



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**

**R40:1990**

# **Högtemperaturlager i lera**

**Geoteknik, systemteknik och  
kostnads kalkyler**

**Jan Sundberg**

V-HUSETS BIBLIOTEK, LTH



15000

400135447

# **Byggforskningsrådet**

R40:1990

HOGTEMPERATURLAGER I LERA

Geoteknik, systemteknik och kostnadskalkyler

Jan Sundberg

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 880876-9  
från Statens råd för byggnadsforskning till Statens  
geotekniska institut, Linköping.

## REFERAT

Med lågtemperaturlager avses sådana lager som har en för låg temperatur för att energin skall kunna utnyttjas direkt i ett uppvärmningssystem. Lågtemperaturlager kräver därför värmepump för att energin i lagret skall kunna tillgodogöras. Nyttan av lågtemperaturlager i jämförelse med luft som värmekälla till värmepump blir framförallt en bättre energitäckning (ca 10-15%).

Vid användning av högtemperaturlager är värmepumpen ej nödvändig och systemet kan göras enklare. Användning blir emellertid mer begränsad eftersom en högre temperaturnivå på den lagrade energin erfodras.

I rapporten diskuteras de geotekniska aspekterna vid högtemperaturlagring i lera med utgångspunkt från de erfarenheter som finns från laboratieskala och fältförsök. Vid de aktuella temperaturnivåerna kommer driften av värmelagret att medföra sättningar. Laboratieförsök tyder vidare på att jordens kompressionsegenskaper förändras vid uppvärmning.

Dessutom diskuteras de systemtekniska aspekterna för markvärmelager vid olika tillämpningar. Slutligen görs omfattande värmeförlustberäkningar och kostnadskalkyler för lagertypen.

En av de viktigaste slutsatserna av arbetet är att kostnadsnivån för säsongslagring med högtemperaturlager i lera är lägre än konkurrerande värmelager med vatten som lagringsmedium. Detta gäller även om kostnaderna normeras i förhållande till inlagrad energimängd.

För att lagertypen skall kunna införas i befintlig bebyggelse måste väl genomförda undersökningar utföras i fältskala, gärna i form av en för-söksackumulator. Detta är nödvändigt för att kunna fastställa storleken av sättningarna och den geotekniskt påverkade zonen runt lagret.

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

Denna skrift är tryckt på miljövänligt, oblekt papper.

R40:1990

ISBN 91-540-5193-2

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

**gotab** Stockholm 1990

# INNEHÅLLSFÖRTECKNING

## SAMMANFATTNING

<b>1</b>	<b>INLEDNING .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>TEMPERATURPÅVERKAN PÅ LERA .....</b>	<b>3</b>
2.1	Inledning .....	3
2.2	Utförda laboratorieförsök .....	4
2.3	Uppföljningar av fullskaleprojekt .....	8
2.4	Försöksfält i Kungälv .....	13
2.5	Värdering av utförda försök och uppföljningar ...	15
2.6	Simulering av sättningsförlopp .....	18
<b>3</b>	<b>PLASTMATERIAL TILL VÄRMEVÄXLARE .....</b>	<b>21</b>
<b>4</b>	<b>VÄRMEFÖRLUSTER .....</b>	<b>23</b>
4.1	Inledning .....	23
4.2	Optimal isolering .....	24
4.3	Kostnader och data för isoleringsmaterial .....	25
<b>5</b>	<b>SYSTEMASPEKTER .....</b>	<b>27</b>
5.1	Allmänt .....	27
5.2	Solvärmelager .....	30
5.3	Fjärrvärmelager .....	32
5.4	Tryckfall i markvärmeväxlare .....	34
5.5	Principutformning av lager .....	35
<b>6</b>	<b>KOSTNADER FÖR MARKVÄRMELAGER .....</b>	<b>37</b>
6.1	Kostnadsberäkning .....	37
6.2	Möjlig kostnadsreducering .....	40
6.3	Tillåten lagerkostnad .....	41
<b>7</b>	<b>SLUTSATSER .....</b>	<b>44</b>
	<b>REFERENSER .....</b>	<b>46</b>

## FÖRORD

Denna rapport hänför sig till BFR-projekt 880876-9, samfinansierat av Bygghörskningsrådet och Statens geotekniska institut. Projektet behandlar möjligheterna med högttemperaturlagring i lera ur systemtekniska och geotekniska aspekter.

Arbetet har utförts vid Statens geotekniska institut. Projektledare har varit Jan Sundberg, numera verksam vid Terratema AB. Inom avsnittet som berör temperaturpåverkan på lera har Lovisa Bergenståhl (SGI) utfört ett omfattande arbete avseende simulering av sättningsförlopp vid värmelagring. Rolf Larsson (SGI) har lämnat värdefulla synpunkter på utförandet av simuleringsberäkningarna under arbetets gång. Monika Nord (SGI) har medverkat med att ta fram uppgifter beträffande plastmaterial.

Caroline Magnusson och Bengt Rydell har slutligen bidragit med värdefulla synpunkter på rapportens uppläggning och innehåll.

Linköping februari 1990

Jan Sundberg

## SAMMANFATTNING

Om lera utsätts för en cyklisk temperaturpåverkan kommer sättningar att utbildas. Detta sker på grund av att när lera värms upp kommer porvattnet att utvidgas mer än kornskelettet varför ett porvattenövertryck utbildas. Som en följd av porövertrycket hävs markytan. Detta porövertryck genererar i sin tur en strömning av vatten ut från den uppvärmda zonen.

När temperaturen sänks uppkommer en volymminskning och ett porundertryck i leran. Detta undertryck kan emellertid endast i begränsad omfattning suga tillbaka porvattnet varför en bestående sättning erhålls. Detta förlopp accentueras vid högre temperaturnivåer på grund av de högre tryckgradienter som då erhålls. Vidare har temperatursvinget i den uppvärmda volymen stor betydelse.

Vid simulering av förhållandena vid CTHs försöksanläggning i Kungälv som drevs upp till drygt 30°C temperatur visade det sig nödvändigt att öka dräneringskapaciteten för att uppnå överensstämmelse mellan uppmätta och simulerade sättningar. Eventuellt fungerar markvärmeväxlarna, i form av U-rörsslingor, som dräner.

Laboratorieförsök vid Institutionen för geoteknik med grundläggning, CTH, tyder på att jordens kompressionsegenskaper förändras vid uppvärmning, vilket skulle medföra ökade sättningar. Detta har dock ej verifierats med fältexperiment. Då temperaturväxlingarna medför såväl volyms- som portrycksförändringar kan även jordens skjuvhållfasthet förväntas att variera med temperaturförändringarna.

Den sammantagna effekten av förändringen av lerans geotekniska egenskaper och "utpumpningen" av vatten medför att sättningar kommer att utbildas. Storleken beror av temperatur och de geotekniska förhållandena vid den aktuella platsen. Troligen kommer geoteknisk påverkan att inskränka sig till den temperaturpåverkade zonen men detta måste verifieras med kontrollerade fältförsök.

Den förhöjda lagertemperaturen i ett marklager kommer att leda till att de termiska egenskaperna i mark förändras. En uttorkning av de övre delarna av lagret riskeras om inte motåtgärder vidtas.

En optimering av behovet av isolering av markvärmelager visar att en relativt omfattande isolering måste genomföras. Värmeförlusterna blir, vid relativt höga energipriser (ca 50 öre/kWh), mellan 20 och 35% för stora respektive små lager baserat på en energiomsättning i lagret per år. Vid lägre energipriser kan en högre förlust tillåtas. De transienta förlusterna de första åren är betydligt större.

Ett marklager kräver en drivande temperatur för inlagring respektive uttag av energi vilket innebär att temperatursvinget i lagret begränsas. Den drivande temperaturen beror av lagrets effektförmåga som styrs av värmeväxlarnas utformning och av centrumavståndet mellan dem. Vidare är värmekapaciteten begränsad jämfört med vatten. Dessa förhållanden medför att ett marklager är mindre effektivt än ett värmelager med vatten som lagringsmedium.

För att förhållandena skall vara energimässigt jämförbara krävs därför att ett marklager i lera görs ungefär dubbelt så stort som ett vattenla-

ger. Ett marklager i berg måste göras ännu större på grund av bergets lägre värmekapacitet. Detta förhållande kan i viss mån kompenseras av att temperaturnivån ej är begränsande i berg.

Kostnadsberäkningarna visar att högttemperaturlager i lera avsedda för säsongslagring kan utföras till en kostnad som varierar mellan ca 50 och 100 kr/m<sup>3</sup> beroende på storlek och isoleringsgrad. Om dessa kostnader normeras till ett vattenlagers energiinnehåll ökar kostnaderna till det dubbla. Till dessa kostnader tillkommer även en hög kostnad för en bufferttank i de fall då effekten varierar kraftigt över dygnet.

Önskas en högre effekttålighet än vad som kan erhållas ur ett säsongslager ökar kostnaderna kraftigt. Genom effektivare byggmetoder och lämpliga material bedöms anläggningskostnaderna för värmelager kunna minska med storleksordningen 25%.

Systemsimuleringar är nödvändiga att göra för att optimera lagret mot övriga komponenter i systemet. Detta är speciellt viktigt för marklager på grund av den energitekniskt komplicerade bilden.

I jämförelse med andra lagringstekniker för säsongslagring, såsom till exempel gropvärmelager, ligger marklagertekniken väl framme och torde vara svår att överträffa kostnadsmässigt. Vid korttidslagring är emellertid värmelagring i vatten att föredra vid tätare energiomsättningar än ca en per månad.

Om problemen med temperaturpåverkan på lerans geotekniska egenskaper kan bemästras är sannolikt högttemperaturlager i lera en av de säsongslagringssformer som har de bästa förutsättningarna inför framtiden.



# 1 INLEDNING

Sedan slutet av 1970-talet har det utvecklats en teknik för värmelagring i lera. Tekniken innebär att U-formade plastslangar trycks ner vertikalt i lera med hjälp av pålkran. U-rören sammankopplas därefter i markytan. En fluid får cirkulera i slangarna varvid U-rören fungerar som värmeväxlare mot den omgivande leran. För en närmare beskrivning av tekniken och av byggda större anläggningar hänvisas till följande publikationer från Byggforskningsrådet: Rydell et al, 1988, Olsson, 1986, Rhen, 1988 samt Holmberg et al, 1986.

I de hittills byggda anläggningarna har temperaturen i lagret varierats från ca 5 °C upp till mellan 20 (Lindälvskolan, Kungsbacka) och 30°C (Ramunderskolan, Söderköping). I en anläggning har temperaturen uppgått till ca 50 °C i en mindre central zon under en kort period varje säsong (Eksta bostadsstiftelse, Kullavik). Värmelagren har uppladdats med lågtemperatursolvärme eller sommarvarm uteluft. För att lagren skall kunna försörja ett värmesystem har därför en kombination med värmepump varit nödvändig.

Vid en kombination av värmepump och värmelager blir den ekonomiska nyttan av lagret en förbättrad energi- och effekttäckningsgrad samt en värmefaktor i jämförelse med luft som värmekälla till värmepump. Den merinvestering som erhålls för ett värmelager måste därvid betalas av denna förbättrade nytta av lagret, se figur 1.1. Den ekonomiska marginalen för lagret blir därvid relativt liten om inte speciella förhållanden föreligger, till exempel spillvärme till låg kostnad eller sådana bullerkrav som en luftvärmepump inte kan tillgodose.

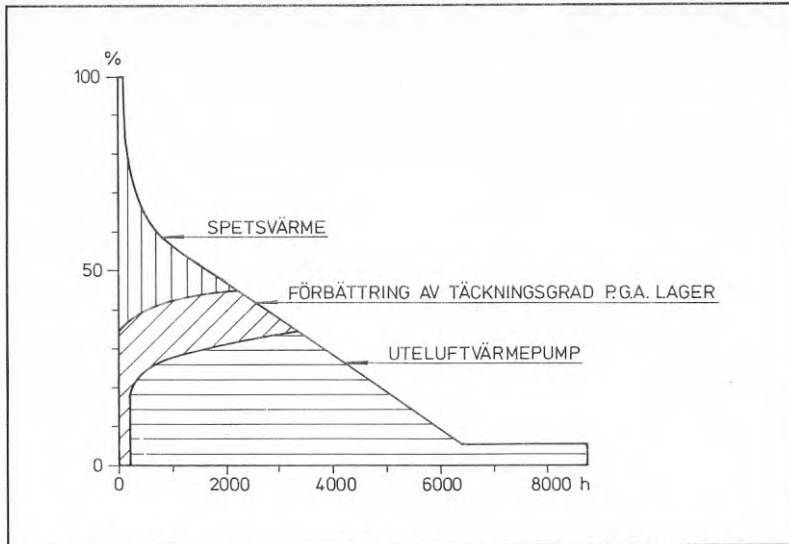
Med tanke på att differentierade eltaxor i allt större utsträckning kommer att införas blir det ekonomiska utrymmet för lågtemperaturlager också mindre, om det inte är elvärme som ersätts. Den förlängda drifttiden för värmepumpen som erhålls vid en lagertillämpning jämfört med uteluft kommer nämligen i stor utsträckning kommer att sammanfalla med tid med höga elpriser.

På grund av värmelagrets begränsade nytta i kombination med värmepump har det blivit alltmer intressant att studera värmelager vid hög temperatur. Ett sådant lager kan direktkopplas till ett värmesystem utan värmepump. Värdet av lagret stiger därmed. Värmen som inlagras i lagret kan vara i form av:

- solvärme
- fjärrvärme
- spillvärme
- elvärme

En rad frågeställningar blir emellertid nödvändiga att besvara inför byggande av högttemperaturlager i lera. De viktigaste rör systemtekniska aspekter, påverkan på lerans geotekniska egenskaper samt materialfrågor.

Dimensioneringen av lagret blir betydligt känsligare än vid en värmepumptillämpning eftersom temperaturnivån på utgående vatten från lagret vid värmeuttag måste ställas i relation till värmesystemets behov vid varje tidpunkt. Det är med andra ord ointressant hur mycket energi som finns i lagret om inte temperaturnivån är tillräckligt hög. Ett liknande resonemang kan föras vid laddning av lagret.



Figur 1.1 Principskiss över nyttan av ett lågtemperaturlager jämfört med luft som värmekälla till värmepump.

Vidare kommer lera att utsättas för en betydligt högre temperatur än vad som tidigare varit fallet. Detta kan innebära att omgivande bebyggelse påverkas i form av sättningar eller att rörelserna i själva lagret blir oacceptabla. Det är också fullt tänkbart att en uttorkning av lagrets övre del kan ske med påföljande negativ inverkan på lagrings- och effektkapaciteten.

Slutligen kommer stora krav att ställas på isolering och material i slangar. Isoleringen av lagret kommer att svara för en stor andel av investeringskostnaderna varför det är högst väsentligt att kunskap finns om hur isolerförmågan upprätthålls under aktuella förhållanden för att undvika överdimensionering. Det material som använts i slangarna vid lågtemperaturtillämpningar är polyeten. Det är tveksamt om detta material kan användas eller om andra material som till exempel nätförstärkt polyeten (PEX) får användas.

Värmelagring i lera är således inte problemfri. Det finns emellertid en stor fördel med värmelagring i lera med vertikala rörsystem jämfört med värmelagring i tankar och gropar. Ett lager i lera är nämligen betydligt billigare per inlagrad kWh än vattenvärmelager om effektkraven är måttliga.

En närliggande värmelagringsteknik är borrhålsvärmelagring. Denna teknik kommer dock endast att beröras på vissa ställen i denna rapport i jämförande syfte.

I de följande kapitlen kommer följande områden att behandlas: temperaturpåverkan på leras geotekniska egenskaper, materialval, värmeförluster, systemteknik och kostnader. Rapporten avslutas med en serie slutsatser beträffande teknik och ekonomi.

## 2 TEMPERATURPÅVERKAN PÅ LERA

### 2.1 Inledning

Alltsedan värmelager med vertikala rörsystem i lera började byggas i slutet av 1970-talet har diskussioner förts beträffande geoteknisk temperaturpåverkan på lera. Den forskning och uppföljning som har bedrivits inom området har huvudsakligen finansierats av Byggforskningsrådet (BFR). Följande översikt visar vilka forskningsinsatser som bedrivits i Sverige inom området, under vilka tidsperioder samt vem som utfört dem:

- Uppföljning av mindre värmelager i Utby, 1979-1982. Geologiska institutionen, CTH, Göteborg.
- Uppföljning av värmelager vid Lindälvskolan, Kungsbacka, 1981-1984. Geologiska institutionen, CTH, Göteborg.
- Uppföljning av värmelager i Kullavik, 1983-1985. Hagkonsult AB, Göteborg.
- Uppföljning av mindre värmelager i Alingsås, 1982-1983. Geologiska institutionen, CTH, Göteborg.
- Uppföljning av mindre värmelager för församlingshem i Söderköping, 1984-1987. SGI, Linköping.
- Uppföljning av värmelager för skola och sporthall i Söderköping, 1987-1991. SGI, Linköping.
- Försöksfält för geoteknisk temperaturpåverkan på lera i Kungälv, 1981-1985. Institutionen för geoteknik med grundläggning, CTH, Göteborg.
- Laboratorieförsök av temperaturpåverkan på leras förkonsolideringstryck, 1982-1986. Institutionen för geoteknik med grundläggning, CTH, Göteborg.
- Laboratorieförsök av temperaturpåverkan på sulfidleras geotekniska egenskaper, 1983-1984. Avdelningen för geoteknik, LuTH, Luleå.

Orsaken till att sådana omfattande insatser utförts är att i första hand farhågor om att ett värmelager geotekniskt kan påverka grundläggningen av omkringliggande bebyggelse eller orsaka annan skada. I andra hand har man befarat att omfattande sättningar i lagret kan påverka slanginstallationen och verksamheten ovanpå lagret, till exempel i form av idrottsplan eller parkeringsyta. I tredje hand kan den höga temperaturen påverka jordens termiska egenskaper på ett sådant sätt att lagrets termiska funktion försämras.

De förändringar som man med säkerhet vet kommer att uppträda är en volymökning av porvattnet och kornskelettet vid en ökad temperatur. Denna volymökning kommer att resultera i en markrörelse. Eftersom vattens temperaturutvidgningskoefficient är betydligt större än mineralpartiklarnas och lera har en låg permeabilitet kommer också en portrycksökning att induceras (ekvation 2.2 i avsnitt 2.2). Genom portrycksökningen kommer också skjuvhållfastheten att minska vilket i ogynnsamma fall kan leda till skred vid sluttande terräng i analogi med portrycksökningar på grund av hög nederbörd.

Vid ökad temperatur och stora temperaturgradienter kommer fuktrörelser att uppträda i marken. I ogynnsamma fall kan dessa leda till uttorkning runt slangarna med drastiskt försämrad värmeöverföring som följd. Det är emellertid mycket osannolikt att en sådan uttorkning sker i lera vid vattenmättad. Då porerna är fyllda med vatten förekommer nämligen

ingen förångning och om någon vattenrörelse i riktning från slangarna trots allt sker har lera en mycket hög vattenhållande förmåga som medför att vattnet sannolikt sugts tillbaka.

