



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**

**R23:1987**

# **Energilagring i lera**

**Värmeströmning,  
värmväxlarutformning och påverkan  
av lerans geotekniska egenskaper**

**Kent Adolfsson  
Göran Sällfors**

INSTITUTET FÖR  
BYGGDOKUMENTATION

Accnr

Plac *Ser*

*K/A*

**Byggeforskningsrådet**

R23:1987

ENERGILAGRING I LERA

Värmeströmning, värmväxlarutformning och påverkan av lerans geotekniska egenskaper

Kent Adolfsson  
Göran Sällfors

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 810113-2 från Statens råd för byggnadsforskning till Chalmers tekniska högskola, Institutionen för geoteknik med grundläggning, Göteborg.

## REFERAT

Inom detta projekt har problematiken kring värmelagring i lera studerats. Lera, som värmelagrande medium, har fördelen att värmekapacitiveteten är relativt hög, värmeförlusterna (åtminstone vid stora lager) blir med tiden små och installationen av värmeväxlarna är relativt enkel. Problemet är att lerans geotekniska egenskaper försämras då temperaturen ökar.

Syftet med detta projekt har främst varit att utreda hur lerans egenskaper förändras och hur stora sättningar som på sikt erhålls. Avsikten har också varit att genomföra så noggranna mätningar att teoretiska modeller för beräkning av värmeströmning i och omkring ett lager skall kunna testas och kalibreras för att förbättra noggrannheten i framtida dimensioneringar av dylika anläggningar.

Inom projektet har två värmelager byggts och testats i full skala. Ett stort antal mätningar av temperaturer, porttryck och deformationer har gjorts i och omkring de bägge lagren. Försöken har pågått i drygt tre år. Parallellt har omfattande försök gjorts i laboratoriet. En ny typ av värmeväxlare, sk värmedrän, har även testats i ett pilotprojekt i fält.

De uppmätta temperaturförändringarna har visat att temperaturutvecklingen låter sig väl beräknas med hjälp av de kända samband som styr värmeströmning i fasta kroppar.

Lerans geotekniska egenskaper påverkas av uppvärmningen. Av största betydelse är den sänkning av lerans förkonsolideringstryck som temperaturökningen orsakar. Detta medför att värmelagring i en normalkonsoliderad lera med tiden leder till påtagliga sättningar.

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

R23:1987

ISBN 91-540-4693-9

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Svenskt Tryck Stockholm 1987

## INNEHÅLLSFÖRTECKNING

### FÖRORD

### SUMMARY

### SAMMANFATTNING

1.	BAKGRUND	1.1
2.	SYFTE OCH PROBLEMORIENTERING	2.1
2.1	Värmelagringens inverkan på lerans geotekniska egenskaper	2.1
2.2	Värmeströmning i jord	2.4
2.3	Värmeväxlarnas utformning	2.5
2.4	Fält- och laboratorieförsök	2.5
3.	LITTERATURSTUDIUM	3.1
3.1	Temperaturens inverkan på lerans geotekniska egenskaper	3.1
3.2	Lerors termiska egenskaper	3.7
3.3	Fullskaleförsök	3.7
4.	OMRÅDE FÖR FÄLTFÖRSÖK	4.1
5.	FÄLTFÖRSÖK- INSTALLATIONER	5.1
5.1	Värmeväxlare	5.1
5.2	Utrustning för temperaturmätning	5.6
5.3	Värme- och mätcentral	5.13
5.4	Utrustning för geotekniska mätningar	5.15
6.	FÖRSÖKSRESULTAT MED KOMMENTARER	6.1
6.1	Försöksprogram	6.1
6.2	Temperaturändringar	6.4
6.3	Resultat från mätning av portryck och sättningar	6.10
6.4	Laboratorieundersökningar	6.21
7.	TEMPERATURENS INVERKAN PÅ JORDMATERIALETS HYDRAULISKA KONDUKTIVITET	7.1
7.1	Temperaturens inverkan på porvattnets viskositet	7.2
7.2	Jordrörelsernas inverkan på jordens permeabilitet	7.3
7.3	Porvattnets termiska utvidgning	7.3

8.	ANALYS AV DE GEOTEKNISKA EGENSKAPERNA	8.1
8.1	Karakteristika för en portrycksprofil i Väst-Sverige	8.2
8.2	Portryck och deformationer under första uppvärmning/avkylning	8.4
8.3	Portryck och deformationer under andra uppvärmning/avkylningen	8.6
8.4	Förändring av vattenkvoter och skjuvhållfastheter	8.8
8.5	Förändringar av förkonsolideringstrycket	8.13
8.6	Koppling mellan förkonsolideringstyp och sättningar för fältförsöken	8.16
8.7	Effekt av upprepade uppvärmningar/ur-laddningar	8.19
9.	PILOTFÖRSÖK MED VÄRMEDRÄN	9.1
9.1	Värmedrän och instrumentering	9.3
9.2	Temperaturutveckling under uppvärmningsfasen	9.3
9.3	Porvattenövertryck under uppvärmningsfasen	9.4
10.	ANALYS AV VÄRMESTRÖMNING I FÖRSÖKS-FÄLTEN	10.1
10.1	Värmeströmning kring cylindrisk värmeväxlare	10.1
10.2	Temperaturfördelning kring cylindrisk värmeväxlare	10.6
10.3	Temperaturfördelning i och omkring värmelagret	10.9
11	EKONOMI	11.1
11.1	Lagrens kapacitet och värmeförluster	11.1
11.2	Potentiell lagringskapacitet	11.1
11.3	Lagrets totalekonomi	11.5
12	SLUTSATSER	12.1
	REFERENSER	R.1
	APPENDIX	A.1

## FÖRORD

Föreliggande rapport utgör slutredovisning av de fältförsök som genomförts inom projektet "Värmelagring i lera. Geoteknisk påverkan och värmeväxling". Anslag har erhållits från Byggforskningsrådet (BFR-projekt 810113-2).

Projektet har bedrivits vid institutionen för geoteknik, Chalmers Tekniska Högskola under perioden 1981-85, och har inneburit mycket arbete såväl ute i fält som i laboratoriet. En mer detaljerad redovisning av laboratoriearbetet och därav dragna slutsatser kommer att senare redovisas separat under titeln "Temperaturens påverkan på leras deformationsegenskaper - en laboratoriestudie" av Marianne Tidfors. Denna rapport planeras komma ut under första halvåret 1987.

Ett stort tack riktas till institutionens personal som samvetsgrant deltagit i projektet.

Delar av det experimentella arbetet har utförts, under vår ledning, som examensarbeten av Tor Ask, Annika Ekstrand, Karin Eriksson, Helena Hallagård, Karl-Gunnar Lundström och Carina Nilsson. Deras bidrag är mycket uppskattat.

Ett stort tack riktas också till Kungälv's kommun som välvilligt ställt markområdet för fältförsöken till vårt förfogande.

Göteborg i augusti 1986

Kent Adolfsson

Göran Sällfors

## SUMMARY

The increasing price of energy has led to a greater interest in heat storage plants for energy. A number of different heat storage concepts have been reviewed, each with its own benefits and drawbacks. This project is a study of the problems connected with heat storage in clay. Storing heat in clay is favorable due to the high heat capacitivity and low heat conductivity of the clay. The latter implies, that at least for large storage plants, the energy losses over the boundaries will be limited. Furthermore the installation of the heat exchange is uncomplicated. The drawback is that the geotechnical properties seem to be affected as the temperature increases. The purpose of the project has been to investigate how the geotechnical properties are changed due to an increase in temperature and to determine the magnitude of the resulting settlements. The intention has also been to carry out so accurate measurements of temperatures that a comparison with theoretical models for calculation of heat flow shall be possible.

Within the project, two heat storage plants have been constructed and tested on a field scale. Temperatures, pore pressures, and settlements have been measured within the test area during more than three years. Furthermore a great number of tests have been carried out in the laboratory. A new type of heat-exchanger, the so called heat drain, has been tested in a pilot project in the field.

Analysis of the measured temperatures has proven that the changes in temperatures can be calculated using known equations for heatflow in a continuum, see fig. S.1.

The geotechnical properties of the clay are affected by the increase in temperature. Most important is the lowering of the preconsolidation pressure caused by



the increase in temperature, is indicating that heat storage in clay with time will cause substantial settlements.

In the field pore pressures are generated due to the increase in temperature, see fig. S.2. Settlements occur as the pore pressures dissipate. It seems, however, as substantial creep deformations develop, also after the dissipation of the pore pressures.

Laboratory tests describe, at least qualitatively, what settlements are to be expected in the field. Also, the pore pressures generated by the increase in temperature can be calculated with a certain degrees of accuracy.

Fig. S.1 Typical deistribution of temperature between two heat exchangers.

Fig. S.2 Pore pressures generated due to an increase of temperature.

## SAMMANFATTNING

Med stigande oljepriser har intresset för lagring av energi ökat. Ett antal olika lagersystem har aktualiserats, var och en med för- och nackdelar. Inom detta projekt har problematiken kring värmelagring i lera studerats. Lera, som värmelagrande medium, har fördelen att värmekapacitiviteten är relativt hög, värmeförlusterna (åtminstone vid stora lager) blir med tiden små och installationen av värmeväxlarna är relativt enkel. Problemet är att lerans geotekniska egenskaper försämras då temperaturen ökar. Syftet med detta projekt har främst varit att utreda hur lerans egenskaper förändras och hur stora sättningar som på sikt erhålls. Avsikten har också varit att genomföra så noggranna mätningar att teoretiska modeller för beräkning av värmeströmning i och omkring ett lager skall kunna testas och kalibreras för att förbättra noggrannheten i framtida dimensioneringar av dylika anläggningar.

Inom projektet har två värmelager byggts och testats i full skala. Ett stort antal mätningar av temperaturer, portryck och deformationer har gjorts i och omkring de bägge lagren. Försöken har pågått i drygt tre år. Parallellt har omfattande försök gjorts i laboratoriet. En ny typ av värmeväxlare, s k värmedrän, har även testats i ett pilotprojekt i fält.

De uppmätta temperaturförändringarna har visat att temperaturutvecklingen låter sig väl beräknas med hjälp av de kända samband som styr värmeströmning i fasta kroppar, se fig. S-1.

Lerans geotekniska egenskaper påverkas av uppvärmningen. Av störst betydelse är den sänkning av lerans förkonsolideringstryck som temperaturökningen orsakar. Detta medför att värmelagring i en normalkonsoliderad lera med tiden leder till påtagliga sättningar.

I fält genereras, till följd av de långa dräneringsvägarna, portryck, se fig. S-2. Sättningarna utbildas i takt med att portrycken utjämnas. Det synes emellertid som om i många fall påtagliga krypdeformationer utbildas, även efter det att portrycken utjämnas.

Försök på lera i laboratoriet beskriver, åtminstone kvalitativt, vilka sättningar som kan förväntas ske på lång sikt i fält. Även de av en uppvärmning genererade portrycken kan någorlunda väl beräknas.

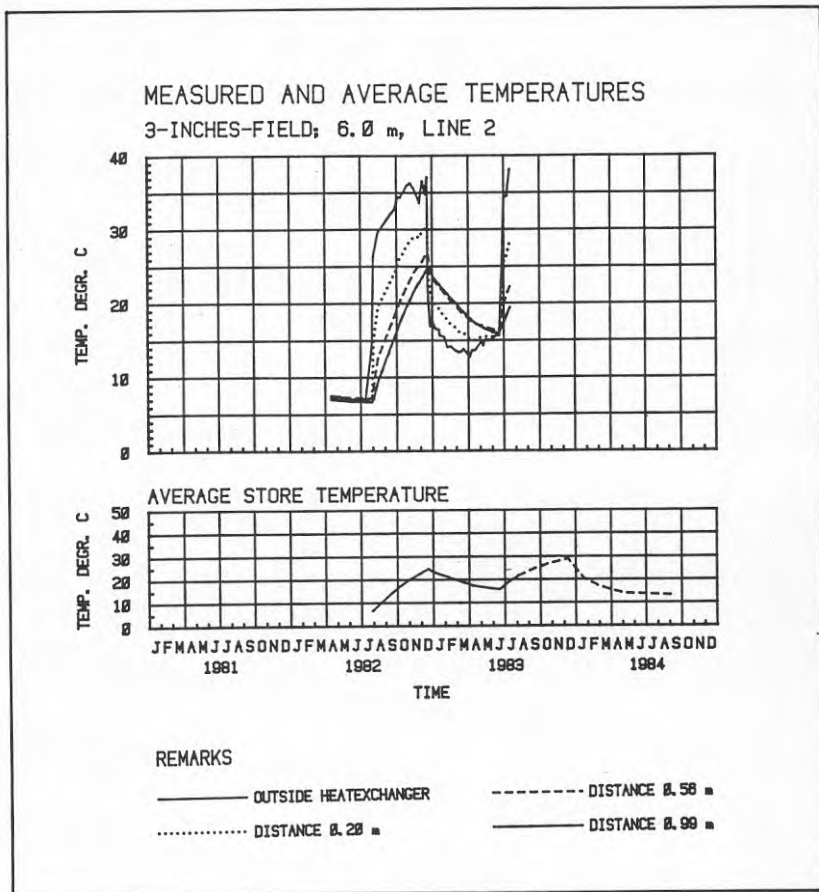


Fig. S-1 Exempel på temperaturfördelning mellan två värmeväxlare.

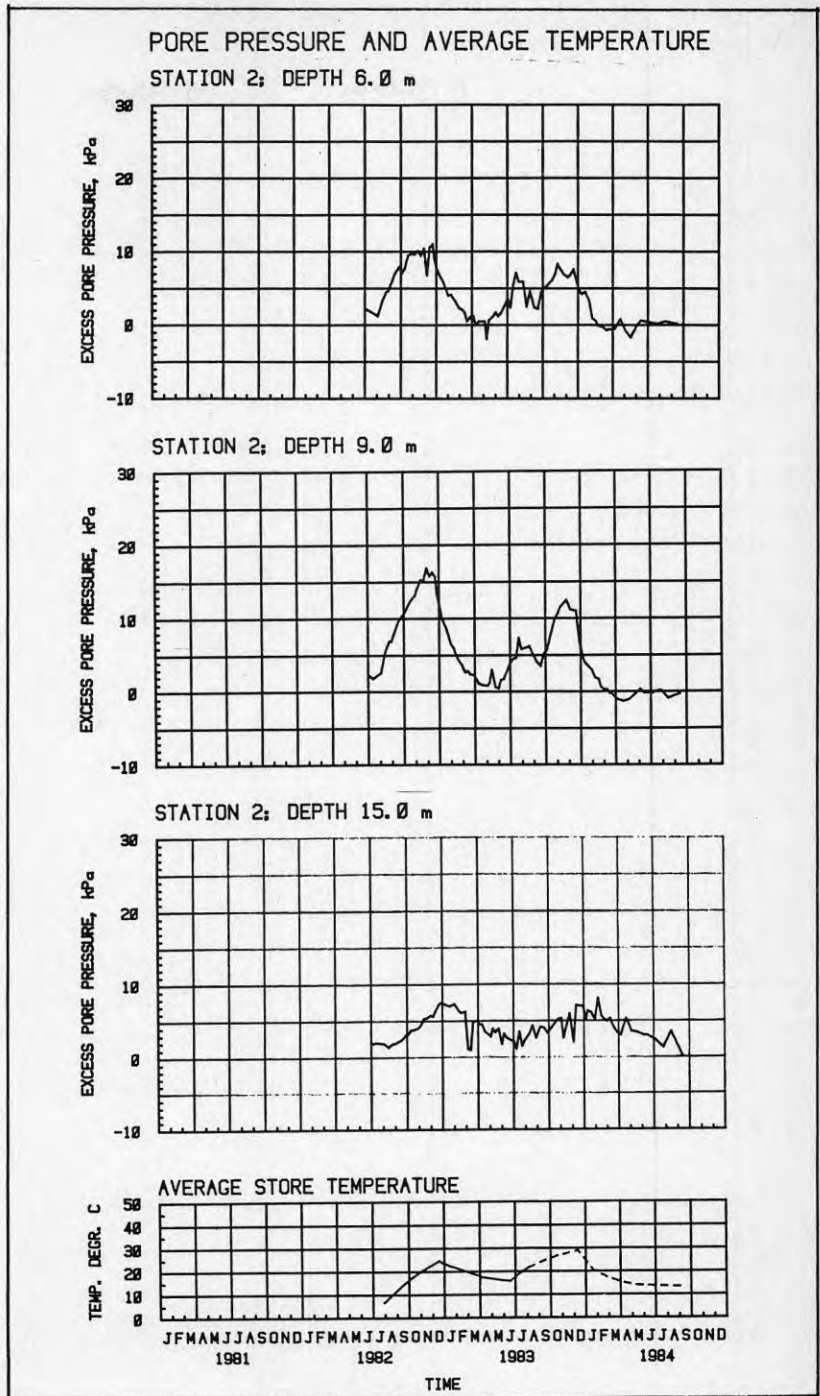


Fig. S-2 Exempel på av uppvärmning genererade porvattenövertryck vid en värmeväxlare.



## 1. BAKGRUND

Kostnaden för uppvärmning av bostäder och andra lokaler ökade drastiskt under 70-talet i och med oljepris-höjningen. Intresset för alternativa energikällor ökade därmed kraftigt. En del av dessa nya produktionsalternativ, exempelvis solenergi och tillvarata-gande av industrins överskottsvärme, kräver dock möj-lighet till lagring av den termiska energin för att överbrygga tiden mellan produktions- och konsumtions-fasen.

Vid lagring av termisk energi sker detta antingen som korttidslagring (dygns- eller veckolagring) eller som långtidslagring (säsongslagring). De lager som be-handlas i denna rapport är avsedda för säsongslagring, vilket innebär en eller ett fåtal omsättningar per år. Eftersom lagren arbetar inom ett begränsat tempera-turområde kan de inte bli särskilt energitäta, vilke medför att såväl anläggnings- som driftskostnaderna för lagringsanläggningarna måste vara mycket låga för att systemet med lagring skall bli ekonomiskt kon-kurrenskraftigt. Ett av de lagringsalternativ som övervägs är att använda lersediment som värmelagrande medium. Ett flertal olika system av värmeväxlare har diskuterats.

För att kunna avgöra om lersediment är ett såväl tekniskt som ekonomiskt lämpligt medium för värmelag-ring krävs mer kunskap om lerans termiska egenskaper, effekter på leran till följd av temperaturändringar, eventuell påverkan på miljön runt omkring (bebyggelse m m). Dessutom krävs, innan konceptet blir kommer-siellt realiserbart, ett visst tekniskt/ekonomiskt utvecklingsarbete.

## 2. SYFTE OCH PROBLEMIORIENTERING

Avsikten med detta forskningsprojekt har varit att utreda och/eller belysa tre väsentliga frågeställningar kring problematiken vid värmelagring i lera, nämligen:

1. Värmelagringens och åtföljande temperaturförändringars inverkan på lerans geotekniska egenskaper.
2. Värmeeströmning i jord och samverkan jord/värmeväxlare.
3. Värmeväxlarnas utformning och dess betydelse för värmelagrets funktion.

I syfte att få underlag för en noggrann analys har mycket omfattande laboratorie- och fältförsök genomförts.

Nedan diskuteras de ovan nämnda frågeställningarna översiktligt. Dessutom nämns något om hur lab- och fältförsöken genomförts i syfte att ge det önskvärda underlaget.

### 2.1 VÄRMELAGRINGENS INVERKAN PÅ LERANS GEOTEKNISKA EGENSKAPER

Det är sedan länge känt att en förändring av temperaturen hos en lera påverkar dess konsoliderings- och hållfasthetsegenskaper. En av orsakerna till detta är att vid en uppvärmning av leran expanderar såväl porvatten som i jorden ingående mineral. Eftersom vattnets temperaturutvidningskoefficient är väsentligt högre än mineralens, ger uppvärmningen upphov till



ett porvattenövertryck och till en ändring av de inre spänningarna i lerskelettet. Detta resulterar i en viss svällning av jordmaterialet. Förändringen av portrycket ger även upphov till en hydraulisk gradient och därmed till porvattenströmning mot kallare zoner.

Vid värmeuttag från lagret uppkommer det motsatta förhållandet. Såväl porvatten som mineral minskar i volym, vilket resulterar i en sättning. Men eftersom porvattnets värmeutvidgningskoefficient är större än mineralens uppstår ett porvattenundertryck, som i sin tur är liktydigt med ökade effektivspänningar, vilket resulterar i en ytterligare volymminskning. Porvattnet börjar ävenledes strömma tillbaka in i den tidigare uppvärmda leran.

#### 2.1.1      Temperaturen inverkan på porvattnets viskositet.

När vatten uppvärms minskar dess viskositet vilket medför att den hydrauliska konduktiviteten ökar. Om en markyta är belastad och det pågår en konsolidering av jordlagren, kommer alltså porvattnet att strömma ut ur leran med högre hastighet och de pågående sättningarna utbildas snabbare.

Även den vattenströmning som sker till följd av den portrycksändring som orsakats av uppvärmning respektive avkylning, sker således snabbare ju högre temperaturen är.

### 2.1.2      Temperaturen inverkan på förkonsolideringstrycket.

Alla leror är konsoliderade för ett visst tryck som kallas förkonsolideringstrycket. På många håll i Väst-sverige är förhållandena sådana att i lerlagrets övre del förkonsolideringstrycket vanligen är högre än det rådande effektivtrycket medan det något längre ner ofta är lika med detta tryck, leran säges då vara normalkonsoliderad. Effektivtrycksförändringar under förkonsolideringstrycket leder i allmänhet till mycket små deformationer medan förändringar över detta tryck oftast medför stora sättningar. Om av någon anledning förkonsolideringstrycket skulle sänkas så att det blir mindre än rådande effektivtryck, skulle detta med tiden resultera i stora sättningar utan att någon yttre last påförts markytan. Det har visats av bl a Habibagahi (1973) att en leras förkonsolideringstryck sänks vid uppvärmning. Det har därför uppfattats som viktigt att försöka kvantifiera denna sänkning och därav beroende sättningar.

### 2.1.3      Temperaturen inverkan på skjuvhållfastheten.

Laboratorieresultat visar att uppvärmning av lera kan resultera i en minskning av skjuvhållfastheten. Vid värmelagring värmer man upp och kyler ner leran vilket, om det ej sker alltför fort, medför en konsolidering av jorden. Hur skjuvhållfastheten på sikt påverkas av upprepad uppvärmning och avkylning är ej helt klarlagt. Frågan om skjuvhållfasthetens beroende av temperaturbelastning kommer dock ej att behandlas i detalj i denna rapport.

## 2.2 VÄRMESTRÖMNING I JORD

En teknisk-ekonomisk dimensionering av ett värmelager ställer höga krav på kunskaper om de ingående komponenternas termiska egenskaper. Dessutom måste man kunna beräkna de komplicerade temperaturförändringarna i det tilltänkta lagret. Temperaturen måste kunna beräknas för hela lagret samt hur denna varierar med tiden.

Vid institutionen för matematisk fysik vid Lunds universitet har ett omfattande utvecklingsarbete utförts rörande simuleringsmodeller och andra analysmetoder för markvärmelager. Två modeller finns: Duct Storage Model och Superposition Model. Dessa modeller kan användas för att analysera de här genomförda fältförsöken.

### 2.2.1 Samverkan mellan värmeväxlare

En viktig parameter i ett markvärmesystem av kanaltyp är avståndet mellan rören. Antalet rör i en viss markvolym påverkar direkt anläggningskostnaden. För att kunna välja rätt delningsavstånd måste man studera termisk växelverkan mellan värmeväxlarna. Ett speciellt problem är att på ett korrekt sätt simulera den värmeströmning som sker mellan i lagret centralt belägna värmeväxlare och de som finns vid värmelagrets ränder.

### 2.2.2 Värmeförluster från värmelager i lera.

En viktig faktor för ett värmelagers ekonomi är den förlust som sker genom värmeströmning ut från lagret, speciellt gäller detta små lager. Värmeförluster sker, dels genom strömning ut till omgivande jord utanför värmelagret, dels vertikalt vid markytan. Efter några

års drift av ett värmelager blir den förstnämnda typen av förluster försumbara, under förutsättning att värmelagret ej är genomsatt av något skikt av material med högre permeabilitet så att uppvärmt vatten strömmar ut ur lagret. Värmeförlusterna uppåt kan minskas genom isolering i anslutning till markytan.

### 2.3 VÄRMEVÄXLARNAS UTFORMNING

Ett värmelagers termiska prestanda är kraftigt beroende av värmeväxlarnas utformning och egenskaper. Trögheten i ett system är kraftigt beroende av värmeövergångstal mellan värmeväxlare och omgivande jord, kontaktarean värmeväxlare och jord och naturligtvis jordens värmeledande förmåga. Samtliga ovannämnda egenskaper påverkar den sk drivtemperaturen, vilken är skillnaden i temperatur mellan det värmebärande mediet i slangsystemet och medeltemperaturen i lagret. Drivtemperaturen är en viktig parameter vid bedömning av ett värmelagers effektivitet.

### 2.4 FÄLT- OCH LABORATORIEFÖRSÖK

Fältförsök har genomförts i full skala i två värmelager med två olika typer av värmeväxlare; en tredje typ har testats i ett pilotförsök. Under fältförsöken har temperaturen registrerats i ett stort antal punkter. Portryck och sättningar har även följts upp i ett stort antal punkter. Vid några olika tillfällen har provtagning av lera gjorts, följt av omfattande försök i laboratoriet. I ett parallellt projekt har temperaturens inverkan på lerans deformationsegenskaper studerats i laboratoriet. Sammantaget finns en mycket omfattande databank av mätserier och dessa utgör ett utmärkt underlag för att analysera de i detta kapitel diskuterade frågeställningarna.

### 3. LITTERATURSTUDIUM

Ett litteraturstudium omfattande alla de typer av frågeställningar som behandlas i detta projekt skulle bli mycket omfångsrikt. En begränsning ansågs därför nödvändig och i linje med den ursprungliga projektbeskrivningen har området "temperaturbelastningens inverkan på lerors geotekniska egenskaper" ägnats störst uppmärksamhet.

Värmetransport i lera och därmed sammanhängande parametrar som konduktivitet och kapacitivet, visar sig relativt väl kunna beskrivas med tidigare kända modeller.

Omfattande, väldokumenterade fältförsök med värmelagring i lös lera saknas dock nästan helt i litteraturen.

#### 3.1 TEMPERATURBELASTNINGENS INVERKAN PÅ LERANS GEOTEKNISKA EGENSKAPER

I litteraturen förekommer endast ett begränsat antal artiklar som behandlar en temperaturbelastnings inverkan på jordars hållfasthets- och deformationsegenskaper. Av dessa rör endast ett fåtal lösa leror med egenskaper liknande dem som undersökts i detta forskningsprojekt.

I ett parallellt forskningsprojekt, genomfört som ett laborierstudium om temperaturens inverkan på lerors deformationsegenskaper, redovisas ett noggrant litteraturstudium. Detta kapitel utgör en sammanfattning av nämnda litteraturstudium. För ett mer detaljerat studium hänvisas till Tidfors (1986).

Att den hydrauliska konduktiviteten är beroende av temperaturen är sedan länge känt. Därmed är även konsolideringskoefficienten  $c_v$  direkt beroende av temperaturen eftersom:

$$c_v = k \cdot \frac{M}{g \cdot \rho_w}$$

där  $k$  = hydraulisk konduktivitet

$M$  = kompressionsmodul

$\rho_w$  = vattnets densitet

Detta visades experimentellt av Finn (1951). I Sverige korrigeras konsolideringskoefficienten med hänsyn till viskositeten eftersom försöken ofta utförs vid en högre temperatur än den som råder i jorden. Ett flertal författare, bl a Youssef (1961) har visat hur andra viskositetsberoende parametrar som flytgränsen ( $w_L$ ) och plasticitetsgränsen ( $w_p$ ) ävenledes beror av temperaturen.

Robert Paaswell (1967) har ganska ingående behandlat temperaturens effekt på en leras konsolideringsegenskaper. Paaswell påpekar att utöver förändringen i viskositet medför en temperaturhöjning en förändring av det adsorberade vattnets egenskaper. Det fast bundna vattnet runt lermineraler är en viktig länk i materialets hållfasthetsegenskaper. Denna komplicerade process har Pusch (1973) ägnat stor uppmärksamhet.

Sambandet mellan temperaturhöjning, volymökning och portrycksförändring studerades, såväl teoretiskt som experimentellt av Campanella och Mitchell (1968). Inverkan på konsolideringen av en stegvis temperaturförändring visas i fig 3.1. De översta två figurerna visar hur deformationen förändras med tiden då

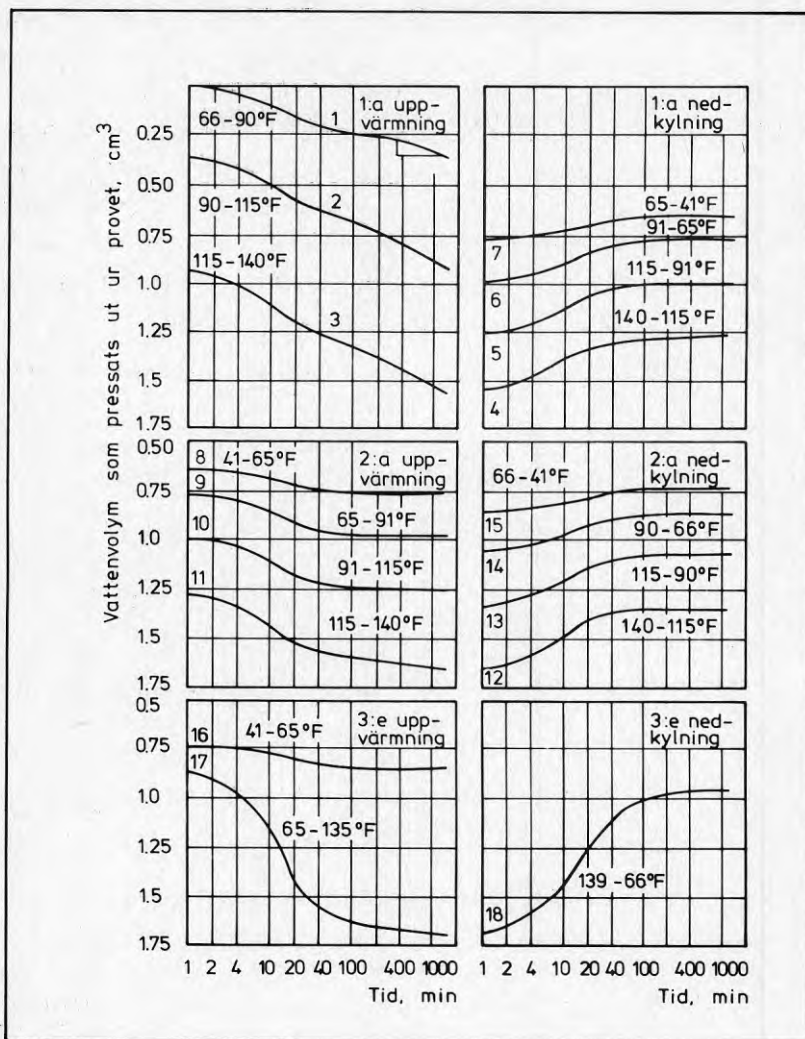


Fig. 3.1. Resultat från ödometerförsök, där provet under konstant vertikalspänning utsätts för en temperaturbelastning i tre cykler (Campanella och Mitchell, 1968).

Fig. 3.1 Results from oedometer tests, during which the vertical load was kept constant, while the temperature of the sample was varied (Campanella and Mitchell, 1968).

temperaturen ökas stegvis. En uppvärmning åtföljd av en temperatursänkning medför en viss permanent deformation. Det är även värt att notera att krypningen är påtaglig då temperaturen höjts, medan den är näst intill obefintlig då temperaturen sänkts, se fig. 3.1. Det framgår även att den temperaturinducerade sättningen är störst för den första temperaturcykeln. Effekten av ytterligare temperaturbelastning minskar successivt.

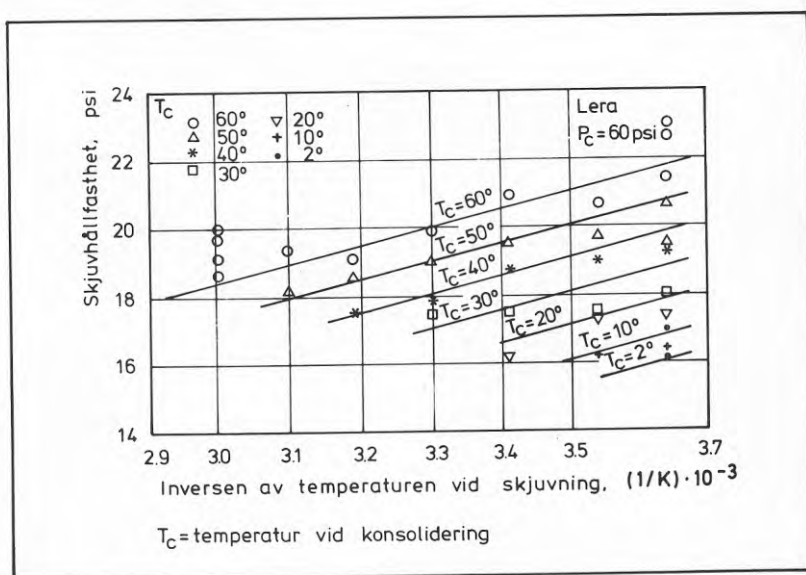


Fig. 3.2. Skjuvhållfasthetens beroende av temperatur vid konsolidering och skjuvning (Noble och Demirel, 1969).

Fig. 3.2 Results from shear tests where the temperature during consolidation and shear was varied (Nobel and Demirel, 1969).

Konsolideringsegenskaper och skjuvhållfasthet är koppade till varandra och ett antal författare har visat att skjuvhållfastheten för lera minskar med ökande temperatur, Sheriff och Borrous (1969), Noble och Demirel (1969).



Att en tillfällig temperaturhöjning, som leder till en konsolidering också resulterar i en höjning av skjuvhållfastheten efter återgång till ursprungstemperaturen framgår av fig. 3.2. Upprepad uppvärmning och avkylning leder på sikt till en förstärkning av jorden, vilket omnämns i tidig geoteknisk litteratur och benämns termisk behandling (thermal treatment).

Habibagahi (1973) visade med sina försök att en temperaturökning resulterade i en minskning av förkonsolideringstrycket, framförallt om materialet var organiskt eller vattenkvoten var hög (ungefär 70-75 %), se fig. 3.3.

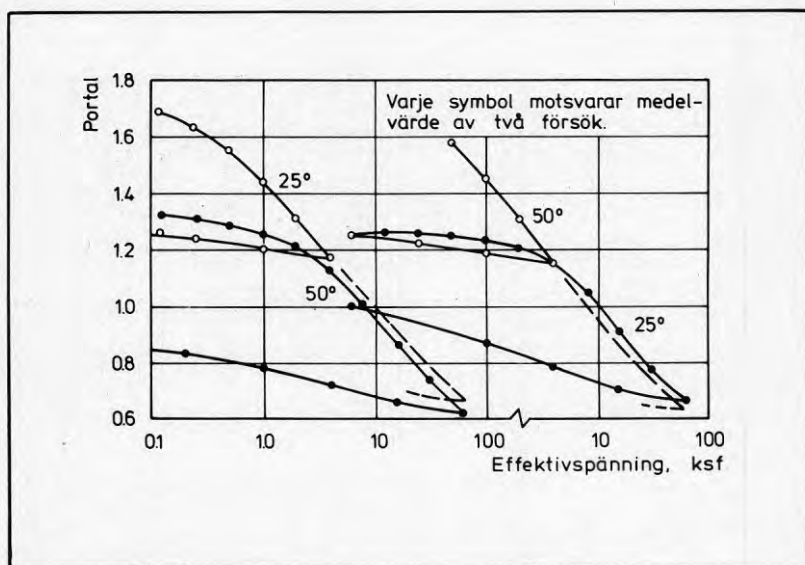


Fig. 3.3. Ödometerkurvor för en jord med visst organiskt innehåll. Delar av försöken utförda vid olika temperaturer (Habibagahi, 1973).

Fig. 3.3 Results from oedometer tests on a slightly organic clay. The temperature was varied during the test (Habibagahi, 1973).

