



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

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



**Rapport**

**R46:1983**

# **Borrhålslager i berg**

**Studium av ett värmelagringsalternativ  
inom projekt Södertuna solvärme**

**Sören Andersson  
Anders Eriksson  
Sam Johansson  
Lars Ljung**

*V  
OVI*

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

**Byggforskningsrådet**

R46:1983

BORRHÅLSLAGER I BERG

Studium av ett värmelagringsalternativ  
inom projekt Södertuna solvärme

Sören Andersson  
Anders Eriksson  
Sam Johansson  
Lars Ljung

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag  
810880-8 från Statens råd för byggnadsforskning  
till AIB - Allmänna Ingenjörbyrå AB, Stockholm.

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

R46:1983

ISBN 91-540-3926-6

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

LiberTryck Stockholm 1983

INNEHÅLLSFÖRTECKNING	<u>Sid</u>
Förord	5
1. Sammanfattning - Resultat	6
2. Inledning	8
2.1 Orientering	8
2.2 Södertuna-projektet	8
3. För- och nackdelar med borrhålslager	9
4. Systemlösningar för borrhålslager	10
4.1 Frågeställningar	10
4.2 Stratifierad värmelagring eller ej?	10
4.3 Värmepumpning eller ej?	12
4.4 Kopplingsalternativ för värmepumpar	13
4.5 Bufferttank	16
5. Termiska förlopp i borrhålslager	17
5.1 Allmänt	17
5.2 Värmeöverföring i borrhål	17
5.3 Termisk kortslutning mellan vattenflöde i borrhål	18
5.4 Borrhålslagrets förmåga att ta emot eller avge stora värmeeffekter	21
5.4.1 Utan temperaturstratifiering	22
5.4.2 Förmåga att ta emot effekt med ett temperaturstratifierat lager	23
5.5 Solpulser	25
5.6 Temperaturstratifiering	26
5.7 Inre och yttre värmeläckage	29
5.7.1 Inre värmeläckage	30
5.7.2 Yttre värmeläckage	31
6. Beräkningar för borrhålslager till Södertuna-projektet	33
6.1 Energi- och effektbehov	33
6.2 Tidsförlopp, energimängder och förluster	33
6.3 Temperaturförlopp i solfångare och lager	34
6.4 Lagerstorlek	35
6.5 Bufferttank	38
6.6 Optimalt borrhålsavstånd	39
6.7 Ekonomisk jämförelse med vattentank	40
7. Beräkningsprogram	43
7.1 Beräkningar med LTH-modellen CHS5	43
7.1.1 Viktigaste indata för referensfall	43
7.1.2 Parametervariation	45
7.1.3 Grafiska resultat - redovisning	47
8. Slutsatser och förslag till fortsatta studier	52
8.1 Slutsatser	52
8.2 Fortsatta studier	53
Referenser	55

Bilagor:

- A Uppskattning av värmeövergångstalet på grund av egenkonvektion i ett borrhål med slutet cirkulationssystem
- B Temperaturförlopp i borrhål
- C Beräkning av temperatursvar på solpulser
- D Uppskattning av kvot mellan inlagrad energimängd och maxeffekt
- E Optimalt hålavstånd för borrhålslager med harmoniskt temperaturförlopp
- F PM över de geologiska förutsättningarna för ett borrhålslager vid Södertuna (Anders Eriksson).
- G Hydrauliska värmeförluster från borrhålslager (Sam Johansson)

## FÖRORD

Allmänna Ingenjörbyrån AB, AIB, har i här presenterad studie undersökt tekniska och ekonomiska förutsättningar för storskalig värmelagring i borrhålslager. Studien har applicerats på projektet Södertuna Solvärme, vilket ingår som svenskt bidrag i IEA-programmet SH & C Annex VII "Central Solar Heating with Seasonal Storage".

I projektet har medverkat

- tekn lic Sören Andersson, AIB, (proj ledare)
- geolog Anders Eriksson, AIB, (geologi)
- civ ing Sam Johansson, AIB, (geohydrologi)
- civ ing Lars Ljung, AIB, (huvudrapport)

Studien har genomförts i samarbete med projekt Södertuna Solvärme (delstyrgruppen Solvärmesystem och arbetsgruppen Lagring).

En stor del av projektet har genomförts med hjälp av matematiska modeller, utarbetade vid Institutionen för Matematisk Fysik vid Lunds Tekniska Högskola.

Stockholm juli 1982

AIB - ALLMÄNNA INGENJÖRSBYRÅN AB

Sören Andersson / Lars Ljung

## 1. SAMMANFATTNING - RESULTAT

I studien har huvudsakligen behandlats de tekniska förutsättningarna för värmelagring i borrhålslager i solvärme-system. Ekonomiska bedömningar har utförts förenklat och i begränsad omfattning.

Studien har genomförts på basdata och andra grundförutsättningar som gällt för projekt Södertuna Solvärme. I södertunaprojektet genomförs en omfattande studie av möjligheterna att uppföra ett till 80 % solvärt bostadsområde med ca 500 lägenheter. Södertunaprojektet förutsätter årlagring av värme med vattentank som huvudalternativ.

För ett solvärmesystem finns ett stort antal tänkbara systemlösningar för hur ett värmelager kan utnyttjas. Om ett borrhålslager skall användas påverkas systemlösningen bl a av tre viktiga frågeställningar

- skall värme lagras stratifierat?
- skall värmepumpning användas som komplement till solenergin?
- erfordras bufferttank för utjämning av den dygnsvis pulserande värmeeffekten från solfångarna?

För att besvara dessa frågeställningar och även i övrigt belysa borrhålslagrets lämplighet i ett solvärmesystem har inom projektet genomförts ett antal delstudier avseende t ex kortslutningseffekter i borrhål, temperaturförlopp i solfångare och lager, optimalt borrhålsavstånd, allmänna parametervariationer och kostnadsjämförelser.

I syfte att för södertunaprojektet lokalisera lämplig plats för ett borrhålslager har tidigare utförd geologisk kartering och geoteknisk undersökning kompletterats med bl a seismik, kärnbörning, vattenförlustmätning och bestämning av bergets värmeledningstal. Undersökningarna har utförts av AIB och Statens Vattenfallsverk.

Beräkning av allmänna termiska förlopp i lagret, värmeförluster, etc, har utförts med hjälp av datorprogram utarbetade vid Institutionen för matematisk fysik vid Lunds Tekniska Högskola. Beräkningsprogrammen har kompletterats med grafiska rutiner så att lagrets funktion lättare kan studeras.

Den genomförda studien har bl a visat att

- borrhålslagret och dess driftstrategi bör utformas så att värmelagret lagras med temperaturstratifiering. (Olika delar av lagret har då sinsemellan olika temperatur).



- borrhålslagret bör förses med en eller flera värmepumpar. I ett temperaturstratifierat lager kan då värme pumpas från en kallare till en varmare del av lagret. Detta kan minska anläggningskostnaden för lagret.
- borrhålslagret är mindre lämpligt i system med stora effekttransienter. Värmepulsen från t ex solfångare bör därför utjämnas dygnsvis med bufferttank.
- borrhålslagret kan utföras med öppna eller slutna cirkulationssystem. Ett öppet system ger bättre värmetransport och troligen lägre anläggningskostnad men kräver ett relativt tätt berg. Genomförda geohydrologiska undersökningar indikerar att berget i det tänkta lagerläget i Södertuna är mycket tätt. Möjligheter finns således att utföra lagret alternativt med öppet eller slutet cirkulationssystem. (Ett slutet system är dyrare men torde vara säkrare avseende hydraulisk kontroll och kemiska utfällningar.)
- borrhålslagret är vid fullstora anläggningar ekonomiskt fördelaktigt i jämförelse med alternativet lagring i vattentank. Vid mindre anläggningar kan dock borrhålslagrets värmeförluster bli besvärande stora. Aktuell lagerstorlek i södertunaprojektet synes vara ett gränfall.
- borrhålslagret medger successiv utbyggnad. Detta innebär bl a att det kan vara riktigt att även i ett projekts första etapp, då borrhålslagret på grund av för litet lagerbehov ej är konkurrenskraftigt, anlägga ett sådant lager.
- borrhålslagrets landskapspåverkan är, jämfört med en vattentank, liten. Detta är särskilt uppenbart i södertunaprojektet.

Sammanfattningsvis kan konstateras att många frågeställningar avseende borrhålslagret återstår att besvara. Borrhålslagret synes dock vara ett konkurrenskraftigt alternativ till andra storskaliga lagringsformer.

## 2. INLEDNING

### 2.1 Orientering

Här redovisad studie avser främst värmetekniska systemfrågor i samband med utnyttjande av borrhålslager. Studien är tänkt allmängiltig. Beräkningar och resultat har dock speciellt baserats och tillämpats på Södertuna-projektet (se nedan).

Ekonomiska bedömningar har gjorts förenklat och i begränsad omfattning. Geologiska och hydrogeologiska förutsättningar för borrhålslagret redovisas i bilaga F resp G.

Studien har genomförts administrativt fristående men i nära samarbete med Södertuna-projektet. Detta ingår som svenskt bidrag i IEA-programmet SH & C Annex VII "Central Solar Heating with Seasonal Storage".

### 2.2 Södertuna-projektet

Riksbyggen, Södertälje kommun, Vattenfall m fl genomför en omfattande studie av möjligheterna att uppföra ett solvärt bostadsområde på ca 500 lägenheter vid Södertuna /2/. Avsikten är att hela bostadsområdet skall värmas med solenergi till ca 80%. Resten av energibehovet täcks av elenergi för drift av värmepumpar. I huvudalternativet används en vattentank för årstidslagring.

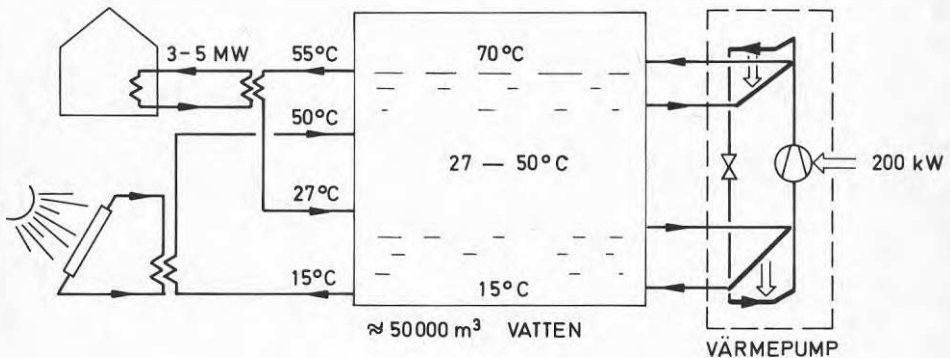


Fig 2-1 Södertuna-projektet, huvudalternativ med vattentank (storlek och temperaturer är approximativa)

### 3. FÖR- OCH NACKDELAR MED BORRHÅLSLAGER

Järmfört med värmelagring med vattentank eller vattenfyllt bergum har borrhålslagret följande för- och nackdelar.

#### Fördelar:

- + En stor lagervolym kan erhållas till en sannolikt låg kostnad.
- + Liten miljöpåverkan.
- + Kan byggas ut i etapper.

#### Nackdelar:

- Problem med värmeläckage för mindre lager.
- Begränsad värmetransport inom lagret, speciellt för kortvariga förlopp.
- Mindre flexibilitet avseende anslutning och systemlösning. (Läget för in- och utflöde kan inte varieras kontinuerligt.)
- Tryckfall i långa rörledningar.

Om ett öppet cirkulationssystem används (se avsnitt 5.1) tillkommer problem med utfällningar och läckage till eller från berget. Investeringskostnad och värmemotstånd blir dock sannolikt mindre med ett öppet cirkulationssystem.

#### 4. SYSTEMLÖSNINGAR FÖR BORRHÅLSLAGER

##### 4.1 Frågeställningar

Det finns en mängd olika tänkbara systemlösningar för hur ett värmelager skall användas i ett solvärmesystem. Detta gäller även för borrhålslaget. För borrhålslaget finns dock vissa värmetekniska begränsningar som komplicerar valet av systemlösning.

Systemlösningen är påverkad av tre viktiga frågeställningar för värmelaget:

1. Skall värme lagras stratifierat eller ej?
2. Skall värmepumpning användas som ett komplement till solenergin?
3. Krävs det en bufferttank för att ta emot den dygnsvis pulserande värmeeffekten från solfångarna?

##### 4.2 Stratifierad värmelagring eller ej?

Stratifierad värmelagring innebär att olika delar av lagret samtidigt kan ha avsevärt olika temperaturer. Värme kan då in- och utlagras vid temperaturnivåer som är i stort sett oberoende av hur uppladdat lagret är. Fördelen med detta är att en stor del av den tillgängliga temperaturskillnaden mellan solfångare och uppvärmningssystem kan utnyttjas för temperatursvinget i lagret.

Att större temperatursving kan erhållas med stratifierad värmelagring kan illustreras med följande figurer:

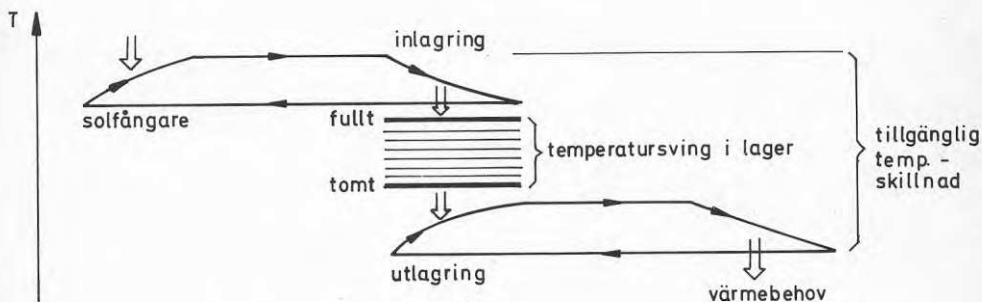


Fig 4-1 Temperaturförlopp utan stratifiering

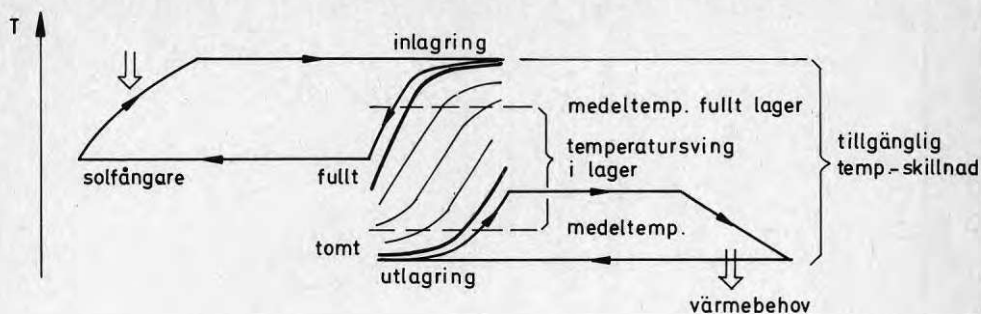


Fig 4-2 Temperaturförlopp med stratifiering

Sannolikt blir också solfångarnas verkningsgrad bättre med temperaturstratifiering på grund av den lägre returtemperaturen.

Temperaturstratifiering i ett borrhållslager kan medföra följande nackdelar:

1. Begränsad bergvolym för värmetransport mellan bergmassan och fluiden
2. Värmeläckage inom lagret
3. Krav på anpassning av fluidflöde till temperaturgradienten i lagret
4. Begränsat antal tillgängliga temperaturnivåer
5. Komplicerad styrning
6. Krav på viss minsta storlek

Av dessa nackdelar är troligen det första av störst betydelse. Det behandlas därför mer detaljerat i avsnitt 5.4.2.

Olika sätt att anordna temperaturstratifiering diskuteras i avsnitt 5.6.

Värmeläckage inom lagret kan motverkas med värmepumpning mellan lagrets kalla och varma delar.

Att olika lagertemperaturer är tillgängliga vid endast ett begränsat antal nivåer (en nivå för varje parallellkopplad zon av borrhål) gör att systemlösningen för ett temperaturstratifierat lager blir något mer komplicerad.

Ett borrhållslager med konstant (dvs endast tidsberoende) temperatur kan i princip kopplas till det övriga systemet med

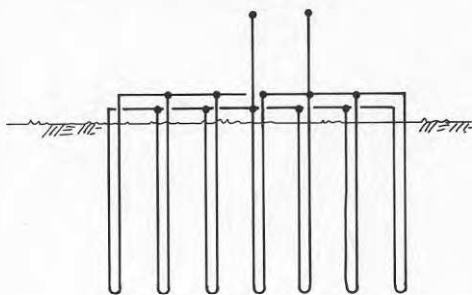


Fig 4-3 Endast två anslutningar för värmelager med (i rummet) konstant temperatur (Borrhålen kan vara serie och/eller parallellkopplade).

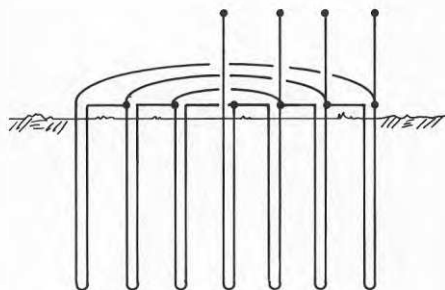


Fig 4-4 Flera anslutningar krävs för att olika temperaturzoner i ett stratifierat borrhålslager skall kunna utnyttjas

För att kontrollera flödena och temperaturen i de olika anslutningarna till ett stratifierat borrhålslager krävs givetvis ett relativt komplext styr- och regelsystem. Denna nackdel bör dock kunna bemästras genom ett väl genomtänkt systemval där lagret kontrolleras och styrs av en minidator.

#### 4.3 Värmepumpning eller ej?

Genom att komplettera solvärmesystemet med en eller flera värmepumpar kan olika fördelar uppnås, exempelvis.

1. Temperatursvinget i lagret kan ökas med hjälp av värmepumpning. Ökat temperatursving medför att lagret kan göras mindre.

2. Värmeläckage från lagret till omgivningen kan motverkas med en värmepump. Detta medför att den lagrade energimängden och därmed också solfångarytan och lagervolymen kan minskas.
3. Värmeläckaget inom ett temperaturstratifierat borrhållslager kan minskas genom värmepumpning mellan lagrets olika temperaturzoner. Detta medför också att solfångarytan och lagervolymen kan minskas.
4. Uppvärmningssystemet blir mer oberoende av vädret om värmepumpar används som komplement till solvärmnet.
5. Solfångarnas verkningsgrad kan ökas genom lägre inloppstemperatur.

Exempel på nackdelar med värmepumpar i systemet är:

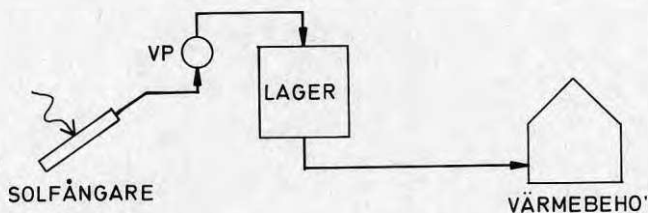
1. Behovet av drivenergi (el) blir större.
2. Systemet blir mer komplicerat och det blir svårare att bestämma hur regleringen skall ske.
3. Värmepumparna har begränsad effekt och är begränsat reglerbara. Temperaturnivåerna får dessutom inte variera för mycket.

Fördelarna med värmepumpning har dock bedömts överväga.

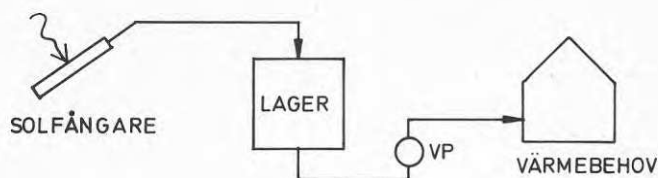
Om solfångare med realistiska prestanda skall användas och om tillräcklig framledningstemperatur skall kunna erhållas måste sannolikt både temperaturstratifiering av lagret och värmepumpning användas.

#### 4.4 Kopplingsalternativ för värmepumpar

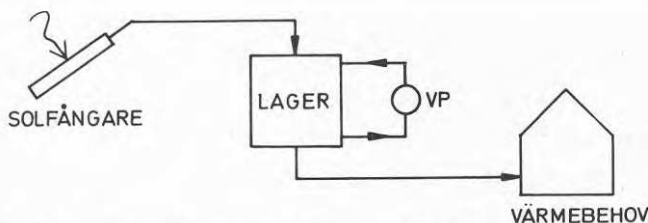
Värmepumpar kan integreras i systemet på många olika sätt. I första hand kan värmepumpens placering väljas enligt tre alternativ:



Alt. 1 Värmepump mellan solfångare och lager



Alt.2 Värmepump mellan lager och värmebehov



Alt.3 Värmepumpning inom lagret

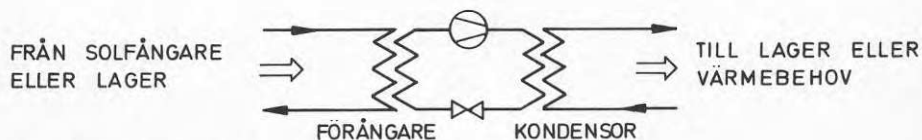
Antalet kopplingsalternativ ökar givetvis om andra värmekällor än solfångare införs i systemet.

Samma värmepump kan kopplas om för användning enligt de olika alternativen. Fördelarna skall dock vägas mot den ökade komplexiteten.

Det mer detaljerade valet av koppling för värmepumpar begränsas bl a av följande "önskemål":

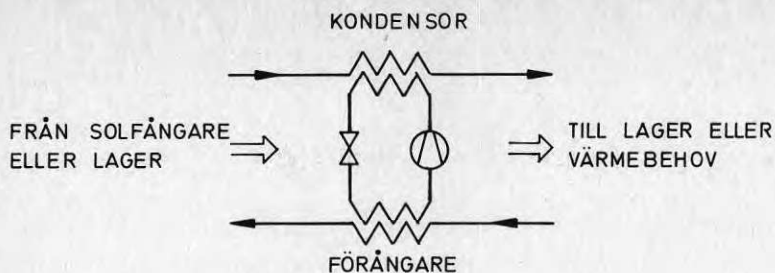
- En värmepump bör utnyttjas tillräckligt lång tid och med jämn effekt för att kapitalkostnaden inte skall bli onödigt stor
- En värmepump bör arbeta mellan relativt konstanta temperaturnivåer

För de två första alternativen ovan kan man välja mellan serie- och parallellkoppling av värmepumpen:



A Seriekoppling





### B Parallellkoppling

Alternativ A kan troligen förkastas eftersom värmepumpen måste dimensioneras för den största effekt som skall överföras.

Om värmepumpen utnyttjas inom lagret så måste detta vara temperaturstratifierat. Dessutom måste värme kunna tas in och ut ur olika delar av lagret. Eftersom ett borrhållager är uppbyggt av ett begränsat antal borrhål finns endast ett begränsat antal anslutningar tillgängliga. Värmepumpen bör kunna kopplas om mellan dessa anslutningar. Hela systemet kan beskrivas med ett omkopplingsbart schema av följande typ:

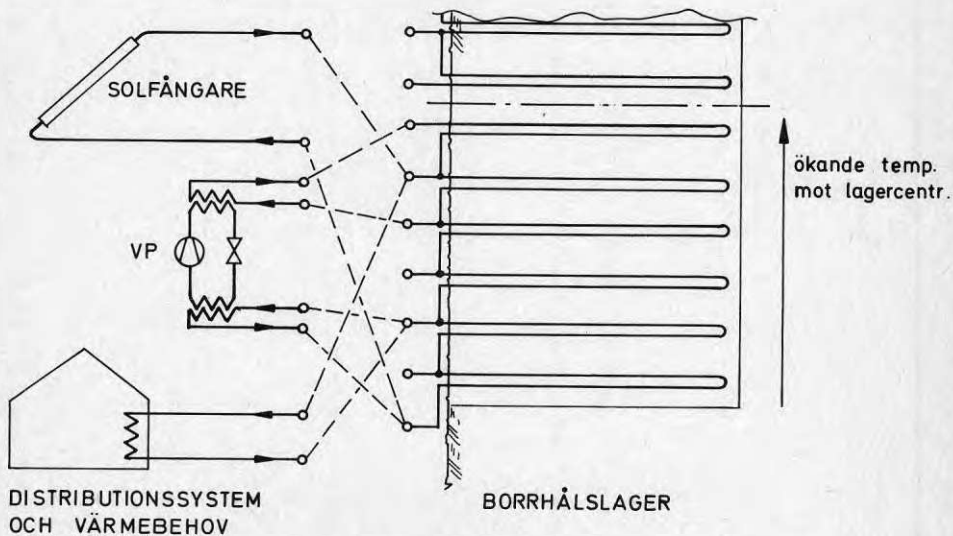


Fig 4-5 Kopplingsschema för temperaturstratifierat lager  
Principskiss

Fördelen med ett omkopplingsbart system är att lagret, värmepumpen och solfångarna kan utnyttjas nära optimalt. Solfångarna kan i så fall utnyttjas även vid dålig instrålning om någon del av borrhållagret har tillräckligt låg temperatur. Värmepumpen kan utnyttjas mellan de zoner av lagret som

har lämpliga temperaturer. Värme kan tas ut från den del av lagret som för tillfället har tillräckligt hög temperatur.

Nackdelen med ett omkopplingsbart system är komplexiteten. Många ventilfunktioner krävs. Styrningen av dessa måste sannolikt ske med en minidator. Detta möjliggör dock att hela systemet styrs på ett flexibelt sätt så att hänsyn kan tas till exempelvis förväntat väder eller till fel i delar av systemet.

