödet kring brunnen. Vi har antagit att flödet är perfekt horisontellt och riktat i radiell led.

Densitetsskillnader mellan varmt och kallt vatten kommer att störa denna enkla strömbild. En ursprungligen vertikal termisk front i akviferen kommer efter hand att kantra. Det varma vattnet tenderar att flyta upp och lägga sig i akviferens övre del. Man kan få en utskjutande varm tunga i akviferens övre del. Detta leder till en större yta mellan varma och kalla delar. Om denna effekt är alltför kraftig kan man ej utnyttja akviferen för värmelagring. Värmeförlusterna blir för stora.

I (\*) göres en ingående studie av detta problem. Kantringshastigheten hos en vertikal termisk front bestäms av en karakteristisk kantringstid  $t_0$  enligt följande (Formel (2a), sidan 18):

$$t_0 = \frac{\eta(T_0, T_1)HC}{k C_w} \cdot 1.2 \cdot 10^{-6} \quad (\text{s})$$

---

(\*) Hellström, Tsang, Claesson. Heat Storage in Aquifers. Buoyancy Flow and Thermal Stratification Problems. Institutionen för matematisk fysik, Lund, oktober, 1979.

På tiden  $t_0$  har fronten kontrat till en lutning på ungefär  $45^\circ$ . I formeln anger  $H$  akviferens höjd,  $C$  dess volymetriska värmekapacitet,  $k$  permeabiliteten ( $m^2$ ) och  $C_w = 4.1 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3\text{K}$  vattens volymetriska värmekapacitet. Funktionen  $n$  anger beroendet av den kalla ( $T_0$ ) och den varma ( $T_1$ ) temperaturen. Denna funktion anges i (\*) (figur 15, sidan 18).

För de tre fallen har vi:

	$H$ (m)	$C$ ( $\text{J/m}^3\text{K}$ )	$K \cdot H$ ( $m^2/s$ )	$k$ ( $m^2$ )
Fall 1	40	$2.5 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^{-3}$	$2.5 \cdot 10^{-12}$
Fall 2	40	$2.7 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^{-3}$	$12.5 \cdot 10^{-12}$
Fall 3	100	$2.2 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^{-4}$	$0.5 \cdot 10^{-12}$

Vi har använt att

$$k = \frac{\mu(T)}{\rho g} K \cong \frac{1000 \cdot 10^{-6}}{1000 \cdot 10} K = 10^{-7} K$$

Viskositeten  $\mu(T)$  har tagits för  $T = 20^\circ\text{C}$ .

Den karakteristiska kantringstiden  $t_0$  blir då i de sex fallen:

	$T_0$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_1$ ( $^\circ\text{C}$ )	$n$ (-)	$t_0$ (tid)
Fall 1a	38	90	1.00	136 dagar
Fall 1b	38	70	2.03	275 dagar
Fall 2a	11	90	1.28	37 dagar
Fall 2b	11	70	2.17	64 dagar
Fall 3a	12	90	1.28	5 år
Fall 3b	12	60	2.80	11 år

Den karakteristiska kantringstiden  $t_0$  får ej vara alltför liten jämfört med tidsskalan för lagringen. I fall 3 får vi en kantringstid på flera år. Detta innebär att effekten av densitetsflöden är försumbar. Vårt antagande med linjärt flöde är mycket välgrundat. I fall 1 kommer vi att få ett relativt måttligt densitetsflöde och en måttlig kantring av temperaturfronten.

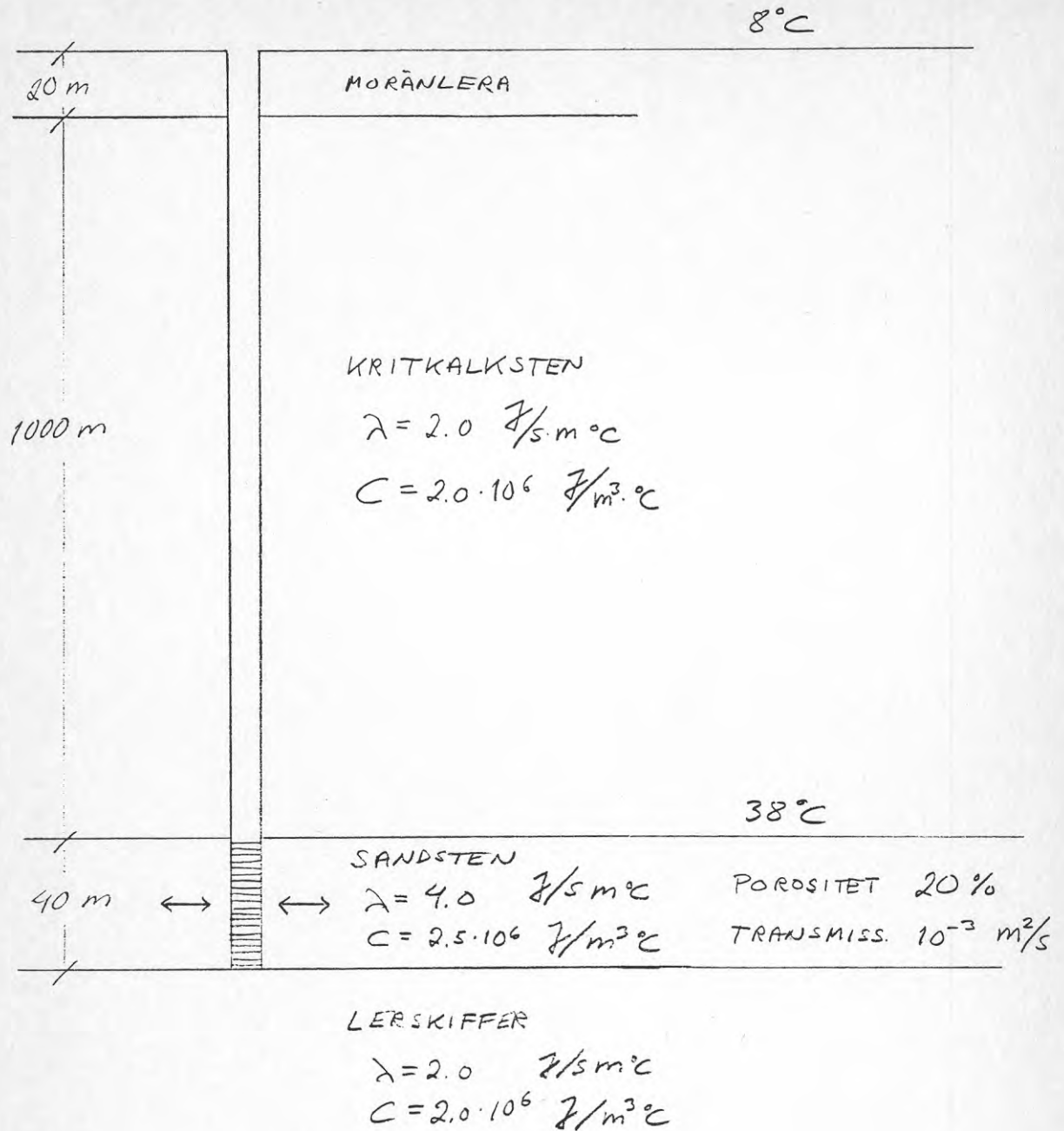
Fallet är klart godkänt ur termohydraulisk synpunkt. I fall 2a får vi en så pass kort kantringstid att man bör studera de termiska stratifieringsproblemen mer detaljerat innan mer precisa bedömningar av systemet kan göras. Fall 2b med den lägre injektionstemperaturen  $T_1 = 70^{\circ}\text{C}$  synes vara acceptabelt. Man får i detta fall räkna med en ökning av värmeförlusterna och en lägre temperatur på det upptagna vattnet p.g.a. det relativt kraftiga densitetsflödet.

