278

Lovisa Bergenståhl SGI
Marti Lehtmets SGI
Jan Sundberg Terratema AB

FÖRSÖKSFÄLT FÖR HÖGTEMPERATURLAGRING I LERA

Förprojektering

BFR-projekt 890862-1
SGI Dnr: 1-574/89
Datum: 90-05-31

FÖRORD

Denna rapport hänför sig till BFR-projekt 890862-1, samfinansierat av Byggforskningsrådet och Statens geotekniska institut. Projektet omfattar förprojektering av försöksfält för energigeoteknisk FoU. Rapporten utgör beslutsunderlag för anläggandet av försöksfältet och verksamheten i detsamma.

Arbetet har utförts vid Statens geotekniska institut. Projektledare har varit Lovisa Bergenståhl och Marti Lehtmets. Projektgruppen har dessutom bestått av Ulf Bergdahl samt Jan Sundberg, verksam vid Terratema AB.

Rolf Larsson har lämnat värdefulla synpunkter på undersökningsmetoder för högtempererad jord.

Inom avsnittet som berör VVS-teknisk projektering har erfarenheter inhämtats från Peder Dahlöf, NCC BYGG AB Göteborg.

Linköping maj 1990

Marti Lehtmets

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

Förord i

Innehållsförteckning ii

Sammanfattning iii

1. Bakgrund 1
1.1 Allmänt
1.2 Temperaturpåverkan på lera - Kunskapsläget
1.2.1 Utförda laboratorieförsök
1.2.2 Uppföljningar av fullskaleprojekt
1.2.3 Försöksfält i Kungälv
1.2.4 Värdering av utförda försök och uppföljningar
1.2.5 Simulering av sättningsförlopp
1.2.6 Slutsatser
1.3 Frysning av lera

2 Motiv till försöksfält 15

3. Alternativa lokaliseringar av försöksfält 16
3.1 Kungälv
3.2 Linköping
3.3 Värdering av geotekniska undersökningar

4. Undersöknings- och utvärderingsprogram 18
4.1 Temperaturpåverkan på leras geotekniska egenskaper
4.2 Markvärmeväxlarnas effektkapacitet
4.3 Isoleringens termiska funktion vid hög temperatur
4.4 Termiska egenskaper i mark vid hög temperatur

5. Utformning och instrumentering av försöksanläggning 24
5.1 Värmeteknisk projektering
5.2 VVS-teknisk projektering
5.3 Instrumentering
5.4 Lagrets principiella utformning

6. Kostnadskalkyl 31

7. Slutsatser 33

Referenser 34

Bilagor 36

SAMMANFATTNING

Lagring av solvärme vid **hög temperatur** har blivit alltmer intressant. Marklager i lera med vertikala rörsystem tillhör den allra mest intressanta lagertypen ur ekonomisk synvinkel. Erfarenheter av denna lagertyp vid hög temperatur saknas dock.

Erfarenhetsmässigt får man vissa förändringar i jordens egenskaper samt sättningar vid in- och utlagring av värme i framförallt lerjord. De fält- och fullskaleförsök som har slutförts är utförda vid relativt låga temperaturer, upp till 20-30 °C. Det är av stor betydelse att denna påverkan också kan bestämmas för högtemperaturlager, dels för att man skall kunna klarlägga placeringen i byggd miljö dels för att man skall kunna göra en riktig konstruktion av lagret med hänsyn till de geotekniska förändringarna i lagret. Ett viktigt kriterium, som bör klarläggas, är det avstånd på vilket ett värmelager kan placeras från bebyggelse utan att påverka dess grundläggning.

Denna rapport innehåller en förprojektering av ett försöksfält för energigeoteknisk FoU vid högtemperaturlagring i lera. Syftet med detta förprojektet har varit att ta fram underlag för beslut ifråga om platsval, omfattning av försöksverksamheten samt ekonomisk kalkyl.

Det projekterade försöksfältet kan lokaliseras antingen i Kungälv eller Linköping. Kungälv är att föredra ur geoteknisk synpunkt men skillnaderna är dock ej av avgörande betydelse. Till Linköpings fördel talar närheten till verksamheten i projektet. Det slutliga valet kan styras av rent ekonomiska faktorer.

Verksamheten i försöksfältet föreslås innehålla fyra separata utvärderingsprogram vilka uppfyller flera av delmålen i projektet. Samtliga utvärderingsprogram, temperaturpåverkan på leras geotekniska egenskaper, markvärmeväxlarnas effektkapacitet, isoleringens termiska funktion samt termiska egenskaper i mark, utförs vid hög lagertemperatur. Ett separat lager för undersökning av frysning av lera med vertikala rörsystem finns dock också medtaget. Högsta prioritet har temperaturpåverkan på leras geotekniska egenskaper vid hög temperatur.

Tre olika försökslager á 1000 m^3 (10·10·10 m^3) föreslås för undersökning av geoteknisk påverkan på lera vid hög temperatur; en yta med konstant hög temperatur (70 °C), en yta med varierad temperatur (30-70 °C), en yta med endast slanginstallation. Dessa tre lager gör det möjligt att utvärdera olika typer av påverkan var för sig. Dessutom finns en referensyta samt en yta för frysning av lera.

De olika testytorna försörjs med värme och kyla från en energicentral inbyggd i en container. Totala värmeeffekten uppgår till 50 kW och kyleffekten till 30 kW. Driften inom respektive testyta (slangslinga) och mellan de olika testytorna kan i stor omfattning ske oberoende av varandra. Detta borgar för ett flexibelt system vid eventuella driftstörningar.

Den geotekniska och termiska instrumenteringen blir omfattande eftersom detektering sker i två dimensioner. Insamling av mätdata kommer till viss del att automatiseras.

Genomförandet av hela projektet beräknas kosta 3,6 miljoner kronor i 1990 års penningvärde. Kostnadskalkylen har delats upp i en investerings- och en driftdel. Högtemperatur- resp kyldelen svarar för 70 resp 15% av totalkostnaden för försöksfältet.

1 BAKGRUND

1.1 ALLMÄNT

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 ev 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.

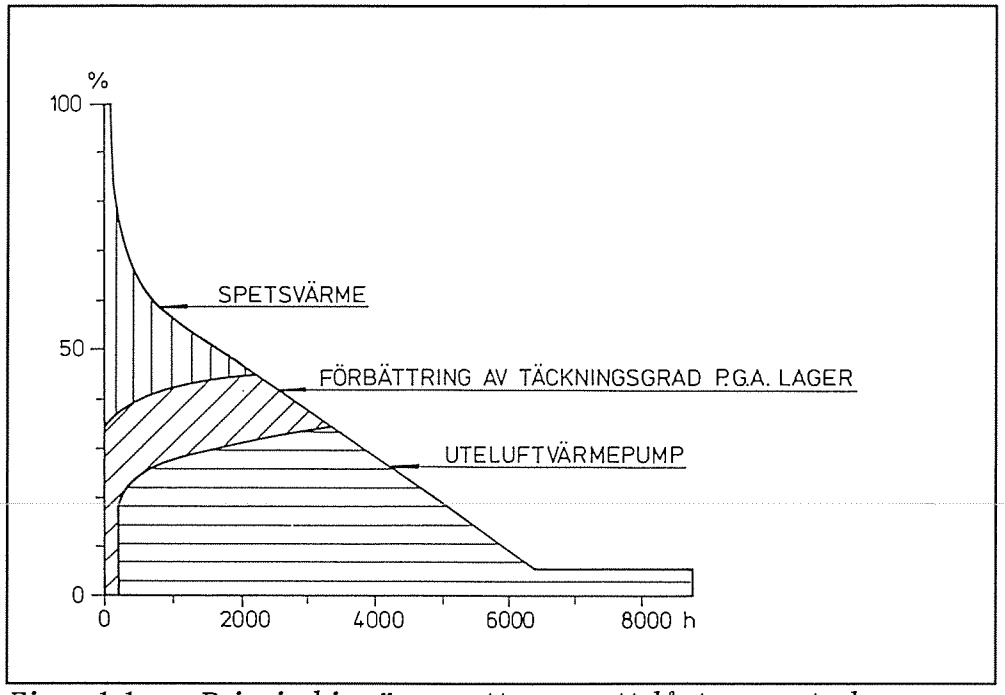
Det har därför blivit alltmer intressant att studera värmelager vid hög temperatur. Ett sådant lager kan direktkopplas till ett värmesystem utan värmepump. Värdet av lagret stiger därmed. Värmen som inlagras i lagret kan vara i form av:

- solvärme
- fjärrvärme
- spillvärme
- elvärme

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

En studie av dessa faktorer har utförts av Sundberg (1990). Det följande avsnittet 1.2 består av utdrag ur denna rapport.

Vidare kommer leran att utsättas för en betydligt högre tempereratur än vad som tidigare varit fallet. Detta kan innebära att omgivande bebyggelse påverkas i form av sättningar eller att rörelserna i själva lagret blir



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

oacceptabla. Det är också fullt tänkbart att en uttorkning av lagrets övre del kan ske med påföljande negativ inverkan på lagrings- och effektkapaciteten.

Sundberg (1990) har visat att kostnaden per inlagrad kWh är betydligt lägre vid värmelagring i lera med vertikala rörsystem jämfört med värmelagring i tankar och gropar. Lagret har dock begränsad effekkapacitet varför användningsområdet främst är inom intervallet säsongslagring till månadslagring.

1.2 TEMPERATURPÅVERKAN PÅ LERA - KUNSKAPSLÄGET

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. (Franck et al, 1981 och Modin & Rhen, 1983).
- Uppföljning av värmelager vid Lindälvskolan, Kungsbacka, 1981-1984. Geologiska institutionen, CTH, Göteborg. (Rhen, 1988).
- Uppföljning av värmelager i Kullavik, 1983-1985. Hagkonsult AB, Göteborg. (Olsson, 1986).
- Uppföljning av mindre värmelager i Alingsås, 1982-1983. Geologiska institutionen, CTH, Göteborg. (Wilén, 1984).
- Uppföljning av mindre värmelager för församlingshem i Söderköping, 1984-1987. SGI, Linköping. (Rydell & Sundberg, 1987).
- Uppföljning av värmelager för skola och sporthall i Söderköping, 1987-1991. SGI, Linköping. (Rydell et al, 1988 och Magnusson & Bergenståhl, 1989).

- Försöksfält för geoteknisk temperaturpåverkan på lera i Kungälv, 1981-1985. Institutionen för geoteknik med grundläggning, CTH, Göteborg. (Adolfsson & Sällfors, 1987).
- Laboratorieförsök av temperaturpåverkan på leras förkonsolideringstryck, 1982-1986. Institutionen för geoteknik med grundläggning, CTH, Göteborg. (Tidfors, 1987).
- Laboratorieförsök av temperaturpåverkan på sulfidleras geotekniska egenskaper, 1983-1984. Avdelningen för geoteknik, LuTH, Luleå. (Eriksson, 1984).
- Temperaturpåverkan på lera. Sammanställning av utförda insatser samt datasimulering av sättningsförlopp. SGI, Linköping. (Sundberg, 1990).

Detta avsnitt 1.2 i denna rapport består i huvudsak av utdrag ur den sistnämnda rapporten.

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. Eftersom vattnets volymutvidgningskoefficient är betydligt större än mineralpartiklarnas. Vid en långsam uppvärmning av ett litet prov medför detta att provet avger fritt vatten. Vid en hastigare uppvärmning och vid större jordvolymer medför en uppvärmning att hela jordvolymen expanderar eftersom vattnet då inte hinner avgå i samma takt som det expanderar. Detta är speciellt påtagligt i finkorniga jordar med låg permeabilitet. Denna expansion medför att kontakttrycken i kornskelettet minskar och att spänningarna i jorden på grund av egenvikt och yttre last omfördelas från effektivtryck i kornskelettet till porvattenövertryck.

Med tiden utjämnas porvattenövertrycket allteftersom vattnet hinner strömma ut ur jorden varvid effektivspänningarna ökar och kornskelettet åter komprimeras.

Vid en avkylning av jord sker motsvarande volymminskningar och eventuella portryckssänkningar. Storleken av portryckssänkningar i vattenmättad jord beror på jordens kompressionsegenskaper, spänningsnivån i jorden och temperaturminskningens hastighet och storlek. Utjämning av dessa porundertryck skulle kunna ske på motsvarande sätt genom vatteninströmning och hävning men torde dels på grund av avsaknad på tillgängligt fritt vatten och dels på grund av att jordens krypegenskaper normalt sker genom spänningsrelaxation utan att någon större volymändring uppstår under detta förlopp.

En annan effekt av temperaturförändringar i jord är att porvattnets viskositet och därmed jordens permeabilitet förändras.

De ovan beskrivna effekterna av temperaturförändringar i jord är rent fysikaliska och påvisbara.

En sekundär effekt av en temperaturändring i vattenmättad jord är att den odränerade skjuvhållfastheten förändras. Då effektivtrycket i jord minskar minskar också den odränerade skjuvhållfastheten liksom den ökar

vid ökande effektivtryck. Vid uppvärmning av finkornig jord sker således en temporär hållfasthetsminskning vars storlek inte enbart beror på temperaturändringen utan också på uppvärmningshastigheten och, liksom dess varaktighet, också på jordens permeabilitet och dräneringsvägarnas längd. Motsvarande hållfasthetsökning kan ehrållas vid avkylning.

Andra effekter av temperaturändringar uppstår också. Bland annat är jord inget elastiskt material varför repeterade minskningar och ökningar av effektivtrycket medför en successiv sammantryckning av kornskelettet oavsett temperatur. Stora volymökningar kan dessutom medföra rubbningar i kornskelettets struktur, vilket skulle medföra ytterligare deformationer vid förnyad effektivtrycksökning samt en sänkning av jordens så kallade "förkonsolideringstryck". Denna parameter används i vanliga geotekniska sammanhang för att beteckna den vertikalspänning för vilken jordens struktur bryts ned och stora deformationer uppstår. Sådana effekter kan antas bero på ett antal faktorer som jordens plasticitet (ökar normalt med ökande lerhalt och organiskt innehåll), kornskelettets rörelser (beror på temperaturändringens storlek och hastighet, jordens vattenhalt och permeabilitet samt dräneringsvägarnas längd) och rörelsernas art (en-, två- eller tredimensionella rörelser vilket i sin tur beror på jordens inspänningsförhållanden - randeffekter).

Utöver dessa effekter kan man spekulera i eventuella förändringar i lerans mikrostruktur och bindningskrafter mellan partiklar, inbördes och mellan partiklar, och mer eller mindre bundna vattenskikt närmast partikelytorna.

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 osannolikt att en sådan uttorkning sker i lera vid vattenmättnad ett antal meter under markytan. 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 sugs tillbaka.