Jämfört med alternativ 1 och 2 (värmepump före resp efter lagret) har alternativ 3 (värmepumpning inom lagret) fördelen att värmepumpen kan utnyttjas med jämn belastning under lång drifttid.

#### 4.5 Bufferttank?

Valet av systemlösning är beroende på om värmeeffekten från solfångarna måste utjämnas med bufferttankar. Detta behövs om borrhåslagrets "effektväljningsförmåga" inte är tillräcklig. Problemet med effektväljningsförmågan för "solpulser" behandlas i avsnitt 5.4. Resultat av dessa beräkningar visar att borrhåslagrets storlek kan reduceras avsevärt även med en relativt liten bufferttank. (Enligt beräkningar i avsnitt 6.5 så bidrar 1 m<sup>3</sup> av bufferttankens volym med en volymminskning av borrhåslagret på upp till 320 m<sup>3</sup>.)

En fördel med bufferttankar är att de kan placeras nära solfångarna så att distributionssystemet för solvärmets inte behöver dimensioneras för full solfångareffekt. Bufferttankar kan också utnyttjas för att utjämna värmeeffekten till en värmepump. Ett sådant system har föreslagits av Kadesjö och Sintorn /1/.

## 5 TERMISKA FÖRLOPP I BORRHÅLSLAGER

### 5.1 Allmänt

Borrhålslagrets funktion och ekonomi bygger på en lämplig kompromiss mellan olika motstående krav som exempelvis tillräcklig värmetransport i lagret och tillräckligt litet värmeläckage från lagret. Exempel på termiska förlopp eller fenomen som har stor betydelse för lagrets funktion är:

- Värmeöverföring i borrhål
- Termisk kortslutning mellan vattenflöden i borrhål
- Effektsväljningsförmåga
- Solpulser
- Temperaturstratifiering
- Inre och yttre värmeläckage

Följande delavschnitt behandlar dessa förlopp.

### 5.1 Värmeöverföring i borrhål

Ett borrhålslager kan utföras med öppet eller slutet cirkulationssystem. I ett öppet system strömmar den värmebärande fluiden (vatten) i direkt kontakt med bergväggen i borrhålen.

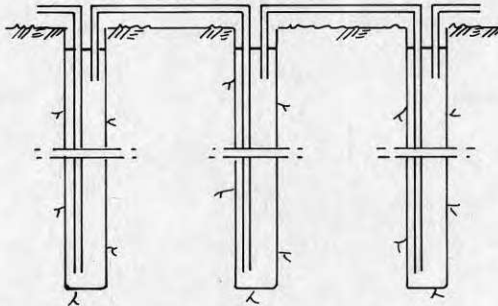


Fig 5-1 Öppet cirkulationssystem

I ett slutet system cirkulerar fluiden i U-rör eller koncentriska rör. Värme överförs genom ledning eller egenkonvektion i grundvattnet mellan rör och borrhålsvägg.

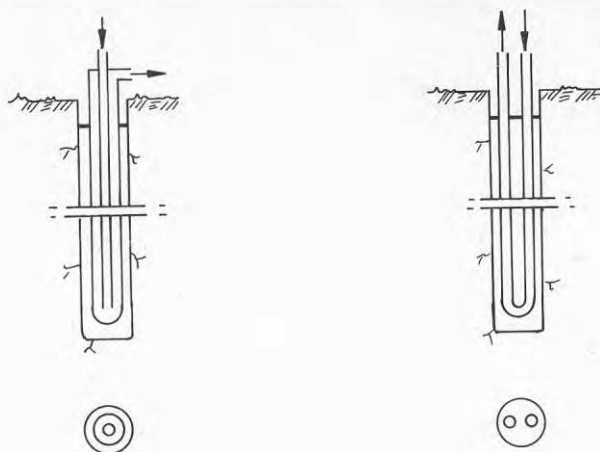


Fig 5-2 Slutna cirkulationssystem

För ett öppet cirkulationssystem är värmeöverföringen mellan fluid och borrhålsväggen alltid fullt tillräcklig. Detta beror på att strömningssträckan från inloppet till fullt utbildad temperaturprofil är betydligt kortare än borrhålens längd, vilken kan vara av storleksordningen 100 m.

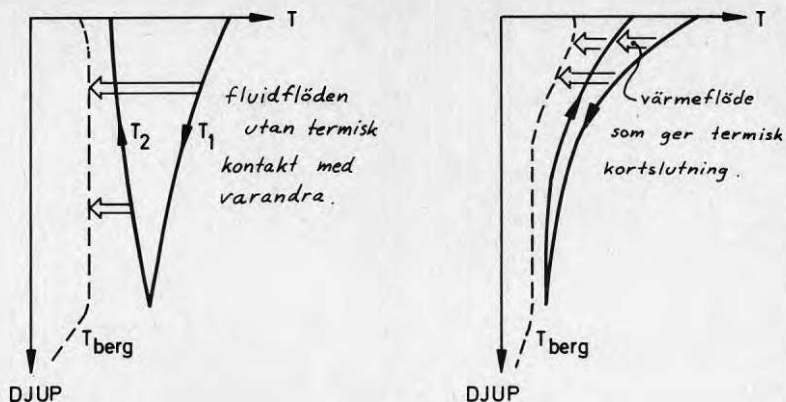
För slutna cirkulationssystem är värmeöverföringen begränsad av ledning och egenkonvektion i det grundvatten som finns mellan rören och borrhålsväggen.

En uppskattning av värmeövergångstalet i ett borrhål med slutet cirkulationssystem görs i bilaga A. Där visas att värmemotståndet i borrhålet är betydligt (exempelvis 13 ggr) mindre än värmemotståndet från borrhålsväggen till bergmassan.

Mätresultat från pågående försök vid Älvkarleby antyder också att värmemotstånden i borrhålen är små.

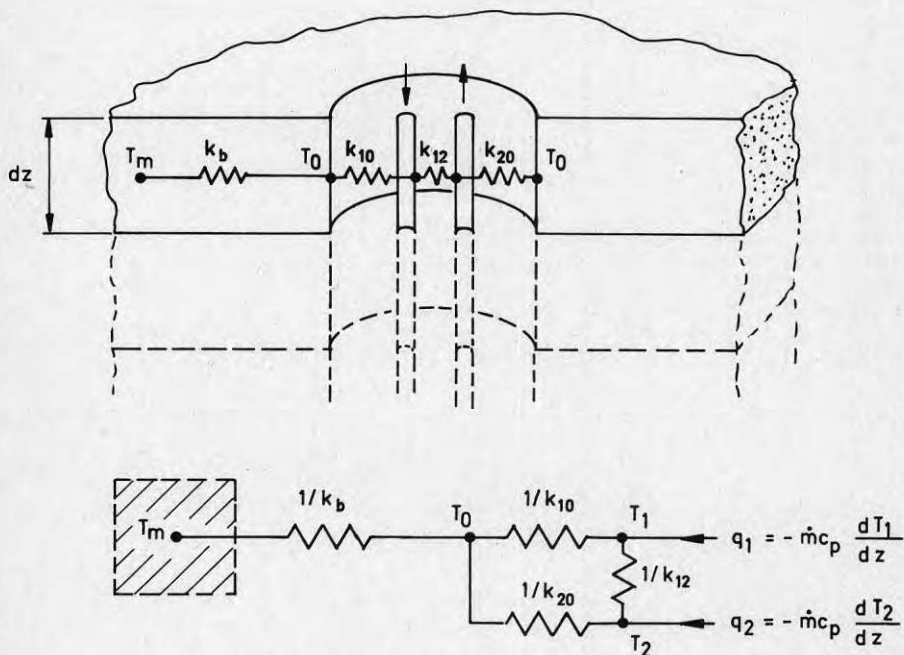
### 5.3 Termisk kortslutning mellan vattenflöden i borrhål

I ett borrhålslager in- och utlagras värme med hjälp av vatten som strömmar både uppåt och nedåt i varje borrhål. Om värmemotståndet mellan de motriktade flödena är litet så blir flödena termiskt kortslutna.



Figur 5-3 Termiskt isolerade resp termiskt kortslutna fluidflöden

De termiska förloppen kan analyseras med hjälp av följande motståndsnät:



Figur 5-4 Motståndet för värmeflöden mellan fluidflödena i borrhål

För långsamma förlopp är värmemotståndet  $1/k_b$  mellan borrhålsväggen och bergmassan betydligt större än motståndet mellan borrhålsväggen och närmaste fluidkanal. För att undvika termisk kortslutning får den totala värmekonduktansen mellan kanalerna inte vara för stor.

$$k'_{12} = k_{12} + \frac{1}{\frac{1}{k_{10}} + \frac{1}{k_{20}}}$$

De olika värmekonduktanserna kan uttryckas som längdkonstanter av typen  $l = \frac{\dot{m}C_p}{k}$ .

Om  $l'_{12} = \frac{\dot{m}C_p}{k'_{12}}$  är kortare eller av samma storleksordning

som borrhålslängden  $L$  så blir flödena mer eller mindre termiskt kortslutna. Det är alltså önskvärt att  $l_{12}$  är betydligt större än borrhålslängden  $L$ .

Den termiska kontakten mellan åtminstone en av fluidkanalerna och berget bör vara god. Detta kan uttryckas med att motsvarande längdkonstanter, exempelvis  $l_b = \frac{\dot{m}C_p}{k_b}$  skall vara

kortare eller av samma storleksordning som borrhålslängden  $L$ . Med det tidigare beräknade värmemotståndet  $R_{\text{berg}} = 0.12 \text{ Km/W}$  och  $l_b = 100 \text{ m}$  erhålls vattenflödet

$$\dot{m} = \frac{l_b k_b}{C_p} = \frac{l_b}{C_p R_{\text{berg}}} = \frac{100}{4178 \cdot 0.12} = 0.2 \text{ kg/s}$$

Det är alltså endast ett litet vattenflöde som krävs för en lämplig relation mellan värmekonduktansen  $k_b$  och värmekapacitetsflödet  $\dot{m}C_p$  skall erhållas.

För att minimera risken för termisk kortslutning så bör den totala värmekonduktansen  $k'_{12}$  mellan kanalerna vara så liten som möjligt. Detta kan åstadkommas genom att en av kanalerna utförs som en tjockväggig plastslang.

Värmekonduktansen genom en slangvägg är

$$k = \frac{2 \pi \lambda}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad [ \text{W/mK} ]$$

Antag  $\lambda = 0.16 \text{ W/mK}$  (PVC)

Välj  $\frac{r_2}{r_1} = 2$

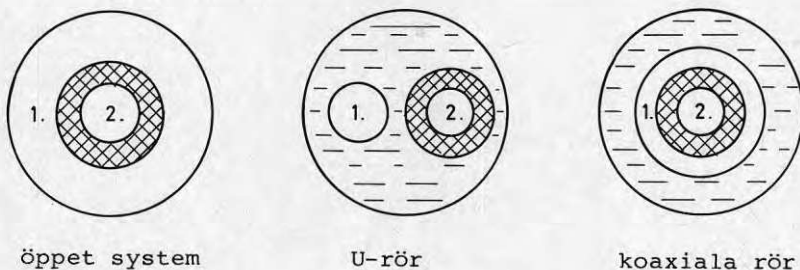
$$k = \frac{2 \pi \cdot 0.16}{\ln 2} = 1.45 \text{ W/mK}$$



Med vattenflödet  $m = 0.2 \text{ kg/s}$  erhålles längdkonstanten

$$l = \frac{mCp}{k} = \frac{0.2 \times 4178}{1.45} = 576 \text{ m, dvs betydligt längre än aktuella borrhålslängder}$$

Fluidkanalerna i borrhålen kan utformas på olika sätt. En av kanalerna bör dock vara termiskt isolerad.



Figur 5-5 Alternativa sätt att utforma fluidkanalerna i ett borrhål

Utformning och den termiska dimensioneringen av kanalerna i borrhålen är beroende på om lagret skall ha en vertikal temperaturgradient eller ej (se avsnitt 5.5 nedan).

I bilaga B härleds mer detaljerade samband för fluidtemperaturerna.

#### 5.4 Borrhålslagrets förmåga att ta emot eller avge stora värmeeffekter

En nackdel med värmelagring i ett borrhålslager är att temperaturdifferenser krävs för transport av värmets mellan berget och fluiden i borrhålen. En del av den tillgängliga temperaturskillnaden mellan in- och utlagrat värme måste reserveras för värmetransporten. Detta minskar både det tillgängliga temperatursvinget och den energimängd som kan lagras. Temperaturdifferensen  $\theta$  mellan berg och fluid är lika med produkten av den överförda effekten  $q = \frac{Q}{L_{tot}}$  per meter borrhål och värmemotståndet  $R$ .

$$\theta = qR = \frac{Q}{L_{tot}} R$$

Värmemotståndet  $R$  kan påverkas med exempelvis borrhålsavståndet  $d_1$ . För värmeströmmar med tillräcklig varaktighet är värmemotståndet:

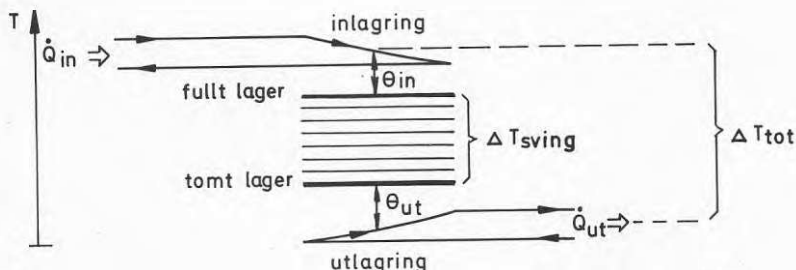
$$R = \frac{1}{k_{h\ddot{a}l}} + R_{berg} = \frac{1}{k_{h\ddot{a}l}} + \frac{1}{2\pi\lambda} \left( \ln \frac{r_1}{r_0} - \frac{3}{4} \right)$$

där  $r_0$  = borrhålsradien  
 $r_1 = 0.525 d_1$  = delningsradien mellan borrhålen (se fig 6-3).

Värmemotståndet i berget dominerar normalt över värmemotståndet i själva borrhålen (se avsnitt 5.2).

#### 5.4.1 Utan temperaturstratifiering

Om värme lagras vid konstant temperatur blir temperatursvinget  $T_{\text{sving}}$  mindre än den totala temperaturskillnaden  $T_{\text{tot}}$  mellan in- och utlagrat värme.



Figur 5-6 Temperaturdifferenser utan stratifiering

$$\Delta T_{\text{tot}} = \Delta T_{\text{sving}} + \theta_{\text{in}} + \theta_{\text{ut}}$$

Temperatursvinget påverkar hur mycket värme  $Q$  som kan lagras med en given total borrhålslängd  $L_{\text{tot}}$ .

$$\Delta T_{\text{sving}} = \frac{Q}{\pi r_1^2 C L_{\text{tot}}} \quad (\pi r_1^2 = \text{tvärsnittsyta per borrhål})$$

( $C$  = värmekapacitet per volymenhet)

Kostnaden för borrhålslagret är sannolikt i första hand beroende på den totala borrhålslängden. Denna kan minimeras genom att borrhålsavståndet  $d_1$  väljs optimalt. Den totala borrhålslängden  $L_{\text{tot}}$  blir beroende av den totala temperaturskillnaden:

$$L_{\text{tot}} = \frac{Q}{T_{\text{tot}}} \left[ \frac{1}{\pi r_1^2 C} + \left( \frac{\dot{Q}_{\text{in}}}{Q} + \frac{\dot{Q}_{\text{ut}}}{Q} \right) R \right] =$$

$$= \frac{Q}{T_{\text{tot}}} \left[ \frac{1}{\pi r_1^2 C} + \frac{\dot{Q}_{\text{in}} + \dot{Q}_{\text{ut}}}{Q} \left( \frac{1}{k_{\text{hål}}} + \frac{1}{2\pi} \left( \ln \frac{r_1}{r_0} - \frac{3}{4} \right) \right) \right]$$



Minimal total borrhålslängd  $L_{tot}$  erhålls för delningsgraden

$$r_{1 \text{ opt}} = 2\sqrt{\tau a} \quad \text{där} \quad \tau = \frac{Q}{\dot{Q}_{in} + \dot{Q}_{out}} \quad \text{och} \quad a = \frac{\lambda}{c}$$

$$\text{Optimalt borrhålsavstånd } d_{1 \text{ opt}} = \frac{r_{1 \text{ opt}}}{0.525} = 3.8\sqrt{\tau a}$$

För årstidslagring av solvärme blir tidskonstanten  $\tau$  liten (stora effekter under korta tider), kanske av storleksordningen  $\tau = 800$  h. Värmediffusiviteten i granit är  $a = 5.76 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$ . Det optimala borrhålsavståndet blir

$$d_{1 \text{ opt}} = 3.2\sqrt{800 \times 5.76 \times 10^{-3}} = 8.2 \text{ m}$$

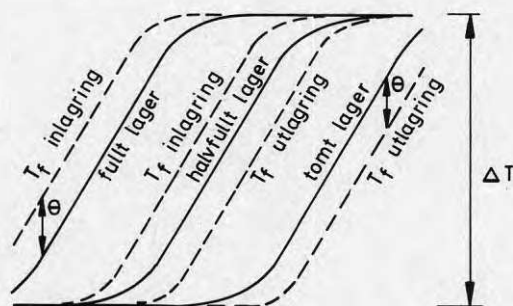
För så stora borrhålsavstånd blir dock transporttiden för värmnet mycket lång. (Transporttiden är av storleksordningen

$$0.2 \frac{L^2}{a} = 0.2 \frac{4.3^2}{5.76 \times 10^{-3}} = 600 \text{ h} )$$

De verkliga förutsättningarna är därför mer komplicerade men resultatet antyder att borrhålsavståndet kan vara stort (> 4 m). En stor bergvolym kan därmed nås med en rimlig total borrhålslängd.

#### 5.4.2 Förmåga att ta emot effekt med ett temperaturstratifierat lager

För att lagra solvärme är det sannolikt nödvändigt med temperaturstratifiering av lagret. En nackdel med detta är dock att värmetransporten endast sker i den del av lagret som har en temperaturgradient. För att tillräckligt stor effekt skall kunna överföras så måste gradientzonen omfatta en stor del  $\alpha$  av den totala borrhålslängden  $L_{tot}$ .



Figur 5-7 Temperaturprofiler för lager och fluidtemperatur genom stratifierat lager

Temperaturdifferansen  $\theta$  för värmetransport måste troligen vara några gånger mindre än den totala temperaturskillnaden  $\Delta T$ .

$$\text{Sätt } \beta = \frac{\theta}{\Delta T} \quad \beta \ll 1$$

Eftersom det är svårt att beräkna temperaturförloppen och inverkan av värmeläckaget kan inte något maxvärde för kvoten  $\beta$  bestämmas

Om volymandelen  $\alpha$  av lagret omfattas av gradienten så kan den övriga andelen  $1 - \alpha$  utnyttjas med fullt temperatursving  $\Delta T$ . Med borrhålslängden  $L_{\text{tot}}$ , delningsradien  $r_1$  och värmekapaciteten  $C$  erhålles den lagrade energimängden:

$$Q = (1 - \alpha) L_{\text{tot}} \pi r^2 C \Delta T$$

Värmeeffekten per meter borrhål som skall överföras är

$$q = \frac{\dot{Q}}{\alpha L_{\text{tot}}}$$

$$\text{Med värmemotståndet } R = \frac{1}{k_{\text{hål}}} + \frac{1}{2\pi\lambda} \left( \ln \frac{r_1}{r_0} - \frac{3}{4} \right)$$

erhålles temperaturdifferansen  $\theta = qR$ .

Denna fixeras till en andel  $\beta$  av  $\Delta T$ . Den totala borrhåls-längden kan nu uttryckas som en summa av en energiberoende och en effektberoende längd.

$$L_{\text{tot}} = (1 - \alpha) L_{\text{tot}} + \alpha L_{\text{tot}} = \frac{Q}{\pi r^2 C \Delta T} + \frac{R \dot{Q}}{\beta \Delta T}$$

$$\text{Sätt } \gamma = \frac{Q}{\dot{Q}}$$

$$L_{\text{tot}} = \frac{Q}{\Delta T} \left( \frac{1}{\pi r_1^2 C} + \frac{R}{\beta \gamma} \right)$$

Delningsradien  $r_1$  kan optimeras så att  $L_{\text{tot}}$  blir minimal.

$$r_{1 \text{ opt}} = 2\sqrt{\beta \gamma a} \quad (a = \frac{\lambda}{C})$$

$$\text{Optimalt borrhålsavstånd } d_{1 \text{ opt}} = \frac{r_{1 \text{ opt}}}{0.525} = 3.8\sqrt{\beta \gamma a}$$

Antag  $\beta = 0.2$ ,  $\gamma = 1600 \text{ h}$  och  $a = 5.76 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$

$$d_{1 \text{ opt}} = 3.8 \sqrt{0.2 \times 1600 \times 5.76 \times 10^{-3}} = 5.2 \text{ m}$$

Även med temperaturstratifiering bör alltså borrhålsavstånden vara stora. (Maxvärdet för kvoten  $\beta = \frac{\theta}{\Delta T}$  är dock okänt.)

Beräkningarna ovan av optimala borrhålsavstånd bygger på värmemotståndet för ett konstant värmefflöde. I ett solvärmesystem är dock värmefflödet till lagret i hög grad varierande. Inverkan av ett varierande värmefflöde och speciellt solpulser diskuteras i följande avsnitt.

### 5.5 Solpulser

Ett problem med att använda borrhålslager för lagring av solvärme är att värmets erhålls i form av pulser med en relativt liten varaktighet. Skillnaden mellan tillförd maxeffekt och dygnsmedelvärdet av effekten under sommaren är stor. För att överföra dessa "solpulser" krävs antingen stora temperaturdifferanser eller en stor total borrhålslängd. I bägge fallen ger det pulserande värmefflödet upphov till en merkostnad jämfört med inlagring av motsvarande dygnsutjämnat värmefflöde.

Dygnsutjämnning av solpulserna kan ske med en (i jämförelse med lagret) liten bufferttank (se avsnitt 6.5).

För att ett borrhålslager skall kunna dimensioneras med hänsyn till solpulser är det nödvändigt att veta hur stor temperaturändring på fluiden som dessa pulser orsakar.

Kvoten mellan maximal temperaturändring och värmepulsamplitud kan betraktas som ett värmemotstånd. Detta värmemotstånd är ofta komplicerat att beräkna eftersom det är beroende av både värmepulsernas form och varaktighet.

För att beräkna temperatursvaret på solpulserna och motsvarande värmemotstånd har tre olika beräkningsmetoder använts:

1. Borrhålslagermodellen från LTH
2. Kelvinfunktioner
3.  $E_1$ -funktionen

De olika metoderna beskrivs i bilaga C. Trots att förutsättningarna och beräkningsmetoderna är ganska olika så erhålls värmemotstånd av lika storleksordning.

$$R_{\text{puls}} = \frac{\text{temperaturändring}}{\text{pulsamplitud}} \approx 0.053 \text{ Km/W}$$

Detta är ungefär 50% av det stationära värmemotståndet i berget vid 4 m hålavstånd. Eftersom toppeffekten under en solpuls är flera gånger större än dygnsmedeleffekten ger detta extra värmemotstånd ett avsevärt bidrag till den totala temperaturskillnaden mellan fluiden och bergmassan.

Värmemotståndet för solpulser är oberoende av avståndet mellan borrhålen (se bilaga C). Det optimala borrhålsavståndet som ger minsta total borrhålslängd är därför oberoende av detta värmemotstånd.

Ett borrhålslager som dimensioneras för att ta emot solpulser bör alltså ha samma borrhålsavstånd som ett lager med en

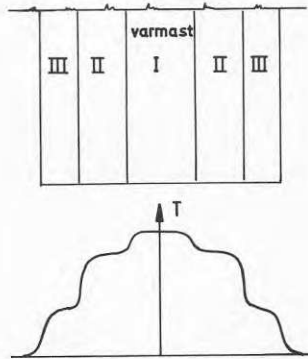
effektutjämnande bufferttank. Däremot måste den totala borrhållslängden ökas vilket gör hela värmelagret större (se avsnitt 6.5).

### 5.6 Temperaturstratifiering

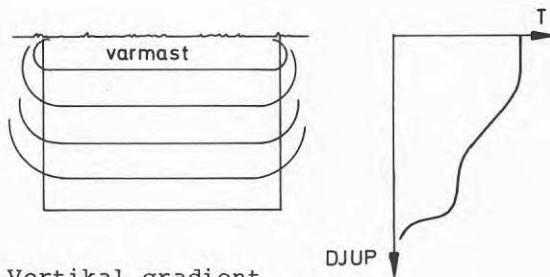
Fördelar och nackdelar med temperaturstratifiering har redan diskuterats i avsnitt 4.1. I detta avsnitt behandlas olika sätt att geometriskt arrangera temperaturgradienten i lagret. Beträffande problemen med effektsväljningsförmåga hänvisas till avsnitt 5.4.2 och 6.4.

#### Vertikal och/eller radiell temperaturgradient

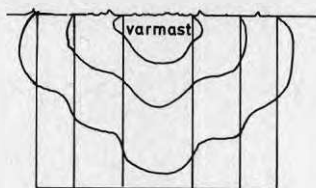
Fördelningen av olika temperaturer (zoner eller gradienter) kan arrangeras geometrisk på olika sätt.