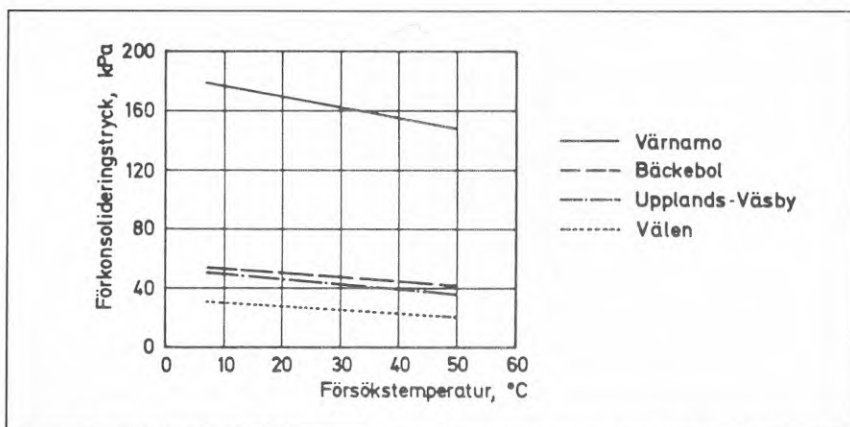
I ytan av ett markvärmelager i lera är emellertid situationen en annan. Om en förångning tillåts där kommer troligen en vattenhaltsminskning att uppträda i den övre delen av lagret. Om det inte finns något överskott på vatten att suga upp kommer en succesiv uttorkning att uppträda. Hur långt ner i lagret en sådan påverkan sträcker sig och effekten därav beror av en rad faktorer.

En vattenhaltsminskning kommer att påverka de termiska egenskaperna för leran. Värmekapaciteten kommer att minska. Vid måttliga vattenhaltsminskningar i kombination med hög temperatur kommer den effektiva värmekonduktiviteten att öka vilket kan få negativ inverkan på värmeförlusternas storlek. Vid en vattenhaltsminskning som närmar sig uttorkning kommer värmekonduktiviteten att minska drastiskt vilket främst kan påverka laddningen av lagret sommartid (Sundberg, 1988).

De olika projekten ovan beskrivs i de följande avsnitten. Laboratorieförsöken tas upp under kapitel 2.2, erfarenheter av befintliga anläggningar under 2.3 och resultat från försöksfält beskrivs under avsnitt 2.4. I avsnitt 2.5 värderas utförda försök och uppföljningar. Under avsnitt 2.6 beskrivs SGI:s utförda datorsimuleringar av sättningsförlopp under temperaturpåverkan. Kapitel 2 avslutas med slutsatser. Termiska egenskaper i mark behandlas endast i denna inledning.

## 2.2 Utförda laboratorieförsök

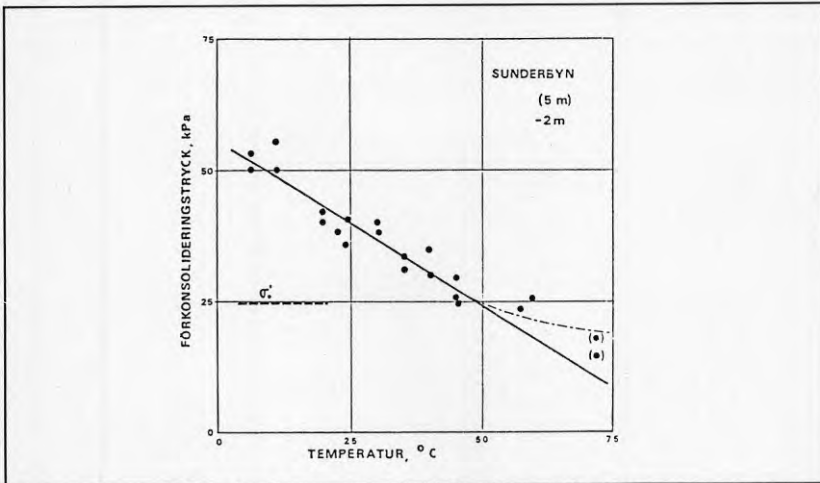
I en licenciatavhandling, utförd vid Institutionen för geoteknik med grundläggning, CTH (Tidfors, 1987), diskuteras temperaturs påverkan på leras deformationsegenskaper. Tidfors genomförde ett stort antal ödometerförsök vid olika temperaturnivåer på leror från fyra olika lokaler. Delar av undersökningen genomfördes i anslutning till de fältförsök i Kungälv som finns redovisade av Adolfsson & Sällfors (1987), se avsnitt 2.4.



Figur 2.1 Utvärderat förkonsolideringstryck som funktion av temperatur. Linjär regression har utnyttjats (Tidfors, 1987).

Ödometerförsök genomförs för att bestämma en leras förkonsoliderings-tryck. Detta kan definieras som den största last som leran varit utsatt för under historisk tid. Vid effektivspänningar (totalspänning - portryck) i jorden upp till förkonsolideringstrycket är kompressionen huvudsakligen elastisk. Överskrider förkonsolideringstrycket blir deformationerna stora och av plastisk natur.

Huvuddelen av försöken genomfördes med ödometer med konstant deformationshastighet (CRS-försök). Utvärderingen av försöken visar entydigt att förkonsolideringstrycket minskar när temperaturen ökar (Tidfors, 1987), se figur 2.1. Liknande resultat har Eriksson (1984) kommit fram till vid CRS-försök på sulfidlera från Luleå, se figur 2.2. Dessa resultat diskuteras i avsnitt 2.5.



Figur 2.2 Utvärderat förkonsolideringstryck som funktion av temperatur (Eriksson, 1984).

Lerorna som härrör från Bäckebo (Götaälvdalen, N Göteborg C) och Välen (10 km SSO Göteborg C) är av marint ursprung och normalkonsoliderade. Leran i Välen innehåller mycket organiskt material och kan närmast karaktäriseras som gyttjig. I Värnamo är leran sötvattenavsatt och överkonsoliderad. Leran från Upplands-Väsby är avsatt i bräckt vatten och normalkonsoliderad. Sulfidleran härrör från Norra Sunderbyn (2 mil NV Luleå C) och är överkonsoliderad. Sulfidlera har vanligen en relativt hög organisk halt, hög halt av järnsulfid samt är relativt siltig.

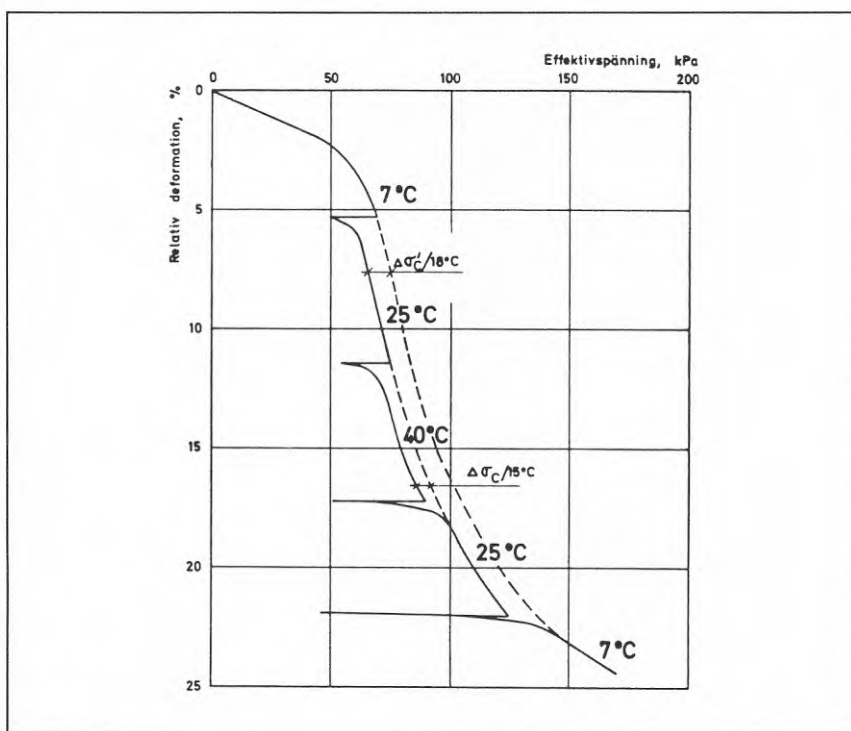
Tidfors utförde även ödometerförsök på en starkt överkonsoliderad lera från Gunnilse (8 km NO Göteborg C). Inget definierbart förkonsolideringstryck kunde utvärderas. Vid de olika temperaturnivåerna kunde ingen skillnad i uppmätta deformationsegenskaper iakttagas.

I figurerna 2.1 och 2.2 har linjär regression utnyttjats för att erhålla en lutningskoefficient. Resultaten visar att för leror undersökta av Tidfors (figur 2.1) förändras förkonsolideringstrycket med mellan 2.2 och 7.3 kPa per 10 °C. Med ett undantag ökar temperaturpåverkan med ökad salthalt vid avsättningstillfället och ökad vattenkvot (minskad densitet). För sulfidleran (figur 2.2) är motsvarande värde 6.3 kPa per 10 °C vilket är ett högt värde jämfört med Tidfors mätningar med hänsyn till avsättningsmiljön. Sulfidleran har emellertid en hög organisk halt vilket kan

vara en bidragande orsak. Eriksson (1984) anger att utvärderingen av förkonsolideringstrycket är mycket osäker vid temperaturer över 50°C.

Om förändringen i uppmätt förkonsolideringstryck relateras till ursprungligt förkonsolideringstryck vid 7°C är förändringen ca 0.4 - 0.7 %/°C för försök utförda av Tidfors. En av slutsatserna Tidfors drar av detta är att uppmätt förkonsolideringstryck i laboratorium är ca 6-8% lägre än det skulle varit om mätningen skett vid naturlig jordtemperatur. Motsvarande minskningen för sulfidlera är ca 1.2 %/°C. En vidare diskussion sker i avsnitt 2.5.

Tidfors och Eriksson har var för sig också utfört CRS-försök där temperaturen ändrades i steg under försökets gång. Tidfors' försök beskrivs i figur 2.3 och visar att jungfrukurvan förskjuts åt vänster vid ökande temperatur och åt höger vid minskande temperatur, en som det verkar helt reversibel process.



Figur 2.3 CRS-försök med varierad temperatur (Tidfors, 1987).

Internationellt har också en rad undersökningar utförts. Tidfors (1987) har utfört en litteratursökning av forskningsresultat i Statens geotekniska instituts databas, SGILINE. Denna sökning stäcker sig fram till början av 1986. Kompletterande sökning har utförts av Tidfors i andra databaser som dock inte gett något utöver resultaten från SGILINE. Relativt få forskningsartiklar framkom vid sökningarna varav flera var relativt gamla. Detta tyder på att den geotekniska forskningen varit relativt begränsad inom området. Ett urval av de av Tidfors upptagna referenserna beskrivs kortfattat här nedan. En kompletterande litteratursökning är utförd inom detta projekt under våren 1989 och beskrivs också.

Campanella & Mitchell (1968) utförde temperaturcyklingsförsök i en triaxialapparat på en vattenmättad Illitisk lera, se figur 2.4. Försöken utfördes mellan varierande temperaturnivåer, upp till 60 °C, i tre uppvärmnings-avkylningscykler.

Försöken visade att vid uppvärmning avgår porvattnet på grund av vattnets, jämfört med mineralpartiklarnas, högre volymsutvidningskoefficient. Vid avkylningen togs endast en del av porvattnet upp i provet igen och en irreversibel volymförändring kvarstod sålunda. Motsvarande förlopp uppträdde vid varje temperaturcykel.

Detta indikerar att om en jordmassa temperaturcyklas kommer en konsolidering att ske. Konsolideringen kommer att bli större när ett större temperaturspann utnyttjas under temperaturcyklningen.

Liknande resultat erhöles också Demars & Charles (1982). De föreslog följande generella ekvation för den irreversibla förändringen ( $\Delta e$ ) av portalet ( $e$ ) för en normalkonsoliderad lera.

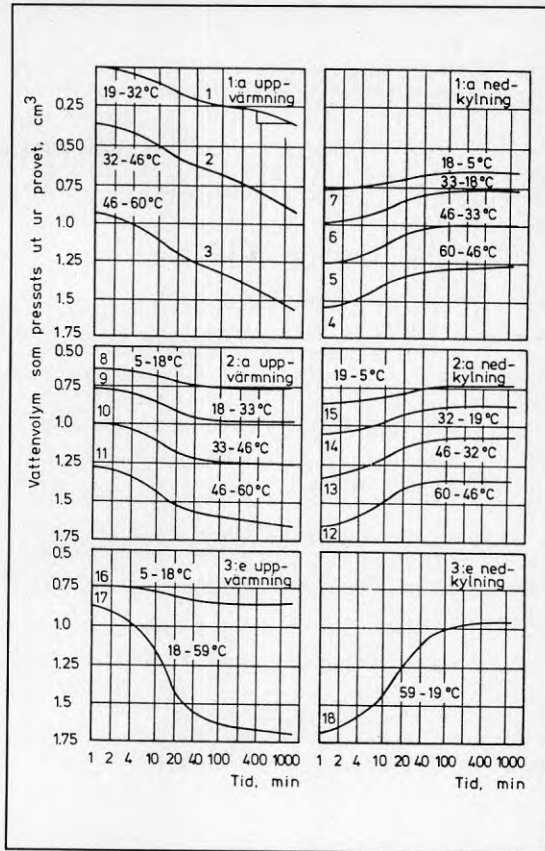
$$\Delta e = (4.8 \cdot 10^{-4} + 8.8 \cdot 10^{-6} \cdot I_p) \cdot \Delta T \quad (2.1)$$

$I_p$  = plasticitetstalet

$\Delta T$  = intervallet för temperaturcyklningen

Habibagahi (1973) undersökte temperturpåverkan på portalet för organisk och oorganisk jord vid olika lastcykler. Habibagahi fann bland annat att temperaturen hade stor inverkan på portalet för organisk jord medan ingen påverkan på portalet för oorganisk jord kunde konstateras. Dessa konstaterande motsäger andra forskares resultat.

Sherif & Borrous (1969) undersökte hur den odränerade skjuvhållfastheten påverkas av temperaturen. Försöken visade att den odränerade skjuvhållfastheten avtog med ökad temperatur. Detta accentuerades vid



Figur 2.4 Dränerat och absorberat vatten vid temperaturcyklning under konstant spänning (Campanella & Mitchell, 1968). Efter Tidfors (1987).

minskad vattenkvot.

Noble & Demirel (1969) utförde också liknande försök. Resultaten visar att skjuvhållfastheten avtar med ökad temperatur under skjuvning samt att skjuvhållfastheten ökar med ökad konsolideringstemperatur.

Campanella & Mitchell (1968) angav ett uttryck för förändringen av portrycket vid en temperaturförändring:

$$\Delta u = n \cdot \Delta T (\beta_s - \beta_w) / \alpha + \beta_{st} \cdot \Delta T / \alpha \quad (2.2)$$

- $\Delta u$  = portrycksförändring, kPa
- $n$  = porositet
- $\Delta T$  = förändring av temperatur, K
- $\beta_s$  = mineralpartiklarnas volymutvidgningskoefficient, 1/K
- $\beta_w$  = vattnets volymutvidgningskoefficient, 1/K
- $\beta_{st}$  = kemisk-fysikalisk volymutvidgningskoefficient pga volymförändringar av kornskelettet, 1/K
- $\alpha$  = kornskelettets kompressibilitet, 1/kPa

Inversen av kornskelettets kompressibilitet är detsamma som det i geotekniska sammanhang använda beteckningen kompressionsmodul, dvs förändringen av effektivspänningen med en volymförändring.

Baldi et al (1988) undersökte termisk expansion av lera med låg porositet. De fann att expansion var betydligt lägre än vad som skulle varit fallet om fritt vatten utsatts för temperaturökning. Baldi et al anser att orsaken till skillnaden beror av att andelen fritt vatten i lera med låg porositet är lågt samt att den termiska expansionen påverkas av elektrokemisk eller elektrisk mikrostrukturell inverkan.

Ctori (1988) undersökte i ett arbete hur temperaturen inverkar på egenskaperna för kohesionsjord. Försöken utfördes vid temperaturer mellan 6 och 35 °C. Ctori fann bland annat att ökad temperatur minskar den odränerade skjuvhållfastheten.

### 2.3 Uppföljningar av fullskaleprojekt

#### Lindälvsolan

Lindälvsolan i Kungsbacka färdigställdes 1981. Skolan värmeförsörjs av 1500 m<sup>2</sup> lågtemperatursolfångare och 4 diseldrivna värmepumpar med ca 600 kW kondensoreffekt tillsammans med ett värmelager i lera. Solfångarna är oglasade och integrerade i takkonstruktionen. Anläggningen finns beskriven av Gräslund et al (1986) och har följts upp värmetekniskt (Holmberg et al, 1986) och geotekniskt (Rhen, 1988).

Lindälvsolan är uppförd vid Kungsbackaan på mäktig, svagt överkonsoliderad, lera. Lerdjupet varierar men uppskattas till ca 50 m vid platsen för värmelagret. I värmelagret är 612 U-rör nedtryckta med ett cc-avstånd om 2 m till ett djup av 35 m. Lagerytan är 38·65 m<sup>2</sup> vilket medför en lagervolym om ca 87000 m<sup>3</sup>. Totalt är ca 42000 m PEH-slang med 16 mm ytterdiameter installerad i lagret.

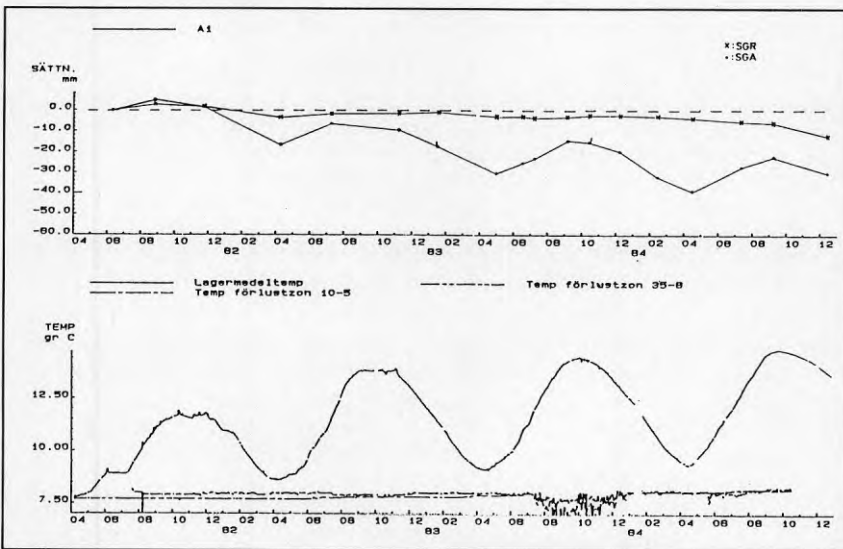
Värmeväxlarna installerades i leran med hjälp av pålkran och en ihålig påle. När pålen tryckts ner till 35 m djup installerades slangen i pålen och vattenfylldes. Därefter öppnades bottenplattan i pålen varefter den



drogs upp samtidigt som U-röret låstes i sitt läge av tillbakaträngande lera. Avståndet mellan skänklarna i U-röret var projekterat till 0.17 m men är sannolikt mindre på grund av den inträngande leran vid installationstillfället.