### Sammanfattning

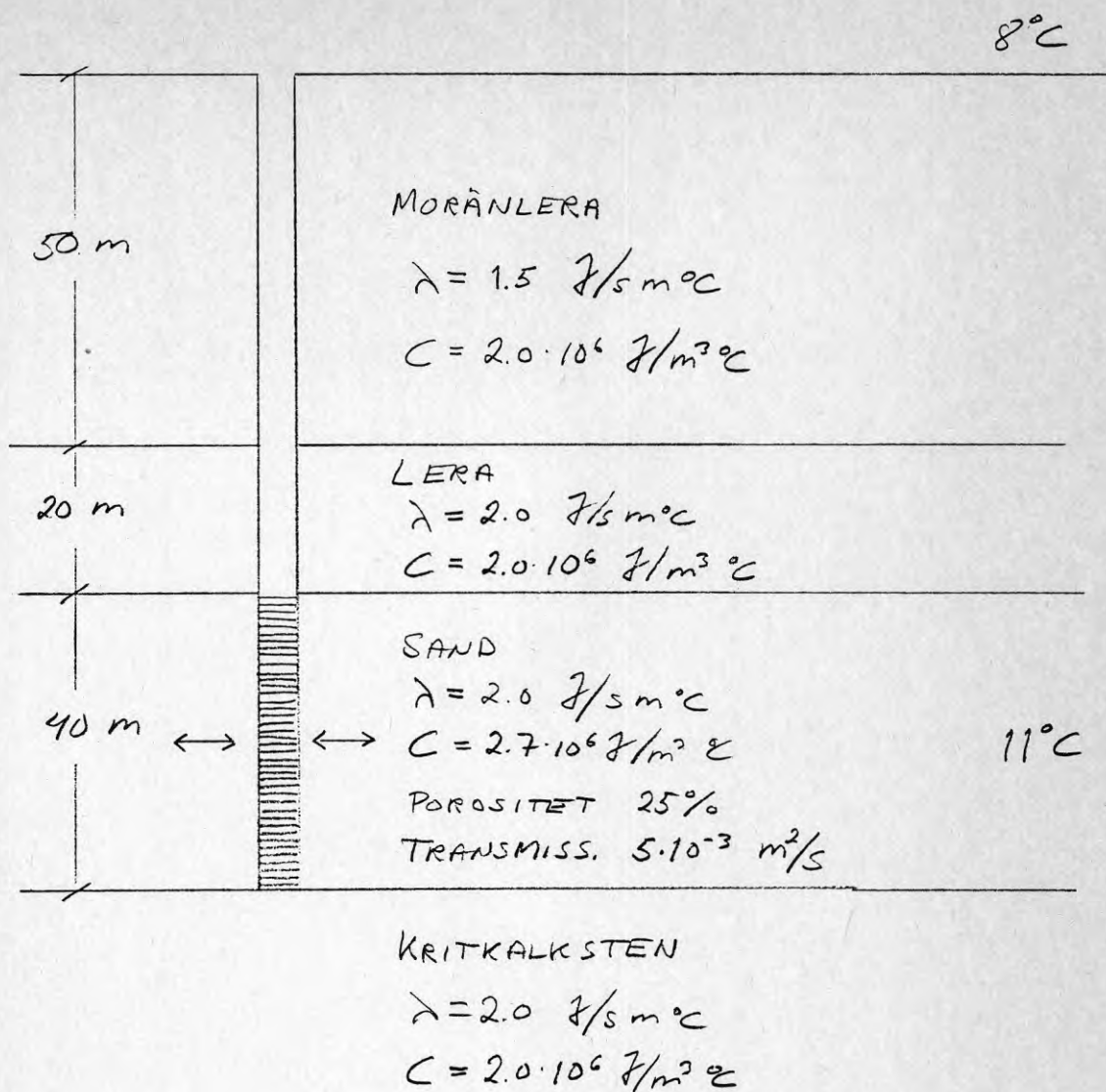
Sammanfattningsvis kan sägas att de studerade fallen för säsongslagring av värme ter sig mycket lovande ur termisk synpunkt. Det är möjligt att återvinna mellan 70 och 90% av den inmatade energin. Vid ett konstant vattenuttag under tre månader tar det mellan 1.5 och 2 månader innan temperaturen har sjunkit från inmatningsvärdet  $90^{\circ}\text{C}$  till  $80^{\circ}\text{C}$ . I slutet av uttagsperioden är temperaturen fortfarande högre än  $60^{\circ}\text{C}$ .

Densitetsflöden kan vara ett problem vid värmelagring i akviferer. De studerade fallen har så låg permeabilitet att detta icke är något problem utom i fall 2 (Alnarpsdalen). Vid den lägre inmatningstemperaturen ( $70^{\circ}\text{C}$ ) bör även detta fall fungera väl ur termohydraulisk synpunkt. Vill man använda den högre inmatningstemperaturen ( $90^{\circ}\text{C}$ ) blir problemen större. För att avgöra om även dessa fall fungerar tillfredställande måste mer detaljerade studier göras.