A. Radiell gradient med zoner



B. Vertikal gradient



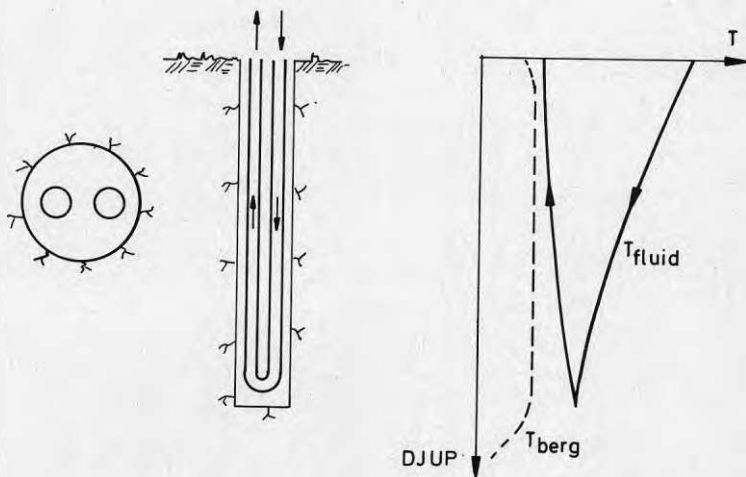
- C. Kombination av radiell och vertikal gradient (halvsfärisk eller konisk gradient)

Figur 5-8 Olika geometrier för temperaturstratifiering

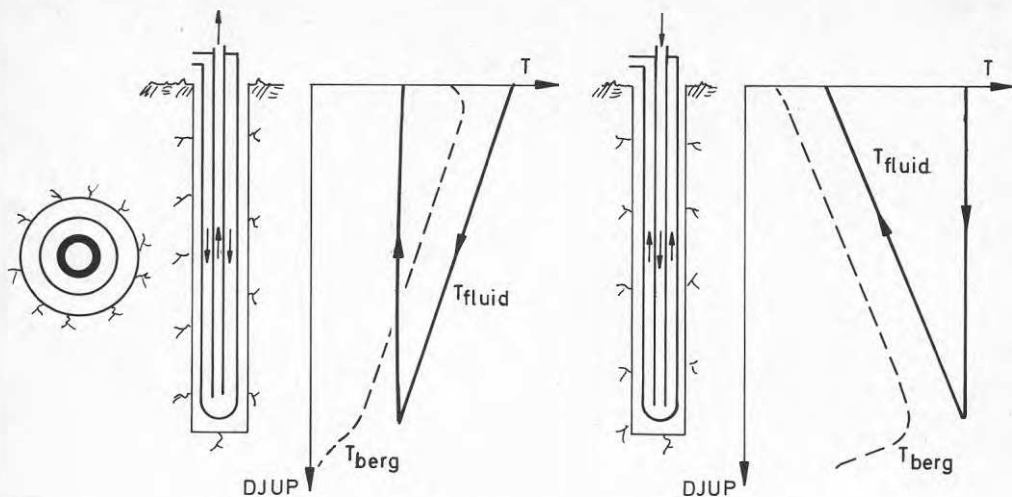
Värmeläckaget bör bli minst för alternativ C förutsatt att antingen markytan ovanför lagret kan isoleras tillräckligt eller lagret läggs på tillräckligt djup under markytan.

Både alternativ B och C ställer speciella krav på temperaturförloppet hos fluiden i borrhålen. Massflödet måste vara lågt. (I alternativ B är alla borrhål parallellkopplade.) Dessutom måste de bägge fluidkanalerna i varje borrhål vara "termiskt asymmetriska".

Temperaturförloppen vid termiskt symmetriska respektive termiskt osymmetriska fluidkanaler kan illustreras med följande figurer.



Figur 5-9 Temperaturförlopp längs borrhål med termiskt symmetriska fluidkanaler, t ex U-rör



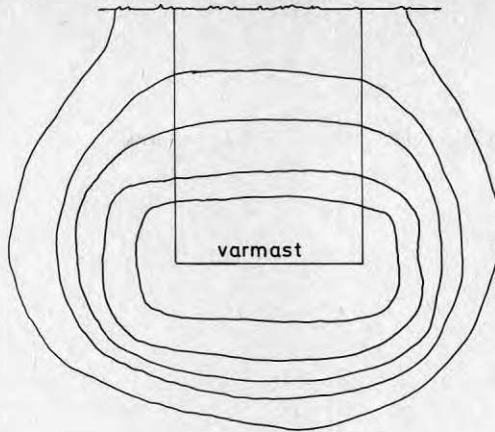
Figur 5-10 Temperaturförlopp längs borrhål med termiskt asymmetriska fluidkanaler, t ex koaxiala rör

För att det skall vara möjligt att ha en vertikal temperaturgradient i ett borrhålslager måste den ena fluidkanalen i varje borrhål vara tillräckligt isolerad och den andra ha tillräckligt god termisk kontakt med berget. Enligt beräkningar i avsnitt 5.3 och bilaga B bör detta vara fullt möjligt att praktiskt åstadkomma.

En vertikal temperaturgradient med högre temperatur nedåt (se högra delen av fig 5-10) kan vara svårt att åstadkomma. Egenkonvektionen strävar mot att utjämna en sådan "inverterad" temperaturgradient. En inverterad temperaturgradient bör dock vara möjlig att upprätthålla om ett öppet flödessystem med tillräckligt trånga kanaler används eller om ett slutet system med hinder för vertikal omblandning av borrhålsvattnet används. En fördel med att ha högst temperatur längst ned i ett borrhålslager är att värmeförlusterna blir små utan att lagret behöver vara välisolerat vid markytan. Ytterligare en fördel kan vara att egenkonvektionen och därmed värmeövergången till berget förbättras.

Om det visar sig vara svårt att kontrollera temperaturförloppen längs borrhålen återstår givetvis möjligheten att utnyttja en radiell temperaturgradient enligt 5-8 A.

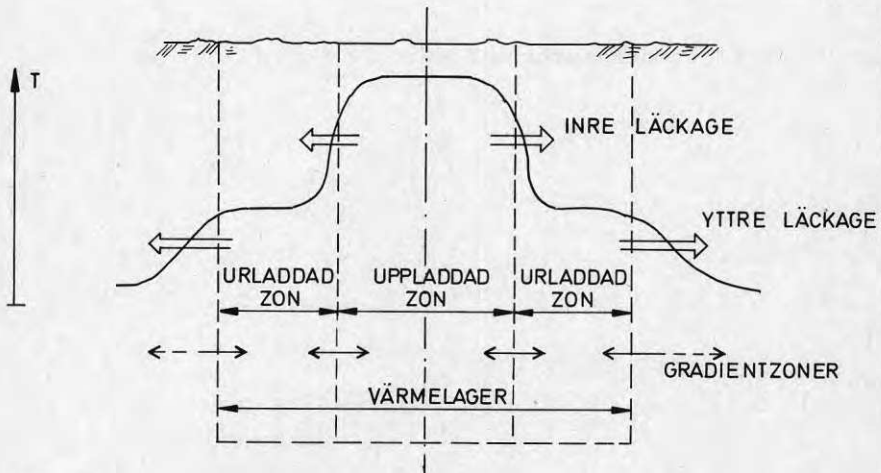
Oavsett vilken geometri som används för temperaturstratifieringen kan gradientzonens tjocklek knappast göras mindre än borrhålsavståndet. En alltför skarp gradient är dock inte önskvärd eftersom tillräcklig borrhålslängd för värmeöverföringen måste finnas inom gradientzonen (se avsnitt 5.4.2 och 6.4). Dessutom måste det inre värmeläcketaget över temperaturgradienten begränsas. Värmeläckage diskuteras i nästa avsnitt.



Figur 5-11 Borrhålslager med "inverterad" vertikal temperaturgradient

### 5.7 Inre och yttre värmeläckage

I ett temperaturstratifierat värmelager kan värme läcka dels mellan zoner med olika temperatur (inre läckage) och dels ut från hela lagret (yttre läckage).



Figur 5-12 Inre och yttre värmeläckage i borrhålslager med radiell temperaturgradient

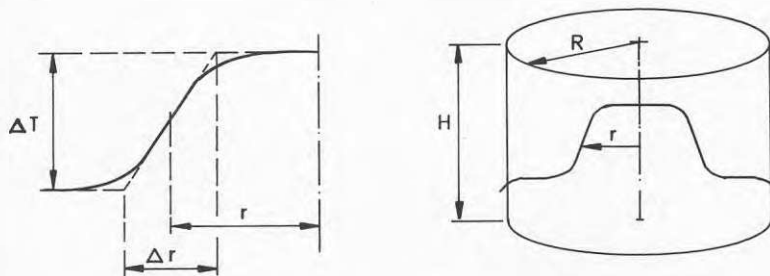
Den främsta nackdelen med värmeläckage över huvud taget är den ökade investeringskostnaden på lager och värmekälla (solfångare) som krävs för att täcka läckaget. Det direkta värdet av den förlorade energin är av något mindre betydelse.

Olika sätt att kontinuerligt motverka läckage med t ex värmepumpning är därför av intresse.

### 5.7.1 Inre värmeläckage

Inre värmeläckage förekommer givetvis endast i temperaturstratifierade värmelager. Det inre läckaget är i två avseenden lättare att kontrollera än det yttre. Dels kan tjockleken på den gradientzon över vilken läckaget sker kontrolleras genom lämpligt utförande och drift av borrhålslagret, dessutom är bägge sidor av gradientzonen tillgängliga via borrhål så att läckaget kan "mötas" med värmepumpning.

Antag för enkelhets skull att en radiell temperaturgradient används. Det inre värmeläckaget  $\dot{Q}_i$  är beroende av temperatursteget  $\Delta T$  över gradientzonen, tjockleken  $\Delta r$  på zonen samt av ytan  $2\pi rH$ .



Figur 5-13 Radial temperaturgradient i borrhålslager

$$\dot{Q}_i = 2\pi r H \lambda \frac{\Delta T}{\Delta r}$$

In- och utlagring av borrhålslagret sker huvudsakligen genom värmeöverföring vid borrhålen inom gradientzonen. Denna måste därför uppta en avsevärd andel  $\alpha$  av lagrets totala volym  $\pi R^2 H$ . Tjockleken på gradienten kan därför skrivas som

$$\Delta r = \frac{\alpha R^2}{2r}$$

För ett halvfullt lager är  $r^2 = \frac{R^2}{2}$ . Då blir det inre värmeläckaget

$$\dot{Q}_i = \frac{4\pi r^2 \lambda H}{\alpha R^2} \Delta T = \frac{2\pi \lambda H}{\alpha} \Delta T$$

Med exempelvis  $H = 100$  m,  $\lambda = 3.5$  W/mk,  $\Delta T = 45$  K och  $\alpha = \frac{1}{3}$  (vilket krävs för tillräcklig värmeövergång) så erhålles



$$\dot{Q}_i = \frac{2\sqrt{100} \times 3.5}{1/3} 45 = 3 \times 10^5 \text{ W}$$

Om denna effekt skall kunna tas från den varmare delen av lagret, måste energin lagras under ungefär 1/2 år. Energiförlusten som måste lagras blir

$$Q_i = 3 \times 10^5 \times \frac{365}{2} \times 24 \times 3600 = 4.7 \times 10^{12} \text{ J}$$

Detta kan jämföras med den energimängd som kan lagras i ett borrhållager med  $D = H = 100 \text{ m}$

$$Q = (1 - \alpha) \frac{\bar{t}}{4} D^2 H C T = \frac{2}{3} \frac{100^3 \times 2.16 \times 10^6 \times 45}{4} = 5.2 \times 10^{13} \text{ J}$$

Med dessa värden blir  $Q_i$  9 % av  $Q$ .

Om läckaget skall täckas med lagrat värme, krävs alltså extra lagerstorlek och extra solfångaryta .

Alternativt kan det inre läckaget mötas med värmepumpning från den kallare till den varmare delen av lagret. Förbrukningen av primäre energi under ett år blir då (med värmefaktorn  $\phi = 3$ ) av storleksordningen

$$E = \frac{\dot{Q}_i \times 1 \text{ år}}{\phi} = \frac{3 \times 10^5 \times 3.1536 \times 10^7}{3} = 3.15 \times 10^{12} \text{ J}$$

eller ca 6 % av den lagrade energimängden.

### 5.7.2 Yttre värmeläckage

Värme läcker ut från lagret dels genom värmeledning i omgivande berg och dels med grundvattenströmmar genom sprickor i berget.

Värmeläckaget på grund av vattenströmning i berget beror i hög grad på om ett slutet eller öppet cirkulationssystem används. Ett öppet cirkulationssystem kan också utföras på olika sätt, med sughävert eller trycksatt, vilket medför olika läckageflöden.

Hydrologiska aspekter på speciellt ett värmelager för Södertunaprojektet diskuteras i bilaga G.

För att reducera värmeläckaget med vattenströmmar i sprickor kan det vara lämpligt att inte utnyttja den översta mer sprickrika delen av bergkroppen för värmelagring.

Det stationära värmeläckaget på grund av ledning i omgivande berg kan uppskattas med formler från /6/.

Det stationära yttre värmeläckaget är enligt dessa formler:

$$\dot{Q}_y \approx (T_{ms} - T_o)(\lambda Rh + \pi R^2 \lambda_i / d_i)$$

där h är en funktion av lagrets form,

$T_{ms}$  är medeltemperaturen på lagrets begränsningsytor,  
 $d_i/\lambda_i$  är värmemotståndet i isoleringen av lagrets  
topp.

För lika höjd och diamter är  $h \approx 20$ .

Värmeläckaget under ett år kan jämföras med den lagrade energimängden

$$Q = (1-\alpha) \pi R^2 H C \Delta T$$

( $1-\alpha$  är utnyttjningsgraden)

Antag att en given andel  $\epsilon$  av det lagrade värmets  $Q$  tillåts läcka ut från lagret. För lika höjd och diameter på lagret  $H = 2R$  kan denna läckagefunktion skrivas:

$$\epsilon = \frac{T_{ms} - T_o}{\Delta T} \cdot \frac{\lambda h + \pi R \lambda_i / d_i}{(1-\alpha) 2 \pi R^2 C} \text{ 1 år}$$

Temperaturstratifiering av lagret bidrar till att minska den första termen genom att medeltemperaturen på ytan  $T_{ms}$  kan hållas låg. Den andra termen minskar med ökad lagerstorlek.

För att uppskatta storleksordningen på läckagefaktorn för det stationära värmeläckaget antages:

$$T_{ms} = 20^\circ\text{C} \text{ (förutsätter temp.stratifiering och värmepumpning)}$$

$$T_o = 7^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = 45 \text{ K}$$

$$\lambda = 3.5 \text{ W/mK} \quad C = 2.16 \times 10^6 \text{ J/m}^3\text{K}$$

$$h = 20$$

$$R = 37 \text{ m} \quad 1-\alpha = 0.36 \text{ (se avsnitt 6.5)}$$

$$\frac{d_i}{\lambda_i} = \frac{5}{3.5} + \frac{1}{1} = 2.4 \text{ m}^2\text{K/W (5 m berg + 1 m jord)}$$

Insättning i formeln ger  $\epsilon = 0.16$ , dvs 16% av det lagrade värmets läcker ut från lagret. Under de första åren blir läckaget större.

Värmeläckaget från ett temperaturstratifierat borrhållager kommer huvudsakligen från de delar av lagret som har låg temperatur. Trots att förlusten kan vara stor behöver den därför inte ha så stor betydelse för systemets ekonomi. (Det inre läckaget tillför värme till lågtemperaturzonen. Resten av det yttre läckaget kan kanske täckas med lågtemperaturvärme från solfångarna under tider med dålig instrålning.)

## 6. BERÄKNINGAR FÖR BORRHÅLSLAGER TILL SÖDERTUNA-PROJEKTET

I de följande delavsnitten redovisas beräkningar för dimensionering av ett borrhålslager specifikt för projekt Södertuna solvärme /2/.

### 6.1 Energi- och effektbehov

För Södertuna-projektet planeras ca 500 lägenheter som troligen byggs ut i två etapper.

Det totala effekt- och energibehovet (exklusive lager och kulvertförluster) har uppskattats till 4.8 MW respektive 3.65 GWh/år (235 större lägenheter å 9.5 MWh/år, 305 mindre lägenheter å 8.5 MWh/år).

### 6.2 Tidsförlopp, energimängder och förluster

Ett fundamentalt problem med solvärmesystem är att solinstrålningen är sämst när värmebehovet är störst.

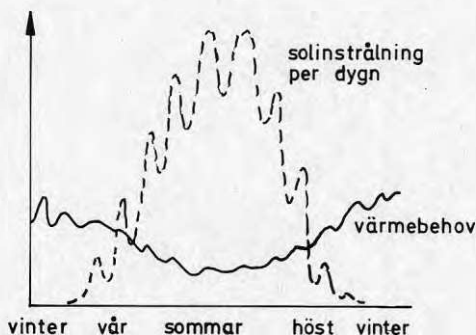


Fig 6-1 Solinstrålning och värmebehov (principskiss)

En mindre del av värmebehovet kan täckas med värme direkt från solfångarna, resten måste lagras. Denna andel kan bestämmas genom ett optimalt val av solfångaryta och lagerstorlek. I denna studie har inte några sådana optimeringar kunnat göras. Andelen av värmebehovet, inklusive förluster som behöver lagras, har i stället fixerats till 75 %.

För huvudalternativet att lagra solvärmets i en vattentank har förlusterna i lager och kulvertar antagits till 15 %. Lika stora förluster antages här för borrhålslagret. Följande energimängder kan då preciseras:

$$Q_{\text{behov}} = 3.65 \text{ GWh}$$

$$Q_{\text{förlust}} = 0.15 Q_{\text{behov}} = 0.55 \text{ GWh}$$

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{behov}} + Q_{\text{förlust}} = 4.20 \text{ GWh}$$

$$Q_{\text{lager}} = 0.75 Q_{\text{total}} = 3.15 \text{ GWh}$$

Värmeförlusten i lagret antages motsvara 2/3 av den totala förlusten (10 % av behovet)

$$Q_{\text{förlust lager}} = 0.1 Q_{\text{behov}} = 365 \text{ MWh}$$

Det återstår att försöka dimensionera borrhålslagret så att denna värmeförlust inte överskrider.

### 6.3 Temperaturförlopp i solfångare och lager

Värmelagret måste sannolikt vara temperaturstratifierat (se avsnitt 4.1). Temperaturförloppet för fluiden i solfångare och lager kan då ha följande principiella utseende under inlagring:

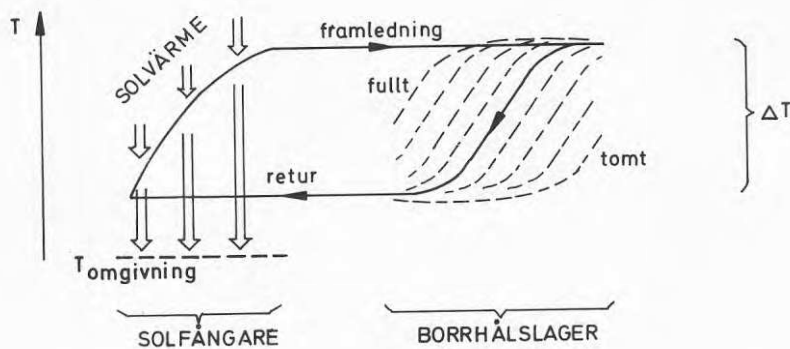


Fig 6-2 Temperaturförlopp i solfångare och lager

För att begränsa storleken på värmelagret bör temperatursvinget  $T$  vara så stort som möjligt. Detsamma gäller volymandelen av lagret som utnyttjas med fullt sving.

Temperatursvinget  $T$  begränsas av framledningstemperaturen från solfångarna och den lägsta returtemperatur som är lämp-

lig vid utlagring med hjälp av en värmepump.

Välj  $T = 60^{\circ}\text{C} - 15^{\circ}\text{C} = 45 \text{ K}$

(För alternativet vattentank valdes temperatursvinget  $\Delta T = 55 \text{ K}$ .)

#### 6.4 Lagerstorlek

Lagrets diameter och höjd väljs lika stora ( $D=H$ ), eftersom detta förhållande ger en nära minimal värmeförlust (se ref. /3/). Den storleksparameter som är viktigast för kostnaden är dock den totala borrhålslängden  $L_{\text{tot}}$

Varje borrhål bidrar med tvärsnittsytan

$$\pi r_1^2 = \frac{\sqrt{3}}{2} d_1^2 \quad \text{till borrhålslaget}$$

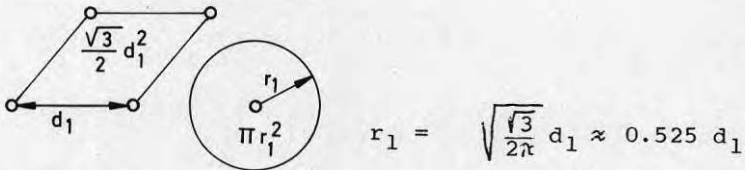


Fig 6-3 Tvärsnittsytan per borrhål

Den totala lagervolymen är

$$V = \frac{\pi}{4} D^2 H = \pi r_1^2 L_{\text{tot}}$$

Liksom i avsnitt 5.3.2 antages att andelen  $\alpha$  av lagervolymen omfattas av en gradientzon. Den del av volymen som utnyttjas med fullt temperatursving blir då approximativt  $1-\alpha$ .

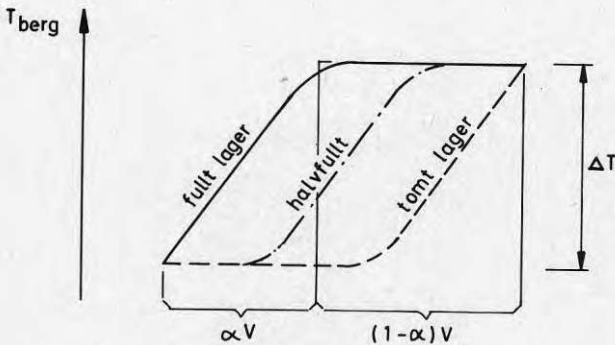


Fig 6-4 Uppdelning av lagervolymen

Energimängden som kan lagras blir med värmekapaciteten  $C$  ( $= 2.16 \times 10^6 \text{ J/m}^3\text{K}$ ):

$$Q = (1-\alpha)VC\Delta T = (1-\alpha) \pi r_1^2 L_{\text{tot}} C \Delta T$$

För att värme skall kunna matas in och ut ur berget krävs att gradientzonen rymmer tillräckligt stor borrhålslängd  $L_{\text{tot}}$ . Eftersom värmets kommer i form av "solpulser", är sannolikt inlagringen dimensionerande.

Vid inlagring tillåts en maximal temperaturdifferens  $\Theta_{\text{in}} = \beta_{\text{in}} \Delta T$  mellan fluiden och bergmassan (se fig 5-7).

Antag att kvoten  $\beta_{\text{in}} = \frac{\Theta_{\text{in}}}{\Delta T}$  kan väljas till 1/3. (Något exakt maxvärde existerar inte, men temperaturstratifieringen fungerar knappast om  $\beta_{\text{in}}$  blir för stort.)

Från solfångarna erhålls en mycket varierande värmeeffekt. Dimensionering av lagersystemet bör inte göras för den maximala effekten som är mycket osannolik, utan för en lägre "representativ maxeffekt"  $\dot{Q}_{\text{in}}$ .

Kvoten mellan energi och den "representativa" maxeffekten uttrycks med en tidskonstant:

$$\tau_{\text{in}} = \frac{Q}{\dot{Q}_{\text{in}}}$$

En grov uppskattning av denna tidskonstant till  $\tau_{\text{in}} = 700 \text{ h}$  diskuteras i bilaga D.

Det pulserande värmeflödet från solfångarna kommer att jämnas ut av berget närmast borrhålen (se bilaga C, speciellt figur C-2). Den utjämnade "likströmmen"  $\dot{Q}_=$  av värme (under tids-skalan dygn-vecka) är mindre än maxflödet  $\dot{Q}_{\text{in}}$  med en faktor

$$\gamma = \frac{\dot{Q}_=}{\dot{Q}_{\text{in}}}$$

Faktorn  $\gamma$  uppskattas till 1/3.

Per meter borrhålslängd blir det representativa maxflödet

$$q_{\text{in}} = \frac{\dot{Q}_{\text{in}}}{\alpha L_{\text{tot}}}$$

Motsvarande likström blir

$$q_= = \frac{\dot{Q}_=}{\alpha L_{\text{tot}}} = \gamma q_{\text{in}}$$

Den totala temperaturdifferensen  $\Theta_{\text{in}}$  mellan fluid och bergmassans medeltemperatur kan delas upp i tre olika delar.

$$\theta_{in} = \theta_{h\ddot{a}l} + \theta_{puls} + \theta_{=}$$

Temperaturdifferensen  $\theta_{h\ddot{a}l}$  mellan fluid och borrh\ddot{a}lsv\ddot{a}gg \ddot{a}r f\ddot{o}rsumbar f\ddot{o}r ett \ddot{o}ppet system d\ddot{a}r fluiden str\ddot{o}mmar i kontakt med borrh\ddot{a}lsv\ddot{a}ggen. F\ddot{o}r ett slutet system med egenkonvektion i en vattenspalt erh\dd{a}lles ett v\dd{a}rmemotst\dd{a}nd av storleksordningen  $R_{h\ddot{a}l} = 0.01 \text{ Km/W}$  (se bilaga A).

$$\theta_{h\ddot{a}l} = \begin{cases} R_{h\ddot{a}l} q_{in} & \text{f\ddot{o}r slutet cirkulationssystem} \\ \approx 0 & \text{f\ddot{o}r \ddot{o}ppet} \quad - \quad " \quad - \end{cases}$$

Solpulserna bidrar med en temperaturdifferens  $\theta_{puls} = R_{puls} q_{in}$  d\dd{a}r v\dd{a}rmemotst\dd{a}ndet  $R_{puls}$  \dd{a}r

oberoende av borrh\ddot{a}lsv\dd{a}rsta\dd{a}ndet. I bilaga C uppskattas  $R_{puls} = 0.053 \text{ Km/W}$ . Med ett buffertlager kan  $\theta_{puls}$  minskas eller elimineras.