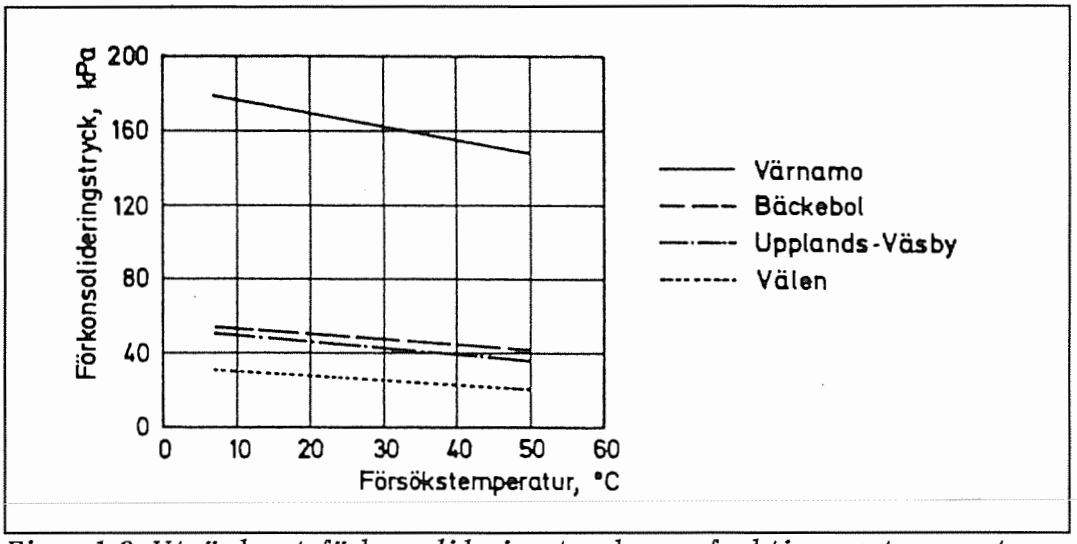
I ytan av ett markvärmelager i lera är emellertid situationen en annan. Om en förångning tillåts där kommer troligen en vattenhaltsminskning att uppträda i den övre delen av lagret. Om det inte finns något överskott på vatten att suga upp kommer en succesiv uttorkning att uppträda. Hur långt ner i lagret 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).

1.2.1 Utförda laboratorieförsök

I en licenciatavhandling, utförd vid Institutionen för geoteknik med grundläggning, CTH (Tidfors, 1987), diskuteras temperaturens påverkan på leras deformationsegenskaper. Tidfors genomförde ett stort antal ödometerförsök vid olika temperaturnivåer på leror från fyra olika lokaler.

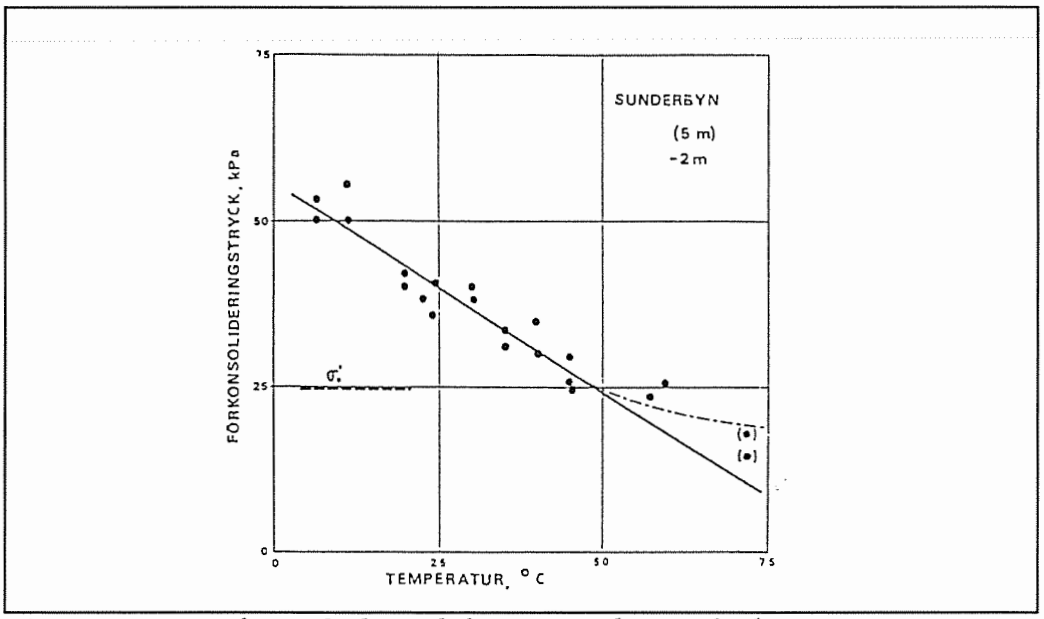
Ödometerförsök genomförs för att bestämma en leras förkonsoliderings-



Figur 1.2 Utvärderat förkonsolideringstryck som funktion av temperatur. Linjär regression har utnyttjats (Tidfors, 1987).

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. Överskrids 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 1.2. Liknande resultat har Eriksson (1984) kommit fram till vid CRS-försök på sulfidlera från Luleå, se figur 1.3. Dessa resultat diskuteras längre fram.



Figur 1.3 Utvärderat förkonsolideringstryck som funktion av temperatur (Eriksson, 1984).

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 sulfidleran är ca 1.2 %/°C.

Internationellt har också en rad undersökningar utförts. Resultaten från dessa är entydiga. En stor påverkan på leras geotekniska egenskaper har uppmätts i laboratorium.

Nämnas kan till exempel Campanella & Mitchell (1968) som utförde temperaturcyklingsförsök i en triaxialapparat på en vattenmättad illitisk lera. Försöken visade att en irreversibel volymsförändring kvarstod efter varje temperaturcykel. Liknande resultat erhöll också Demars & Charles (1982).

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

1.2.2 Uppföljningar av fullskaleprojekt

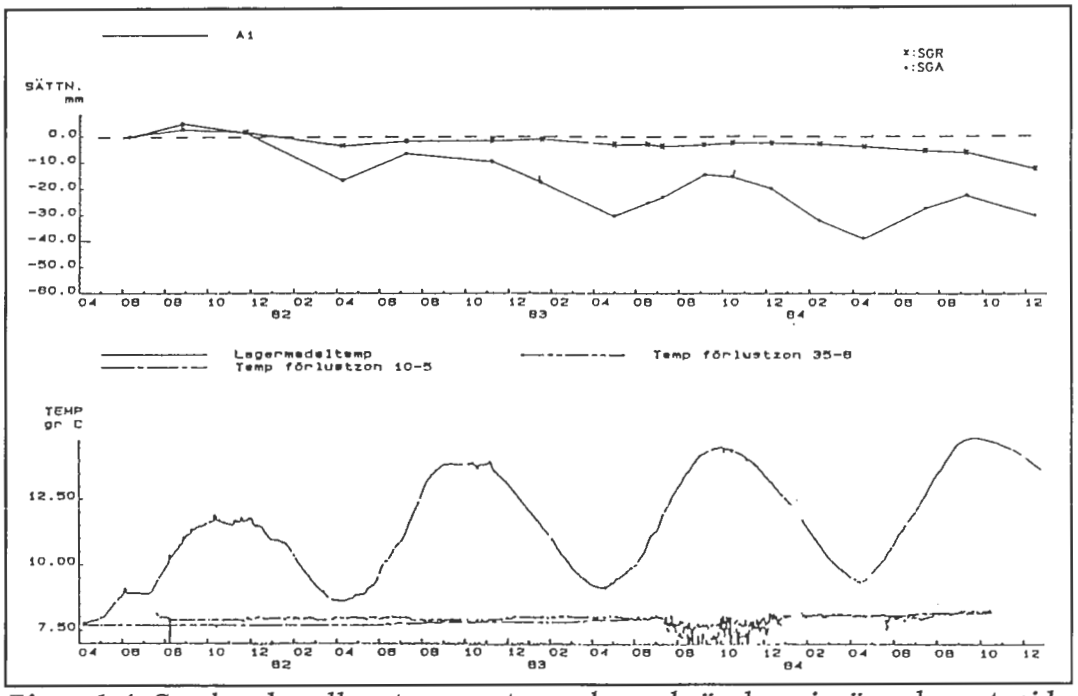
Lindälvskolan i Kungsbacka färdigställdes 1981. Skolan värmeförsörjs av lågtemperatursolfångare och 4 värmepumpar tillsammans med ett värmelager i lera. Lagret har en volym av ca 87000 m^3.

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 kolvborrning utförts vid 2 á 3 tillfällen. Laboratorieundersökning av ostörda prover har omfattat geoteknisk standardundersökning samt värmekonduktivitetsmätning. Mätningarna har utförts i lagret samt vid en referensyta.

Temperaturen i lagret har successivt ökats för att under 1984 variera mellan ca 9 och 15°C. Resultaten av temperatur- och markrörelsemätningarna framgår av figur 1.4. 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.

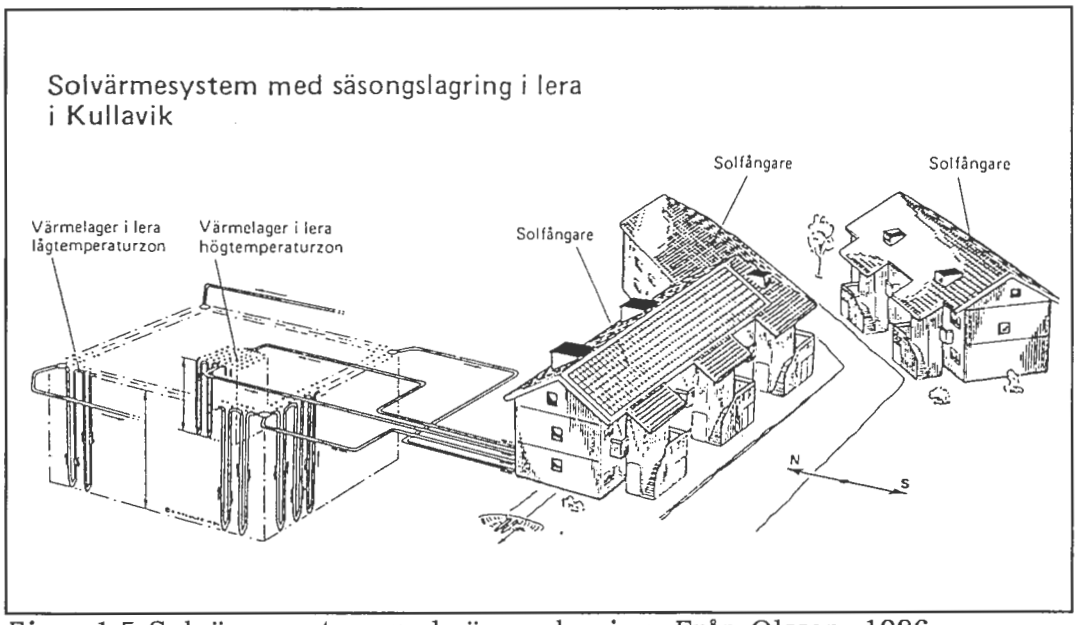
Den totala sättningen under perioden kan ha orsakats av en förändring av de geotekniska egenskaperna på grund av temperaturökning/cykling eller en pålastning. Under byggnadsskedet skedde en viss markplanering som medförde att området där lagret ligger uppfylldes något. Rhen har visat att denna uppfyllnad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

I **Kullavik**, väster om Kungsbacka, uppfördes 1982 ett bostadsområde som värmeförsörjs med en solvärmeanläggning i kombination med värmelager och värmepump, se figur 1.5. Värmelagret är förlagt i lera. Värmelagret består av en hög- och en lågtemperaturdel där den centralt placerade



Figur 1.4 Samband mellan temperatur och markrörelser i värmelagret vid Lindälvskolan, Kungsbacka (Rhen, 1988).

högtemperaturdelen är direktkopplad till värmesystemet medan värmepumpen tar värme från lågtemperaturdelen.



Figur 1.5 Solvärmesystem med säsongslagring. Från Olsson, 1986.

Temperaturen är maximalt 20 och 50 °C i låg- respektive högtemperaturdelen. Lagrets totalvolym är 8300 m^3 varav 200 m^3 i högtemperaturdelen. För att kunna dra nytta av den höga temperaturen nyttjas denna därför relativt snart efter det att den har blivit inlagrad.

Den geotekniska uppföljningen var koncentrerad till högtemperaturdelen och omfattade 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 högtemperaturzonen. 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.

I **Söderköping** försörjs en skola och sporthall med värme från en uteluftvärmepumpanläggning med säsongslagring i lera. Anläggningen färdigställdes 1987. Lagervolymen är 36000 m^3. Temperaturen i lagret varierar mellan ca 5 och 30 °C.

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 & Bergenståhl, 1989). Orsaken till denna sättning är ännu för tidig att yttra sig om men kan vara en förändring av de geotekniska egenskaperna i kombination med slanginstallationen och de goda dräneringsförhållanden som den siltiga leran medför.

För övriga värmelager i lera som har följts upp geotekniskt har inga markrörelser som kan härledas till temperaturhöjning eller temperaturcykling har kunnat märkas.

1.2.3 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.

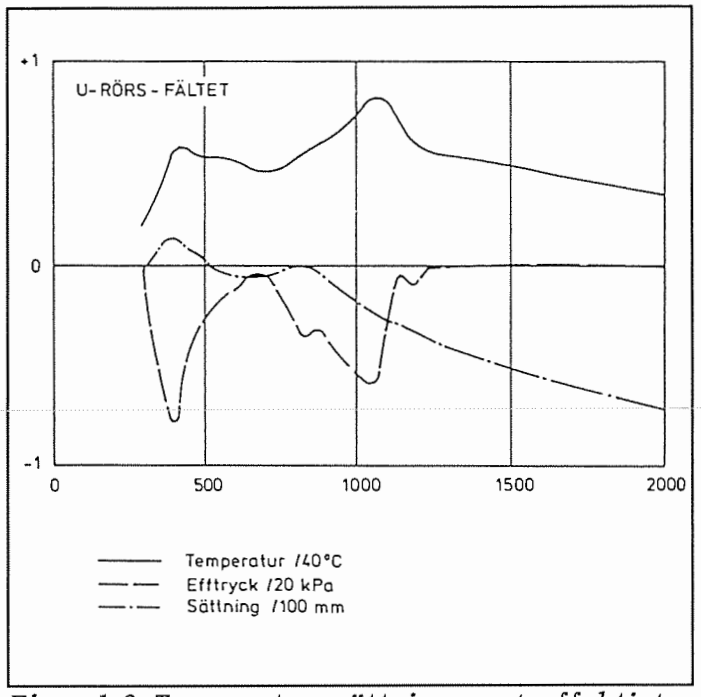
Området invallades på 1920-talet och fylldes upp med muddermassor. Jorden består av postglacial lera ner till 10 m djup. Denna underlagras av glacial lera med relativt stor mäktighet. Ett organiskt skikt på 2 meters djup utgör sannolikt resterna av den gamla älvbottnen. Leran i området är svagt överkonsoliderad 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 sättningsgivare. Dessutom finns en referensyta instrumenterad. Uppvärmningen skedde med en elektrisk panncentral på 30 kW.