Det geotekniska mätprogrammet har omfattat åren mellan april 1981 och december 1984 varvid mätning av portryck, sättning och temperatur har utförts. Vidare har ving- och kolvbörning utförts vid 2 å 3 tillfällen. Laboratorieundersökning av ostörda prover har omfattat geoteknisk standardundersökning samt värmekonduktivetsmätning. Mätningarna har utförts i lagret samt vid en referensyta.

Temperaturen i lagret har successivt ökat för att under 1984 variera mellan ca 9 och 15°C. Resultaten av temperatur- och markrörelsemätningarna framgår av figur 2.5. En cyklisk hävning och sättning av marken erhålls som korresponderar mot hög och låg temperatur i lagret. Vidare finns det en nedåtgående trend avseende markrörelsen så att en successiv konsolidering av leran erhålls. Orsaken till detta diskuteras av Rhen (1988) och han visar att den årliga variationsbredden för markrörelsen svarar mot vattnets volymsutvidgning vid förändringen av temperatur under antagande om expansion endast i vertikal led och avsaknad av dränering.



Figur 2.5 Samband mellan temperatur och markrörelser i värmelagret vid Lindälskolan, Kungsbacka (Rhen, 1988).

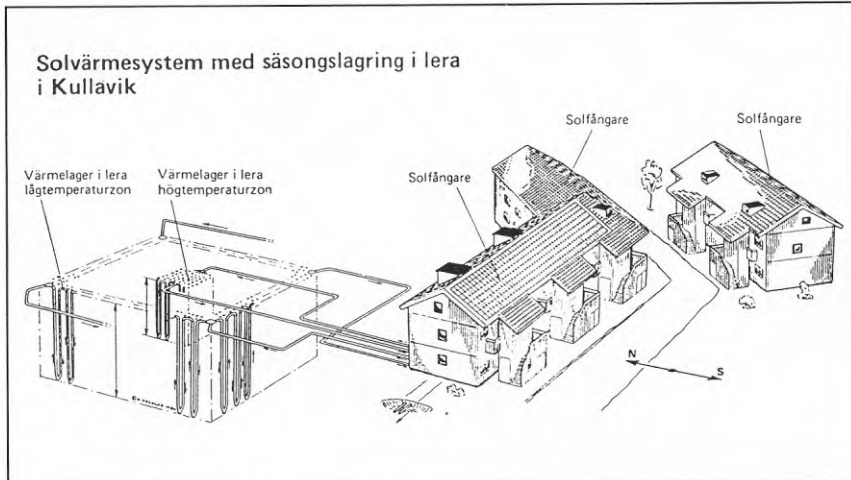
Den totala sättningen under perioden kan ha orsakats av en förändring av de geotekniska egenskaperna på grund av temperaturökning/cykling eller en pålastning. Under byggnadsskedet skedde en viss markplanering som medförde att området där lagret ligger uppfylldes något. Rhen har visat att denna uppfyllnad (5-15 kPa) i sig kan ha orsakat sättningen även om han inte vill utesluta en termisk påverkan.

Portrycksvariationen i lagret har maximalt varit 10 kPa i mitten på lagret. Portrycksmätningarna visar vidare att det finns en uppåtriktad vattenströmning i lagret. Den odränerade skjuvhållfastheten och förkon-

solideringstrycket, mätt i laboratorium, har ej förändrats under mätperioden.

### Kullavik

I Kullavik, väster om Kungsbacka, uppfördes 1982 ett bostadsområde med 75 lägenheter. Området värmeförsörjs med en solvärmeanläggning i kombination med värmelager och värmepump, se figur 2.6. Värmelagret är förlagt i lera. Värmelagret består av en hög- och en lågtemperaturdel där den centralt placerade högtemperaturdelen är direktkopplad till värmesystemet medan värmepumpen tar värme från lågtemperaturdelen.



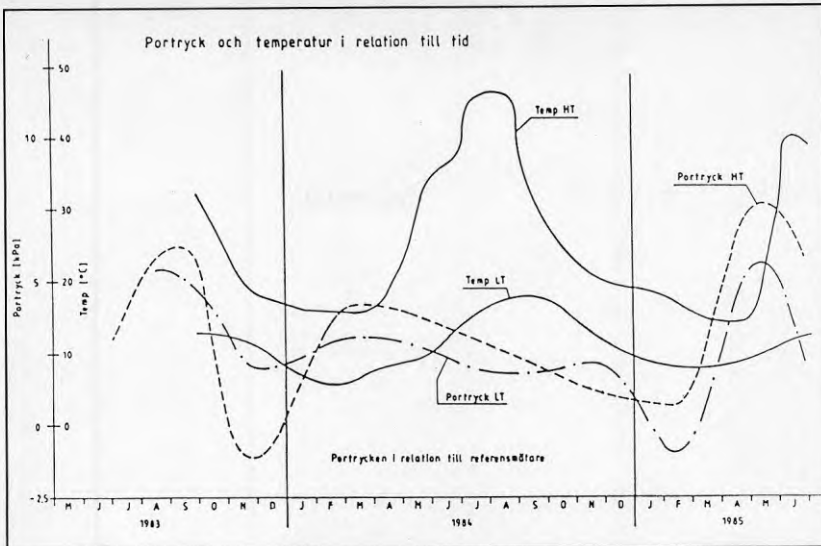
Figur 2.6 Solvärmesystem med säsongslagring. Från Olsson, 1986.

Temperaturen är maximalt 20 och 50 °C i låg- respektive högtemperaturdelen. Lagrets totalvolym är 8300 m<sup>3</sup> varav 200 m<sup>3</sup> i högtemperaturdelen. Lagerdjupet är 12 m och överytan är kvadratisk, 26·26 m<sup>2</sup>. På grund av högtemperaturdelens begränsade volym är värmeförlusterna från denna stora. För att kunna dra nytta av den höga temperaturen nyttjas denna därför relativt snart efter det att den har blivit inlagrad.

Från och med 1989 nyttjas inte den centrala lagerdelen längre för hög temperatur utan den ingår som en del av lågtemperaturdelen. Orsaken är att solfångarkonstruktionen tillsammans med de höga förlusterna gör det mer ekonomiskt att nyttja även högtemperaturdelen till lågtemperaturlager.

I lagret finns totalt 5550 m 32 mm PEH-slang i form av enkla U-rör (värmeväxlare) varav 2000 m är i högtemperaturzonen. Avståndet mellan värmeväxlarna är ca 2 m i lågtemperaturdelen och ca 0.5 m i högtemperaturzonen. Installationsmetoden är densamma som för lagret vid Lindälvs skolan varför skänkelavståndet mellan slangarna för varje U-rör kan antas vara 0.15 m, då uppgift saknas.

Anläggningen är finansierad via BFR:s experimentbyggnadslån och har följts upp värmetekniskt och geotekniskt under 2 säsonger. Den geotekniska uppföljningen var koncentrerad till högtemperaturdelen och om-



Figur 2.7 Uppmätt portryck och temperatur som funktion av tid (Ols-son, 1986).

fattade mätning av portryck och sättning samt geoteknisk undersökning.

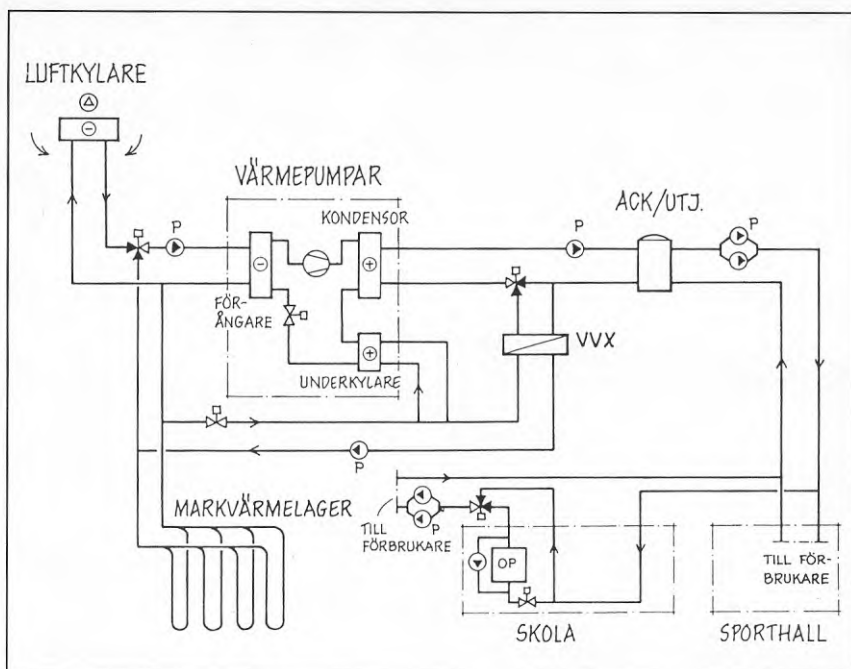
Resultaten visade lägre portrycksvariationer än förväntat som förklaras med en kombination av dränerande siltskikt i leran samt förbättrad dränering på grund av den täta placeringen av U-rör i högtemperatur-zonen (figur 2.7). Några sättningar utöver det normala kunde ej påvisas under den korta tid som uppföljningen varade. De geotekniska undersökningsresultaten påvisade ej heller några entydiga resultat beträffande hållfasthetsnedsättningar i leran.

### Söderköping

I Söderköping försörjs en skola och sporthall med värme från en uteluft-värmepumpanläggning med säsongslagring i lera. Anläggningen färdigställdes 1987 och är finansierad med experimenbyggnadslån. Värmelagret laddas sommartid med värme från uteluften via värmepumpar. Värmepumparna har en kondensoreffekt av ca 560 kW. Ett principalschema över anläggningen visas i figur 2.8. Anläggningen är projekterad av Statens geotekniska institut (SGI) i Linköping och RNK (Rydell et al, 1986) som också svarar för den geotekniska uppföljningen av lagret.

Värmelagret är förlagt i svagt överkonsoliderad lera med tilltagande siltskikt/siltinnehåll med ökat djup under markytan. I värmelagret är 382 stycken dubbla U-rör installerade som värmeväxlare (jämför kapitel 5.1). Lagrets överyta har måtten  $55 \cdot 36 \text{ m}^2$  och har djupet 18 m. Detta ger lagervolymen  $36000 \text{ m}^3$ . U-rören är installerade med avståndet 2.4 m från varandra och avståndet mellan U-rörets skänklar är 0.4 - 0.5 m. Slangen är gjord av PEM med 25 mm ytterdiameter. Köldbärarvätskan är kalciumklorid.

Värmeväxlarna installerades med pålkran och en specialgjord påle som skyddade slangen vid neddrivningen och fixerade slangen med avsett skänkelavstånd. Temperaturen i lagret varierar mellan ca 5 och  $30^\circ\text{C}$  med



Figur 2.8 Principschema över anläggningen i Söderköping.

en max-begränsning på fluiden av 40 °C och en min-begränsning av 1 °C. Lagrets överyta är isolerad och värmeförlusterna är beräknade till 15%.

Uppföljningen omfattar kontinuerlig värmemängds-, temperatur- och portrycksmätning, mätning av markrörelser samt ving- och kolvborrning. Uppföljningen, som påbörjades 1987, beräknas pågå till 1991. En preliminär utvärdering visar på en kontinuerlig nettosättning av lagerområdet som har uppmätts till 4-7 cm under totalt 2.5 år (Magnusson & Bergensstahl, 1989). Orsaken till denna sättning är ännu för tidigt att yttra sig om men kan vara en förändring av de geotekniska egenskaperna i kombination med slanginstallationen och en eventuell pålastning under byggnadsskedet.

### Övriga värmelager

Tre mindre säsongsvärmelager i lera har också följts upp geotekniskt. Det ena är värmelagret i Utby som färdigställdes 1979 och som geotekniskt finns dokumenterat i Franck et al (1981) samt Modin & Rhen (1983). Det andra är ett 2900 m<sup>3</sup> stort värmelager för församlingshem i Söderköping som byggdes 1984 och där uppföljningen finns dokumenterad av Rydell & Sundberg (1987). Det tredje är ett mindre värmelager i Alingsås (Wilén, 1984).

Den geotekniska uppföljningen har i samtliga fall omfattat temperatur, markrörelse och portryck. Inga markrörelser som kan härledas till temperaturhöjning eller temperaturcyklning har kunnat märkas. Värmelagret i Utby utsattes emellertid för frysning varvid sättningar kring de vertikala rören uppstod.

## 2.4 Försöksfält i Kungälv

### Beskrivning av försöksfält

Institutionen för geoteknik med grundläggning vid CTH har utfört fältförsök i halvskala för att undersöka temperaturens påverkan på de geotekniska egenskaperna för lera. Försöken har utförts strax NO om Kungälv vid Göta älvs västra strand.

Området invallades på 1920-talet och fylldes upp med muddermassor. Jorden består av postglacial lera ner till 10 m djup. Denna underlagras av glaciallera med relativt stor mäktighet. Densitet och vattenkvot framgår av figur 2.9. Ett organiskt skikt på 2 meters djup utgör sannolikt resterna av den gamla älvbotten. Leran i området är svagt överkonsoliderad med ca 19 kPa på 3 m djup och som avtar ungefär rätlinjigt mot djupet till ca 8 kPa på 12 m djup. Portrycksprofilen visar på ett ökande porövertryck mot djupet som på 22 m djup uppgår till 5 kPa.

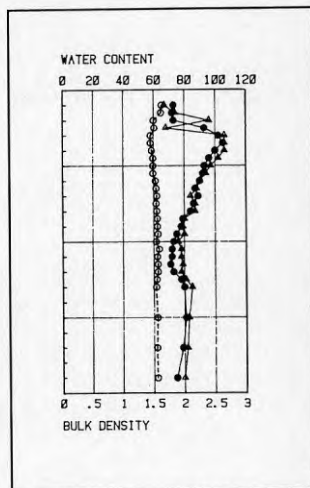
Två separata värmelager har byggts med olika typer av värmeväxlare. Ytorna har instrumenterats med ett stort antal portrycksgivare, temperaturgivare och sättninggivare. Dessutom finns en referensyta instrumenterad. Uppvärmningen skedde med en elektrisk panncentral på 30 kW.

De två lagren upptar en markyta om  $14 \cdot 14 \text{ m}^2$  vardera och lagerdjupet är 12 m det vill säga en volym om drygt  $2300 \text{ m}^3$  för vardera lagret. I det ena fältet är 49 stycken värmeväxlare i form av U-rör installerade med ett cc-avstånd av 2 m. U-rören består av 15 mm polyamidslang med skänkelavståndet 200 mm. Värmeväxlarna i det andra fältet består av 25 stycken 3" galvaniserade stålrör som är placerade med ett cc-avstånd av 2.8 m.

### Resultat

Portrycksmätningarna i både U-rörsfältet och 3"-fältet visar att portrycken, med några undantag, kan relateras till temperaturen i lagret. Undantaget är en portrycksminskning under den andra uppvärmningsfasen utan att laddningsförlopp eller temperatur förändras, se figur 2.10. De portrycksprofiler som är placerade strax utanför 3"-lagret visar, som förväntat, på betydligt mindre variationer.

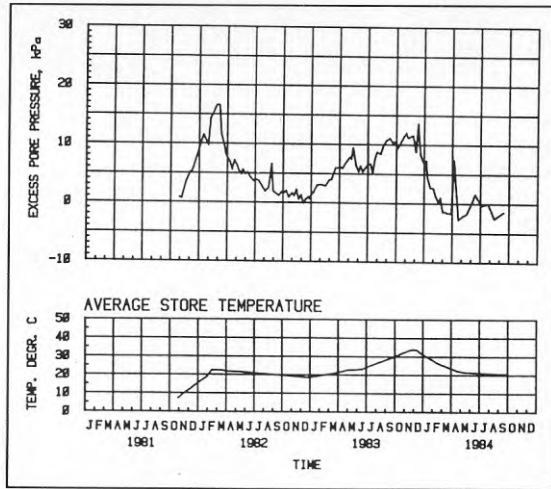
Mätning av skjuvhållfastheten har mätts i laboratorium med hjälp av konförsök. Resultaten visar att skjuvhållfastheten minskar något när temperaturen ökas. Förkonsolideringstrycket har uppmätts med hjälp av CRS-försök. Försök utfördes före värmelagring och efter slutlig avkylning vid temperaturen  $7^\circ\text{C}$ . För U-rörsfältet utfördes dessutom en mätning under försökens gång vid temperaturen  $20^\circ\text{C}$ . Adolfsson & Sällfors menar att försöken visar att endast en obetydlig påverkan på förkonsolideringstrycket sker vid en återgång till naturlig marktemperatur samt att en temperaturökning från  $7$  till  $22^\circ\text{C}$  medför en sänkning av förkonsolide-



Figur 2.9 Densitet och vattenkvot vid försöksfältet (Adolfsson & Sällfors, 1987).

ringstrycket med 5-10 kPa.

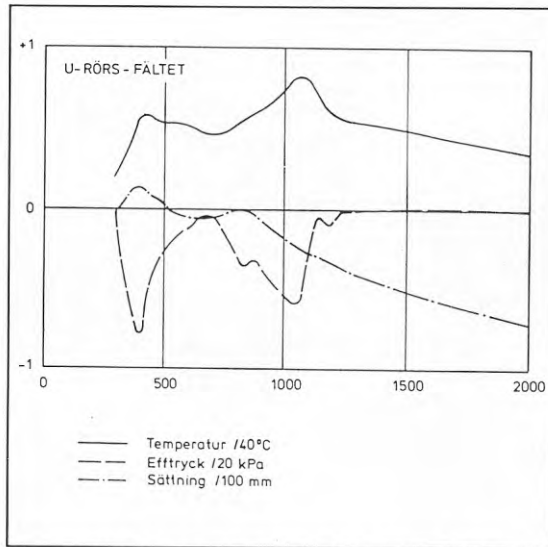
Vertikalrörelsen skiljer sig åt för de två testfälten. Mätningarna i U-rörsfältet visar en oscillerande nedåtgående tendens, se figur 2.11. Först erhålls en hävning av markytan med ca 25 mm som övergår i en sänkning vid den första avkylningen. Den nästkommande uppvärmningen resulterar ej i någon hävning utan en fortgående sättning. Den totala sättningen efter två uppvärmningsscykler uppgår till 45 mm.



Figur 2.10 Portrycksutveckling på nivå 9 m i U-rörsfältet (Adolfsson & Sällfors, 1987).