Likstr\dd{o}mmen  $q_{=}$  av v\dd{a}rme ger upphov till temperaturdifferensen  $\theta_{=} = R_{=} q_{=}$ .

Det station\dd{a}ra v\dd{a}rmemotst\dd{a}ndet  $R_{=}$  ber\dd{a}knas enligt

$$R_{=} = \frac{1}{2\pi\lambda} \left( \ln \frac{r_1}{r_0} - \frac{3}{4} \right)$$

d\dd{a}r  $r_1 = 0.525 d_1$  \dd{a}r delningsradien och  $r_0$  \dd{a}r borrh\ddot{a}lsv\dd{a}rsta\dd{a}ndet.

Detta \dd{a}r allts\dd{a} det enda av v\dd{a}rmemotst\dd{a}nden som kan p\dd{a}verkas av borrh\ddot{a}lsv\dd{a}rsta\dd{a}ndet.

Kvoten mellan maximal temperaturdifferens vid inlagring  $\theta_{in}$  och temperatursvinget  $\Delta T$  blir

$$\beta_{in} = \frac{\theta_{in}}{\Delta T} = \frac{\theta_{h\ddot{a}l} + \theta_{puls} + \theta_{=}}{\Delta T} = \frac{R_{h\ddot{a}l} + R_{puls} + \gamma R_{=}}{\Delta T} = \frac{\dot{Q}_{in}}{\alpha L_{tot}}$$

$\beta_{in}$  v\dd{a}ljs till exempelvis 1/3.

Borrh\ddot{a}lsv\dd{a}rsta\dd{a}ndet  $L_{tot}$  i gradientdelen av lagret kan nu ber\dd{a}knas:

$$\alpha L_{tot} = \frac{(R_{h\ddot{a}l} + R_{puls} + R_{=}) \dot{Q}_{in}}{\beta_{in} \Delta T} = \frac{(R_{h\ddot{a}l} + R_{puls} + \gamma R_{=}) Q}{\beta_{in} \Delta T z_{in}}$$

Borrh\ddot{a}lsv\dd{a}rsta\dd{a}ndet i resten av lagret  $(1-\alpha) L_{tot}$  erh\dd{a}lls fr\dd{a}n den lagrade energim\dd{a}ngden  $Q$  och temperatursvinget  $\Delta T$ :

$$(1-\alpha) L_{tot} = \frac{Q}{\pi r_1^2 C \Delta T}$$

Den totala borrhålslängden är tydligen proportionell mot  $\frac{Q}{\Delta T}$ .

$$L_{tot} = \alpha L_{tot} + (1-\alpha) L_{tot} = \frac{Q}{\Delta T} \left[ \frac{R_{hål} + R_{puls} + \gamma R_{=} + \frac{1}{\pi r_1^2 C}}{\beta_{in} \tau_{in}} \right]$$

En minimering av den totala borrhålslängden med avseende på borrhålsavståndet utförs och diskuteras i avsnitt 6.6.

Här antages ett borrhålsavstånd  $d_1 = 4$  m.

Med följande antaganden kan nu  $L_{tot}$  beräknas

Inlagrad värmemängd  $Q = 3.15$  GWh

Temperatursving  $\Delta T = 45$  K

$R_{hål} = 0.01$  Km/W (slutet cirkulationssystem)

$R_{puls} = 0.053$  Km/W (ingen bufferttank för dygnslagring)

$\gamma = 1/3$

Delningsradie  $r_1 = 0.525 \times 4 = 2,1$  m

Borrhålsradie  $r_0 = 0.075$  m

Värmedledningsförmåga  $\lambda = 3.5$  W/Km

$$R_{=} = \frac{1}{2\pi\lambda} \left( \ln \frac{r_1}{r_0} - \frac{3}{4} \right) = \frac{1}{2\pi \cdot 3.5} \left( \ln \frac{2.1}{0.075} - \frac{3}{4} \right) = 0.117 \text{ Km/W}$$

$\beta_{in} = 1/3$

$\tau_{in} = 700$  h

$C_{in} = 2.16 \times 10^6$  J/m<sup>3</sup>K

$$L_{tot} = \frac{3.15 \cdot 10^9 \cdot 3600}{45} \left[ \frac{0.01 + 0.053 + \frac{1}{3} \cdot 0.117}{\frac{1}{3} \cdot 700 \cdot 3600} + \frac{1}{\pi \cdot 2.1^2 \cdot 2.16 \cdot 10^6} \right] = 3.9 \cdot 10^4 \text{ m}$$

$$\text{Lagervolym } V = \pi r_1^2 L_{tot} = \pi \cdot 2.1^2 \cdot 3.9 \cdot 10^4 = 5.4 \cdot 10^5 \text{ m}^3$$

$$\text{Storlek } D = H = \sqrt[3]{\frac{4}{\pi} V} = 88 \text{ m}$$

Den andel  $1-\alpha$  av lagervolymen som utnyttjas för den egentliga värmelagringen (utnyttjningsgraden) blir med ovanstående endast 22%. Resten behövs för tillräcklig värmeväxling i gradientzonen. För att minska lagrets storlek och kostnad är det därför angeläget att minska det totala värmemotståndet.

## 6.5 Bufferttank

Om "solpulserna" utjämnas med en bufferttank så att värmemotståndet  $R_{puls}$  försvinner, ändras den erforderliga totala borrhålslängden till  $L_{tot} = 2,3 \times 10^4$  m. Detta är endast 59 % av borrhålslängden utan bufferttank. Att skillnaden blir stor beror på att värmemotståndet  $R_{puls}$  dominerar över övriga bidrag till  $L_{tot}$ . Utnyttjandegraden  $1-\alpha$  har ökat från 22% till 36%.



Med bufferttank blir borrhålslagrets volym  
 $V = \pi 2.1^2 \times 2.3 \times \frac{10^4}{4} = 3.2 \times 10^5 \text{ m}^3$   
Storlek  $D = H = \sqrt[3]{\frac{4}{\pi} V} = 74 \text{ m}$

Bufferttanken bör kunna lagra åtminstone ett dygns solvärme.

$$Q_{\text{buff}} = \gamma \dot{Q}_{\text{in}} 24 \text{ h} = \gamma \frac{Q}{\tau_{\text{in}}} 24 \text{ h} = \\ = \frac{1}{3} \frac{3.15 \times 10^9 \times 3600}{700} 24 = 1.3 \times 10^{11} \text{ J}$$

För detta krävs en tankvolym

$$V_{\text{buff}} = \frac{Q_{\text{buff}}}{C_{\text{H}_2\text{O}} \Delta T} = \frac{1.3 \cdot 10^{11}}{4.2 \cdot 10^6 \cdot 45} = 690 \text{ m}^3$$

$$\text{Bufferttankens storlek } D_{\text{buff}} = H_{\text{buff}} = \sqrt[3]{\frac{4}{\pi} V_{\text{buff}}} = 9.6 \text{ m}$$

Varje  $\text{m}^3$  av bufferttanken bidrar alltså till en besparing av 23 m borrhål eller  $320 \text{ m}^3$  bergvolym. Även om de specifika kostnaderna inte är helt kända, bör användning av bufferttank ge bättre ekonomi.

### 6.6 Optimalt borrhålsavstånd

Den totala borrhålslängden  $L_{\text{tot}}$  och därmed kostnaden för lagret kan minimeras med avseende på delningsradien  $r_1$ . Från avsnitt 6.4 erhålls:

$$L_{\text{tot}} = \frac{Q}{\Delta T} \left[ \frac{R_{\text{hål}} + R_{\text{puls}} + \frac{\gamma}{2\pi\lambda} \left( \ln \frac{r_1}{r_0} - \frac{3}{4} \right)}{\beta_{\text{in}} \tau_{\text{in}}} + \frac{1}{\pi r_1^2 C} \right]$$

$$\frac{dL_{\text{tot}}}{dr_1} = \frac{Q}{\Delta T} \left[ \frac{\gamma}{2\pi\lambda \beta_{\text{in}} \tau_{\text{in}} r_1} - \frac{2}{\pi r_1^3 C} \right]$$

$$\frac{dL_{\text{tot}}}{dr_1} = 0 \Rightarrow r_1^2 = \frac{4\lambda \beta_{\text{in}} \tau_{\text{in}}}{\gamma C} = \frac{4a \beta_{\text{in}} \tau_{\text{in}}}{\gamma} \quad \left( a = \frac{\lambda}{C} \right)$$

$$\text{Optimal delningsradie } r_1^* = 2 \sqrt{\frac{a \beta_{\text{in}} \tau_{\text{in}}}{\gamma}}$$

Antag värmediffusiviteten  $a = 5.76 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$  (granit)

$\beta_{in} = 1/3$ ,  $z_{in} = 700 \text{ h}$  och  $\gamma = 1/3$

$$r_1^* = 2\sqrt{5.76 \times 10^{-3} \times 700} = 4 \text{ m}$$

$$\text{Optimalt borrhålsavstånd } d_1^* = \frac{r_1^*}{0.525} = 7.6 \text{ m}$$

Observera att detta optimala borrhålsavstånd är oberoende av värmemotståndet  $R_{puls}$ . Användning av en bufferttank bör alltså inte direkt påverka valet av borrhålsavstånd.

Det hittills framräknade optimala borrhålsavståndet är baserat på konstant värmeflöde i berget. Detta uppfylls inte för borrhålsavstånd som är av samma storleksordning som "räckvidden"

$s = \sqrt{\frac{a}{\omega}}$  för årstidsvariationen av den periodiska in- och utlagringen.

"Räckvidden" för årstidsvariationen är

$$s = \sqrt{\frac{a}{2\pi} \frac{1}{\text{år}}} = \sqrt{\frac{5.76 \times 10^{-3} \times 365 \times 24}{2\pi}} = 2.83 \text{ m}$$

Det är därför osäkert om det är någon fördel med stora borrhålsavstånd. För att mer detaljerat utreda detta härleds i bilaga E ett explicit uttryck för "värmeadmittansen" hos ett borrhål. Maximum för absolutbeloppet av denna admittans ligger vid borrhålsavståndet  $d_1 = 6.9 \text{ m}$  (se fig E-1). Eftersom maximumet är flackt, kan dock andra faktorer, t ex värmeläckage, också styra valet av bästa hålavstånd. Enligt fig E-1 blir lagrets värmekapacitet per meter borrhål onödigt liten för borrhålsavstånd under 4 m.

Datorberäkningar av lagret med olika borrhålsavstånd redovisas i avsnitt 7.1.2.

### 6.7 Ekonomisk jämförelse med vattentank

Kostnaden för ett borrhålslager antages proportionellt mot den totala borrhåls längden  $L_{tot}$ . För alternativet med värmelagring i en vattentank antages kostnaden proportionell mot volymen  $V_v$ .

$$\begin{aligned} \text{Kostnad för borrhålslager } K_b &= P_b L_{tot} \\ \text{Kostnad för vattentank } K_v &= P_v V_v \end{aligned}$$

$P_b$  och  $P_v$  är priset per meter borrhål respektive per  $\text{m}^3$  tankvolym. Noggrannare samband mellan kostnad och storlek kan givetvis antagas.

En nackdel med borrhålslager är att endast en mindre del ( $1-\alpha$ ) kan utnyttjas med fullt temperatursving  $\Delta T$ . För en vattentank antages däremot att hela lagervolymen kan utnyttjas med fullt temperatursving.

Antag att en lika stor energimängd  $Q$  skall lagras. Värmeförlusterna från ett borrhålslager är emellertid sannolikt större än från en optimalt isolerad vattentank. Olika energimängder borde därför användas. Eftersom skillnaden inte är känd antages dock samma värde för bägge alternativen.

Enligt sid 38 krävs för ett borrhålslager en total borrhåls-  
längd

$$L_{tot} = \frac{Q}{\Delta T} \left[ \frac{R_{h\ddot{a}l} + R_{puls} + \gamma R_{=}}{\beta_{in} \tau_{in}} + \frac{1}{\pi r_i^2 C_{berg}} \right]$$

Enligt avsnitt 6.5 kan en avsevärd reduktion av  $L_{tot}$  erhållas om solpulserna utjämnas med ett dygnslager ( $R_{puls} = 0$ ). För detta krävs dock en mindre bufferttank. (Exempelvis  $V_{buff} = 690 \text{ m}^3$  enligt avsnitt 6.5).

En vattentank som utnyttjas med fullt temperatursving  $\Delta T$  behöver volymen

$$V_v = \frac{Q}{\Delta T C_{H_2O}}$$

Kvoten mellan borrhålslängd och tankvolym blir

$$\frac{L_{tot}}{V_v} = C_{H_2O} \left[ \frac{R_{h\ddot{a}l} + R_{puls} + \gamma R_{=}}{\beta_{in} \tau_{in}} + \frac{1}{\pi r_i^2 C_{berg}} \right]$$

Med värmekapaciteten  $C_{H_2O} = 4.2 \times 10^6 \text{ J/m}^3\text{K}$ .

$R_{puls} = 0$  och i övrigt samma antaganden som i avsnitt 6.4 erhålls för några olika borrhålsavstånd:

Borrhålsavstånd $d_1$	2	3	4	5	6	m
Storlekskvot $L_{tot}/V_v$	1.2	0.92	0.84	0.80	0.79	$\text{m}^{-2}$

Tabell 6-1 Total borrhålslängd/volym för motsvarande vattentank

Med ledning av kostnadsberäkningar i ref /7/ uppskattas kostnaden per meter för ett borrhålslager med öppet cirkulationssystem till  $P_b = 200 \text{ kr/m}$ .

Kostnaden per  $\text{m}^3$  för en vattentank av stål är inte känd men bedöms ändå vara större än  $200 \text{ kr/m}^3$ .

Kostnadskvoten  $K_b/K_v$  kan ritas upp som funktion av priskvoten  $P_b/P_v$  för olika borrhålsavstånd:

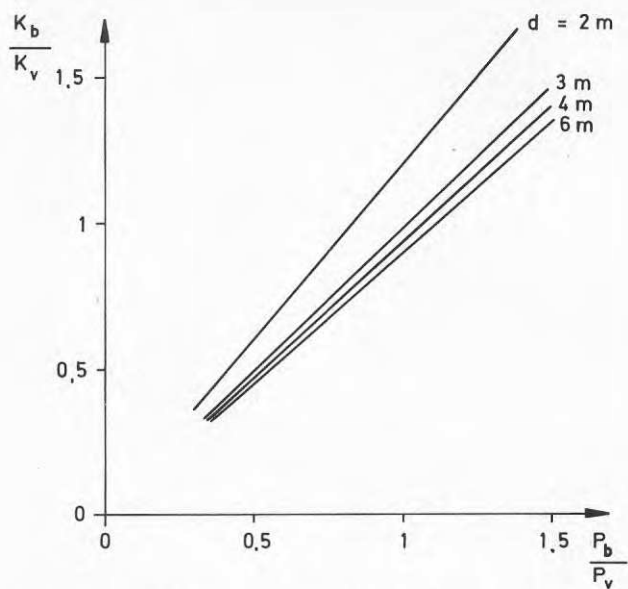


Fig 6-5 Kostnadskvot mellan borrhålslager och vattentank som funktion av prisförhållande och borrhålsavstånd

## 7. BERÄKNINGSPROGRAM

Datorberäkningar av borrhålslagret har utförts med beräkningsmodellen CHS5 från Lunds Tekniska Högskola /6/.

Härutöver har olika specialproblem i samband med värmelagring i berg har studerats med ett antal egna mindre program

### 7.1 Beräkningar med LTH-modellen CHS5

Det ursprungliga programmet ger endast resultat i form av tabeller. Den kanske viktigaste användningen av beräkningsmodellen är dock att i stort verifiera värmelagrets funktion. För detta ändamål är det önskvärt med grafisk presentation av resultaten. Beräkningsmodellen från LTH har därför kompletterats med plottningsrutiner. Denna programutveckling har varit mycket tidskrävande.

För att begränsa mängden av beräkningsresultat redovisas nedan endast figurer från en körning av ett referensfall med programmet. Avslutningsvis utförs en parametervariation med olika borrhålsavstånd.

#### 7.1.1 Viktigaste indata för referensfall

Aktiv lagerstorlek:  $D = H = 74$  m (med bufferttank enligt avsnitt 6.5)

Värmekapacitet:  $C = 2.16 \times 10^6$  J/m<sup>3</sup>K

Isolering av lagrets övre del: 1 m sand eller jord med  $\lambda = 1$  W/mK, därunder 5 m outnyttjat berg

Ursprunglig marktemperatur: 7°C

Zonindelning: 4 st radiella zoner för temperaturstratifiering

Värmemotstånd i borrhål:  $R_{\text{hål}} = 0$  (öppet cirkulationssystem)

Borrhålsavstånd:  $D_1 = 4$  m

Önskvärd inlagrad energimängd: 3.15 GWh (avsnitt 6.2)

Önskvärd utlagrad energimängd: 2.785 GWh

Effektkurva: Approximativt enligt en sinuskurva utan effektuttag första året (se fig 7-1)

Den relativt jämna effektkurvan kan endast erhållas om en bufferttank används för effektutjämnning.

Vattenflödet genom lagret väljs proportionellt mot den önskvärda effekten enligt

$$\dot{V} = \frac{\dot{Q}}{C_p T} = \frac{\dot{Q}}{992 \times 4178 \times 45}$$

Begränsningar på vattentemperaturen till lagret väljs för andra och följande år enligt fig 7-2.

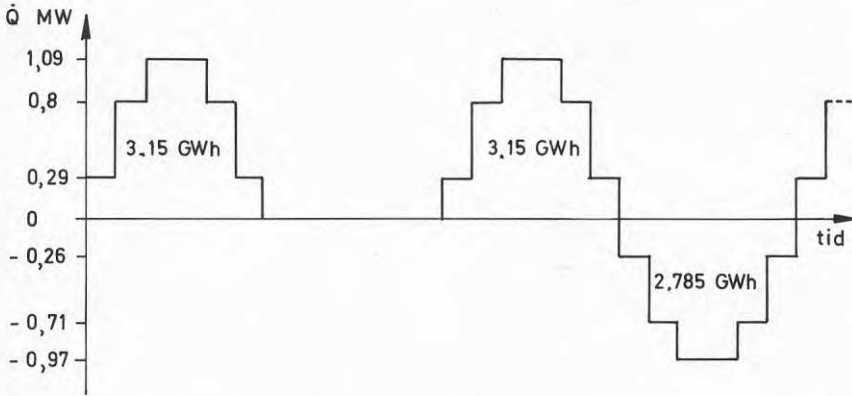


Fig 7-1 Önskad effektkurva

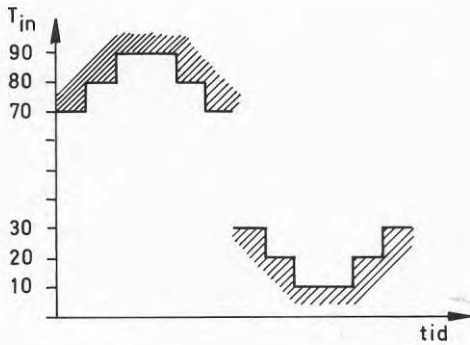


Fig 7-2 Temperaturgränser för vattentemperatur till lagret under in- och utlagring

Simuleringstid: 5 år

Programmet beräknar bl a energi och temperaturverkningsgrader. Dessa definieras som

$$\eta_Q = \frac{Q_{ut}}{Q_{in}} \quad \text{respektive} \quad \eta_T = \frac{T_{ut, \text{ medel}} - T_{ref}}{T_{in, \text{ medel}} - T_{ref}}$$

(Referenstemperaturen har valts till  $T_{ref} = 7^{\circ}\text{C}$ )

Efter fem årscyklar erhöles för referensfallet  $\eta_Q = 0.61$  respektive  $\eta_T = 0.57$

Värmeförlusten (39%) är alltså större än önskvärt. Vid fortvarighet efter ytterligare några årscyklar kommer dock värmeförlusten att bli något lägre. Att fortvarighet inte har erhållit framgår av figur 7-4. Figurerna (avsnitt 7.1.3 nedan)

visar också att temperaturstratifieringen inte fungerar tillfredsställande.

Genom förbättrad isolering av markytan ovanför lagret (från 1 till 5 m<sup>2</sup>K/W) erhöles endast 2% minskning av värmeförlusten.

Den av programmet beräknade värmeförlusten (37-39%) är avsevärt större än den i avsnitt 5.7.2 beräknade stationära värmeförlusten (16%). Orsaken till att förlusterna enligt programmet blir så stora beror dels på att fortvarigheten inte uppnåtts och dels på att medeltemperaturen vid lagrets yta är högre.

För att utreda borrhålsavståndets inverkan på värmeförlusten (energiverkningsgraden) har dock en parametervariation utförts.

### 7.1.2 Parametervariation

Det finns en mängd olika indataparametrar och driftsfall som kan vara intressanta att variera. Den parameter som sannolikt är viktigast att studera är borrhålsavståndet. Av tidskäl har därför parametervariationer endast utförts för borrhålsavståndet. Inverkan av andra variabler har studerats i ref /7/.

Om borrhålsavståndet ökas så krävs en mindre total borrhålslängd för att erhålla en viss lagervolym. Samtidigt försämraras dock värmetransporten i lagret. För att kompensera mot detta kan lagrets volym ökas. Detta kan göras med formlerna från avsnitt 6.4. Lagrets storlek varierar med lika diameter och höjd. Beräkningar har utförts med följande data:

Borrhålsavstånd $D_1$	2	3	4	5	6	7	
Total borrhålslängd	45.3	28.4	23.2	21.1	20.5	20.0	10 <sup>3</sup> m
Lagervolym	V	153	226	318	466	632	858
Lagerstorlek	D=H	58	66	74	84	93	103
							m

Tabell 7-1 Data för parametervariation

Efter fem års cykler erhöjls följande energi- och temperaturverkningsgrader:

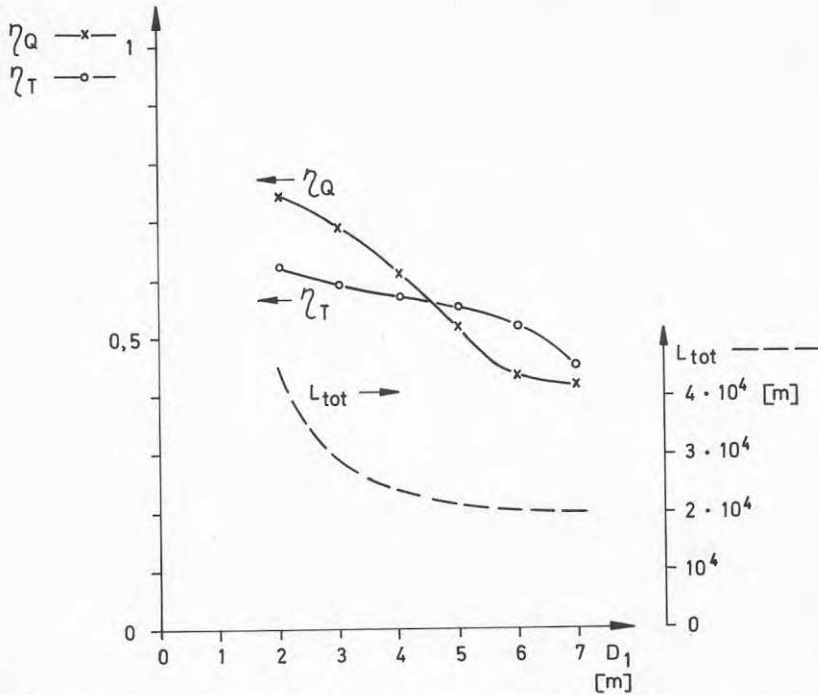


Fig 7-3 Energi- och temperaturverkningsgrad som funktion av borrhålsavstånd (Efter 5 års cykler, lagerstorlek enligt tabell 7-1)

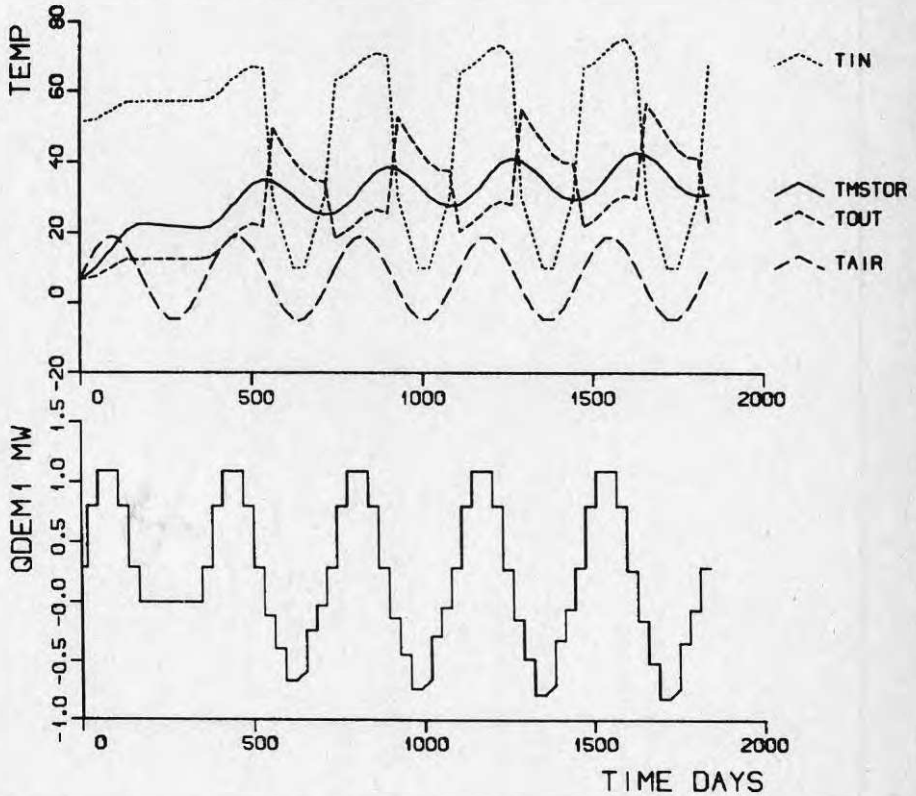
Observera att både lagerstorlek och borrhålsavstånd har varierats samtidigt enligt tabell 7-1.