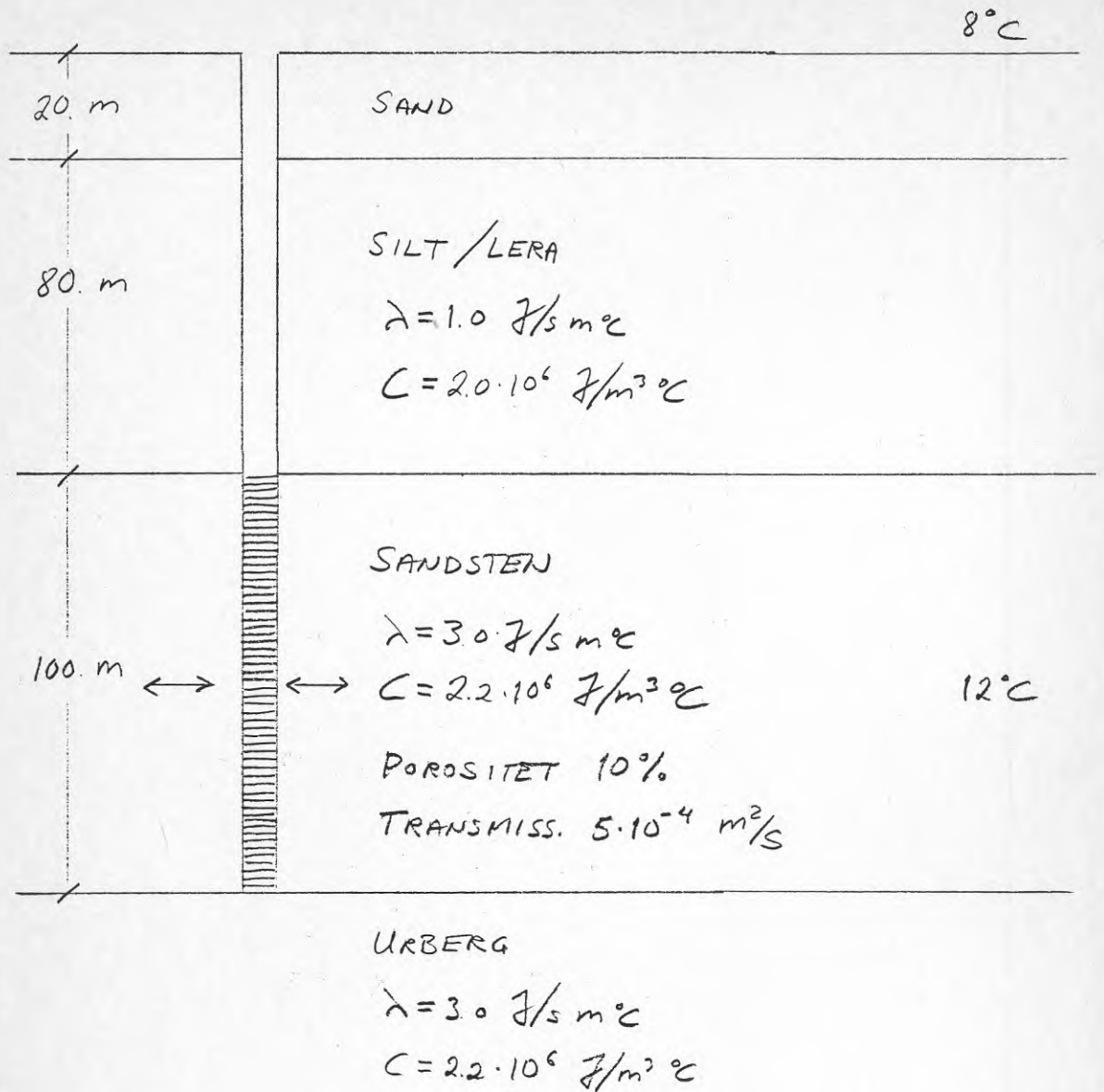
Dessa bedömningar baserar sig på antagandet att akvifererna är homogena. Man måste genom fältundersökningar undersöka om detta antagande gäller.



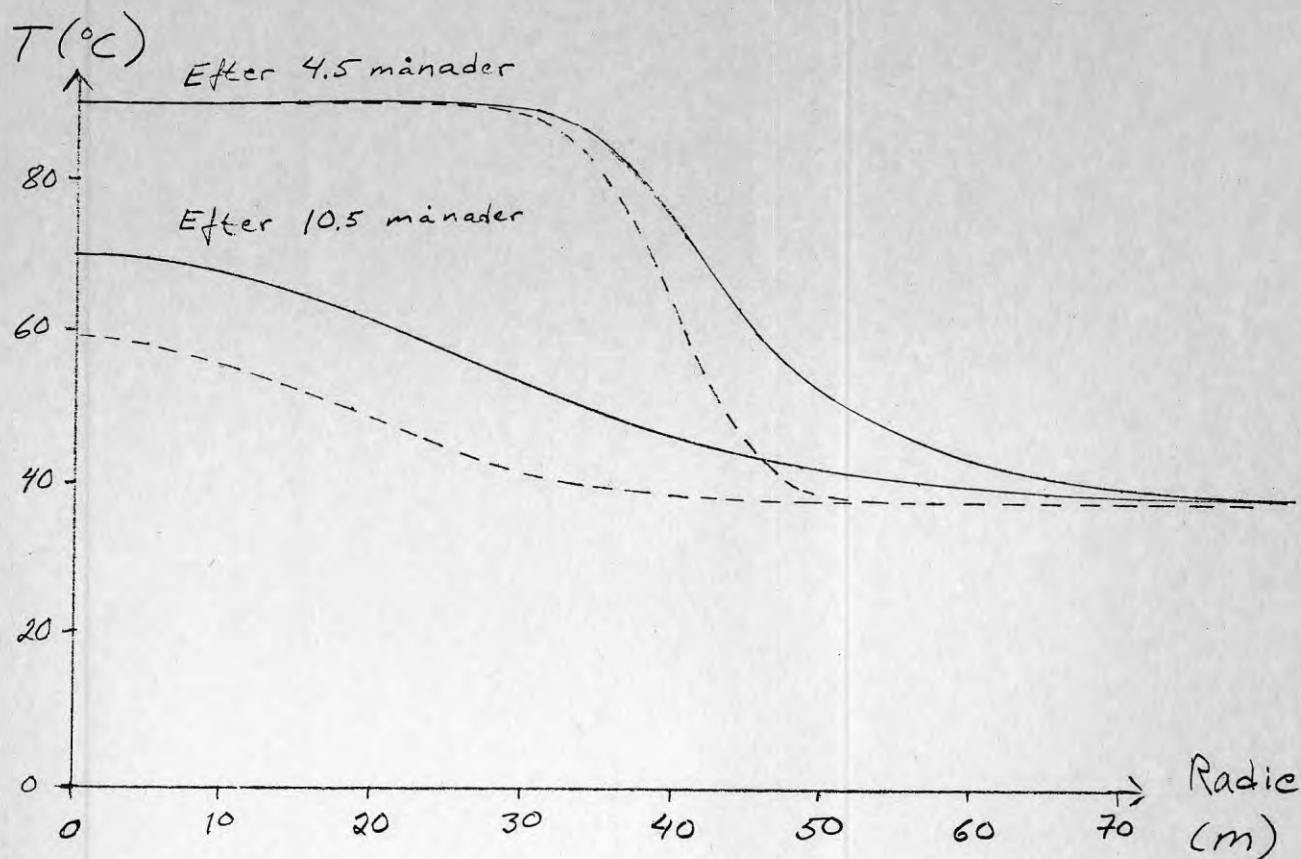
FIGUR 1. FALL 1 : SANDSTEN I S.V. - SKÅNE