Rörelserna i 3"-fältet är annorlunda. Där erhålls en hävning under den första uppvärmningsfasen medan avkylningen resulterar i endast mycket måttliga sättningar. Den påföljande uppvärmningen medför en måttlig hävning och avkylningen en sättning till i stort sett ursprungsnivå.

Adolfsson & Sällfors försöker vidare att se samband mellan förkonsolideringstryck och sättningar i försöksfältet. Figur 2.11 visar relationen mellan temperatur, effektivtryck och sättning för U-rörsfältet.



Figur 2.11 Temperatur, sättning samt effektivtryck som funktion av tid i U-rörsfältet (Adolfsson & Sällfors, 1987).

Adolfsson & Sällfors anser det troligt att förkonsolideringstrycket minskat i så hög grad i U-rörsfältet att effektivspänningarna överskridit detta. I 3"-fältet skedde uppvärmningen snabbare och följdes direkt av en urladdning. Adolfsson & Sällfors anser att effektiv- och förkonsolideringstrycken blivit av samma storleksordning men endast under en relativt kort tidsperiod.

Skillnaden i uppförande mellan de två fälten förklarar Adolfsson & Sällfors med att U-rörslagret hade en längre tidsperiod för utjämning av portrycken utan att temperaturen i lagret sänktes i någon större omfattning.

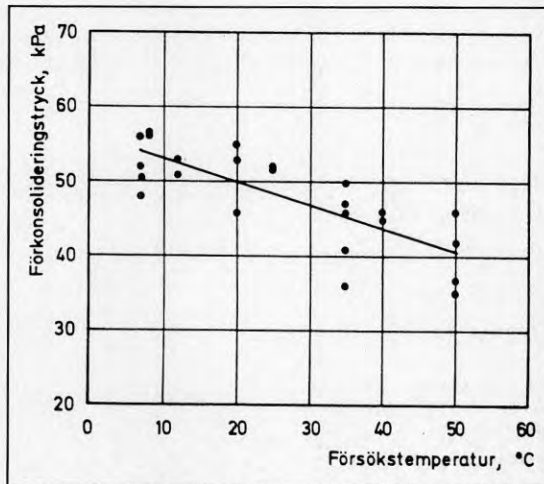
Författarna menar slutligen att om en fortsatt cyklisk uppvärmning/avkyllning sker där förkonsolideringstrycket tidvis överskrider kommer sättningar av i storleksordningen 30-40 cm att uppkomma (ca 3 % av lagrets djup).

## 2.5 Värdering av utförda försök och uppföljningar

### Laboratorieförsök

En av de slutsatser som både Tidfors (1987) och Eriksson (1984) drar av sina försök är att normala ödometerförsök i laboratorium underskattar förkonsolideringstrycket eftersom de utförs vid en temperatur som ligger över den naturliga jordtemperaturen. Tidfors anger ett intervall om 6-10% för denna underskattning. Den linjära regression som har använts indikerar också att hållfastheten vid höga temperaturer blir mycket låg.

Vid en granskning av samtliga temperaturförkonsolideringstrycksdiagram med experimentella punkter inlagda finner man att approximationen med en rät linje inte alltid är tillräckligt bra. I vissa diagram redovisade av Tidfors (1987) kan kurvform antydast vilket skulle innebära att förändringen av förkonsolideringstrycket är litet vid låga, samt möjligen vid höga temperaturer, se figur 2.12.



Figur 2.12 Förkonsolideringstryck som funktion av temperatur från 7m:s djup i Bäckebol (Tidfors, 1987).

Eriksson drev sina försök till en högre temperatur (70 °C) än Tidfors (50 °C). I Eriksson's diagram (figur 2.2) syns också en avtagande förändring vid hög temperatur tydligare. Eriksson hade emellertid svårt att utvärdera sina försök vid de högsta temperaturerna. I Eriksson's diagram finns emellertid en klar tendens till att förkonsolideringstrycket kraftigt minskar mellan 7 °C och 25 °C.

Viskositeten för vatten minskar vid ökande temperatur vilket medför att vattnet blir lätttrögligare och kan dräneras ut snabbare vid ett ödometerförsök. Vid ett CRS-försök skulle detta innebära att vid standardhastighet kan provet dräneras ut snabbare vid hög temperatur än vid normal temperatur. Vid CRS-försök med olika deformationshastighet har man funnit att utvärderingen av förkonsolideringstrycket påverkas i högre grad först vid hastigheter över normalhastigheten. Minskningen av viskositet bör därför inte påverka utvärderingen i någon högre grad.

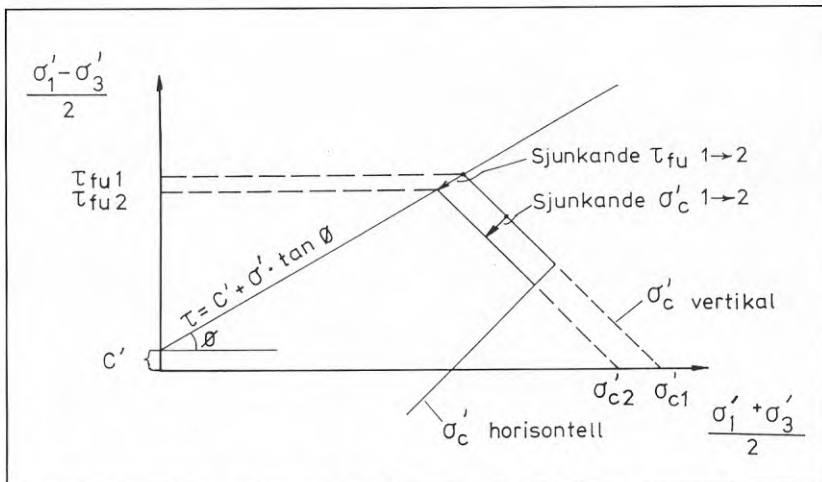
Temperaturpåverkan på mätutrustningen är en möjlig felkälla. Tidfors (1987) har ägnat ett kapitel i sin avhandling till att studera sådana eventuella felkällor. Tidfors har använt material med relativt liten

temperaturutvidgningskoefficient i uppbyggnaden av ödometern. Tidfors drar slutsatsen att temperaturen endast i försumbar omfattning påverkar försöksresultaten för den försöksupställning som använts vid försöken på CTH.

Eriksson (1984) beskriver ej i sin rapport temperaturens eventuella inverkan på försöksutrustningen. Om Erikssons försöksupställning har haft en större temperaturkänslighet än Tidfors' så kan detta vara en förklaring till den betydligt högre temperaturpåverkan på leras förkonsolideringstryck som Eriksson uppmätt.

En viktig sak att hålla i minnet är att utvärderingen av ödometer-försök är empirisk och relaterad till belastningsförsök i fält. Det är därför inte sannolikt att försöksmetodiken och utvärderingssättet kan utföras identiskt oberoende av temperaturen. För att få en säker utvärdering måste därför laboratorieförsök vid hög temperatur relateras till fältförsök med motsvarande temperatur.

Mohr-Coulombs brottheori är allmänt vedertagen inom geotekniken. Sällfors & Larsson (1984) visar till exempel hur denna teori kan appliceras på en slänt under odränerade och dränerade förhållanden. Om en minskning



Figur 2.13 Illustration av hur den odränerade skjuvhållfastheten kan förväntas minska när förkonsolideringstrycket minskar.

av förkonsolideringstrycket verkligen sker bör även en minskning av den odränerade skjuvhållfastheten kunna förväntas enligt figur 2.13.

### Fältförsök och experimentbyggnadsprojekt

De flesta utförda uppföljningar av experimentbyggnadsprojekt har utgjorts av lerlager i vilka temperatursvinget varit ca 10-20°C. Denna låga temperatur har medfört att en temperaturpåverkan på leras geotekniska egenskaper varit mycket svår att särskilja från andra naturliga förlopp. Så kan till exempel sättningarna i den mycket väldokumenterade ackumulatorn vid Lindälvsskolan förklaras med påverkan från installationen av U-rör samt en viss pålastning i byggnadsskedet.



Lagret i Kullavik har högtemperaturzon i vilken temperaturen under korta perioder uppgått till ca 50°C. I den uppföljning som finns beskriven i Olsson (1986) redovisas ej några mätvärden över sättningar i lagrets markyta. I texten omtalas dock att sättningarna varit små. Tidsperioden för uppföljningen var också kort. En påtaglig slutsats är emellertid att portrycken inte blev så höga som förväntat vid uppvärmningen av högtemperaturdelen, se figur 2.7. Några andra slutsatser om temperaturpåverkan på de geotekniska egenskaperna för leran är emellertid svåra att dra ur denna högtemperaturtillämpning. Värmelagret i Söderköping har temperaturnivåer som tidvis uppgår till 30°C. Uppföljningen av denna anläggning, som avslutas 1991, bör därför kunna ge indikationer på eventuell temperaturpåverkan.

Laboratorieundersökningar av skjvuhållfasthet och förkonsolideringstryck har för de flesta anläggningarna utförts vid ordinär temperatur, det vill säga ca 20°C. Enligt Tidfors (1987) och Adolfsson & Sällfors (1987) är förändringen av förkonsolideringstrycket med temperaturen helt reversibel. Detta bör medföra att ingen förändring av dessa hållfasthetsegenskaper uppmäts även om provtagningen skett vid varierande temperaturer. Sådana förändringar har uppmätts vid Kullaviksanläggning och kan därför ha orsakats av mätfel i kombination med inhomogena jordartsförhållanden.

Vid försöksfältet i Kungälv samt vid uppföljningen av lagret vid Lindälvsskolan har hävningen i lagret under uppladdningsperioden relaterats till vattnets volymutvidgning. Resultaten visar att vattnets volymutvidgning medför att markytan hävs i motsvarande grad (vid temperaturer upp till ca 30°C). Slutsatsen av detta är att markrörelser på grund av volymsförändring av porvattnet huvudsakligen sker i vertikalled för dessa typer av leror.

Vid försöksfältet i Kungälv kunde en plötslig portryckssänkning uppmätas under den andra uppvärmningsperioden som inte kunde relateras till någon temperatursänkning. Medeltemperaturen i leran var vid denna tidpunkt ungefär 30°C men högre kring rören eftersom laddning pågick. Adolfsson & Sällfors menar att en tänkbar förklaring kan vara att en dräneringsväg öppnats genom vertikala sprickplan i leran. Sådana sprickplan har man tidigare uppmärksammat i lera. Man har dock ej kunnat finna att de påverkat lerans geotekniska egenskaper.

En annan möjlighet är att kontakten mellan markvärmeväxlarna och leran fungerat som dräner. Detta senare antagande styrks av den ovan nämnda portrycksutvecklingen vid värmelagret i Kullavik.

Vid försöksfältet utanför Kungälv relaterar Adolfsson & Sällfors (1987) de sättningar som uppstått i U-rörsfältet till att förkonsolideringstrycket sjunkit och effektivspänningarna därför tidvis överskridit detta. Att sättningarna varit betydligt mindre för 3"-fältet förklaras med att driftstrategien för detta lager varit annorlunda varför temperaturen i lagret legat på en högre nivå under en kortare period jämfört med U-rörslagret.

Vid en cyklisk uppvärmning och avkylning av en något överkonsoliderad lervolym kommer sättningar att utbildas även om inte förkonsolideringstrycket förändras. Vid en 1-dimensionell betraktelse kan förloppet indelas i fyra faser:

1. Uppvärmning På grund av temperaturutvidgningen av porvattnet sker en portryckshöjning. Effektivtrycken minskar.
2. Hög temperatur a) En utjämning av porvattentrycket sker men fördröjs av lerans låga hydrauliska konduktivitet. Vattenströmningen sker uppåt mot markytan och nedåt, eventuellt mot ett lager av grövre material och följaktligen med högre hydraulisk konduktivitet. På grund av vattnets minskade viskositet vid hög temperatur sker portrycksutjämningen snabbare än vid naturlig jordtemperatur.
- b) När portrycken succesivt utjämnas sker en konsolidering av leran under ökning av effektivspänningen. Krypdeformationer börjar utbildas när effektivspänningen överskrider ca 80 % av lerans förkonsolideringstryck.
3. Avkylning Under avkylningsfasen minskar porvattnets volym och ett visst porundertryck kan uppstå. Det är osannolikt att någon nämnbar återtransport av vatten sker från markytan varför en bestående sättning utbildas.

Denna cykliska på- och avlastning av portrycken ger för varje säsong en tillskottssättning. En 3-dimensionell betraktelse bör öka sättningarna något enligt figur 2.4. Denna sättning, i grunden orsakad av porvattnets volymutvidgning, är svår att separera från den av Adolfsson & Sällfors, Tidfors och Eriksson omtalade minskningen av förkonsolideringstrycket. För att undersöka effekterna av dessa två fenomen var för sig, har simulering av sättningsförloppet vid försöksfältet i Kungälv utförts vid SGI. Det använda datorprogrammet, förutsättningar och resultat beskrivs i nästa avsnitt.

## 2.6 Simulering av sättningsförlopp

### Förutsättningar

För att teoretiskt undersöka effekterna på sättningsförloppet av på- och avlastning av portrycken samt av sänkt förkonsolideringstryck har simulering av förhållandena i försöksfältet i Kungälv utförts. Beräkningarna är utförda i flera steg. Vissa steg är beräknade med sättningsberäkningsprogrammet Comult medan andra är beräknade manuellt. Comult är ett datorprogram som beräknar tids-sättningsförloppet för en jordprofil.

Programmet arbetar 1-dimensionellt i vertikalled och bygger ursprungligen på Terzaghi's konsolideringsteori samt Darcy's lag. Vid SGI är programmet modifierat på ett sådant sätt att även krypdeformationer kan beräknas. Programmets överensstämmelse med förhållanden i fält har undersökts av Larsson (1986). Resultaten från väl dokumenterade lerprofiler visar på en god överensstämmelse mellan beräknade och uppmätta värden.

Comult kan ej ta hänsyn till svällnings- och krympningsförlopp som orsakas av temperaturpåverkan. Vidare kan ett porövertryck på ett för detta fall relevant sätt ej ansättas i en delprofil. Det av temperaturen alstrade porövertrycken får därför i Comult ansättas som en överlast.

Campanella & Mitchell (1968) angav ett uttryck (ekvation 2.2) för förändringen av portryck vid en temperaturförändring.

Vid beräkning av sättningar på grund av cyklisk på- och avlastning ansätts en överlast i Conmult till samma storlek som den temperaturinducerade portrycksökningen. För att överlasten ej skall påverka sättningen får förkonsolideringstrycket ökas i motsvarande grad. Vidare får kompressionsmodulen justeras vid behov. Beräkningarna utförs därför i flera steg:

1. Uppvärmning      Manuell beräkning av temperaturinducerad portrycksökning med hjälp av ekvation 2.2. Beräkning av jordprofilens svällning.
2. Hög temperatur    Beräkning av konsolideringsförlopp med Conmult. Vattenströmning och krypning beaktas under det att portrycksökningen simuleras med överlast och ökat överkonsolideringstryck.
3. Avsvalning        Manuell beräkning av jordprofilens krympning och åtföljande portrycksminskning. Ingen återtransport av vatten antas ske.

Vid antagande om sänkt förkonsolideringstryck på grund av temperaturökning genomförs beräkningarna på samma sätt. I steg 2 minskas emellertid förkonsolideringstrycket med 0.6 %/°C i enlighet med de av Tidfors redovisade förhållandena i Bäckebol, en relativt närbelägen lokal.

I försöksfältet i Kungälv kunde en portrycksminskning iakttagas utan koppling till en temperaturminskning. Orsaken till denna dränering kan vara att dräneringsvägar öppnats intill slangarna eller genom de observerade vertikala sprickplanen. En sådan vertikaldränering har i modellen simulerats med horisontella dräneringslager utlagda på varannan meter i vertikalled. Sammanfattningsvis har följande simuleringar utförts:

- |              |   |
|--------------|---|
| Simulering 1 | Cykling av temperatur                     |
| - " - 2      | Dito men med sänkt förkonsolideringstryck |
| - " - 3      | Som 1 men med dräneringslager inlagda     |

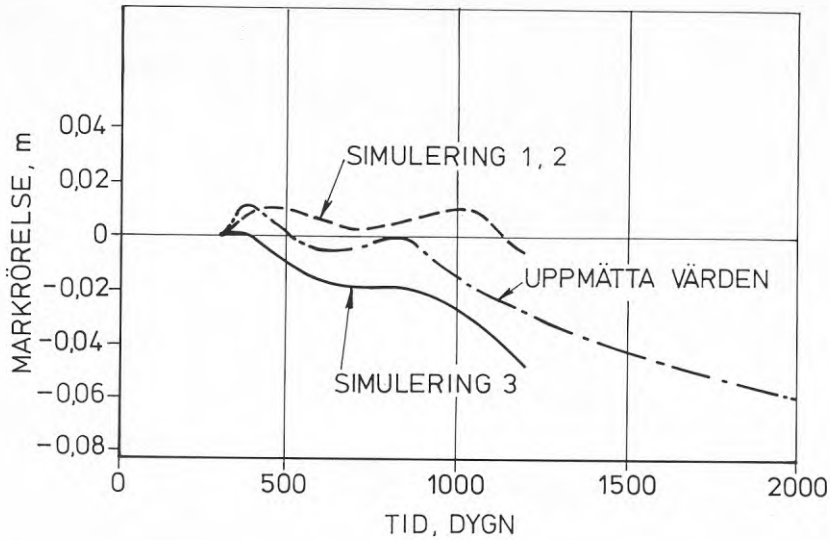
Dessutom har simulering 1 och 3 även utförts vid en temperaturcykling mellan 60 och 30°C

## Resultat

Resultatet av simuleringarna framgår av figur 2.14. Som framgår av figuren är resultatet av simulering 1 och 2 i stort sett identiska. Detta beror delvis på att leran är svagt överkonsoliderad och den antagna reduktionen medför ej att förkonsolideringstrycket överskridits. En inverkan av sänkt förkonsolideringstryck blir därför mycket måttlig. Vid dessa båda simuleringar erhålls sättningar som är mindre än de uppmätta. När dräneringsskikt läggs in i modellen erhålls sättningar som är större än de uppmätta. Sättningskurvan har emellertid samma form som den uppmätta.

En god överensstämmelse med försöksresultaten hade kunnat erhållas om dräneringslagren antagits vara färre eller mindre permeabla. Om detta till alla delar speglar de verkliga förhållandena kan dock ej påvisas.

Vid utförda simuleringar mellan 30 och 60°C erhöles sättningar som var



Figur 2.14 Uppmätta och simulerade sättningar vid försöksfältet i Kungälv.  
ungefär 6 gånger större jämfört med figur 2.14.