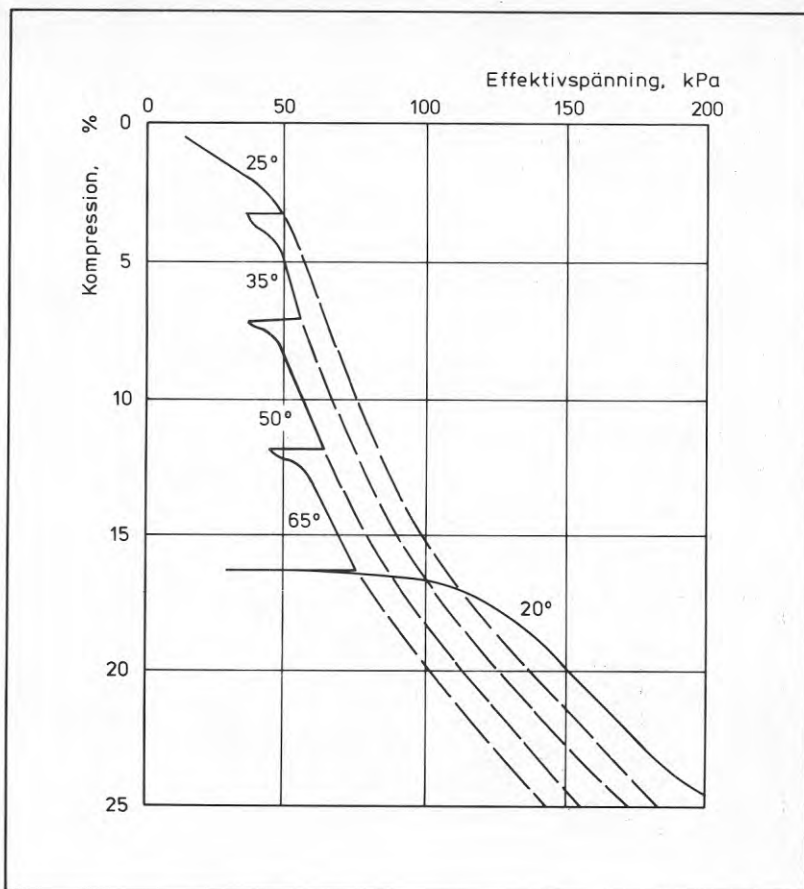


Fig. 3.4. Resultat från ett ödometerförsök, typ CRS, där temperaturen ändrats under försökets gång. De streckade kurvorna är ej uppmätta utan antagna samband (Tidfors, 1982).

Fig. 3.4 Results from CRS-tests, where the temperature was changed during the course of the test. The dotted lines do not represent measured values, but indicate an assumed behaviour (Tidfors 1982).

Tidfors (1982) redovisade resultat från ett pilotprojekt hur deformationsegenskaperna var beroende av temperaturen. Konsolideringsförsöken utfördes med konstant deformationshastighet och visar tydligt hur en höjning av temperaturen minskar förkonsolideringstrycket. En sänkning av temperaturen åtföljs på motsvaran-

de sätt av en förhöjning av förkonsolideringstrycket, se fig. 3.4. Ett omfattande laboratoriestudium rörande temperaturens inverkan på konsolideringsegenskaperna för olika typer av leror har sedan dess genomförts av Tidfors och redovisas hösten 1986.

Eriksson (1985) redovisar liknande resultat från en serie genomförd på svartmocka.

### 3.2. LERORS TERMISKA EGENSKAPER

Ett flertal författare har med olika typer av utrustning bestämt lerors termiska konduktivitet och kapacitivitet, (Sundberg, 1982) och i stort funnit att dessa parametrar kan beräknas utgående från vattnets och ingående mineralers egenskaper. För den lera som ingår i denna studie är konduktiviteten och kapacitiviteten,  $1W/mK$  respektive  $3.6 MJ/m^3K$ .

Värmetransporten i ett värmelager bestående av lera följer väl den differentialekvation som gäller för diffusion. Inverkan av strömning är till följd av lerans låga permeabilitet försumbar.

### 3.3 FULLSKALEFÖRSÖK

Någon omfattand redovisning av hur lerans geotekniska egenskaper påverkas vid fullskaleförsök med värmelagring i lera finns inte. Wilen (1984) redovisade mätningar gjorda i anslutning till ett värmelager i sensitiv lera, som varit i bruk i ett och ett halvt år. Där visade det sig att skjuvhållfastheten minskade påtagligt på tre nivåer, medan den ej påverkades på en och ökade kraftigt på en nivå. Sensitiviteten var även efter värmeuttaget hög.

#### 4. OMRÅDE FÖR FÄLTFÖRSÖK

När ett omfattande fältförsök skall utföras är det många olika önskemål som skall uppfyllas. Området bör inte ligga alltför långt bort och skall helst vara skyddat för olaga intrång och vandalism. Det är vidare viktigt att det får användas ostört under en längre tidsperiod och det är en fördel om markägaren har en positiv inställning till projektet.

Beträffande jorden skall den helst vara relativt homogen, åtminstone bör variationerna i egenskaperna i sidled vara små. I detta fallet var det viktigt att jorden utgjordes av lös lera till ett djup större än 20 m och att lerprofilen ej var genomsatt av något dränerande skikt av grövre material.

Ett område som befanns uppfylla ovannämnda krav och som slutligen valdes som försöksplats är beläget inom stadsdelen Öster i Kungälv kommun. Försöksplatsen som upptar en yta av  $40 \times 50 \text{ m}^2$  ligger på västra stranden av Göta älv, fig 4.1. Marken ägs av Kungälv kommun.

Området lutar svagt mot Göta älv och är beläget cirka 1.4 m över älvens normala vattenstånd. Marken består av äng som normalt nyttjas för höskörd. Enligt uppgift från ortsbefolkningen invallades det aktuella området på 1920-talet med en träspont och fylldes upp med muddermassor från älven. Rester av sponten från invallningen finns fortfarande kvar vid älvstranden.

Jorden består av postglacial lera ner till cirka 10 m. Därunder återfinns en glaciallera med ganska stor mäktighet. Den postglaciala lerans vattenkvot varierar mellan 60 och 105% med de högsta värdena i den övre något organiska jorden. Densiteten varierar mellan 1.45 och  $1.55 \text{ t/m}^3$ . Någon torrskorpa av betydelse

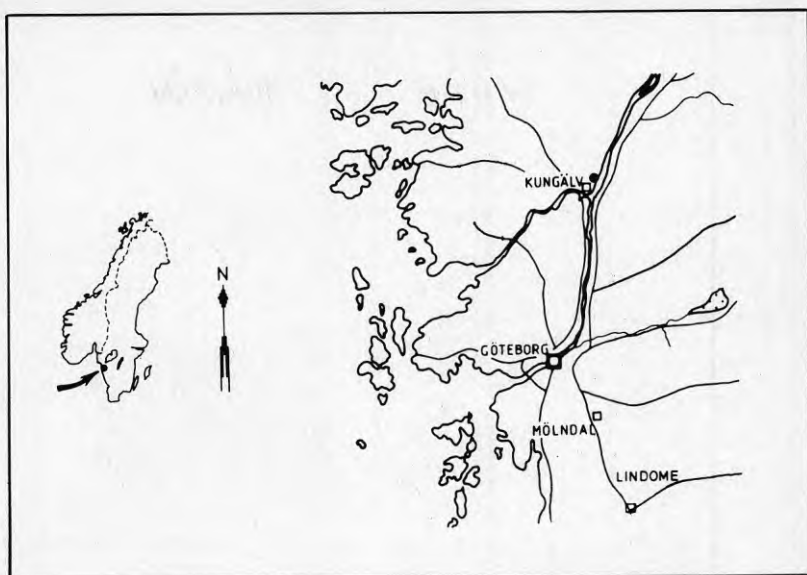


Fig. 4.1 Karta utvisande försöksfältets läge.

*Fig. 4.1 Map showing the location of the test site.*

förekommer inte. Däremot har ett skikt av i huvudsak organiskt material observerats på cirka 2 m djup, sannolikt utgörande den tidigare älvbotten. Skjuvhållfastheten ökar något med djupet och är cirka 12 kPa i markytan och cirka 21 kPa på 19 m djup. Den höga vattenkvoten medför att lerans värmekapacitet är hög (teoretiskt cirka  $3.77 \text{ MJ/m}^3 \text{ K}$ , d v s  $1 \text{ kWh/m}^3 \text{ K}$ ).

Portrycksprofilen visar på ett med djupet svagt stigande porövertryck, vilket även verifieras av den artesisiska brunn som monterats inom området.

Leran i området är svagt överkonsoliderad. På 3 m är överkonsolideringen cirka 19 kPa men avtar med djupet och är cirka 8 kPa på 12 m djup.

LABORATORY TESTS,  
TEMPERATURE +7.3 DEGR. C

DATE OF SAMPLING 810615  
DATE OF TESTING 810720

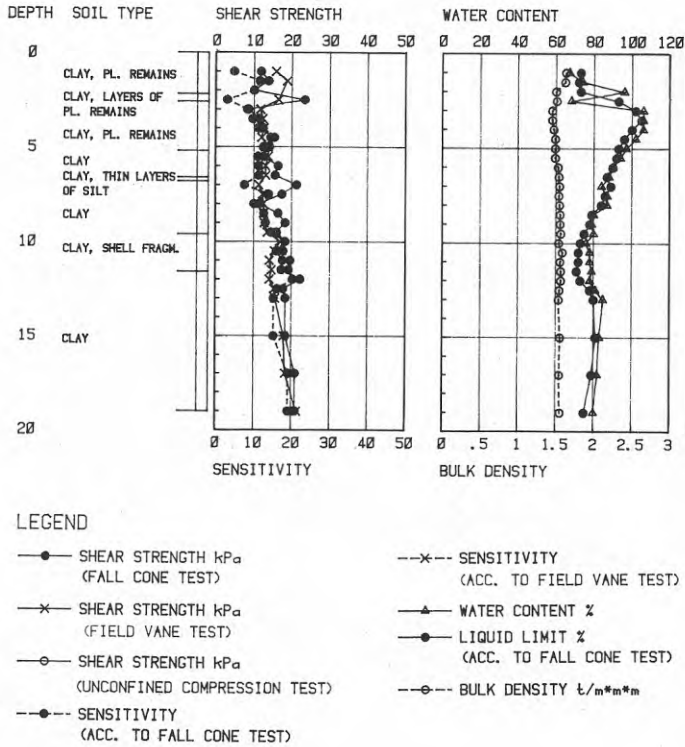


Fig. 4.2 Vattenkvoter, skjuvhållfasthet och densiteter för leran i försöksområdet.

Fig. 4.2 Water contents, shear strength and densities for the clay within the test site.

En sammanställning av de geotekniska egenskaperna visas i fig. 4.2. och porvattenövertrycket visas i fig. 4.3.

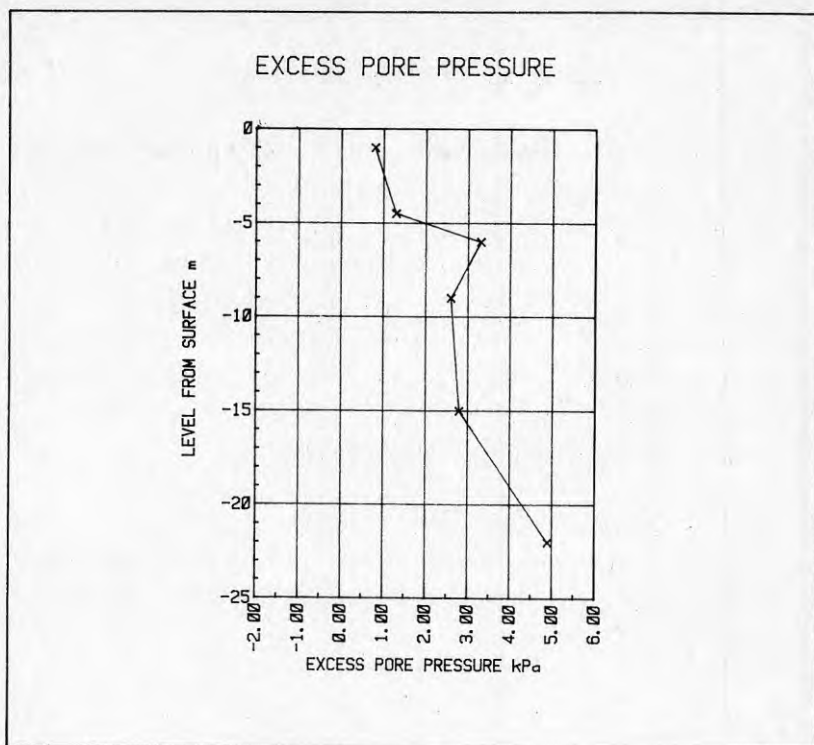


Fig. 4.3 Porvattenövertrycket relativt hydrostatiskt tryck med grundvattenytan i markytan mitt i försöksområdet.

*Fig. 4.3 Excess porewater pressure relative to hydrostatic pressure assuming the groundwater table located at the ground surface.*

Konsolideringsförhållanden och temperaturer redovisas och diskuteras längre fram i rapporten.

## 5. FÄLTFÖRSÖK - INSTALLATIONER

Området för fältförsök är 40x50 m<sup>2</sup> och inom försöksområdet har två separata lager med olika typer av värmewäxlare installerats. Ett stort antal temperaturgivare har sedan monterats i de bägge lagren. Dessutom monterades utrustning så att sättningar och portryck kunde mätas under försökets gång. En särskild yta inom området, opåverkad av uppvärmningen, reserverades som referensyta fig. 5.1. Där mättes portrycket och även vertikalkrörelserna regelbundet.

Uppvärmning skedde från en central, kopplad så att den kunde användas som två separata anläggningar för uppvärmning av de bägge lagren, eller med hela effekten på ett fält.

Nedan diskuteras värmewäxlare (utformning och installation), värmewäxlarnas placeringar, temperaturmätare, värme- och mätcentral samt utrustning för geotekniska mätningar var för sig.

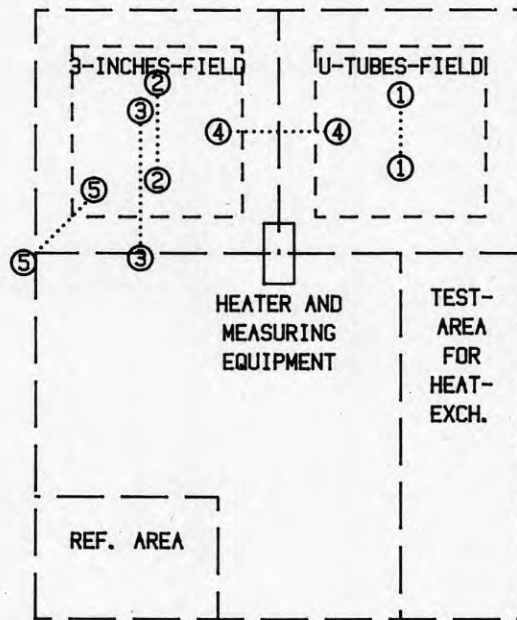
### 5.1. VÄRMEVÄXLARE

De två lagren, som båda har planmått 14x14 m<sup>2</sup> och har ett djup på 12 m, försågs med värmewäxlare av olika utförande. I det ena fältet bestod varje värmewäxlare av tunn plastslang som löper ner och upp i en slinga, i fortsättningen benämnt U-rörsfältet. I det andra fältet bestod värmewäxlarna av 3"-rör med ett invändigt koncentriskt rör, i fortsättningen benämnt 3"-fältet. Nedan diskuteras de bägge fälten var för sig.



# PLAN OF THE TEST AREA

SCALE 1:400



## LEGEND

⊙.....⊙ TEMPERATURE MEASURING  
LINE NUMBER N

Fig. 5.1. Plan över dispositionen av området.

Fig. 5.1 Plan showing the location of the different areas within the test site.

### 5.1.1 U-rörsfältet

Värmeväxlarna i U-rörsfältet bestod av slingor av polyamidslang drivna vertikalt till ett djup av cirka 12 m. Rördimensionen var 15x2.5 mm (ytterdiameter 15 mm, godstjocklek 2.5 mm) och avståndet mellan de båda rörskänklarna i slingan var cirka 200 mm, se fig. 5.2.

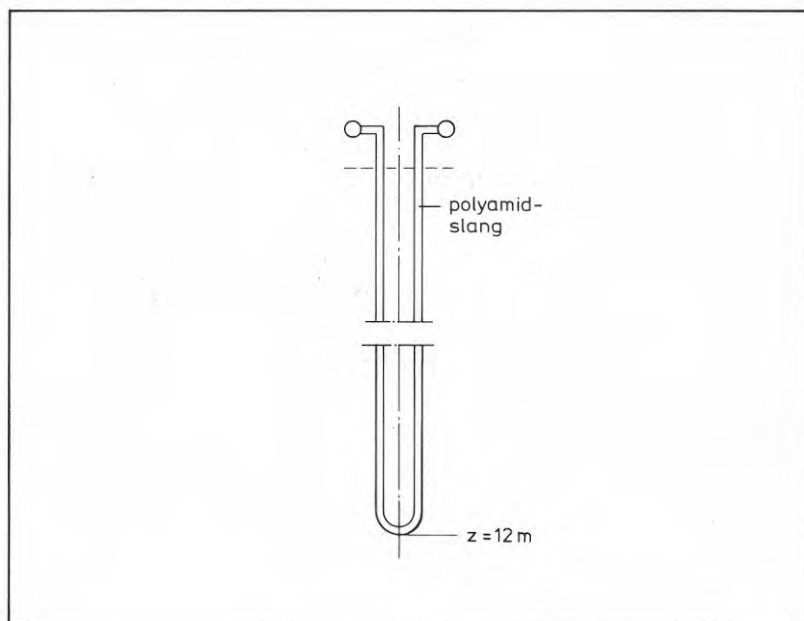


Fig. 5.2. Principen för värmeväxlare av U-rörstyp.

*Fig. 5.2 The basic parts of a U-shaped heat-exchanger.*

Avståndet mellan centrum på värmeväxlarna var 2 m och totalt bestod fältet av 49 värmeväxlare. För neddrivning av U-rörsfältets värmeväxlare användes en bandburen, hydrauldriven, kedjematad borrarutrustning. För att erhålla rätt avstånd mellan slangarna i slingan användes ett specialbyggt drivdon som drevs med hjälp av 32 mm borrhäng. Drivdonet, som lämnades kvar i

marken, bestod av ett halvcirkelformat rör som polyamidslangen kunde träs igenom. Därmed skyddades även slangens nedre del under neddrivningen.

Före neddrivningen förborrades ett 200 mm hål genom torrskorpan. Borrtrustningens maximala neddrivningskraft, 18 kN, visade sig sedan vara fullt tillräcklig vid neddrivning genom lera. För att forcera det tunna torvlagret på tvåmetersnivån krävdes dock att den hydrauliska slagmaskinen kopplades in. Vid några tillfällen förborrades torvlagret med bergborrstängerna för att på så sätt minska drivtiden genom torvlagret. Neddrivningen löpte i sin helhet bra utan att några egentliga problem uppstod.

Värmeväxlarna parallellkopplades med slang av förnätad polyeten, som har goda hållfasthetsegenskaper även vid höga temperaturer. Tilloppslangarnas stamledning, vars ytterdiameter var 40 mm, kopplades samman med värmeväxlarna via grenledningar med ytterdiametern 32 mm. På motsvarande sätt löper 32 mm returslangor samman i en 40 mm stamledning. Slang och samtliga kopplingar var tillverkade av Wirsbo Bruk AB.

Tilloppsledningarna, returledningarna samt kopplingarna mellan dem och värmeväxlarna har helt och hållet förlagts ovanför markytan. Detta har skett främst av kostnadsskäl, för att undvika schaktgravar samt underlätta inspektion av slangar och kopplingar. Vid uppförande av en anläggning för kommersiellt bruk är det naturligtvis lämpligare om ledningssystemet ligger helt under markytan. För att minska värmeförlusterna i ledningarna och förhindra att de påverkas av omgivningens klimat exempelvis, uv-strålning, har de sedan isolerats med 70 millimeter mineralull.

### 5.1.2. 3"-fältet

I detta fält bestod värmeväxlarna av 3" galvaniserade standardrör (ytterdiameter 88 mm, godstjocklek 4 mm) som tätats med en huv i nederändan. Även dessa rör var drivna till cirka 12 m djup. Detta fält innehöll 25 st värmeväxlare med ett c/c-avstånd på 2.8 m. Vattencirkulationen inom varje värmeväxlare ombesörjdes av ett 3/4"-rör, som centriskt placerat, avslutades cirka 100 mm ovanför botten i det grövre röret, se fig. 5.3. Returvattnet leddes tillbaka till markytan med en polyamidslang 18x1.5 som var ansluten till 3/4"-röret.

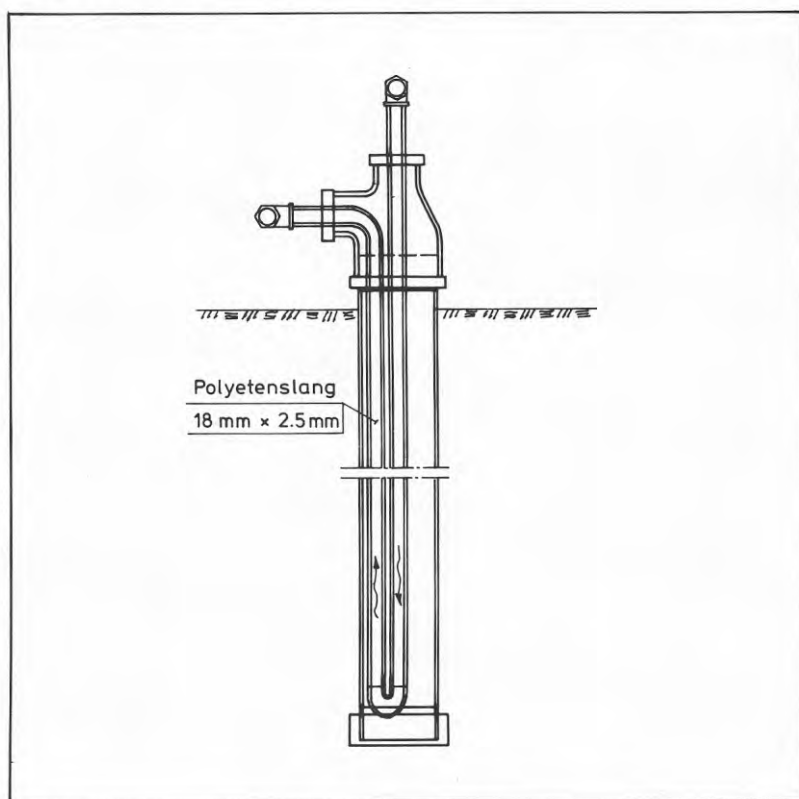


Fig. 5.3. Principen för värmeväxlare av 3"-typ.

*Fig. 5.3 The basic parts of a 3" heat exchanger.*

På så sätt erhöles ett två-stegs-system där det varma vattnet i den erhållna rörslingan värmdes upp det i 3"-röret stillastående vattnet. Temperaturmätning gjordes både i det cirkulerande vattnet och i det i värmeväxlaren stillastående vattnet.

För neddrivning av värmeväxlarna användes en bandvagn med hydrauliskt borrok. Värmeväxlarens ytterrör, som bestod av 3"-rör, drevs till 12 m djup genom skarvning av två 6 m längder. Några problem vid drivning och montage uppstod egentligen ej.

Även dessa värmeväxlare parallellkopplades med samma typ av system som används för U-rörsfältet.

## 5.2. UTRUSTNING FÖR TEMPERATURMÄTNING

Temperaturen mättes med resistiva givare, Pt 100, av fabrikat THERM. Givarna monterades i specialtillverkade stålhylsor och elledningarna till markytan skyddades av polyetenslang, se fig. 5.4. Montering av givare i marken skedde genom att ett stålrör drevs ned med handkraft. Stålrörets vertikalitet kontrollerades med ett vattenpass.

Temperaturgivarna har mycket stor noggrannhet, när det gäller mätning av temperaturskillnader ( 0.01 C), men sämre vad absoluttemperaturen beträffar ( 1-2 C). Detta beror på att givarna fungerade enligt 3-ledarkoppling, vilket innebär att det föreligger en viss felvisning av absoluttemperaturerna beroende på varierande kabellängder. Eftersom det inom projektet i huvudsak var temperaturdifferenser som mättes i förhållande till tiden saknade denna felvisning praktisk betydelse, och någon noggrann kalibrering gjordes inte i detta syfte. Temperaturen kunde via mätvärdesom-

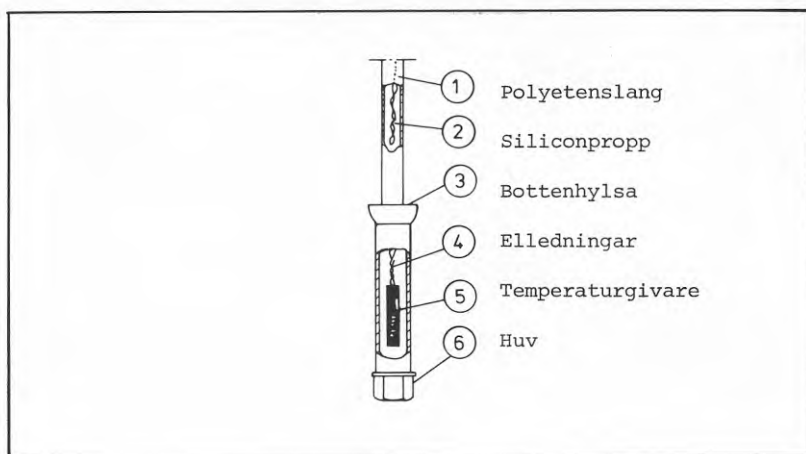


Fig. 5.4. Temperaturgivare monterad i hylsa.

*Fig. 5.4 Temperature gauge mounted in its casing.*

kopplarna avläses manuellt. En datainsamlingsutrustning byggdes upp kring en microdator HP-85, som vid förutbestämda tidsintervaller läste av temperaturgivarerna.

Totalt monterades i och omkring de bägge lagren 63 temperaturgivare, varav 25 i anslutning till 3"-fältet, 12 i anslutning till U-rörsfältet, 19 utanför 3"-lagret och 6 i slangsystemet ovan mark. 1 givare placerades i referensytan för att registrera de års-tidsberoende temperaturvariationerna i markytan. Den använda voltmetern liksom mätvärdesomkopplarna var av märket THERM.

#### 5.2.1 Temperaturgivarernas placering i U-rörsfältet.

Temperaturgivarerna placerades samtliga på 6 m djup centralt i U-rörsfältet, se fig. 5.5. Givare 1:1 och 1:12 är monterade mitt emellan värmeväxlarnas bägge skänklar, medan 1:6 och 1:7 monterades fast på respektive skänkel.

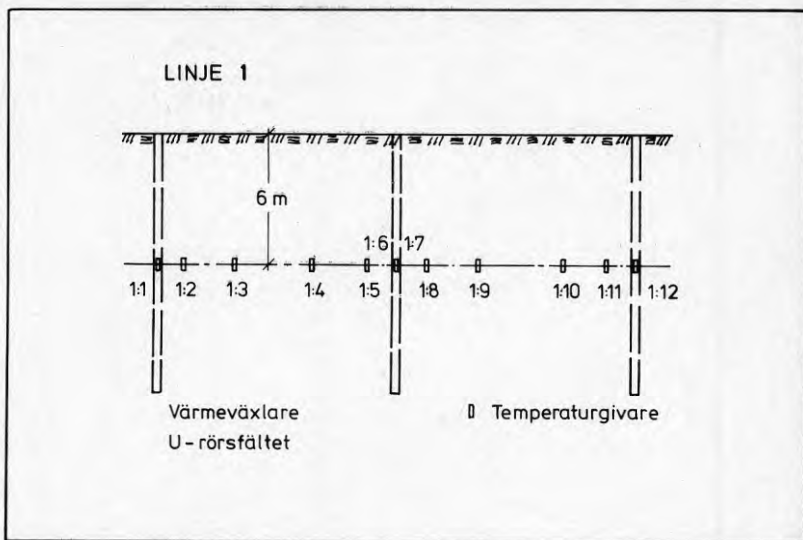


Fig. 5.5 Placering av temperaturgivare i U-rörsfältet.

*Fig. 5.5 Location of temperature gauges in the U-tube field.*

5.2.2 Temperaturgivarnas placering i 3"-fältet.

Temperaturgivarna placerades utefter fyra linjer, linje 2-5, i fältet, se fig. 5.6.

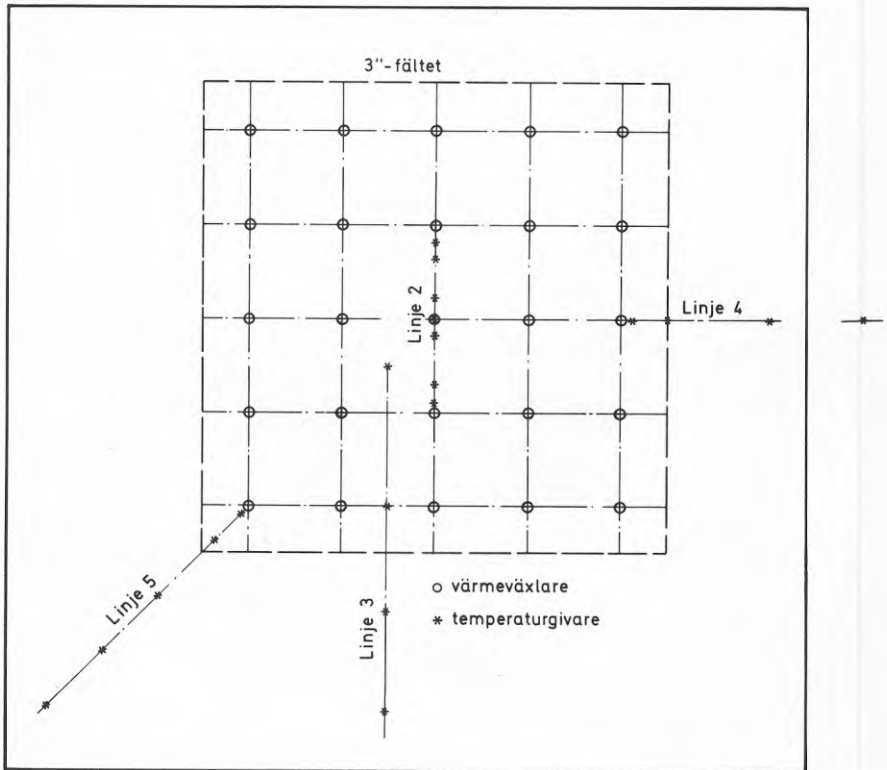


Fig. 5.6. Temperaturgivarlinjernas läge, linje 2 till 5.

Fig. 5.6 Location of the lines with temperature gauges, line 2 through 5.



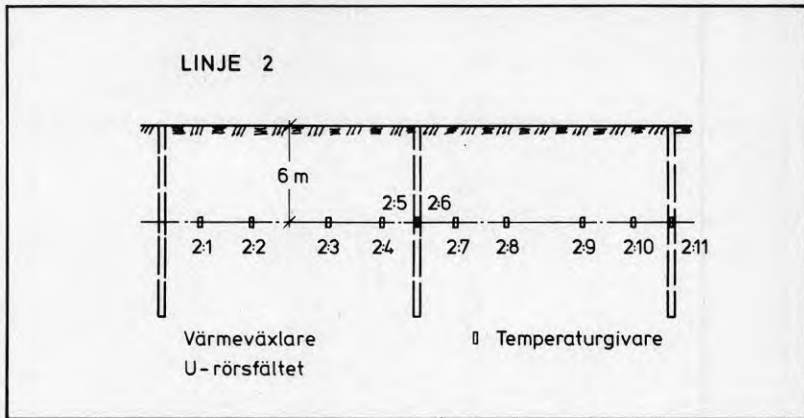


Fig. 5.7. Temperaturgivarnas placering längs linje 2.

*Fig. 5.7 Location of temperature gauges along line 2.*

Linje 2 löper centralt i fältet och avsågs mäta temperaturfördelningen direkt mellan 3 värmeväxlare, se fig. 5.7.

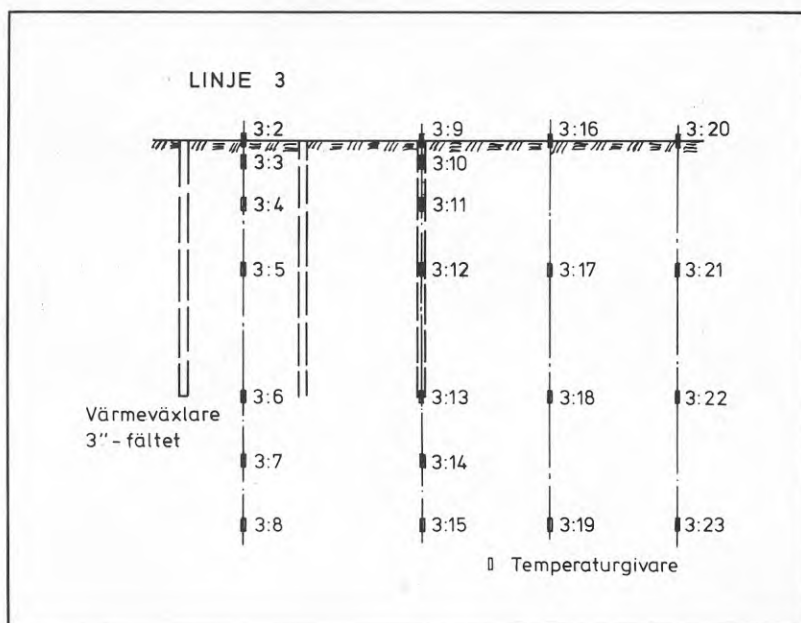


Fig. 5.8. Temperaturgivarnas placering längs linje 3.

*Fig. 5.8 Location of temperature gauges along line 3.*

Temperaturgivarna i linje 3 mäter temperaturen mellan två rader av värmeväxlare samt hur temperaturen avtar utanför lagret, se fig. 5.8.

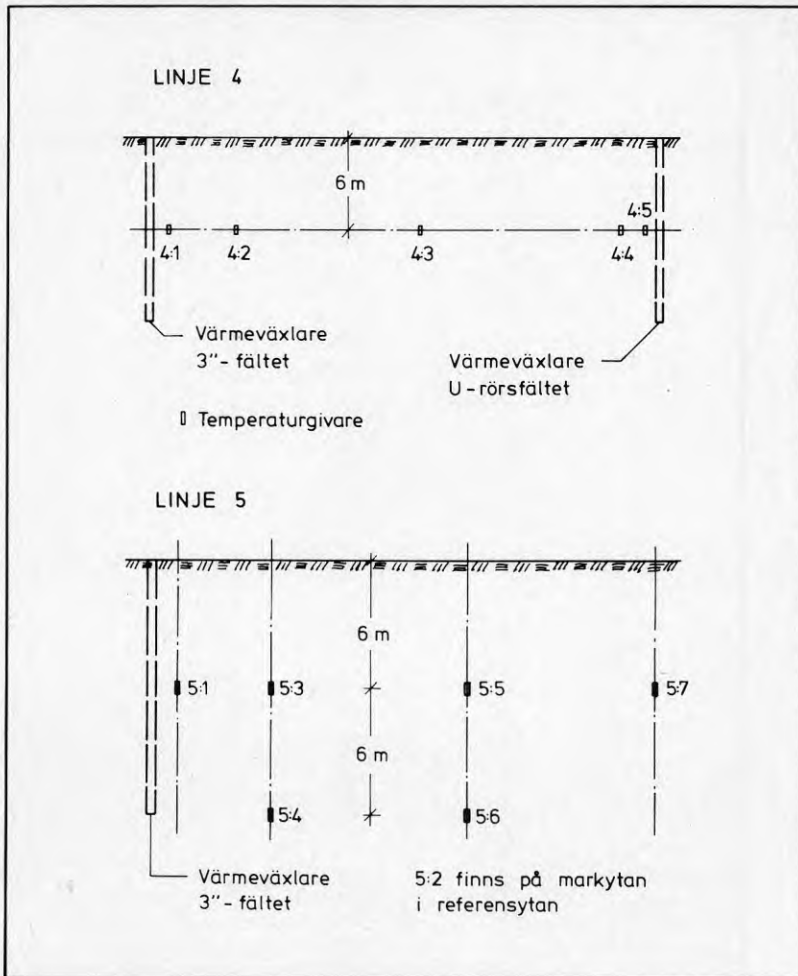


Fig. 5.9. Temperaturgivarnas placering längs linjerna 4 och 5.

*Fig. 5.9 Location of temperature gauges along line 4 and 5.*

Linje 4 och 5, se fig. 5.9., instrumenterades för att ge underlag för beräkning av värmeförlusterna.