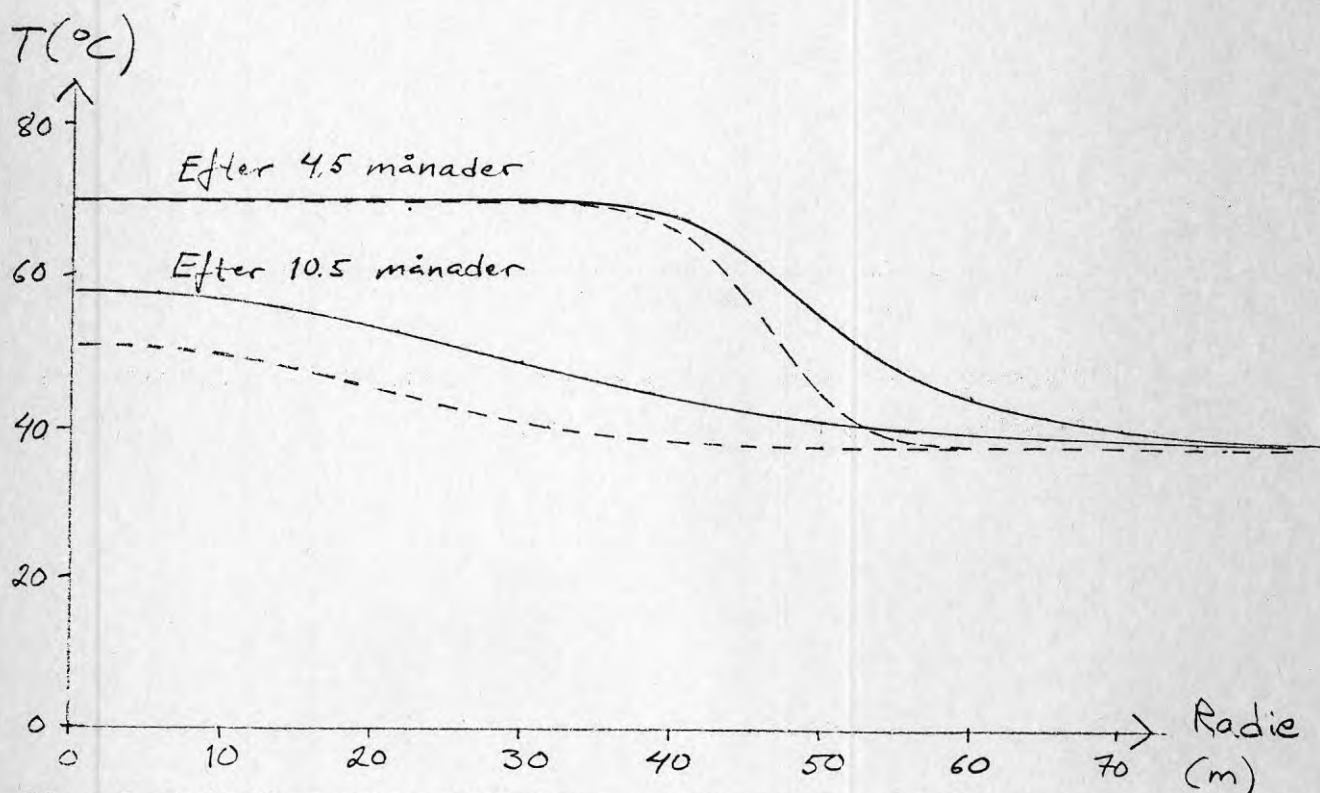
FIGUR 2. FALL 2 : ALNARPSDALEN



FIGUR 3. FALL 3: VISINGSÖFORMATIONEN

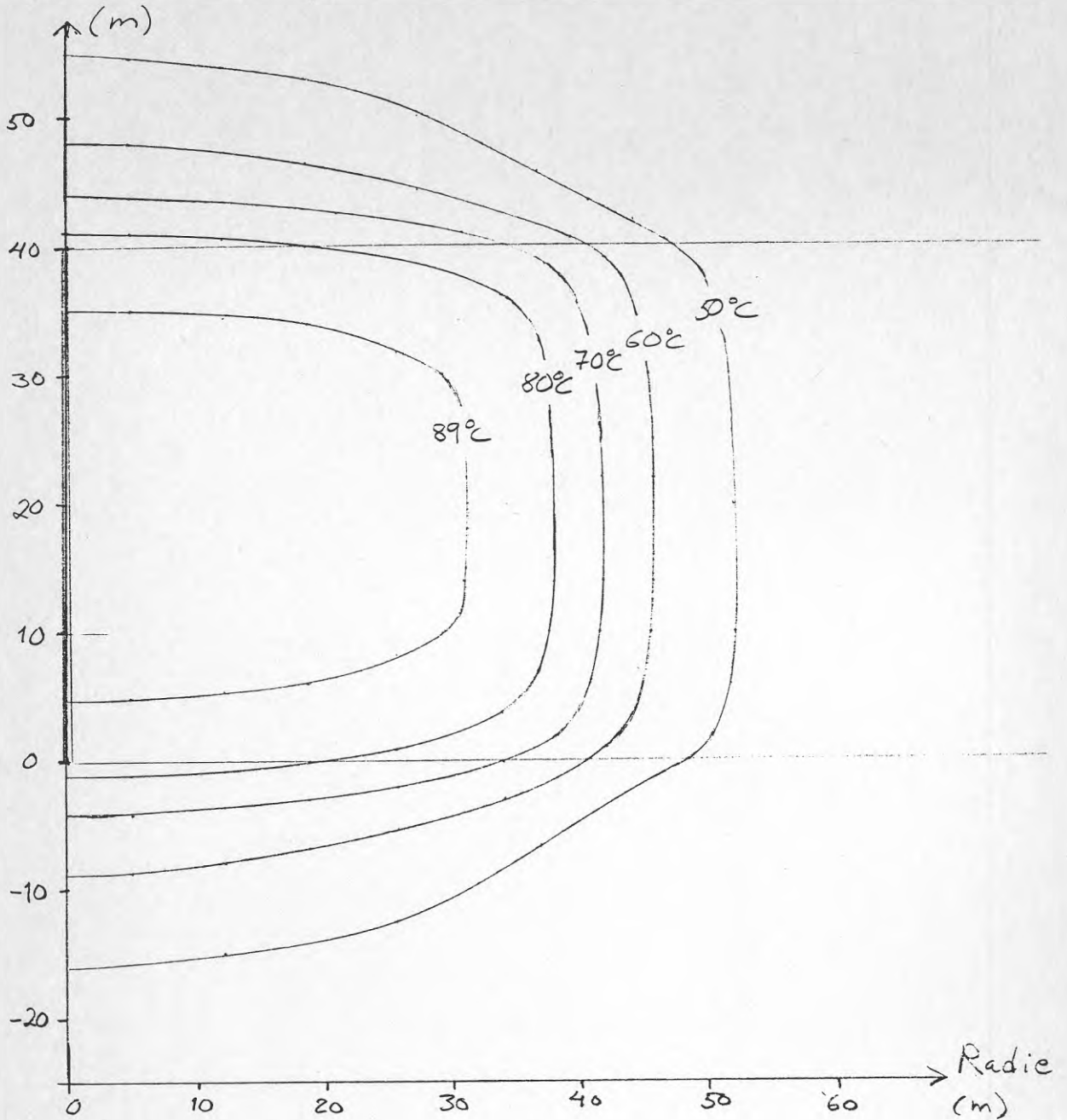


Figur 4. Radiell temperaturfördelning i mitten av den skånska sandstensakvifern vid laddning med 15 l ( $90^{\circ}\text{C}$   $\text{H}_2\text{O}$ )/s. Streckade linjer: 1:a året. Heldragna linjer: 5:e året.



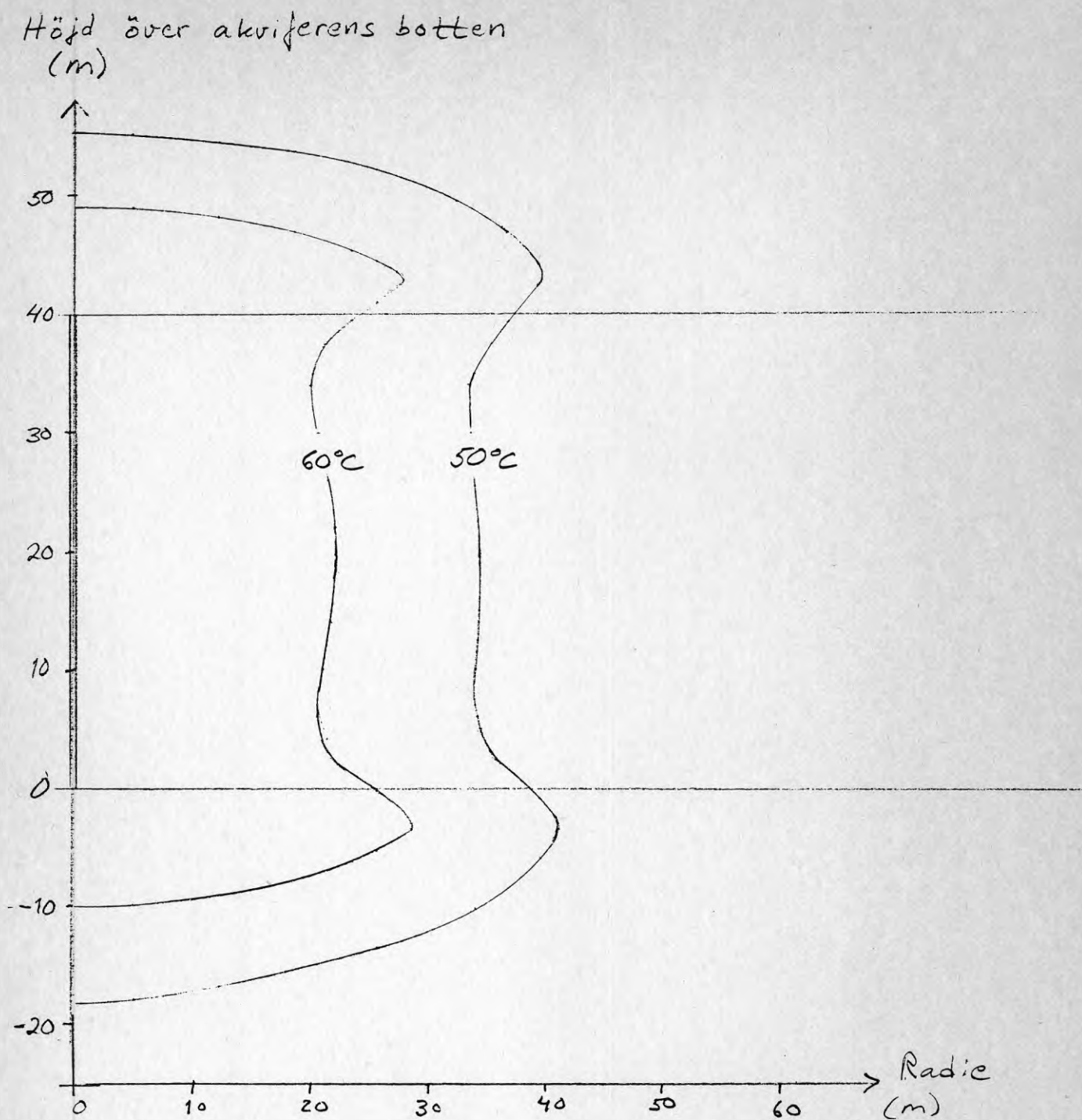
Figur 5. Radiell temperaturfördelning i mitten av den skånska sandstensakvifern vid laddning med 20 l ( $70^{\circ}\text{C}$   $\text{H}_2\text{O}$ )/s. Streckade linjer: 1:a året. Heldragna linjer: 5:e året.