De två lagren upptar en markyta om 14·14 m^2 vardera och lagerdjupet är 12 m, det vill säga en volym om drygt 2300 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. De portrycksprofiler som är placerade strax utanför 3"-lagret visar, som förväntat, på betydligt mindre variationer.



Figur 1.6 Temperatur, sättning samt effektivtryck som funktion av tid i U-rörsfältet (Adolfsson & Sällfors, 1987).

Vertikalrörelsen skiljer sig åt för de två testfälten. Mätningarna i U-rörsfältet visar en oscillerande nedåtgående tendens, se figur 1.6. 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 uppvärmningscykler uppgår till 45 mm.

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 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.

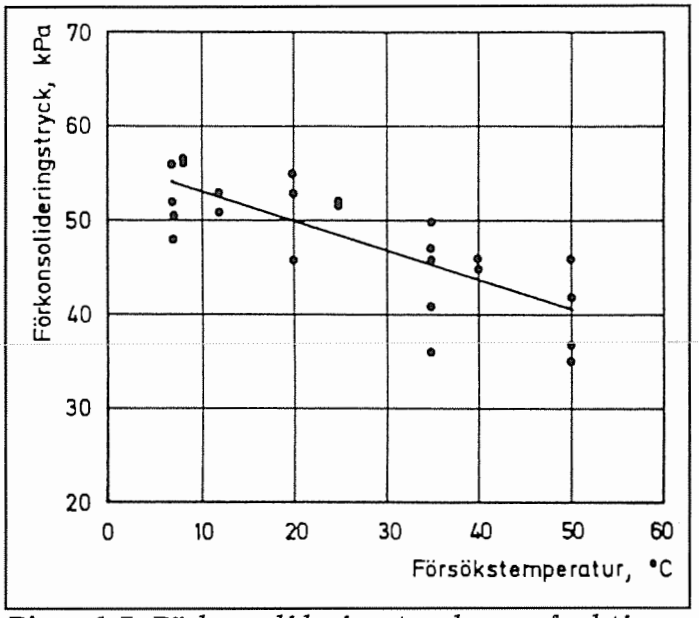
1.2.4 Värdering av utförda försök och uppföljningar

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 förkonsolideringstrycket vid höga temperaturer blir mycket låg.

Vid en granskning av samtliga temperatur-förkonsolideringstrycks-diagram 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 en kurvform antydas vilket skulle innebära att förändringen av förkonsolideringstrycket är liten vid låga, samt möjligen också vid höga temperaturer, se figur 1.7.



Figur 1.7 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 1.3) 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.

En viktig sak att hålla i minnet är att utvärderingen av ödometerförsök 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.

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 lerans 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. Några andra slutsatser om temperaturpåverkan på de

geotekniska egenskaperna för leran är emellertid svåra att dra ur denna högtemperaturtillämpning.

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

a) På grund av temperaturutvidgningen av porvattnet sker en portryckshöjning. Effektivtrycken minskar.

b) 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.

c) När portrycken succesivt utjämnas sker en konsolidering av leran under ökning av effektivspänningen. Krypdeformationer börjar utbildas när effektivspänningen överskrider ca 80 % av lerans förkonsolideringstryck.

2. 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. Vid en 3-dimensionell betraktelse bör sättningarna öka något. Denna sättning 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.

1.2.5 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 Conmult medan andra är beräknade manuellt. Conmult är ett datorprogram som beräknar tids-sättningsförloppet för en jordprofil.

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
   a) Manuell beräkning av temperaturinducerad portrycksökning. Beräkning av jordprofilens svällning.
   b) Beräkning av konsolideringsförlopp med Conmult. Vattenströmning och krypning beaktas under det att portrycksökningen simuleras med överlast och ökad överkonsolidering.
2. 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.

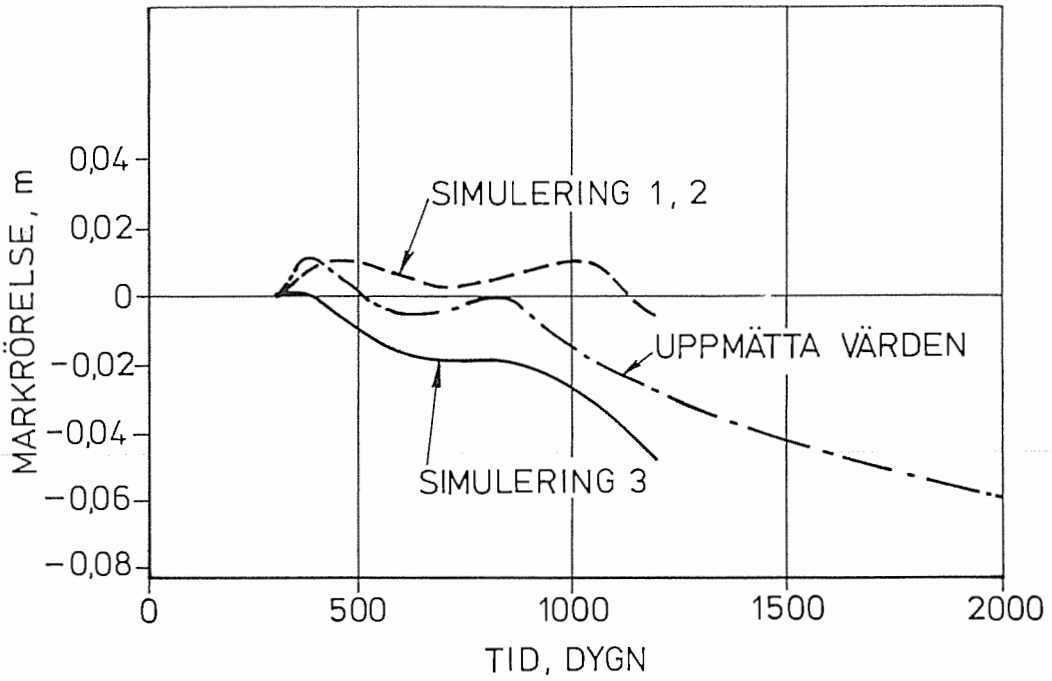
I försöksfältet i Kungälv kunde en portrycksminskning iaktagas utan koppling till en temperaturminskning. Orsaken till denna dränering kan vara att dräneringsvägar öppnats intill slangarna eller genom de observerade vertikala sprickplanen. En sådan vertikaldränering har i modellen simulerats med horisontella 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 30 och 60 °C

Resultat

Resultatet av simuleringarna framgår av figur 1.8. 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.



Figur 1.8 Uppmätta och simulerade sättningar vid försöksfältet i Kungälv.

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 erhölls sättningar som var ungefär 6 gånger större jämfört med figur 1.8.

1.2.6 Slutsatser

Följande slutsatser kan dras av de ovan referade undersökningarna:

- Vid en temperaturcykling av lera upp till ca 25-30 °C verkar vattnets volymsförändring 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.

1.3 FRYSNING AV LERA

Vid utnyttjande av mark som värmekälla till värmepump kan ett stort hinder vara de stora markytor som krävs för utvinning av erfoderlig värme. Ett sätt att minska dessa markytor, vid tillgång till stora jorddjup, är att i analogi med bergvärmebrunnar placera vertikala värmeväxlare i form av slangar i jorden. Detta har undersökts i BFR-rapporten R33:1989.

Resultaten visar att det är fullt möjligt att få en fullgod funktion på sådana jordvärmebrunnar om en viss återladdning av värme sker. Under vintern då värmebehov krävs tas värme från jorden runt jordvärmebrunnen i en sådan omfattning att jorden fryses i en cirkulär Zon runt brunnen. Sommartid förs överskottsvärme ned i marken och den frusna zonen tinas.

Ett problem i sammanhanget är emellertid att jorden i den frusna zonen runt en jordvärmebrunn tidigare är helt opåverkad av frysning varför lerans hållfasthet drastiskt minskar när den tinas. En separerimg av vatten och mineralpartiklar sker varefter en lera med högre densitet bildas i den undre delen runt röret och ny lera pressas in i den övre delen.

Detta kan innebära att oacceptabla sättningar och hållfasthetsminskningar uppkommer. Detta fenomen har i viss mån undersökts i samband med en oavsiktlig frysning av ett jordvärmelager i Utby i Göteborg (Modin & Rhen, 1983) men kompletterande insatser måste utföras.

Fenomenet med sättningar på grund av frysning kan också uppkomma i samband med bergvärmeanläggmimgar där berget överlagras av en lera. Stora sättningar har obseverats i vissa fall.

Det kan emellertid också visa sig att problemen är överkomliga. Anläggningens funktion är också värdefull att studera då de termiska egenskaperna i jorden runt slangen kommer att förändras.

2 MOTIV TILL FÖRSÖKSFÄLT

Som ovan redovisats från olika försök får man vissa förändringar i jordens egenskaper samt sättningar vid in- och utlagring av värme i framförallt lerjord. De fält- och fullskaleförsök som har slutförts är utförda vid relativt låga temperaturer, upp till 20-30 °C. Det är av stor betydelse att denna påverkan också kan bestämmas för högtemperaturlager, dels för att man skall kunna klarlägga placeringen i byggd miljö dels för att man skall kunna göra en riktig konstruktion av lagret med hänsyn till de geotekniska förändringarna i lagret. Ett viktigt kriterium, som bör klarläggas, är det avstånd på vilket ett värmelager kan placeras från bebyggelse utan att påverka dess grundläggning.

Undersökning av temperaturpåverkan på lera kan delvis utföras på laboratorium. Detta har utförts i viss omfattning som redovisats ovan. Det erfordras dock att man kan efterlikna de belastningssituationer som uppstår i ett värmelager eftersom dessa skiljer sig från den normala geotekniska tillämpningen där man ofta studerar spänningsförändringar vid konstanta temperaturer. Belastningssituationen i ett värmelager är mycket komplicerad varför en undersökning i laboratorium i dagsläget kräver verifiering från försöksfält eller experimentbyggnadsprojekt. Det är mycket svårt att i laboratorium efterlikna de randvillkor i ett värmelager som blir avgörande för de olika belastningsfallen. Någon uppföljning av värmelager vid hög temperatur har ej utförts vare sig i Sverige eller utomlands.

Att genomföra en verifiering i ett speciellt försöksfält har många fördelar framför en uppföljning av ett experimentbyggnadsprojekt och kan sammanfattas i följande punkter:

- Projektet kan genomföras i mindre skala.
- Uppföljningen kan genomföras oberoende av det värmesystem som försörjs av lagret.
- Försöksproceduren styrs inte av brukarens krav på utnyttjande av lagret.
- Fler temperaturcykler per år kan genomföras vilket och därigenom kan resultat beträffande lagrets funktion erhållas snabbare.
- Resultat från projektet kan erhållas tidigare genom att igångsättningstidpunkten ej styrs av byggnationen i övrigt.
- Det är lättare att kontrollera effekterna av olika åtgärder, t ex slanginstallation, uppfyllning, dränering etc.
- Vid lokaliseringen av ett försöksfält kan platsvalet i hög grad styras efter lämpliga geotekniska förhållanden.
- Instrumentering och provtagning i jorden kan göras mer omfattande, enkel och noggrann eftersom hänsyn ej behöver tas till övriga intressenter. Härigenom får jämförelsen mot laboratorieförsök och modellsimuleringar en högre kvalité.

3 ALTERNATIVA LOKALISERINGAR AV FÖRSÖKSFÄLT

Vid val av plats för detta experimentfält för högtemperaturlager i lera bör följande saker beaktas:

- Leran ska i möjlig mån vara homogen ner till minst 12 m djup.
- Inga genomgående dränerande skikt skall förekomma i lagerdelen.
- Leran bör ej vara alltför överkonsoliderad.
- Ansvarig personal skall finnas tillgänglig i närheten av platsen för kontinuerlig tillsyn.

Dessa önskemål har gett två olika alternativ, småbåtshamnen i Linköping samt Chalmers försöksfält i Kungälv.

3.1 KUNGÄLV

Chalmers försöksfält i Kungälv har tidigare använts av institutionen för geoteknik vid Chalmers Tekniska Högskola då de genomförde BFR-projektet "Värmelagring i lera. Geoteknisk påverkan och värmeväxling". Det finns nu möjlighet att utvidga området något så att ett tilltänkt experimentfält för högtemperaturlager skulle kunna placeras där.

Platsen ligger på västra stranden av Göta älv och marken ägs av Kungälvs kommun. Området lutar svagt mot Göta älv och består av ängsmark. Enligt rapporten "Energilagring i lera" (Adolfsson och Sällfors, 1987) invallades det aktuella området på 1920-talet med en träspont och fylldes upp med muddermassor från älven.

Jorden består överst av 3-4 m fyllnadsmassor av i huvudsak lera därefter är den postglaciala leran tämligen homogen ner till 10-11 m djup sånär som några inslag av tunna siltskikt. Den postglaciala leran underlagras av en glacial lera ner till ca 30 m djup under markytan.

Vattenkvoten i den postglaciala leran är 105% vid 3 m och sjunker därefter ner till ca 80% vid 10 m djup. Detta innebär att lerans värmekapacitet är relativt hög. Skjuvhållfastheten är ca 12 kPa i markytan och ökar därefter mot djupet, vid 19 m djup är den ca 21 kPa. Leran i området är något överkonsoliderad på 3 m ca 19 kPa men avtar med djupet och är ca 8 kPa på 12 m djup (Bilaga 1). Mot djupet uppträder ett visst porövertryck vilket verifieras av den artesiska brunn som Chalmers har monterat i området.

SGI har utfört två stycken kombinerade spets- och portryckssonderingar (CPTU) i området vilka visar att leran från ca 3 m är homogen, dvs innehåller inga synliga dränerande skikt. Resultaten från CPTU-sonderingen finns redovisade i Bilaga 1.

Eftersom Chalmers försöksfält tidigare utnyttjats finns redan en elansluten mätbod tillgänglig. För det aktuella projektet måste emellertid elanslutningen kompletteras för att klara det stora effektbehovet. Vid förfrågan hos elverket har detta ej ansetts vara något problem.

3.2 LINKÖPING

Längs Stångån i närheten av sjön Roxen ligger småbåtshamnen och strax intill det område som undersökts för ett framtida experimentfält för högtemperaturlager. Området är gräsbevuxet och används i ena kanten för båtupplag, marken ägs av fastighetskontoret i Linköpings kommun. Vid eventuellt utnyttjande av marken skall Linköpings Segelsällskap kontaktas så att konflikt ej uppstår beträffande deras utrymme för båtupplag.

De undersökningar som utförts i området består av 3 st CPTU-sonderingar, 1 st kolvprovtagning samt 1 st vingsondering. Sonderingarna har utförts av SGI, och proverna har därefter analyserats i laboratoriet. CRS-undersökningar har gjorts på 6 st nivåer.

Marken består överst av ca 2 m torrskorpelera, därefter kommer lera med växtlighet vilken senare övergår till en ren lera ner till ca 8 m djup. Sedan uppträder sulfidfläckar i leran ner till ca 11-12 m djup och därefter kommer siltinslag in i leran ner mot djupet.