### 5.2.3 Placering av övriga temperaturgivare.

Övriga temperaturgivare är placerade i referensytan 1 st, och i slangsystemet ovan mark, 6 st, för att kunna beakta förluster och beräkna tillförd energi.

### 5.3. VÄRME- OCH MÄTCENTRAL

Värme- och mätcentralerna var inrymda i en gemensam bod, en militär omformarvagn, se fig. 5.10. Värmecentralen var uppbyggd av fyra elpannor, två med effekten

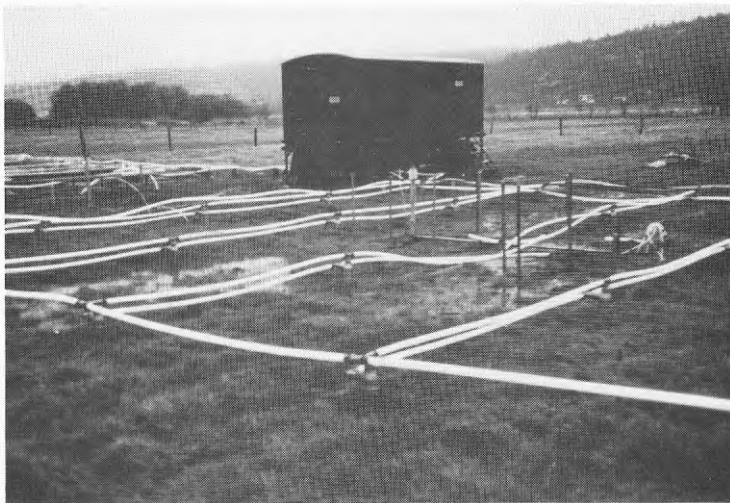


Fig. 5.10. Foto visande försöksfält och mätvagn.

*Fig. 5.10 Photo showing the test site and data acquisition truck.*

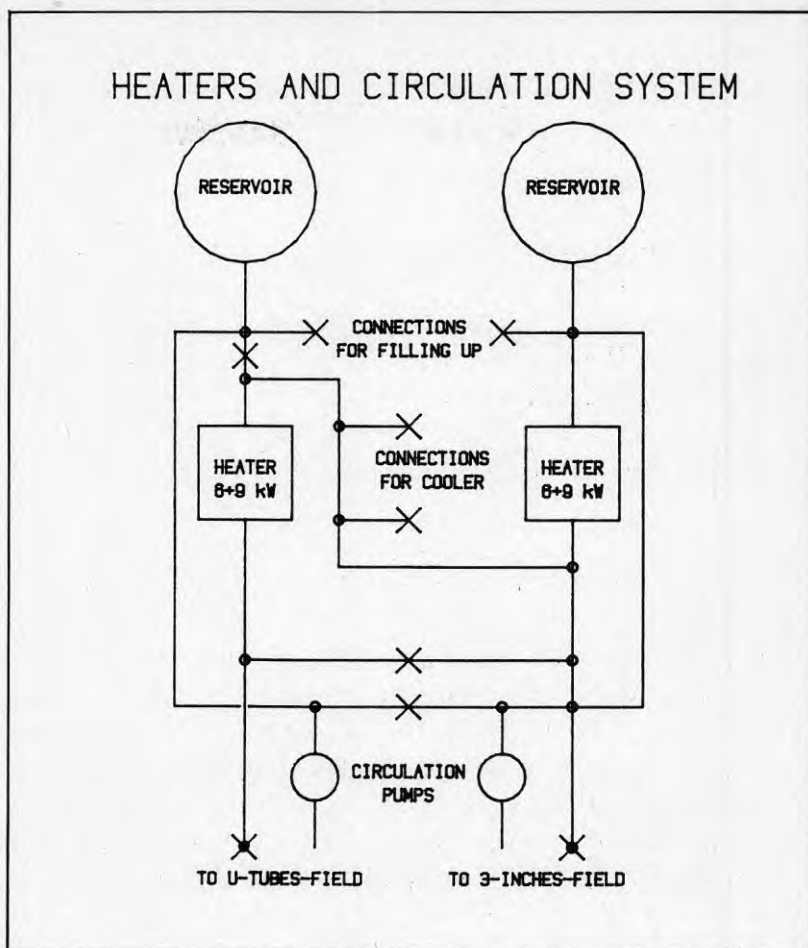


Fig. 5.11. Kopplingsschema för uppvärmnings- och kylsystem.

*Fig. 5.11 Circuit diagram for the heating and cooling system.*

6 kW och två med effekten 9 kW. Vattencirkulationen ombesördjes av två centrifugalpumpar på 1.5 kW vardera. Systemet, se fig. 5.11, kopplades så att effekten, vid parallell drift i båda fälten, kunde varieras mellan 6,9 och 15 kW. Vid drift på ett fält med hela värmeanläggningen kunde effekten varieras mellan 6, 9,

12, 15, 18, 21, 24, och 30 kW. Vattenflödet genom systemet var maximalt 1.9 liter/sek i U-rörsfältet och 1.4 liter/sek i 3"-rörsfältet. Systemet var slutet med slutna expansionskärl.

För avläsningen av passerande vattenmängder fanns två konventionella vattenmätare av standardtyp. Hela anläggningen försörjdes med ström från egen transformator, monterad på en nära belägen högspänningsledning. Vattenförsörjningen av anläggningen ordnades med egen brunn bestående av ett 1"-rör nedfört till friktionsmaterialet på cirka 30 m med artesiskt tryck.

#### 5.4. UTRUSTNING FÖR GEOTEKNISKA MÄTNINGAR

Det är av vikt att under försökets gång följa upp sättningar/hävningar och portryck. Av stort intresse var även att dokumentera eventuella förändringar i vattenkvoter, förkonsolideringstryck etc. Det senare kräver emellertid provtagning och åtföljande laboratorieförsök vid varje mättillfälle medan sättning/hävning och portryck kan mätas direkt i fält.

För mätning av portryck installerades totalt 30 st portryckmätare av typ BAT. Sättningarna följdes genom avvägning av 10 markpeglar och mätning av två bälgslangar. Med hjälp av bälgslangen är det möjligt att avläsa sättningarna på varje meter ned till 12 m under markytan.

##### 5.4.1 Mätarnas placering i U-rörsfältet.

Bälgslangen placerades centralt i lagret och en markpegel placerades i vardera hörnet.

Portryckmätarna placerades samtliga som en portrycksstation mitt i lagret med mätare på djupen 1m, 4.5m, 6m, 9m och 15 m.

#### 5.4.2 Mätarnas placering i 3"-fältet

Bälgslangen placerades mitt i lagret och en markpegel placerades i vardera hörnet.

Antalet portrycksmätare i detta lager var fler än i U-rörsfältet, se fig. 5.12. och placerades enligt följande:

Station 2: Centralt i lagret mellan 4 värmewäxlare placerades 5 givare på djupen 1 m, 4.5 m, 6 m, 9 m och 15 m.

Station 3: Centralt i lagret mellan två värmewäxlare sitter 4 mätare i linje på 9m djup.

Station 4: Som station 2 fast 3 m utanför lagrets yttre värmewäxlarrad. (Monterades i januari 1983.)

Station 5: Som station 4 fast 6 m utanför lagrets yttre värmewäxlarrad.

#### 5.4.3 Mätarnas placering i referensområdet.

I referensytan finns en markpegel och fem portrycksmätare placerade på djupen 1 m, 4.5m, 6m, 9m och 15 m.

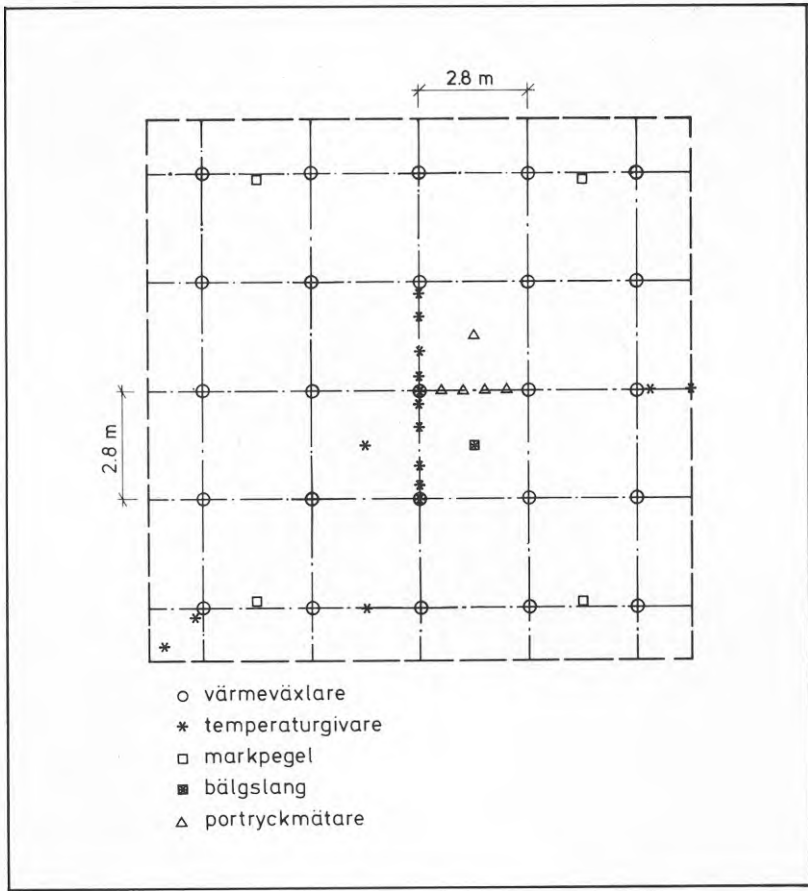


Fig. 5.12. Portryckmätarnas placering i 3"-fältet.

Fig. 5.12 Location of the piezometers in the 3"- field.



## 6. FÖRSÖKSRESULTAT MED KOMMENTARER

Samtliga installationer var slutförda och all utrustning på plats i september 1981. Efter kontroll och injustering kunde försöken starta i oktober 1981. De pågick sedan oavbrutet i tre år. Under denna tidsperiod gjordes otaliga avläsningar av temperaturgivare, porttrycksmätare och bälgslangar. Under perioden gjordes också en del provtagningar med åtföljande laboratorieförsök. Mängden mätdata är således oerhört omfattande. En detaljerad redovisning med kommentarer till alla mätdata skulle därför bli alltför omfattande. Därför har endast representativa data lyfts fram och kommenterats i detta kapitel. Efter en presentation av försöksprogrammet behandlas temperaturmätningarna, därefter porttryckförändringar och sättningar och sist laboratorieförsöken. En relativt omfattande sammanställning av mätresultaten återfinns i Appendix.

### 6.1. FÖRSÖKSPROGRAM

För såväl U-rörsfältet som 3"-fältet genomfördes två uppvärmningar vardera åtföljda av en vilofas, alternativt en avkylning.

#### 6.1.1. Försöksprogram för U-rörsfältet.

U-rörsfältet uppvärmdes först i tre månader med effekten 15 kW, åtföljt av en månad med 30 kW och en månad med 6 kW, se fig. 6.1. Den prickade linjen i det övre diagrammet anger den teoretiska effekten, medan den heldragna linjen är den verkliga effekten framräknad ur uppmätta temperaturförändringar inom lagret. I det

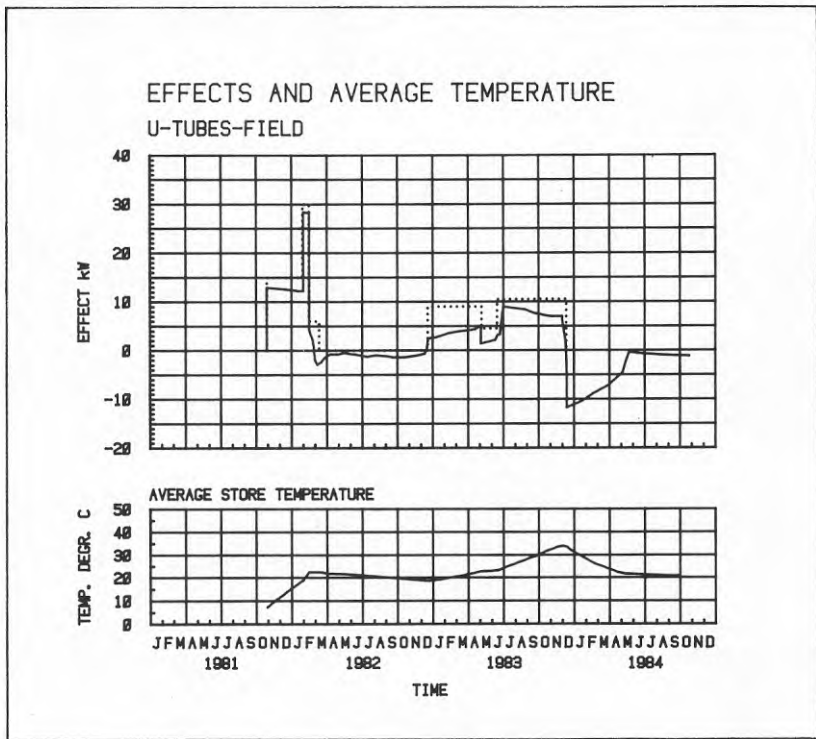


Fig. 6.1. Uppladdningseffekter och medeltemperatur för U-rörsfältet. Den streckade linjen anger effekt från värmepannor, den heldragna linjen anger verklig effekt.

Fig. 6.1 Effects and average temperature for the U-tubesfield. The broken line represents effect from the heaters and the full line represents obtained effect.

undre diagrammet visas medeltemperaturen för lagret framräknad med hjälp av de uppmätta temperaturerna, med beaktande av den enskilda temperaturgivarens placering.

Efter den första uppvärmningsfasen fick lagret vila i nio månader varvid en temperaturutjämning skedde inom lagret. Därefter uppvärmdes det återigen under ett år

med en teoretisk effekt på 9 kW, med undantag för en kortare period med lägre effekt. U-rörsfältet urladdades slutligen under en femmånaders period med som mest 12 kW.

Som framgår av fig. 6.1. ökar temperaturen proportionellt mot tiden under första uppladdningen upp till som mest 22°C. Under vilofasen sker, utöver en viss temperaturutjämning i lagret, en viss höjning av temperaturen utanför lagret, vilket i sin tur återspeglas i en långsam sänkning av medeltemperaturen i lagret, ner till 19°C. Under den andra uppladdningsfasen stiger temperaturen långsammare upp till 34°C. Under urladdningen, som pågick i dryga 5 månader, sjönk temperaturen till 20-21°C.

#### 6.1.2. Försöksprogram för 3"-fältet.

3"-fältet uppvärmdes i två perioder om vardera cirka 5 månader med den teoretiska effekten 15 kW, se fig. 6.2. Varje uppvärmningsfas åtföljdes av en urladdningsfas omfattande cirka 6 månader, den senare med något större effekt än den första. Medeltemperaturen i lagret steg som mest till 24°C under första uppladdningen och till 30°C under andra. Medeltemperaturen efter urladdning var 17°C respektive 13°C.

Genom ett åsknedslag i juli 1983 skadades dessvärre ett antal temperaturgivare, varför värdena på i huvudsak 3"-fältet visade en viss instabilitet efter denna tidpunkt. På grund av detta redovisades medeltemperaturen för detta fält delvis som streckad linje.

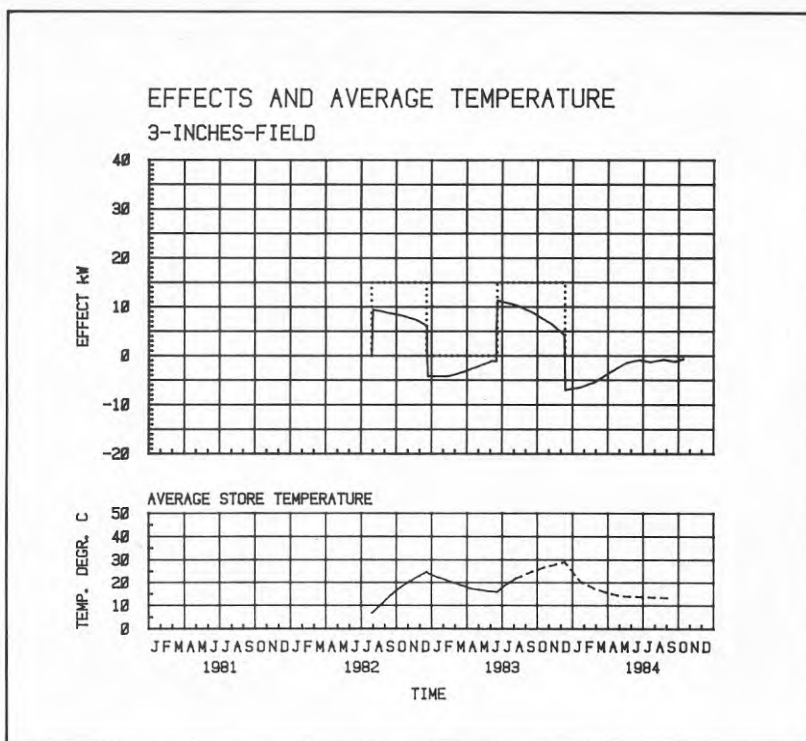


Fig. 6.2. Uppladdningseffekter och medeltemperatur för 3"-fältet. Den punktade linjen anger effekt från värmepannor, den heldragna linjen anger verklig effekt.

*Fig. 6.2 Effects and average temperature for the 3"-field. The dotted line represents effects from the heaters and the full line represents obtained effect.*

## 6.2 TEMPERATURÄNDRINGAR

Vid bedömning av ett värmelagers effektivitet är det två faktorer som är av störst intresse, nämligen värmeförlusterna från lagret och den sk drivtemperaturern. Med drivtemperatur avses temperaturskillnaden mellan det värmebärande mediet och lagrets medeltemperatur. Drivtemperaturen beror förutom av, värmeväxlarnas area och c/c-avstånd också av övergångsmotstånd värmeväxlare/jord och jordens värmekapacitet och konduktivitet.

Värmeförlusterna kan beräknas ur de mätvärden som erhöles under den nio-månaders period då U-rörsfältet "vilade".

Drivtemperaturerna för de båda lagren har studerats genom i huvudsak jämförelser mellan temperaturgivare på utsidan av värmeväxlarna och lagrens medeltemperaturer. Temperaturfallet från pannrum till värmeväxlarnas utsida registrerades även.

Som framgår av fig. 6.2. sjunker inladdningseffekten snabbt i förhållande till den teoretiska panneffekten. Anledningen till detta är att detta lager var beläget i en svacka och således stod mer eller mindre under vatten vilket i hög grad försämrade isoleringen, vilket gav extremt stora förluster när utetemperaturen sjönk.

Uttagen från lagret skedde med hjälp av en 100 m lång rörslinga, som låg på marken, genom vilken vattnet fick strömma och således avge sin värme till den omgivande luften. Avkylningseffekten var alltså helt beroende av utetemperaturen vilket även framgår av figuren.

#### 6.2.1 Temperaturändringar i U-rörsfältet.

I U-rörsfältet fanns givare i huvudsak på 6 m djup, placerade så att temperaturtratten mellan värmeväxlarna skulle kunna studeras. Exempel på resultat visas i fig. 6.3. Inledningsvis stiger temperaturen kraftigt i värmeväxlaren. Därefter inträder ett till synes kvastationärt förhållande där temperaturen ökar ungefär lika mycket i samtliga punkter. Temperaturen 0.5m och 1m utanför värmeväxlaren är då cirka 5 respektive 7 lägre än i omedelbar anslutning till värmeväxlaren.

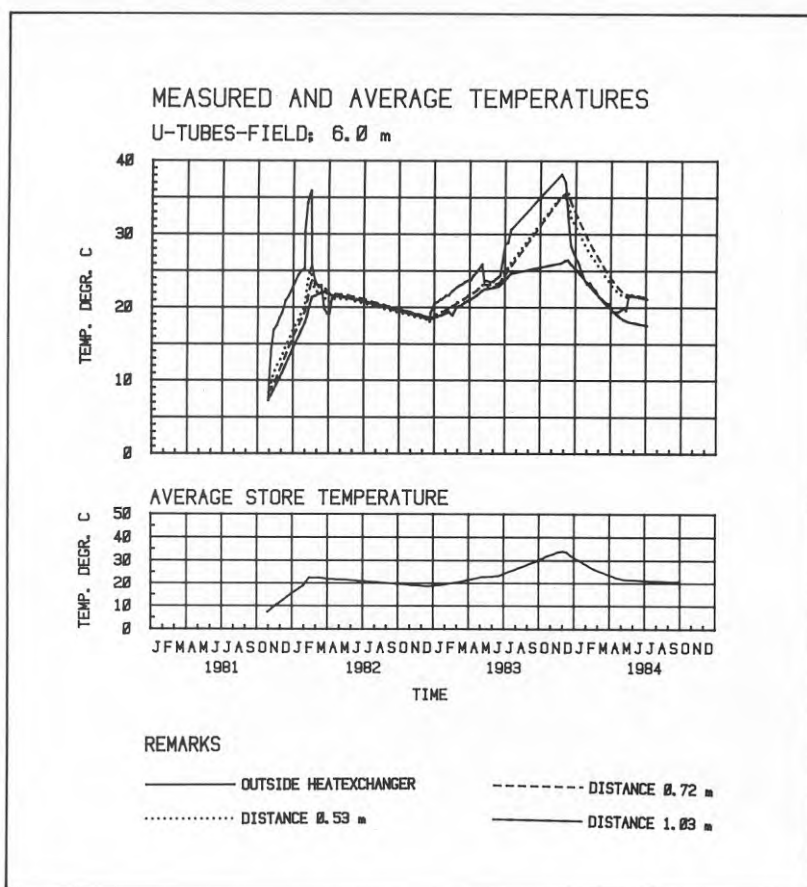


Fig. 6.3. Temperaturvariationer i U-rörsfältet på nivån 6 m på olika avstånd från värmeväxlarna.

*Fig. 6.3 Temperature changes in the U-tubesfield at 6 m depth. Temperature gauges located at different distance from the heatexchangers.*

Då effekten ökas till det dubbla stiger naturligt nog temperaturen fortare i lagret och de tidigare diskuterade temperaturskillnaderna ökar till cirka 10 respektive 14°C.

När lagret sedan lämnas orört, jämnas temperaturen ganska fort ut i lagret och medeltemperaturen sjunker med nära 0.35°C/månad.

Under nästa uppvärmningsfas är förhållandena likartade, dock med omvända temperaturförhållanden under urladdningsfasen.

Värt att notera är att temperaturdifferenserna vid urladdning är av samma storleksordning som vid laddning med motsvarande effekt.

#### 6.2.2 Temperaturmätningar i 3"-fältet.

I 3"-fältet fanns 44 st temperaturgivare placerade i fyra linjer. Exempel på temperaturvariationer mellan två närliggande värmeväxlare visas i fig. 6.4. Efter ett inledningsskede är temperaturökningen på olika avstånd från värmeväxlarna likartade och visar på en typisk temperaturtratt runt värmeväxlarna. Medeltemperaturökning i 3"-fältet är nära nog identisk med medeltemperaturökningen i U-rörsfältet. Absoluttemperaturer i leran på 1m avstånd från värmeväxlarna är i 3"-fältet ungefär densamma som i U-rörsfältet, där dock temperaturen närmare värmeväxlaren är avsevärt högre.

Vid urladdning uppstår motsvarande förväntade temperatursänkning närmast värmeväxlarna. I början av juni - 83, då urladdningen upphör är temperaturen densamma i stort i hela lagret. Strax därefter inträffar åsknedslaget och någon ytterligare detaljerad analys blir ej möjlig, i och med att givarnas precision kraftigt försämras.

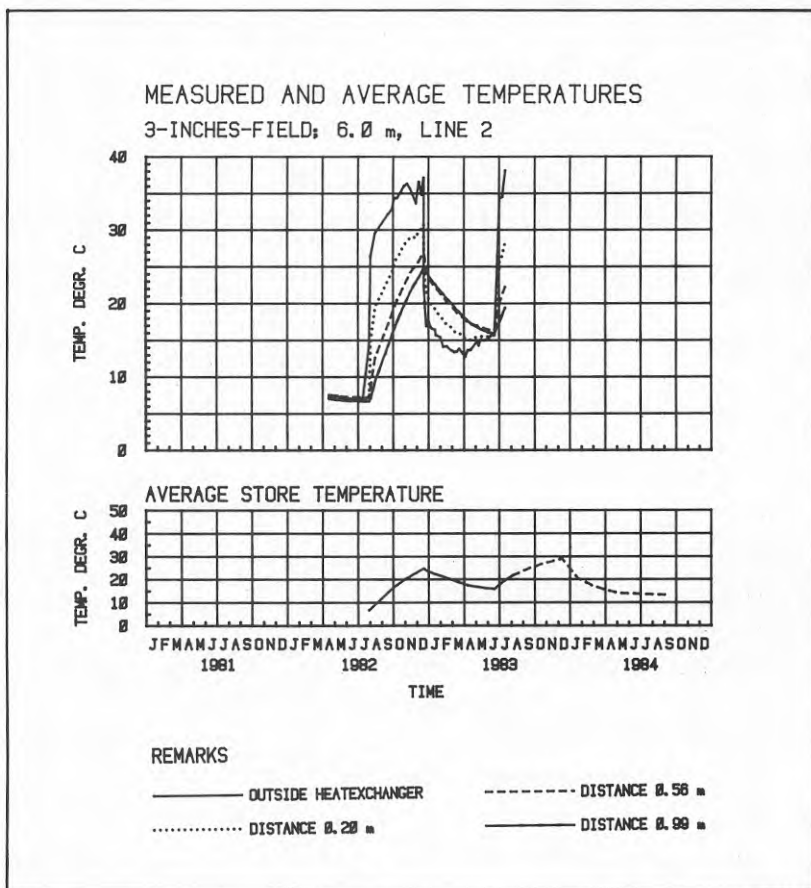


Fig. 6.4. Temperaturvariationer i 3"-fältet på nivån 6 m på olika avstånd från värmeväxlarna.

Fig. 6.4 Temperature changes in the 3"field at 6 m depth. Temperature gauges located at different distance from the heatexchangers.



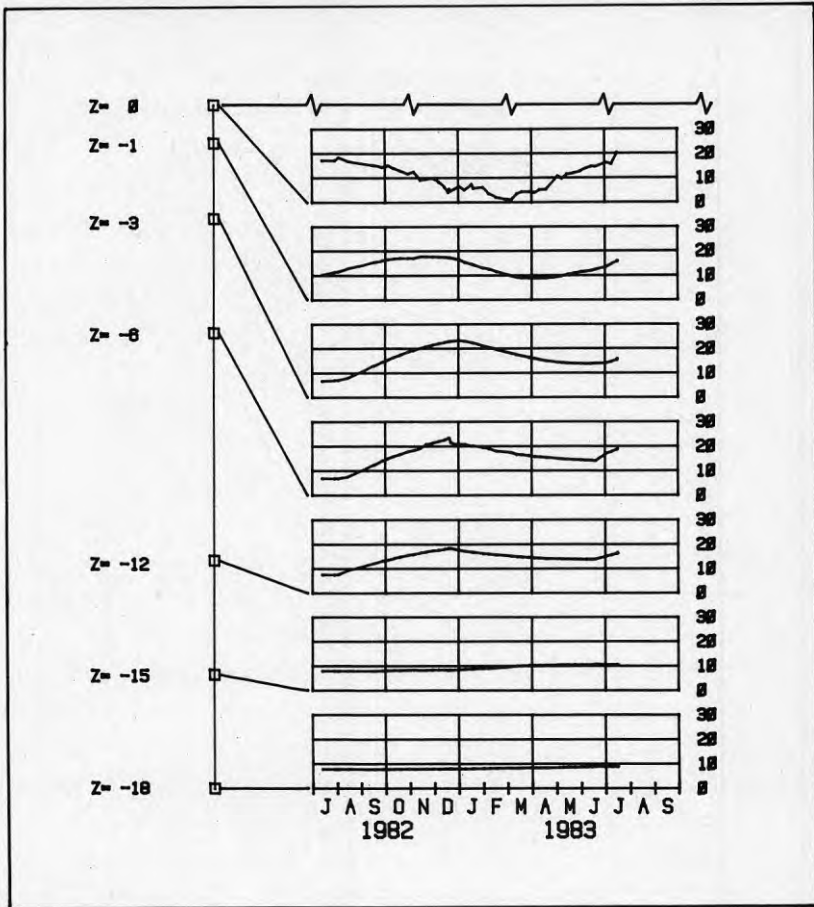


Fig. 6.5 Uppmätta temperaturer för Linje 3, station 1 i 3"-fältet.

Fig. 6.5 Measured temperatures for line 3, station 1 in the 3"-field.

Temperaturens variation med tiden i djupled framgår av fig. 6.5., som redovisar resultat från en station ganska centralt i lagret, med mätare på 0m, 1m, 3m, 6m, 12m och 18 m djup.

Mätarna på 3m och 6m djup visar tämligen likartade förlopp och är i stort sett opåverkade av randeffek-

ter. Mätaren i markytan visar i princip yttermedeltemperaturen och det framgår även att mätaren på 1 m djup uppvisar något låga värden p g a värmeförluster uppåt.

Värmeväxlarnas nedre del återfinns 12 m under mark och mätarna på 15 m och 18 m djup visar på en viss värmeeströmning nedåt. Av denna anledning är temperaturen lägre på 12 m djup än i lagrets mitt. Resultat från övriga temperaturgivare återfinns i appendix. Ur dessa kan värmeförlusterna i horisontal led utläsas.

### 6.3 RESULTAT FRÅN MÄTNING AV PORTRYCK OCH SÄTTNINGAR

Portrycken har uppmätts i sex stationer, en till två gånger i veckan. Under vissa tidsperioder, då temperaturförändringarna i lagret varit små, har portrycken avlästs med större tidsintervall. En av stationerna är belägen i referensytan, där variationerna i portryck endast beror av väderleken. Hela området har antagits ha identiska väderberoende portrycksförändringar och samtliga nedanstående portryck har korrigerats med hjälp av värdena från referensytan och representerar effekten av temperaturändring, konsolidering etc.

Det förtjänas att här påpeka att det är betydligt svårare att mäta portryck med stor noggrannhet än temperatur.


Att de portryckskurvor som redovisas nedan är något taggiga är definitivt inget tecken på dålig noggrannhet.

### 6.3.1 Portryck i U-rörsfältet.

I U-rörsfältet finns en portrycksstation placerad i plan mitt emellan fyra värmväxlare. Mätarna återfinns på 1m, 4.5m, 6m, 9m och 15 m djup. I fig. 6.6. redovisas portryckens variation med tiden för mätarna på 6m, 9m och 15m djup. För samtliga mätare ökar portrycket när jorden värms upp, den kraftigaste ökningen, cirka 17 kPa, noteras för mätaren på 9m djup. Under den tid lagret lämnas orört, februari-december 1982, återgår portrycken till ursprungsnivån för alla mätare, detta trots att temperaturen i lagret då är 19°C. Detta gäller alla mätare utom den på 15m.

Mätaren på 1m påverkas ej av uppvärmningen och på 4,5 m djup stiger portrycken relativt lite under samma tidsperiod.

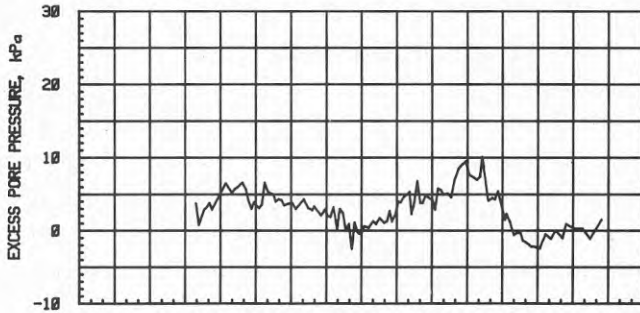
Under andra uppvärmningsperioden stiger portrycken till en början på ett likartat sätt, men efter 4-5 mån blir förloppet något mer oregelbundet och portrycken t o m sjunker eller ökar åtminstone inte under en dryg två-månadersperiod. Därefter ökar portrycken igen, men inte lika kraftigt.

Fig. 6.6 Uppmätta porövertryck för station 1, nivåerna 6m, 9m och 15m i U-rörsfältet. 

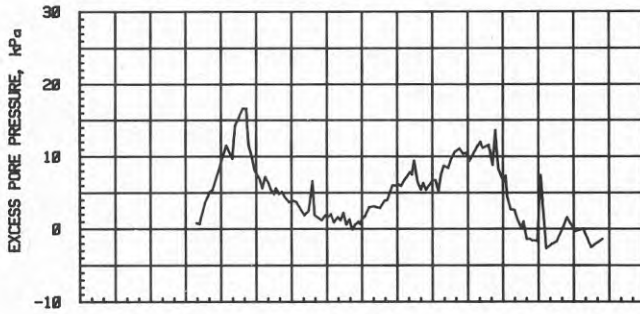
*Fig. 6.6 Measured excess porepressures for station 1, at 6m 9m and 15m depth in the U-tubesfield.*

PORE PRESSURE AND AVERAGE TEMPERATURE

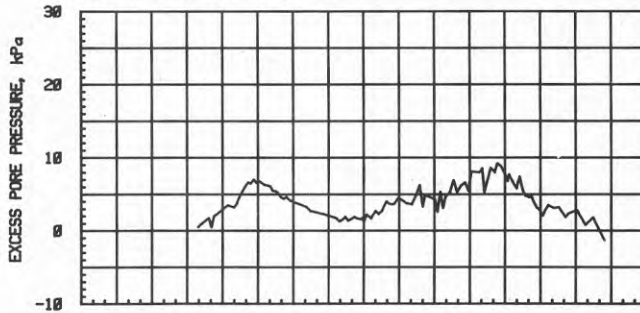
STATION 1; DEPTH 6.0 m



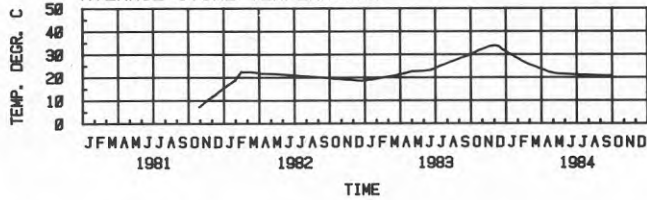
STATION 1; DEPTH 9.0 m



STATION 1; DEPTH 15.0 m



AVERAGE STORE TEMPERATURE



### 6.3.2 Portryck i 3"-fältet.

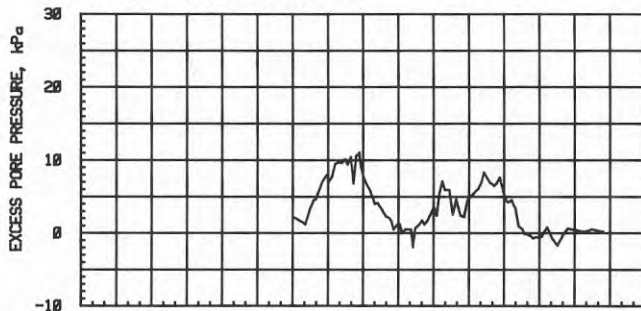
I mitten av 3"-fältet finns en portrycksstation placerad i plan mitt emellan fyra värmväxlare. Mätarna återfinns på 1m, 4.5m, 6m, 9m och 15m djup. I fig. 6.7 redovisas portryckens variation med tiden. Tendensen är densamma som för portrycken i U-rörsfältet. Portrycken stiger i takt med uppvärmningen och sjunker vid urladdning. I stort återgår portrycken till ursprungsnivån efter första urladdningen, dock undantaget mätaren på 15 m djup. Mitt under andra uppvärmningsfasen sjunker portrycken ganska kraftigt för att efter några månader åter börja stiga igen. Portrycken på 1m djup påverkas inte av temperaturhöjningen och på 4,5m djup ändras portrycken med ungefär hälften jämfört med förändringarna på 6m nivån.



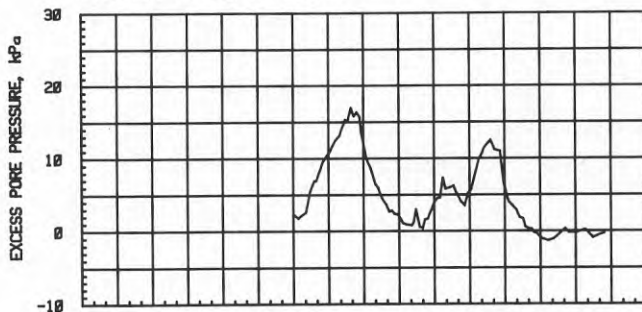
Fig. 6.7. Uppmätta porövertryck för station 1, nivåerna 6m, 9m och 15m i 3"-fältet.