## 2.7 Slutsatser

Följande slutsatser kan dras av de ovan referade undersökningarna:

- Vid en temperaturcykling av lera upp till ca 25-30°C verkar vattnets volymförändring vid temperaturförändring kunna utläsas i motsvarande hävning/sänkning av markytan.
- Vid förändring av temperaturen i laboratorieförsök har tydliga förändringar i utvärderade förkonsolideringstryck, övriga kompressionsegenskaper och odränerad skjuvhållfasthet observerats.
- En förändring av förkonsolideringstryck och odränerad skjuvhållfasthet med temperaturen har ej verifierats experimentellt i utförda fältförsök med temperaturer upp till ca 35°C.
- Om inga åtgärder vidtas riskeras en uttorkning av ett högtemperaturvärmelagers övre del.

### 3 PLASTMATERIAL TILL VÄRMEVÄXLARE

Materialet i en markvärmväxlare i lera måste tidvis tåla relativt höga temperaturer utan att materialets egenskaper försämras på ett oacceptabelt sätt. Materialet skall vidare ha en så hög värmekonduktivitet som möjligt samt gärna vara relativt böjligt. Slutligen är kostnaderna för både slangmaterialet och de kopplingar som är nödvändiga en viktig aspekt eftersom det åtgår 10-tals km slang till en medelstor anläggning.

Vid Studvik energiteknik har man under en längre tid undersökt olika plastmaterials användbarhet till värmekulvert i det så kallade GRUDIS-systemet (Berglund & Ifwarson, 1984). Speciellt har långtidsegenskaperna studerats. Det som är avgörande för ett plastmaterials långtidsegenskaper är hur lång exponeringstid materialet utsätts för i olika temperaturintervall. Längre exponering vid höga temperaturer medför försämrade långtidsegenskaper.

De tre intressantaste plastmaterial för värmväxlare är polyeten (PE), polybuten (PB) och tvärbunden polyeten (PEX). Dessa materials långtidsegenskaper vid olika temperaturnivåer har undersökts vid Studvik energiteknik. Problemet med tester av detta slaget är tidsaspekten. När resultat från ett material föreligger har utvecklingen lett till att nya varianter utvecklats av det undersökta materialet med andra egenskaper.

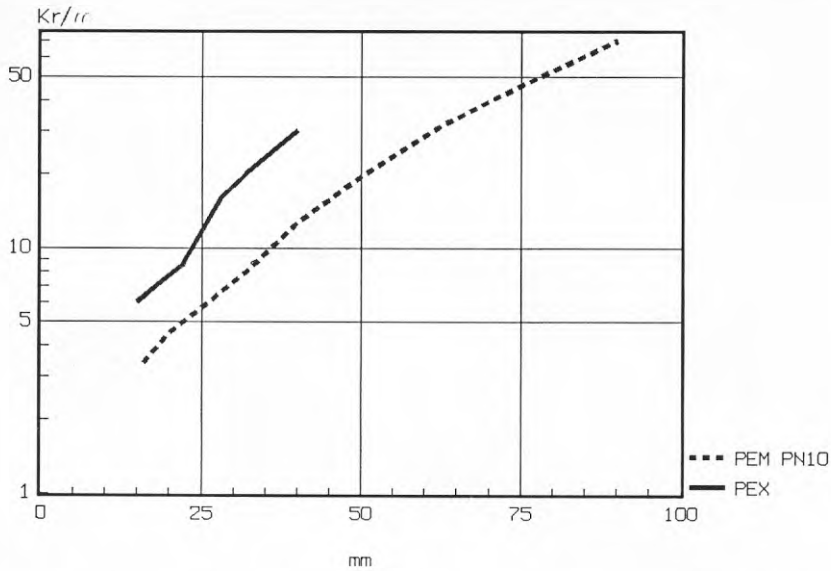
Polyeten finns i tre olika densitetklasser, låg (PEL), medium (PEM) samt hög (PEH). De två sistnämnda är vanligast. Polyeten är ett relativt billigt material. PEM eller PEH har använts i byggda lågtemperaturlager i lera. Temperaturtåligheten är dock måttlig, ca 60°C. PEX har en betydligt bättre temperaturtålighet, ca 90°C, och används till exempel i golvvärmesystem och värmekulvert av plast. Priset är dock betydligt högre. Nackdelen med PEX är att det till skillnad från PE ej är svetsbart utan kräver metallkopplingar. Det bör dock vara möjligt att ta fram metallkopplingsdon som är speciellt anpassade till detta ändamål.

Polybuten är det tredje intressanta alternativet. PB har liknande temperaturtålighet som PEX, är böjligare än PEX och är dessutom svetsbart. I Sverige har hittills slangar av PB ej varit så vanligt förekommande.

Tabell 3.1 visar värmekonduktivitet för olika plastmaterial. Värmekonduktiviteten har betydelse för övergångsmotståndet över rörväggen. Värmekonduktiviteten skall därför vara så hög som möjligt. Värmekonduktiviteten för polybuten är endast hälften av den för polyeten.

Tabell 3.1 Värmekonduktivitet för några plastmaterial.

Material	Värmekonduktivitet W/(m,K)
PEM	0.4
PB	0.22
PEX	0.38



Figur 3.1 Kostnadsindikationer för PEM och PEX-rör. Kostnaderna för PEX avser stora kvantiteter.

I figur 3.1 redovisas kostnaden för några intressanta diametrar. Som framgår av figuren är kostnaden för PEX ungefär den dubbla gentemot PEM. Kostnader för rör av PB har ej tagits fram men tidigare kostnadsindikationer tyder på kostnader som är något lägre än för PEX.

I dagsläget finns det inga uppgifter om att polyeten klarar de temperaturer som är aktuella vid laddning av ett högtemperaturlager i lera. På kort sikt bör därför PB eller PEX användas. Det som talar för PEX är den högre värmekonduktiviteten och att goda erfarenheter finns i Sverige av materialet. Fördelarna med PB är framförallt dess svetsbarhet och eventuellt priset.

Om bättre temperaturlåghet för nya PE-kvaliteter kan utvecklas är detta mycket intressant på grund av det relativt sett låga priset.

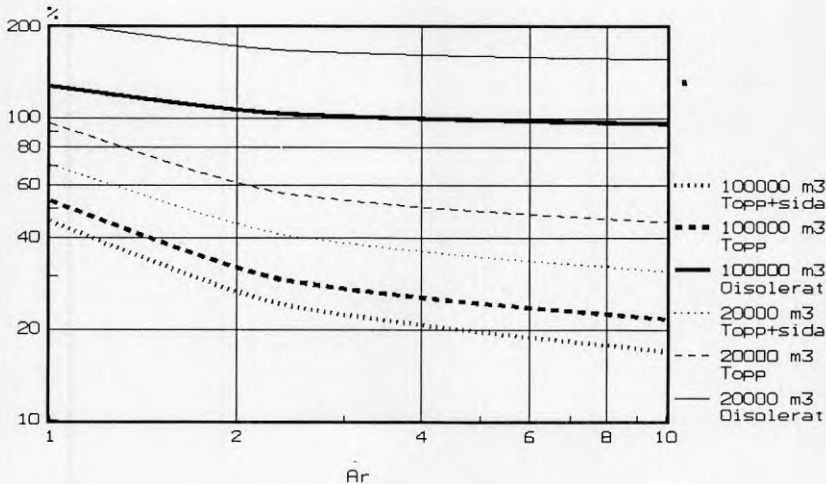
## 4 VÄRMFÖRLUSTER

### 4.1 Inledning

Ett värmelager med hög temperatur kommer alltid att ha en viss värmeförlust. Förutom att den förlorade värmen har ett värde så innebär även höga värmeförluster att temperaturen på den inlagrade energin sjunker. Detta medför att lagrets energitäckningsgrad kan minska genom att temperaturen i lagret ej är tillräcklig hög för att överstiga det aktuella värmesystemets temperaturkrav i tillräcklig omfattning.

Volymen av ett värmelager inverkar kraftigt på värmeförlustens storlek i relation till inlagrad energi. Detta beror av den minskande yt/volymskvoten för lagret vid ökande volym. Vidare inverkar lagergeometrin och markens termiska egenskaper på förlusternas storlek. Värmeledningseffektiviteten i lera är ca en faktor 3 gånger lägre än den i berg. Ett värmelager i lera kan därför göras mindre än i berg med samma storlek på värmeförlusterna.

Värmeisolering av lagret är emellertid oftast nödvändig för att nedbringa värmeförlusternas storlek till en acceptabel nivå. Hur tjock isoleringen skall vara och hur stor del av omslutningsytan som skall isoleras är ett ekonomiskt optimeringsproblem. Isoleringskostnaden får därvid vägas mot värdet av den förlorade energin.



Figur 4.1 Värmeförlustens utveckling för värmelager i lera. Två lagerstorlekar har åskådliggjorts vid tre olika isoleringsalternativ: Oisolerat, isolerad överyta samt dito med halva sidoytan isolerad. Se äv text.

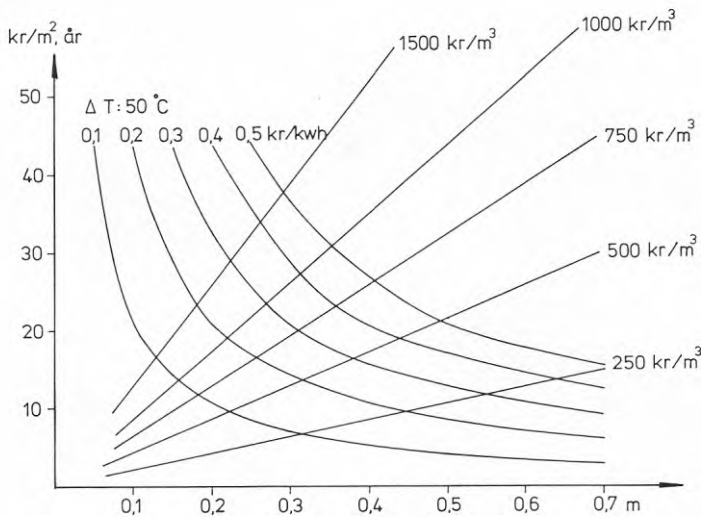
Det är vanligt i lagersammanhang att stationära värmeförluster anges, dvs tidsberoende värmeförluster. Innan värmeförlusterna har övergått till stationära förhållanden kommer emellertid de årliga värmeförlusterna att vara större, de första åren betydligt större.

Figur 4.1 visar den instationära förlustens förändring med tiden mot ett relativt stationärt värde för lager av olika storlek och isoleringsgrad. I beräkningarna har 30 cm:s isolering och 50°C drivande temperaturskillnad ansatts. Vidare är förlusterna beräknade som % av energiinnehållet i lagret vid en energiomsättning per år. I beräkningsprogrammet (Hellström, 1989) ansätts konstanta temperaturer som ej påverkas av energiförlusten. Av detta skäl kan förlusterna överstiga 100%.

Som framgår av figur 4.1 har isoleringen mycket stor betydelse. Vidare är de första årens förluster mer än två gånger större än värdet år 10 för isolerade lager. Det är därför av vikt att även dessa instationära förlustkostnader medräknas i kalkylen på ett korrekt sätt, till exempel som en kapitaliserad investeringskostnad.

#### 4.2 Optimal isolering

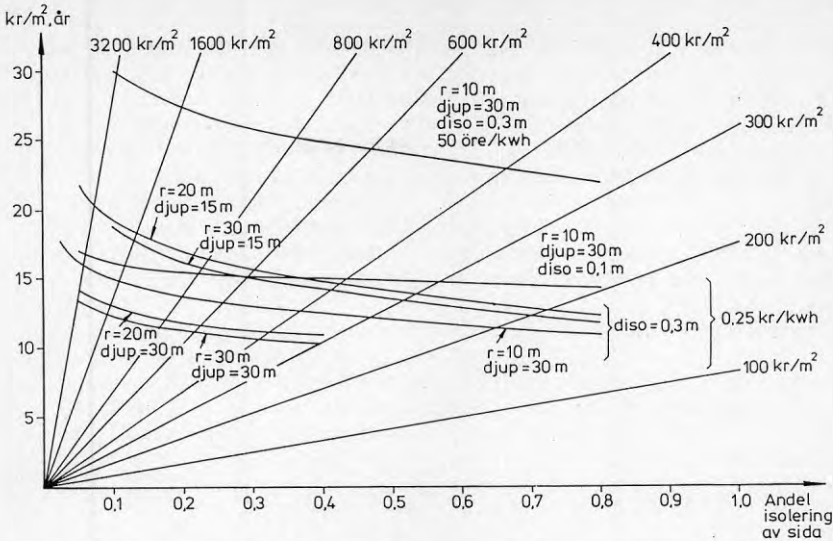
Figur 4.2 visar en optimering av isoleringstjockleken för lagrets överyta. Under givna förutsättningar kan optimal isolertjocklek beräknas utifrån energipris och isoleringskostnad. Vid ett energipris av 50 öre/kWh (till exempel solvärme) och ett isoleringspris av 100 kr/m<sup>3</sup> blir en optimal tjocklek ca 35 cm. Vid ett energipris av 5 öre/kWh (spillvärme) blir motsvarande tjocklek endast 10 cm.



Figur 4.2 Optimal isoleringstjocklek (m) av ett lagers överyta vid olika priser på energi (kr/kWh) och isolering (kr/m<sup>3</sup>). Den vertikala axeln visar årlig kapitalkostnad och värdet av förlorad energi.

Ofta är det emellertid intressant att även isolera en del av sidoytorna på värmelagret. Eftersom en sådan vertikal isolering kan vara svår att utföra kan isoleringen istället läggas horisontellt till motsvarande avstånd från lagret som det avsedda sidoisoleringsdjupet. De stationära förlusterna blir därvid ungefär densamma medan de instationära ökar. Ett försök till optimering av sidoisoleringsandelen har gjorts i figur 4.3. För att ge en rättvisare bild har i figur 4.3 inte de stationära värdet på förlusten använts utan istället värmeförlusten under lagrets tionde driftår.





Figur 4.3 Optimal isoleringsandel av ett värmelagers sida vid olika energipris (kr/kWh), isoleringspris (kr/m<sup>2</sup>) och lagerstorlek. Y-axeln visar årlig kapitalkostnad samt värdet av förlorad energi. Isolertjocklek: diso

#### 4.3 Kostnader och data för isoleringsmaterial

Det finns ett flertal isoleringsmaterial på marknaden. Några av de vanligaste är:

- Mineralull
- Cellplast
- Polyuretan

Mineralull marknadsförs som glas- eller stenull beroende på ursprungsråvaran. Materialet är ej lämplig som markisolering vid fuktiga förhållanden då isoleringsförmågan starkt nedsätts. Speciellt är det fallet då fuktiga förhållanden kombineras med hög temperatur och temperaturgradient. Mineralull är annars ett relativt billigt material (ca 300-900 kr/m<sup>3</sup>) och är beständigt vid höga temperaturer. Mineralull marknadsförs i form av skivor eller som lösull.

Cellplast tillverkas med två olika metoder med olika egenskaper som följd. Expanderad cellplast består av slutna luftfyllda porer i form av sammanpressade kulor. Extruderad polystyrencellplast består av helt slutna porer med en bättre isoleringsförmåga. Värmeledningsförmågan för expanderad och extruderad cellplast är 0,042 respektive 0,033 W/(m,K) vid markförläggning.

Vid tillverkning av extruderad cellplast användes tidigare freon som blåsmedel. Ett utvecklingsarbete pågår för att minska freonanvändningen utan att de tekniska egenskaperna påverkas i alltför hög grad. Högsta rekommenderade kontinuerliga temperatur anges för båda typerna till ca 75 °C. Kostnaden för dessa material varierar beroende på tryckhållfasthet men är ca 1000 kr/m<sup>3</sup> i normalfallet.

Långtidstester av vägisolering i mark som Vägverket och Statens väg- och trafikinstitut låtit göra visar att expanderad cellplast tar upp mer vatten än extruderad. Vatteninnehåll medför en nedsatt isoleringsförmåga.

Förhållandena för värmeisolering i ett värmelager är emellertid annorlunda jämfört med en vägtillämpning. Vid ett högtemperaturlager är temperaturgradienten över isoleringen större än vid en vägtillämpning och dessutom alltid riktad åt samma håll, ut från lagret. Vid en vägtillämpning växlar temperaturgradientens riktning beroende på årstiden. Dessa skillnader i förhållanden kan medföra att isoleringsförmågan nedsätts i ett högtemperaturlager jämfört med en vägtillämpning.

Isolering av polyuretan (PUR) kan närmast jämföras med extruderad cellplast vad avser termiska egenskaper. Temperaturtåligheten är dock bättre, ca 100 °C. Materialet kan skummas eller sprutas på plats vilket kan vara fördelaktigt i vissa fall. PUR:s egenskaper varierar dock kraftigt beroende på sammansättning och skumningsprocessen. Priset är för närvarande (1990) ca 1600 kr/m<sup>3</sup>

## 5 SYSTEMASPEKTER

### 5.1 Allmänt

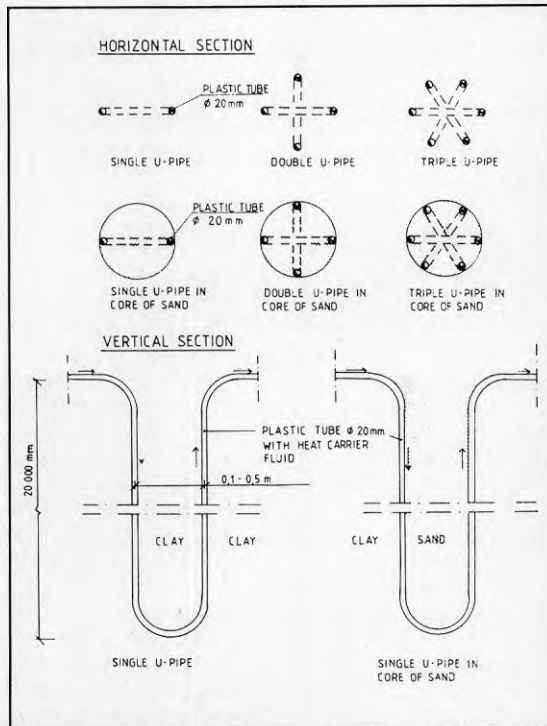
Beroende på typ av inlagringsenergi till värmelager kommer olika krav att ställas på lagrets energi- och effektmässiga funktion. Ett säsongslager ställer vidare helt andra effektkrav på lagret än vad ett korttidslager gör.

Följande faktorer är avgörande för ett markvärmelagers effektförmåga vid en konstant drivande temperaturdifferens:

- avståndet mellan markvärmeväxlarna
- avståndet mellan slangskänklarna för varje markvärmeväxlare
- storleken på den värmeöverförande ytan för varje markvärmeväxlare
- rörmaterialets termiska egenskaper
- jordens termiska egenskaper
- ev värmeövergångsmotstånd vid materialgränser

Markvärmeväxlaren kan vara av typen enkelt, dubbelt eller trippelt U-rör, se figur 5.1. Den värmeväxlade ytan är störst för trippelt U-rör. För en stor värmeväxlade yta kan den drivande temperaturen minskas vid ett givet effekttuttag. Markvärmeväxlaren kan också vara utformad på annat sätt som till exempel koncentriska rör eller dylikt.