Vattenkvoten nedanför torrskorpan varierar i stort sett mellan 70-85 %. Skjuvhållfastheten är 17 kPa vid 4 m djup och ökar därefter något till 20 kPa vid 11 m djup. Leran i området är överkonsoliderad för ca 30 kPa vid 3m djup vilket sedan sjunker till 15 kPa vid 5m djup (Bilaga 2). CPTU-sonderingarna visar att leran är homogen och att inga dränerande skikt finns i de översta 18 metrarna. Resultaten från laboratorieundersökningar och sonderingar redovisas i Bilaga 2.

3.3 VÄRDERING AV GEOTEKNISKA UNDERSÖKNINGAR

Vid jämförelse av de två alternativa platserna kan man konstatera att lerprofilen i Kungälv är något mer homogen än i Linköping. I båda fallen återfinns dock fyllningsmassor i de översta metrarna. Leran är mer överkonsoliderad i Linköping och sättningarna förväntas därför att bli större i Kungälv. Ur geoteknisk synpunkt talar detta för lokalisering i Kungälv men skillnaderna bedöms dock som små.

4 UNDERSÖKNINGS- OCH UTVÄRDERINGSPROGRAM

Verksamheten vid försöksfältet skall i första hand omfatta följande moment:

- Undersökning av förändring av leras geotekniska egenskaper, främst hållfasthet och sättningsbenägenhet vid temperaturcykling inom intervallet 40-80 °C. Undersökningen kompletteras med laboratorieförsök på andra lertyper så att referensmetoder för laboratorieförsök kan erhållas.

- Undersökning av temperaturgradienter, portryck och sättningsförhållanden utanför lagret.

- Undersökning av effekterna av frysning av klimatopåverkad lera.

- Undersökning av olika isolermaterials funktion i fuktig miljö, vid hög temperatur och fuktdiffusion.

- Undersökning av fuktrörelser och markens termiska egenskaper vid hög temperatur.

- Undersökning av den använda värmeväxlartypens effektkapacitet.

4.1 TEMPERATURPÅVERKAN PÅ LERAS GEOTEKNISKA EGENSKAPER

Inledning

De traditionella undersökningsmetoderna i fält som används idag för att få fram en jords geotekniska egenskaper är väl beprövade och verksamma i de flesta typer av jordar. Utvärderingsmetoderna är oftast empiriska vilket gör att det kan vara svårt att hantera resultaten från en fältundersökning i högtempererad lera. För att få erfarenhet och därmed kunskap om vad som händer med de geotekniska parametrarna i jorden under och efter uppvärmning samt frysning krävs en omfattande undersökningsinsats i fält som därefter skall relateras till laboratorieundersökningar.

Syfte

Projektet syftar i första hand till att undersöka sättningarnas storlek, tidsförlopp och betydelse vid höga temperaturer i lera. För att kunna överföra resultaten till andra tilltänkta platser för högtemperaturlager krävs även en förståelse av hur sättningarna uppkommer. Dessutom skall även skjuvhållfasthetens förändring med temperaturen undersökas.

Genomförande

Sättningarnas storlek och tidsförlopp skall mätas noggrant dels med bälgslang, dels med peglar. Bälgslangarna skall framför allt visa hur sättningarna förändras i djupled men placeringen skall utföras så att man även ser vad som händer i kanterna samt utanför lagret. Peglar skall

installeras på de nivåer där det är extra viktigt att man inte tappar information.

Att veta hur portrycken förändras vid uppvärmning samt nerkylning är av stor vikt för att sedan kunna förstå sättningarnas utveckling. Portrycksmätarna skall placeras så att man kan följa om dräneringsvägarna är vertikala eller horisontella, de skall därför installeras på olika nivåer, i kanten och strax utanför lagret. I varje punkt där portrycksmätare är installerad skall även en temperaturgivare installeras så att man lätt kan få en uppfattning om eventuell portrycksökning är direkt proportionell mot temperaturökningen eller om vattnet har haft en möjlighet att dränera bort någonstans. Dessutom skall portrycksmätare och temperaturmätare installeras strax intill en slang samt mittemellan en skänkel för att om möjligt utröna om det uppstår en slags dräneringseffekt intill slangen vilket tidigare sättningsmätningar i värmelager indikerat.

Kolvprover skall tas upp på nivåerna 3, 6, 9 och 12 m, där temperaturgivare och portrycksmätare är installerade, två gånger per år i det cyklade respektive konstant tempererade fältet. Sedan ska i första hand vattenkvot noggrannt bestämmas för att se eventuella uttorkningseffekter. Dessutom ska en noggrann okulär besiktning göras av proverna för att se om vatten frigjorts efter uppvärmningen.

Den bästa metoden idag för att mäta skjuvhållfastheten i fält är vingborrsondering. Man bör troligtvis utföra sonderingen med större hastighet för att få ett odränerat brott i uppvärmd lera jämfört med normaltempererad lera. Eftersom denna undersökningsmetod blir något osäker vid hög temperatur skall även en kompletterande undersökning göras med dilatometer och kombinerad spets- och portrycksondering. Man får då även en del övrig information utöver en uppskattning av den odränerade skjuvhållfastheten såsom jordartsklassificering, jordlagerföljd samt en uppskattning av överkonsolideringsgraden. Mätningarna skall utföras vid olika temperaturer förslagsvis naturlig marktemperatur, 25 °C, 50 °C och 70 °C. Mätningarna utförs ner till 15 meters djup och upprepas varje år för att undersöka påverkan under en längre tid.

De resurser som behövs för att genomföra undersökningsprogrammet finns redovisade i kapitel 5.3.

4.2 MARKVÄRMEVÄXLARENS EFFEKTKAPACITET

Inledning

I ett marklager är antalet markvärmeväxlare proportionellt till önskad effektkapacitet. För att hålla nere totalkostnaden är det av intresse att så exakt som möjligt kunna uppskatta markvärmeväxlarens kapacitet. Idag sker projektering med teoretiska beräkningsprogram. Utifrån termiska och geometriska egenskaper hos material (lagringsmedium, slangmaterial) respektive lager-markvärmeväxlare (lagerkonfiguration, typ av värmeväxlare) beräknas antalet markvärmeväxlare fram. Antalet markvärmeväxlare baseras på en jämn medeleffekt över en längre tidsperiod. I verkligheten levereras ofta energin momentant i effektpulser varför antalet markvärmeväxlare, baserat på medeleffekt, inte alltid är tillräckligt. För att få uppföljning till verkligheten är det av vikt att utvärdera den praktiska effektkapaciteten hos markvärmeväxlare i fält.

Tidigare arbeten inom arbetsområdet har med få undantag utförts vid

något över naturlig marktemperatur. I det aktuella fallet, med marklagertemperatur upp mot 70 °C, är funktionen hos markvärmeväxlare mindre känd. Förångning av vatten från lagret kan till exempel innebära att mekanismerna för värmeövergång mellan markvärmeväxlare och lagermedium förändras.

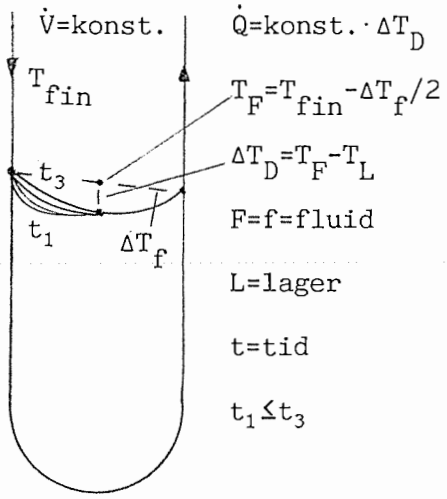
Syfte

Projektet syftar till att i fält och vid hög marklagertemperatur undersöka markvärmeväxlarnas effektkapacitet.

Genomförande

Arbetet är tänkt att genomföras i anslutning till SGI:s försöksfält för högtemperaturlagring. Det planerade försöksfältet är förutom en marginell tillskottinvestering (se följande text) anpassat för att kunna genomföra en undersökning av markvärmeväxlarnas effektkapacitet vid en hög temperaturnivå. Till lagret finns ingen beroende avnämare ansluten vilket garanterar en utvärdering av markvärmeväxlarna utan kompromisser.

För en markvärmeväxlare är den drivande temperaturen ΔT_D proportionell mot effekttillförseln per volymsenhet lager. Genom att hålla ΔT_D och V konstant (det vill säga $\dot{Q}$) samtidigt som tiden mäts för att höja lagertemperaturen kan man erhålla markvärmeväxlarens effektkapacitet.



Mätningarna uppdelas i tre moment och kan utföras i testyta 1 och 2.

- För att utjämna temperaturskillnader i lagret pumpas värmeöverförande fluiden runt i slangarna under en vecka.

- Konstant effekt, motsvarande delta-T_D=10 °C, tillförs lagret under minst en vecka. Mätomgången genomförs under första driftsåret då lagertemperaturen överstiger 50 °C. Den beskrivna metoden förutsätter att en kontinuerlig värmekälla med jämn effektkapacitet är tillgänglig.

- Vid solvärmetillämpning pulserar tillgänglig värmeeffekt över dygnet

varför någon form av dygnsbuffert i praktiken kan bli nödvändig. För att undersöka markvärmeväxlarens momentana effektkapacitet tillförs lagret konstant effekt, motsvarande delta-T_D=50 °, under 12 timmar varefter lagret får vila med avstängd cirkulation under 12 timmar för att återigen laddas under ett halvt dygn och så vidare. Dessa cykler upprepas under minst en vecka. Eftersom fluidtemperaturen inte bör överstiga 80 °C erhålls konstant effekt enbart tills lagertemperaturen uppnått 30 °C. Därefter avtar effekten med minskande delta-T_D. Mätningarna genomförs under det andra driftsåret.

För att genomföra utvärderingen av markvärmeväxlarnas effektkapacitet måste dels flödet av värmeöverförande fluiden mätas i det aktuella lagret, dels följande temperaturer: t_{fin}=ingående fluidtemperatur, t_{fut}= utgående fluidtemperatur samt en lagertemperatur i relation till lagrets medeltemperatur. Utöver den normala instumenteringen i högtemperaturlagret belastar undersökningsprogrammet projektet med kostnader för inköp och montering av tre temperaturgivare och två pulsgivare för registrering av flödesmängder. Dessutom tillkommer driftkostnader. I Bilaga 5.5 redovisas merkostnaden för att utvärdera markvärmeväxlarnas effektkapacitet. Registrering av parametrar kommer att automatiseras med mätinsamlingsutrustning inköpt för andra ändamål i projektet.

Mätningarna kommer att genomföras under det första och andra driftsåret. Ändras förutsättningarna för markvärmeväxlarnas funktion på grund av till exempel avdunstning kommer jämförande mätningar att genomföras vid begäran under slutet av projektet. Dessa aktiviteter tilläggsfinansieras i sådana fall.

4.3 ISOLERINGSMATERIALS TERMISKA FUNKTION I MARK VID HÖG TEMPERATUR

Inledning

Isoleringen av ett marklager för hög temperatur i lera eller berg svarar för ca 40-45% av totalkostnaden (exkl dygnsackumulator) för lagret vid en solvärmetillämpning. Den teoretiska värmeledningsförmågan för många isoleringsmaterial är ca 0.025-0.035 W/m°C. Ofta ansätts värmeledningsförmågan 0.05 W/m°C på isoleringen som ett värde som skall motsvara fältmässiga fuktiga förhållanden vid hög temperatur. Om detta är ett relevant värde är ej undersökt. Den verkliga värmeledningsförmågan i isoleringsmaterialet spelar därför en viktig roll. Om värmeledningsförmågan 0.03 kan antas istället för 0.05 W/m°C kan isoleringstjockleken, och därmed kostnaden, minskas med 40%.

Ett omfattande arbete är utfört beträffande olika isoleringstypers funktion vid fältmässiga förhållanden inom vägbyggnadssidan. Dessa försök är dock utförda vid naturlig marktemperatur och med en temperaturgradient som skiftar riktning under året. Några långtgående slutsatser kan därför inte dras av det arbetet för en högtemperaturtillämpning. De grunderfarenheter som erhållits beträffande olika materialtypers förmåga att bibehålla isolerförmågan kan dock användas i projektet.

Syfte

Projektet syftar till att undersöka isoleringsmaterials förmåga att bibehålla låg värmeledningsförmåga vid hög temperatur och fuktiga förhållanden.

Genomförande

Arbetet är tänkt att genomföras i anslutning till SGI:s försöksfält för högtemperaturlagring. Några principiellt olika fall skall studeras:

- Isolering av lagrets överyta med och utan diffusionsspärr i form av folie. Ensidig temperaturgradient.

- Isolering som utsätts för konstant ensidigt hög temperatur och isolering som utsätts för varierande temperatur. Temperaturgradienten är även i detta fall i huvudsak ensidig.

Ovanstående förhållanden är möjliga att erhålla i de testytor som planeras. Dels en yta med hög konstant temperatur och dels en yta med cykliskt varierande temperatur.

För att utvärdera isoleringens funktion mäts temperaturgradienten över hela isoleringens tjocklek och över olika delskikt för de olika principiella fallen. Som värmeflödesmätare används förslagsvis expanderad cellplast av god kvalitet (t ex Markisol 50) inklädd i dubbla lager av metallfolie. Det är viktigt att skivan hålls absolut torr. Skivan bör vara 40 mm tjock och hålla måtten $1.0 \cdot 1.0$ m^2.

Temperaturfallet över skivan sker förslagsvis med seriekopplade termoelement, så kallade termoelementkedjor (t ex 10 st seriekopplade). Mätning av absoluttemperaturen skall också göras. Termoelementen skall placeras inom den centrala ytan av skivan (ca $0.1 \cdot 0.1$ m^2) och innanför folien. Termoelementen skall skyddas mot korrosion e dyl. En skiva appliceras inom varje delyta, dvs 4 stycken. Termoelementkedjor är även lämpliga att använda vid mätning av temperaturfallet över isoleringen.

Vattenmättnadsgraden i marken under och ovanför isoleringen undersöks. Vissa isolerskivor grävs upp och vattenhalten undersöks i olika skikt av isoleringen. Som komplement kan vissa skivor grävas upp och skickas till Statens provningsanstalt för bestämning av värmeledningsförmågan med plattapparat. Vid ett sådant förfarande slås skivorna in i plast och fryses ev ner efter upptagandet för att förhindra att vattnet avgår/omfördelas. Märkning sker av varm respektive kall sida.

Mätningar utförs tre gånger per år för ytan med hög temperatur. För ytan med varierad temperatur anpassas mätningarna till temperaturcyklingen så att mätningar utförs under olika förhållanden. Eventuellt ansluts givarna till ett mätdatainsamlingssystem.

4.4 TERMISKA EGENSKAPER I MARK VID HÖG TEMPERATUR

Inledning

Jord och bergs termiska egenskaper är relativt väl kända vid naturlig marktemperatur. Vid låga temperaturer dominerar ren värmeledning av de värmetransporterande mekanismerna. Vid hög temperatur kommer emellertid bl.a. ångdiffusionen att få ett betydande inflytande på värmetransporten vid vattenomättade förhållanden i jord.