Höjd över akviferens botten

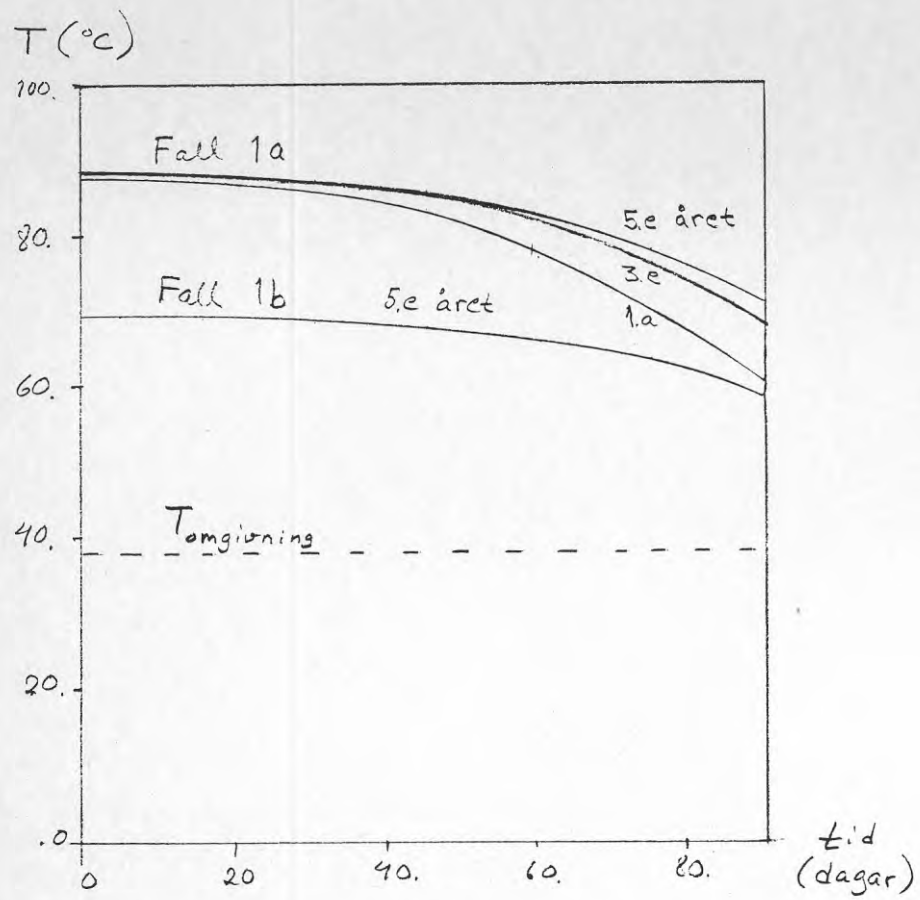


Figur 6. Temperaturfördelning efter 4 år och 4.5 månader i den skånska sandstensakviferen vid laddning med 15 l ( $90^{\circ}\text{C H}_2\text{O}$ )/s.

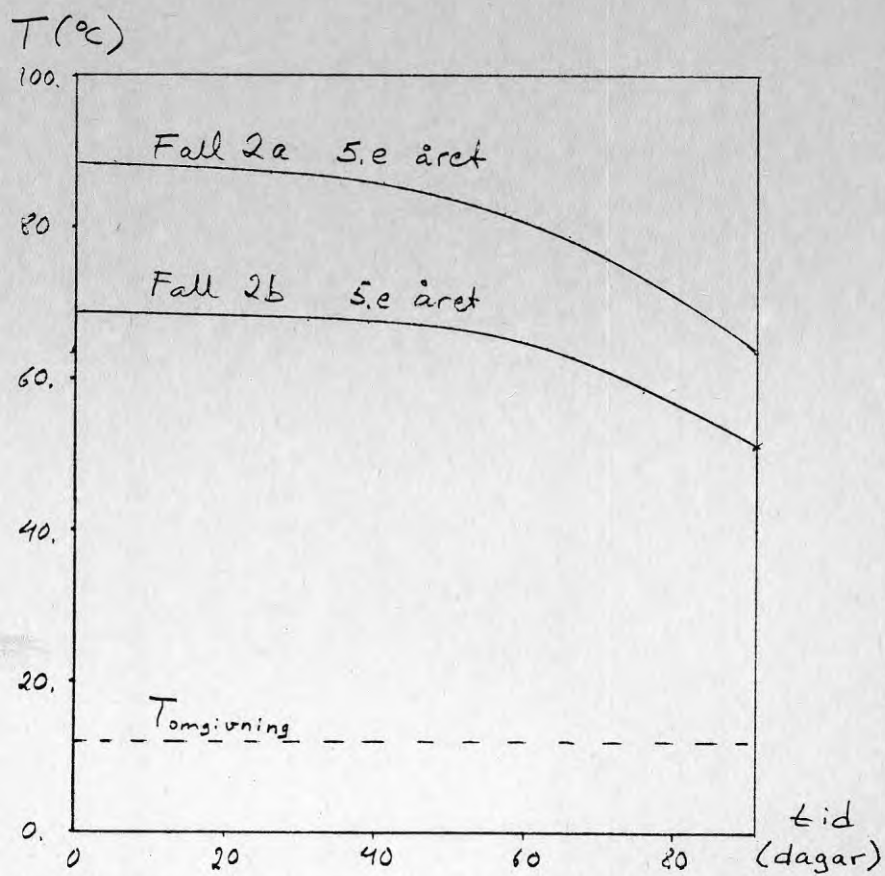




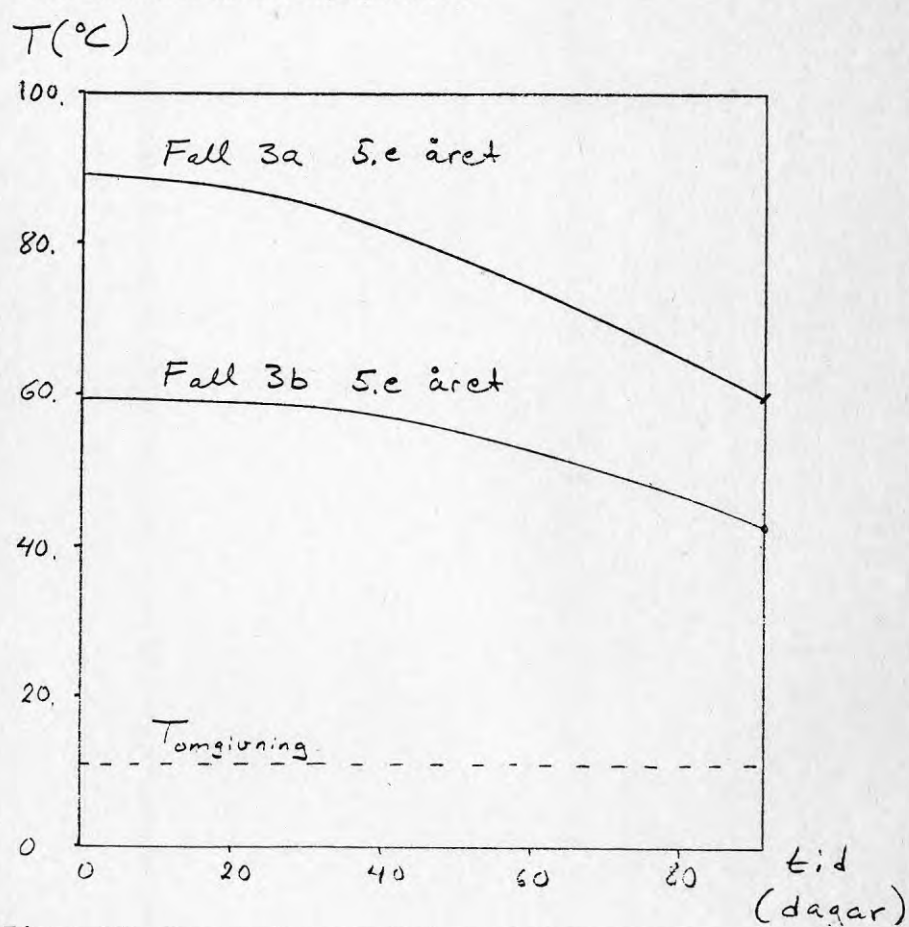
Figur 7. Temperaturfördelning efter 4 år och 10.5 månader i den skånska sandstensakviferen vid laddning med 15 l ( $90^{\circ}\text{C}$   $\text{H}_2\text{O}$ )/s.