*Fig. 6.7 Measured excess pore pressures for station 1, at 6 m 9 m and 15 m depth in the 3"-field.*

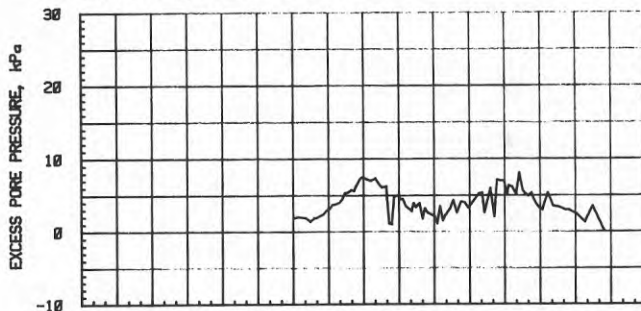
PORE PRESSURE AND AVERAGE TEMPERATURE  
STATION 2; DEPTH 6.0 m



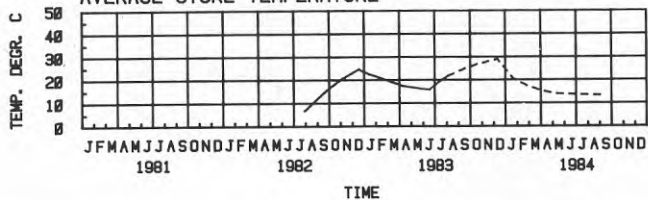
STATION 2; DEPTH 9.0 m



STATION 2; DEPTH 15.0 m



AVERAGE STORE TEMPERATURE



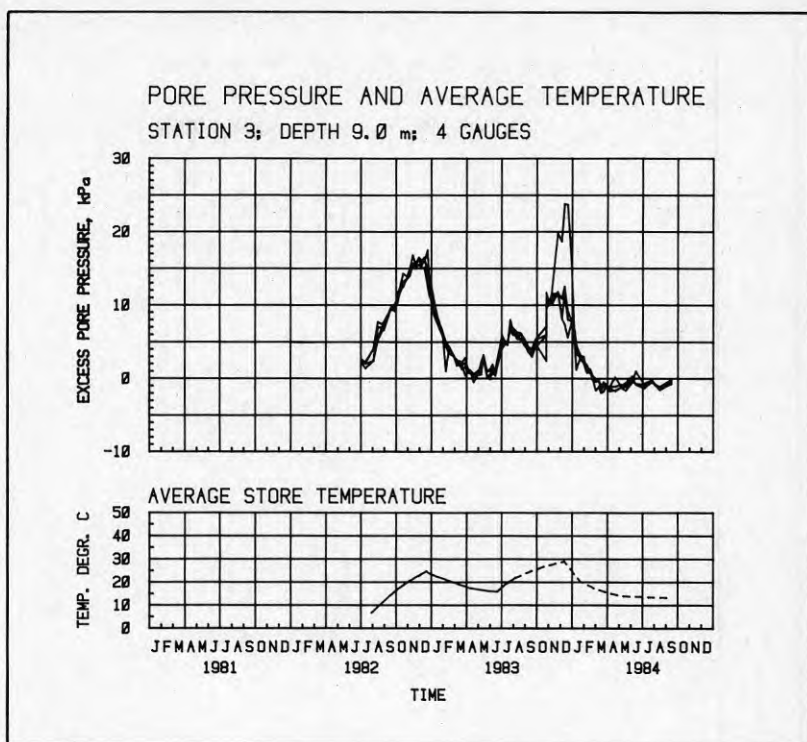


Fig. 6.8 Uppmätta poröverttryck för station 3 i 3"-fältet.

Fig. 6.8 Measured excess pore pressures at station 3 in the 3"-field.

Centralt i 3"-fältet finns också portrycksstation 3, med 4 mätare på 9m djup med 0.5m avstånd placerade på en linje mellan två värmväxlare. Portrycksvariationerna för dess mätare visas i fig. 6.8. De ger alla mycket likartade resultat och följer precis samma trend som beskrivits ovan för övriga mätare. Endast en mätare avviker under en två månaders period i slutet av andra uppvärmningsfasen, då den visar på portrycksökningar som är ungefär dubbelt så stora som övriga mätare.

Intill 3"-fältet finns även två portrycksstationer, station 4,3m utanför, och station 5,6m utanför, med mätare på 1m, 6m, 9m och 15m djup. I fig. 6.9. visas portrycken för en del av dessa nivåer. Därav kan två saker utläsas. För det första är, som väntat, portrycksökningarna mindre ju längre ut från lagret mätaren är placerad. För det andra återgår inte portrycken till ursprungsnivåerna efter avslutad urladdning. Det senare är kanske en naturlig följd av att området utanför lagret endast i ringa grad påverkas av urladdningen.



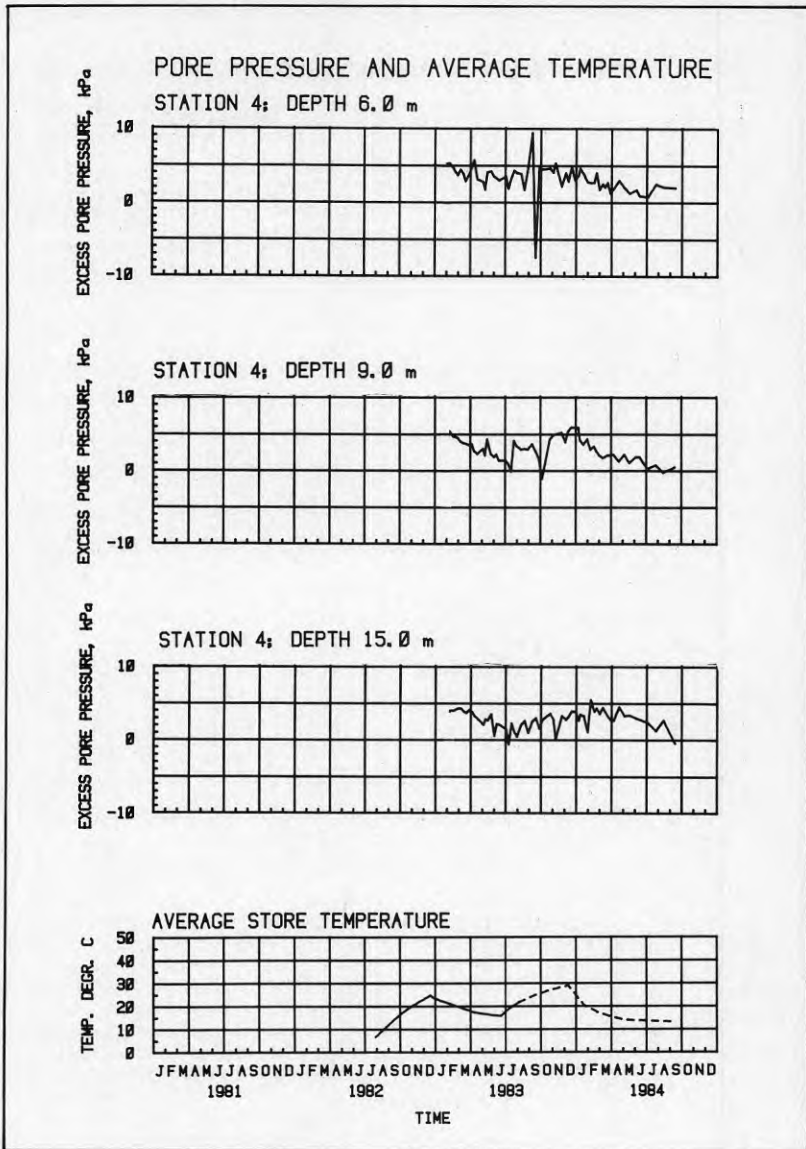


Fig. 6.9a Uppmätta porövertryck för station 4 intill 3"-fältet.

Fig. 6.9a Measured excess pore pressures at station 4 next to the 3"-field.

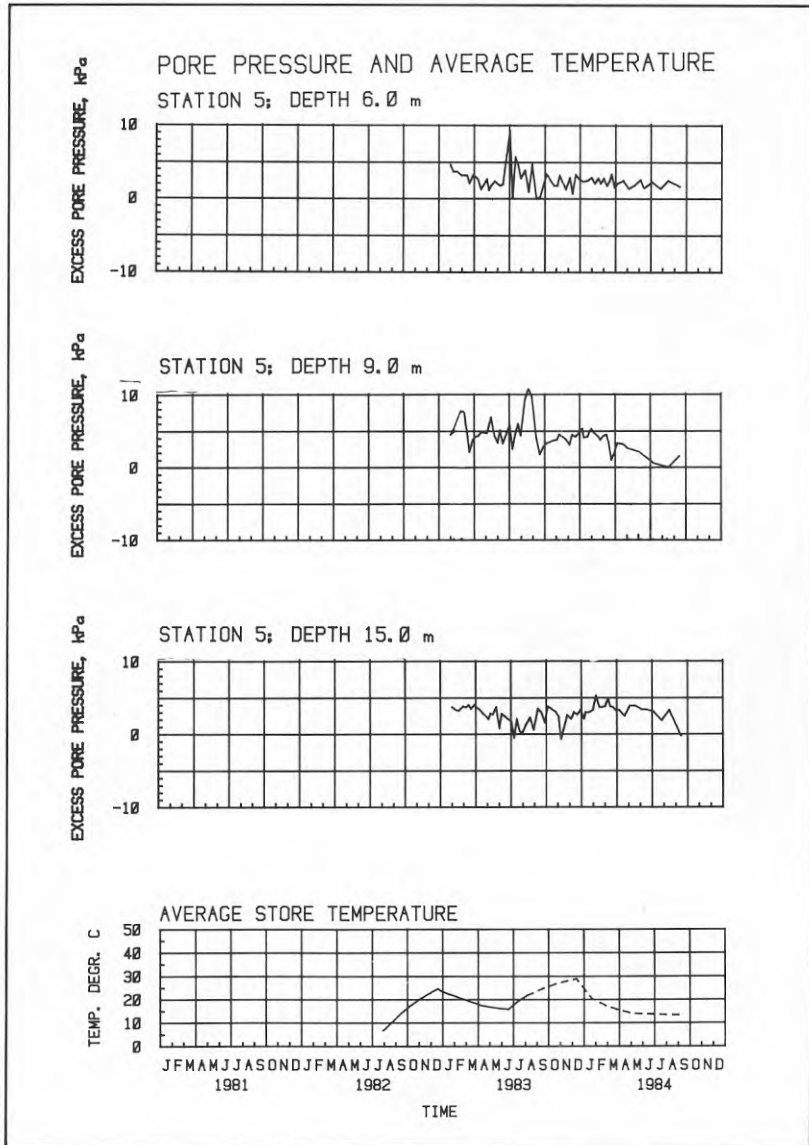


Fig. 6.9b Uppmätta porövertryck för station 5 intill 3"-fältet

Fig. 6.9b Measured excess pore pressure at station 5 next to the 3"-field.

### 6.3.3. Vertikalrörelser U-rörslagret.

På diagrammet , fig. 6,10 redovisas sättningarna nivå-vis mot tiden på så sätt att siffrorna längs diagrammets y-axel avser mätnivå (markytan = +20) och att sedan rörelserna redovisas så att en ruta i höjddled motsvarar 10 mm sättning.

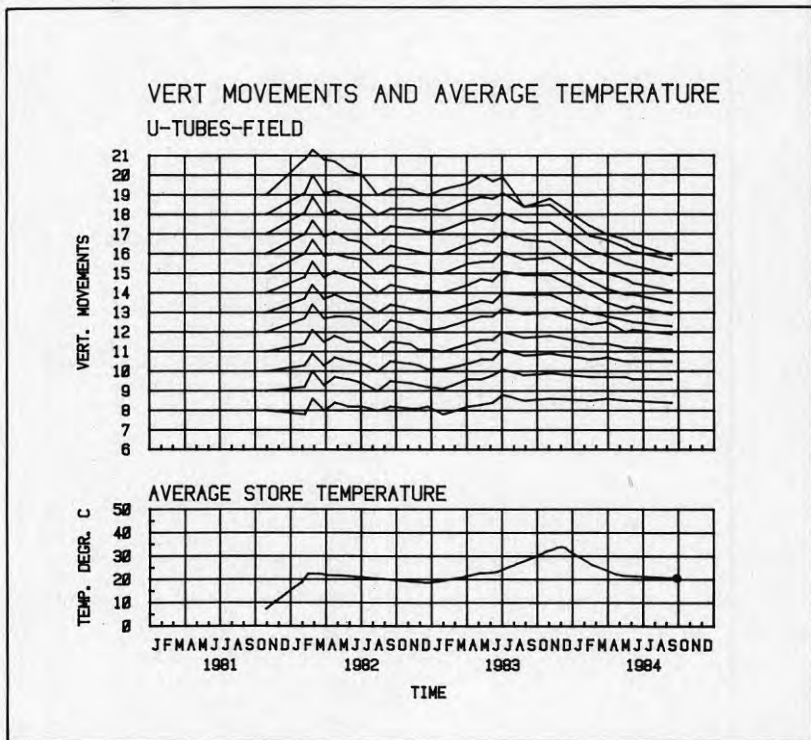


Fig. 6.10a Resultat från sättningmätning med bälgslang i U-rörsfältet.

*Fig. 6.10a Results from settlement observation in the U-tubesfield. The results were obtained from a bellow hose settlement gauge.*

Det framgår av, fig. 6.10. att de uppkomna rörelserna i huvudsak uppkommit i de övre jordlagren. Den totala sättningen av markytan uppgår till cirka 45 mm. Den

första uppvärmningen resulterade i en relativt kraftig svällning, markytan hävdes cirka 25 mm, medan den senare uppvärmningen resulterade i en sättning som ytterligare ökade vid avkylningen av lagret.

#### 6.3.4. Vertikalrörelser 3"-lagret.

Mätningarna, vars resultat visas i fig. 6.10, visar att inom denna lageryta resulterade den första uppvärmningen i en hävning, medan den efterkommande avkylningen knappast gav någon sättning. Den påföljande

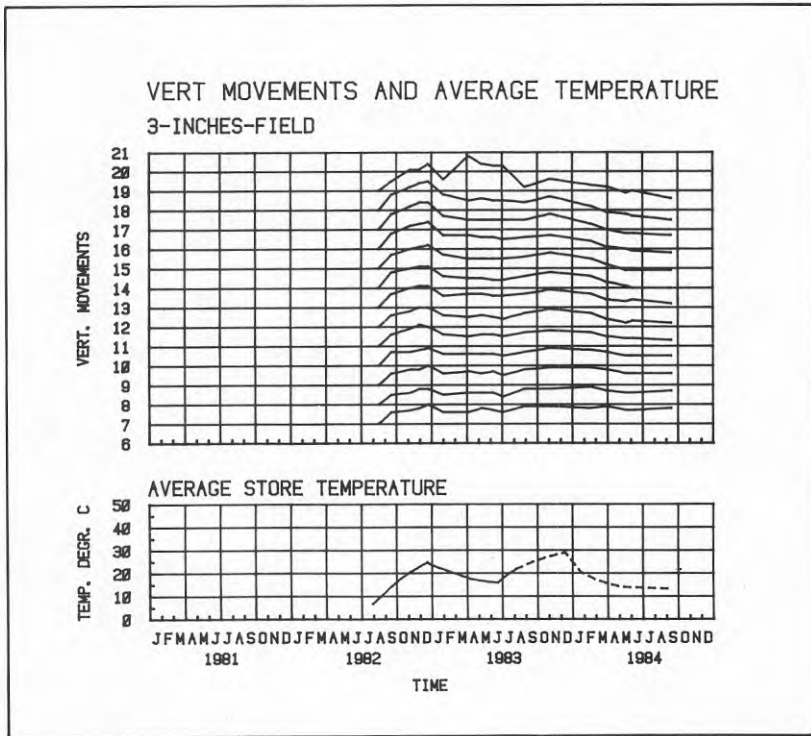


Fig. 6.10b Resultat från sättningmätning med bälgslang i 3"-field.

Fig. 6.10b Results from settlement observations in the 3"-field. The results were obtained from a bellow hose settlement gauge.

uppvärmningen gav en mycket måttlig hävning och den därpå följande avkylningen ledde i stort sett till samma slutliga nivå som innan lagret togs i bruk.

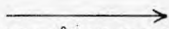
Skillnaden mellan de två lagren är att U-rörslagret hade en längre period då portrycken fick utjämnas utan att någon större sänkning av temperaturern ägde rum efter första uppvärmningsperioden.

#### 6.4. LABORATORIEUNDERSÖKNINGAR

Ostörda jordprover har vid ett flertal tillfällen tagits upp och undersökts på laboratorium med avseende på vattenkvot, hållfasthets- och kompressionsegenskaper.

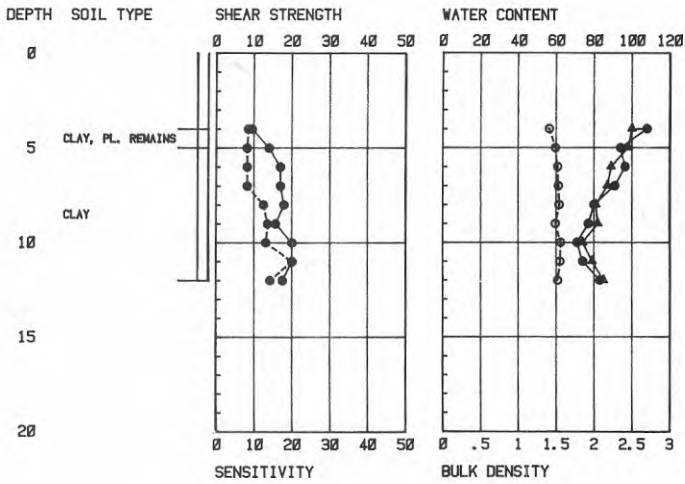
##### 6.4.1. Rutinanalyser

Provtagning gjordes vid tre tillfällen i U-rörssfältet och vattenkvot, flytgräns och hållfasthet bestämdes i laboratoriet. Resultaten redovisas i fig. 6.11. Som framgår av texten i diagrammen gjordes den första provtagningen före försökens början och den andra provtagningen gjordes efter första uppvärmningsfasen. Laboratorieförsöken utfördes då på leran som var cirka 20°C varm. Den sista provtagningen gjordes efter den andra urladdningen. Proverna kylades därefter till +7°C innan laboratorieundersökningarna utfördes, detta för att möjliggöra en jämförelse med egenskaperna sådana de var före försökets början. Dessa resultat diskuteras och analyseras i kapitel 8.

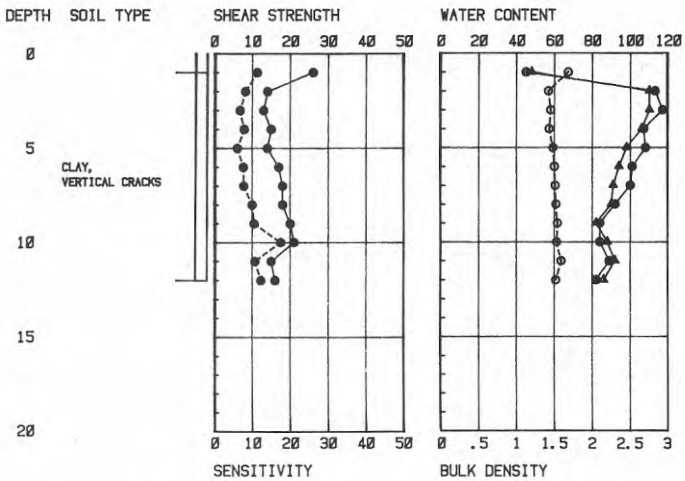
Fig. 6.11. Resultat från rutinundersökningar på prover tagna vid tre olika tillfällen i U-rörssfältet. 

*Fig. 6.11 Results from standard tests in the laboratory on samples from the U-tubesfield taken at three different times.*

LABORATORY TESTS, U-TUBES-FIELD  
TEMPERATURE +7.3 DEGR. C



TEMPERATURE +22.8 DEGR. C



LEGEND

- SHEAR STRENGTH kPa (FALL CONE TEST)
- x— SHEAR STRENGTH kPa (FIELD VANE TEST)
- SHEAR STRENGTH kPa (UNCONFINED COMPRESSION TEST)
- SENSITIVITY (ACC. TO FALL CONE TEST)
- x— SENSITIVITY (ACC. TO FIELD VANE TEST)
- ▲— WATER CONTENT %
- LIQUID LIMIT % (ACC. TO FALL CONE TEST)
- BULK DENSITY t/m³

LABORATORY TESTS, U-TUBES-FIELD  
AFTER TEST PERIOD, MARCH 1985

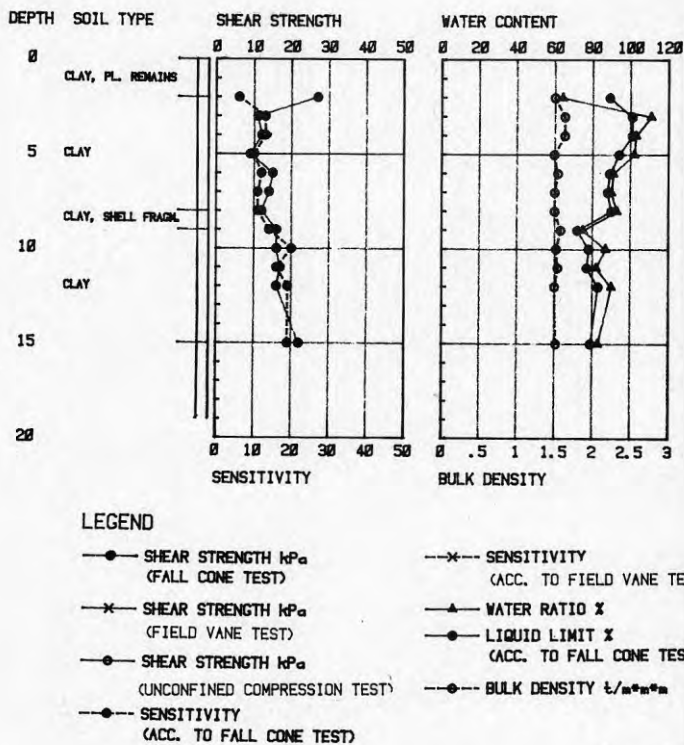



Fig. 6.11.

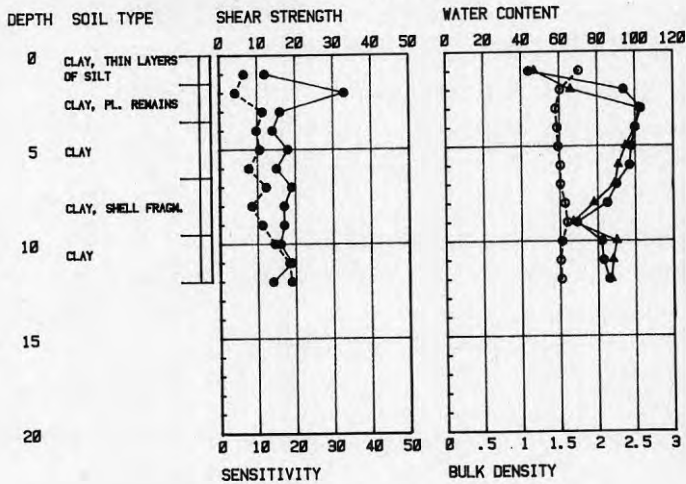
I 3"-fältet gjordes endast två provtagningar, före och efter försökens genomförande. Även för dessa prover gjordes rutinanalyser. Jordens temperatur vid laboratorieförsöken var 7°C i bägge fallen. Resultaten visas i fig. 6.12.

Fig. 6.12. Resultat från rutinundersökningar på prover tagna vid två olika tillfällen i 3"-fältet. 

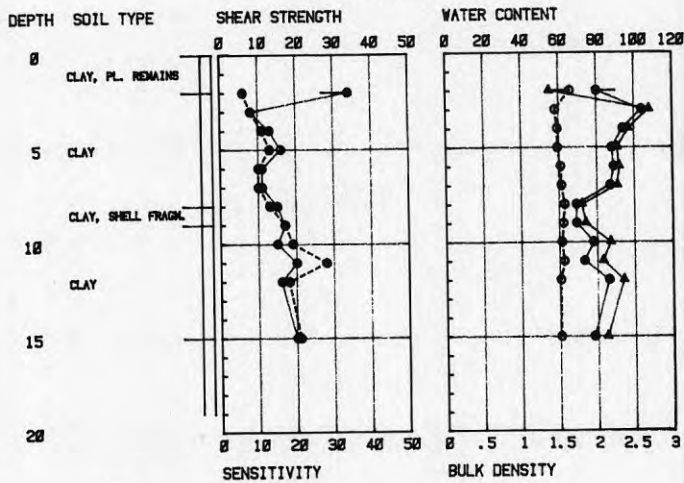
*Fig. 6.12 Results from standard test in the laboratory on samples from the 3"-field taken at two different times.*



LABORATORY TESTS, 3-INCHES-FIELD  
TEMPERATURE +7.3 DEGR. C



AFTER TEST PERIOD; MARCH 1985



LEGEND

- SHEAR STRENGTH kPa (FALL CONE TEST)
- x— SHEAR STRENGTH kPa (FIELD VANE TEST)
- SHEAR STRENGTH kPa (UNCONFINED COMPRESSION TEST)
- SENSITIVITY (ACC. TO FALL CONE TEST)
- x— SENSITIVITY (ACC. TO FIELD VANE TEST)
- ▲— WATER CONTENT %
- LIQUID LIMIT % (ACC. TO FALL CONE TEST)
- BULK DENSITY t/m<sup>3</sup>m

#### 6.4.2. Ödometerförsök.

Under försökstiden utfördes sammanlagt 49 konsolideringsförsök i CRS-ödometer. (CRS-försöken redovisas i Appendix). På liknande sätt som för rutinanalyserna har försök från olika tidpunkter jämförts. Jämförelserna har begränsats till förkonsolideringstryck och ödometermodul.

I fig. 6.13. visas exempel på resultat från ödometerförsök genomförda på prover tagna vid olika tillfällen. Uppkomna skillnader i deformationsegenskaper redovisas och diskuteras i kapitel 8.

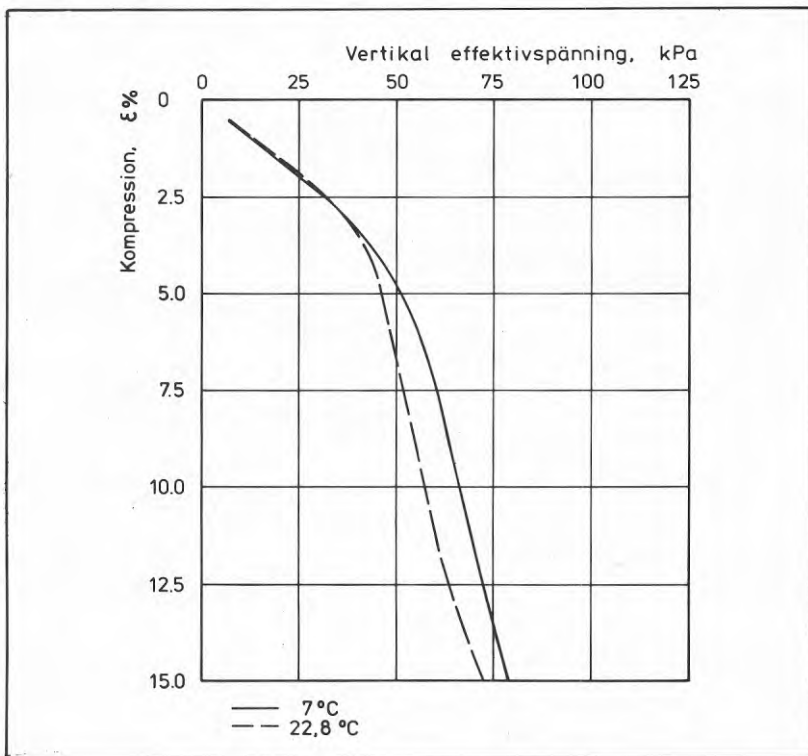


Fig. 6.13. Exempel på resultat från CRS-försök på prover med olika temperaturer.

*Fig. 6.13 Typical results from CRS-test on clay performed at different temperatures.*

7. TEMPERATURENS INVERKAN PÅ JORDMATERIALETS  
HYDRAULISKA KONDUKTIVITET

En ändring av vattnets temperatur förändrar dess viskositet, vilket medför att alla tidsbundna förändringar som beror av vattenströmning påverkas, som t ex konsolidering.

Vid uppvärmning av lera alstras dessutom ett porvattenövertryck pga det ingående vattnets termiska expansion. Konsolideringsförloppet påverkas således, dels genom att permeabiliteten förändras, dels genom att ett extra porvattenövertryck alstras.

Dessutom innebär temperaturförändringar termisk utvidgning eller krympning av porvattnet som i sin tur leder till förändring av det strömmande vattnets mängd.

För en jord där konsolidering till följd av en ytlast pågår och som värms upp, inträffar följande fenomen när temperaturen och portrycken stiger:

- o Vattnets viskositet minskar vilket leder till ett snabbare flöde.
- o Jordens permeabilitet ökar i någon mån genom den av portryckshöjningen förorsakade hävningen.
- o Erforderlig utströmmande vattenmängd ökar genom termisk utvidgning av porvattnet.

Vid en avsvälning av lagret blir förloppet det omvända.

7.1. TEMPERATURENS INVERKAN PÅ PORVATTNETS  
VISKOSITET

Temperatures inverkan på viskositeten för rent vatten kan som bekant beräknas enligt ekvation 7.1.

$$\mu = [1,78 / (1 + 0,0337 \cdot T + 0,00022 \cdot T^2)] \cdot 10^{-6} \quad (7.1)$$

där  $T$  = vattentemperaturen i  $^{\circ}\text{C}$

$\mu$  = kinematisk viskositet i  $\text{m}^2/\text{s}$

Figur 7.1. visar ekvation 7.1. i diagramform.

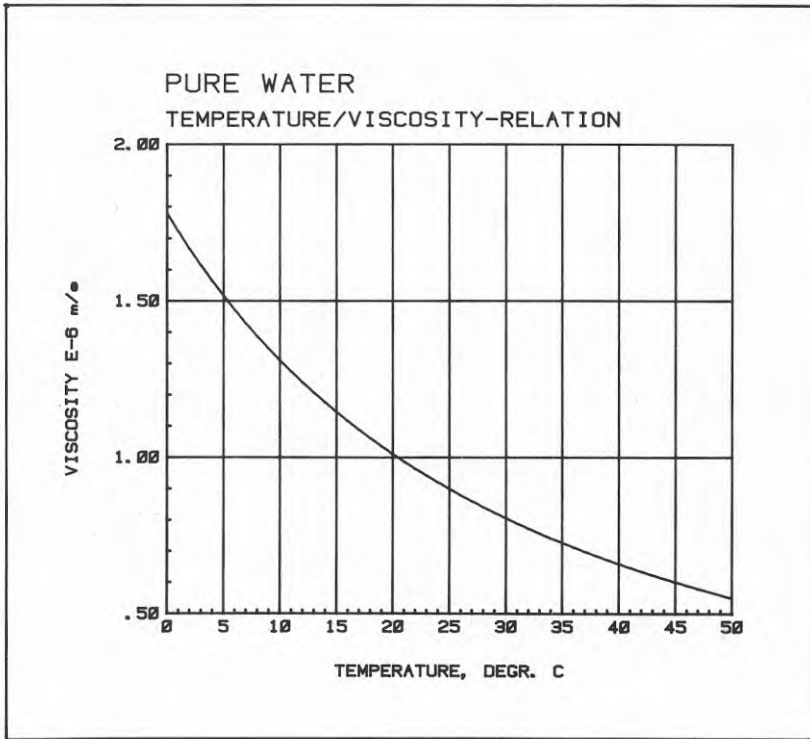


Fig. 7.1. Temperatures inverkan på viskositeten.

Fig. 7.1 The effect of temperature on the viscosity.

## 7.2. JORDRÖRELSESNAS INVERKAN PÅ JORDENS PERMEABILITET

En deformation av ett jordskikt ger genom deformation av jordmaterialets porer en förändring av jordens permeabilitet som enligt Hallagård m.fl (1984) kan tecknas:

$$k = 10^{(f\epsilon)} \quad (7.2)$$

där  $\epsilon$  = relativ deformation

$k$  = permeabilitet

Av ovanstående framgår att den hävning som de förhöjda portrycken vid uppvärmning av en jord ger upphov till, resulterar i en ökning av jordens permeabilitet. Den härav orsakade ökningen är emellertid mycket liten.

## 7.3. PORVATTNETS TERMISKA UTVIDGNING

Sammanställer man tillgängliga tabellvärden beträffande rent vattens volym vid olika temperaturer i relation till volymen vid  $+4^{\circ}\text{C}$  kan sambandet med god noggrannhet tecknas med nedanstående ekvation:

$$V = 1 + 0,0000104 \cdot |T-4|^{1,834} \quad (7.3)$$

där  $V$  = relativa volymen

$T$  = temperatur  $^{\circ}\text{C}$

Figur 7.2. visar ovanstående ekvation i diagramform.

En uppvärmning från  $7$  till  $25^{\circ}\text{C}$  ger enligt ovanstående en volymökning

$$(0,0000104 \cdot 21^{1,834} - 0,0000104 \cdot 3^{1,834}) = 2,7 \text{ }^{\circ}/_{\infty}$$

vilket innebär för en lera av den aktuella typen en volymökning av porvattnet som är cirka  $1.9 \text{ liter/m}^3$  lera.

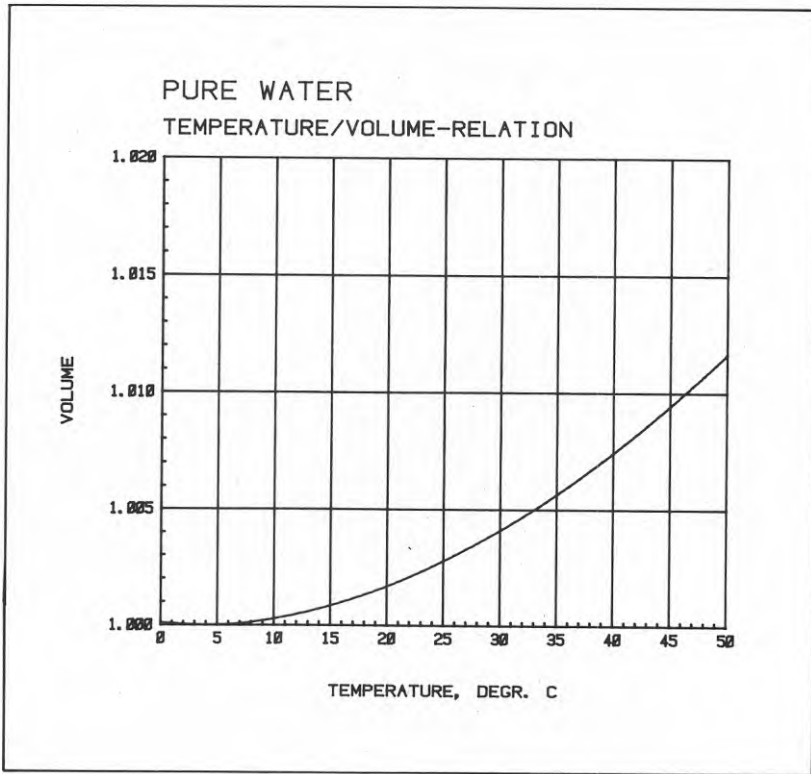


Fig. 7.2. Relativ volymförändring av porvattnet som funktion av temperaturen.