Att energiverkningsgraden enligt programmet blir låg vid stora borrhålsavstånd och stor lagerstorlek beror sannolikt på att lagret inte hinner bli fullt uppladdat. Med endast små förändringar i indata och driftsätt kan helt andra förlopp för verkningsgradskurvorna erhållas.



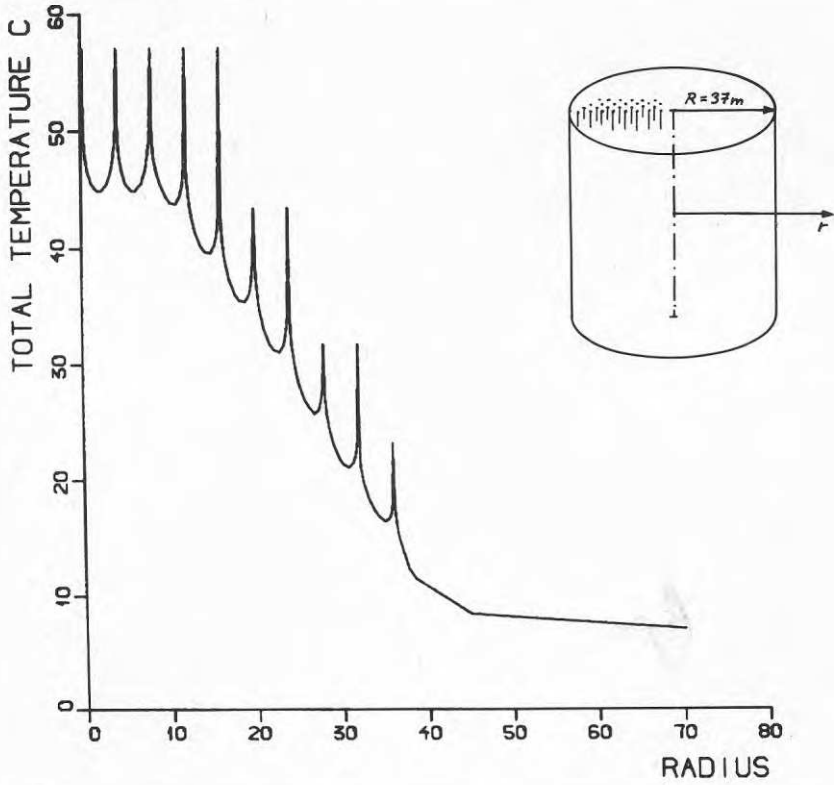
7.1.3 Grafiska resultat - redovisning

# MEAN STORAGE, FLUID AND AIR TEMPERATURES AND HEAT INPUT TO STORAGE



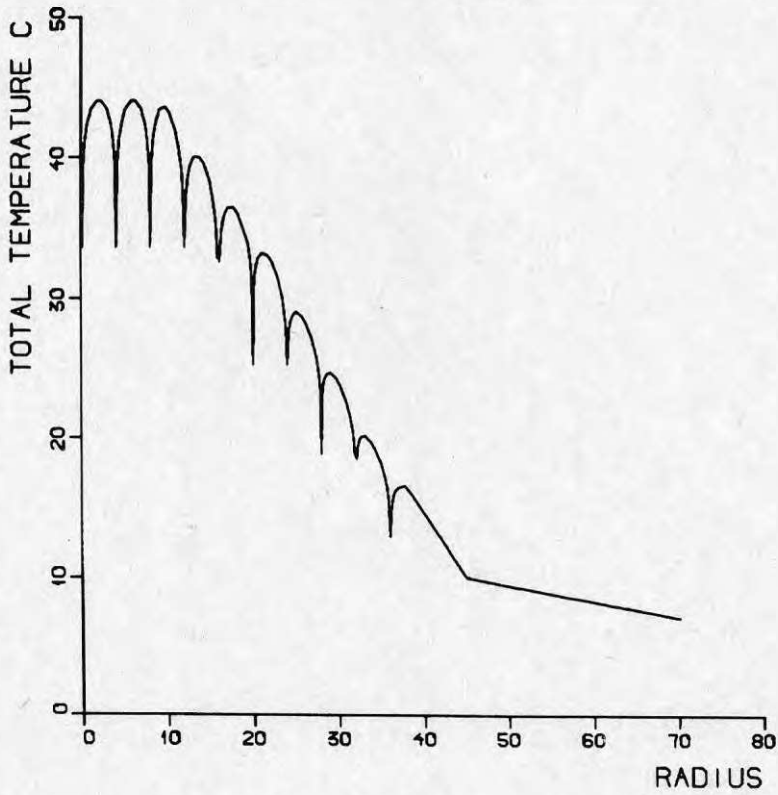
Figur 7-4 Temperaturer och effekt som funktion av tid för referensfallet (borrhålsavstånd  $d_1 = 4$  m, storlek  $D=H=74$  m, volym  $V=318.000$  m<sup>3</sup>)<sup>1</sup>

TOTAL TEMPERATURE AT TIME = 456.0 DAYS  
HEAT INPUT QDEM1= 1.1 MW



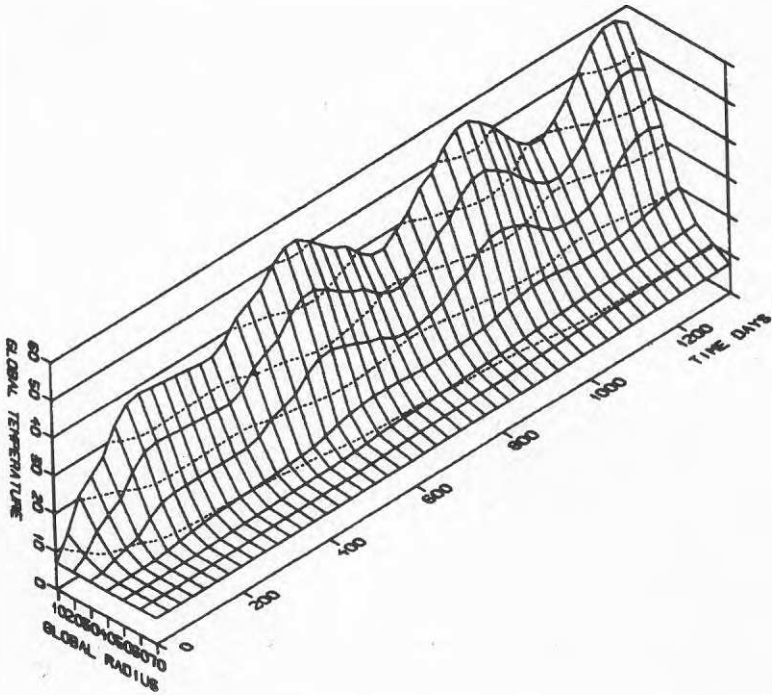
Figur 7-5 Radiell temperaturprofil vid inlagring

TOTAL TEMPERATURE AT TIME = 638.0 DAYS  
HEAT INPUT QDEM1= -0.6 MW



Figur 7-6 Radiell temperaturprofil vid utlagring

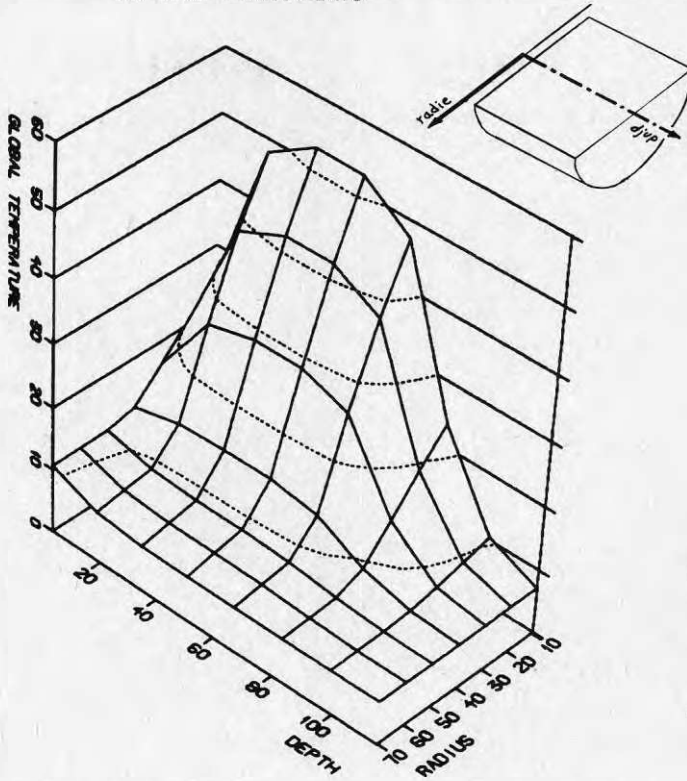
### GLOBAL TEMPERATURE VERSUS RADIUS AND TIME



Figur 7-7 Global temperatur (dvs den lokala temperaturvariationen kring borrhålen är utjämnad) som funktion av radie och tid

Observera att temperaturstratifieringen inte tycks fungera så bra. (Gradienten ändrar lutning istället för att förskjutas radiellt.)

GLOBAL TEMPERATURE PLOT NUMBER 7  
AT TIME = 562.7 DAYS



Figur 7-8 Global temperatur som funktion av djup och radie  
(5 m berg närmast markytan utnyttjas inte för  
värmelagring)

## 8. SLUTSATSER OCH FÖRSLAG TILL FORTSATTA STUDIER

### 8.1 Slutsatser

- Kostnaden för ett borrhålslager blir sannolikt mindre än för ett motsvarande värmelager med vattentank (avsnitt 6.7)
- Miljöpåverkan blir liten med ett borrhålslager
- Lagret kan byggas ut i etapper
- Värmeläckaget från ett borrhålslager är relativt stort. Genom lämpligt driftsätt och dimensionering kan värmeläckaget troligen begränsas till en acceptabel nivå.
- Värmet kan och bör lagras med temperaturstratifiering. Datorsimuleringar visar dock att denna stratifiering inte fungerar helt tillfredsställande (se fig 7-7).
- Endast en mindre del av bergvolymen utnyttjas med fullt temperatursving. Resten av bergvolymen behövs för tillräcklig värmeöverföring. Trots detta blir borrhålslagret sannolikt ekonomiskt fördelaktigt.
- Korta effekttransienter (solpulser) bör utjämnas med en bufferttank (avsnitt 6.6).
- Kopplingschema och driftsätt kan bli något mer komplicerat med ett borrhålslager än för lagring med vattentank (fig 4-5).
- Solvärmesystemet bör kompletteras med värmepumpar. Genom att värmepumpa inom lagret mot värmeläckaget kan troligen solfångaryta och lagerstorlek minskas.
- De geologiska och hydrologiska förutsättningarna för ett borrhålslager vid Södertuna är goda, även om ett öppet cirkulationssystem väljs (bilaga F och G).
- För att få litet värmemotstånd bör cirkulationssystemet helst vara öppet. Värmemotståndet med ett slutet system är dock sannolikt litet (avsnitt 5.2 och bilaga A). Kostnaden per meter borrhål blir dock mindre med ett öppet cirkulationssystem.
- Borrhålsavståndet har stor betydelse för lagrets funktion och kostnad. För att få så stort värmelager som möjligt i förhållande till den totala borrhåls längden bör avståndet vara stort. För att värmetransporten skall bli tillräckligt god får inte avstånden mellan hålen vara för stort. Större borrhålsavstånd och därmed större lager leder också till ett större absolut värmeläckage från lagret. Dessutom

blir "värmeinvestering" för att första året värma upp lagret större. Tills vidare tycks 4 m vara ett lämpligt hållavstånd.

- De antaganden som har gjorts i avsnitt 6.1 om effekt och energibehov för Södertuna har visat sig vara felaktiga. Enligt nya data från Riksbyggen blir energiförbrukningen istället 44% större. Detta medför att lagret måste göras större och att energiverkningsgraden förbättras.

## 8.2 Fortsatta studier

Många delproblem som borde ha utförts i denna utredning får utföras i ett eventuellt fortsatt projekt. Flera av de problem som har diskuterats ovan bör också studeras ytterligare. (Att det finns så många problem och obesvarade frågor innebär dock inte att borrhållager skulle vara ofördelaktiga.)

För ett fortsatt arbete föreslås studier av:

1. Totalekonomi för solenergisystem med olika typer av värmelager. Någon form av kriterium för om energisystem av denna typ är ekonomiskt rimliga behövs.
2. Alternativa systemlösningar, kopplingar och reglerprinciper för borrhållager till övriga komponenter (solfångare, värmepumpar, radiatorsystem, vxv för tappvarmvatten m m).
3. Alternativa geometrier för placering och sammankoppling av borrhål.
4. Tryckfall i och vattenläckage från borrhål.
5. Energikvalitetsanalys av energisystem baserat på solvärme samt med lagring och värmepumpning. (Att enbart använda energimängd eller exergimängd leder knappast till något användbart resultat. Det behövs dock en förenklad metod att värdera faktorer som kapitalkostnad och driftkostnad för primärenergi mot exempelvis entropiproduktion i olika delar av systemet.) Energikvalitetsanalysen kan förhoppningsvis vara ett hjälpmedel till en övergripande optimering.
6. Övergripande optimering av hela systemet. (Val av temperaturnivåer, termisk dimensionering av solfångare och lager, strategi för värmepumpning m m.) Denna optimering är troligen endast möjlig genom mycket förenkla analyser. Kanske kan simuleringsprogram som TRNSYS användas.
7. Temperaturstratifiering av borrhållager behöver utredas betydligt noggrannare än vad som har gjorts i denna studie.

8. Försöksresultat från andra projekt och experiment bör utnyttjas. Försöken vid Älvkarelby bör ge information om värmeöverföringen i borrhål med slutna cirkulationssystem. Nya försök för att studera exempelvis transienta förlopp eller temperaturstratifiering kan kanske genomföras.
9. Optimeringen av borrhålsavstånd behöver förbättras. Andra parametrar som borrhålsdiameter och lagrets form bör också optimeras. (För detta krävs kunskap om teknik och kostnader för borrhål.)
10. Dimensionering i simulering och om möjligt viss optimering av hela energisystemet med realistiska data för värmebehov och solinstrålning. Simuleringsprogram av typen TRNSYS bör vara användbara.
11. Fortsatt förprojektering av solvärmesystem med borrhålslager för Södertuna.
12. Detaljerade kostnadberäkningar och jämförelse med andra lagringsalternativ.

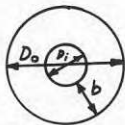


REFERENSER

1. Kadesjö H, Sintorn J:  
Säsongslagring av värme i berg. Förstudie av  
borrhålslager för ca 10 000 lägenheter. R98:1981  
Byggeforskningsrådet.
2. Bruce T, Hedlund B, Nilsson O m fl:  
Solvärmecentral, Södertuna för ca 500 lägenheter.  
Byggeforskningsrådet.
3. Hellström G:  
Dimensionering av rörsystem för värmelagring i mark.  
Inst för matematisk fysik, Lunds Tekniska Högskola,  
1981.
4. Isaksson P:  
Plana termiska solfångare. R35:1979 Byggeforsknings-  
rådet.
5. Raithby G D, Hollands K G T:  
A General Method of Obtaining Approximate Solutions  
to Laminar and Turbulent Free Convection Problems.  
Advances in Heat Transfer, Vol 11, 1975.
6. Hellström G:  
Model of duct storage system. Manual for computer  
Code. Inst för matematisk fysik, Lunds Tekniska Hög-  
skola, 1981.
7. Andersson S, Johansson A, Nordell B, Åbyhammar T:  
Borrhålslager i berg. Fältförsök i Luleå. 5 årscykler  
i nedskalat lager. Förprojektering av demonstrations-  
och experimentanläggning.
8. Andersson S, Eriksson A, Tollin J:  
Borrhålslager i berg för säsongslagring av värme.  
Förstudie, R66:1981 Byggeforskningsrådet.
9. Platell O, Wikström H:  
Sunstore-projektet 1977-1980  
Solvärmesystem med låg temperatur och säsongslagring  
för uppvärmning av lokaler, R100:1981 Byggeforsknings-  
rådet.

UPPSKATTNING AV VÄRMEÖVERGÅNGSTALET PÅ GRUND AV EGENKONVEKTION I ETT BORRHÅL MED SLUTET CIRKULATIONSSYSTEM

Värmeövergångstalet per meter borrhål kan uppskattas med hjälp av en korrelation för egenkonvektion mellan koncentriska cylindrar. Enligt referens /5/ erhålles värmeövergångstalet för en ringformig spalt med följande formler:

$$k = \frac{2\pi \lambda_{eff}}{\ln \frac{D_o}{D_i}}$$


$$b = \frac{D_o - D_i}{2}$$

$$\lambda_{eff} = 0.317 \lambda \frac{\ln \frac{D_o}{D_i}}{b^{\frac{3}{4}} \left( D_i^{-\frac{3}{5}} + D_o^{-\frac{3}{5}} \right)^{\frac{5}{4}}} Ra^{\frac{1}{4}}$$

$$\lambda \approx 0.629 \text{ W/mK} \quad \text{värmeledningsförmåga vid } 40^\circ\text{C}$$

$$Ra = \frac{g \beta \Delta T b^3}{\nu a} \quad \text{Rayleightalet}$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2 \quad \text{gravitationen}$$

$$\beta \approx 3.85 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1} \quad \text{volymutvidgningskoefficienten för vatten}$$

$$\nu \approx 6.46 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} \quad \text{kinematisk viskositet (40}^\circ\text{C)}$$

$$a \approx 1.5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} \quad \text{värmедiffusivitet}$$

Antag att borrhålsdiametern är  $D_o = 0.15 \text{ m}$  samt att röret för fluiden har diametern  $D_i = 0.075 \text{ m}$ .

$$\text{Spalttjocklek} \quad b = 0.0375$$

$$\text{Antag temperaturdifferens } \Delta T = 10 \text{ K}$$

$$Ra = \frac{9.81 \cdot 3.85 \cdot 10^{-4} \cdot 10 \cdot 0.0375^3}{6.46 \cdot 10^{-7} \cdot 1.5 \cdot 10^{-7}} = 2.06 \cdot 10^7$$

$$\lambda_{eff} = 0.317 \cdot 0.629 \frac{\ln 2}{0.0375^{\frac{3}{4}} \left( 0.075^{-\frac{3}{5}} + 0.15^{-\frac{3}{5}} \right)^{\frac{5}{4}}} (2.06 \cdot 10^7)^{\frac{1}{4}} = 12 \text{ W/mK}$$

$$k = \frac{2\pi \cdot 12}{\ln 2} = 109 \text{ W/mK}$$

Värmemotståndet i vattenspalten blir

$$R_{vatten} = \frac{1}{k} = 9.2 \times 10^{-3} \text{ Km/W}$$

Detta värmemotstånd kan jämföras med värmemotståndet från borrhållsväggen till bergets medeltemperatur:

$$R_{\text{berg}} = \frac{l}{2\pi\lambda} \left( \ln \frac{r_1}{r_0} - \frac{3}{4} \right)$$

Med  $\lambda = 3.5 \text{ W/mK}$  och borrhållsavståndet 4 m erhålles delningsradien  $r_1 = 0.525 \times 4 = 2.1 \text{ m}$  och värmemotståndet

$$R_{\text{berg}} = \frac{l}{2\pi \cdot 3.5} \left( \ln \frac{2.1}{0.075} - \frac{3}{4} \right) = 0.12 \text{ Km/W}$$

Kvoten mellan värmemotstånden blir  $\frac{R_{\text{berg}}}{R_{\text{vatten}}} = \frac{0.12}{9.2 \cdot 10^{-3}} = 13$

Värmeöverföringen från fluid till borrhållsväggen bör alltså vara tillräcklig även med ett slutet cirkulationssystem.

## TEMPERATURFÖRLOPP I BORRHÅL

Värmeledningen mellan fluidkanalerna och berget efterliknas med ett motstånd enligt fig 5-4. Från motståndsnätet erhålls följande samband:

$$\begin{cases} T_0 = T_m + \frac{q_1 + q_2}{k_b} \\ q_1 = k_{10} (T_1 - T_0) + k_{12} (T_1 - T_2) \\ q_2 = k_{20} (T_2 - T_0) - k_{12} (T_1 - T_2) \end{cases}$$

Väggtemperaturen  $T_0$  elimineras:

$$\begin{cases} q_1 = k_{10} (T_1 - T_m) + k_{12} (T_1 - T_2) - \frac{k_{10}}{k_b} (q_1 + q_2) \\ q_2 = k_{20} (T_2 - T_m) - k_{12} (T_1 - T_2) - \frac{k_{20}}{k_b} (q_1 + q_2) \end{cases}$$

Inför vektorerna  $\mathcal{Q} = \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \end{pmatrix}$  och  $\mathcal{T} = \begin{pmatrix} T_1 - T_m \\ T_2 - T_m \end{pmatrix}$

Ekvationssystemet kan nu skrivas som en matrisekvation

$$\underbrace{\begin{pmatrix} 1 + \frac{k_{10}}{k_b} & \frac{k_{10}}{k_b} \\ \frac{k_{20}}{k_b} & 1 + \frac{k_{20}}{k_b} \end{pmatrix}}_A \mathcal{Q} = \underbrace{\begin{pmatrix} k_{10} + k_{12} & -k_{12} \\ -k_{12} & k_{20} + k_{12} \end{pmatrix}}_B \mathcal{T}$$

Värmeeffektvektorn blir  $\mathcal{Q} = A^{-1} B \mathcal{T}$

Denna effekt ger upphov till en temperaturgradient på fluiden längs kanalerna.

Om medeltemperaturen  $T_m$  i berget antages konstant längs borrhålet kan gradienten skrivas

$$\frac{dT}{dz} = \frac{1}{\dot{m}c_p} \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} q$$

Hela problemet har nu reducerats till en kopplad differentialekvation för vektorn  $T$ .

$$\frac{dT}{dz} = CT$$

där  $C = \frac{1}{\dot{m}c_p} \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} A^{-1} B$

En allmän lösning kan skrivas som

$$T = D \begin{pmatrix} e^{\lambda_1 z} \\ e^{\lambda_2 z} \end{pmatrix}$$

$D = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \end{pmatrix}$  är en tills vidare godtycklig matris

Egenvärdena  $\lambda_1$  och  $\lambda_2$  erhålls ur

$$\det \left( C - \lambda \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \right) = 0$$

$$(c_{11} - \lambda)(c_{22} - \lambda) - c_{12}c_{21} = 0$$

$$\lambda = \frac{c_{11} + c_{22}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{c_{11} - c_{22}}{2}\right)^2 + c_{12}c_{21} - c_{11}c_{22}}$$

Insättning av den allmänna lösningen i differentialekvationen ger matrisekvationen

$$D \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{pmatrix} = CD$$

eller

$$\begin{pmatrix} d_{11} \kappa_1 & d_{12} \kappa_2 \\ d_{21} \kappa_1 & d_{22} \kappa_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} d_{11} + c_{12} d_{21} & c_{11} d_{12} + c_{12} d_{22} \\ c_{21} d_{11} + c_{22} d_{21} & c_{21} d_{12} + c_{22} d_{22} \end{pmatrix}$$

Från två av elementen i ekvationen erhålls sambanden

$$\frac{d_{21}}{d_{11}} = \frac{\kappa_1 - c_{11}}{c_{12}} = \frac{\frac{c_{22} - c_{11}}{2} + \sqrt{\dots}}{c_{12}}$$

$$\frac{d_{21}}{d_{12}} = \frac{\kappa_2 - c_{11}}{c_{12}} = \frac{\frac{c_{22} - c_{11}}{2} - \sqrt{\dots}}{c_{12}}$$

Ett randvillkor erhålls vid markytan ( $z=0$ ) för det nedåtgående flödet som antages ha en given övertemperatur  $\Theta$  relativt  $T_m$ .

$$\Theta = T_1(0) - T_m = d_{11} + d_{12}$$

Det andra randvillkoret erhålls vid hålets botten ( $z=L$ ) där flödestemperaturerna är lika.

$$T_1(L) = T_2(L)$$

$$d_{11} e^{\kappa_1 L} + d_{12} e^{\kappa_2 L} = d_{21} e^{\kappa_1 L} + d_{22} e^{\kappa_2 L}$$

$$\frac{d_{22} - d_{12}}{d_{11} - d_{21}} = e^{(\kappa_1 - \kappa_2)L} = e^{2\sqrt{\dots}L}$$

De olika sambanden mellan elementen i matrisen D kan nu kombineras.

$$e^{2\sqrt{\dots}L} = \frac{d_{12}}{d_{11}} \frac{\frac{d_{22}}{d_{12}} - 1}{1 - \frac{d_{21}}{d_{11}}} = \frac{d_{12}}{d_{11}} \frac{\frac{c_{22} - c_{11}}{2} - \sqrt{\dots} - c_{12}}{c_{12} - \frac{c_{22} - c_{11}}{2} - \sqrt{\dots}}$$

$$\frac{d_{12}}{d_{11}} = \frac{-\sqrt{\dots} + c_{12} - \frac{c_{22} - c_{11}}{2}}{-\sqrt{\dots} - c_{12} + \frac{c_{22} - c_{11}}{2}} e^{2\sqrt{\dots}L}$$

$$d_{11} = \frac{\Theta}{1 + \frac{d_{12}}{d_{11}}} \quad \text{osv för övriga element i D.}$$

För att exemplifiera formlerna antages en termisk asymmetrisk geometri med följande värmekonduktanser:

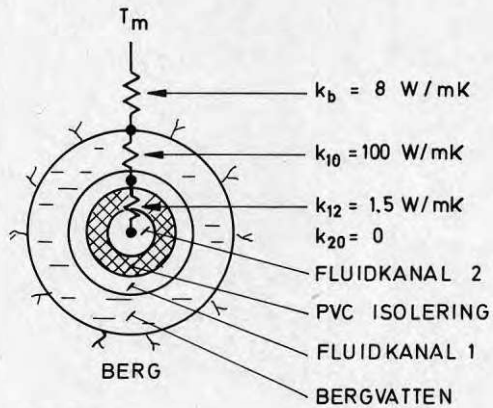


Fig B-1 Exempel på värmekonduktanser. (Avrundade värden från tidigare beräkningar)

Antag att hålet har de aktiva djupet  $L = 100 \text{ m}$  och att massflödet är  $\dot{m} = 0.2 \text{ kg/s}$ . Välj  $\Theta = 10 \text{ K}$ .