Vid Matematisk fysik, Lunds tekniska högskola, har utvecklats en beräkningsmetod för markvärmeväxlare (Claesson et al, 1985). Metoden gäller för effektpulser med en så lång varaktighet att värmeflödet är oberoende av tiden ("steady-flux").



Figur 5.1 Olika typer av markvärmeväxlare.

Den grundläggande formeln för analys av sådana effektpulser är:

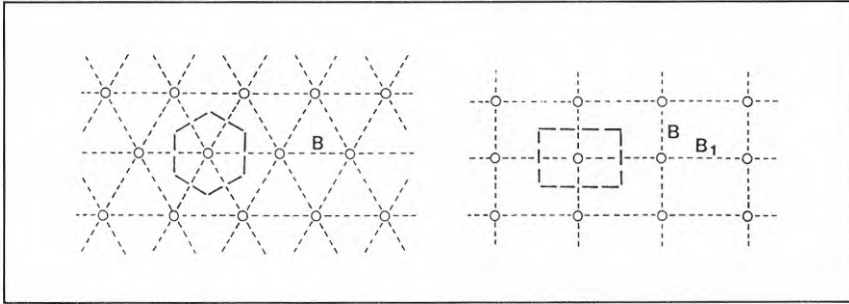
$$T_f - T_m = q \cdot m_{s_f} \quad (5.1)$$

där  $m_{s_f}$  är det totala värmemotståndet,  $q$  är effekt per meter värmeväxlare och temperaturen i fluid och mark representeras av  $T_f$  respektive  $T_m$ . Det totala värmemotståndet består av flera delmotstånd.

Formeln gäller under förutsättning av att tidskravet uppfylls:

$$a \cdot t/R^2 > 0.2 \quad (5.2)$$

där  $a$  representerar jordens värmediffusivitet ( $m^2/s$ ),  $t$  tid (s) samt  $R$  influensradien för en värmeväxlare i ett hexagonalt gitter, se figur 5.2. Kravet innebär att för en värmeväxlare i lera erhålls typiska värden mellan 2 och 8 dagar för hålavstånden 1 respektive 2 m.



Figur 5.2 Olika gittertyper. Hexagonalt respektive kvadratisk gitter

En volymetrisk värmeövergångskoefficient,  $\alpha_v$ , införs därefter som ett mått på värmeväxlarens prestanda där varje värmeväxlare tillskrivs en markareal,  $A_p$ .

$$\alpha_v = 1/(m_{sf} \cdot A_p) \quad (5.3)$$

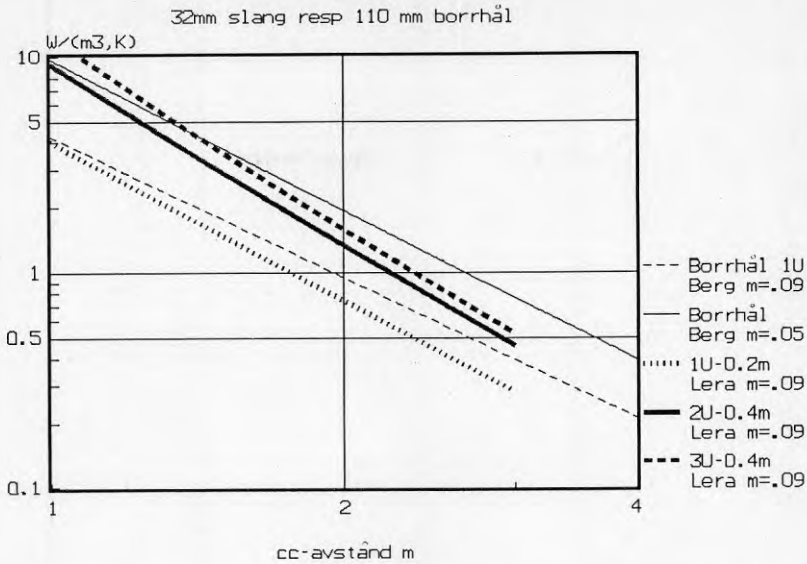
eller

$$q_v = \alpha_v \cdot (T_m - T_{sf}) \quad \text{där } q_v = q/A_p \quad (W/m^3, K) \quad (5.4)$$

Funktionsmässigt bör den drivande temperaturen vara så låg som möjligt för att därigenom öka den uttagbara energimängden ur lagret vid ett givet temperatursving på fluiden. Detta är emellertid ett optimeringsproblem eftersom investeringskostnaden stiger kraftigt vid ett minskat avstånd mellan markvärmeväxlarna.

I figur 5.3 visas hur kraftigt effektkapaciteten ökar vid ett minskat centrum-avstånd mellan värmeväxlarna (observera den logaritmiska skalan). Förhållandet gäller för effektpulser med en längre varaktighet. Det är en stor skillnad mellan enkelt och dubbelt U-rör medan förbättringen i kapacitet inte blir så stor för trippelt U-rör. Sorten som används för effektkapaciteten är  $W/(m^3, K)$  vilket innebär effekt per  $m^3$  lagervolym och drivande temperaturskillnad mellan fluid och medeltemperatur i lager enligt formel (5.1). Övergångsmotståndet mellan fluid och utsida borrhål/slang betecknas med  $m$ . Vid beräkningarna har använts ett menystyrt persondatorprogram utvecklat av Hellström (1989).

Figur 5.3 visar även skillnaden i värmeväxlarkapacitet mellan U-rör i lera och borrhål i berg. Trots den stora skillnaden i värmekonduktivitet för berg ( $=3.5 W/(m, K)$ ) och lera ( $=1 W/(m, K)$ ) är det dubbla U-röret likvärdigt med borrhålet vid cc-avståndet 3 m för berg och 2 m för lera. Detta beror på det dubbla U-rörets stora värmeöverförande yta och stora skänkelavstånd.

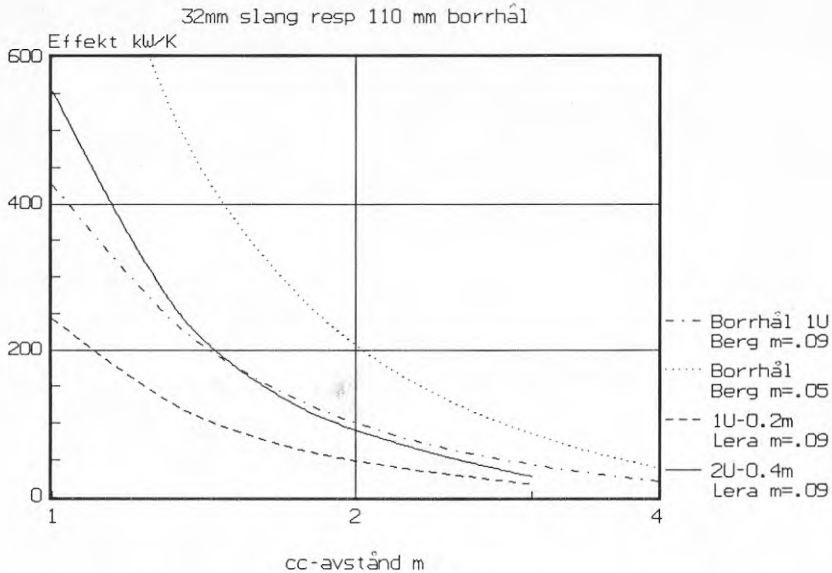


Figur 5.3 Effektkapacitet för olika typer av värmeväxlare i lera och granit, hexagonalt gitter. 2U-0.4m står t ex för dubbelt U-rör-skänkelavstånd 0.4m och borrhål 1U borrhål med installerat U-rör.

Granit och lera har emellertid olika värmelagringsförmåga. Värmekapaciteten är ungefär  $0.6 \text{ kWh}/(m^3, K)$  för berg medan den är ca 1 för lera. I figur 5.4 har effektkapaciteten för ett värmelager i lera jämförts med ett lager i berg. Värmelagrens volym i lera och berg är satt till  $60,000 \text{ m}^3$  respektive  $100,000 \text{ m}^3$  för att erhålla energimässigt likvärdiga alternativ. Figuren visar att vid de cc-avstånd som brukar praktiseras för värmelager, ca 4 m för berg och 2 m för lera, har det dubbla U-röret i lera en högre kapacitet trots den mindre lagervolymen.

Vid effektpulser med kort varaktighet är antal meter slang avgörande för det momentana uttaget. Inledningsvis kommer varje meter slang att fungera som en ensam slang i ett oändligt medium. Efter en viss tid kommer pulsen att påverkas av angränsande skänklar för att efter ytterligare en tidsperiod "se" de angränsande värmeväxlarna. I figur 5.5 visas hur effekten successivt avtar när tiden ökar. Observera att både x- och y-axeln är angiven i logaritmisk skala. Vid en varaktighet av en timma är effektkapaciteten ungefär dubbelt så stor som värdet vid "steady-flux".

För det dubbla U-röret ser vi att det mindre skänkelavståndet inverkar på resultaten vid ungefär 2 h. För det enkla U-röret ser vi hur jordarter med olika termiska egenskaper i marken inverkar på resultaten. Vid instationära problem, som är fallet i figur 5.5, inverkar inte bara värmeledningsförmågan utan även värmekapaciteten. En hög värmeledningsförmåga och en låg värmekapacitet är gynnsam för en snabb temperaturutjämning i lagret. En hög värmekonduktivitet är emellertid inte enbart av godo. En hög värmekonduktivitet i marken medför en högre värmeförlust. En hög värmekapacitet innebär att lagringsförmågan ökar och att



Figur 5.4 Effektkapacitet för ett 60,000 m<sup>3</sup> stort lager i lera och ett 100,000 m<sup>3</sup> stort lager i berg vid olika avstånd mellan markvärmväxlarna. Se även figur 5.3.

lagret kan göras mindre med bibehållet energiinnehåll.

När värme in- eller urladdas ett lager i lera kommer fluidtemperaturen att variera dels med tiden och dels med effektuttaget. Detta innebär en betydligt besvärligare dimensioneringssituation än vad som är fallet då vatten är lagringsmedium. I det senare fallet kan en konstant temperatur erhållas från lagret på grund av temperaturskiktningen intill dess att lagret är urladdat.

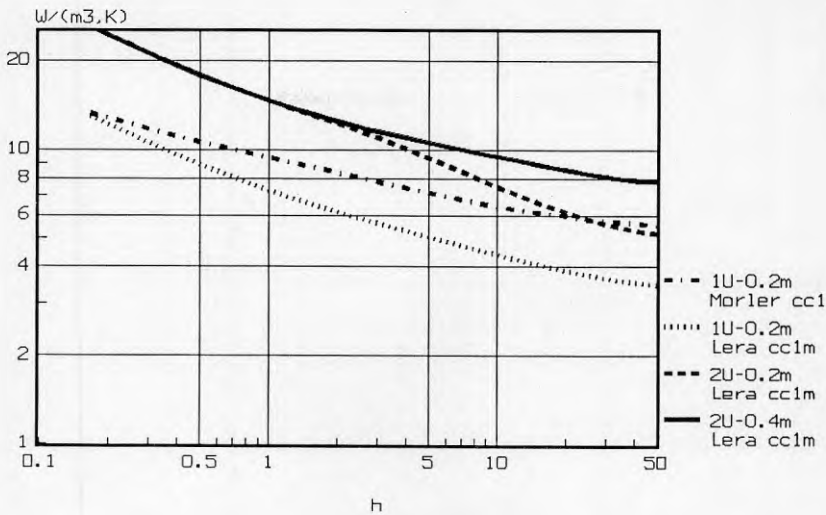
## 5.2 Solvärmelager

Lagring av solvärme karaktiseras av höga inladdningseffekter under begränsade tidsperioder. Uttagen värmeeffekt styrs av den försörjda fastighetens behov och fördelar sig därför på normalt sätt.

Det finns två olika sätt att ladda lagret med energi:

- Direktladda lagret. En mycket hög effektkapacitet krävs av värmväxlarna i lagret.
- Laddning via tank. Tanken är dimensionerad för att utjämna variationen över dygnet varvid värmväxlarna i lagret kan dimensioneras för en betydligt lägre medeleffekt.

Valet mellan de två alternativen är en optimeringsfråga mellan ökad lagerkostnad och tankkostnad. Bilden kompliceras emellertid också av att även solfångarnas verkningsgrad påverkas. Eftersom ett visst behov av en



Figur 5.5 Värmeväxlarkapacitet för enkla och dubbla U-rör med olika skänkelavstånd som funktion av tiden. Vid 50-60h i lera och för cc-avstånd 1m har effekten övergått till ett konstant värde. Morler: moränlera.

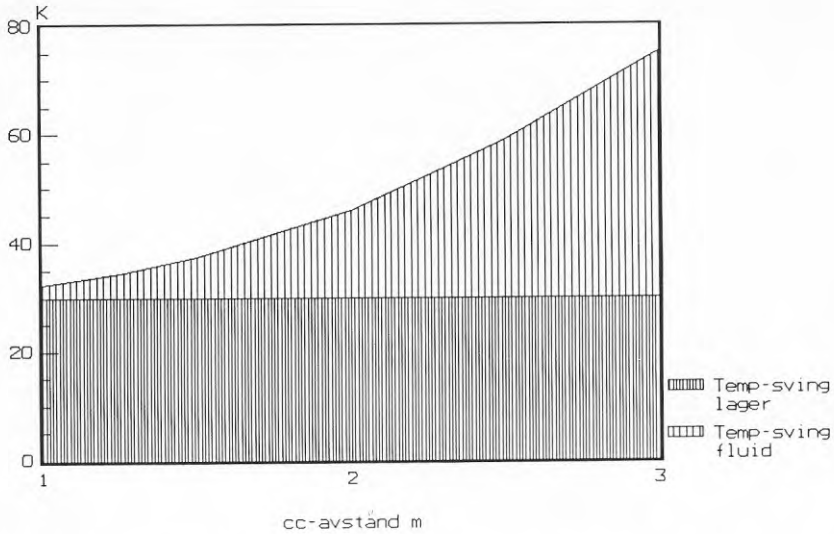
tank som utjämningsvolym finns i vilket fall som helst har arbetet bedrivits med denna förutsättning. En optimering mellan olika storlekar på tank och effektkapacitet för lager kan givetvis också utföras.

Kostnaden per lagrad kWh är starkt beroende av lagrets temperatursving, det vill säga skillnaden mellan lagrets högsta medeltemperatur och den lägsta. Rent generellt styrs detta i första hand av värmeavvärnarens temperaturkrav, det vill säga temperaturen på distributionssystemet. Nybyggnadsreglerna föreskriver ca 55/40 °C i dimensionerande framlednings- respektive returtemperatur. Detta innebär att tyngdpunkten av värmebelastningen kommer att ske vid ca 30 °C returtemperatur.

För ett lager med vertikala rörsystem styrs temperatursvinget även av den drivande temperaturskillnaden mellan fluid och medeltemperatur i lager. Denna beror av markvärmeväxlarnas effektkapacitet samt av den inlagrade solvärmeeffekten.

Figur 5.6 visar på ett förenklat sätt hur värmeväxlarnas centrumavstånd inverkar på den drivande temperaturen och därmed fluidens temperatursving vid solvärmeinlagring samt värmeuttag. Lagrets temperatursving har satts konstant till 30 °C. Vidare är medeleffekten vid solvärmeinlagring satt till 12 W/m<sup>3</sup> och vid värmeuttag ungefär hälften inklusive kompensering för 33% värmeförluster (vid en energiomsättning) från lagret. Dubbla U-rör enligt figur 5.4 har använts.

Figur 5.6 visar tydligt hur fluidens temperatursving ökar kraftigt vid ökande cc-avstånd. Ett försök till optimering mellan investeringskostnad och temperatursving görs i kapitel 6.



Figur 5.6 Fluidens temperatursving vid konstant temperatursving i lager vid olika cc-avstånd mellan markvärmeväxlare i form av dubbla U-rör. Vid t ex 2m cc-avstånd blir fluidens totala temperatursving ca 45 °C.

### 5.3 Fjärrvärmelager

Värmelagring i fjärrvärmenät motiveras ofta med ökad elproduktionskapacitet (kraftvärme) eller med ökad möjlighet till utnyttjande av billig baslastproduktion. Vanligen utnyttjas hetvattenackumulatörer i stål som har en hög effektkapacitet varför ackumulatorns energimängd kan omsättas ett stort antal gånger per år.

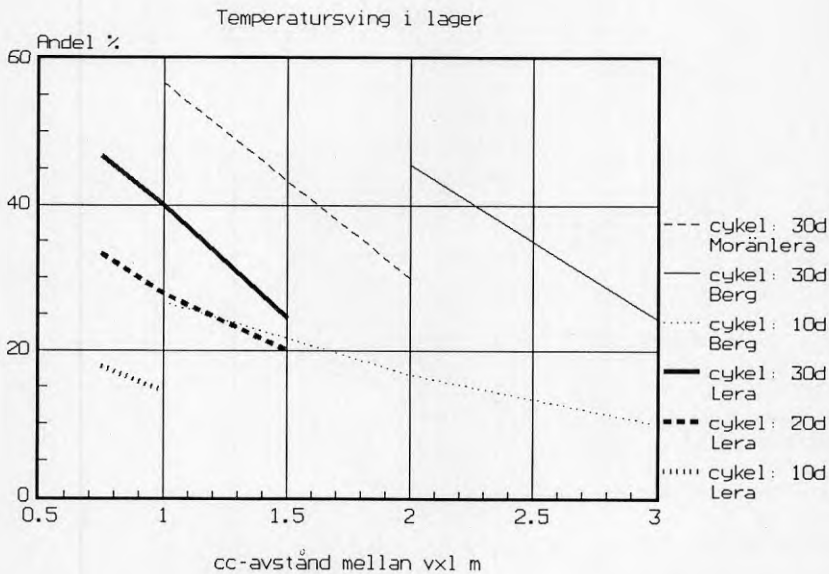
Säsongslagring av värme nyttjas inte i någon större omfattning beroende på att kostnaderna ofta blir stora, delvis på grund av att lagret bara omsätts en gång per år. En annan orsak är de begränsningar som fjärrvärmenätets temperatur utgör. Sommartid är framledningstemperaturen relativt låg, ofta ca 80-85 °C, vilket begränsar inladdningstemperaturen. Vintertid är returtemperaturen ofta ca 55-60 °C vilket medför att temperatursvinget på fluiden är ca 30 °C. Eftersom det vidare krävs en drivande temperatur i lagret blir temperatursvinget i lagret mindre. Detta innebär att förutsättningarna att säsongslagra värme ute på fjärrvärmenätet i decentraliserade fjärrvärmelager är begränsad. Om lagret kopplas direkt till en fjärrvärmecentral kan en högre temperatur inlagras och förutsättningarna förbättras.

Om lagret placeras som ett så kallat satellitlager i anslutning till en fastighet på sekundärsidan av nätet kan temperatursvinget i lagret ökas. Laddning kan fortfarande göras vid en temperatur av ca 80 °C medan fastighetens relativt låga returtemperatur kan utnyttjas. Temperatursvinget i lagret bör därvid kunna öka till ca 30-50 °C. En förstudie över ett satellitlager för en fastighet i Göteborg finns beskriven av Hofgren et al (1987).