Fig. 7.2 *The relative change in volume of water as a function of temperature.*

Fältförsöken, så som de genomfördes utgör egentligen fyra kompletta cykler av uppvärmning/avkylning, två försök i vardera fälten. Medeltemperaturkurvorna för de bägge lagren visas ånyo i figur 8.1. Det är viktigt att notera att den första temperaturcykeln i U-rörsfältet innebär en uppvärmning till  $22^{\circ}\text{C}$  som tar cirka 3.5 månad, medan motsvarande värden för 3"-fältet är  $24^{\circ}\text{C}$  och 4.5 månad. Förhållandena var således relativt lika för de bägge fälten under första uppvärmningen. Under nästa fas får U-rörsfältet "vila" och temperaturen sjunker under en niomånadersperiod med

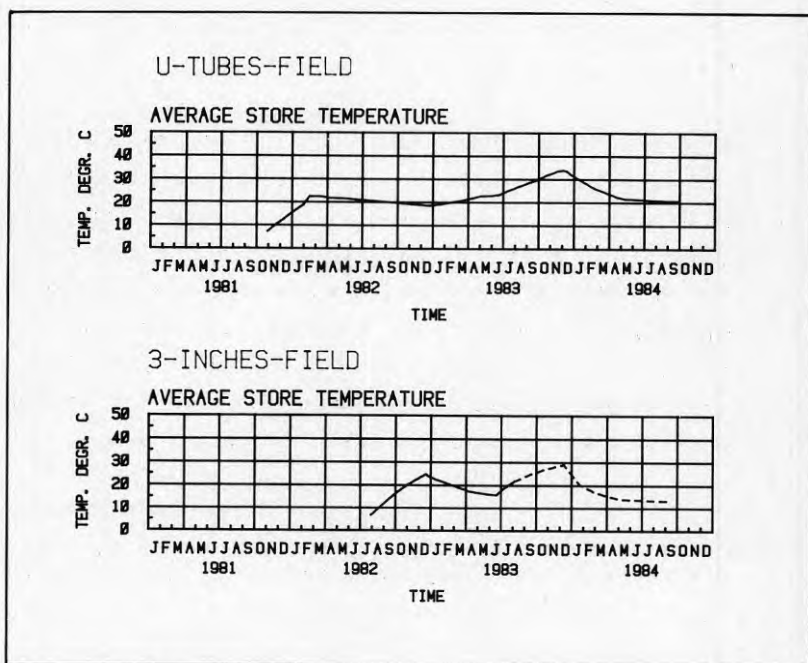


Fig. 8.1 Medeltemperaturens variation med tiden för de bägge värmelagren.

Fig. 8.1 Variation of average storage temperature for the U-tubesfield and the 3"-field.

endast 3°C till 19°C. 3"-fältet däremot kyls aktivt genom en urladdning och på sex månader sjunker medeltemperaturen med 8°C till 16°C.

Under andra uppvärmningsfasen stiger temperaturen i de bägge lagren med cirka 15°C, till 34°C respektive 29°C. För U-rörsfältet sker denna uppvärmning under 12 månader, medan motsvarande uppvärmning för 3"-fältet sker på halva tiden, 6 månader.

Den sista avkylningen för de bägge fälten tar cirka 6 månader och temperaturen sjunker med cirka 15°C till 20°C respektive 14°C. U-rörsfältet är i bruk cirka 30 månader medan 3"-fältet, som startades senare är i bruk cirka 20 månader. Den totala försökstiden är således cirka 50% längre för U-rörsfältet jämfört med 3"-fältet.

Nedan behandlas första och andra uppvärmnings/avkylningsfaserna var för sig och inträffade förändringar av de geotekniska parametrarna behandlas för respektive fält. Därefter analyseras förkonsolideringstryckets betydelse för uppkomna portryck och sättningar. Avslutningsvis behandlas det resultat som kan förväntas efter ett stort antal på varandra följande temperaturcykler. Inledningsvis behandlas de dräneringsförhållanden som normalt råder i en lerprofil.

#### 8.1 TYPEXEMPEL PÅ EN PORTRYCKSPROFIL I VÄSTSVERIGE

I en lerprofil av den typ som återfinns inom försöksområdet ligger den övre grundvattennivån ofta i nära anslutning till underkant torrskorpa. Denna nivå är emellertid ej liktydig med den övre dräneringshorisonten. Berntson (1983) har visat att oberoende av



eventuellt artesiskt tryck i botten, eller eventuell kraftig avsänkning av trycket i botten, så är portrycket i de övre 3-5 metrarna i stort sett hydrostatiskt, se fig. 8.2. För mycket lösa leror kan denna nivå eventuellt vara något grundare. Det innebär att den övre dräneringsfronten sannolikt ligger 3-5 m under markytan. Detta är viktigt att känna till, när utjämnningen av de uppkomna portrycken diskuteras.

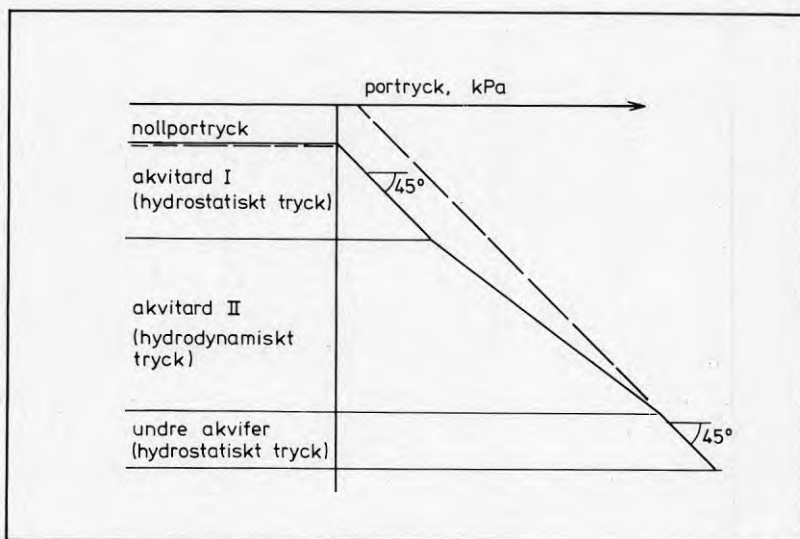


Fig. 8.2 Indelning av en lerprofil i akvitard I, akvitard II och akvifär.

Fig. 8.2 Definition of akvitard I, akvitard II and aquifer in a soil profile.

## 8.2. PORTRYCK OCH DEFORMATIONER UNDER FÖRSTA UPPVÄRMNINGEN/AVKYLNINGEN

### 8.2.1. U-RÖRS FÄLTET

Under uppvärmningen av jorden stiger portrycken beroende på att vattnet utvidgas och denna utvidgning motverkas av jordskelettet. Om porvattnet betraktas som inkompressibelt är det uppkomna portrycket lika med den spänning som behövs för att i materialet, med en given modul, åstadkomma erforderlig svällning. I de här aktuella fallen är uppvärmningsförloppet utdraget i tiden och i och med att portryck börjar genereras sker en strömning ut ifrån lagret. Att en strömning av vatten ut ifrån lagret sker framgår också av de sjunkande portrycken under utjämningsfasen.

Att den i avsnitt 8.1. diskuterade dräneringshorisonten ligger djupare än en meter styrks av de på djupen 4.5 m och 6 m uppmätta portrycken, som är relativt små jämfört med portrycken på 9 m, se fig. 6.7, trots att temperaturökningarna är av samma storleksordning för de tre aktuella djupen. En påtaglig dränering sker således på 4.5 m och 6 m nivån under själva uppvärmningen.

En avlastningsmodell kan med kännedom av portrycksökningen och svällningen för ett visst skikt beräknas med ekv. 8.1.

$$\Delta h = (\Delta u / M) \cdot \Delta z \quad (8.1)$$

där  $\Delta u$  = portrycksökning  
 $\Delta h$  = svällning för skiktet  
 $\Delta z$  = skiktets tjocklek  
 $M$  = deformationsmodul

Genom att ur fig. 6.6 och 6.10 avläsa portrycksökningar och svällningar kan följande moduler beräknas.

Tabell 8.1 Beräkning av Modul vid avlastning

nivå	$\Delta u$ (kPa)	$\Delta s$ (mm)	h (m)	M (MPa)
4.5	5			
3-5		2.1	2.0	5
6	7			
5-7		1.5	2.0	9
9	17			
8-10		2.3	2.0	15

Dessa värden på modulen, 5 - 15 MPa, är av den storleksordning som man kan förvänta sig i denna typ av lera. Omvänt kan sägas att med kännedom om modulen, kan de av en viss temperaturökning genererade portrycken beräknas.

När lagret lämnas att "vila", utjämnas portrycken helt och svällningen återgår. Således är spänningsnivådensamma som före uppvärmningen och vad deformationerna beträffar har även de helt återgått till ursprungsläget. De moduler som fås för denna spänningsökning är således av samma storleksordning som redovisas i tabell 8.1.

#### 8.2.2 3"-fältet.

Resultatet av uppvärmningen av 3"-fältet är snarlikt det från U-rörsfältet. Moduler beräknade utifrån uppmätta portryck och svällningen blir för djupen 4.5 m, 6 m och 9 m 6 MPa, 14 MPa respektive 21 MPa, vilka dock är 1.5 till 2 gånger större än vad som erhöles i

U-rörsfältet. Modulerna beräknade utifrån urladdningsfasen är av samma storleksordning som för uppvärmningsfasen.

Att notera är dock att i detta fallet sker urladdningen såpass fort att vissa portryck under lagret kvarstår och det visar sig att en hävning på cirka 5 mm på nivån 12 m kvarstår, medan svällningen av jorden inom värmelagret helt återgår.

### 8.3. PORTRYCK OCH DEFORMATIONER UNDER ANDRA UPPVÄRMNINGEN/AVKYLNINGEN

#### 8.3.1 U-rörsfältet

Uppvärmningen under denna fas är något långsammare än under första fasen och följaktligen stiger portrycken långsammare. Efter fyra månader börjar portrycken plötsligt att sjunka. Detta fenomen kan iakttas på samtliga nivåer utom 1 m. Visserligen minskar panneffekten något då, men detta kan inte helt förklara det inträffade. Det verkar som om dräneringsvägarna plötsligt förkortades. Vid provtagning av lera, när medeltemperaturen i lagret var 22°C, återfanns i några tuber vertikala "sprickplan" där det för ögat tycktes finnas små mängder fritt vatten. Denna typ av vertikala plan är inte ovanlig i lera i Göteborgstrakten, men är vid normal temperatur (4°C) till synes torra. Triaxialförsök och ödometerförsök på omsorgsfullt monterade prover har visat att dessa plan ej påverkar vare sig hållfasthets- eller deformationsegenskaperna. Vid denna uppvärmning verkar det som om dessa plan i viss mån skulle kunna fungera som dräneringskanaler.

Under första delen av andra uppvärmningsfasen sker en viss hävning. Dock beror denna hävning till största delen av en svällning av jorden under värmelagret. Det verkar som om den svällning som borde ske i själva värmelagret motverkas av en ökad kompression, till följd av försämrade deformationsegenskaper, i sin tur orsakade av temperaturökningen.

Vid årskiftet 82/83 börjar sättningar att utbildas, trots att temperaturen fortfarande stiger i lagret. Fram till dess uppvärmningen avbryts, då medeltemperaturen i lagret är 34°C, sker en kompression av jordlagren mellan 2 m och 7 m. Från 9 m djup och nedåt sker under samma tidsperiod en obetydlig svällning.

När urladdningen påbörjas ökar sättningarna kraftigt och är på 2 m-nivån vid slutet (20°C) 3 cm relativt ursprunglig markyta. Som mest är kompressionen 0.5% i de översta 10 m av jordprofilen. Även i värmelagrets underkant återgår portrycken till ursprungsvärdena, men portrycksökningen har varit alltför kortvarig för att någon kvarstående kompression skall utbildas.

### 8.3.2 3"-fältet.

Portrycksuppbyggnaden i 3"-fältet under andra uppvärmningsfasen är snarlik den för U-rörsfältet. Temperaturökningen är något större varför följaktligen portrycken stiger något fortare.

Även här sjunker portrycken ganska kraftigt mitt i uppvärmningsperioden trots att effekten i stort är densamma under hela perioden. Förhållandet är likadant för samtliga mätare utom den på 1 m djup.

Under uppvärmningen till 29°C sker en viss hävning,

till största delen orsakad av en svällning av jorden under värmelagret, där temperaturen även stiger. För jorden 8-10 m sker ingen kompression utan det verkar här, som för U-rörsfältet, som om svällningen motverkas av en kompression till följd av försämrade deformationsegenskaper.

Under den avslutande avkylningsfasen ner till 13°C utbildas en viss sättning, för 2 m nivå 0.5 cm totalt, vilket endast är 20% av sättningen i U-rörsfältet. Den största utbildade kompressionen är av storleksordningen 1 0/00. I de djupare lagren, större än 10 m djup, återgår hävningen, då portrycken utjämnas till den nivå som rådde innan andra temperaturhöjningen påbörjades.

#### 8.4 FÖRÄNDRING AV VATTENKVOTER OCH SKJUVHÅLLFASTHETER

Provtagning gjordes i U-rörsfältet före försöken, efter första uppvärmning/urladdning samt efter försökens avslutande. I 3"-fältet gjordes provtagning endast före respektive efter värmelagringen. De i laboratoriet uppmätta hållfastheterna, sensitiviteterna, vattenkvoterna, finlekstalen och densiteterna har sedan jämförts för de olika fälten vid olika tidpunkter. Resultatet av denna jämförelse framgår för U-rörsfältet av fig. 8.3 och för 3"-fältet av fig. 8.4.

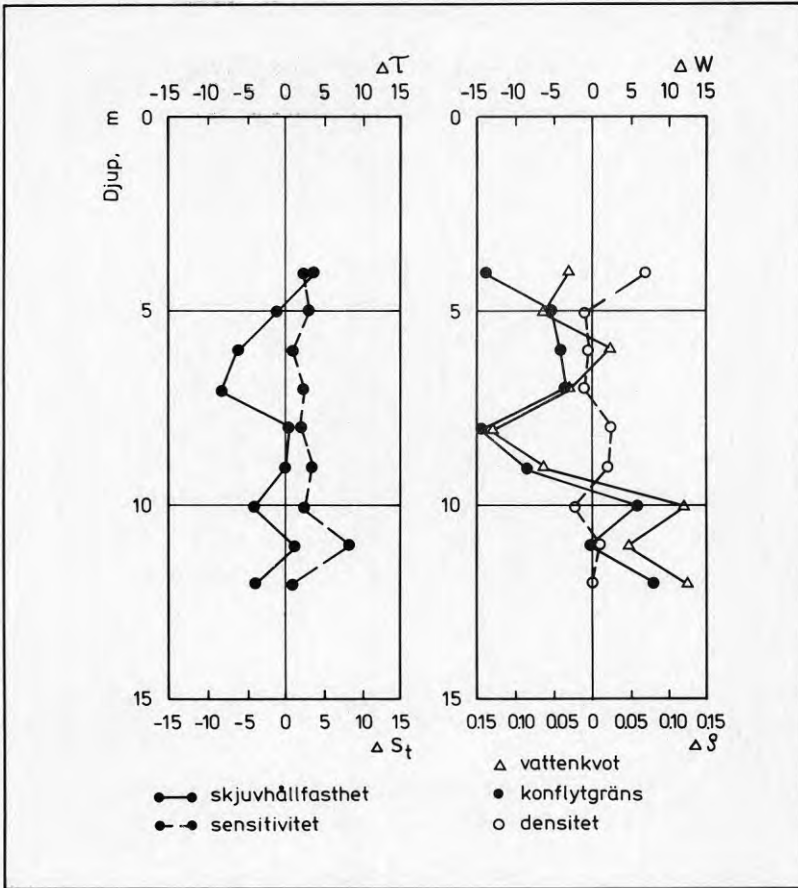


Fig. 8.3a Förändring av skjuvhållfasthet, sensitivitet, vattenkvoter etc mellan de olika provtagningarna i U-rörsfältet. Juli -81 - mars -82.

Fig. 8.3a Change in shear strength, sensitivity, water contents etc, between the different times of sampling in the U-tubesfield. July -81 - March -82.

Beträffande hållfastheterna kan noteras att en viss minskning sker då temperaturen ökas. Vattenkvoterna uppvisar större, i viss mån oregelbundna, variationer. Mot bakgrund av vattenkvotens naturliga variation i en lera torde det vara svårt att dra några långt-

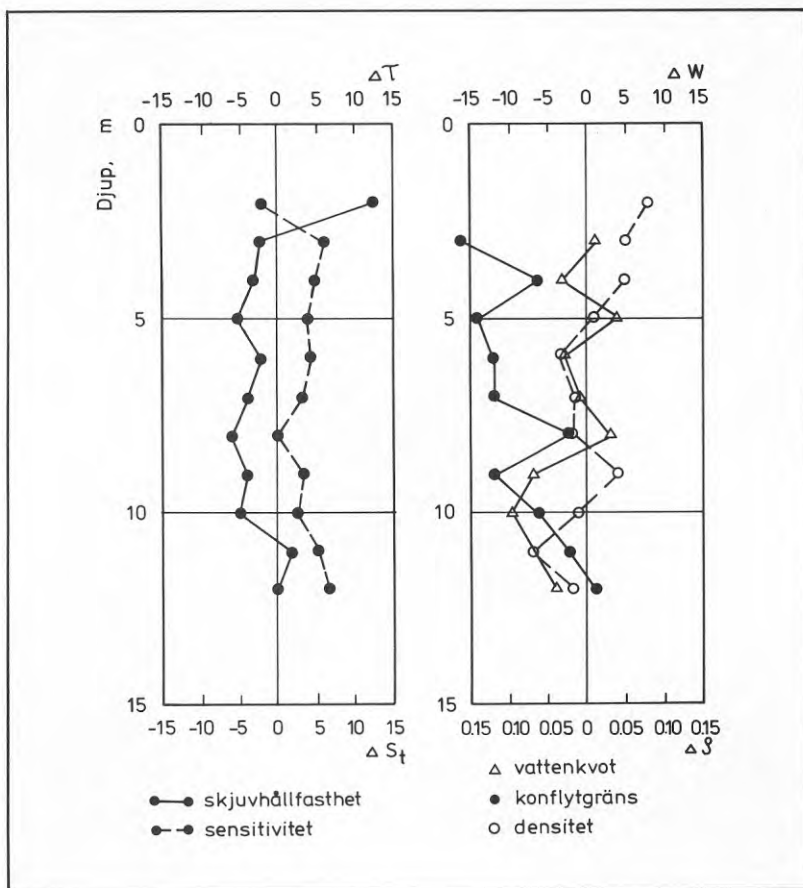


Fig. 8.3b Förändring av skjuvhållfasthet, sensitivitet, vattenkvoter etc mellan de olika provtagningarna i U-rörsfältet. Mars -82 - mars -85.

Fig. 8.3b Change in shear strength, sensitivity, water contents etc, between different times of sampling in the U-tubesfield.

gående slutsatser på basis av de uppmätta vattenkvoterna.

För att åskådliggöra sambandet mellan sättningar och utpressad mängd porvatten, d v s efter en uppvärmnings/avsvlningsfas när portrycket har sjunkit till det ursprungliga värdet, kan följande exempel vara av



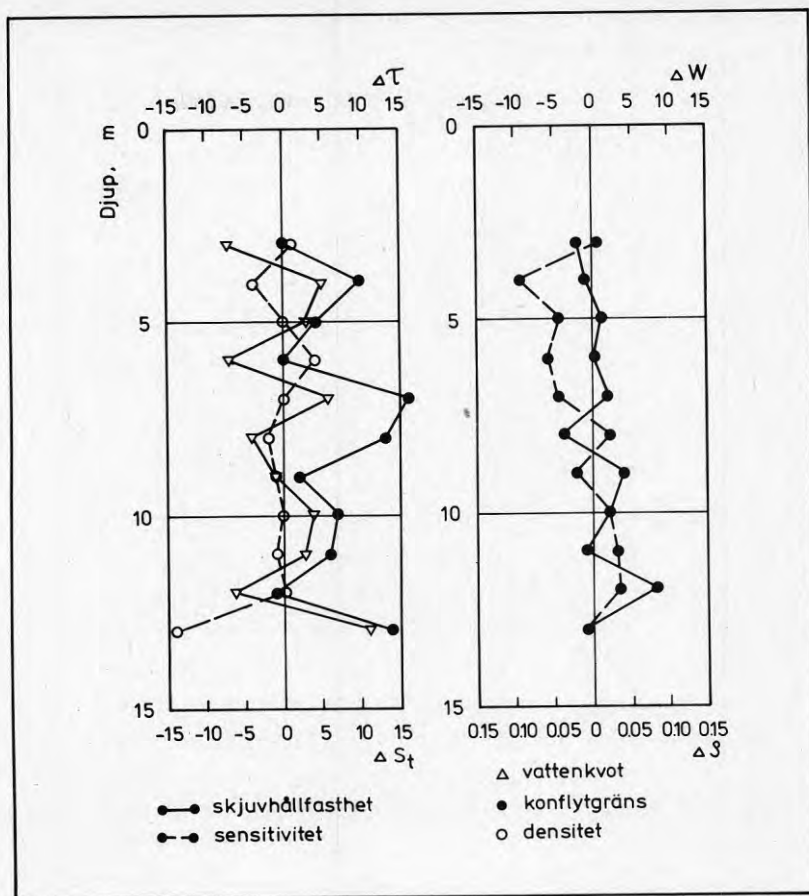


Fig. 8.4 Förändring av skjuvhållfasthet, sensitivitet, vattenkvoter, etc mellan de olika provtagningsarna i 3"-fältet. Mars -82 - mars -85.

Fig. 8.4 Change in shear strength, sensitivity, water contents etc, between the different times of sampling in the 3"-field. March -82 - March -85.

värde. U-rörslagret har totalt värmts från 7°C till cirka 34°C och därefter fått svalna till cirka 21°C. Om den volymetriska vattenkvoten sättes till 70%,

innebär detta för ett 10 m tjockt lerskikt att porvattenvolymen ökat med

$$\left(1 - \frac{1,005322}{1,000078}\right) \cdot 0,7 \cdot 10 = 0,037 \text{ m}^3$$

under hela uppvärmningen.

Under avsvälningen har på motsvarande sätt volymen minskat:

$$\left(1 - \frac{1,005322}{1,001878}\right) \cdot 0,7 \cdot 10 = 0,024 \text{ m}^3$$

Detta innebär en bestående "ökning" av porvattenvoly-  
men med  $0.013 \text{ m}^3/\text{m}^2$ , som då skulle svara mot en häv-  
ning av markytan på 13 mm. Eftersom det i U-rörssystemet  
under tiden skett en sättning av jorden i de vatten-  
mättade lagren av cirka 31 mm innebär detta en avgång  
av porvatten som totalt för jordskiktet skulle vara  
cirka  $0.044 \text{ m}^3/\text{m}^2$ , d v s en volymminskning av vatten-  
kvoten med 6 o/oo, motsvarande cirka 1.6% vatten-  
kvot.

Beräknas medeltalen för vattenkvoterna i U-rörslagret  
före och efter försökstiden för nivåerna 3-10 m fås en  
sänkning av 1.5%.

P g a det relativt låga antalet värden är ovanstående  
medeltalsberäkning något osäker men visar ändå att ett  
samband existerar.

## 8.5 FÖRÄNDRINGAR AV FÖRKONSOLIDERINGSTRYCKET

Ödometerförsök har för U-rörsfältet utförts vid tre tillfällen (före värmelagring, efter första uppvärmning/avkylning och efter avslutad värmelagring) och för 3"-fältet vid två tillfällen (före respektive efter värmelagring). De ödometerförsök som utfördes efter första uppvärmning/urladdning för U-rörsfältet utfördes vid 22°C, övriga försök vid normal jordtemperatur, 7°C.

Skillnaden i uppmätta förkonsolideringstryck redovisas i fig. 8.5. Det skall här påpekas att de skillnader som redovisas i fig. 8.5. inte skall uppfattas som absolut korrekta, utan får snarare ses som en indikation på hur förkonsolideringstrycket har påverkats. Det framgår dock klart att en uppvärmning från 7°C till 22°C medför en sänkning av förkonsolideringstrycket av storleksordningen 5-10 kPa.

En ytterligare temperaturökning ger sannolikt en ytterligare sänkning av förkonsolideringstrycket. Någon bestämning av förkonsolideringstrycket vid denna temperatur har dock icke gjorts. Den sista bestämningen av förkonsolideringstrycken i U-rörsfältet visar på en svag höjning av förkonsolideringstrycket i de övre 8 metrarna och en viss sänkning på större djup. Man måste då komma ihåg att proven i laboratoriet kylde ner till 7°C innan försöken genomfördes, trots att jordens temperatur in situ då var drygt 20°C.

Försöken som utfördes på lera från 3"-fältet visar på obetydliga förändringar av förkonsolideringstrycket.

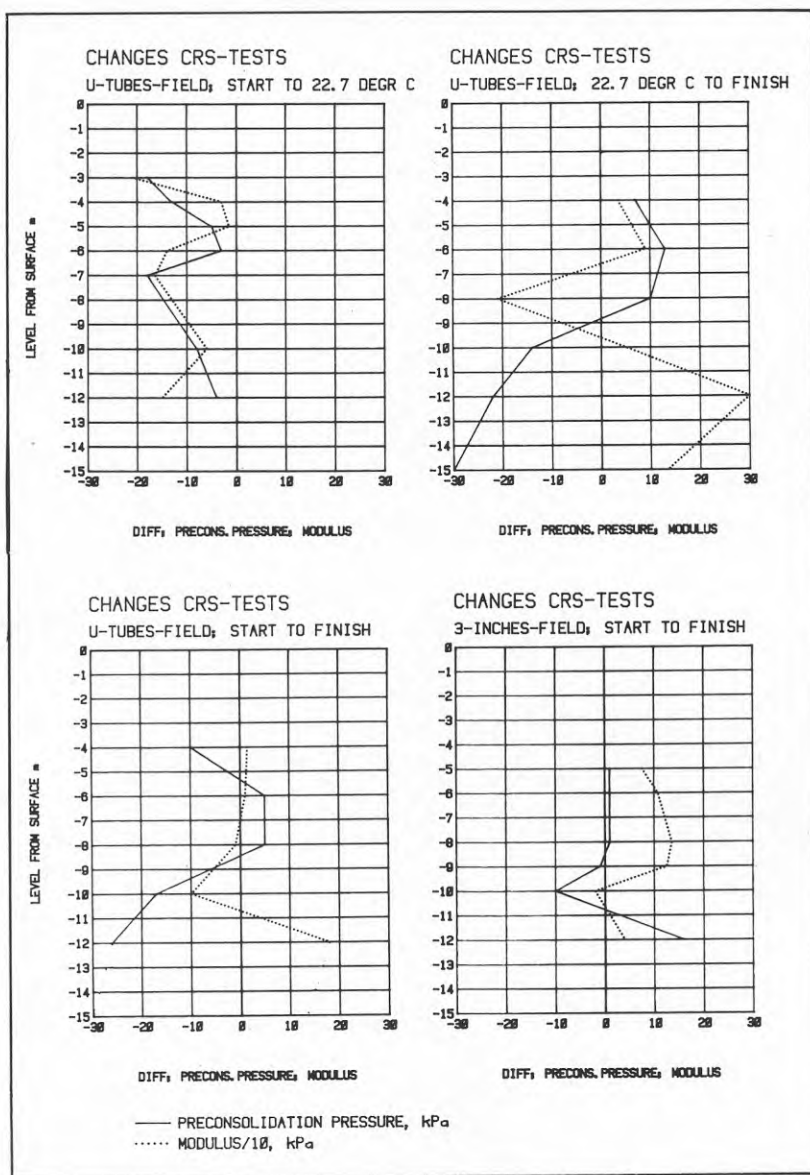


Fig. 8.5 Förändring av förkonsolideringstrycken mellan provtagningarna för de bägge provfälten.

Fig. 8.5 Change in preconsolidation pressure between the different times of sampling for both fields.

Resultaten från CRS-försöken tyder på en obetydlig påverkan på förkonsolideringstrycken när temperaturen återställs till den ursprungliga temperaturen (ca 7°C) när det gäller de högre nivåerna (med till 6 - 7 m). Därunder finns en tendens till permanent sänkning av förkonsolideringstrycken, dock ej så stor att effektivtrycket på någon nivå underskrids. Sättningsmätningarna efter försökstiden, som diskuteras senare, tyder på att en så stor sänkning av förkonsolideringstrycket ägt rum att det rådande effektivtrycket, efter portryckets utjämning, överskrider ca 80% av förkonsolideringstrycket, och således ge upphov till krypdeformationer (sekundärsättningar). Sekundärsättningarna kännetecknas av så låg deformationshastighet att något porövertryck ej uppstår. Den i detta fallet relativt snabba deformationen kan förklaras med den förhöjda jordtemperaturen och därmed låga viskositeten hos porvattnet.

De CRS-försök som utfördes på varm (22,7°C) lera visade dock en klar sänkning av förkonsolideringstrycken av en sådan storlek att rena konsolideringssättningar under ogynnsamma förhållande kan uppkomma.

## 8.6. KOPPLING MELLAN FÖRKONSOLIDERINGSTRYCK OCH SÄTTNINGAR FÖR FÄLTFÖRSÖKEN

Jordprofilen i försöksfältet är svagt överkonsoliderad. När jorden värms upp första gången från 7°C till 22°C försämras deformationsegenskaperna något, förkonsolideringstrycket minskar. Under uppvärmningen ökar emellertid även porvattentrycket vilket medför att effektivspänningen minskar. Under denna period häver sig marken något. Av detta kan man dra slutsatsen att effektivspänningarna hela tiden är mindre än förkonsolideringstrycket, se fig. 8.6a. Detta gäller bägge försöksfälten.

I U-rörsfältet sker sedan en utjämning av portrycken under i princip konstant temperatur. Effektivspänningarna ökar allteftersom portrycken minskar. De uppkomna sättningarna svarar mot en hög modul, 10-15 MPa, några påtagliga primära konsolideringssättningar uppstår inte och förkonsolideringstrycket överskrids endast obetydligt, se fig. 8.6. Minskningen av förkonsolideringstrycket till följd av den förhöjda temperaturen har konstaterats i laboratoriet.

Förhållandena i 3"-fältet under första urladdningen är likartade. Temperaturhöjningen är inte tillräckligt stor för att sänka förkonsolideringstrycket så mycket att påtagliga konsolideringssättningar uppstår.

Under andra uppvärmningsfasen i U-rörsfältet börjar sättningar att utbildas mitt i uppvärmningsfasen och vid uppvärmningsfasens slut uppvisar de översta 7 till 8 metrarna en kompression. Av portryckskurvorna, fig. 6.6., framgår att portrycksökningen på nivåerna 4.5 m och 6 m är klart lägre än på 9 m. Effektivspänningen på dessa nivåer är, relativt utgångsvärdet högre än på 9 meter. Om överkonsolideringen i kPa räknat är ungefär densamma på de olika djupen är det då naturligt att förkonsolideringstrycket överskrids först i de övre lagren och att kompressionen börjar där eftersom

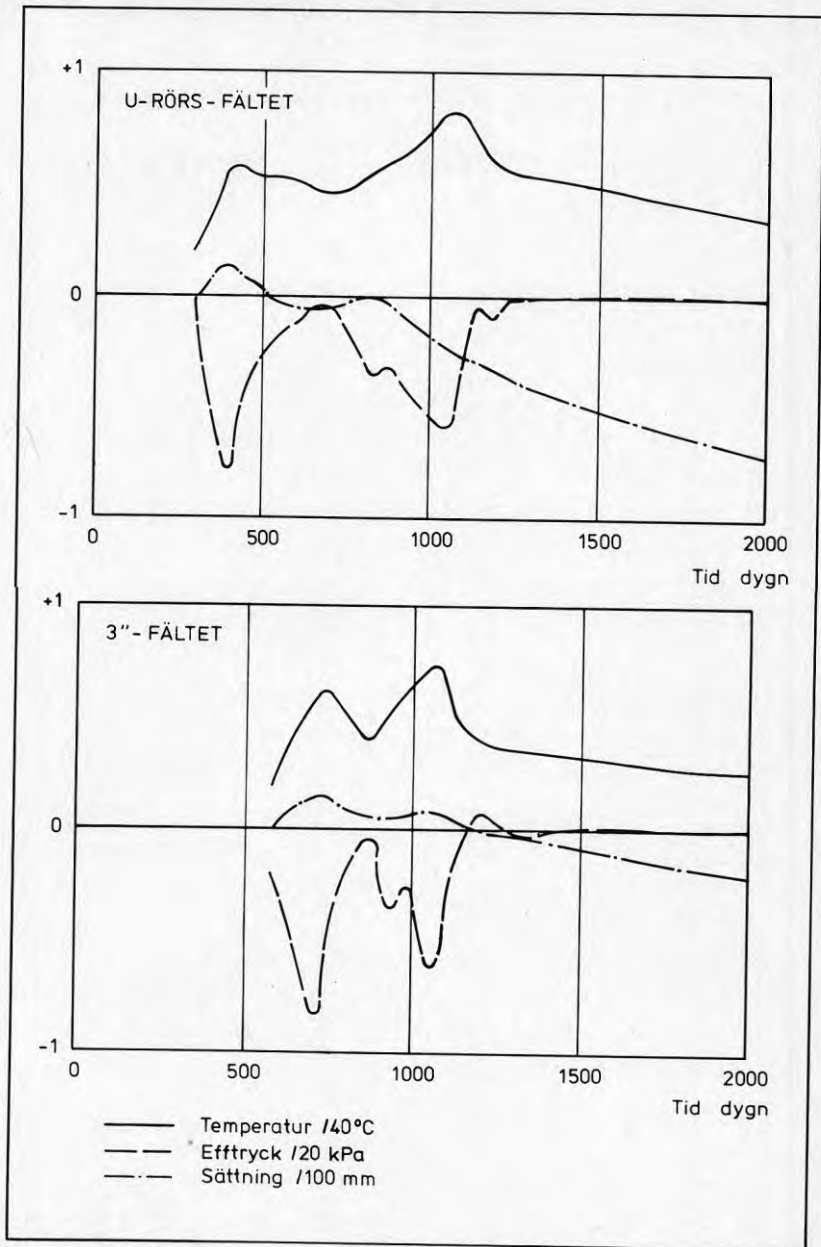


Fig. 8.6 Fig. visar relationerna mellan temperatur effektivtryck och sättning under försökstiden för U- resp. 3"-fältet.

Fig. 8.6 The figures gives the variation of temperature effective stress and settlement with time for the U-tubesfield and 3"-field.

portrycksutjämnningen där sker snabbare.

Det är emellertid viktigt att komma ihåg att storleken på det genererade portrycket är ett resultatet av två motverkande processer. Temperaturhöjningen ger ett ökande portryck till följd av att den termiska expansionen hos fattenfasen är större än för mineralfasen. Men uppvärmningen sker inte momentant, utan under en längre tidsperiod, och därmed sker en viss vattenströmning ut ur leran under själva uppvärmningen. Detta medför att de uppmätta portrycken är lägre än vad som skulle vara fallet om uppvärmningen skedde under odränerade förhållanden. Det bör även observeras att porvattnets fluiditet ökas med 50 - 60% till följd av uppvärmningen, vilket medför att permeabiliteten, och därmed konsolideringskoefficienten ökas i motsvarande grad. Konsolideringssättningarna utbildas således fortare. Därför kan, även om portrycken ökar och jordprofilen sväller, förkonsolideringstrycket ha överskridits. Om så är fallet framgår, vid en återgång till ursprunglig temperatur, av de kvarstående deformationerna. För U-rörsfältet visar det sig att efter nedkylning till cirka 20°C har jorden inom värmelagret, 0-12 m, erhållit en kompression. Det är alltså troligt att förkonsolideringstrycket även för 8-12 m sjunkit såpass mycket till följd av uppvärmningen att de rådande effektivspänningarna är lika stora som förkonsolideringstrycket. Tiden med hög temperatur har dock varit relativt kort, samtidigt som dräneringsvägarna varit långa, varför kompressionen blivit relativt ringa.

I 3"-fältet skedde uppvärmningen ännu fortare och följdes direkt av en urladdning. Den kvarstående kompressionen efter återgång till den temperatur som rådde före andra uppvärmningen/urladdningen är därför liten, endast en fjärdedel av den i U-rörsfältet. Troligt är dock att temperatursänkningen varit tillräckligt stor så att effektivspänningarna och förkonsolideringstrycket blivit av samma storleksordning.



Studeras man sedan de förändringar som uppstått av förkonsolideringstrycket såsom det bestämts på laboratoriet, efter nedkylning till 7°C, finner man att det höjts något för de översta 6 till 7 metrarna i U-rörsfältet, medan det sjunkit något för de större djupen. Förkonsolideringstrycket i 3"-fältet förefaller i stort sett opåverkade av värmelagringen, dock med reservation för de större djupen där testunderlaget är litet.

Sättningarna i de bägge fälten följdes fram till och med sommaren 1986 och finns redovisade i fig. 8.6. Det framgår där även efter avkylningen till 20°C sker en viss sättning, som åtminstone för U-rörsfältet är ganska stor, trots att effektivspänningarna är i stort sett konstanta. I 3"-fältet är sättningen under motsvarande tidsperiod mycket mindre, endast fjärdedelen av den i U-rörsfältet. Denna sättning, som närmast får betraktas som en krypdeformation, antyder att lerans egenskaper har varaktigt försämrats av uppvärmningen/avkylningen.