Med hjälp av ett beräkningsprogram erhålls följande temperaturförlopp:

## FLUIDTEMPRATURER I BORRHÅL

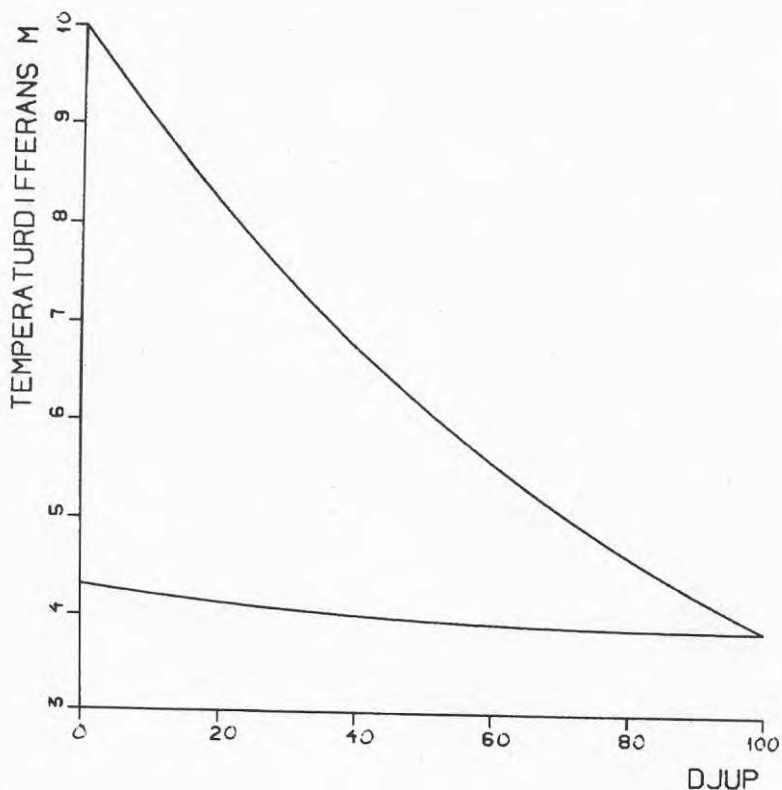


Fig B-2 Exempel på temperaturfördelning i fluidkanalerna längs ett borrhål



## BERÄKNING AV TEMPERATURSVAR PÅ SOLPULSER

Temperatursvaret i borrhålen på den dygnsvis varierande värmeeffekten från solfångare utan buffertlager beräknas enligt tre olika metoder.

I Borrhålslagermetoden från LTH

Solpulserna efterliknas här med ett antal rektangulära pulser. Beräkningsmodellen /ref 6/ har kompletterats med plottningsrutiner som bl a kan visa hur temperaturen kring ett borrhål varierar med den pulserande effekten (fig C-1).

TOTAL TEMPERATURE AT CENTER OF STORAGE

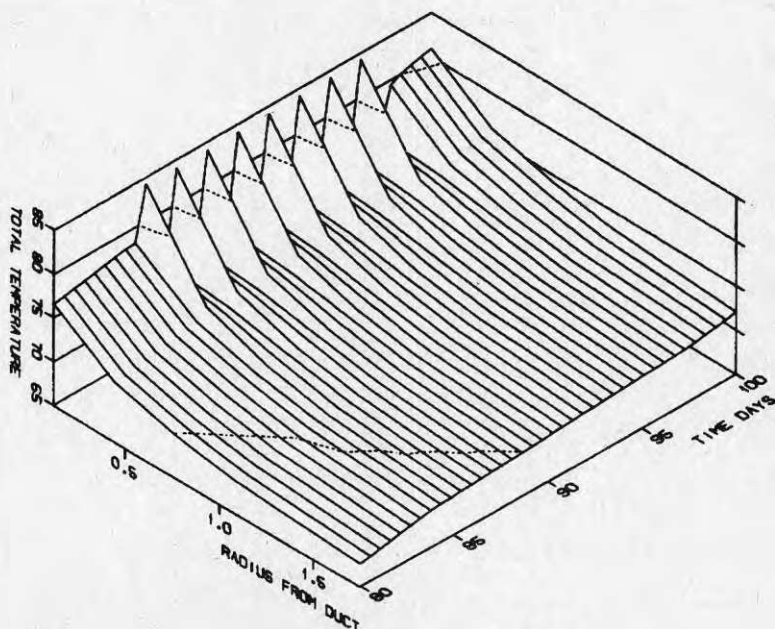


Fig C-1 Temperatur omkring ett borrhål i centrum av lagret. Värme tillförs i form av dygnspulser med amplituden 265 W/m.

Med effektamplituden 265 W/m erhålls temperaturvariationer på ca 11 K. Värmemotståndet för solpulserna skulle alltså vara

$$R_{\text{puls}} = \frac{11}{265} = 0.042 \text{ Km/W}$$

Eftersom resultatet är osäkert utförs nedan en noggrannare analys.

## II Kelvinfunktioner

En beräkningsmodell som utnyttjar fourierserier och kelvinfunktioner har utvecklats. Solpulserna efterliknas med en likriktad sinusvåg:

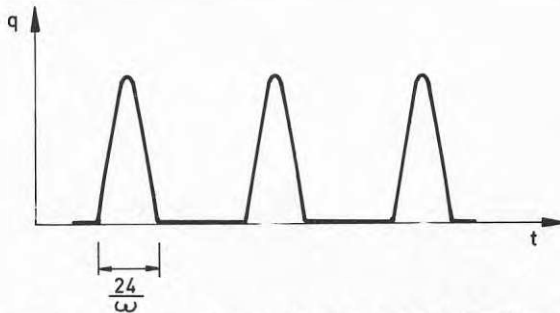


Fig C-2 Solpulser efterliknade med likriktad sinusvåg

Effekten per meter borrhål definieras med funktionen

$$q = \frac{A}{1 - \cos \varphi} \max(0, \cos \omega t - \cos \varphi)$$

Denna funktion uppdelas i en fourierserie

$$q = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cos n\omega t$$

Värmeledningsekvationen  $\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right)$  för

temperaturen i berget kring ett borrhål kan lösas för varje frekvens i fourierserien. Lösningarna för  $n > 0$  (växelströmmen) kan skrivas som en summa av termer av typen

$$\left[ \alpha_n \text{bec} \left( \sqrt{\frac{n\omega}{a}} r \right) + \beta_n \text{kec} \left( \sqrt{\frac{n\omega}{a}} r \right) \right] e^{in\omega t}$$

(bec och kec är egna beteckningar för kelvinfunktioner som förklaras i Bilaga E)

Koefficienten  $A_0$  i fourierserien motsvarar en likström av medeleffekten. Denna ger en konstant växande medeltemperatur

$$T_=(r, t) = \frac{A_0}{4\pi(r_1^2 - r_0^2)\lambda} (4at + r^2 - r_0^2 - 2r_1 \ln \frac{r}{r_0})$$

där  $r_1$  = delningsradie  
 $r_0$  = borrhålsradie  
 $a$  = värmediffusivitet

Med ett beräkningsprogram beräknas fourierseriekoefficienterna  $A_n$ , temperatursvaret för varje frekvens samt den totala periodiskt varierande temperaturen  $T$ . Denna adderas med bidraget  $T_=($  från likströmmen av värme. Den resulterande temperaturen i berget ritas upp som funktion av tid och radie från borrhålet (fig C-3). Dessutom beräknas temperaturen på fluiden och vid borrhålsväggen som funktion av tiden (fig C-4). Ur denna figur kan ett effektivt värmemotstånd för solpulser uppskattas till

$$R_{\text{puls}} = \frac{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}}{A} = \frac{10.6}{200} = 0.053 \text{ Km/W}$$

## TEMPERATUR I BERG

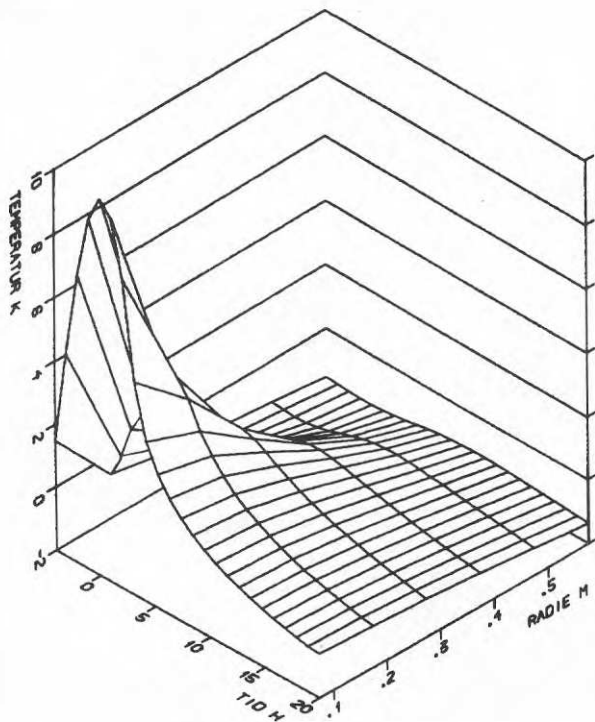


Fig C-3 Temperatur i berg som funktion av tid och avstånd från centrum på borrhål. Värme tillförs från tiden -4 h till tiden +4 h.

## VÄRMEEFFEKT OCH TEMPERATURER I BORRHÅL

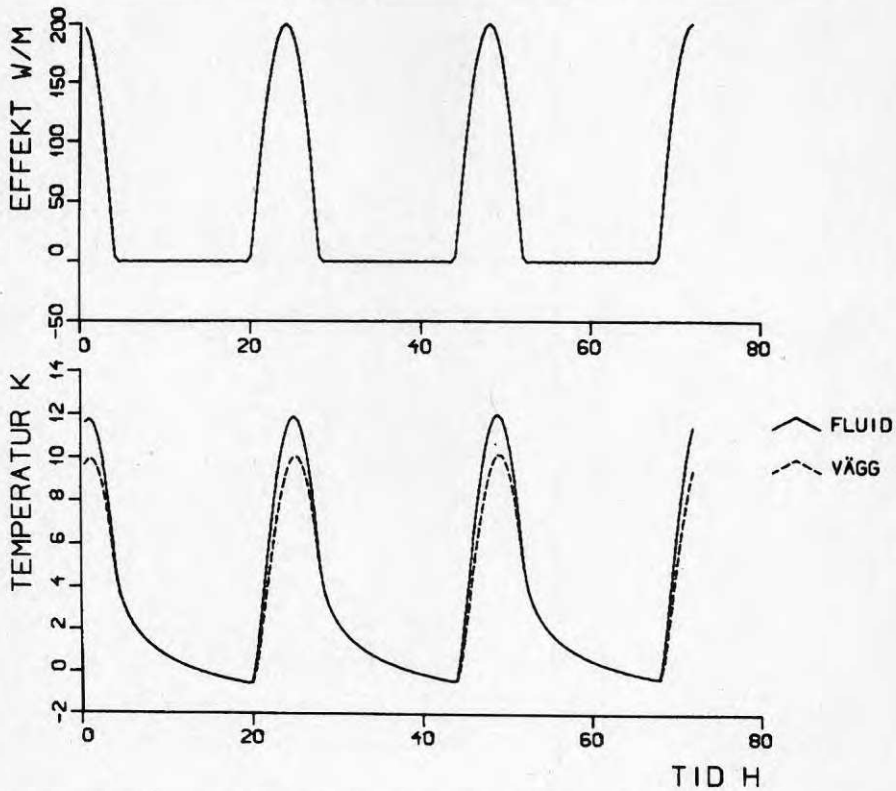


Fig C-4 Värmeeffekt, temperatur på borrhållsvägg och fluidtemperatur på grund av solpulser

Nackdelen med att använda fourierserietveckling och komplexa kelvinfunktioner är att beräkningarna blir komplicerade vilket ökar risken för fel. För att verifiera resultaten görs därför nedan en förenklad analys med  $E_1$ -funktioner.

III  $E_1$ -funktioner

En relativt enkel och användbar analytisk lösning till transienta temperaturförlopp kring ett borrhål kan erhållas med hjälp av exponentintegralfunktionen  $E_1$ . Denna definieras som:

$$E_1(x) = \int_x^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} dy$$

Temperaturfördelningen kring en linjekälla som kopplas på vid tidpunkten  $t = 0$  uppfylls nämligen av ekvationen:

$$T(r, t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \int_{\frac{r^2}{4at}}^{\infty} \frac{e^{-x}}{x} dx = \frac{q}{4\pi\lambda} E_1\left(\frac{r^2}{4at}\right)$$

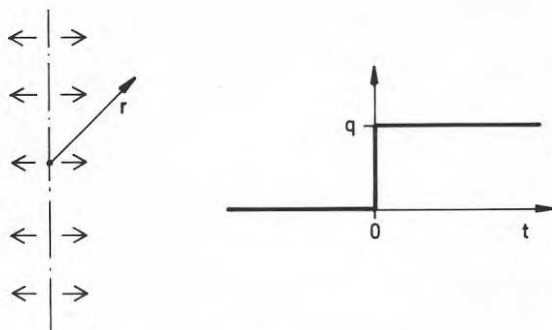


Fig C-5 Linjekälla med stegformad effekt

Värmetillförsel under en dag (solpuls) kan efterliknas med två superponerade motriktade stegfunktioner.

Värmeflödet genom ett cylindriskt tvärsnitt av berget kring linjekällan blir tidsfördröjt och utjämnat. Vid borrhålsradien 0.075 m erhålls tidsförlopp för effekt och temperatur enligt fig C-6.

## VÄRMEEFFEKT OCH TEMPERATUR I BORRHÅL

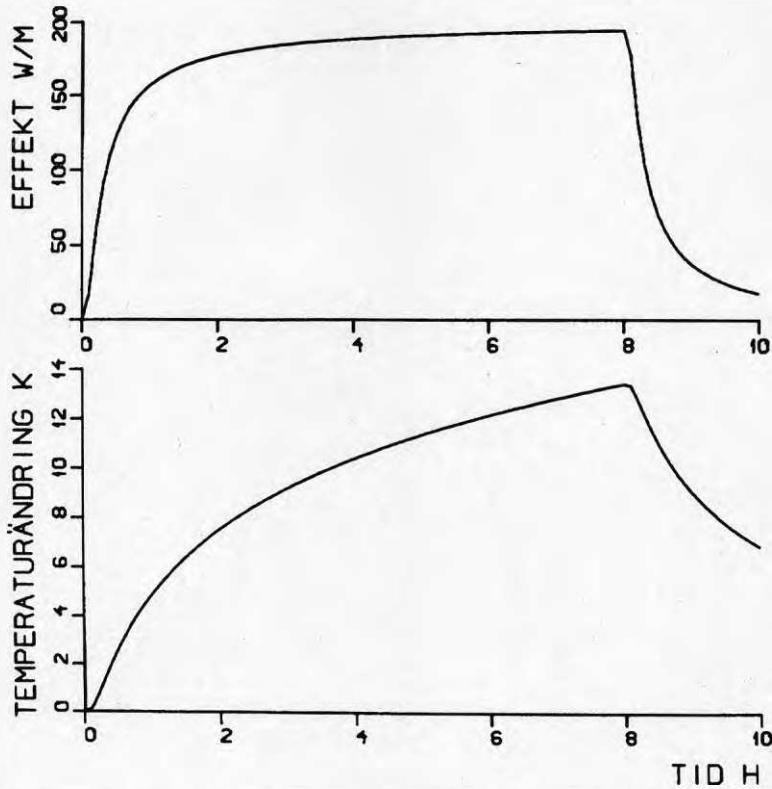


Fig C-6 Värmeeffekt och temperatur i borrhål beräknat med  $E_1$ -funktioner

Om värme tillförs vid borrhålsradien enligt effektkurvan (fig C-6) gäller den analytiska lösningen exakt utanför borrhålet.

Från kurvorna kan värmemotståndet för solpulser uppskattas till

$$R_{\text{puls}} = \frac{13.5}{190} = 0.071 \text{ Km/W}$$

Detta visar att den betydligt mer komplicerade beräkningen i avsnitt II sannolikt är korrekt.

## UPPSKATTNING AV KVOT MELLAN INLAGRAD ENERGIMÄNGD OCH MAX-EFFEKT

Kvoten  $\tau_{in} = \frac{Q}{\dot{Q}_{in}}$  mellan inlagrad energimängd  $Q$  och den "representativa" maxeffekten  $\dot{Q}_{in}$  skall uppskattas för dimensionering av borrhålslagret (avsnitt 6.4). Varaktighetsdiagram för solinstrålning från ref /4/ kan utnyttjas.

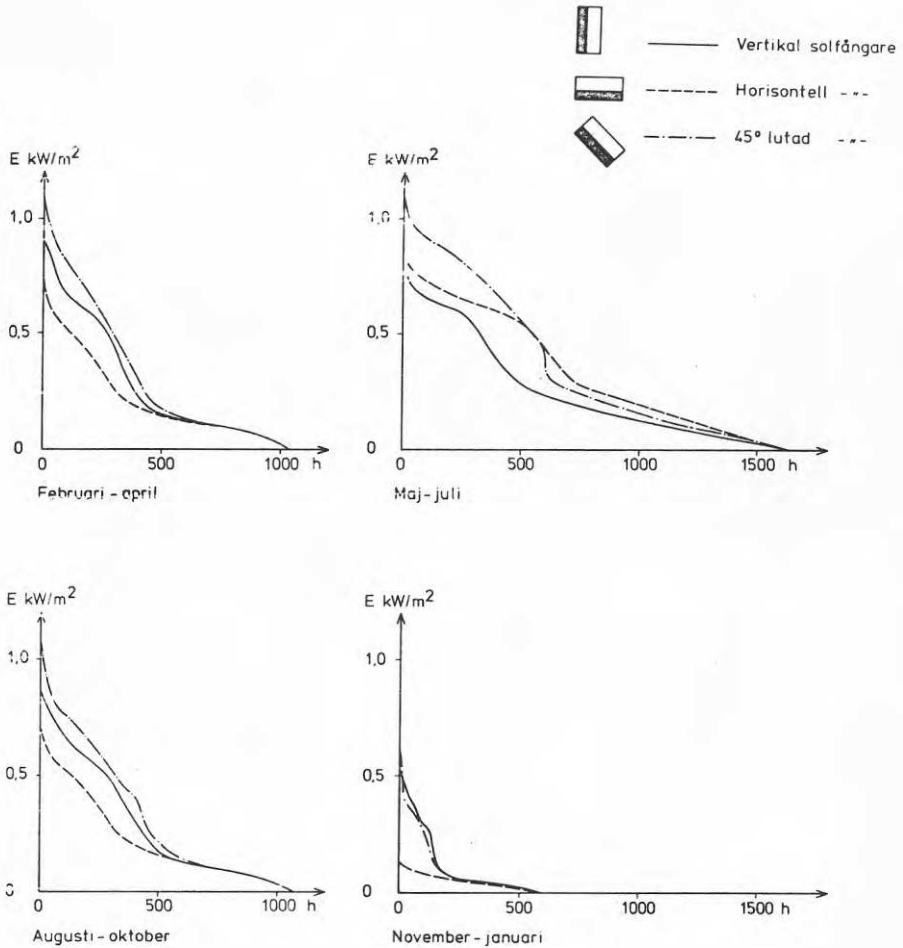


Fig D-1 Varaktighetsdiagram över irradiansen på södervända solfångare i Stockholm (från ref /4/)



Basbelastningen för tappvarmvatten och för borrhålslagrets värmeförluster är relativt stor. Den solvärme som infångas under vinter, vår och höst kan därför huvudsakligen utnyttjas direkt utan lagring.

Det infångade solvärmets blir på grund av reflektion och förluster mindre än irradiansen. Under en viss instrålning blir dessutom framledningstemperaturen alltför låg. Av det återstående under sommaren infångade värmets utnyttjas en mindre del för direkt förbrukning utan lagring. För uppladdning av lagret återstår alltså en värmemängd (proportionell mot)  $Q$ . Ett representativt eller dimensionerade maxvärde  $Q_{in}$ , som är något mindre än den verkliga maxeffekten, väljs. Kvoten mellan energi och effekt blir den sökta tidskonstanten.

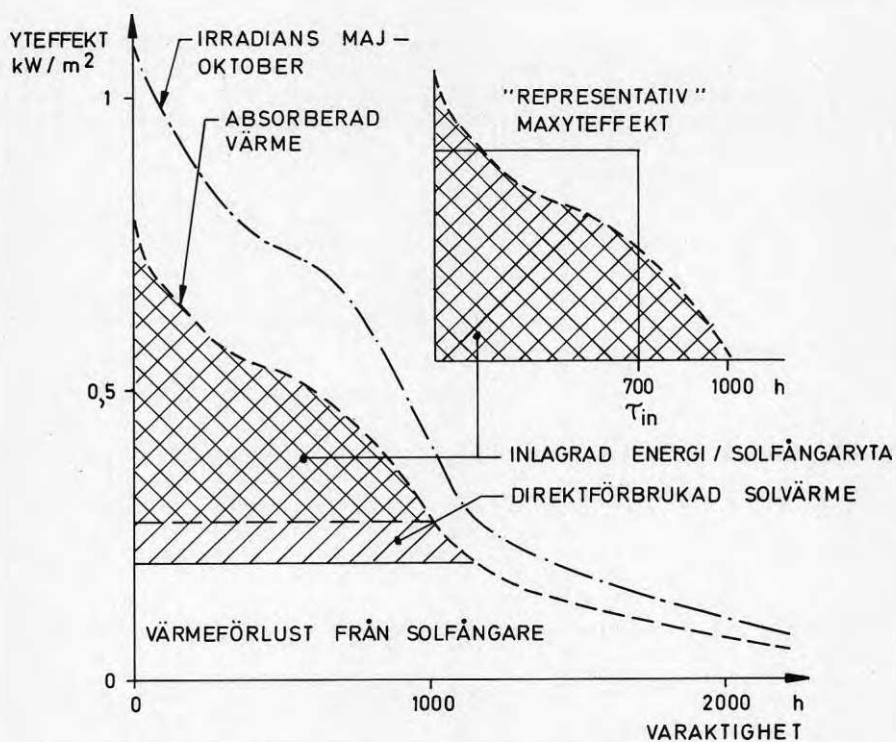


Fig D-2 Varaktighetsdiagram för inlagrad energi

Utan att några specifika antaganden görs för solfångarnas verkningsgrad, minsta utnyttjningsbara instrålning eller andelen direktförbrukat värme kan figur D-2 utnyttjas för en grov uppskattning av storleksordningen på tidskonstanten  $\tau_{in}$  till förslagsvis 700 h.

## OPTIMALT HÅLAVSTÅND FÖR BORRHÅLSLAGER MED HARMONISKT TEMPERATURFÖRLOPP

De formler för optimalt borrhålsavstånd i ett temperaturstratifierat lager som härledes i avsnitt 6.6 är delvis felaktiga eftersom de bygger på värmeledning med konstant flöde. Ett värmelager är ju tänkt att arbeta periodiskt. Om "räckvidden" för temperaturvariationerna är av samma storleksordning som borrhålsavståndet gäller inte antagandet om värmeledning med konstant värmeledning.

Problemet att välja bästa hålavstånd kan förenklas genom att effekter och temperaturer antages variera harmoniskt (sinusformigt). Analytiska samband mellan effekt och temperatur kan då härledas. Dessa samband kan utnyttjas för optimering av hålavståndet.

Önskemålet att lagret skall vara temperaturstratifierat kan kanske vara svårt att förena med harmoniska temperaturförlopp. Antagandena om harmoniska temperaturförlopp kan dock tänkas vara giltiga för de inre delar av lagret där gradienten utnyttjas.

Borrhålsavståndet  $d_1$  eller delningsradien  $r_1 = 0.525 d_1$  skall väljas så att så stor effekt eller energi per meter borrhål kan lagras med ett givet temperatursving på fluiden i borrhålen.

Effekten till hela lagret och per meter borrhål antages variera sinusformigt med vinkelfrekvensen  $\omega = \frac{2\pi}{1\text{år}} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$

Temperaturen på fluiden varierar med samma frekvens men olika fas.