Den höga temperaturen kan leda till att andra mekanismer än ren värme-

ledning får ett sådant stort inflytande att värmeförlusterna blir större än de projekterade vilket kan få allvarliga driftkostnadsökningar. En förångning av vatten från markytan är också tänkbar och kan på sikt leda till att ackumulatorns funktion nedsätts.

Syfte

Projektet syftar till att undersöka de termiska egenskaperna vid hög temperatur och utreda om en ångdiffusion kan leda till en uttorkning av markackumulatorn.

Genomförande

Arbetet är tänkt att utföras i anslutning till SGI:s försöksfält för högtemperaturlagring. Undersökningar görs i första hand i lagret med hög konstant temperatur men kan kompletteras med mätningar i lagret med cykliskt temperaturförlopp.

Vattenhaltsmätare i form av t.ex. tensiometrar installeras på olika nivåer i skilda sektioner i lagret. Med hjälp av dessa kan vattenhaltsförändringar uppmätas i den omättade zonen. Dessa jämförs med teoretiskt beräknade värden. Mätningarna utförs med ett intervall av en månad.

För att undersöka om några förändringar i värmekonduktiviteten i lagret sker mäts temperaturen i några sektioner med noggrant fixerat avstånd mellan temperaturgivarna. Mätning av värmeflödet görs med särskild anordning. Mätningarna utförs inledningsvis tre gånger per år.

Värmeledningsförmågan mäts i jorden vid varierande temperatur, förslagsvis naturlig marktemperatur, 25 °C, 50 °C och 70 °C. Mätningarna utförs på varierande djup under markytan, 1, 2 och 5 m under markytan. Mätningarna upprepas också en gång per år för att undersöka långtidsaspekten. Uppmätt värmeledningsförmåga utvärderas mot teoretiskt beräknade värden.

Utrustning för mätning av värmeledningsförmåga kan ev lånas från CTH. Mätsonder får dock inköpas. Ett visst arbete för att sätta utrustningen i användbart skick är nödvändigt.

Som komplement till dessa mätningar tas 1 gång per halvår prover för bestämning av vattenhalt och densitet.

5 UTFORMNING OCH INSTRUMENTERING AV FÖRSÖKSANLÄGGNING

5.1 VÄRMETEKNISK PROJEKTERING

För att dimensionera markvärmeväxlarna utgår man från det uppskattade energilagringsbehovet samt hur snabbt lagret kommer att omsättas. De erhållna effekterna matas sedan in i ett beräkningsprogram som resulterar i det antal markvärmeväxlare som behövs för att teoretiskt täcka energi- och effektbehoven.

Följande indata och beteckningar används vid beräkningar:

Testyta 1: V=1000 m^3, h=10 m, cykling 30-70 °C i lagertemperatur
Testyta 2: V=1000 m^3, h=10 m, konstant 70 °C i lagertemperatur
Testyta 3: V=1000 m^3, h=10 m, endast slanginstallation
Testyta 4: V=1000 m^3, h=10 m, cyklisk frysning/tining
Testyta 5: A=100 m^2, referensyta

Antal cykler per år: två, vilket ger t=2000 timmar

Projekteringen enligt Bilaga 3 har givit följande resultat:

Testyta 1

Brutto effektbehov: $\dot{Q}_B$=29 kW

Kyleffektbehov: $\dot{Q}_{kyl}$=20 kW

Testyta 2

Brutto effektbehov: $\dot{Q}_B$=32 kW

Testyta 1 och 2

Testyta 1 och 2 kommer att samköras. Den dimensionerande effekten $\dot{Q}_D$ hos pannan blir

$\dot{Q}_D$=29+32-20=41 kW

Testyta 4

Brutto kyleffekt: $\dot{Q}_B$=3,75 kW

Med en värmefaktor på 3 erhålls avgiven bruttoeffekt

Avgiven kyleffekt: $\dot{W}_B$=5,5 kW

Datorstödd beräkning av antalet markvärmeväxlare per testfält.

Testyta 1

Max effektbehov: $\dot{Q}_B$=29 kW

Slangmaterial: Välj ett värmetåligt slangfabrikat, till exempel PEX

av tryckklass 0,6 MPa (vid 90 °C vattentemperatur).

Antag Ytterdiameter D_y=25,0 mm D_i=20,4 mm

Detta motsvarar 91 styck markvärmeväxlare.

Antag Ytterdiameter D_y=32,0 mm D_i=26,0 mm

Detta motsvarar 83 styck markvärmeväxlare.

Testyta 2

Max effektbehov: $\dot{Q}_B$=32 kW

Analogt följer:

Antag Ytterdiameter D_y=25,0 mm D_i=20,4 mm

Detta motsvarar 100 styck markvärmeväxlare.

Antag Ytterdiameter D_y=32,0 mm D_i=26,0 mm

Detta motsvarar 91 styck markvärmeväxlare.

Testyta 4

Max effektbehov: $\dot{Q}_B$=3,75 kW

Slangmaterial: Klenare slangdimensioner av PEX saluförs enbart i tryckklass 1,0 MPa vid (90 °C vattentemperatur).

Antag Ytterdiameter D_y=12,0 mm D_i=8,0 mm

Detta motsvarar 21 styck markvärmeväxlare.

Antag Ytterdiameter D_y=15,0 mm D_i=10,0 mm

Detta motsvarar 21 styck markvärmeväxlare.

Testyta 1, 2 och 4

Effektbehovet i testyta 2 är störst (32 kW) och blir därför dimensionerande. Av samordningsskäl monteras även fält 1 med samma slangdimension som fält 2. För fält 4 rekommenderas en klenare slangdimension för att lättare erhålla turbulent strömning. Tryckfallsberäkningar vid senare VVS-beräkningar avgör exakt val av slangdimension.

5.2 VVS-TEKNISK PROJEKTERING

Utifrån effektbehoven i föregående kapitel 5.1 dimensioneras slangar och rör med hjälp av tryckfallsnomogram. Prisfrågan och god värmeöverförande egenskaper talar för klenare dimensioner. Tryckfallet får emellertid inte bli för högt eftersom detta ökar driftskostnaderna.

Projekteringen enligt Bilaga 4 har givit följande resultat:

Testyta 1

Med stöd av resultat från kapitel 5.1 antas (10·10) markvärmeväxlare. Varje slangslinga motsvarar en längd av 10·20+10+30 (anslutningsslang) =240 m (0,14 dm^3/s).

Tryckfallsnomogram (70 °C) ger tryckförlust för

D_i=20,4 mm 0,12 kPa/m 29 kPa/slinga

D_i=26,0 mm 0,04 kPa/m 10 kPa/slinga

Den klenare dimensionen accepteras både med avseende på tryckfall och den höga temperaturen.

Testyta 2

Med stöd av resultat från kapitel 5.1 väljes (10·10) markvärmeväxlare. Varje slangslinga motsvarar en längd av 10·20+10+30 (anslutningsslang) =240 m (0,16 dm^3/s).

Tryckfallsnomogram (70 °C) ger tryckförlust för

D_i=20,4 mm 0,15 kPa/m 36 kPa/slinga

D_i=26,0 mm 0,05 kPa/m 12 kPa/slinga

Den klenare dimensionen accepteras både med avseende på tryckfall och den höga temperaturen.

Testyta 1 och 2

Till testfält 1 och 2 väljs PEX-slangar med dimension 25,0/20,4 i tryckklass 0,6 MPa (vid 90 °C vattentemperatur). Både fält 1 och 2 monteras med 100 markvärmeväxlare fördelade på tio slingor. Testyta 1 blir något överdimensionerad.

Testyta 4

Drift av testyta 4 förutsätter glykolinblandning (propylen) för att förhindra frysning av köldbärarvätskan.

Med stöd av resultat från kapitel 5.1 antas (2·12) markvärmeväxlare. Varje slangslinga motsvarar en längd av 12·20+25+30 (anslutningsslang) =295 m (0,10 dm^3/s).

Med detta lilla flöde och en slandimension enligt föregående testytor fås ej önskvärd laminär strömning. Välj därför en klenare dimension.

Tryckfallsnomogram (70 °C) ger tryckförlust för

D_i=8,0 mm 0,18 kPa/m 53 kPa/slinga

D_i=10,0 mm 0,1 kPa/m 30 kPa/slinga

Tryckfallen gäller för vatten. För glykol (35 vikts-%, fryspunkt -20 °C) skall tryckfallet multipliceras med en faktor 1,6 enligt VVS-handböcker.

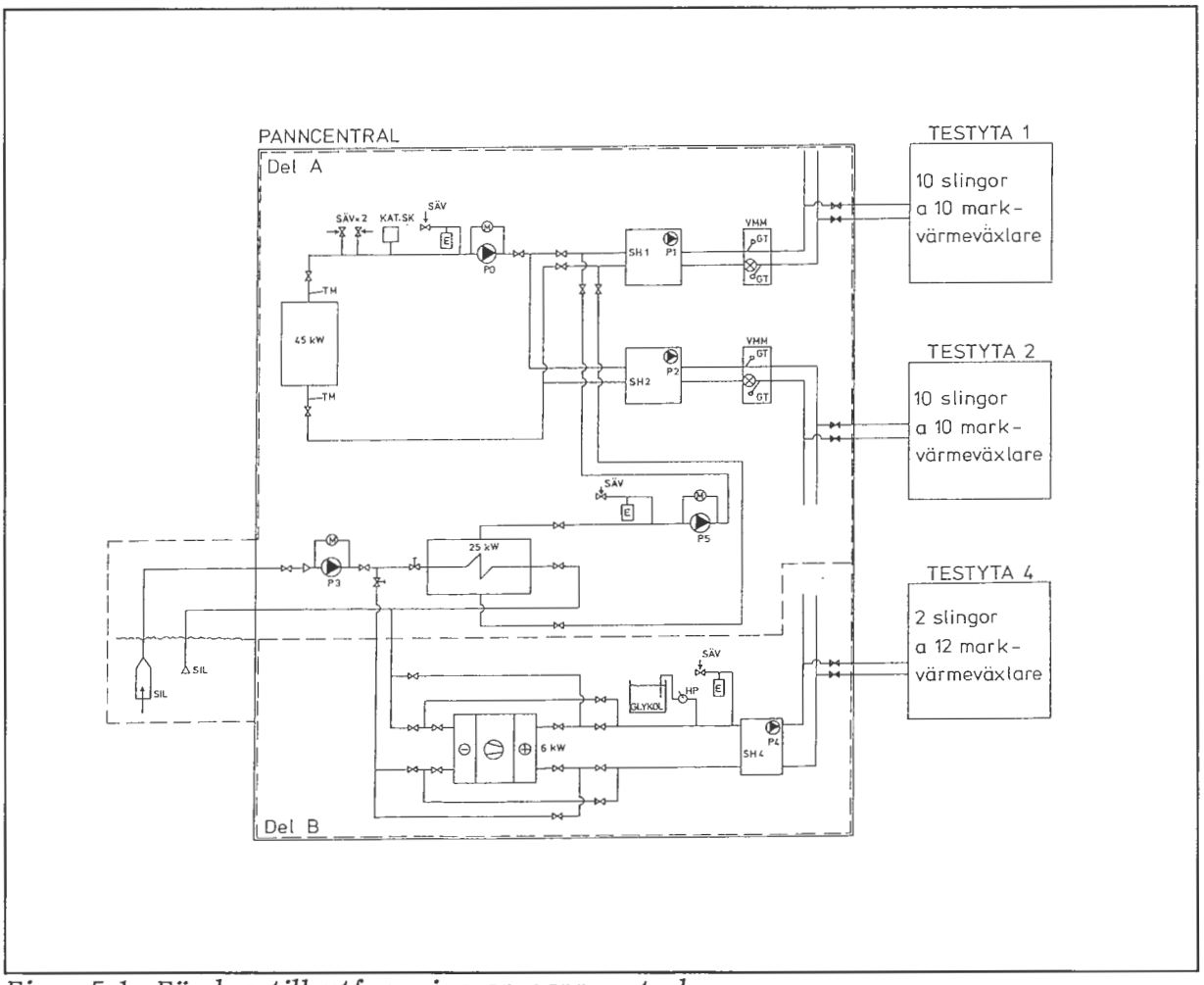
1,6·53 85 kPa/slinga

1,6·30 48 kPa/slinga

Den klenare dimensionen accepteras både med avseende på tryckfall och glykolinblandning.

Glykolmängd: Glykolmängd=10 dm^3

Förslag till utformning av panncentral för drift av försöksfält i lera.



Figur 5.1 Förslag till utformning av panncentral.

Enligt förslaget byggs energicentralen i en transportabel container.

För att försörja testyta 1 och 2 krävs följande huvudkomponenter: Värmepanna, säkerhetsutrustning, utrustning för effektstyrning och

värmemängdsmätning, kylkrets med värmeväxlare och cirkulationspumpar.

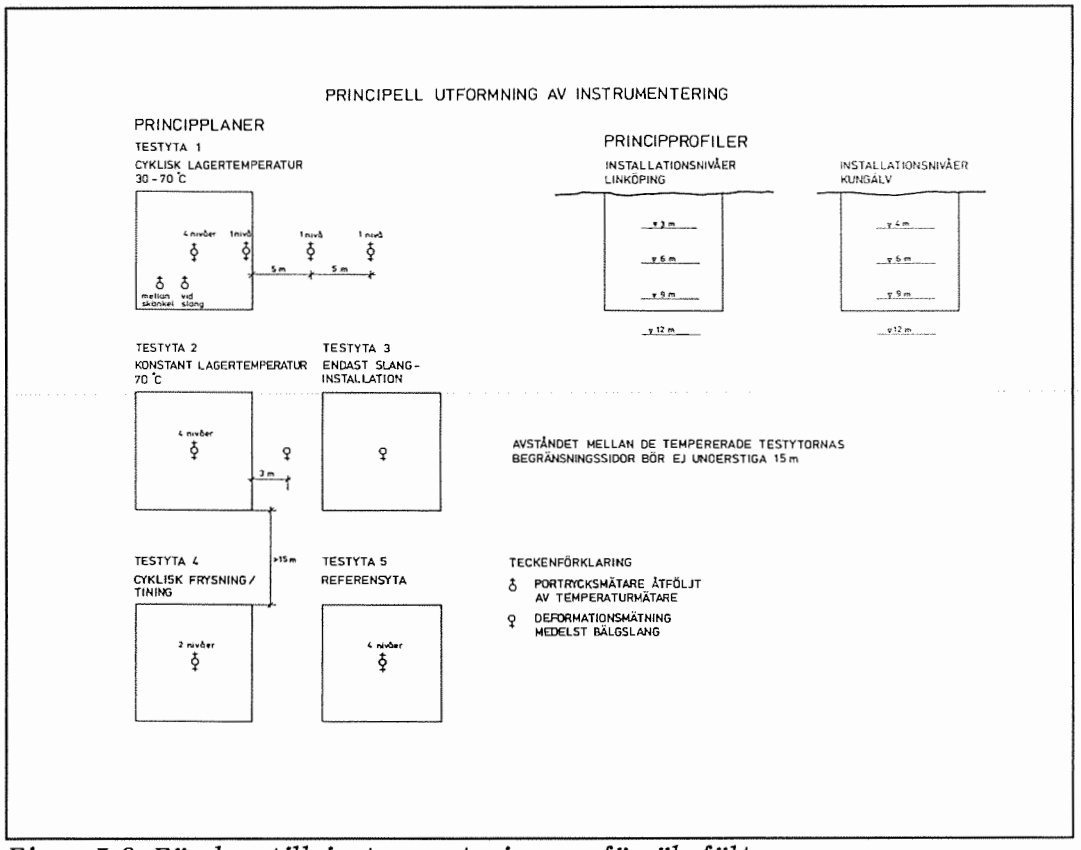
För testyta 4 tillkommer värmepump, utrustning för effektstyrning samt armaturer för säkerhetsfunktioner och glykolpåfyllning.