Det vore fel att i detalj dra slutsatser om storleken på inverkan av värmelagringen på basis av ovannämnda ödometerförsök, därtill är antalet försök alltför ringa. Helt klart är emellertid att resultaten kvalitativt är mycket logiska.

#### 8.7           EFFEKT AV UPPREPADE UPPVÄRMNINGAR/URLADDNINGAR

Om det aktuella värmelagret skulle användas under en längre tid och utsättas för ett stort antal uppvärmningar/urladdningar, skulle de effekter som erhållits under de här beskrivna uppvärmningarna/urladdningarna förstoras.

Återupprepade uppvärmningar/urladdningar, så att lager-temperaturen skiftade mellan 7 och 22°C skulle även på sikt ge mycket små sättningar, eftersom förkonsolideringstrycket till följd av denna temperaturändring ej sjunker under de rådande effektivspänningarna. Spännings/deformationsmässigt är det närmast att jämföra med ett ödometerprov som utsätts för upprepade av- och pålastningar, se fig. 8.7., hela tiden med spänningarna lägre än förkonsolideringstrycket.

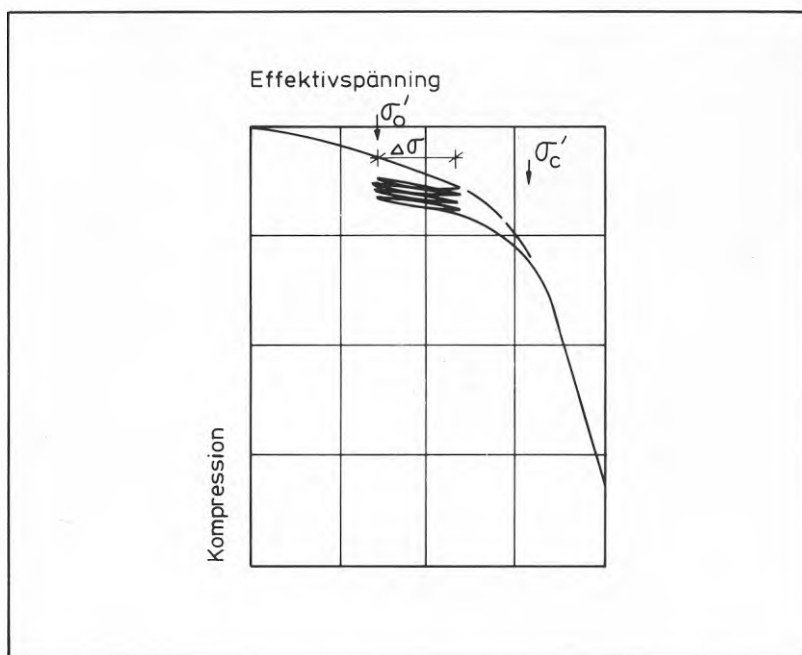


Fig. 8.7 Spännings-kompressionsdiagram vid upprepade av och pålastning, då förkonsolideringstrycket ej överskrids.

*Fig. 8.7 Effective stress - compression curve for a clay under repeated loading, when the preconsolidation pressure is not exceeded.*

Om uppvärmning/urladdning skulle ske för 22-35°C intervall skulle betydande sättningar med tiden uppstå. Redan den första cykeln gav 3 cm sättning. När lagret lämnades utan ytterligare energitillförsel i 1,5 år inträffade ytterligare 5 cm sättning. Varje påföljande uppvärmningscykel kommer om varaktighet är densamma, att ge tillskottssättningar visserligen av successivt avtagande omfattning. Hur stora sättningar som totalt skulle uppstå, är svårt att säga på det befintliga underlaget, men 30-40 cm är inte orimligt. Av stor betydelse är hur nära förkonsolideringstrycket effektivspänningarna är vid 22°C.

Spännings/deformationsmässigt är denna temperaturbelastning, 22 - 35°C, närmast att jämföra med ett ödometerprov som lastas på till spänningar över förkonsolideringstrycket men endast för en kortare tid och sedan lastas av igen, se fig. 8.8. För varje lastcykel sker sedan en viss primär konsolidering och påtagliga sättningar utbildas ända tills den sammanlagda tiden är så lång att effektivspänningen blir lika stor som totalspänningen. Därefter uppstår viss krypdeformation vid varje uppvärmning. Storleken på denna tillskottsdeformation blir mindre för varje lastcykel.

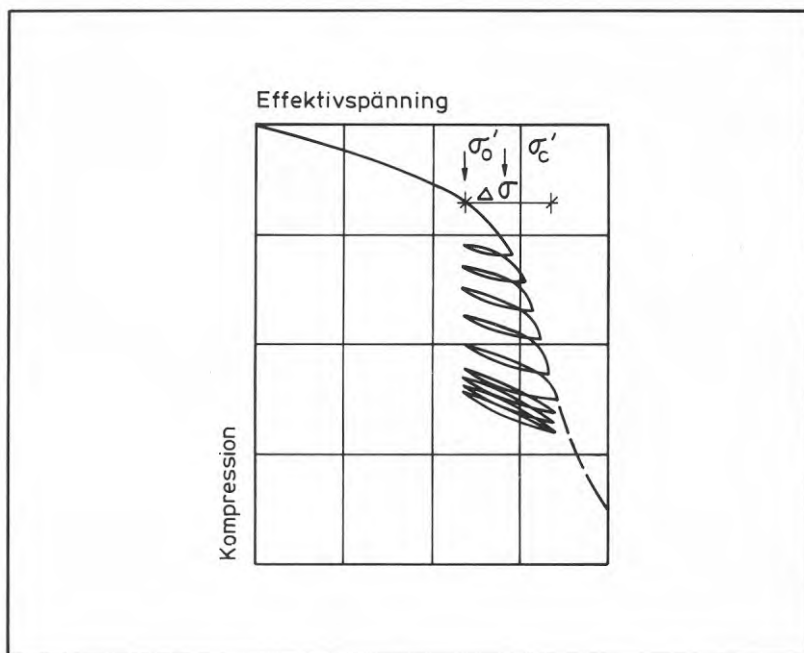


Fig. 8.8 Spännings/kompressionsdiagram vid upprepad, kortvarig av- och pålastning, då förkonsolideringstrycket överskrids.

Fig. 8.8 Effective stress - compression curve for a clay under repeated loading, when the preconsolidation pressure is exceeded.

Fullskaleförsöken i fält omfattade två olika typer av värmeväxlare, U-rörsystem med två skänklar av plast med 15 mm utvändig diameter och 3"-rör av järn. För att få så stor energimängd som möjligt överförd från värmeväxlaren till omkringliggande jord är det, utöver en hög temperatur hos det värmebärande mediet, viktigt att kontaktarean mellan värmeväxlare och jord är stor. Det sistnämnda är skälet till att 3"-rören också användes.

Ett sätt att öka kontaktytan ytterligare utan att kostnaderna för värmeväxlarna blir orimliga är att använda sanddräner som värmeväxlare. Det har emellertid visat sig att systemet blir mycket enklare att montera och hantera om, istället för att låta vattnet strömma direkt i dränen, man använder en enkel typ av U-rörsvärmeväxlare i dränen, se fig. 9.1. Omfattande laboratorieundersökningar på modeller av olika typer av sk värmedräner har visat att skillnaden i effektivitet mellan en värmedrän av den typ som visas i fig. 9.1. och en där vattnet strömmar direkt i sanden, är försumbar.

I ett annat projekt är syftet att studera funktionen hos värmedräner med diameter 15-50 cm i fullskala. Av mycket stort intresse är om hela vattenvolymen i värmedränen kommer att få en relativt jämn temperaturhöjning, beroende på vattenströmning, orsakad av densitetsskillnader, i själva dränen.

Om så är fallet erhålls två stora fördelar. För det första undviker man temperaturtratten kring den smala värmeväxlaren. Temperaturen i randen av värmedränen blir då högre vilket ökar värmeväxlarens verkningsgrad. För det andra kan effekttoppar tas vara på utan

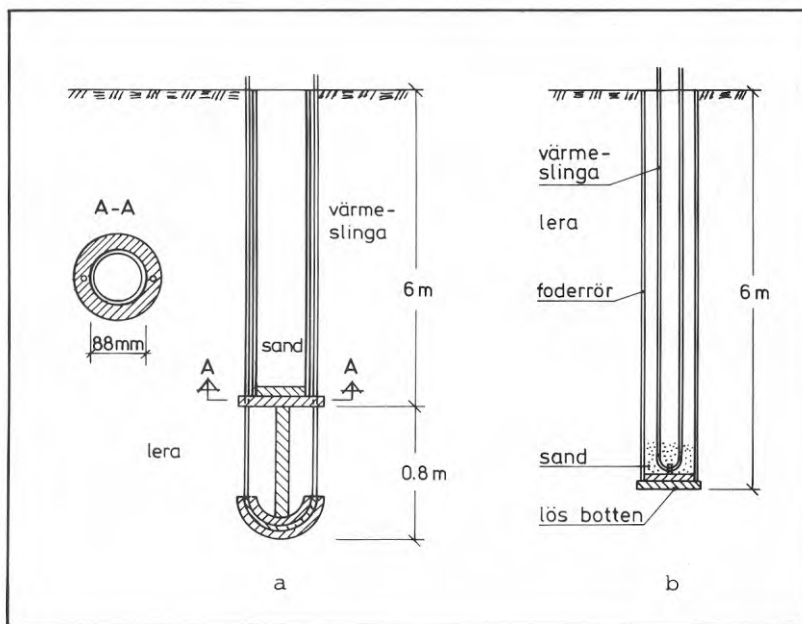


Fig. 9.1 Till höger visas principen för en stor värmedrän och till vänster hur värmedrären i pilotförsöket utformades.

Fig. 9.1 In the figure to the right the main features of a heat-drain is illustrated while the other figure shows the heat-drain used in the pilot test.

att drivtemperaturen stiger kraftigt. Vattenmängden i dränen utgör ett effektivt snabblager. Det samma gäller vid urladdning.

Nedan redogörs kortfattat för resultaten från ett försök i fält med en liten värmedrän. En detaljerad redovisning av laborieförsöken och med värmedrären sammanhängande teorier och beräkningar görs i anslutning till slutrapporteringen av det nu pågående fullskalförsöken.

## 9.1. VÄRMEDRÄN OCH INSTRUMENTERING

Detta försök med värmedrän är ett pilotprojekt och framförallt principen för montering har utvecklats mycket sedan sommaren 1982, då dessa försök genomfördes.

Principen för en värmedrän visades i fig. 9.1b. Den i pilotförsöket använda värmedränen visas i fig. 9.1a och har en ytterdiameter på 88 mm. Foderröret som var av järn drogs upp efter det att sandfyllningen utförts. På grund av den lilla diametern placerades U-rörsskänklarna på utsidan av sanddränen.

I leran på 4.5 m djup monterades tre porttryckmätare på avstånden 0.7 m, 1.45 m och 2.15 m från centrum av värmedränen. På samma nivå fast på avstånden 0.6 m, 1.3 m och 2.25 m monterades temperaturgivare. Endast en värmedrän installerades och några sättningsuppföljningen gjordes inte.

## 9.2 TEMPERATURUTVECKLING UNDER UPPVÄRMNINGSFASEN

Effekten var 0,5 kW under uppvärmningen, vilket resulterade i en temperatur runt 43°C hos det ingående vattnet. Resultatet från övriga temperaturmätningar visas i fig. 9.2.

Fig. 9.2. visar på en tydlig temperaturtratt runt värmedränen.

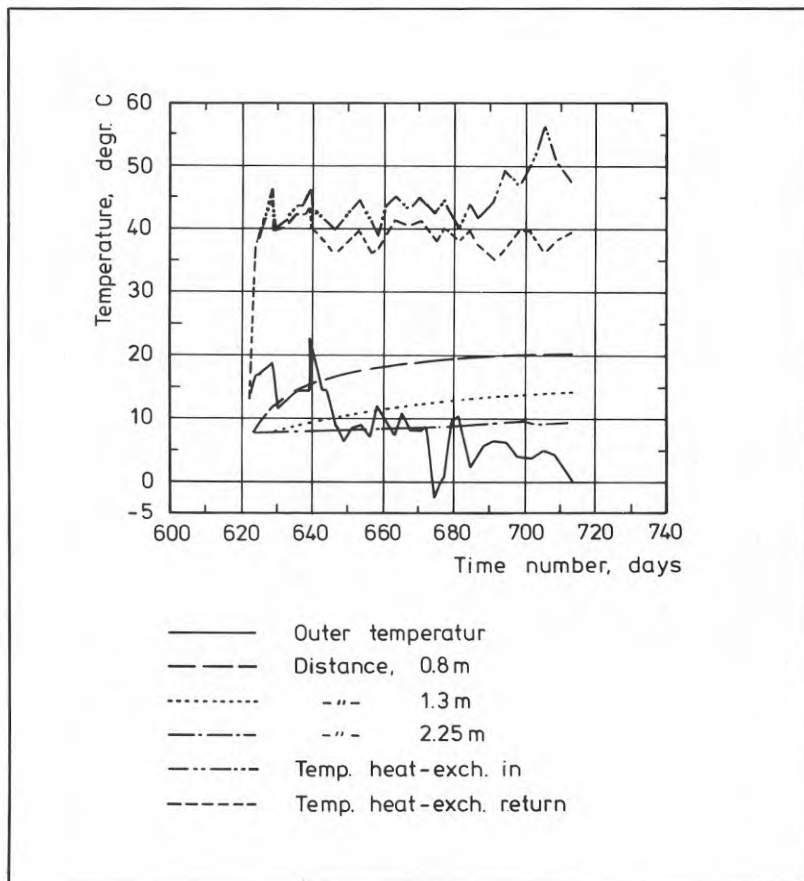


Fig. 9.2 Temperaturökningarna på 4.5 m djup under uppvärmning med värmedrän.

Fig. 9.2 Measured increase in temperature at 4.5 m depth around the heat-drain.

### 9.3. PORVATTENTRYCK UNDER UPPVÄRMNINGSFASEN

Portrycken mättes två gånger i veckan och trots de ökande temperaturerna, uppstod inga som helst porvattenövertryck under försöken, se fig. 9.3. Resultaten kan med viss försiktighet jämföras med porvattenöver-



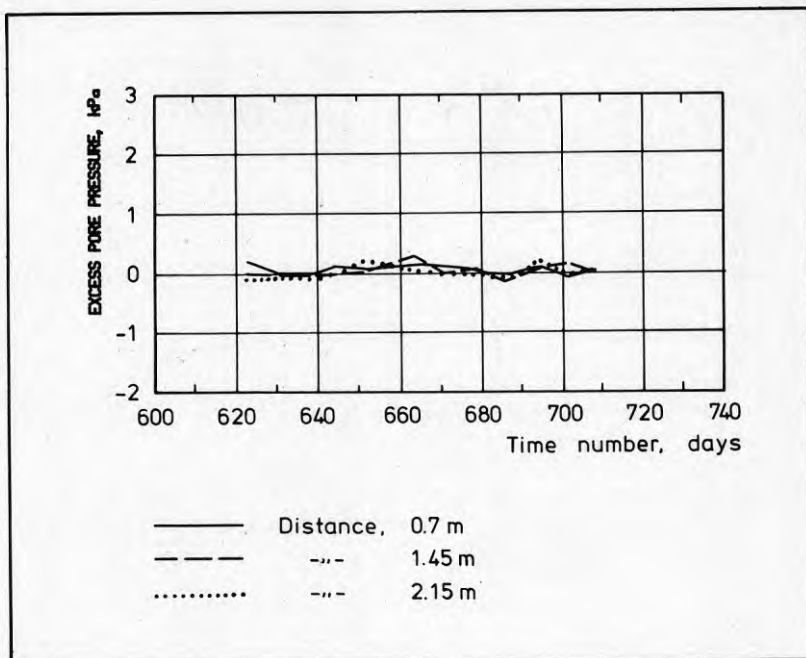


Fig. 9.3 Porvattenövertryck uppmätta på 4.5 m djup under uppvärmning med värmedrän.

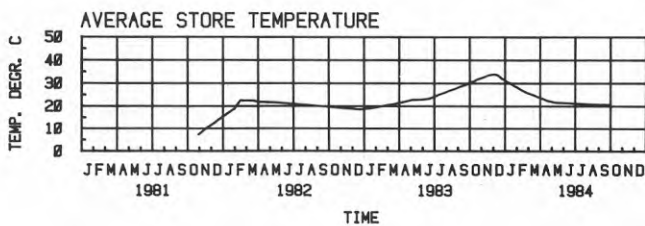
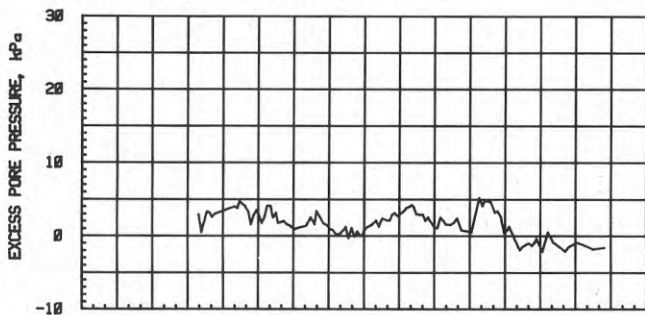
*Fig. 9.3 Measured excess pore pressure changes around the heatdrain at 4.5 m depth.*

trycken i de bägge fullskalelagren på motsvarande djup, fig. 9.4., där portrycken ökar till cirka 5 kPa. visserligen är temperaturhöjningen i dessa fält större och har större utbredning i sidled, men portrycken runt värmedränen visar ingen som helst tendens till att stiga. Detta måste innebära att de av uppvärmningen skapade porvattenövertrycken utjämnas genom dränering till värmedränen.

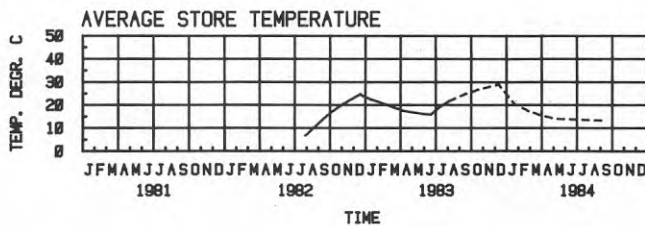
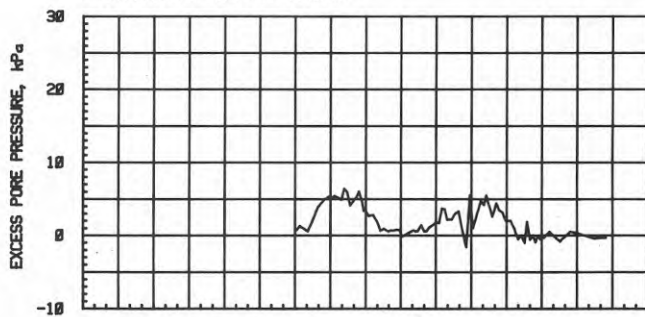
Fig. 9.4 Uppmätta porvattenövertryck på 4.5 m djup i U-rörs och 3"fälten. →

*Fig. 9.4 Measured excess pore pressure changes at 4.5 depth in the U-tubesfield and the 3"-field.*

PORE PRESSURE AND AVERAGE TEMPERATURE  
STATION 1: DEPTH 4.5 m



STATION 2: DEPTH 4.5 m



Någon provtagning före eller efter uppvärmning gjordes inte. Om av uppvärmningen orsakade porvattenövertryck skulle försämra lerans egenskaper, så skulle den därav beroende försämringen utebli. Emellertid tydde de andra fält- och laboratorieförsöken på att porvattenövertrycken i sig inte påtagligt inverkar på lerans egenskaper. Det är temperaturhöjningen i sig som medför de stora förändringarna. Denna förändring mildras inte genom användandet av värmedränen.

Om emellertid även portrycken på större djup förblir relativt oförändrade till följd av dränering till värmedränen medför det en väsentlig skillnad jämfört med en typ av slutna värmeväxlare. Sättningarna kommer inte att bli större totalt sett, men de kommer att utbildas betydligt snabbare, vilket skulle kunna vara en fördel genom att området skulle kunna planeras efter endast någon eller några få uppvärmnings/urladdnings cykler och sedan inte få vidkännas ytterligare sättningar.

## 10. ANALYS AV VÄRMESTRÖMNING I FÖRSÖKSFÄLTEN

Mängden information från de genomförda fältförsöken är mycket stor och utgör ett utomordentligt gott underlag för en jämförelse av teoretiskt beräknade temperaturförlopp och effekter och i verkligheten uppmätta värden. Det skulle föra alltför långt att här redovisa en sådan studie. Nedan görs endast några enkla jämförelser för att visa de teoretiska beräkningarnas giltighet. Vidare redovisas temperaturutvecklingen för ett horisontellt och ett vertikalt snitt genom ett av lagren.

### 10.1 VÄRMESTRÖMNING KRING VÄRMEVÄXLARE I MARK

I det aktuella fallet förutses effektpulser med längre varaktighet. Den mest intressanta parametern är i detta fall den s k drivtemperaturen dvs temperaturskillnaden mellan den värmebärande vätskans temperatur (fluiden) och lagrets medeltemperatur inom den av värmeväxlaren influerade cylinderregionen.

Vid dessa längre effektpulser uppnås ett s k "steady-flux"-tillstånd vilket innebär att efter en viss tid med konstant effekt, är drivtemperaturen konstant. Drivtemperaturen är proportionell mot effekten varav följer att

$$T_f - T_m = q \cdot m_{sf} \quad (10.1)$$

där  $T_f$  = fluidtemperaturen, °C  
 $T_m$  = cylinderregionens medeltemperatur, °C  
 $q$  = effekten/m värmeväxlare, W/m  
 $m_{sf}$  = värmemotståndet K/(W/m)

"Steady-flux"-tillståndet uppnås enl Claesson (1985) efter tiden  $t$  (sek) för ett kvadratisk rör gitter enligt formeln:

$$t = 0,058 \quad B^2/a \quad (10.2)$$

där  $t$  = tiden, sek

$B$  = röravståndet, m

$a$  = markens termiska diffusivitet,  $m^2/\text{sek}$

Värmemotståndet  $m_{sf}$  kan uppdelas i två huvudkomponenter:

$$m_{sf} = m_g + m_p \quad (10.3)$$

där  $m_g$  = värmemotståndet i mark,  $K/(W/m)$

$m_p$  = värmemotståndet genom strömningskanalens vägg,  $K/(W/m)$

När det gäller ett eller flera rör i mark kan  $m_p$  delas upp enligt följande:

$$m_p = m_{fc} + m_p^1 + m_c \quad (10.4)$$

där  $m_{fc}$  = övergångsmotståndet mellan fluiden och rörväggen

$m_p^1$  = värmemotståndet över rörmaterialet

$m_c$  = kontaktmotstånd mot omgivande lera

I de föreliggande mätningarna har temperaturen mätts på värmeväxlarnas utsida, men eftersom temperaturgivarna även varit i kontakt med den omgivande leran till sin större del, anses de uppmätta temperaturerna representera lerans temperatur omdelbart utanför värmeväxlaren. Detta innebär att de redovisade temperaturskillnaderna ( $\Delta T$ ), kan betraktas enligt:

$$\Delta T = q \cdot m_g \quad (10.5)$$

I det följande har nedanstående värden för de termiska parametrarna använts.

Termisk konduktivitet ( $\lambda$ ) = 1 W/m

Termisk diffusivitet ( $a$ ) =  $0,27 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sek}$

10.1.1 Värmeströmning kring U-rörs-varmeväxlare i kvadratisk rörgitter (U-rörs-fältet)

Värmemotståndet kan enligt Claesson (1985) beskrivas med formeln:

$$m_g = 1 / (4\pi\lambda) [\ln(B / (2\pi R_p)) + \ln(1 / (2\sin(\pi B_u / B))) + 1,05] \quad (10.6)$$

där  $B$  = röravståndet, m

$R_p$  = skänkelrörets ytterradie, m

$B_u$  = avståndet mellan U-rörets skänklar, m

För att uppnå "steady-flux"-tillståndet med ett röravstånd av 2,0 m och en termisk diffusivitet av  $0,27 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sek}$  åtgår en tid av:

$$0,058 \cdot 2^2 / 0,27 \cdot 10^{-6} = 0,86 \cdot 10^6 \text{ sek}$$

dvs ca 10 dygn.

De använda uppladdnings- och uttagsperioderna är således tillräckliga för att "steady-flux"-tillståndet skall inträffa.

Under förutsättning att skänklarna håller ett inbördes avstånd av 0,2 m längs hela varmeväxlaren erhålles ett  $m_g$  av

$$0,42 \text{ K}/(\text{W}/\text{m})$$

dvs  $\Delta T = 0,42 \cdot q$

U-rörs-fältet innehöll 49 st värmeväxlare av 12 m längd vilket innebär en total längd av ca 590 m.

Nedanstående tabell visar uppmätta temperaturskillnader vid olika effekter samt motsvarande värmemotstånd i marken.

$\Delta T$ K	Q kW	q W/m	$m_g$ K/(W/m)
8	12,5	21	0,38
14	26	44	0,31
4	4	7	0,57
6,5	7,5	13	0,50
3	4,5	8	0,38
-4	-5	-8,5	(-)0,47
		Medeltal	0,44

Spridningen i resultaten är stor men ger som medelvärde 0,44 K/(W/m) vilket tyder på att lagret som helhet fungerar enligt beräkningsmodellen och att skänklarna i U-rören ganska väl håller det avsedda inbördes avståndet.

#### 10.1.2 Värmeströmning kring koncentriskt rör i kvadratisk rörgitter (3"-fältet)

Värmemotståndet kan enligt Claesson (1985) beskrivas med formeln:

$$m_g = 1 / (2\pi\lambda) (\ln(B/2\pi R_0)) + 0,52 \quad (10.7)$$

där  $R_0$  = värmeväxlarrörets ytterrädie, m

"Steady-flux"-tillståndet uppnås vid 2,8 m röravstånd enligt

$$0,058 \cdot 2,8^2 / 0,27 \cdot 10^{-6} = 1,68 \cdot 10^6 \text{ sek}$$

dvs ca 19 dygn. Även här är uppladdnings- och uttagsperioderna tillräckligt långa för uppnående av "steady-flux"-tillståndet.

Insättes värmeväxlarradien 0,044 m i ekv fås

$$m_g = 0,45 \text{ K/(W/m)}$$

dvs teoretiskt ett något större värmemotstånd än för värmeväxlarna i U-rörs-fältet där dock röravståndet är mindre.

$\Delta T$  kan alltså tecknas:

$$\Delta T = 0,45 \cdot q \quad (10.8)$$

3"-fältet innehöll 25 värmeväxlare med 12 m längd vilket ger ca 300 m totalt.

Nedanstående tabell visar ett antal uppmätningar av temperaturskillnader vid olika effekter samt motsvarande värmemotstånd.

$\Delta T$ K	Q kW	q W/M	$m_g$ K/(W/m)
20,5	14	46	0,45
13	11	37	0,35
16,5	13	43	0,38
-7	-5	-16	(-)0,44
		Medeltal	0,41



Även här är spridningen ganska stor och medeltalet något för lågt. Detta kan bero på den branthet som temperaturtratten har i omedelbar närhet av värmväxlaren och att temperaturgivarens inneslutning, som visserligen var svetsad till värmväxlaren, har en diameter av 22 mm.

#### Värmedrän

Ur det mindre försök som genomfördes med en sanddrän som värmväxlare redovisas på fig. 10.1 de uppmätta temperaturerna på fluiden tillsammans med en teore-

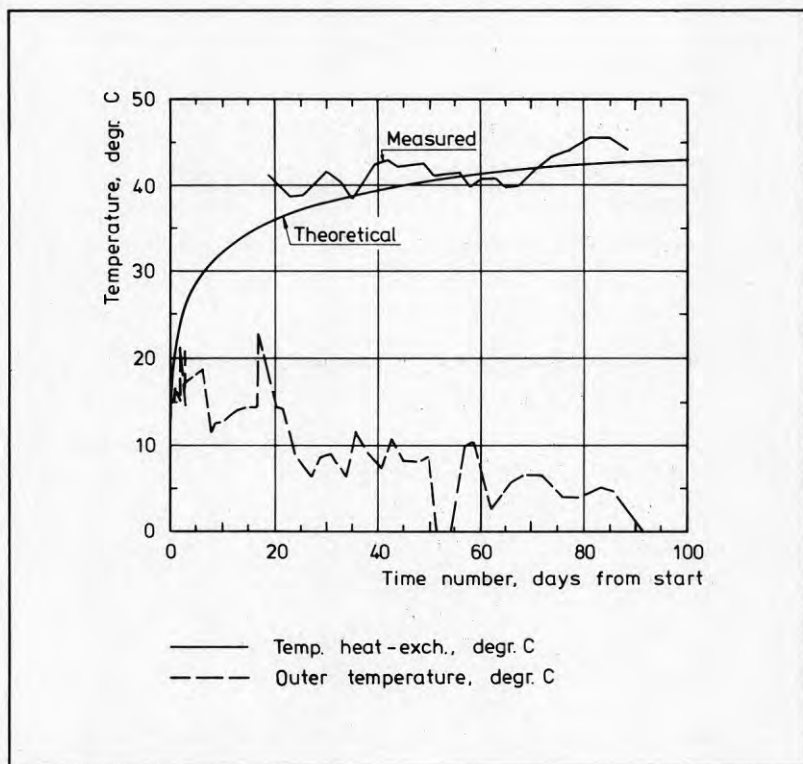


Fig. 10.1 Beräknad och uppmätt effekt hos värmedrären.

Fig. 10.1 Calculated and measured effekt for the heatdrain.

tiskt framräknad kurva för densamma, utgående från att sanddränen med sin radie av ca 0,045 m var ekvivalent med en motsvarande cirkulär värmeväxlare. Den teoretiska kurvan är korrigerad för den under försöket sjunkande effekten. Det genomförda försöket visar att en U-rörs-värmeväxlare i kombination med en sanddrän är effektivare än motsvarande U-rör direkt i lera. Beräknas värmemotstånden för en cirkulär värmeväxlare resp en U-formel med de aktuella dimensionerna fås i "steady-flux"-tillståndet en förbättring av ca 14%. Denna effektivitetsökning ökar med ökande radie hos sanddränen i förhållande till skänkelavståndet i värmeväxlaren.

Det framgår att den teoretiska modellen relativt väl med de antagna värdena på konduktivitet, diffusivitet och värmeövergångstal beskriver det faktiska förloppet. Taggigheten i den uppmätta kurvan tillskrivs imperfektioner i försöksgenomförandet, främst betingade av utetemperaturens inverkan på ingångseffekten.

## 10.2 TEMPERATURFÖRDELNING KRING CYLINDRISK VÄRMEVÄXLARE

Temperaturfördelningen i en ihålig cylinder med konstanta egenskaper, kan enligt Claesson (1985) under antagande om stationärt flöde beräknas ur följande ekvation:

$$T(r) = \frac{T_{(i)} \cdot \ln(r_y/r) + T_{(y)} \cdot \ln(r/r_i)}{\ln(r_y/r_i)} \quad (10.9)$$

där  $T_i$  = temperatur vid inre rand  $^{\circ}\text{C}$   
 $T_y$  = temperatur vid yttre rand  $^{\circ}\text{C}$   
 $r_i$  = inre hålets radie, m  
 $r_y$  = cylinderns radie, m  
 $T(r)$  = temperatur för radien = r $^{\circ}\text{C}$

I de genomförda värmelagringsförsöken är den yttre randen inte cylindrisk, utan snarare kvadratisk. Felet i beräkningarna blir emellertid ringa om omräkning till en ekvivalent radie görs. Vidare är temperaturen vid ränderna inte konstant. För en enklare överslagsberäkning, blir emellertid felet i det närmaste försumbart, om beräkningarna görs för ett antal tidpunkter, med antagande om stationära förhållanden.

En första analys visade att lägesuppgifterna om temperaturgivarna är mycket viktig och måste vara mycket noggranna. Även ett litet vinkelfel hos stålet kan resultera i en avvikelse hos givarens placering på 25 - 40 cm jämfört med den avsedda. En analys utan någon korrigerig av givarlägen skulle snarare visa på felet i givarnas positioner än riktigheten i den termiska analysen. För att undvika detta har ekvation 10:3 antagits gälla och mätvärden från två mättillfällen har använts för att beräkna temperaturgivarnas exakta placering. Med de beräknade lägena har sedan temperaturkurvor för olika tidpunkter kunnat konstrueras. I fig. 10.2 visas sådana kurvor för några tidpunkter för givarna i linje 2 (6 meters djup) i 3"-fältet. Det framgår av fig. 10.2 att temperaturförloppet relativt väl följer en logaritmisk funktion. Att lutningen på temperaturlinjerna minskar med tiden är ett resultat av den minskande effekten, skillnaden i inner- och yttertemperatur minskar med tiden.

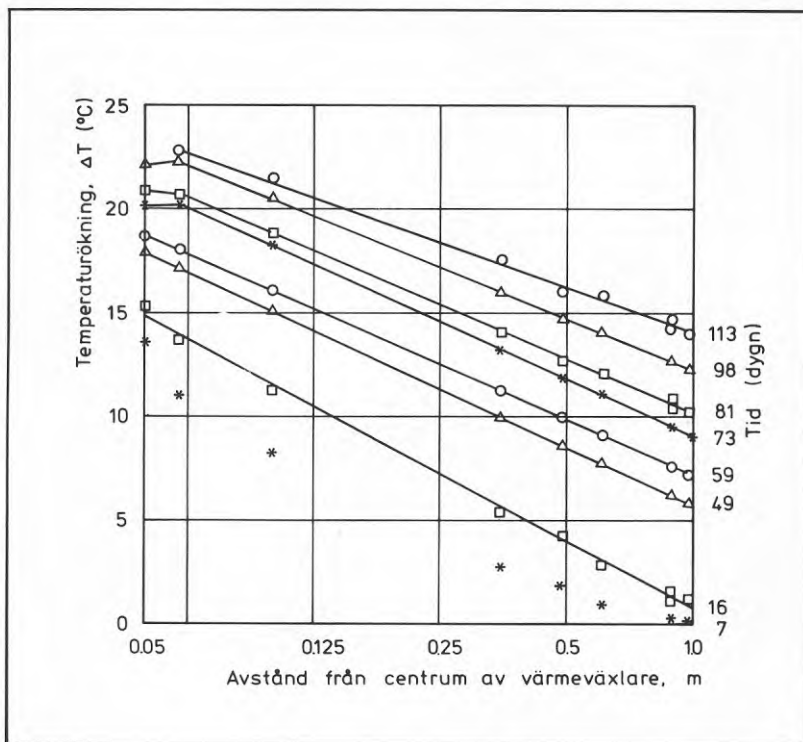


Fig. 10.2 Temperaturfördelning runt en värmeväxlare, vid olika tidpunkter i 3"-fältet, 6 m djup.

*Fig. 10.2 Measured temperatures around a heat exchanger at different stages of the field test in the 3"-field at 6 m depth.*

### 10.3 TEMPERATURFÖRDELNING I OCH OMKRING VÄRMELAGRET

Som tidigare påpekats görs i denna rapport ingen ingående teoretisk analys av temperaturfördelning utanför lagret och värmeförluster utifrån lagret. Nedan redovisas förändringen av temperaturfördelningen längs två plan för första uppvärmningen av 3"-fältet.

Längs linje 3 i 3"-fältet finns 21 temperaturgivare placerade. Mätvärden från dessa har legat till grund för de konstruerade och i fig. 10.3 redovisade temperaturlinjerna.