Om dessutom lagret kan omsättas flera gånger per år förbättras situationen ytterligare. Korttidslagring med vertikala rörsystem har därför simulerats för olika lagringscykler och markförhållanden. Lagring i lera, moränlera och granit har undersöks. Dessa material har valts eftersom de representerar skilda termiska egenskaper. Lera har låg värmeledningsförmåga och hög värmekapacitet medan förhållandena för granit är de omvända. Moränlera har termiska egenskaper som representerar ett mellanting mellan lera och granit. Termiska egenskaper i jord och berg finns beskrivna av Sundberg (1988).

Förmågan att snabbt utjämna temperaturskillnader är således störst i granit. Vid simuleringen har endast värmeväxlare i form av borrhål kunnat utnyttjas. Dessa kan för "steady-flux" översättas till dubbla U-rör men med andra centrumavstånd enligt tabell 5.1. Eftersom en viss del av korttidslagringen sker under instationära förhållanden missgynnas emellertid det dubbla U-röret ytterligare. Effekten blir påtagligast vid de kortaste lagringscyklerna i figur 5.7.



Figur 5.7 Utnyttjningsbart temperatursving uttryckt som andel av totalt som funktion av cc-avstånd mellan värmeväxlare. Värmeväxlare: koncentrisk rör, temperatursving på fluiden: 50 - 95 °C.

Tabell 5.1 Ekvivalenta cc-avstånd mellan borrhål och dubbla U-rör. Övergångsmotståndet (m) fluid-mark är satt till 0.01 resp 0.05.

Borrhål m	Dubbelt U-rör m	Värmeöverförings- kapacitet W/m <sup>3</sup> ,K
1	1.25	3.81
1.5	1.85	1.36
2	2.4	0.67

Som framgår av figur 5.7 och tabell 5.1 bör centrumavståndet mellan dubbla U-rör i lera vara högst 1.5 m för att andel utnyttjningsbart temperatursving i lager skall vara större än 30% av fluidens temperatursving.

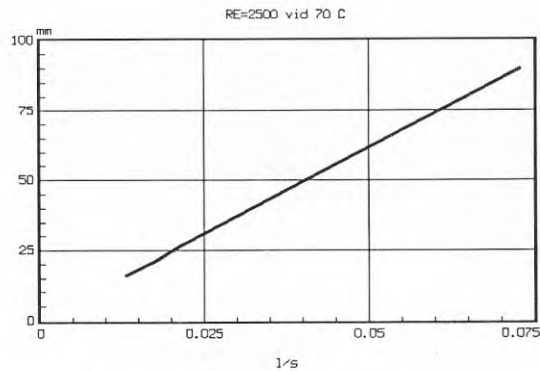
Vid ökat antal energiomsättningar i lagret per år och med bibehållet energiinnehåll per lagringscykel ökar därför kostnaderna drastiskt. Värmelagring i vatten påverkas inte kostnadsmässigt i så hög grad av ökad effektkapacitet varför "vattenlager" ofta är att föredra vid många energiomsättningar i ett lager per år. Markvärmelager med vertikala slangar i jord eller borrhål i berg är därför i första hand intressanta som säsongslager.

#### 5.4 Tryckfall i markvärmeväxlare

Flödet genom en markvärmeväxlare har en undre och en övre begränsning. Vattenhastigheten måste vara tillräckligt hög för att turbulenta förhållanden skall upprätthållas. I annat fall kommer värmemotståndet mellan fluid och rörvägg att bli oacceptabelt stort. För att tryckfallet skall begränsas får ej heller vattenhastigheten vara för stor.

Reynolds tal beskriver typen av strömning och beror av vattenhastighet, slangdiameter samt kinematisk viskositet. Den kinematiska viskositeten är i sin tur temperaturberoende. Övergången mellan laminära och turbulenta förhållanden anses ske i intervallet 2300-4000 för Reynolds tal.

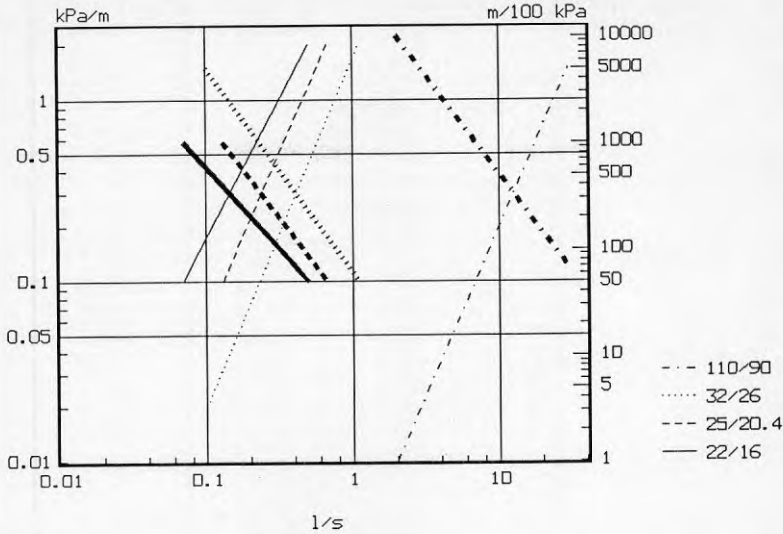
I figur 5.8 är vattenhastighet som funktion av slanginnerdiameter uppritad vid Reynolds tal 2500. Vattentemperaturen är satt till 70 °C. Om således  $Re > 2500$  representerar turbulenta förhållanden kan figur 5.8 användas som underlag till bestämning av minimal vattenhastighet.



Figur 5.8 Vattenhastighet som funktion av slanginnerdiameter vid Reynolds tal 2500 och vattentemperaturen 70 °C

Beroende på hur markvärmeväxlarna kopplas påverkas tryckfallet över ett värmelager. Markvärmeväxlare kan seriekopplas eller parallellkopplas. Vid större värmelager är det ofta en blandning av dessa två fall. Ett enkelt exempel är två samlingsledningar på var sin sida av lagret. Dessa sammanbinds av ett antal parallella slangar som också bildar värmeväxlare. Varje parallell slang består sålunda av ett antal seriekopplade värmeväxlare. Det är då intressant att undersöka hur lång slangen kan vara, i exemplet hur många markvärmeväxlare som kan seriekopplas, utan att tryckfallet blir för stort.

Figur 5.9 visar sambandet mellan vattenhastighet och tryckfall för PEX-slang (tvärbunden polyeten). På den högra y-axeln redovisas hur lång



Figur 5.9 Tryckfall som funktion av vattenflöde vid olika slangdimensioner för PEX-rör (tunn linje). Figuren visar även den rörlängd som kan seriekopplas vid tryckfallet 100 kPa (grov linje).

slang som kan installeras utan att tryckfallet blir större än 10 meter vattenpelare (mvp), det vill säga 100 kPa. Detta tryckfall kan ses som ett riktvärde för ett markvärmelager. Som framgår av figuren kan mellan 50 och 1000 m slang seriekopplas när flödet varierar mellan ca 1 och 0.1 l/s. Om flödet sätts till 0.25 l/s kan 6-7 stycken 25 mm U-rör av PEX seriekopplas vid ett lagerdjup av 20 m och ett tryckfall av 10 mvp.

### 5.5 Principutformning av lager

Funktionen av ett värmelager i lera skall uppfylla vissa krav. Dessa kan formuleras enligt följande.

- Värmeförlusterna skall minimeras på ett ekonomiskt optimalt sätt.
- Effektförmågan och energikapaciteten skall anpassas till rådande förhållanden.
- Lerans termiska egenskaper får ej försämrats med tiden i en sådan grad att funktionen påverkas.
- Värmeväxlarnas funktion får ej nedsättas av skador på grund av sättningar eller dylikt.
- Överytan skall kunna användas till tänkt verksamhet vilket i sin tur ställer krav på
  - sättningar
  - dränering
  - markbeskaffenhet
- Minimal påverkan på omgivande installationer och bebyggelse

Några av ovanstående punkter behandlas här. Värmeförluster har diskuterats i kapitel 4. För optimal isolering visades där att även sidoytorna av lagret måste isoleras i varierande grad. Eftersom det medför vissa svårig-

heter att isolera sidoytorna vertikalt i marken kan isoleringen läggas ut horisontellt till motsvarande avstånd från lagret som det tänkta djupet. Även en kombination av horisontell och vertikal isolering är tänkbar.

Det är troligt att en uttorkning av leran kommer att ske på grund av den höga temperaturen i lagret. För att motverka en uttorkning måste någon form av diffusionspärr placeras på åtminstone lagrets överyta. En sådan spärr bör också förbättra isoleringens långtidfunktion på grund av minskad ångdiffusion. Om stora rörelser sker i lagret finns det risk för att skador i form av brott eller förträngning uppkommer på slangen. Risken för sådana skador kan minskas genom att hänsyn till detta tas under projekteringen.

Ett värmelager i lera kan ha en relativt stor horisontell yta. Det är därför av vikt att dränering fungerar på avsett sätt om ytan skall utnyttjas för speciella ändamål.

## 6 KOSTNADER FÖR MARKVÄRMELAGER

### 6.1 Kostnadsberäkning

Relativt detaljerade kalkyler har utförts för olika lagerstorlekar i lera med olika isoleringsgrad och effektkapacitet. Priser enligt tabell 6.1 har använts. Kalkylerna har resulterat i en kostnadsfördelning enligt tabell 6.2.

Tabell 6.1 Använda kostnader i lagerkalkyler. Kostnader för kulvert och VVS har varierats med lagerstorleken. Samtliga kostnader är exkl moms och i 1989 års kostnadsläge. Kostnader för slangmaterial och isolering baseras på kapitel 3 och 4.

Etablering	100000	kr
Matjordsavtäckning	10	kr/m <sup>2</sup>
Schakt, trp inom område	25	kr/m <sup>3</sup>
Borttrp. schaktmassor	30	kr/m <sup>3</sup>
Markplanering, gräs	50	kr/m <sup>2</sup>
Markisolering inkl arbete	100	kr/m <sup>3</sup>
Plastfolie inkl arbete	10	kr/m <sup>2</sup>
Dräneringslager	100	kr/m <sup>3</sup>
Värmeväxlar slang mtrl, PEX 28mm	16	kr/m
Samlingsledningar mtrl	250	kr/m
Kopplingsblock	6000	kr/styck
Pålkran med 3 man	10000	kr/dag
Kostnad per koppling	150	kr/styck
Lägningsarbete samlingsledn	30	kr/m
Kulvert till byggnad	1200	kr/m
VVS-övrigt	40000	kr
Samordning	10	%
Oförutsett	10	%
Byggherreomkostnader	15	%

Tabell 6.2 Kostnadsfördelning för värmelager. Värmeväxlarna är placerade med centrumavstånd 2m och isoleringen är 35 cm på överytan och 25 cm på del av sidoytan. Ev tank är ej inkluderad.

	Lagerstorlek m <sup>3</sup> :	20000	50000	100000
	Djup m:	20	25	35
Kostnadslag	Sidoisolerandel %:	50	40	30
-----				
Etablering, markarbeten lageryta, dränering, kulvert, VVS-övrigt:		20 %	15 %	12 %
-----				
Isoleringsarbeten, markarbeten för isolering sidoyta:		40 %	35 %	32 %
-----				
Värmeväxlare, kopplingar kopplingsblock, samlingsledningar:		40 %	50 %	56 %
-----				
Totalkostnad per m <sup>3</sup> lager:		104 Kr	79 Kr	62 Kr

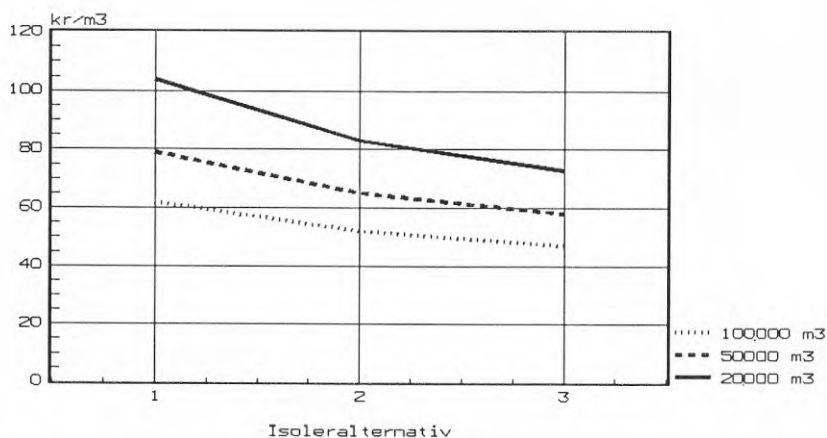
Som framgår av tabell 6.2 är kostnadsfördelningen olika för de olika lagerstorlekarna. Detta beror av att den relativa omslutningsytan minskar vid ökande volym. Därav minskar också andelen av totalkostnaden för isolering och markarbeten. Detta blir speciellt markant eftersom en hög isoleringsgrad har använts.

Vi ser vidare att den relativa andelen för värmeväxlare med tillbehör minskar med ökande lagerstorlek. Detta är en funktion av att de andra delkostnaderna sjunker och ger en mindre totalkostnad per  $m^3$  vid ökande volym. Egentligen är kostnaden per  $m^3$  lager relativt konstant för värmeväxlargruppen. Vidare kommer olika krav på isolering och effekt att ha en helt avgörande inverkan på totalkostnaden. Därför kommer möjliga besparingar att koncentrera sig på de två senare grupperna i tabell 6.2. Kostnaden för bufferttank är ej medtagen i sammanställningen eftersom den i första hand är specifik för solvärme.

Isoleringsgraden har således en stor inverkan på kostnaden. Figur 6.1 visar kostnadsförändringen vid tre olika isoleringsalternativ enligt följande tabell 6.3.

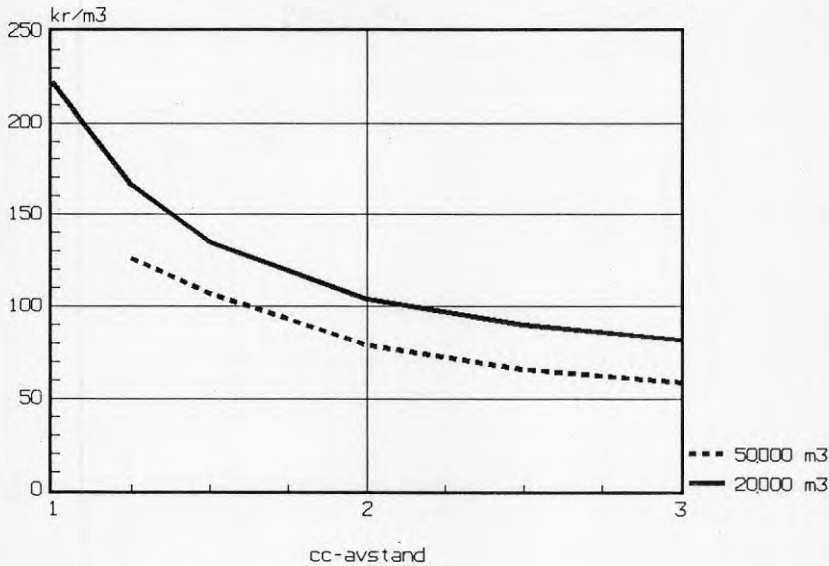
Tabell 6.3 Definition av de tre olika isoleringsalternativen i figur 6.1.

Isoleringsalternativ	Lagerstorlek $m^3$		
	20000	50000	100000
	Andel av sidoyta som är isolerad		
1: Överyta 35 cm Sidoyta 25 cm	50%	40%	30%
2: Överyta 20 cm Sidoyta 15 cm	25%	20%	15%
3: Överyta 10 cm Sidoyta 10 cm	15%	10%	7%



Figur 6.1 Totalkostnaden för olika storlekar av värmelager vid olika isoleringsalternativ enligt tabell 6.3.

Som förväntat är kostnadens förändring med lagerstorleken mest markant för det minsta lagret. Vidare kan man se att lagerstorleken i sig påverkar kostnaden kraftigt men att skillnaden minskar vid minskande isolering. För ett lager om 50000 m<sup>3</sup> medför isolering enligt alternativ 3 en minskning av kostnaden från 80 till knappt 60 kr/m<sup>3</sup> eller med drygt 25%.



Figur 6.2 Lagerkostnadens förändring med cc-avståndet mellan markvärmeväxlare i form av dubbla U-rör.

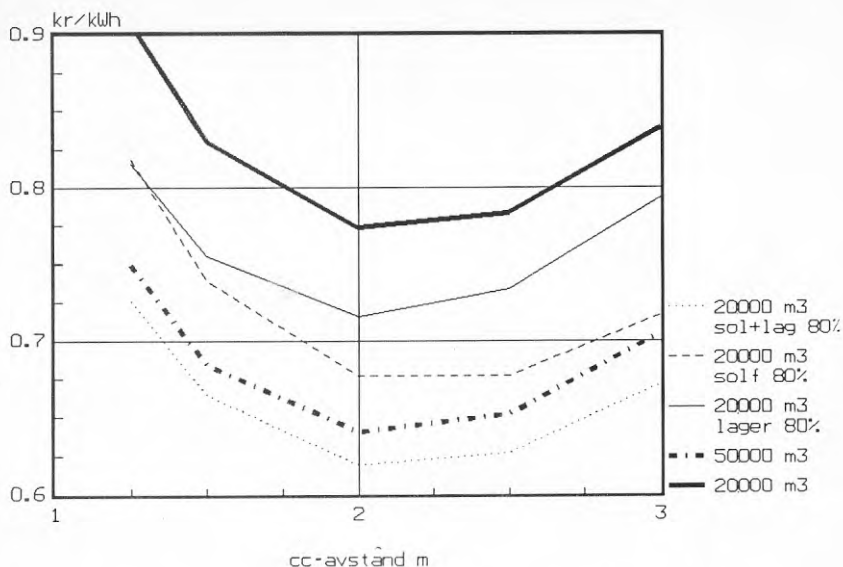
Värmeväxlarkapaciteten eller effekttåligheten för lagret är en annan sak som kraftigt påverkar totalkostnaden. Figur 6.2 visar hur kostnaden ökar vid minskande centrumavstånd mellan värmeväxlarna för ett 20000 respektive 50000 m<sup>3</sup> stort lager.

Kostnaden för materialet i värmeväxlaren och för neddrivningen är således mycket väsentliga faktorer.

Kostnaderna ökar således kraftigt vid minskande centrumavstånd mellan markvärmeväxlarna. Var det kostnadsmässiga optimumet finns varierar med kostnaden för och vilken typ av värme som lagras.

I figur 6.3 har en förenklad optimering utförts för en solvärmeställning. Kostnaden för solfångare har satts till 1500 kr/m<sup>2</sup>. Förutsättningen för optimeringen är att solfångarnas effektivitet beror av medeltemperaturen på fluiden vid inladdning. Ett minskat centrumavstånd mellan markvärmeväxlare innebär således inte bara en högre lagerkostnad utan också en effektivare solfångare.