Figur 8. Temperatur på, det uttagna vattnet från den skånska sandstensakviferen.



Figur 9. Temperatur på det uttagna vattnet från akviferen i Alnarpsdalen.



Figur 10. Temperatur på det uttagna vattnet från akviferen i Visingsöformationen.



## CITERAD LITTERATUR

AGA Thermia Ytjordvärme, Värme har du i din egen mark.  
Broschyr.

Andersson, O, 1980, Borrnings- och provtagningsmetodik  
(koncept). BFR-rapport under redovisning.

Atlas Copco, 1975, Odex-metoden. Jordborrning enligt  
excentermetoden. Atlas Copco, MCT nr 15490, Stockholm.

Bjelm, L, 1977, Geotermisk energiutvinning i Skåne.  
Slutrapport etapp 1. Arbetsgruppen för geotermisk energi,  
LTH, Lund.

Bjelm, L, 1979, Geotermisk energiutvinning i Skåne.  
Slutrapport etapp 2 och 3. Arbetsgruppen för geotermisk  
energi, LTH, Lund.

Catz, D, Coats, K, 1968, Underground Storage of Fluids.  
Ulrich's Books, Inc. Ann Arbor, Michigan.

Davis, S N, DeWiest, R M J, 1967, Hydrogeology, John  
Wiley and Sons, New York.

Finn, L, 1979, A Swedish solar heating plant with seasonal  
storage. BFR Document 14:79.

Gustafson, G, Andersson, O, 1979, Geotermi i SV-Skåne.  
Uppborrning och provpumpning av Höllviksnäs 1. Slut-  
rapport. NE-projekt 4560 062-063, VIAK AB, Malmö.

Gustafson, G, 1979, Energilagring i jord och berg -  
programarbete. PM till BFR-ansökan, daterad VIAK AB,  
Göteborg, 79-11-22.

Gustafson, G, 1980, Brunnsteknik (koncept), BFR-rapport under redovisning

Hellström, G, Tsang, C-F, Claesson, J, 1979, Heat Storage in Aquifers. Buoyancy Flow and Thermal Stratification Problems. Inst för Matematisk Fysik, Lunds Tekniska Högskola, Lund.

Johansen, Ø, 1975, Thermal Conductivity of Soils. Frost i jord, nr 16, Oslo.

Magnusson, W, H, Lundqvist, G, Regnéll, G, 1963, Sveriges geologi. Norstedts, Stockholm.

Modin, B, 1979, Förstudier av byggnadsuppvärmning med jordvärmepump. Geologiska faktorer. Byggeforskningen R55, Stockholm.

Modin, B, 1979, Ackumulering av värme i mark och vatten. Ur samlingspärm STF-kurs "Alternativa energiformer för uppvärmning", Stockholm 25 sept 1979.

Nordberg, L, Persson, G, 1979, Vårt vatten, tillgång-utnyttjande. LTs förlag, Stockholm.

Roseen, R, 1978, Central solar heat station in Studsvik. Studsvik report 78/77, Nyköping.

Stymne, H, 1979, Fasomvandling, Kemisk lagring och kemiska värmepumpar. Ur samlingspärm STF-kurs "Alternativa energiformer för uppvärmning", Stockholm 25 sept 1979.