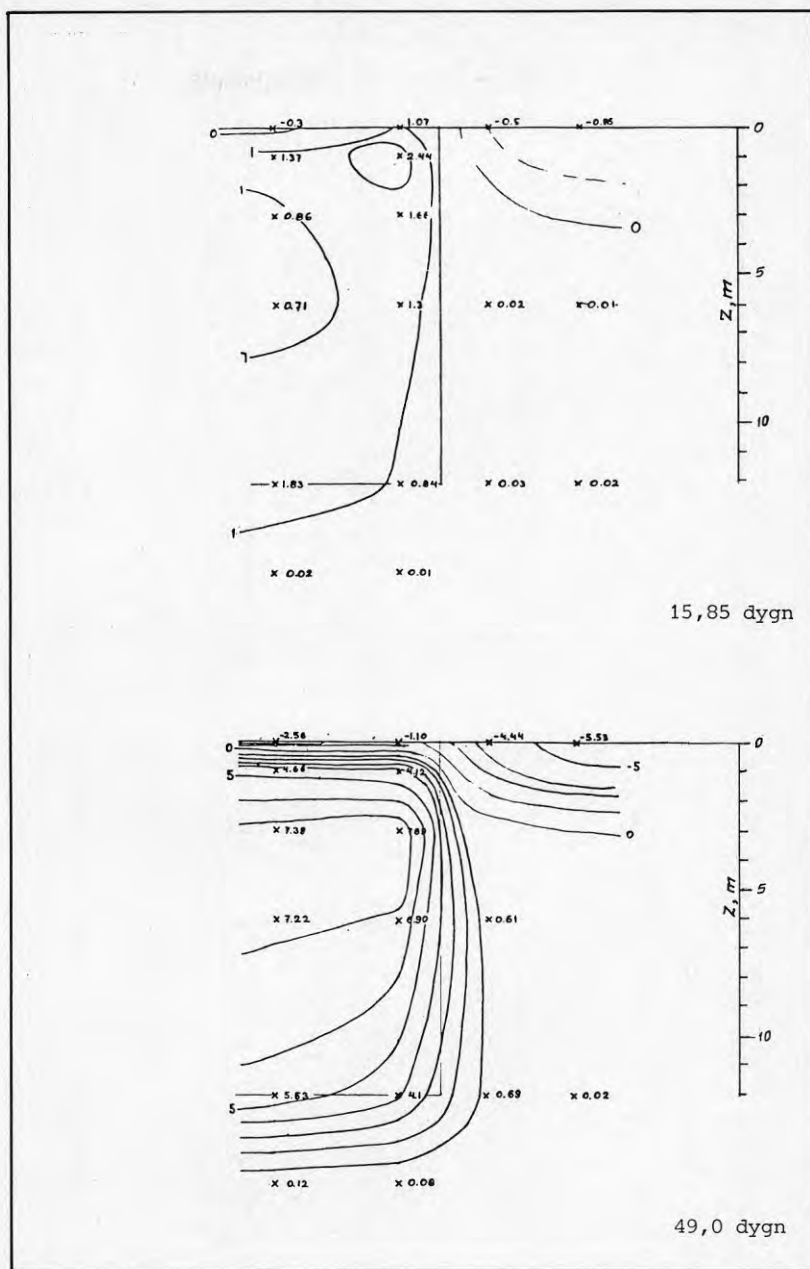


Fig. 10.3 Temperaturfördelning i 3"-fältet vid olika tidpunkter under första uppvärmningen.

Fig. 10.3 Temperature distribution along a vertical section in the 3" field at different stages of the first cycle.

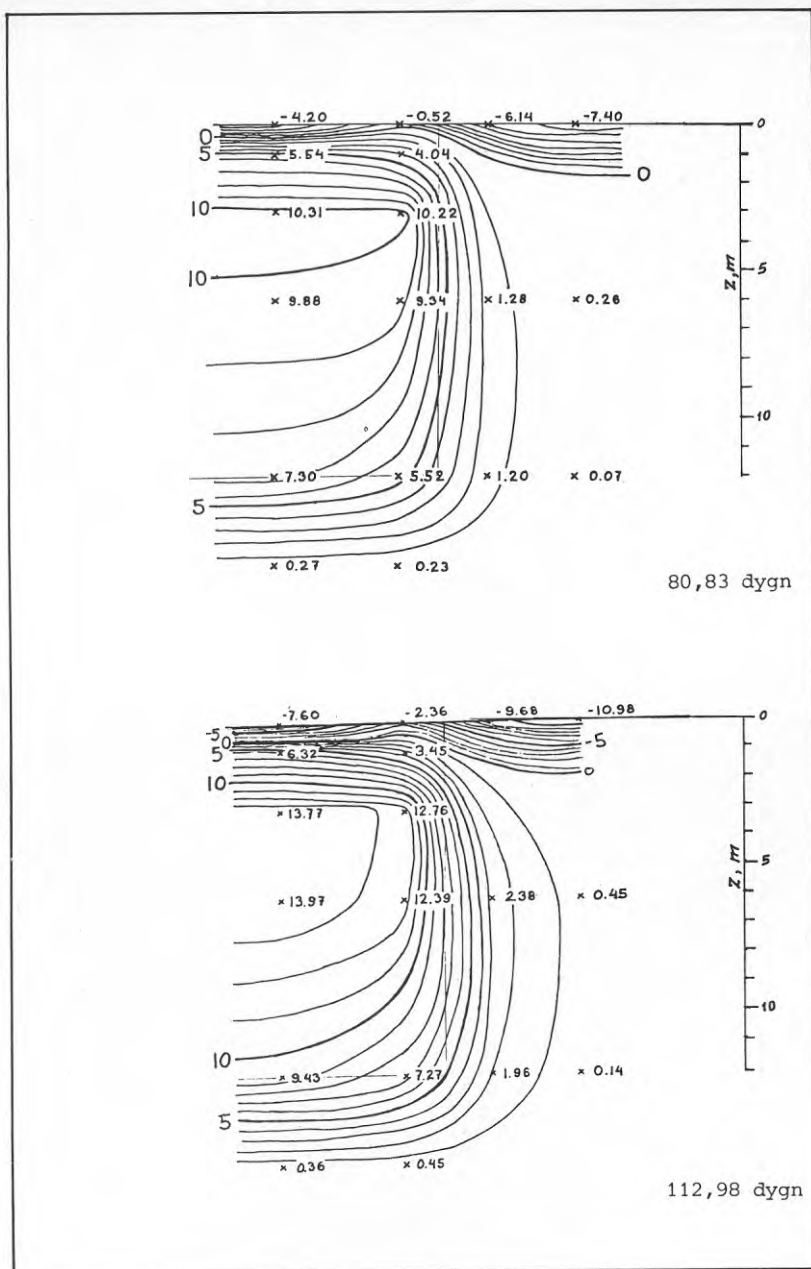


Fig 10.3 forts

Fig 10.3 cont.

På djupet 6 m i 3"-fältet finns sammanlagt 18 temperaturgivare. Dessa har legat till grund för de konstruerade och i fig. 10.4 redovisade temperaturlinjerna. Någon ytterligare beräkning, med hänsyn till de i fig. 10.4 visade temperaturfördelningarna har inte gjorts.

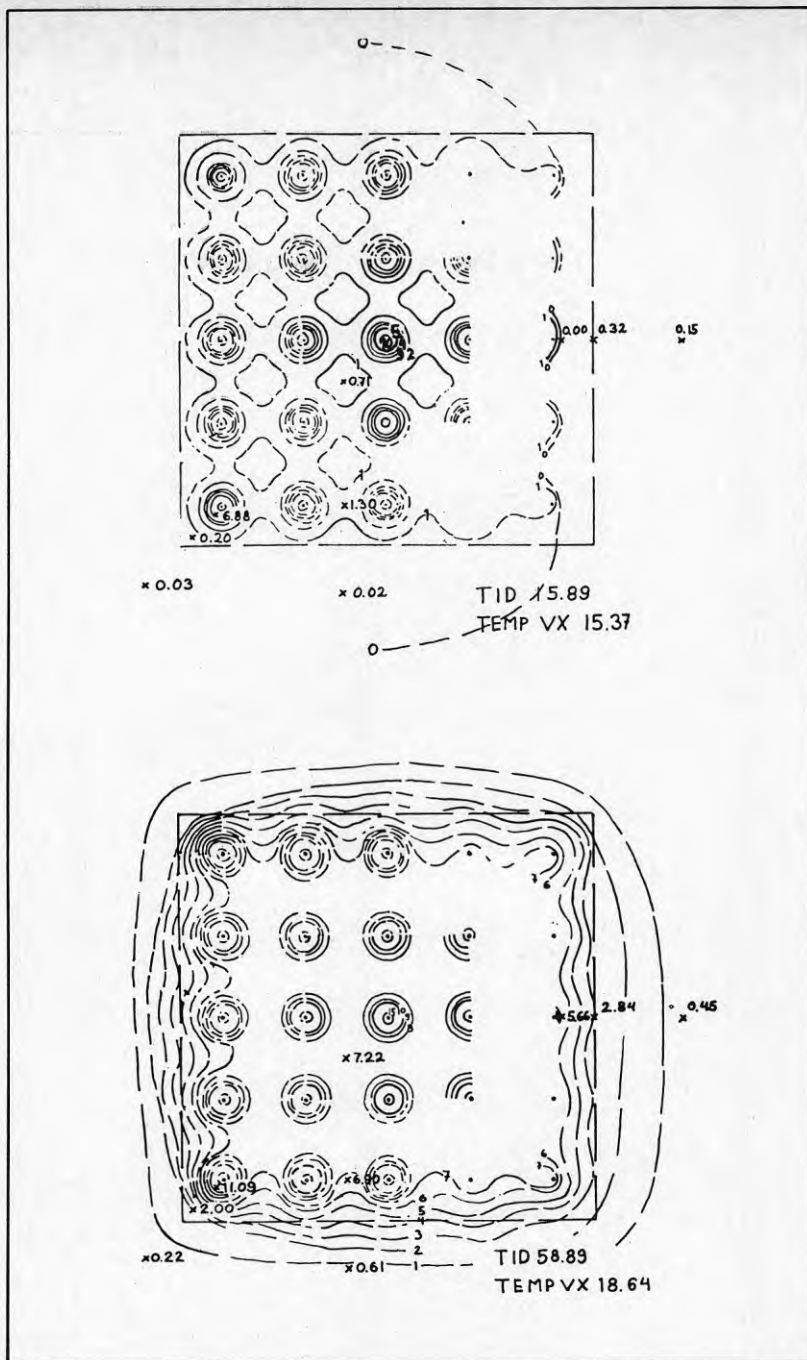


Fig. 10.4 Temperaturfördelning på 6 m djup i 3"-fältet vid olika tidpunkter under första uppvärmningen.

Fig. 10.4 Temperature distribution along a horizontal plane of the 3"-field at different stages of the first cycle.

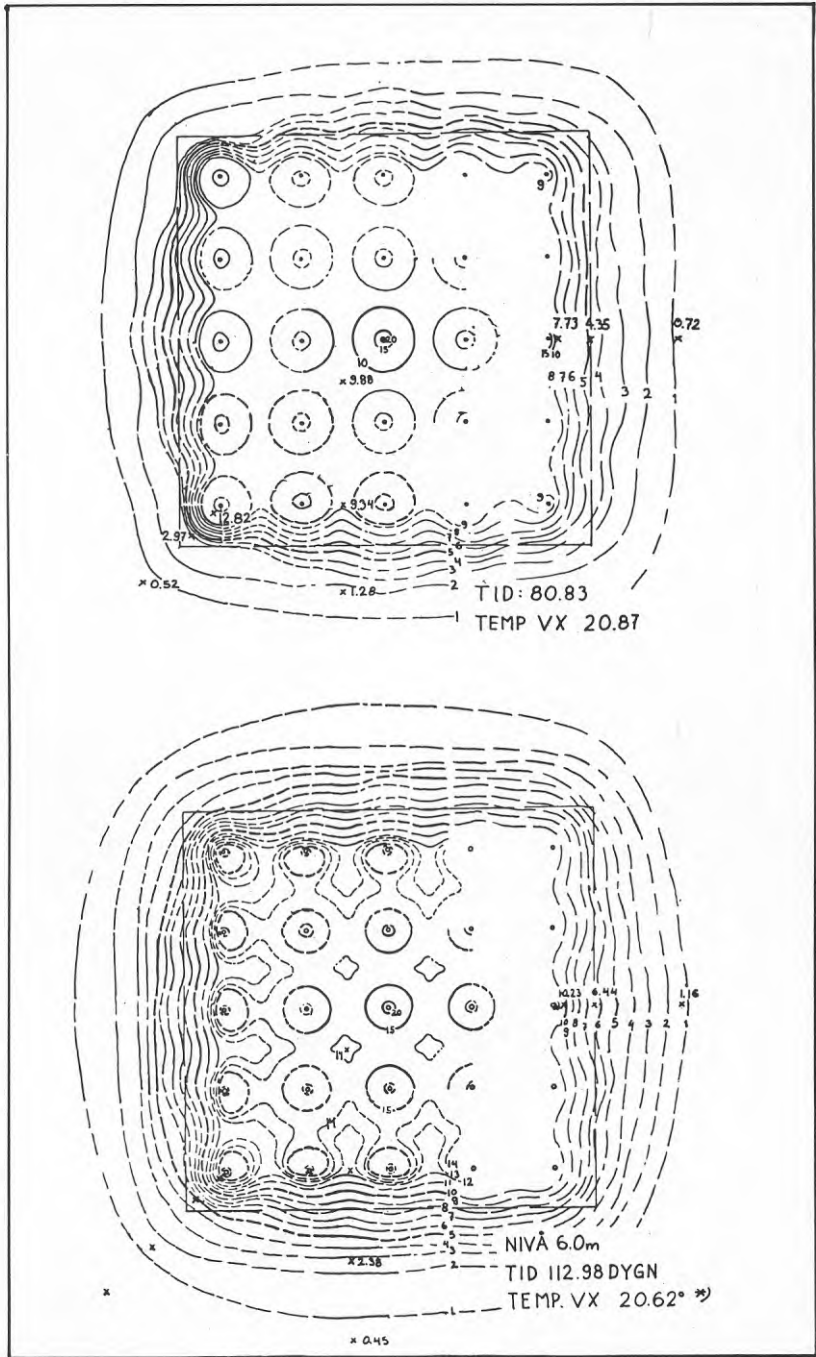


Fig 10.4 forts

Fig 10.4 cont



## 11. EKONOMI

I samband med uppförandet av de två lagren inom provfältet gjordes en noggrann uppföljning av kostnaderna med avseende på såväl material som arbetid.

Med tanke på de begränsade resurser som stod till buds kunde väl arbetet inte genomföras på det mest rationella sättet varför kostnaderna för lagren sannolikt blev onödigt höga.

Arbetet utfördes i huvudsak under sommaren 1981 varför kostnaderna är angivna i det då gällande kostnadsläget.

### 11.1 Lagrens kapacitet och värmeförluster

De båda lagren omfattar teoretiskt  $14 \times 14 \times 12 \text{ m}^3$  dvs  $2300 \text{ m}^3$ . Lerans kapacitivitet kan sättas till  $1 \text{ kWh/m}^3\text{K}$ , vilket innebär att vardera lagret teoretiskt rymmer  $2300 \text{ kWh/K}$  utnyttjningsbart temperatursving.

Under större delen av 1982 vilade U-rörslagret vilket gav möjlighet att praktiskt studera värmeförlusterna. Lagertemperaturen var under denna tid ca  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  och medeltemperaturen i luften ca  $16 \text{ }^\circ\text{C}$ . Lagret svalnade under perioden (mars -82 - dec -82) i medeltal  $3,8 \text{ }^\circ\text{C}$  vilket svarar mot ett genomsnitt av  $3,6 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}$  per dygn och  $^\circ\text{C}$  över lufttemperaturen. Efter några års drift kan lagerförlusten beräknas till ca  $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}$  per dygn och  $^\circ\text{C}$  över lufttemperaturen.

### 11.2 Potentiell lagringskapacitet

Ett värmelagers kapacitet styrs av ett flertal faktorer, nämligen

- o Tillgänglig högsta inladdningstemperatur
- o Drivtemperaturer vid olika effekter
- o Lägsta tillåtna fluidtemperatur vid uttag.
- o Värmeförlusterna.

Sker uppladdningen med hjälp av solfångare är denna dessutom intermittent vilket påverkar lagrets förmåga att ta upp energi.

I ett stationärt tillstånd, som man kan anse sig uppnå med den typ av konstant uppvärmning som ägde rum på provfältet, är drivtemperaturen proportionell mot av värmeväxlarna avgiven effekt.

I U-rörs-fältet uppmättes som ett medelvärde under hela försökstiden en drivtemperatur av  $0,42 \text{ K/(W/m)}$ , på den temperatur som rådde på värmeväxlarens utsida.

Motsvarande för 3"-fältet var  $0,45 \text{ K/(W/m)}$ .

Av ovanstående framgår att en stor skillnad mellan värmeväxlarnas temperatur och lagrets medeltemperatur medger att energiutbytet i lagret kan ske med stor effekt. De två renodlade driftstrategierna (konstant temperatur eller effekt) redovisas i princip i fig. 11.1.

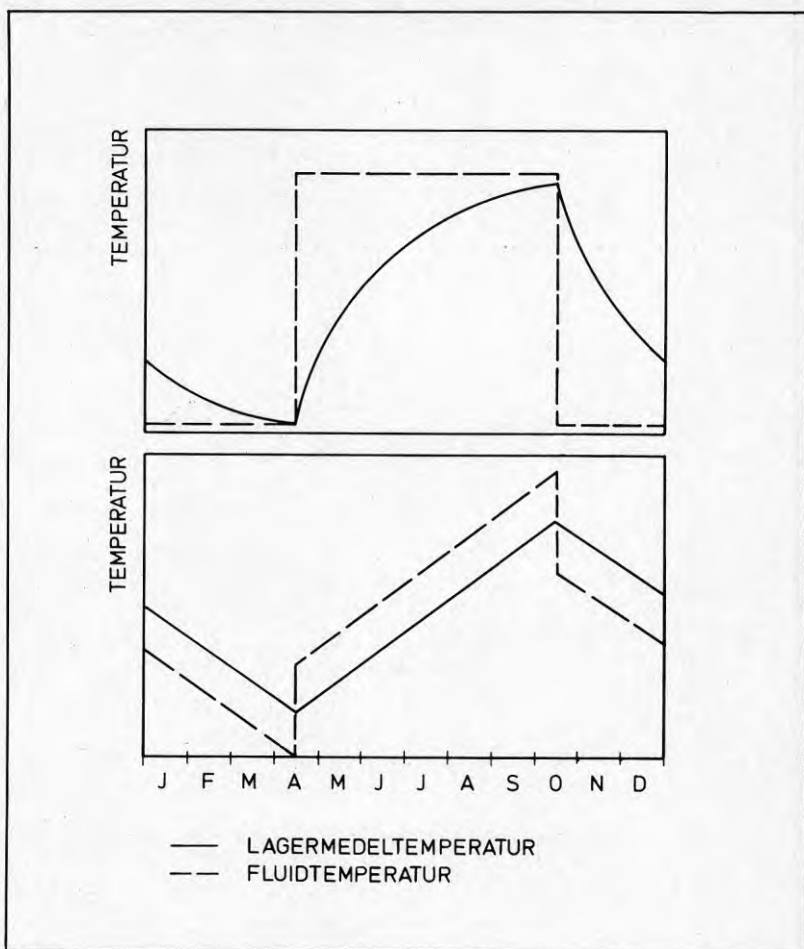


Fig. 11.1 Utnyttjande av lagrets värmekapacitet med konstanta fluidtemperaturer eller konstanta effekter vid laddning och uttag.

*Fig. 11.1 The figure shows how the capacity of the heat storage plant varies, when either the temperature of the fluid or the charging and discharging effects are kept constant.*

Den huvudsakliga skillnaden mellan de båda strategierna är att vid konstant effekt kan lagret inte tömmas helt beroende på att man vill undvika frysning i anslutning till värmeväxlarna där fluidtemperaturen vid konstant effekt blir betydligt lägre än lagrets medeltemperatur.

Det kan även vara svårt att åstadkomma tillräckligt hög fluidtemperatur i slutet av inladdningsperioden varför den optimala driftstrategien ur lagerekonomisk synvinkel är en kombination av de båda nämnda. Principiellt kan alltså ett lager fungera enligt fig. 11.2.

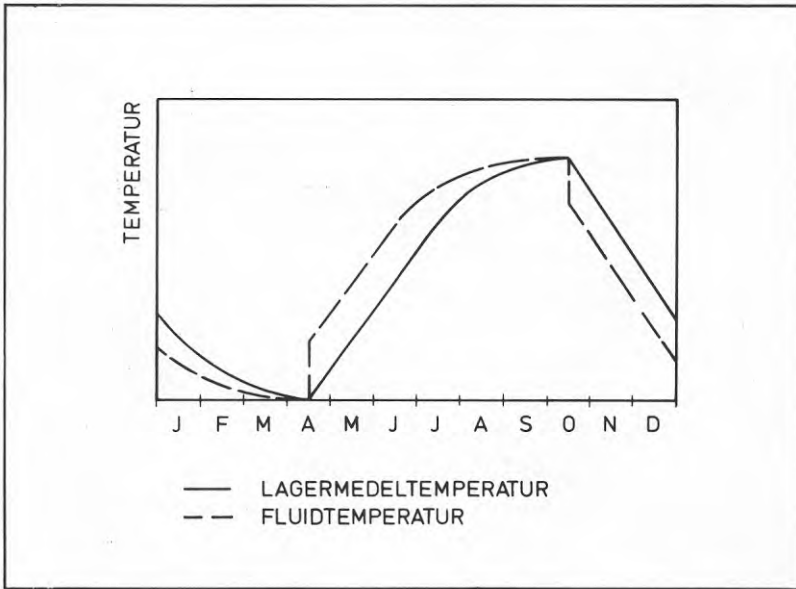


Fig. 11.2 Optimalt utnyttjande av lagrets värmekapacitet.

*Fig. 11.2 Most efficient use of the capacity of the heat storage plant.*

De genomförda försöken visar att det inte hittills har inneburit några nackdelar med avseende på den termiska funktionen hos lagren att gå upp till en medeltemperatur av ca 35°C. Med en anpassad driftstrategi bör det finnas möjligheter att utnyttja ett temperaturintervall av 3 - 35 °C vilket då skulle innebära följande:

Utetemperatur i medeltal under året	7°C
Lagermedeltemperatur under året	20°C
Förlustgenererande temperatur	13°C
"Temperaturförlust"	8°C
Effektiv temperaturintervall	25°C
Utnyttjningsbar lagrad energi	58 MWh

### 11.3 Lagrets totalekonomi

De båda lagren kostade vid uppförandet 49.000 resp 47.500 kr, vilket innebär en investeringskostnad av ca 0,75 kr/lagrad kWh.

Kostnaden för lagringen kan beräknas med annuitetsmetoden för de olika ingående komponenterna enligt följande:

Lagerinstallationer 40.000:-  
 Avskrivning 50 år ränta 12%  
 Pumpar reglerutrustning och armatur 7.000:-  
 Avskrivning 10 år ränta 12%  
 Årskostnaden blir då  
 $40.000 \times 0,1204 + 7000 \times 0,1770 = 6000$  kr  
 Lagringskostnaden blir då  
 $6000/58.000 = 0,10$  kr/kWh

Antages konventionell energi kosta ca 0,30 kr/kWh återstår alltså 0,20 kr/kWh till solfångare eller annan källa för primärenergien.

## 12. SLUTSATSER

De slutsatser som kan dras ur det här genomförda forskningsprojektet är:

- o Förkonsolideringstrycket sjunker då lerans temperatur höjs. Storleken på denna försämring av förkonsolideringstrycket kan bestämmas i laboratoriet.
- o Portrycken stiger då lerans temperatur höjs. Denna portrycksökning kan med kännedom om lerans geotekniska egenskaper beräknas.
- o Om de portryck som genereras av uppvärmningen tillåts utjämnas uppstår sättningar. Om effektivspänningarna till följd av det minskande förkonsolideringstrycket överskrider förkonsolideringstrycket blir sättningarna stora.
- o En upprepad uppvärmning/avkylning leder med tiden till ökade sättningar.
- o En uppvärmning/avkylning under odränerade förhållanden synes för en normalkonsoliderad lera leda till ökade krypdeformationer.
- o Resultaten från laboratorieförsöken stämmer kvalitativt och kvantitativt väl med resultaten från fältförsöken.
- o En värmedrän tycks medföra att de av temperaturökningen inducerade portrycken snabbt utjämnas, eller nästan helt uteblir.
- o De uppmätta temperaturerna låter sig väl beräknas med kända ekvationer för värmeströmning i fasta kroppar.

## REFERENSER

- Adolfsson, K., Bengtsson, P.-E., Lindblom, U. och Sällfors, G., 1980. Energilagring i djupjordsystem, förstudie, Göteborg.
- Ask, T. och Lundström, K.-G., 1983. Värmelagring i lera. Examensarbete, G83/3. Institutionen för geoteknik med grundläggning, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.
- Bjerrum, L., 1967. Engineering Geology of Norwegian Normally-Consolidated Marine Clays as Related to Settlements of Buildings. NGI publikation nr 71, Oslo.
- Berntson, J., 1982. Portrycksvariationer i leror i Göteborgstrakten. Licentiatuppsats. Institutionen för geoteknik med grundläggning, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg.
- Campanella, R.G., and Mitchell, J.K., 1968. Influence of Temperature Variations on Soil Behaviour, ASCE, Vol. 94, No. SM3.
- Claesson, J., 1985. Markvärme. En handbok om termiska analyser del I och II. Statens Råd för Byggnadsforskning, Stockholm.
- Demars, K.R., Charles, R.D., 1982. Soil volume changes induced by temperature cycling. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 19, No. 2.
- Ekstrand, A. och Eriksson, K., 1983. Värmelagring i lera. Fältförsök med sanddrän. Examensarbete G83/1. Institutionen för geoteknik med grundläggning, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg.

- Eriksson, L., 1984. Geotekniska konsekvenser av värme-  
lagring i sulfidjord. Teknisk Rapport, 1984:06T,  
Högskolan i Luleå, Luleå.
- Finn, F.N., 1955. The effect of temperature on the  
consolidation characteristics of remolded clay.  
American Society for Testing Materials, Special  
Technical Publ., No. 126.
- Habibagahi, K., 1973. Temperature effect on consolida-  
tion behaviour of overconsolidated soils. Proc. VIII  
ICSMFE, Moskva.
- Hallagård, H. och Nilsson, C., 1984. Värmelagring i  
lera. Examensarbete G84/7. Institutionen för geotek-  
nik med grundläggning, Chalmers Tekniska Högskola,  
Göteborg.
- Modin, B. och Wilen, P., 1985. Värmelager med vertikala  
rörsystem i lera. Jordvärmegruppen, rapport nr  
17. Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg.
- Noble, C. and Demirel, T., 1969. Effect of Temperature  
on Strength Behaviour of Cohesive Soil. Highway  
Research Board, Special Report No 103, Washington  
D.C.
- Paaswell, R.E., 1967. Temperature effects on clay  
soil consolidation. ASCE, Vol. 93. No. SM3.
- Pusch, R., 1970. Clay microstructures. National Swe-  
dish Building Research, D8:1970, Stockholm.
- Pusch, R., 1973. Influence of organic matter on the  
geotechnical properties of clays. National Swedish  
Building Reserach, Stockholm.



Sherif, M., Burrous, C., 1969. Temperature effects on the unconfined shear strength of saturated cohesive soil. Highway Research Board, Special Report No. 103, Washington DC.

Sundberg, J., 1982. Metoder för bestämning av värmeöverförande egenskaper i jord och berg. Jordvärmegruppen rapport nr 5. Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg.

Tidfors, M., 1982. CRS-försök med varierande temperatur. Internmeddelande, Institutionen för geoteknik med grundläggning, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg.

Wilén, P., 1984. Jordvärmelager i lera för småhus i Alingsås. Jordvärmegruppen, rapport nr 15, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg.

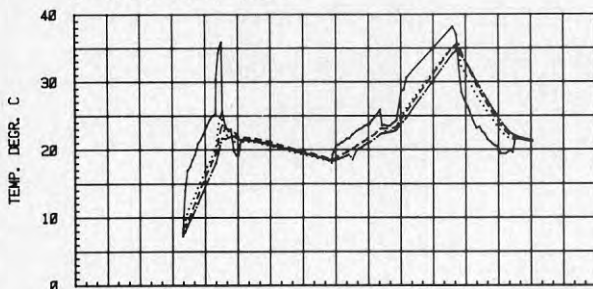
Youssef, S., Sabry, A., Ramli, El Helmi, A., 1961. Temperature changes and their effects on some physical properties of soils. ISCMFE 5, Vol. 1, Paris.

## APPENDIX

Uppmätta temperaturer  
och portryck i U-rörs-  
och 3"-fältet.

MEASURED AND AVERAGE TEMPERATURES

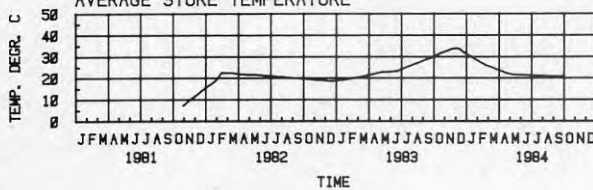
U-TUBES-FIELD; 6.0 m



REMARKS

- OUTSIDE HEATEXCHANGER
- ..... DISTANCE 0.53 m
- - - - DISTANCE 0.72 m
- · - · DISTANCE 1.03 m

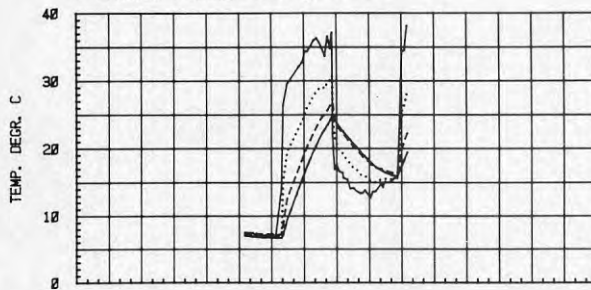
AVERAGE STORE TEMPERATURE



CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
 GEOTEKNIK M. GRUNDLÄGGNING  
 VÄRMELAGRING, KUNGÄLV  
 BFR-PROJ. 810113-2  
 DAT. 860317 SIGN. KADO

MEASURED AND AVERAGE TEMPERATURES

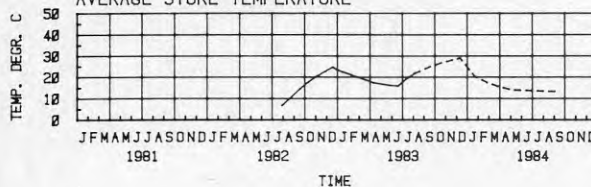
3-INCHES-FIELD; 6.0 m, LINE 2



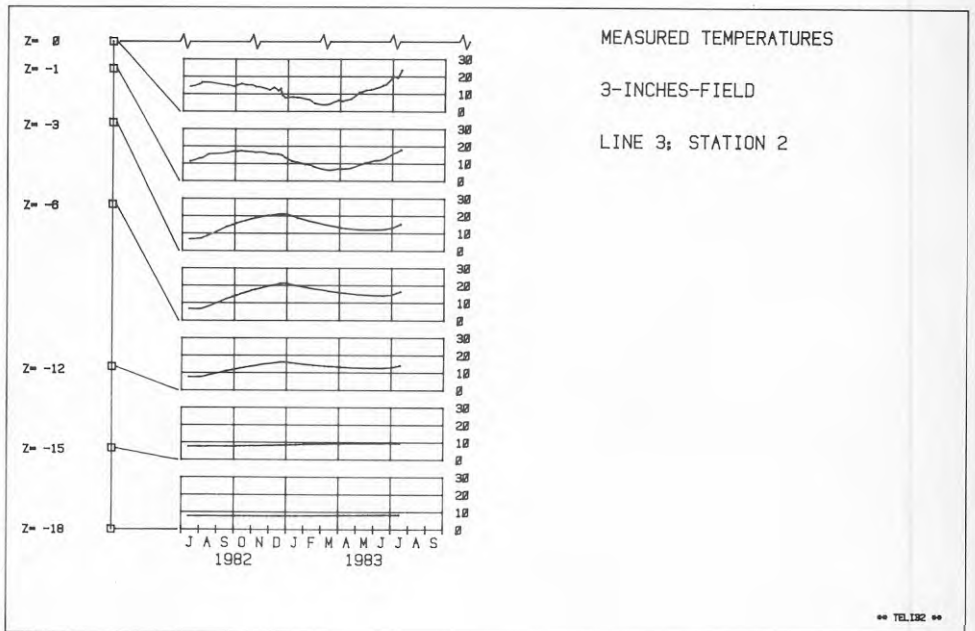
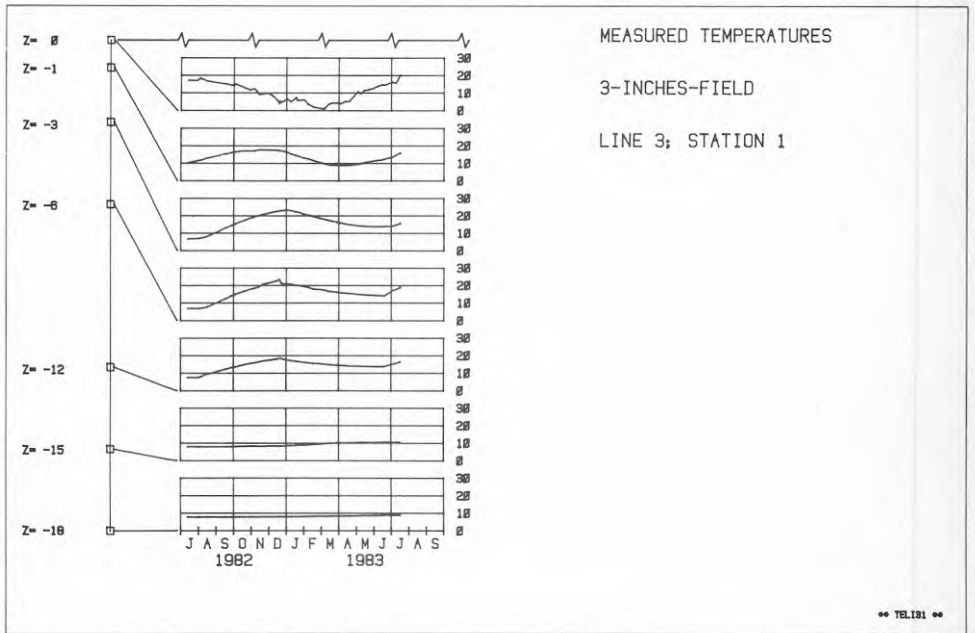
REMARKS

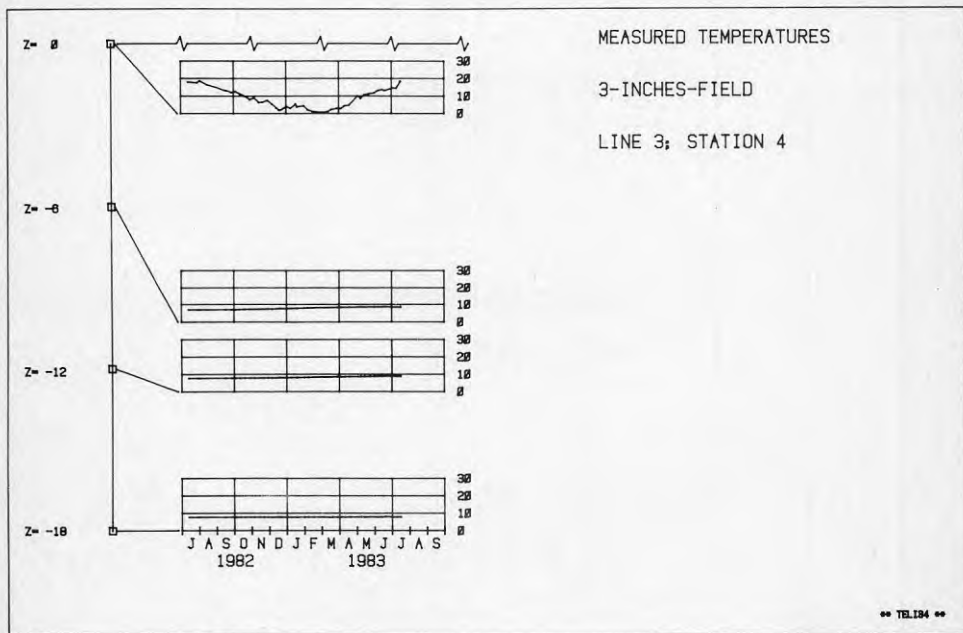
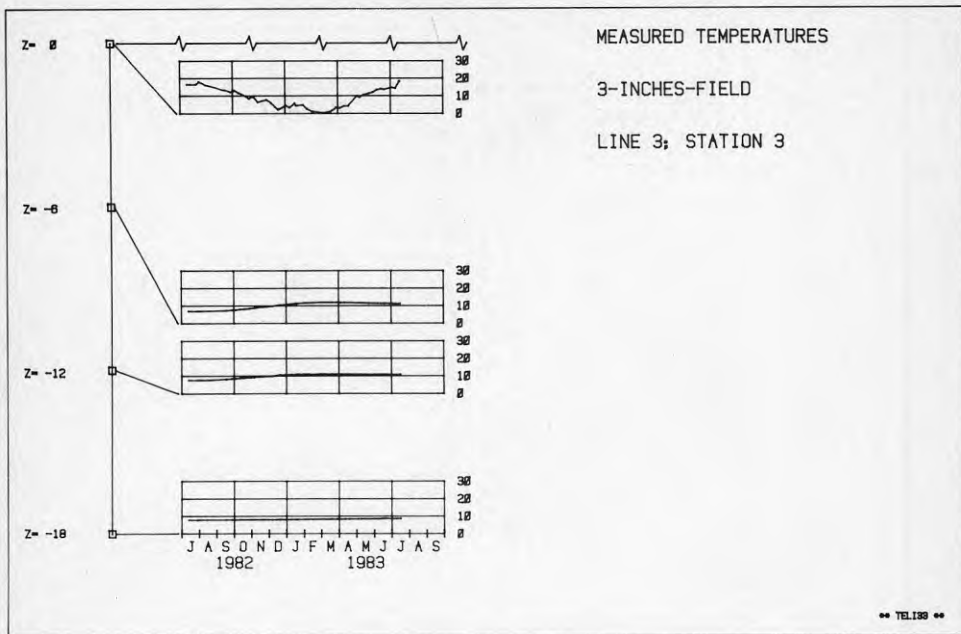
- OUTSIDE HEATEXCHANGER
- ..... DISTANCE 0.20 m
- - - - DISTANCE 0.56 m
- · - · DISTANCE 0.99 m