Figur 6.2 har utnyttjats för bestämning av lagerkostnaden. Som framgår av figur 6.3 erhålls ett optimalt centrumavstånd vid ungefär 2 m. De tunnare linjerna visar kostnadsoptimum för ett 20000 m<sup>3</sup> om lager eller solfångarkostnad reduceras med 20%.



Figur 6.3 Optimering av cc-avstånd mellan värmeväxlare för totalkostnad av solfångare och lager. Annuitet 10%. Temperatursving i lager 30 °C.

Som framgår av figur 6.3 sker inte någon större förändring av optimalt centrumavstånd för de här angivna fallen. Om endast solfångarkostnaden reduceras med 20% sker dock en svag förskjutning åt större centrumavstånd.

Figur 6.3 anger totalkostnaden för värmelager och solfångarefält **exklusive** kostnad för bufferttank, sammankoppling av lager-solfångare samt styr- och reglerutrustning. Kostnaden för en bufferttank är ca 1800-2500 kr/m<sup>3</sup>. Den nödvändiga volymen är drygt 300 m<sup>3</sup> för ett 20000 m<sup>3</sup> stort marklager i lera vilket innebär en tilläggskostnad av 50 kr/m<sup>3</sup> marklager.

Dessa kostnader för bufferttank och sammankoppling etc är ca 15-20 öre/kWh och skall adderas till kostnaderna i figur 6.3 för att en totalkostnad skall erhållas. Optimeringen beträffande centrumavstånd påverkas endast marginellt för dessa tillkommande kostnader.

Som nämnts ovan är optimeringen i figur 6.3 starkt förenklad. Modellsimuleringar med hela energisystemet är nödvändiga för att en verklig kostnadsoptimering skall kunna göras. I det verkliga komplexa fallet är det inte bara solfångarnas effektivitet varierar utan även t ex lagerstorlek, temperatursving i lagret samt optimering mellan markvärmeväxlarens utformning och centrumavstånd och bufferttankens storlek.

För andra typer av värmekällor är optimalt centrumavstånd beroende på en rad faktorer som

- tid för inladdning respektive utladdning
- önskad temperaturnivå
- effektkrav



## 6.2 Möjlig kostnadsreducering

I tabell 6.2 framgår kostnadsstrukturen för markvärmelager vid en relativt hög isoleringsgrad. Kostnaderna är grupperade i tre grupper. Den första gruppen innehåller kostnader för etablering, ordinära markarbeten etc. som troligen är svåra att reducera. Grupperna 2 och 3 innehåller kostnader för isolering respektive markvärmeväxlare och fördelningsledningar.

Figur 6.1 visar att resultatet av en lägre isoleringsgrad kan ge besparingar på upp till 25-30% av totalkostnaden. Om dessutom billigare isoleringsmaterial kan användas minskar kostnaden ytterligare. Andelen av totalkostnaden för markvärmeväxlare mm ökar vid ökande lagerstorlek och uppgår till mellan 40 och 55% av kostnaden. Om billigare material kan användas och en effektivare installationsteknik utvecklas bör det finnas utrymme för kostnadsminskningar även här.

I tabell 6.4 nedan har en sammanställning utförts över resultatet av antagna kostnadsreduceringar.

Tabell 6.4 Resultatet av potentiella kostnadsminskningar i kr/m<sup>3</sup>. Isoleringalternativen framgår av tabell 6.3.

Typ av kostnad	Lagerstorlek m <sup>3</sup>			
	20000		100000	
	Isoalt.		Isoalt.	
	1	3	1	3
Utgångskostnad	104	73	62	47
Isolering -25%	-10	-3	-5	-1
Markvärmeväxlare mm -40%	-17	-17	-14	-14
Reducerad lagerkostnad	77	53	43	32
Reducering i % av utgångskostn	26%	27%	31%	32%

För solvärmertilämpningar är en möjlig kostnadsreducering av bufferttanken mycket intressant eftersom den står för ca 35% av totalkostnaden. En lovande teknik för byggandet av små "vattenlager" är det så kallade spirocylinderkonceptet. Det prövas för närvarande i två projekt i Växjö respektive Särö. Om tekniken håller vad den lovar bör kostnaderna för bufferttanken kunna reduceras med i storleksordningen 40-50%.

Systemoptimeringar av lager tillsammans med t ex solfångare och värme-system kan reducera kostnaderna för det totala energisystemet.

## 6.3 Tillåten lagerkostnad

För att lagerkostnaden för ett markvärmelager för säsongslagring skall kunna jämföras med ett vattenlager måste hänsyn tas till möjlig temperaturnivå, möjligt temperatursving samt markens värmelagringsförmåga.

Den sistnämnda faktorn beror av markens värmekapacitet. För en lera kan denna ansättas till ca 0.9-1.0 kWh/m<sup>3</sup>,K. Detta motsvarar ungefär 80% av värmekapaciteten för vatten.

På grund av värmeväxlingen i marken kan inte hela fluidens temperatur-

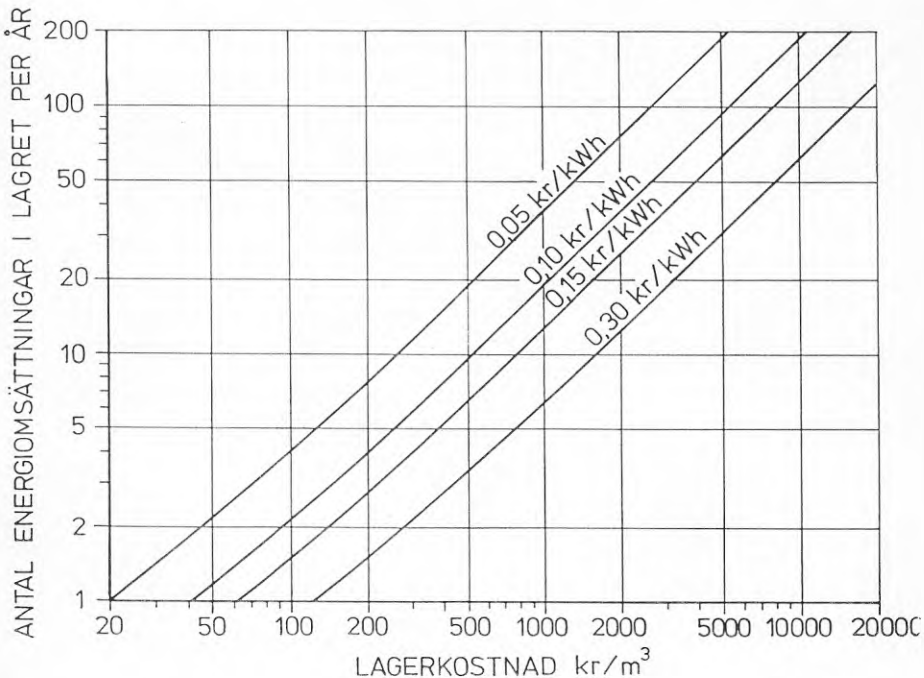
sving utnyttjas. Enligt figur 5.6 är markens temperatursving ca 65% av fluidens vid ett centrumavstånd mellan markvärmväxlarna av 2m. Om vi tills vidare bortser från begränsningar som kan föranledas av temperaturnivån är enligt detta exempel ett markvärmelager ungefär hälften så effektivt ( $0.8 \cdot 0.65$ ) som ett lager där lagringsmediet är vatten.

Ett markvärmelager för säsongslagring av energi får därför kosta maximalt dubbelt så mycket som motsvarande vattenlager. Kostnader för värmelager framgår av tabell 6.5. Som framgår av tabellen är kostnaden för värmelager i lera klart lägre än lager med vatten som lagringsmedium.

Tabell 6.5 Kostnader för marklager. Intervallet inbegriper olika storlekar, eventuellt behov av bufferttank och utvecklingspotential. Normerad kostnad är kostnaden som erhålls när marklagret har normerats mot ett "vattenlager" m.a.p. uttagen energimängd.

Typ av lager	Kostnad kr/m <sup>3</sup>	Normerad kostnad kr/m <sup>3</sup>
Groplager	300 - 600	300 - 600
Marklager i lera	30 - 160	60 - 320

I figur 6.4 ges tillåten lagerkostnad för "vattenlager" som funktion av antal lageromsättningar och skillnaden i värde mellan inlagrad energi och den energi som ersätts. Med tillåten lagerkostnad avses den maximala lagerkostnad ett lager får ha för att nyttan och värdet av lagret precis



Figur 6.4 Tillåten lagerkostnad vid värmelagring i vatten som funktion av antal energiomsättningar i lagret och värdeskillnad mellan inlagrad och uttagen energi. I övrigt se text.

skall motsvara drift- och kapitalkostnader. I sådana här resonemang får valda räntenivåer och avskrivningstider mm stor betydelse. I figur 6.4 har använts 6% real ränta, 20 års avskrivning samt 40 °C temperatursving. Vidare har värmeförlusterna ansatts till 25% av en styck energiomsättning i lagret. Värdet av värmeförlusten är satt till detsamma som värdeskillnaden.

Av figuren framgår att kombinationen av säsongslagring (1-2 energiomsättningar per år) och liten värdeskillnad mellan inlagrad och uttagen energi medför att mycket små belopp finns tillgängliga för investering i ett värmelager. Om 60 kr/m<sup>3</sup> enligt tabell 6.5 ansätts som en lägsta möjlig normerad kostnad för värmelager erhålls en minimal värdeskillnad mellan inlagrad och uttagen energi av 15 öre/kWh enligt figur 6.4. Ofta kan energiomsättningen ökas till något över en genom att lagret till exempel nyttjas för dygnsutjämning under inlagringsperioden.

Vid korttidslagring minskar marklagrets kostnadsfördelar gentemot vattenlagret. Detta orsakas av att avstånden mellan markvärmeväxlarna måste minskas drastiskt för att det skall vara möjligt att hinna med att lagra in och ta ut värme under den kortare tidsperiod som står till förfogande.

I figur 5.7 har beräkningar utförts över en energiomsättning per månad. Vid centrumavståndet 1.8 m kan ca 30% av temperatursvinget på fluiden utnyttjas. Detta innebär i analogi med det tidigare resonemanget att lervärmelagret har ca 25% av vattenlagrets energikapacitet. Om 70 kr/m<sup>3</sup> ansätts som en kostnad för detta centrumavstånd inklusive kostnadsredueringar enligt tabell 6.4 blir därmed den normerade kostnaden 280 kr/m<sup>3</sup> vilket är av samma storleksordning som kostnaden för ett utvecklat vattenlager. Det intressanta området för markvärmelager inskränker sig således till säsongsvärmelagring och månadslagring.

## 7 SLUTSATSER

Följande slutsatser kan dras:

- När lera utsätts för temperaturcykling kommer sättningar att utbildas. Hur stora sättningarna blir och tidsförloppet för dessa är beroende av temperatur, lerans geotekniska egenskaper samt dräneringsförhållandena i leran.
- När lera utsatt för en ökad temperatur i laboratorieförsök har tydliga förändringar i utvärderat förkonsolideringstryck, övriga kompressionsegenskaper och odränerad skjuvhållfasthet observerats. De utförda försöken har dock ej verifierats med fältexperiment.
- Hur stort det geotekniskt påverkade området utanför lagret blir är ej klarlagt. En kvalificerad gissning är att detta är ungefär lika stort som det termiskt påverkade. Detta måste dock verifieras med väl kontrollerade fältförsök för att byggande av värmelager i lera skall kunna ske intill bebyggelse.
- Eftersom det är klarlagt att sättningar kommer att utbildas i lagret måste de installationer som utförs inom detta område utföras på ett sådant sätt att funktionen av ackumulatören ej nedsätts.
- Den förhöjda temperaturen i ett markvärmelager kommer att leda till att de termiska egenskaperna förändras och en möjlig uttorkning sker av delar av lagret.
- Värmeförlusterna från ett värmelager i lera kommer att variera mellan 20 och ca 45% (beräknat utifrån en energiomsättning i lagret) beroende på lagerstorlek och värdet av den lagrade energin. Den sistnämnda faktorn påverkar den ekonomiskt optimala isoleringsinsatsen. De transienta förlusterna de första åren är betydligt större.
- För att ett markvärmelager i lera skall vara energimässigt jämförbart med ett värmelager med vatten som lagringsmedium måste det göras ungefär dubbelt så stort.
- Om nya former av PEM i slangar (värmeväxlare) kan användas för högttemperaturlager i lera bör kostnaderna för markvärmeväxlare kunna minskas kraftigt.
- Isolering svarar för en stor andel av totalkostnaden. För att undvika överdimensionering är det därför av vikt att erfarenheter införskaffas om till exempel isoleringens funktion vid de speciella förhållanden (hög temperatur och fuktig miljö) som råder vid en markvärmelagring.
- Ett markvärmelager i lera eller berg är ej ekonomiskt att utföra för korttidslagring på grund av de kraftigt ökande kostnaderna för markvärmeväxlare som detta medför. Maximalt är i storleksordningen en energiomsättning per månad möjlig för att lagertypen skall kunna konkurrera med vattenlager.

- Kostnaderna för ett högtemperaturvärmelager i lera avsett för säsongslagring beräknas uppgå till mellan 100 och 200 kr/m<sup>3</sup> ekvivalent vattenvolym beroende på storlek och isoleringsgrad. Detta bedöms vara mindre än för samtliga lagertyper med vatten som lagringsmedium. Kostnaderna bedöms dessutom kunna minskas med ca 25% genom teknikutveckling.
- Systemsimuleringar är nödvändiga att göra för att optimera lagret mot övriga komponenter i systemet. Simuleringar är speciellt viktiga för marklager med slangsystem på grund av den energitekniskt komplicerade bilden.

## REFERENSER

- Adolfsson, K. & Sällfors, G., Energilagring i lera, Byggeforskningsrådet, rapport R23, 1987.
- Baldi, G., Hueckel, T. & Pellegrini, R., Thermal volume changes of the mineral - water system in low-porosity clay soils, *Can. Geotech. J.* 25, 807-825, 1988.
- Berglund, G. & Ifwarson M., Inventering av plastmaterial i värmedistribuitionssystemet, Byggeforskningsrådet, rapport R154, 1984.
- Campanella, R.G., Mitchell, J.K., Influence of temperature variations on soil behavior, *ASCE*, vol. 94, no. SM3.1, 1968.
- Claesson, J., Efring, B., Eskilson, P. & Hellström, G., Markvärme. En handbok om termiska analyser, Byggeforskningsrådet, rapport T16-18, 1985.
- Ctori, P., The effects of temperature on the physical properties of cohesive soils, Beng Civil Engineering, Coventry Polytechnic, 1988.
- Demars, K.R. & Charles, R.D., Soil volume changes induced by temperature cycling, *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 19, no. 2, 1982.
- Eriksson, L.G., Geotekniska konsekvenser av värmelagring i sulfidjord, Avdelningen för geoteknik, Högskolan i Luleå, teknisk rapport, 1984:06T, 1984.
- Franck, P-Å., Modin, B. & Rosenblad, G., Värmepump med vertikalt jordvärmsystem och vindkonvektor. Chalmers Tekniska Högskola, Jordvärmegruppen, rapport 2, 1981.
- Gräslund, J., Hultmark, G., Olsson, S. & Rudholm, B., Sunclay-projektet. Utvärdering av SUNCLAY-systemet. Andra generationens systemlösning. Byggeforskningsrådet rapport R84, 1986.
- Habibagahi, K., Temperature effect on consolidation behavior of over-consolidated soils, *Proc. VIII ICSMFE*, Moskva, 1973.
- Hellström, G., Pc-programs for ground heat systems. Avdelningen för matematisk fysik, Lunds tekniska högskola, 1989.
- Hofgren, K-H., Buresten, R. & Johnson, G., Satellitvärmelager. Lokal värmelagring i ett fjärrvärmsystem. Fallstudie. Byggeforskningsrådet, rapport R82, 1987.
- Holmberg, P., Berntsson, T. & Schroeder, K., Sunclayanläggningen i Kungsbacka. Värmeteknisk uppföljning. Chalmers Tekniska Högskola, Jordvärmegruppen, rapport 23, 1986.
- Larsson, R., Consolidation of soft soils, Statens geotekniska institut, rapport no 29, 1986.
- Magnusson, C. & Bergenståhl, L., personlig kommunikation, 1989.
- Modin, B. & Rhen, I., Frysning av lera vid jordvärmelager i Utby. Chalmers Tekniska Högskola, Jordvärmegruppen, rapport 11, 1983.

Noble, C. & Demirel, T., Effect of temperature on strength behavior of cohesive soils, Highway Research Board, special report no. 103, Washington D.C., 1969.

Olsson, S., Solvärmelagring med höga temperaturer i lera för flerfamiljs-  
hus i Kullavik. Utvärdering, Byggforskningsrådet, rapport R105, 1986.

Rhen, I., Sunclay-anläggningen i Kungsbacka. Teknisk uppföljning av  
värmelagret, Chalmers Tekniska Högskola, Jordvärmegruppen, rapport 27,  
1988.

Rydell, B., Magnusson, C. & Dahlöf P., Värmelagring i lera med värme-  
pump för skola och sporthall i Söderköping. Projektering. Statens geotek-  
niska institut, Varia 186, Linköping, 1986.

Rydell B. & Sundberg J., Värmelager i lera vid församlingshem i Söderkö-  
ping. Geoteknisk uppföljning och utvärdering, Statens geotekniska insti-  
tut, Linköping, 1987.

Rydell, B., Lundin, S-E. & Sundberg J., Teknikupphandling av markvärme-  
lager, Byggforskningsrådet, rapport R44, 1988.

Sherif, M. & Burrous, C., Temperature effects on the unconfined shear  
strength of saturated cohesive soil, Highway Research Board, special  
report no. 103, Washington D.C., 1969.

Sundberg, J., Thermal properties of soils and rocks (Delvis på svenska).  
Chalmers Tekniska Högskola och Göteborgs Universitet, Geologiska  
institutionen, Doktorsavhandling, Publ. A57, Göteborg, 1988. Även publi-  
cerad av Statens geotekniska institut, rapport 35, Linköping, 1988.

Sällfors, G. & Larsson, R., Beräkning av slänters stabilitet. Väg- och  
vattenbyggaren 7-8, 1984.

Tidfors, M., Temperaturens påverkan på leras deformationsegenskaper -  
En laboratoriestudie, Chalmers Tekniska Högskola, Institutionen för  
geoteknik, Licenciatuppsats, 1987.

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









**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 880876-9  
från Statens råd för byggnadsforskning till Statens  
geotekniska institut, Linköping.**

**R40: 1990**

**ISBN 91-540-5193-2**

**Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm**

**Art. nr: 6801040**

**Abonnemangsgrupp:  
Ingår ej i abonnemang**

**Distribution:  
Svensk Byggtjänst  
171 88 Solna**

**Cirkapris: 44 kr exkl moms**