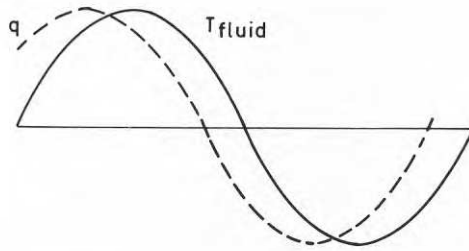


Fig E-1 Harmonisk variation av temperatur och effekt

Analysen förenklas avsevärt genom användning av komplexa funktioner:

$$q(t) = \hat{q} e^{i\omega t}$$

$$T_{fluid}(t) = \hat{T}_{fluid} e^{i\omega t}$$

$\hat{q}$  och  $\hat{T}_{fluid}$  är komplexa amplituder.

Värmet tillförs lagret från solfångare och bortförs till ett distributionssystem. Solfångarna bestämmer en maxtemperatur och distributionssystemet en mintemperatur. Bägge dessa temperaturer är dock beroende av effekten. För att förenkla problemet antages dock att temperaturgränserna är oberoende av effekten. Amplituden för fluidtemperaturens variation  $T_{fluid}$  är därmed fixerad. Dessutom får fasvinkeln mellan effekt och temperatur mindre betydelse.

För en given temperaturamplitud gäller det att välja delningsradien  $r_1$  så att absolutvärdet av effektamplituden  $|\hat{q}|$  blir maximal. Kvoten mellan effekt per längdenhet och temperatur kan betraktas som en komplex admittans för värmets.

$$y = \frac{\hat{q}}{\hat{T}_{fluid}}$$

Problemet är att finna den delningsradie  $r_1$  som maximerar  $|y|$ .

Värmeledningsekvationen kring ett borrhål är

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right)$$

Randvillkoret vid borrhålsradien  $r = r_0$  är  $-\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{\hat{q}}{2\pi\lambda r_0} e^{i\omega t}$

Randvillkoret vid delningsradien  $r = r_1$  är  $\frac{\partial T}{\partial r} = 0$ .

Separationsansats:  $T(r, t) = R(r)e^{i\omega t}$

Insättning i värmeledningsekvationen ger

$$i\omega R e^{i\omega t} = a \left( R'' + \frac{1}{r} R' \right) e^{i\omega t}$$

$$R'' + \frac{1}{r} R' - i\frac{\omega}{a} R = 0$$

Substituera  $x = \sqrt{\frac{\omega}{a}} r$

$$\frac{d^2 R}{dx^2} + \frac{1}{x} \frac{dR}{dx} - iR = 0$$

Denna ekvation har lösningar av typen  
 $bec\ x = ber\ x + i\ bei\ x$  respektive  
 $kec\ x = ker\ x + i\ kei\ x$

( $bec$  och  $kec$  är egna beteckningar för  $J_0(xe^{i\frac{\pi}{4}})$   
 respektive  $K_0(xe^{i\frac{\pi}{4}})$ )

Allmän harmonisk lösning  $R(r) = \alpha bec(\sqrt{\frac{\omega}{a}}r) + \beta kec(\sqrt{\frac{\omega}{a}}r)$

Randvillkoret vid delningsradien  $r_1$  medför att

$$0 = \frac{dR}{dr} = \alpha \sqrt{\frac{\omega}{a}} bec'(x_1) + \beta \sqrt{\frac{\omega}{a}} kec'(x_1) \quad \left(x_1 = \sqrt{\frac{\omega}{a}} r_1\right)$$

$$\text{Därmed bestäms kvoten } \frac{\alpha}{\beta} = - \frac{kec'(x_1)}{bec'(x_1)}$$

Randvillkoret vid borrhålsradien  $r_0$  används för att fullständigt bestämma konstanterna.

$$\begin{aligned} \frac{\hat{q}}{2\pi\lambda r_0} e^{i\omega t} &= - \frac{\partial T}{\partial r} = - e^{i\omega t} \sqrt{\frac{\omega}{a}} [\alpha bec'(x_0) + \beta kec'(x_0)] = \\ &= - e^{i\omega t} \sqrt{\frac{\omega}{a}} \beta \left[ - \frac{kec'(x_1)}{bec'(x_1)} bec'(x_0) - kec'(x_0) \right] \quad \left(x_0 = \sqrt{\frac{\omega}{a}} r_0\right) \\ \beta &= \frac{\hat{q}}{2\pi\lambda r_0 \sqrt{\frac{\omega}{a}} \left[ \frac{kec'(x_1)}{bec'(x_1)} bec'(x_0) - kec'(x_0) \right]} \end{aligned}$$

Temperatursvaret på värmeflödet vid borrhållsväggen blir

$$T(r_0, t) = e^{i\omega t} [\alpha bec(x_0) + \beta kec(x_0)]$$

Fluidtemperaturen kan skilja sig från borrhållsväggens temperatur om det finns ett värmemotstånd  $R_{h\ddot{a}l} \neq 0$ .

$$T_{fluid} = T(r_0, t) + q R_{h\ddot{a}l}$$

Uppskattningar i Bilaga A och avsnitt 6.4 visar dock att värmemotståndet i hålet är litet jämfört med värmeimpedansen i berget. För den totala värmeaddmitansen vars absolutbelopp skall maximeras gäller därför:

$$\begin{aligned} y = \frac{\hat{q}}{\hat{T}_{fluid}} &= \frac{1}{\frac{\hat{T}(r_0)}{\hat{q}} + R_{h\ddot{a}l}} \approx \frac{\hat{q}}{\hat{T}(r_0)} = \frac{\hat{q}}{\alpha bec(x_0) + \beta kec(x_0)} = \\ &= \frac{2\pi\lambda r_0 \sqrt{\frac{\omega}{a}} \left[ \frac{kec'(x_1)}{bec'(x_1)} bec'(x_0) - kec'(x_0) \right]}{- \frac{kec'(x_1)}{bec'(x_1)} bec(x_0) + kec(x_0)} \end{aligned}$$

Absolutbeloppet av värmeaddmitansen som funktion av delningsradien  $r_1$  har ritats upp med ett beräkningsprogram.

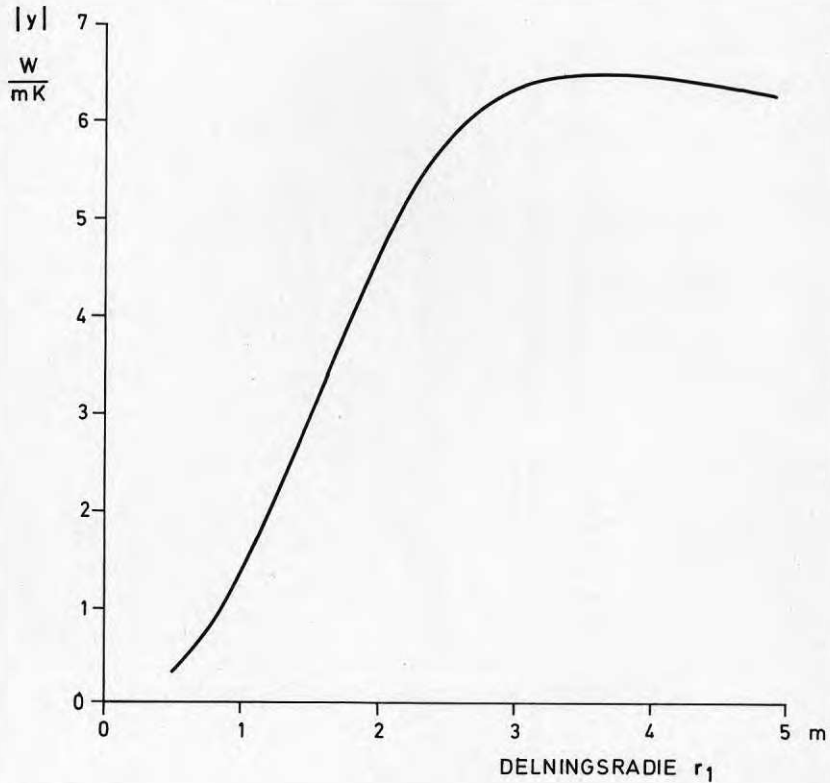


Fig E-1

Ett flackt maximum erhålls för  $r_1 \approx 3.6$  m, vilket motsvarar hålavståndet  $d_1 = \frac{3.6}{0.525} = 6.9$  m

## Geologiska förutsättningar för ett borrhålslager vid Södertuna, Södertälje kommun

### Inledning

Parallellt med de värmetekniska beräkningarna har de geologiska förutsättningarna för ett borrhålslager undersökts vid Södertuna.

Undersökningarna har utförts av AIB och Statens Vattenfallsverk.

Tidigare har en allmän geologisk kartering utförts av VBB och en geoteknisk utredning av AB Jacobson och Widmark.

Av SGU utgivna jord- och bergartskartor över området är betecknade Ae nr 4 och Ba 24.

### Syfte

Undersökningarnas syfte har varit att lokalisera en lämplig plats för ett borrhålslager med hänsyn till planerad bebyggelse, topografi och berggrundsförhållanden.

### Undersökningarnas omfattning

Undersökningarna har omfattat kompletterande geologisk kartering, seismisk undersökning och tre kärnborrhål - ett längre borrhål genom det tänkta lagerområdet och två kortare borrhål norr och söder om lagerområdet. Från det längre kärnborrhålet har uttagits tre prov för bestämning av värmekonduktivitet, värmekapacitivitet och densitet. En översiktlig studie över grundvattenförhållandena för bedömning av vattenomsättningen i aktuellt bergområde har ingått i utredningen.

### Topografisk översikt

Södertunaområdet gränsar till områden med tämligen kuperad berggrundstopografi. Djupa fjärdar som Kaggfjärden, Hallsfjärden och Näslandsfjärden finns söder och öster om området med vattendjup mellan 30-40 m. Jorddjupen i dessa områden ligger troligen i samma storleksordning. Bergshöjder kring +55 finns inom området och i vissa punkter norr om Södertunaområdet når bergshöjderna +75.

Södertunaområdet ligger inom ett ca 4 km<sup>2</sup> stort höjdparti begränsat av Moraån söder väg 57, gamla E4:n, dalgången Brogårdet - Logsjön och en spricklinje i berggrunden från Logsjön till Moraån längs Verkstadsvägen. Markytan i dessa dalgångar höjer sig ej över nivån +35 (se karta 1 sid 11).

#### Geologisk översikt

Berggrunden består huvudsakligen av migmatiserad granatådergnejs. Denna genomsettes av smala diabasgångar 0,1 - 1 m.

Den av VBB utförda geologiska karteringen visar att urbergsplinten genomsetts av sekundära sprickor och sprickzoner. Dessa är orienterade i dels ett NNO-SSV-ligt system, dels ett NV-SO-ligt spricksystem, i vilket diabasgångarna uppträder. Ett utdrag ur kartan över tilltänkt lagerområdet (plats 2) redovisas på karta 2 sid 12.

Berget går i dagen inom stora ytor. Jordtäcket består av morän som täckes av upp till 10 m lera i bergområdets svackor.

#### Hydrogeologiska förhållanden

Hela Södertörns- och Östra Sörmlandsområdet är känt för att ha ovanligt låg kapacitet hos bergborrade brunnar och således låg vattenföring i berggrunden. En genomgång av vid SGU:s brunnsarkiv registrerade brunnar kring Järna har gjorts och bekräftar i stort denna bild.

Nederbörd som faller i området infiltrerar till stor del inom höjdområdet och avrinner som markvatten och grundvatten för att mynna i omgivande ytvattensystem.

#### Undersökta platser

Tre platser utvaldes för kompletterande seismiska undersökningar. Alla tre platserna ligger norr om planerat bebyggelseområde i plintens nordvästra del.

Av planeringsskäl för rördragning och borrning vill man ha en något så när jämn markyta. Lämpliga platser saknas därför uppe på de kuperade bergsryggarna, även om berget där kan antas vara mest homogent och sprickfattigt.

Plats 1 längst mot väster har nackdelen att vara ganska begränsad till ytan om inte sprängning eller uppfyllnad tillgripes. Vidare faller terrängen ca 20 m på ca 150 m mot väster, vilket bör ha en dränerande inverkan på bergplinten.

Plats 2 har goda utrymmesmöjligheter för ett borrhålslager och plan markyta. Nackdelen med platsen är att den ligger i en topografiskt markerad svacka i bergplinten, där viss grundvattenströmning i bergsprickor kan förekomma.

Plats 3 längst mot öster har ett slutet topografiskt läge i terrängen. Denna plats ligger på störst avstånd från den plane-rade bebyggelsen.

Den seismiska undersökningen visade homogena berggrundsförhållanden förplatserna 1 och 2 och mer inhomogena förhållanden vid plats 3 med en lägsta berghastighet av 4300 m/s. Jordtäckets tjocklek var mindre än 6 m på samtliga platser.

Av utrymmesmässiga skäl och med stöd av seismiken valdes plats 2 för närmare undersökning genom kärnbörning. Längs det plane-rade borrhålslagrets västra gräns antogs en mindre sprickzon gå, bl a beroende på en brantare bergsida i denna del. Kärnborrhålet placerades därför i borrhålslagrets östra del med 60° lutning mot horisontalplanet. Med denna börning skulle den förmodade sprickzonen genomborras, om den stupade mot öster in i den tilltänkta lagervolymer.

För att få ytterligare uppgifter om dels bergbeskaffenheten i lagerområdet, dels grundvattenytans läge, utfördes även ett kärnborrhål i norra delen av tilltänkt lagerområde och ett i södra delen. Kärnborrhålet i norra delen riktades mot öster med 45° lutning för att erhålla kunskap om någon sprickzon gick fram i östra delen av lagerområdet. Kärnborrhålet i södra delen utfördes vertikalt.

Jorddjupet vid de olika kärnborrhålen var

1/60°	0 m
2	1,6 m
3/45°	3,1 m

Ingen kärnförlust noterades. Berget ansågs vara hårdborrat. Sprickytor var belagda med klorit. Pyrit förekom också som sprickmineral.

I kärnborrhål 1/60 noterades förutom sedimentådergnejs med impregnationer av granit och pegmatit en diabasgång med 1,7 m kärnlängd (98,8 m till 100,5 m) och därefter 0,5 m gråvit gångkvarts till 101 m, (se rapport för kärnborrhål 1/60 sid 6).

Kärnan är måttligt sprickig till riksprickig. Från 0-42 m var det 4,3 sprickor per meter (s/m), mellan 42-86 m 9,0 s/m och mellan 86-100 m 4,3 s/m. Partiet mellan 42-86 m kan betraktas som en sprickzon.



Trots sprickigheten är berget under ytberget (under 10-15 m djup) att betrakta som tätt. Detta beror på att berget uppför sig elastiskt vid vattenintryckning, dvs. vattnet trycks tillbaka, när trycket släpps. Vattenförlustmätningen finns grafiskt redovisad i diagram för kärnborrhål 1/60<sup>o</sup>, sid 7.

I kärnborrhål 2 utgöres bergarten av sedimentådergnejs med impregnationer av granit och pegmatit. Eftersom borrhålet är vertikalt, kan skiffrihetsstupningen anges till ca 65<sup>o</sup> +5<sup>o</sup>; rapport för kärnborrhål 2, sid 8. Medelsprickfrekvensen är 6,3 s/m med något högre sprickfrekvens 7,1 s/m på djupet 0-19 m mot 4,8 s/m på djupet 19-28 m. 49 % av sprickorna utgjordes av medelbranta sprickor och högsta procenttalet 13 % låg på 60<sup>o</sup> stupning.

I kärnborrhål 3/45<sup>o</sup> består bergarten av sedimentådergnejs med impregnationer av granit och pegmatit, vilket framgår av borrhålsrapport, sid 9. Medelsprickfrekvensen var hög 8,2 s/m. Vattenförlustmätningen visade dock mycket tätt berg även i ytberget, vilket framgår av diagram över vattenförlustmätning, sid 10.

Från kärnborrhålet 1/60 har uttagits tre prov för bestämning av värmekapacitivet och värmekonduktivet. Mätningarna har utförts vid Högskolan i Luleå, avd för tillämpad geofysik. Följande värden erhöles:

Djup (m)	Densitet (kg/m <sup>3</sup> )	Värmekapacitivet (kJ/kg K)	Värmekonduktivet (W/m K)
25,8-26,0	2,666	0,817	3,22
48,7-49,1	2,775	0,777	3,00
78,1-78,4	2,729	0,772	4,00

#### Diskussion av hydrogeologin i och kring lagerområdet

Reglerande på grundvattenståndet i jord och berg i nordvästra delen är Logsjön och Kallforsån med kringliggande sankmarker, vilka har en grundvattennivå kring +30. I östra och södra delen skjuter dalar med lägre markyta in i bergområdet och dränerar detta. En viktig fråga att klarlägga är om berggrunden har krosszoner som verkar dränerande på Logsjö-området.

Grundvattenavrinning skulle då kunna ske till det södra området med en grundvattenyta kring +5 vid Moraån. En sådan grundvattengenomströmning i berggrundens sprickor genom planerat lagerområde skulle kunna föra bort värme som skall säsongslagras. För att en sådan genomströmning skall kunna äga rum erfordras att grundvattenytan i eventuella sprickzoner ligger mellan nivåerna +30 och +5.

Om berggrunden är tät, ligger i stället grundvattenytan högt och nära markytan. Grundvattenavrinning sker då huvudsakligen via jordlagren på berget från en lokal vattendelare.

Till ledning för denna bedömning har därför utförts grundvattenståndsobservationer i de tre kärnborrhålen. Observationspunkterna finns inlagda på karta 2.

<u>Kärnborrhål</u>	<u>Markyta</u>	<u>Vattenyta</u>	<u>Djup u.my</u>
1/60°	+45,2	+44,0	1,2
2	+43,7	+42,7	1,0
3/45°	+42,1	+41,7	0,4

Grundvattenståndsobservationer har också utförts i rör nedslagna i jordlagren i samband med den geotekniska utredningen. Nedan redovisas vattenståndsobservationer under perioden 80-02 till 81-11.

<u>Rör</u>	<u>Markyta</u>	<u>Vattenyta</u>	<u>Max djup u. my</u>
202	+40,5	+40,0 +40,6	0,5
209	+38,8	+38,0 +39,5	0,8
16	+37,5	+37,4 +37,8	0,1
249	+40,4	+40,0 +40,4	0,4
257/44	+37,4	+37,4 +38,1	0
226	+37,9	+37,4 +37,8	0,5
35	+36,9	+36,0 +37,2	0,9
49	+36,2	+35,3 +36,3	0,7

Som framgår ligger grundvattenytan högt både i jord och berg.

### Sammanfattning

De utförda undersökningarna vid område 1 visar att berget är av lämplig beskaffenhet för ett borrhållager. Några problem vid borrningen i form av kärnförluster eller ras i borrhålen har man inte haft, även om berget har bedömts som hårdborrat.

Området utgör ett sadelområde i terrängen. Utförda grundvattenståndsobservationer i kärnborrhålen indikerar att området utgör ett vattendelarområde mellan området kring Logsjön och planerat bebyggelseområde. Vattenförlustmätningar och den höga grundvattennivån tyder på liten grundvattenomsättning. Grundvattentillrinningen är liten i vattendelarområdet.

Några näraliggande grundvattentäkter som kan påverka området finns ej. Några befintliga eller planerade berggrum eller tunnlar som kan verka dränerande på området är ej heller kända.

SÖDERTUNAKärnborrhål 1/60° (Gradhål mot SV)Markyta = Bergyta = + 45,2A. KÄRNANS BERGARTSINNEHÅLL M M

0 - 98,80 m Grå och underordnat ljusgrå medelgrov sediment-ådergnejs med riktiga impregnationer av granit och pegmatit. Lokalt förekommer enkelkristaller och klumpar av rosa granat. Skiffrighetsstupning i kärnan medelbrant till brant. Flertalet sprickytor belagda med klorit eller kismineral.

1,50-3,40 m Gråvit grov pegmatit.

88,50-88,70 m Gråvit kvartsrik grov pegmatit.

88,70-93,30 m Vitgrå medelgrov pegmatitisk granit.

98,80-100,50 m Gråaktigt svart tät diabas.

100,50-101,01 m Gråvit gångkvarts.

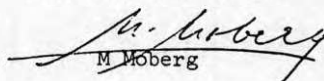
B. PRIMÄRA SPRICKOR I BERGKÄRNAN

0 - 101,01 m Se tabell Bilaga 1 och diagram Bilaga 2.

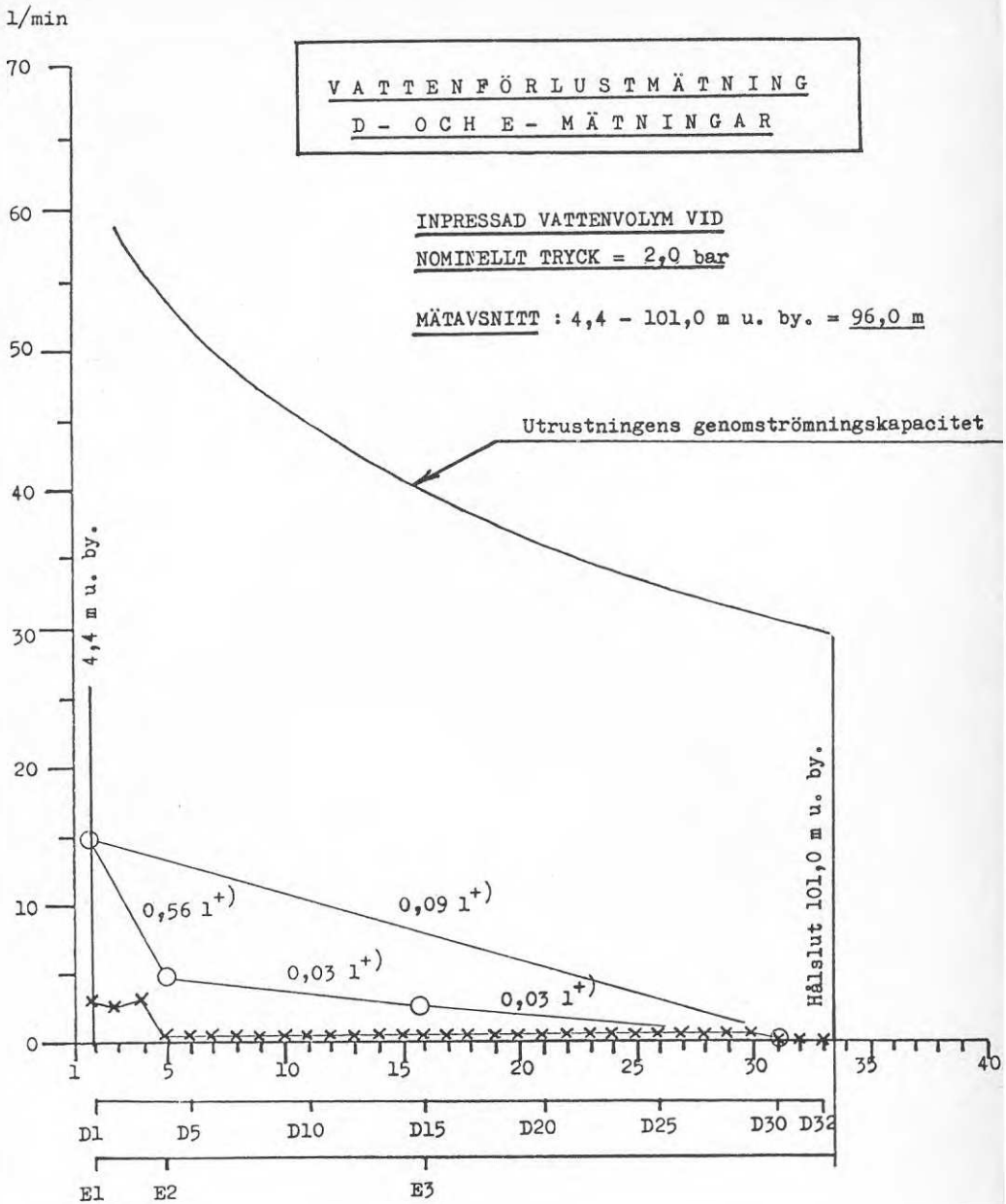
C. DISKONTINUITETER I BERGKÄRNAN

0 - 101,01 m Inga skölar eller kärnförluster.

Vällingby i mars 1982



M Moberg



A = Antal Al- borrhör  $\phi$  33 mm  
 B = Dubbelmanschettmätning (X)  
 C = Enkelmanschettmätning (O)  
 +) = Specifik vattenförlust  
 liter/ min x m x bar

SÖDERTUNA  
Kärnborrhål 1 / 60°

SÖDERTUNAKärnborrhål 2

Markyta = 43,7;      Bergyta: = 42,1;      Jord: 1,6 m

Ä. KÄRNANS BERGARTSINNEHÅLL M M

0 - 28,02 m      Grå och underordnat ljusgrå medelgrov sediment-ådergnejs med impregnationer av granit och pegmatit. Lokalt förekommer enkelkristaller och klumpar av rosa granat. Skiffrihetsstupning ca  $65^{\circ} \pm 5^{\circ}$ . Flertalet sprickytor belagda med klorit eller kismineral.

10,40-11,20 m      Vitgrå granatförande måttligt grov pegmatit.

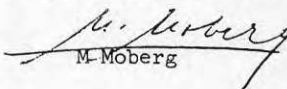
B. PRIMÄRA SPRICKOR I BERGKÄRNAN

0 - 28,02 m      Se tabell Bilaga 1 och diagram Bilaga 2 och Bilaga 3.

C. DISKONTINUITETER I BERGKÄRNAN

0 - 28,02 m      Inga skölar eller kärnförluster.