Förutom slangdragning till de olika testytorna och kylanslutning till aktuellt vattendrag sker all rörinstallation inom containern.

En kostnadskalkyl för VVS-installationen exklusive kostnader med anknytning till lagret finns redovisad i bilaga 5.1.

5.3 INSTRUMENTERING

För att få ut mesta möjliga geotekniska/termiska information från experimentfältet med rimliga mätinsatser föreslås att testytorna installeras med 19 st portrycksmätare, 19 st temperaturgivare samt 9 st bälgslangar. Dessutom bör 5 st markpeglar installeras. Fördelningen mellan de olika testytorna visas i efterföljande principskiss.



Figur 5.2 Förslag till instrumentering av försöksfält.

För de punkter där portrycks- och temperaturgivare endast skall placeras på 1 nivå föreslås nivån 6m, och i de punkter där givarna skall placeras på 2 nivåer föreslås 6 respektive 9m nivå. För att underlätta utvärdering av mätdata kommer 10 portrycksgivare och 6 temperaturgivare att anslutas till ett automatiskt mätdatainsamlingssystem. Under kortare tidsperioder kommer detta system för mätdatainsamling att användas vid undersökning av markvärmeväxlarnas effektkapacitet.

Bälgslangarna sätts ner till fast botten i Linköpingsalternativet och ner till 20m i Kungälv. Peglarna föreslås placeras i testyta 1 och 2. I testyta 1 placeras 2 peglar i mittpunkten på nivån 6 respektive 12m. En pegel vardera placeras i kanten och 5m utanför testyta 1 på nivån 6m. I testyta 2 placeras en pegel på nivån 6m.

I testyta 1 föreslås även att 2 st portrycks- och temperaturmätare sätts mellan skänklarna samt strax intill en slang på nivån 6m.

För att förhindra ömsesidig påverkan på geotekniska förändringar (giva-rutslag) runt de olika testytorna, speciellt de tempererade, bör avståndet mellan deras begränsningslinjer ej understiga 15 meter.

5.4 LAGRETS PRINCIPIELLA UTFORMNING

För att genomföra målsättningarna i projektet föreslås 5 testytor.

Testyta 1: V=1000 m^3, h=10 m, cykling 30-70 °C i lagertemperatur
Testyta 2: V=1000 m^3, h=10 m, konstant 70 °C i lagertemperatur
Testyta 3: V=1000 m^3, h=10 m, endast slanginstallation
Testyta 4: V=1000 m^3, h=10 m, cyklisk frysning/tining
Testyta 5: A=100 m^2, referensyta

Motivet till testyta 1 och 2 är att studera skillnaden av den geotekniska och termiska påverkan i lagret dels vid upprepad temperaturcykling (30-70 °C), dels vid konstant hög (70 °C) lagertemperatur.

I testyta 3 utförs endast slanginstallation för att urskilja förändringarna i lagret som enbart beror av metoden att installera slangarna.

För att undersöka effekterna av upprepade cykler där jorden fryses respektive upptinas anläggs testyta 4. Förändringar i lagret som beror av påverkan vid frysning går att urskilja genom jämförelse med testyta 1.

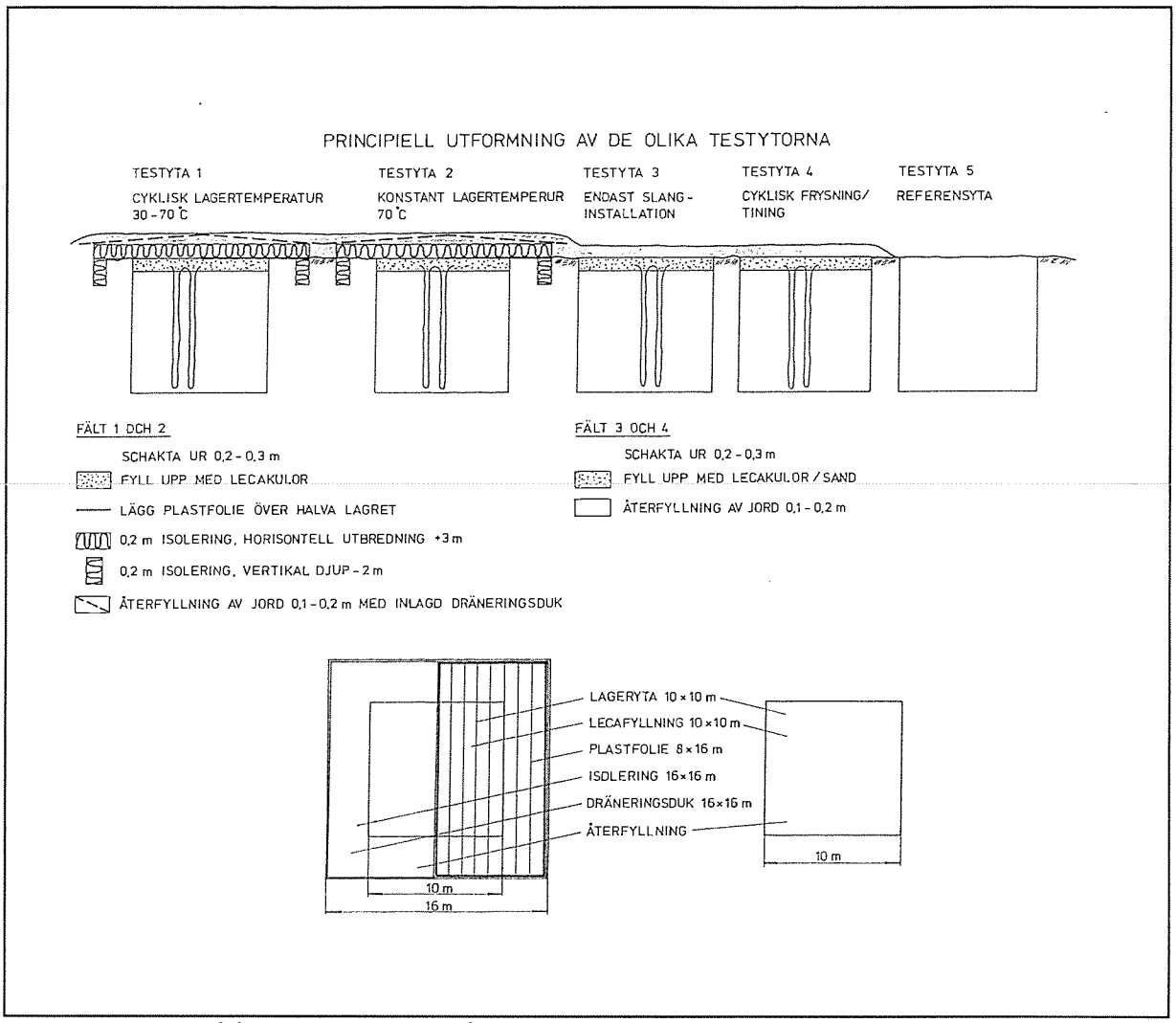
Testyta 5 är en helt opåverkad referensyta.

Förslag till utformning av de olika testytorna.

Varje testyta är 100 m^2. För att förbereda installation av markvärmeväx-lare schaktas den översta markytan bort. Efter installation återfylls volymen med lättklinker. Materialet är lätt varför masspåverkan i lagret undviks. Dessutom har lättklinker en isolerande funktion.

För att kunna undersöka påverkan av förångning och diffusion på grund av en hög lagertemperatur i testyta 1 och 2 beläggs vardera halva lagerytan (inklusive 3 meter utbredning) med en plastfolie. Hela lagery-tan inklusive lagrets omkrets, ned till ett djup av 2 meter, täcks sedan med en 0,2 m tjock isolering. Till sist återfylls schaktmassorna med en integrerad dräneringsduk. Duken avleder vatten vilket skyddar isoleringen från väta.

På testyta 3 och 4 behövs ingen isolering eftersom temperaturnivån och därmed förlusterna är små. På skiktet av lättklinker återfylls den bort-schaktade jorden.



Figur 5.3 De olika testytorna i plan och sektion.

6 KOSTNADSKALKYL

Kostnadskalkylen är baserad på beräknade kostnader för byggnation, drift och mätinstallationer i 1990 års kostnadsläge. Inledningsvis har en huvudkalkyl upprättats. Kalkylen har uppdelats i en investerings- och en driftdel. Dessa har i sin tur specificerats i olika funktionsdelar, t ex Högtemperaturdel, frysdel värmeväxlardel etc.

Huvudkalkylen har därefter analyserats med avseende på de två lokaliseringsalternativen och justeringar utförts.

INVESTERING HUVUDKALKYL		kkr
VVS	Högtemperaturdel (bilaga 5.1)	192
	Kyldel (bilaga 5.1)	99
Styr- och regler	Totalt (bilaga 5.1)	100
Lager	Högtemperaturdel (bilaga 5.2)	507
	Kyldel	124
Bygg	Mätbod mm	20
Mät	Geoteknisk mätinstall. (bilaga 5.3)	328
	Isolerfunktion (bilaga 5.4)	25
	Termiska egenskaper (bilaga 5.4)	45
	Effektkapacitet VVX (bilaga 5.5)	20
Summa		1460
Oförutsett 5% (delvis i underkalkyler)		70
Projektering		70
Summa investeringskostnad exkl moms		1600

DRIFT		
Pannanläggning	Drift och underhåll	30
	Energi (0.5 kr/kwh) (bilaga 5.6)	440
	El	50
Kylanläggning	Drift och underhåll	15
	Energi (bilaga 5.6)	90
Mät	Geoteknik högtemp (bilaga 5.3)	463
	Geoteknik kyldel (bilaga 5.3)	85
	Isolerfunktion (bilaga 5.4)	120
	Termiska egenskaper (bilaga 5.4)	212
	Effektkapacitet värmeväxl (bilaga 5.5)	128
Utvärdering, rapport		180
Avveckling av försöksfält		32
Summa		1845
SUMMA DRIFT + INVESTERING		3445

LOKALISERINGSALTERNATIV

I följande uppställning redovisas uppskattade kostnadsskillnader vid lokalisering i Kungälv.

Investering	**Kungälv**
Utgångssumma	3445
Ökade omkostnader i samband m bygg	+20
Mätbod	-20
Mät, ökade omkostnader	+34
Drift	
Mät, geoteknik	-120
ökade resekostnader	+100
Summa	3459

På grundval av denna kalkyl har inte platsvalet någon avgörande betydelse. Det finns dock en rad osäkra faktorer i kalkylen varför inga avgörande slutsatser kan dras. Rent generellt brukar det dock föra med sig stora, i viss mån dolda, fördelar med korta reseavstånd.

En del kostnadsposter är osäkra, t ex energikostnaden som beror av vilken uppvärmningsform som kan åstadkommas.

UPPDELNING AV HUVUDKALKYL

	Högtemp	**kyl**	**Isoler**	**Term.eg**	**Effekt**
Investering exkl moms	1200	295	30	50	25
Drift exkl moms	1135	235	125	217	133
Summa	2335	530	155	267	158
Totalt					3445 kkr
Moms 25% på inköpta tjänster, viktad till ca 5%					170
Summa					3615 kkr

Uppdelningen av huvudkalkylen visar att huvudsyftet med försöksfältet, undersökning av geoteknisk påverkan på lera vid hög temperatur, svarar för ca 70% av totalkostnaden. Undersökning av frysning av lera med vertikala rörsystem upptar ca 15% av den kalkylerade totalsumman. Övriga verksamheter vid försöksfältet svarar totalt för ca 15% av kostnaden.

7 SLUTSATSER

- Lokalisering av det projekterade försöksfältet kan antingen ske i Kungälv eller Linköping. Ur geoteknisk synpunkt är Kungälv att föredra men skillnaderna bedöms ändock som små. Till Linköpings fördel talar närheten och därmed den bättre tillgängligheten till verksamheten i anläggningen. Det slutliga valet kan styras av rena ekonomiska faktorer. Först vid ett beslut om byggnation finns möjlighet att upphandla fördelaktiga villkor vad gäller till exempel lån av pannanläggning och driftskostnader av densamma.

- Utöver det primära syftet med försöksfältet, undersökning av temperaturpåverkan på leras geotekniska egenskaper vid hög temperatur, förseslås tre separata utvärderingsprogram:
  - Markvärmeväxlarnas effektkapacitet vid hög temperatur
  - Isolermaterials termiska funktion i mark vid hög temperatur.
  - Termiska egenskaper i mark vid hög temperatur.

  Det bedöms som kostnadseffektivt att utföra dessa tre program i samband med försöksfältet. Dessutom studeras frysning av lera (kyldel).