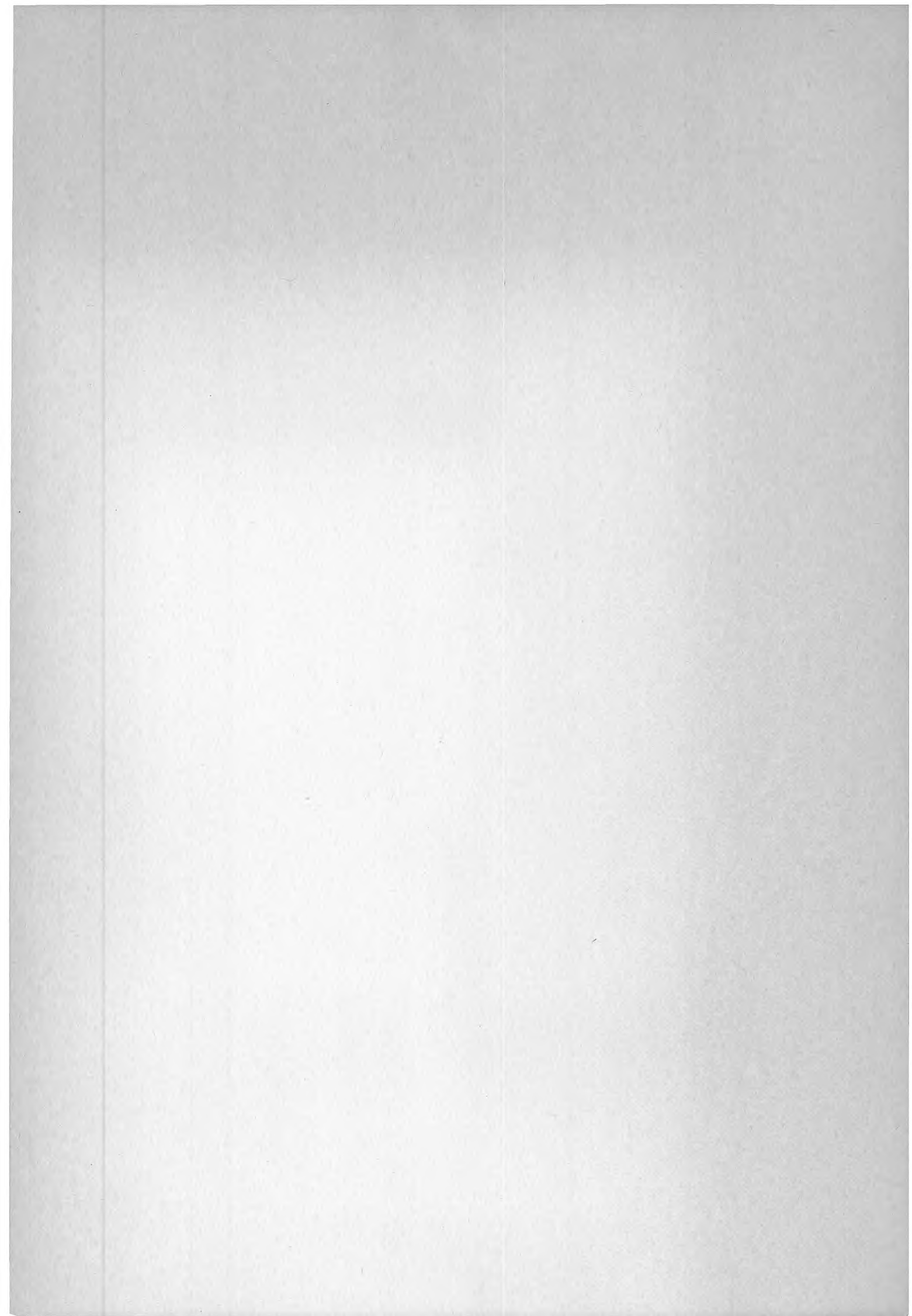
Theis, C, V, 1935, The relation between the Lowering of the Piezometric Surface and the Rate and Duration of Discharge of a Well using Groundwater Storage. Trans. Americ. Geophys. Union, Vol 16 pp 519-524.

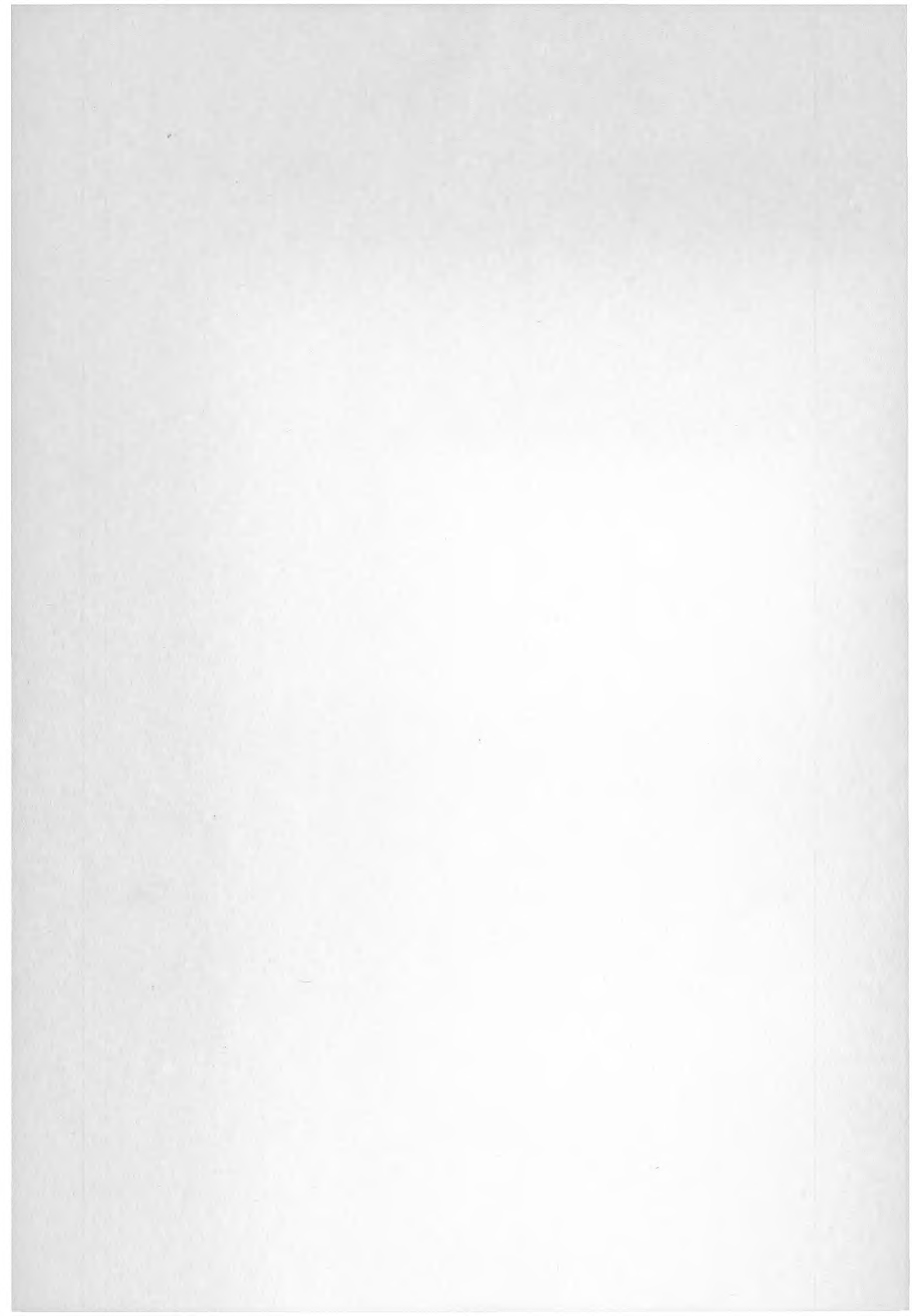
Thiem, G, 1906, Hydrologische Methoden. Gebhardt, Leipzig.

Tsang, C, F (ed) 1978-. Ates Newsletter. A quarterly review of Aquifer Thermal Energy Storage. Vol 1, Lawrence Berkeley Laboratory, UCLA, Berkley.









Denna rapport hänför sig till forskningsanslag  
790358-1 från Statens råd för byggnadsforskning  
till Viak AB, Malmö.

**Art.nr: 6700201**

**Abonnemangsgrupp:  
V. Anläggningsteknik**

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

**R101: 1980**

**ISBN 91-540-3310-1**

**Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm**

**Cirka pris: 35 kr exkl moms**