AVERAGE STORE TEMPERATURE



CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
 GEOTEKNIK M. GRUNDLÄGGNING  
 VÄRMELAGRING, KUNGÄLV  
 BFR-PROJ. 810113-2  
 DAT. 860317 SIGN. KADO







3-INCHES-FIELD  
LINE 4, DISTANCE 0.3/0.0



3-INCHES-FIELD  
LINE 4, DISTANCE 1.4/0.9



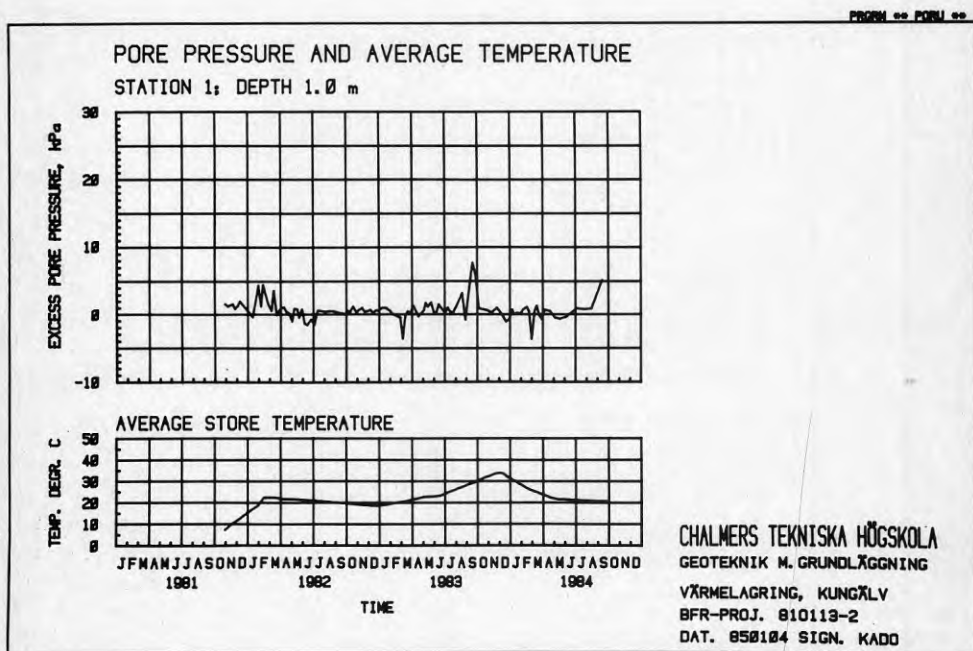
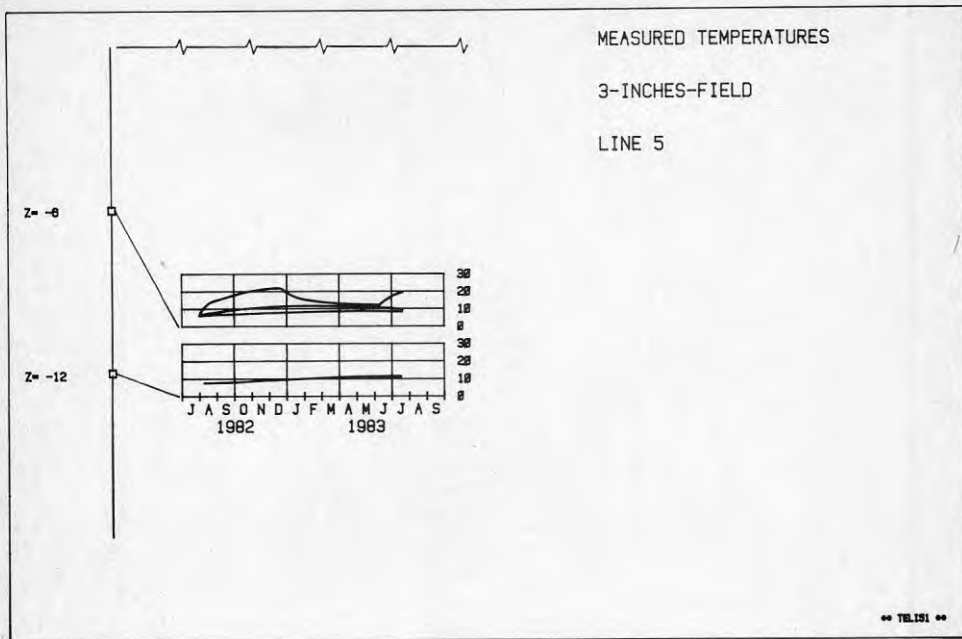
3-INCHES-FIELD  
LINE 4, DISTANCE 3.0/4.4



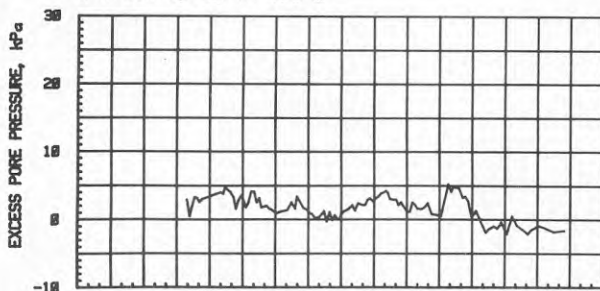
3-INCHES-FIELD  
LINE 4, DISTANCE 7.2/1.1



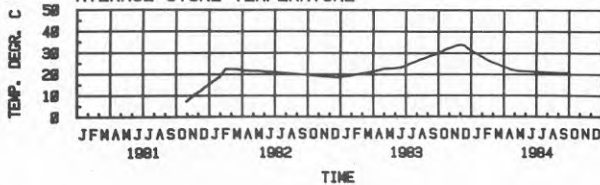
3-INCHES-FIELD  
LINE 4, DISTANCE 8.1/0.2



PORE PRESSURE AND AVERAGE TEMPERATURE  
STATION 1; DEPTH 4.5 m

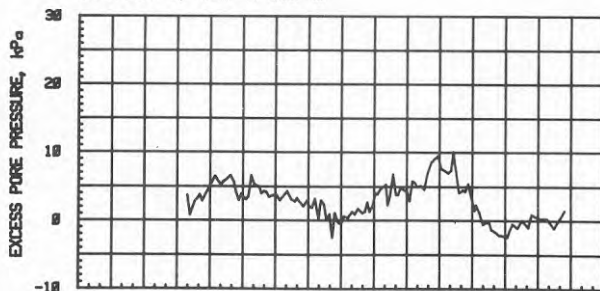


AVERAGE STORE TEMPERATURE

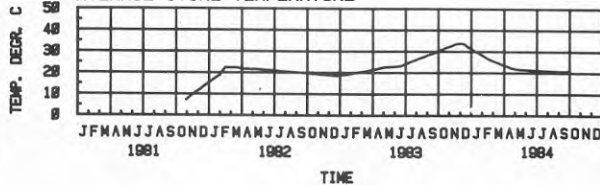


CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
GEOTEKNIK M. GRUNDLÄGGNING  
VÄRMELAGRING, KUNGÄLV  
BFR-PROJ. 810113-2  
DAT. 850104 SIGN. KADO

PORE PRESSURE AND AVERAGE TEMPERATURE  
STATION 1; DEPTH 6.0 m



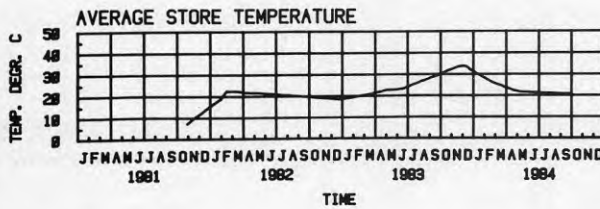
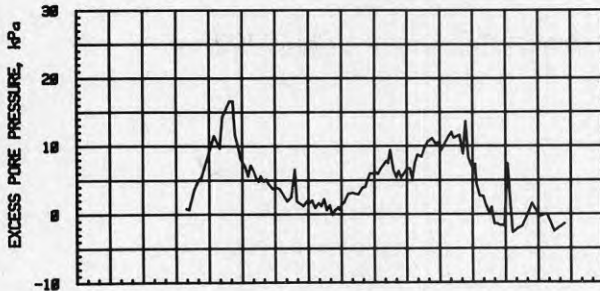
AVERAGE STORE TEMPERATURE



CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
GEOTEKNIK M. GRUNDLÄGGNING  
VÄRMELAGRING, KUNGÄLV  
BFR-PROJ. 810113-2  
DAT. 850104 SIGN. KADO

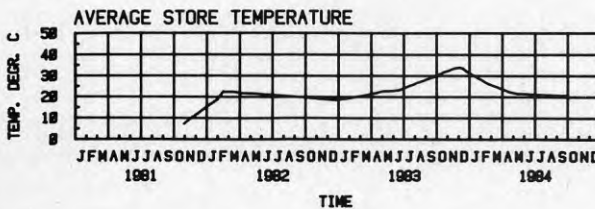
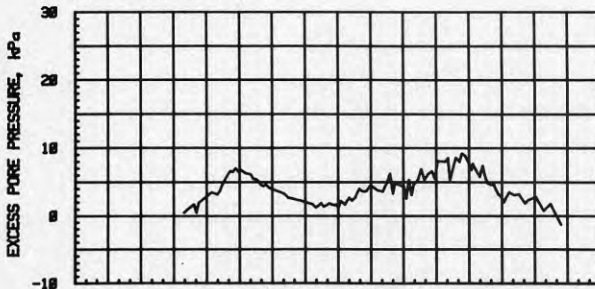


PORE PRESSURE AND AVERAGE TEMPERATURE  
STATION 1; DEPTH 9.0 m



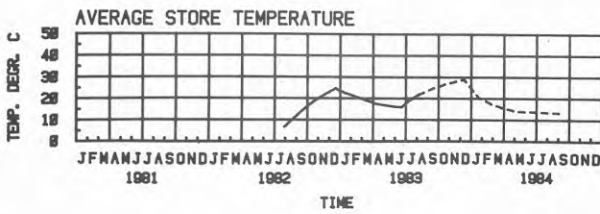
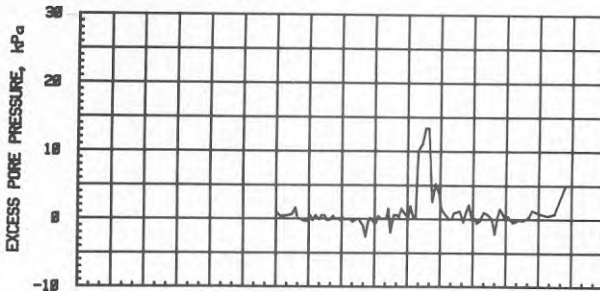
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
GEOTEKNIK M. GRUNDLÄGGNING  
VÄRMELAGRING, KUNGÄLV  
BFR-PROJ. 810113-2  
DAT. 850104 SIGN. KADO

PORE PRESSURE AND AVERAGE TEMPERATURE  
STATION 1; DEPTH 15.0 m



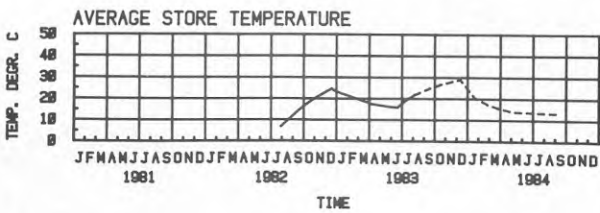
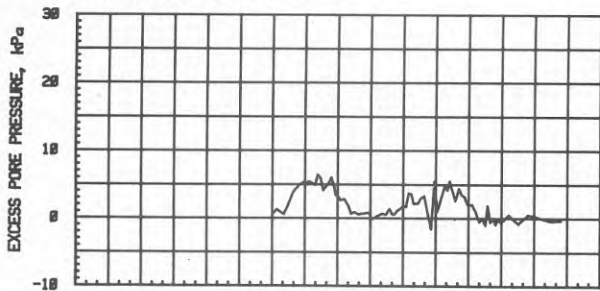
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
GEOTEKNIK M. GRUNDLÄGGNING  
VÄRMELAGRING, KUNGÄLV  
BFR-PROJ. 810113-2  
DAT. 850104 SIGN. KADO

PORE PRESSURE AND AVERAGE TEMPERATURE  
STATION 2; DEPTH 1.0 m



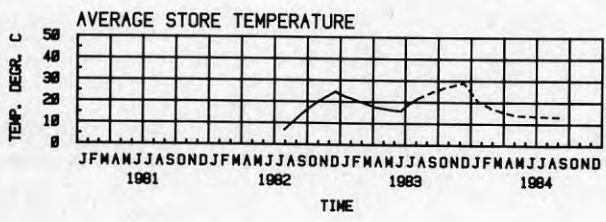
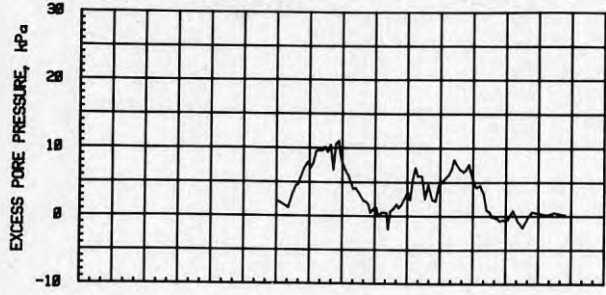
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
GEOTEKNIK M. GRUNDLÄGGNING  
VÄRMELAGRING, KUNGÄLV  
BFR-PROJ. 810113-2  
DAT. 850110 SIGN. KADD

PORE PRESSURE AND AVERAGE TEMPERATURE  
STATION 2; DEPTH 4.5 m



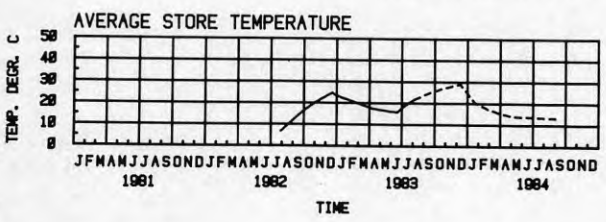
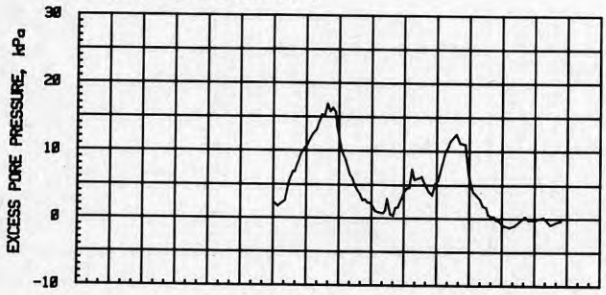
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
GEOTEKNIK M. GRUNDLÄGGNING  
VÄRMELAGRING, KUNGÄLV  
BFR-PROJ. 810113-2  
DAT. 850110 SIGN. KADD

PORE PRESSURE AND AVERAGE TEMPERATURE  
STATION 2; DEPTH 6.0 m



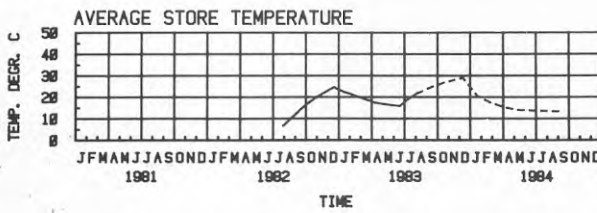
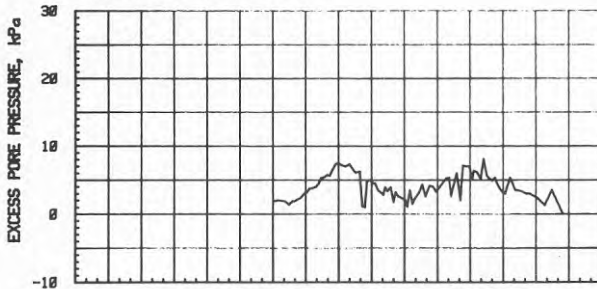
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
 GEOTEKNIK M. GRUNDLÄGGNING  
 VÄRMELAGRING, KUNGÄLV  
 BFR-PROJ. 810113-2  
 DAT. 850110 SIGN. KADO

PORE PRESSURE AND AVERAGE TEMPERATURE  
STATION 2; DEPTH 9.0 m



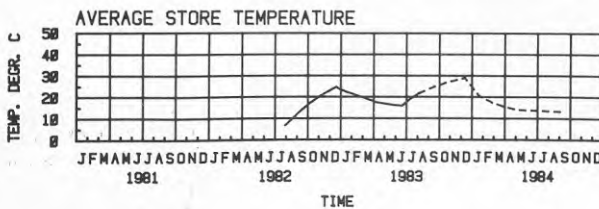
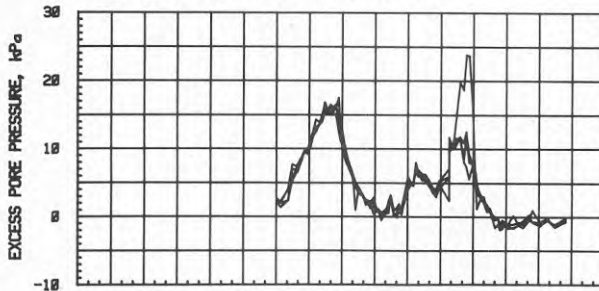
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
 GEOTEKNIK M. GRUNDLÄGGNING  
 VÄRMELAGRING, KUNGÄLV  
 BFR-PROJ. 810113-2  
 DAT. 850110 SIGN. KADO

PORE PRESSURE AND AVERAGE TEMPERATURE  
STATION 2; DEPTH 15.0 m



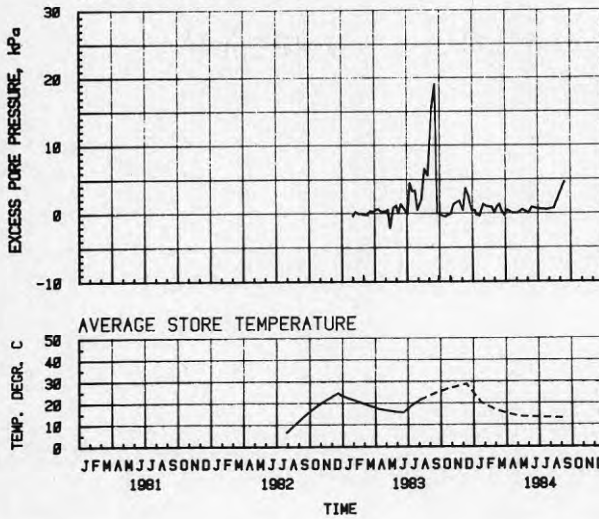
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
GEOTEKNIK M. GRUNDLÄGGNING  
VÄRMELAGRING, KUNGÄLV  
BFR-PROJ. 810113-2  
DAT. 850225 SIGN. KADO

PORE PRESSURE AND AVERAGE TEMPERATURE  
STATION 3; DEPTH 9.0 m; 4 GAUGES



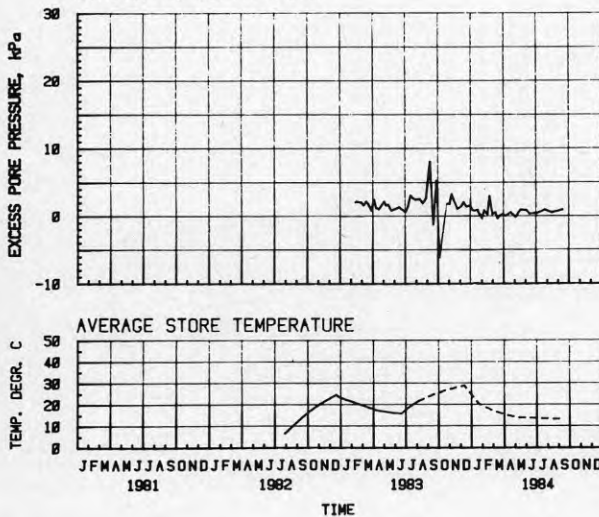
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
GEOTEKNIK M. GRUNDLÄGGNING  
VÄRMELAGRING, KUNGÄLV  
BFR-PROJ. 810113-2  
DAT. 850304 SIGN. KADO

PORE PRESSURE AND AVERAGE TEMPERATURE  
STATION 4; DEPTH 1.0 m



CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
GEOTEKNIK M. GRUNDLÄGGNING  
VÄRMELAGRING, KUNGÄLV  
BFR-PROJ. 810113-2  
DAT. 850225 SIGN. KADO

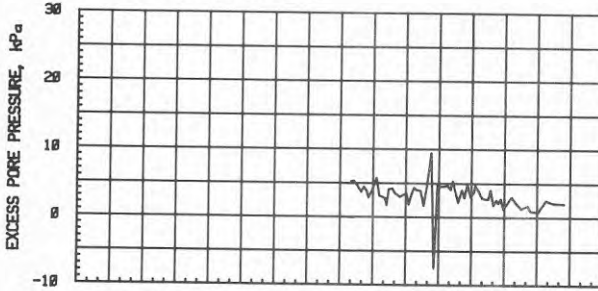
PORE PRESSURE AND AVERAGE TEMPERATURE  
STATION 4; DEPTH 4.5 m



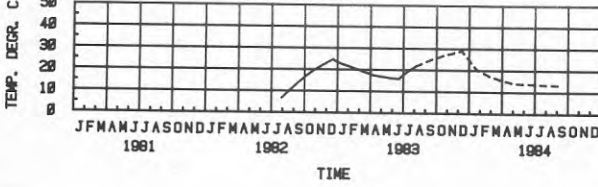
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
GEOTEKNIK M. GRUNDLÄGGNING  
VÄRMELAGRING, KUNGÄLV  
BFR-PROJ. 810113-2  
DAT. 850225 SIGN. KADO

PORE PRESSURE AND AVERAGE TEMPERATURE

STATION 4; DEPTH 6.0 m



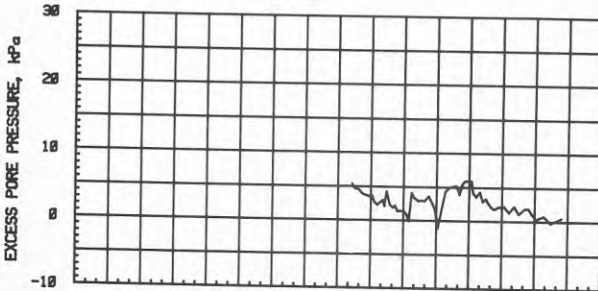
AVERAGE STORE TEMPERATURE



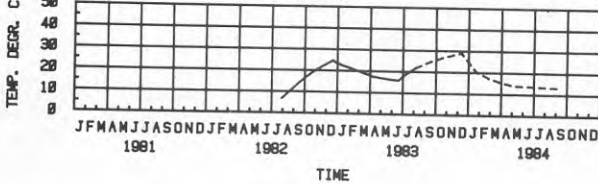
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
 GEOTEKNIK M. GRUNDLÄGGNING  
 VÄRMELAGRING, KUNGÄLV  
 BFR-PROJ. 810113-2  
 DAT. 850225 SIGN. KADO

PORE PRESSURE AND AVERAGE TEMPERATURE

STATION 4; DEPTH 9.0 m



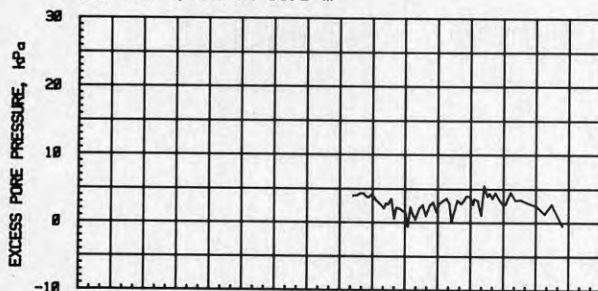
AVERAGE STORE TEMPERATURE



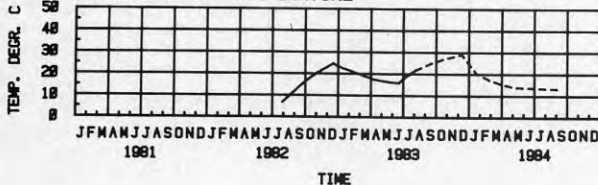
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
 GEOTEKNIK M. GRUNDLÄGGNING  
 VÄRMELAGRING, KUNGÄLV  
 BFR-PROJ. 810113-2  
 DAT. 850225 SIGN. KADO

PORE PRESSURE AND AVERAGE TEMPERATURE

STATION 4; DEPTH 15.0 m



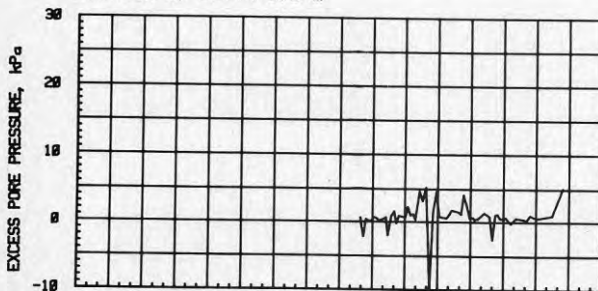
AVERAGE STORE TEMPERATURE



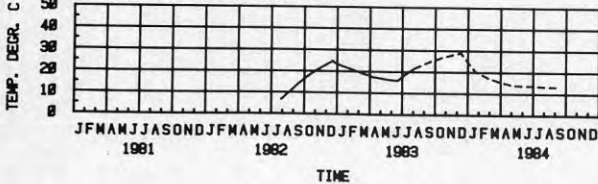
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
 GEOTEKNIK M. GRUNDLÄGGNING  
 VÄRMELAGRING, KUNGÄLV  
 BFR-PROJ. 810113-2  
 DAT. 850225 SIGN. KADO

PORE PRESSURE AND AVERAGE TEMPERATURE

STATION 5; DEPTH 1.0 m



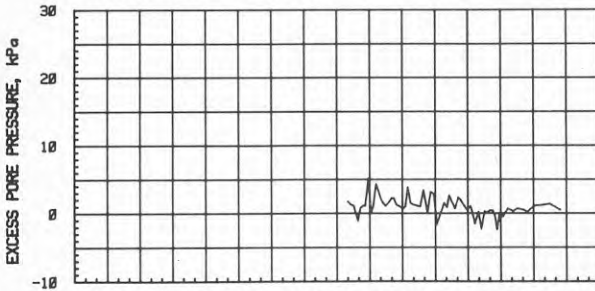
AVERAGE STORE TEMPERATURE



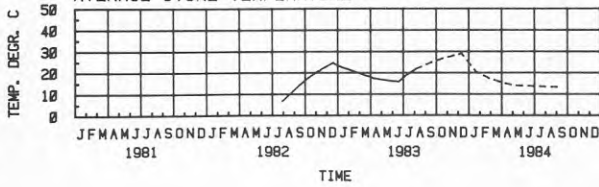
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
 GEOTEKNIK M. GRUNDLÄGGNING  
 VÄRMELAGRING, KUNGÄLV  
 BFR-PROJ. 810113-2  
 DAT. 850225 SIGN. KADO

PORE PRESSURE AND AVERAGE TEMPERATURE

STATION 5; DEPTH 4.5 m



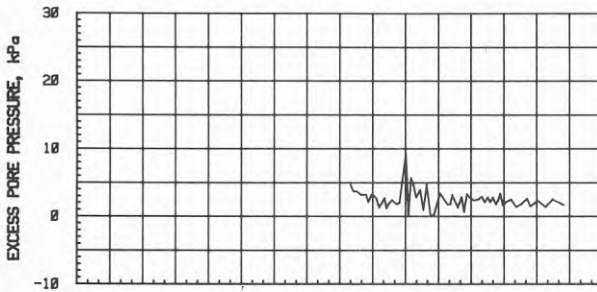
AVERAGE STORE TEMPERATURE



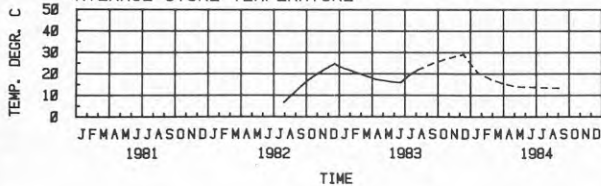
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
 GEOTEKNIK M. GRUNDLÄGGNING  
 VÄRMELAGRING, KUNGÄLV  
 BFR-PROJ. 810113-2  
 DAT. 850110 SIGN. KADO

PORE PRESSURE AND AVERAGE TEMPERATURE

STATION 5; DEPTH 6.0 m



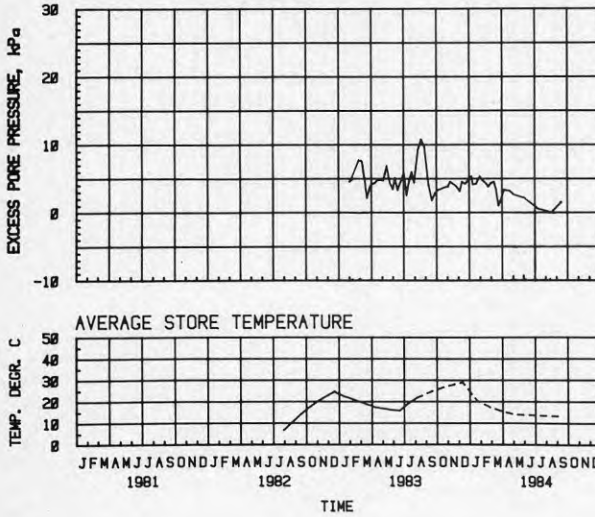
AVERAGE STORE TEMPERATURE



CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
 GEOTEKNIK M. GRUNDLÄGGNING  
 VÄRMELAGRING, KUNGÄLV  
 BFR-PROJ. 810113-2  
 DAT. 850110 SIGN. KADO

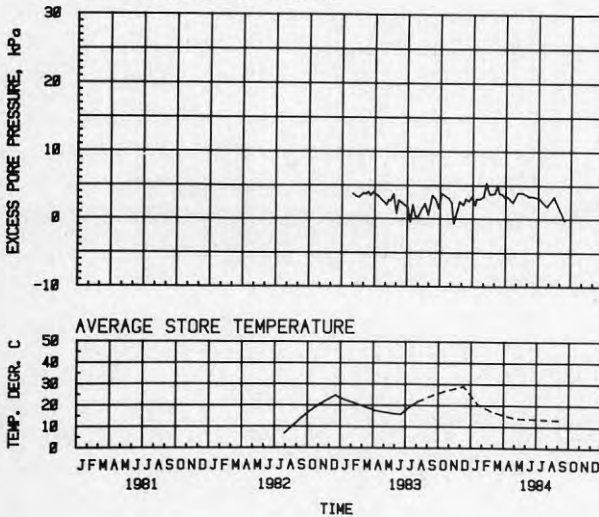


PORE PRESSURE AND AVERAGE TEMPERATURE  
STATION 5; DEPTH 9.0 m

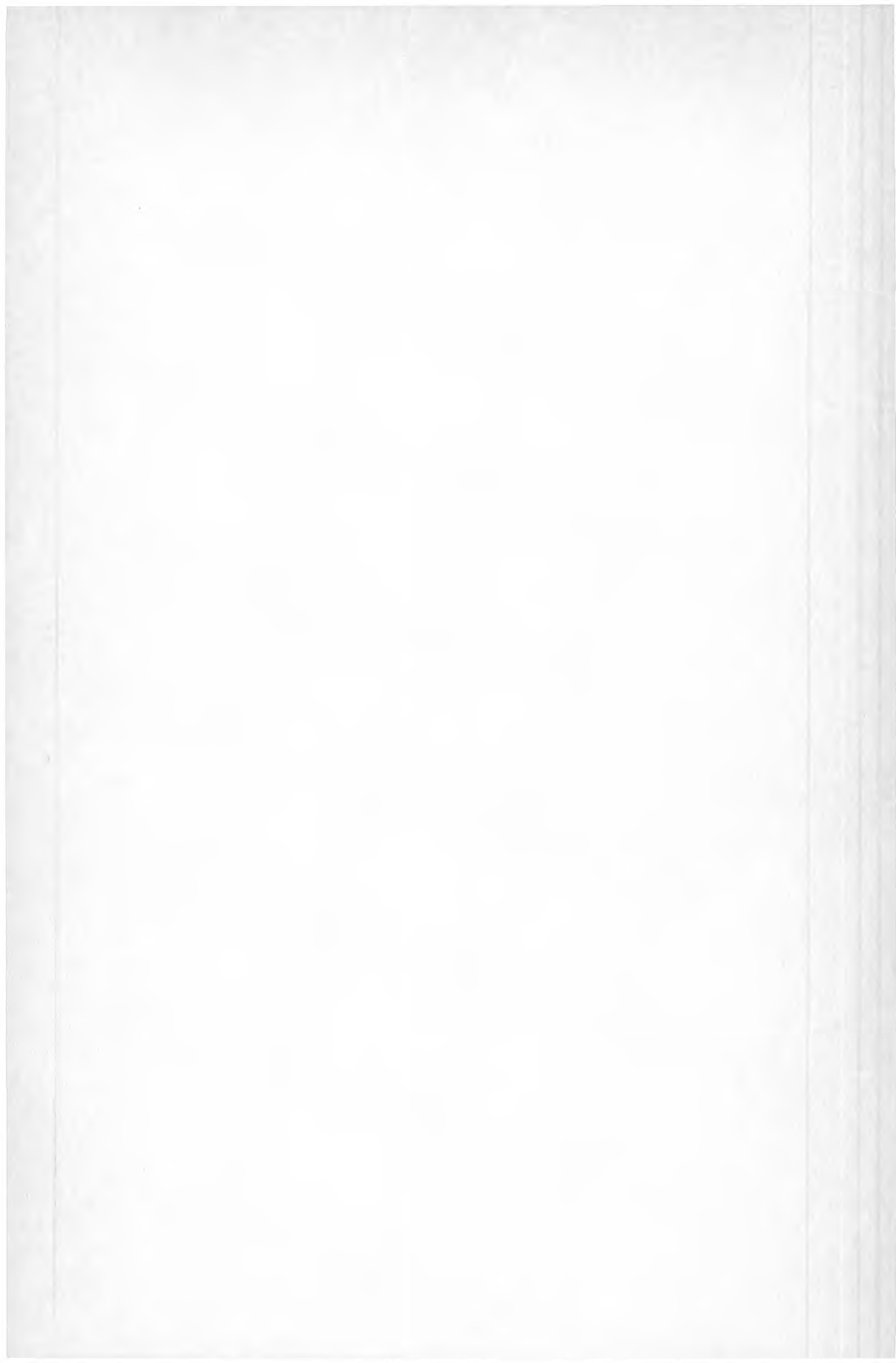


CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
 GEOTEKNIK M. GRUNDLÄGGNING  
 VÄRMELAGRING, KUNGÄLV  
 BFR-PROJ. 810113-2  
 DAT. 850304 SIGN. KADO

PORE PRESSURE AND AVERAGE TEMPERATURE  
STATION 5; DEPTH 15.0 m



CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
 GEOTEKNIK M. GRUNDLÄGGNING  
 VÄRMELAGRING, KUNGÄLV  
 BFR-PROJ. 810113-2  
 DAT. 850304 SIGN. KADO



**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 810113-2  
från Statens råd för bygnadsforskning till Chalmers  
tekniska högskola, Institutionen för geoteknik med  
grundläggning, Göteborg.**

**R23: 1987**

**ISBN 91-540-4693-9**

**Statens råd för bygnadsforskning, Stockholm**

**Art.nr: 6707023**

**Abonnemangsgrupp:  
W. Installationer**

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

**Cirkapris: 51 kr exkl moms**