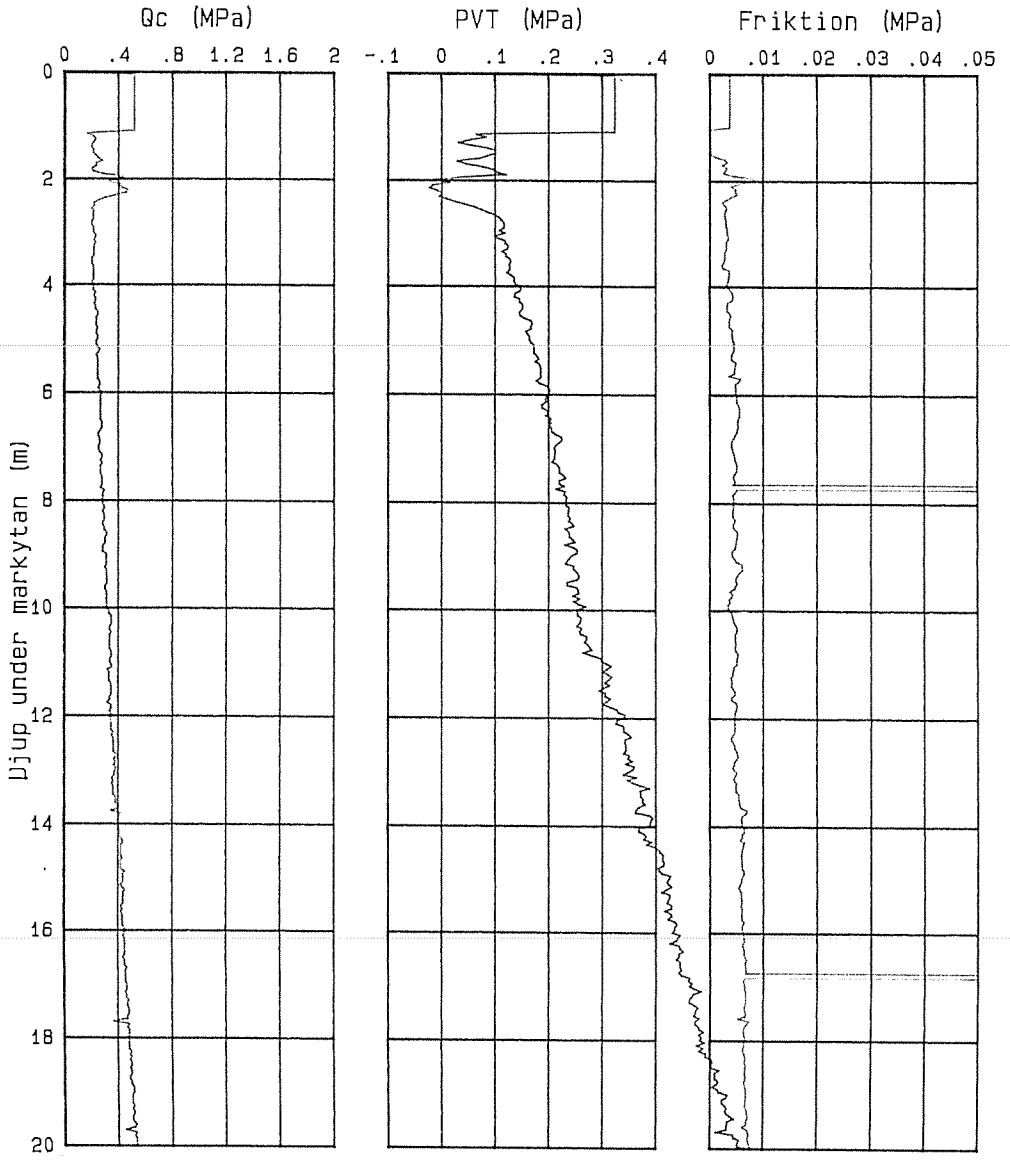
- Kostnadskalkylen har delats upp i en investerings- och en driftdel. Genomförandet av hela projektet beräknas kosta 3.6 miljoner kronor. En uppdelning av huvudkalkylen visar att högtemperatur- resp kyldelen svarar för 70 resp 15% av totalkostnaden.

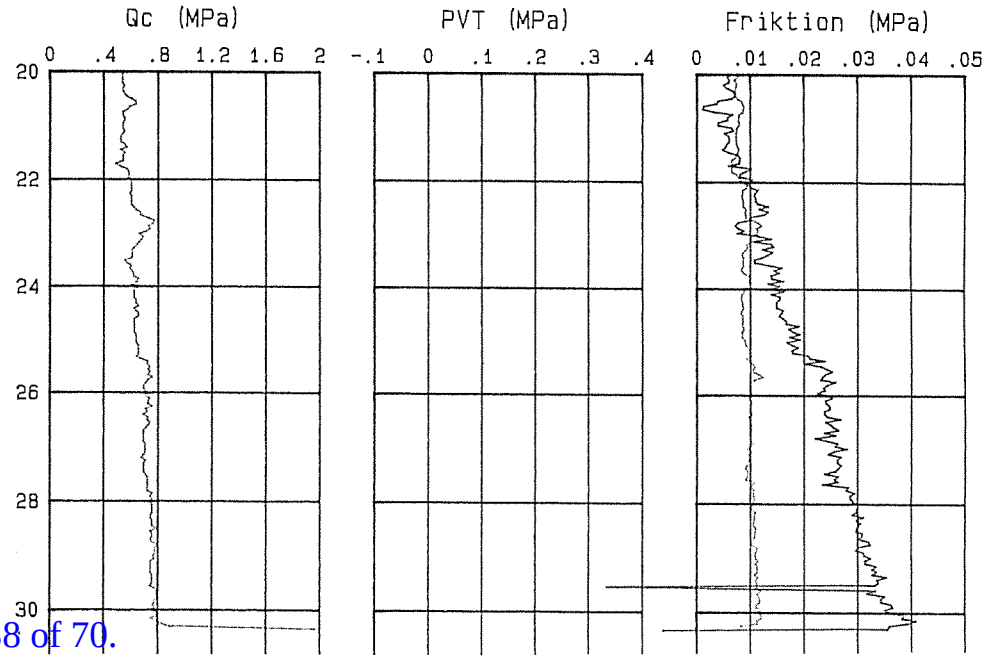
- Eftersom inga betydande hinder av teknisk eller praktisk art föreligger föreslår projektgruppen att finansiella medel tillsätts så att projektet kan genomföras. För i första hand framtida solvärmetillämpningar skulle nyttan av ett försöksfält för högtemperaturlagring i lera vara stor och många viktiga frågor skulle bli besvarade.

SGI
581 01 Linköping
013 - 11 51 00

Uppdragsg.: SGI
Proj. nr. : 515748919-5
Plats : KUNGÄLV
Filnamn : CTH-1

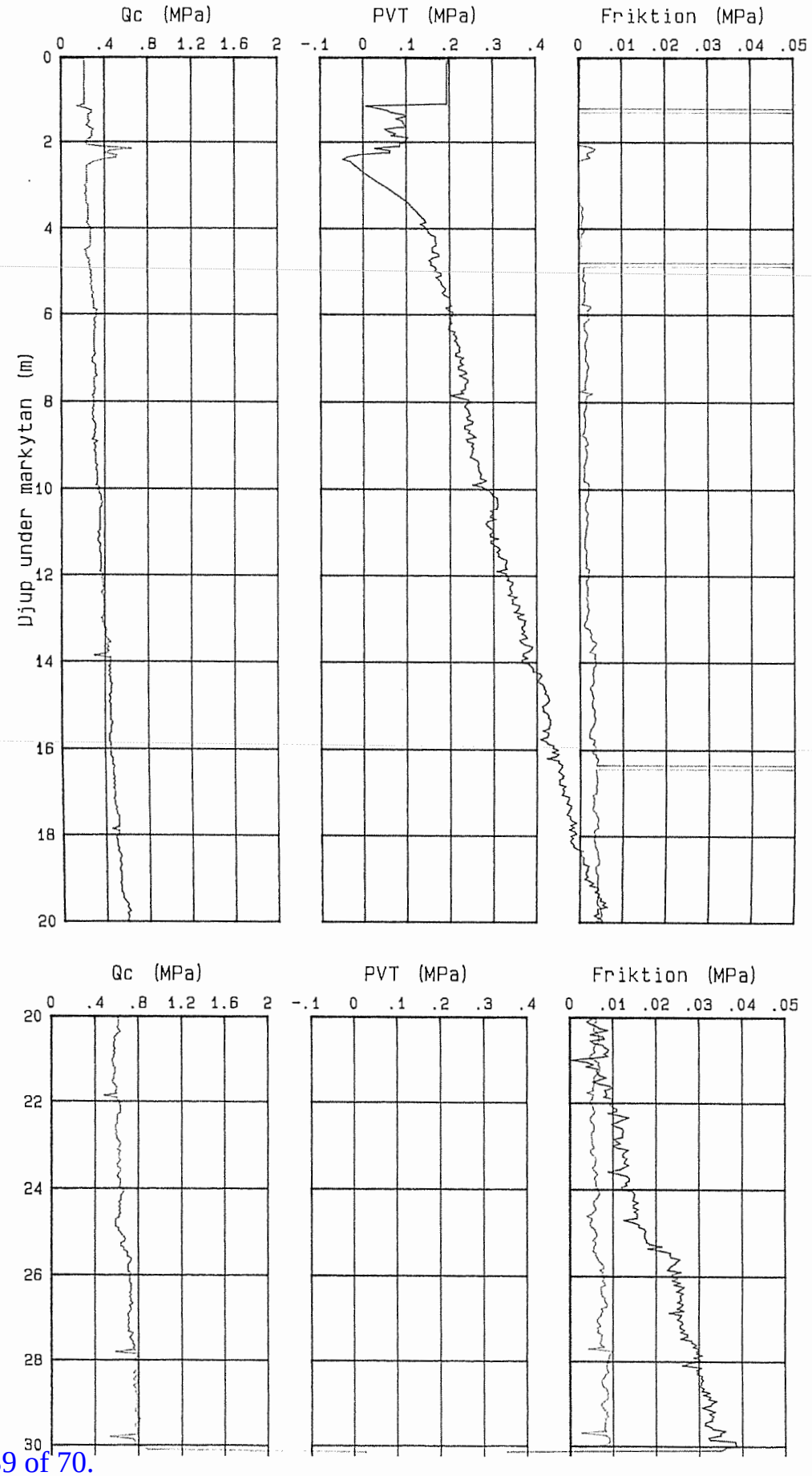
Spets nr.: 3063
Hål nr : 1
Utförd av : LB
Datum : 900322

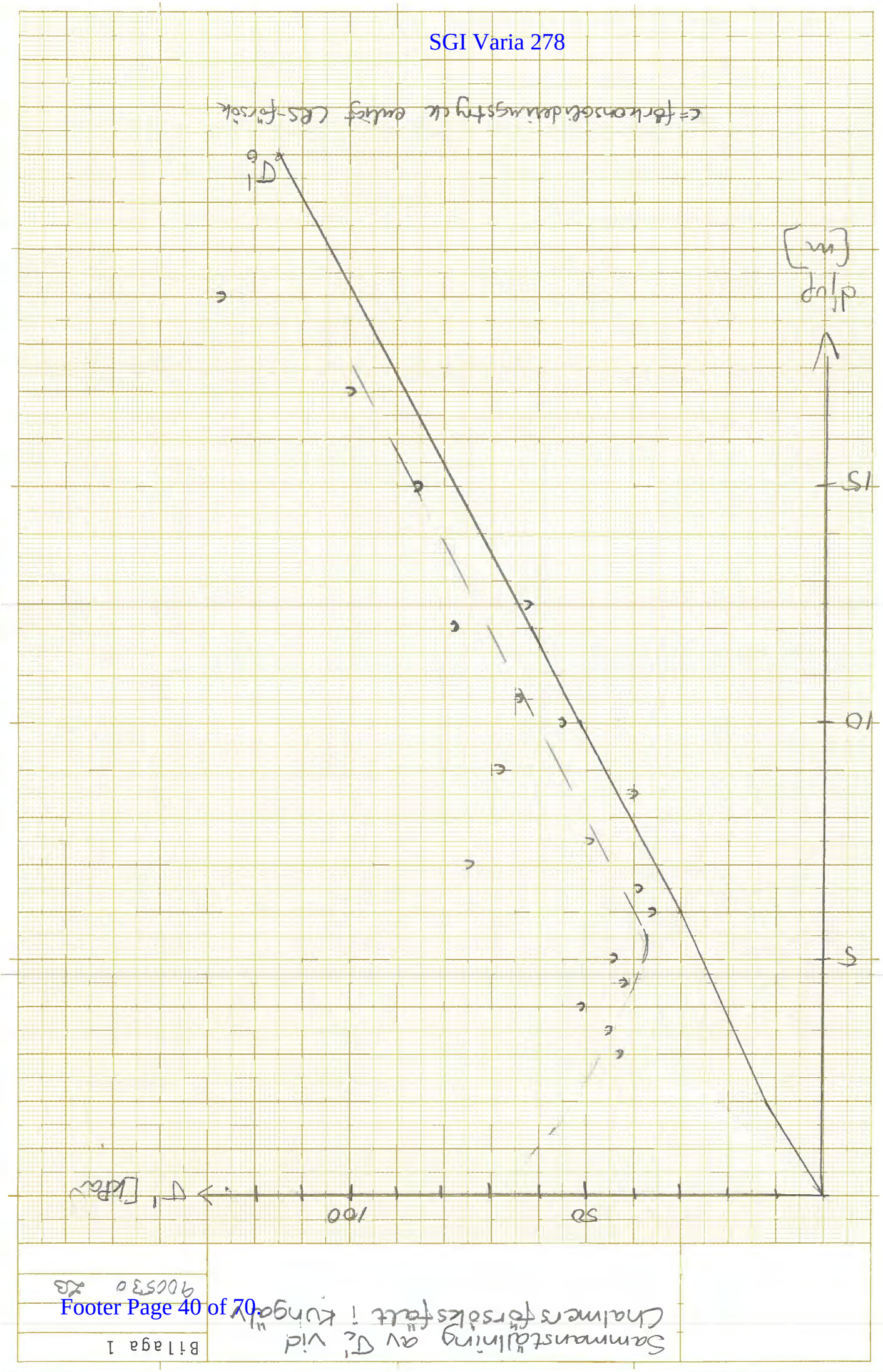




SGI
581 01 Linköping
013 - 11 51 00

Uppdragsg.: SGI
Proj. nr. : 515748919-5
Plats : KUNGÄLV
Filnamn : CTH-2
Spets nr.: 3063
Hål nr : 2
Utförd av : LB
Datum : 900322





Sammanställning av Q' vid Chalmers försökstak i kungälv

Bilaga 1

900530 KS

SIS 732501 514 A4 1 1 mm

STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT

Sammanställning av
LABORATORIEUNDERSÖKNINGAR

Projekt
SMÅBÅTSHAMNEN

PROVTAGNING	LABORATORIEUNDERSÖKNING
Datum: 900417	Datum: 900424 SZ

PROVTAGNINGSREDSKAP	LABORATORIEANSVARIG	DNR	TABELL
Kv StI		1-574/89	1

Sektion/ Djup	Benämning enligt 1981 års system	Densitet t/m^3	Vattenkvot %	Konflytgräns %	Sensitivitet	Skjuvhållfasth* kPa	Jordartsförkortning Anmärkning
1							
0.4-1.4	BRUN, MULLHALTIG, SILTIG LERA MED VÄXTDELAR, ROSTFLÄCKIG		21				mu si Le vx
1.4-1.6	GRÅ, NÅGOT LERIG SILT MED LERKÖRTLAR OCH ROTTRÅDAR, ROSTFLÄCKIG		20				(le) Si vx
1.6-2.0	GRÅ LERA MED SILTKÖRTLAR, ROSTFLÄCKIG		29				Le
2.0-2.6	GRÅ LERA MED ROTTRÅDAR		(62)				Le vx
3	GRÅ LERA MED ROTTRÅDAR	1.57	76	71	19	19	Le vx
4	GRÅ LERA MED ROTTRÅDAR	1.54	75	69	22	19	Le vx
5	GRÅ LERA	1.55	74	69	(16)	(16)	Le
6	GRÅ LERA	1.58	71	66	(16)	(16)	Le
7	GRÅ LERA	1.55	84	77	19	16	Le
8	GRÅ LERA	1.55	85	77	23	19	Le
9	GRÅ LERA, SULFIDFLÄCKIG	1.46	106	93	28	21	Le
10	GRÅ LERA, SULFIDFLÄCKIG	1.53	82	73	27	20	Le
11	GRÅ LERA, SULFIDFLÄCKIG	1.66	68	65	16	19	Le
13	GRÅ, VARVIG LERA	1.59	72	72	14	20	v Le
15	GRÅ, VARVIG LERA MED TUNNA SILTSKIKT	1.60	72	72	(14)	(20)	v Le (si)
17	GRÅ, VARVIG LERA MED SILTSKIKT	1.71	50	49	(16)	(19)	v Le si