Vällingby i mars 1982

  
M. Moberg

SÖDERTUNAKärnborrhål 3/45° (Gradhål mot NO)Markyta: + 42,1;      Bergyta: + 39,9;      Jordborrning: 3,1 mA. KÄRNANS BERGARTSINNEHÅLL M M

0 - 27,85 m      Grå och nedåt övervägande ljusgrå medelgrov sedimentådergnejs med rikliga impregnationer av granit och pegmatit, lokalt granatförande. Skiffrihetsstupningen i kärnan är brant ca 70°. Flertalet sprickytor belagda med klorit eller kismineral.

1,00-1,90 m      Gråvit grov pegmatit med rosa granater.

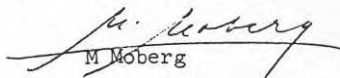
B. PRIMÄRA SPRICKOR I BERGKÄRNAN

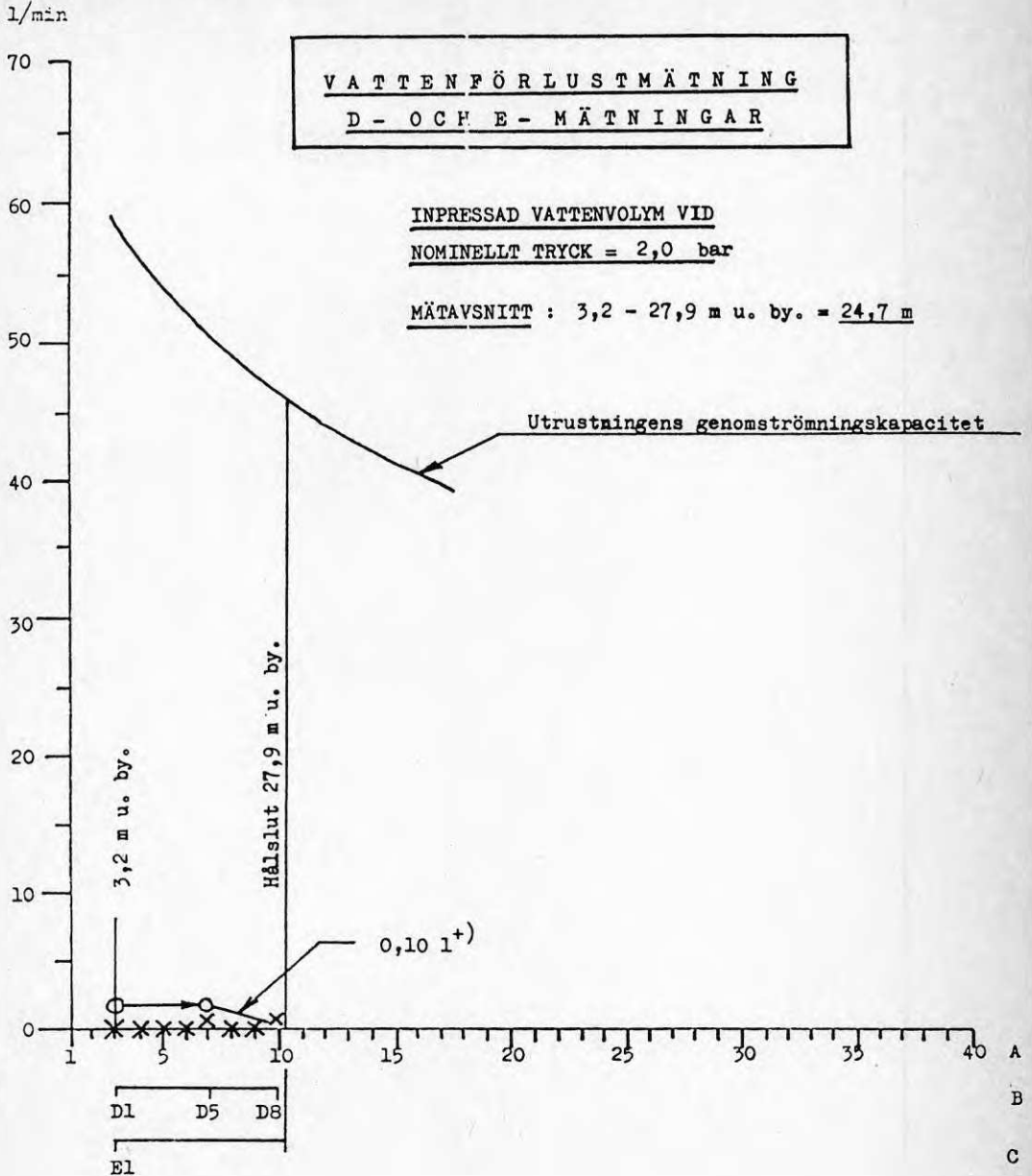
0 - 27,85 m      Se tabell Bilaga 1 och diagram Bilaga 2.

C. DISKONTINUITETER I BERGKÄRNAN

0 - 27,85 m      Inga skölar eller kärnförluster.

Vällingby i mars 1982

  
M Moberg



- A = Antal A1- borrhör  $\phi$  33 mm
- B = Dubbelmanschettmätning (x)
- C = Enkelmanschettmätning (o)
- + ) = Specifik vattenförlust i liter / min. x m x bar

SÖDERTUNA

Kärnborrhål 3 / 45<sup>0</sup>

LOGSJÖN  
+30

11

BROGÅRDET

SJ. SÖDRA STAMBANAN

SÖDERTÄLJE - STOR

ETAPP II

ETAPP I

3

2

VERSTADSVÄGEN

BUSSTA

NYA SÄ

JÄRNA

MORAÅN

KARTA 1



# SÖDERTUNA

## Dispositionsplan

SAK 1982-02-01

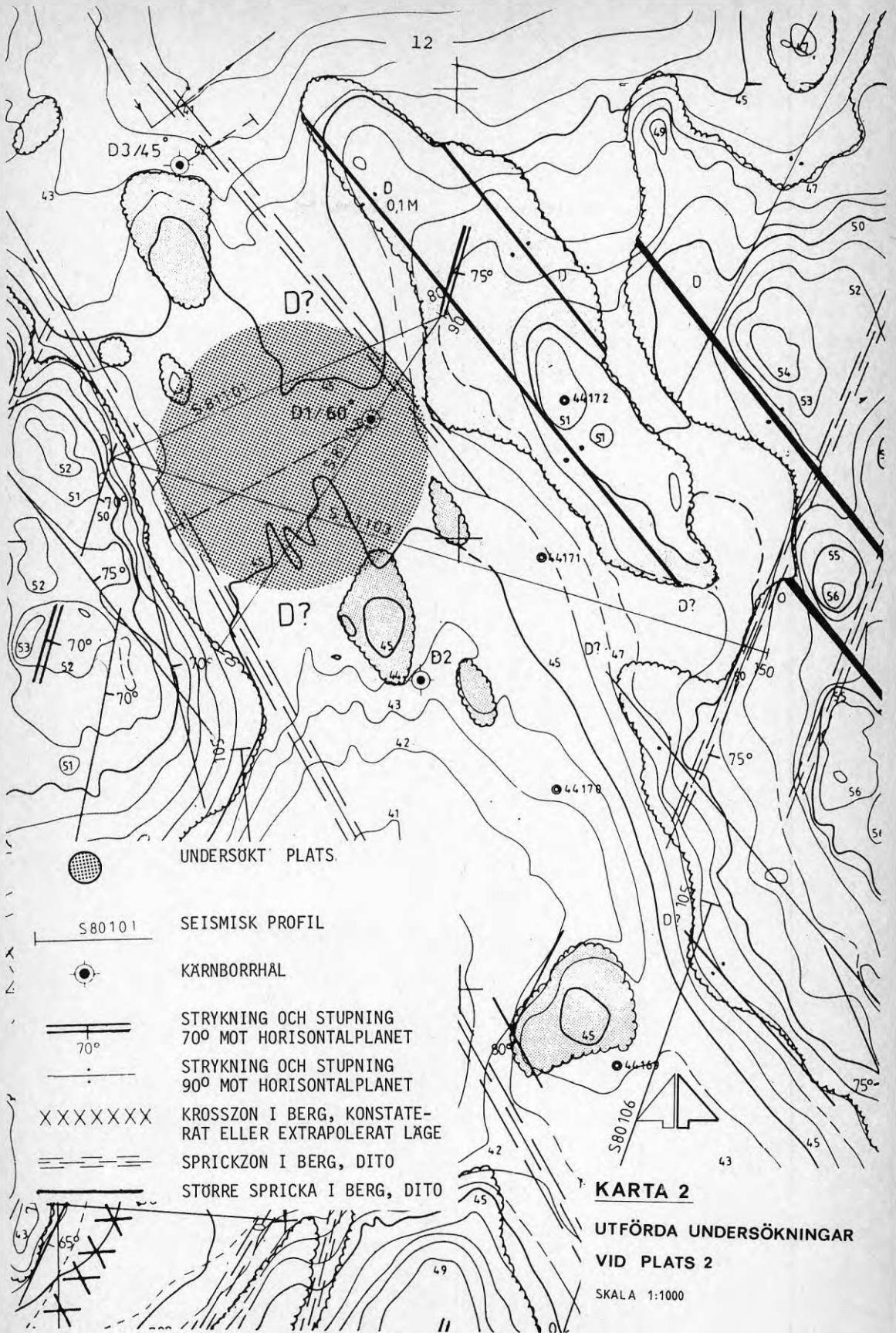


UNDERSÖKTA PLATSER FÖR  
ETT BORRHÅLSLAGER

SKALA  
40:0

100 200 300 400 m





D3/45°

12

D 0,1M

D?

D1/60°

D?

D2

44172

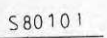
44171

44178

44169



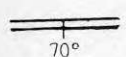
UNDERSÖKT PLATS



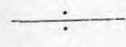
SEISMISK PROFIL



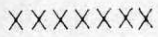
KÄRNBORRHÅL



STRYKNING OCH STUPNING  
70° MOT HORIZONTALPLANET



STRYKNING OCH STUPNING  
90° MOT HORIZONTALPLANET



KROSSZON I BERG, KONSTATE-RAT ELLER EXTRAPOLERAT LÄGE



SPRICKZON I BERG, DITO



STÖRRE SPRICKA I BERG, DITO

**KARTA 2**

UTFÖRDA UNDERSÖKNINGAR  
VID PLATS 2

SKALA 1:1000

Tidigare utförda geologiska utredningar

Södertuna, Hetvattenlager i berg, Översiktlig berggrundsgeologisk karta, skala 1:1000, VBB Arb nr C5824, 81-07-17.

Grundvattenobservationer Södertuna Järna, AB Jacobsson & Wikdmark, Arb nr 1082085.

Rapport över seismiska grundundersökningar för Södertuna Värmelager, Seismiska Mätningar AB 277/1 1980-12-22 och 277/2 1981-11-05.

Södertuna 1982, Grundundersökningar exkl seismik, Statens Vattenfallsverk, BSU mars 1982, M Moberg.

## VÄRMEFÖRLUSTER ORSAKADE AV GRUNDVATTENSTRÖMNING

1. Inledning

Vid värmelagring i berg utnyttjas bergets värmeledningsegenskaper. Bergets porositet understiger vanligen 1-2%, vilket innebär att det vatten som finns i sprickor och porer inte medverkar i någon större utsträckning som värmelagringsmedium. Den vattenströmning som sker i sprickorna kan därmed ge upphov till värmeförluster genom att värme transporteras bort från lagret via det genomströmmande vattnet. Grundvattenströmningens storlek är beroende av bergsprickornas antal och bredd, dvs bergets vattengenomsläpplighet samt grundvattnets hydrauliska gradient  $I$ .

För ett tänkt borrhålslager i Södertuna har vatteninpressningsförsök utförts i två kärnborrhål, 1/60° och 3/45°. Ur dessa försök har bergets vattengenomsläpplighet, dvs bergets hydrauliska konduktivitet,  $K$ , utvärderats. Grundvattenflödet genom lagret har sedan beräknats vid olika hydrauliska gradienter. Den borttransporterade energimängden har då kunnat beräknas med kännedom om lagrets form och temperatur.

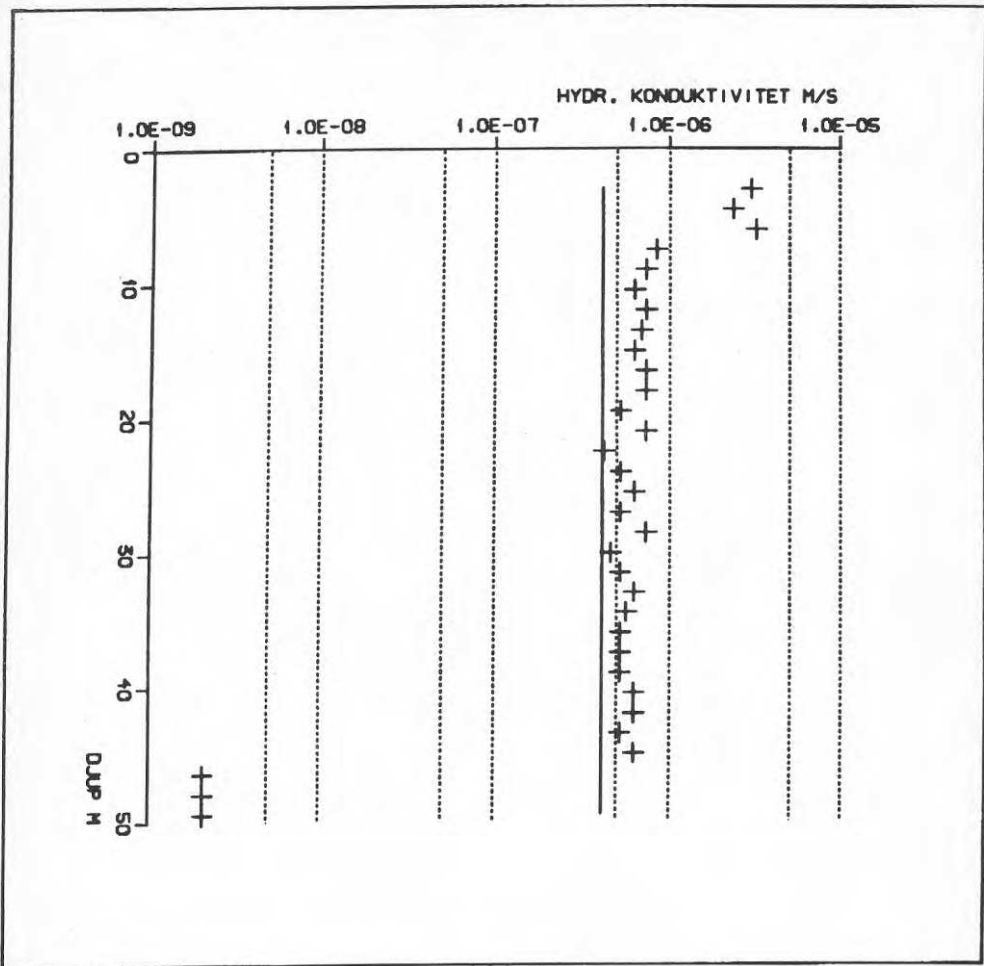
2. Utvärdering av vatteninpressningsförsök

Vatteninpressningsförsök kan göras med enkelmanschettmätning eller dubbelmanschettmätning. Enkelmanschettmätningen ger ett medelvärde på permeabiliteten i hela borrhålet medan dubbelmanschettmätningen ger permeabiliteten på en viss mätsträcka (sektion av borrhålet). Mätresultaten kan för båda metoderna utvärderas enligt följande:

$$k = \frac{q}{2\pi Lh} \cdot \ln \frac{R}{r}$$

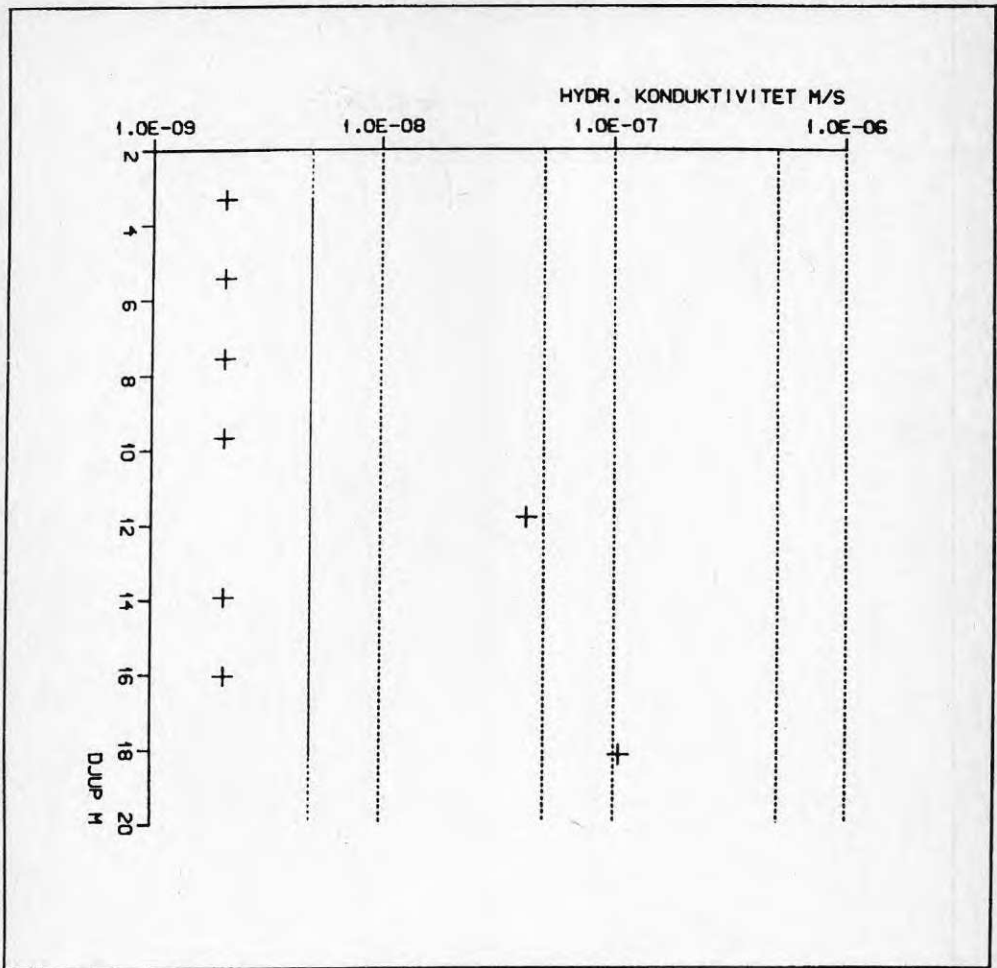
där  $k$  = bergets permeabilitet, m/s  
 $q$  = inpressat vattenflöde, m<sup>3</sup>/s  
 $L$  = avståndet mellan gummimanschetterna, m  
 $h$  = höjden hos den vattenpelare som svarar mot skillnaden mellan vattentrycket i borrhålet och i berget, m  
 $r$  = borrhålets radie  
 $R$  = influensradien, dvs avståndet till den punkt i berget där vattentrycket i berget föga påverkats under vatteninpressningen, m

Vid enkelmanschettmätningar har influensradien  $R$  satts lika med borrhåls längden och vid dubbelmanschettmätningarna har  $R = h$ , dvs avståndet mellan gummimanschetterna, använts. För mätningstrustningen har en nedre gräns på 0.01 l/min satts.



Figur G-1 Hydraulisk konduktivitet, K, vid olika djup i borrhål 1/60° enligt dubbelmanschettmätning

I borrhål 1/60° visar dubbelmanschettmätningarna att den hydrauliska konduktiviteten K är samlad runt  $K = 5 \times 10^{-7}$  m/s med undantag av ytberget ned till ca 15 m djup samt de djupaste partierna där den nedre mätgränsen har uppnåtts. Borrhålet 3/45° synes vara mycket tätt och mätgränsen uppnås under större delen av borrhålet vid dubbelmanschettmätningen. Därför kan antagas att värdet från enkelmanschettmätningen bättre överensstämmer med de verkliga förhållandena.



Figur G-2 Hydraulisk konduktivitet, K, vid olika djup i borrhål 3/45° enligt dubbelmanschettmätning

En sammanställning av beräknade K-värden visas i tabell G-1. Med dessa som grund kan  $K = 2 \times 10^{-7}$  m/s anses representativt för lagerområdet.

Mätmetod	Borrhål 1/60°		Borrhål 3/45°	
	Djup (m)	K (m/s)	Djup (m)	K (m/s)
Dubbelmanschett	0-50	$4.1 \times 10^{-7}$	0-13	$(5.0 \times 10^{-9})$
Enkelmanschett	2-50	$2.1 \times 10^{-7}$	2-13	$1.9 \times 10^{-7}$
	7-50	$0.68 \times 10^{-7}$		
	23-50	$0.64 \times 10^{-7}$		
Medelvärde		$1.7 \times 10^{-7}$		$1.9 \times 10^{-7}$

Tabell G-1 Hydraulisk konduktivitet K utvärderad från vattenförlustmätningar

### 3. Beräkning av värmeförluster

Den hydrogeologiska utredningen har visat att den hydrauliska gradienten  $I$  är relativt liten inom området. Tills kompletterande mätningar är gjorda kan antagas att  $I < 0.05$ .

Om lagrets tvärsnittsarea är  $5500 \text{ m}^2$  ( $74 \times 74 \text{ m}$ ) och den hydrauliska konduktiviteten  $K = 2 \times 10^{-7} \text{ m/s}$  fås följande grundvattenflöde genom lagret, se tabell 2.

Vid beräkningarna har Darcy's lag  $v = K \times I$  använts, där  $v =$  grundvattenflödet  $\text{m}^3/\text{s}$  per tvärsnittsarea  $\text{m}^2$  (Darcy-hastighet).

Eftersom  $v = \frac{Q}{A}$  kan Darcy's lag då skrivas:  $Q = A \times K \times I$

Hydraulisk gradient	0.05	0.01	0.005	0.001
Darcy hastighet ( $\text{m}^3/\text{s}$ )/ $\text{m}^2$	$1 \times 10^{-8}$	$2 \times 10^{-9}$	$1 \times 10^{-9}$	$2 \times 10^{-10}$
Grundvattenflödet genom lagret ( $\text{m}^3/\text{mån}$ )	140	28	14	2.8
Grundvattenflödet genom lagret ( $\text{m}^3/\text{år}$ )	1700	340	170	34

Tabell G-2 Grundvattenflödet per månad resp år genom ett lager med tvärsnittsarean  $5500 \text{ m}^2$  och hydrauliska konduktiviteten  $K = 2 \times 10^{-7} \text{ m/s}$

Den energimängd  $E$  som transporteras bort med grundvattenströmmen  $Q$  kan beräknas enligt

$$E = Q \times t \times \Delta T \times C_w$$

där  $\Delta T =$  lagrets temperatur - grundvattnets temperatur, vattnets värmekapacitet  $C_w = 4.2 \times 10^6 \text{ J/m}^3, ^\circ\text{C}$   
och  $t =$  tiden.

Av resultaten i avsnitt 7.1.3 framgår att lagrets temperatur varierar mellan  $35$  och  $45^\circ\text{C}$ . Grundvattnets temperatur är ca  $10^\circ\text{C}$ .

Temperaturdifferensen  $\Delta T$  blir då  $\Delta T \approx 35 \text{ K}$  under lagringsperioden och  $\Delta T \approx 25 \text{ K}$  under laddningsperioden. Den energi som då bortförs framgår av tabell G-3.

Hydraulisk gradient	0.05	0.01	0.005	0.001
$\Delta T = 35 \text{ K}$ , kWh/mån	57000	1100	570	110
$\Delta T = 25 \text{ K}$ , kWh/mån	4100	820	410	82
Totalt: GWh/år	0.059	0.012	0.006	0.001

Tabell G-3 Bortförd energi från lagret vid olika hydrauliska gradienter

En grundvattenström som passerar värmelagret transporterar värme i grundvattenströmmens riktning. Om sprickorna ligger tillräckligt tätt kommer mellanliggande bergblock att följa med i sprickvattnets temperaturförändringar. En temperaturfront i berget kommer därvid att fortplanta sig i grundvattenströmmens riktning ungefär dubbelt så fort som grundvattenströmmens tvärsnittshastighet (Darcy-hastighet). Detta innebär en förskjutning av värmekroppen. Vid den aktuella hydrauliska konduktiviteten blir denna rörelse liten och får en ringa betydelse för lagrets funktion.

Hydraulisk gradient	0.05	0.01	0.005	0.001
Termisk hastighet (m/s)	$2 \times 10^{-8}$	$4 \times 10^{-9}$	$2 \times 10^{-9}$	$4 \times 10^{-10}$
Termisk hastighet (m/år)	0.63	0.13	0.06	0.01

Tabell G-4 Värmekroppens förflyttning i sidled orsakad av konvektiv värmetransport vid  $K = 2 \times 10^{-7}$  m/s

#### 4. Slutsatser

De genomförda undersökningarna visar att den föreslagna platsen för värmelagret sannolikt uppfyller de förväntade kraven. Den hydrauliska konduktiviteten  $K$  är relativt låg och den hydrauliska gradienten är liten.

De värmeförluster som orsakas av grundvattenströmning är små, ca 0.06-0.006 GWh, vilket vid en lagerkapacitet av 4 GWh motsvarar ca 1% av lagrets kapacitet. Grundvattenströmmens låga hastighet innebär en förflyttning av värmekroppen på ca 0.5 m.









**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag  
810880-8 från Statens råd för byggnadsforskning  
till AIB — Allmänna Ingenjörbyrån AB, Stockholm.**

**R46: 1983**

**ISBN 91-540-3926-6**

**Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm**

**Art.nr: 6700746**

**Abonnemangsgrupp:  
W. Installationer**

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

**Cirkapris: 30 kr exkl moms**