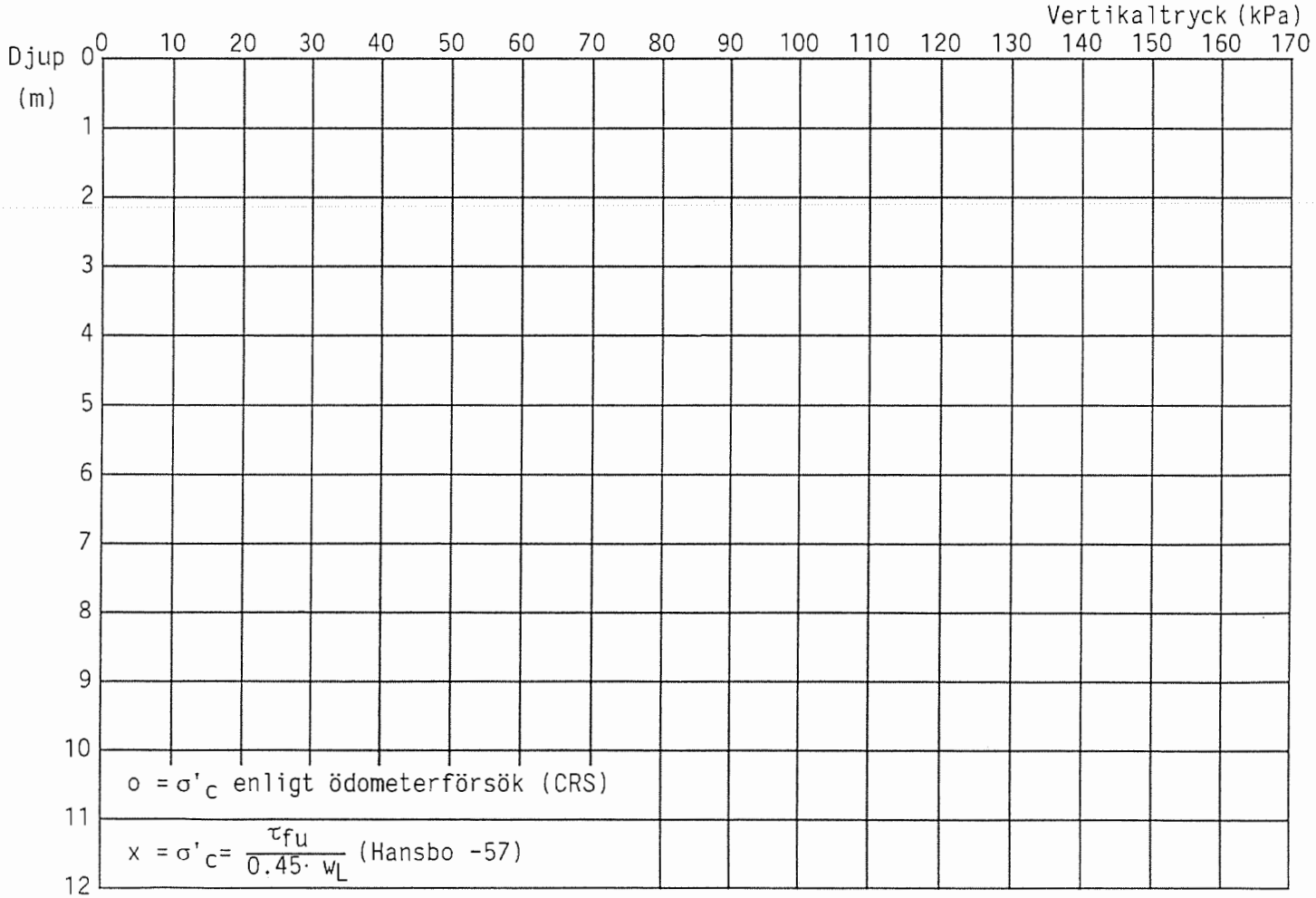
*Korrigering rekommenderas enligt SGI-INFO nr 3

STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT — SAMMANSTÄLLNING AV ÖDOMETERFÖRSÖK (CRS)

Projekt SMABÅTSHAMNEN — Dnr: 1-574/89

Borrhål 1 — Datum 900510 — Sign.: I-M S

Djup m	Dens. (CRS) t/m³	σ'_c kPa	M_L kPa	σ'_L kPa	M' -	Perm. k m/s	β_k -	c_{vmin} m²/s	Jordart
3	1.59	74	140	78	13.3	$9 \cdot 10^{-10}$	2.9		Le vx
5	1.57	63	300	85	13.5	$5 \cdot 10^{-10}$	3.2		Le
7	1.55	73	120	76	13.9	$9 \cdot 10^{-10}$	2.8		Le
9	1.48	(83)	(150)	(99)	23.5	$6 \cdot 10^{-10}$	2.8		Le
11	1.54	106	230	117	13.1	$3 \cdot 10^{-10}$	2.8		Le
13	1.57	102	360	127	13.5	$4 \cdot 10^{-10}$	3.1		vLe



$\tau_u = \mu \cdot \tau_v$

τ_k

Djup (m)	Brott (mm)	Stång (mm)	Tb (kPa)	Tid (sek.)	Störd (mm)	Stång (mm)	TS (kPa)	TB.v (kPa)	St	Anm.
3	24	0,5	25,8	110	3	1	2,5	25,1	10	
4	17	1	17,9	125	3	1,5	1,9	17.6	9,3	
5	17	1	17,9	95	2	1	1,3	17,3	13	
6	17	1	17,9	100	2,5	1	1,9	17,3	9,1	
7	17	0,5	18,4	95	2	1	1,3	17,8	14	
8	19,5	1	20,6	95	2	1	1,3	19,9	15	
9	23,5	1	24,8	125	2,5	1,5	1,3	24,3	19	
10	20	1	21,1	135	2	0,5	1,9	20,8	11	
11	20,5	1	21,6	160	2,5	1	1,9	21,5	11	
12	28	1	29,4	225	2,5	1	1,9	29,8	16	
13	25	0,5	26,8	125	2,5	1	1,9	26,3	14	
14	27	0	29,4	180	3	1	2,5	29,4	12	
15	28	1,5	28,8	165	3	1	2,5	28,7	11	
16	28,5	0,5	30,4	135	3	1	2,5	29,9	12	
17	24	1	25,3	145	3	1	2,5	25,0	10	
18	28	0,5	29,9	170	3	1	2,5	29,8	12	

Objekt : Småbåtshamnen

Proj. nr.: 5157 48919-5

Datum : 900418

Sektion / Punkt : 1

Instrument: 89

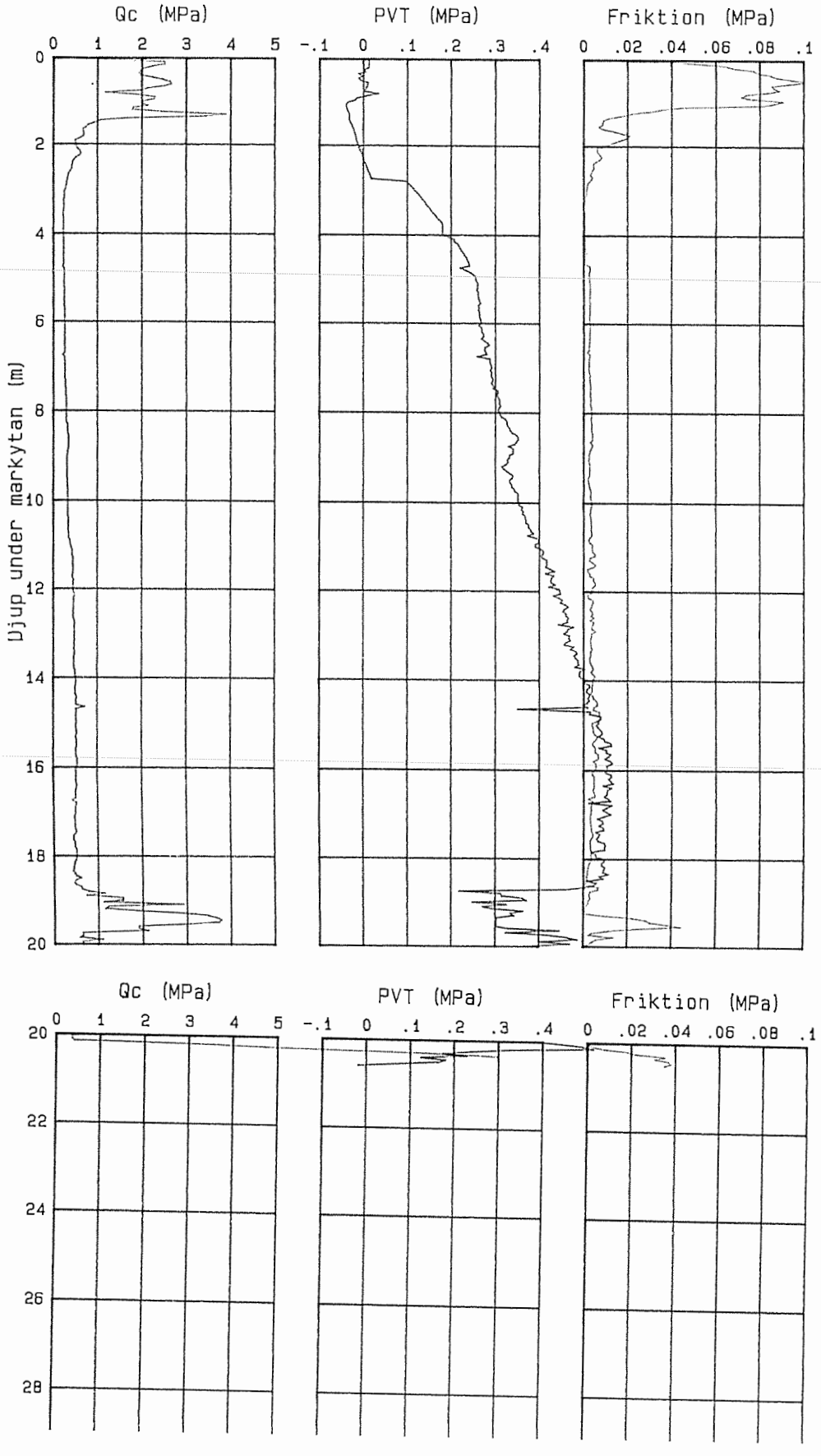
Vinge: 65 × 130

Bilaga 2

SGI
581 01 Linköping
013 - 11 51 00

Uppdragsg.: SGI
Proj. nr. : 515748919-5
Plats : SMÅBÅTSHAMNEN
Filnamn : HAMN-1

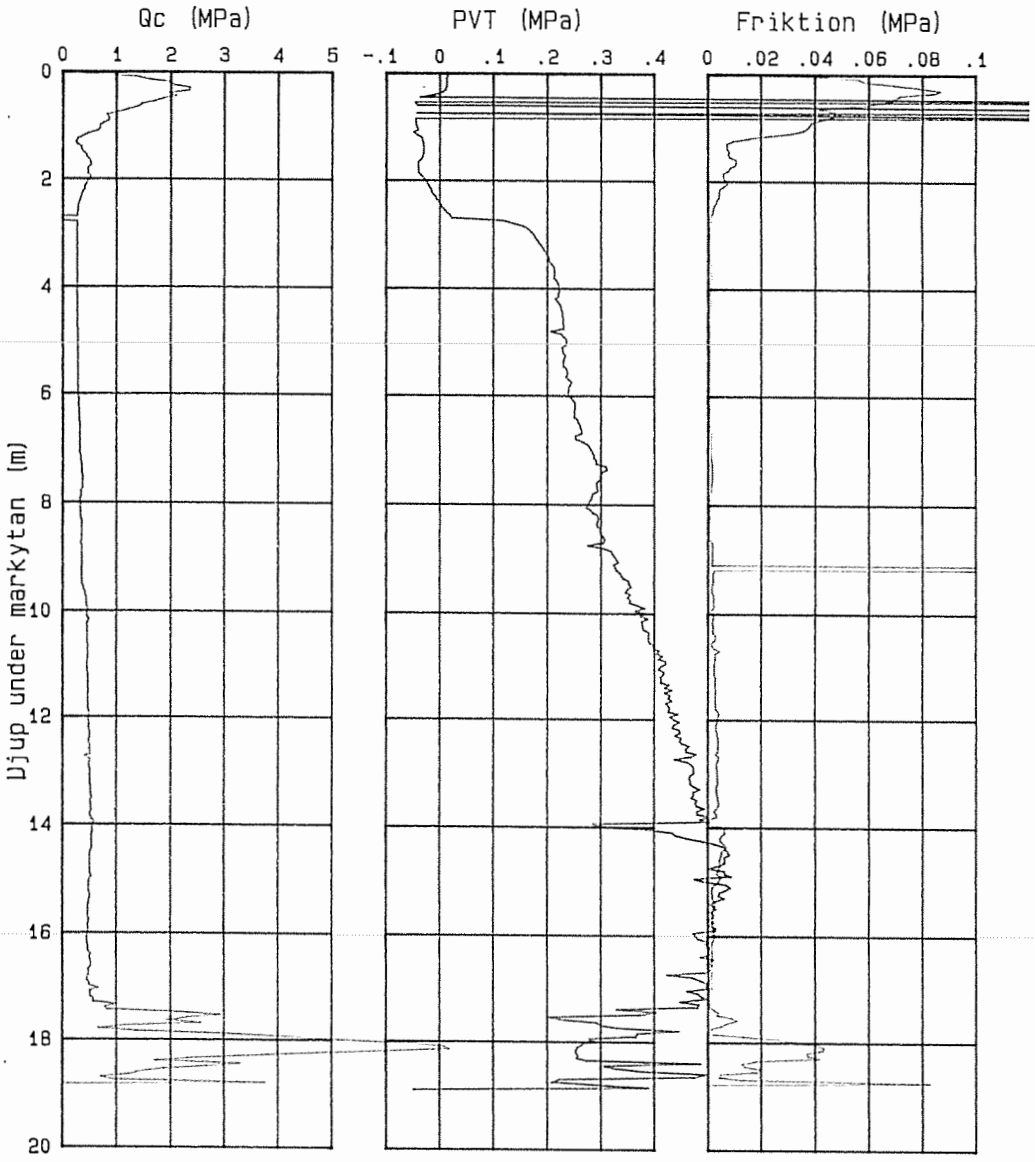
Spets nr.: 3063
Hål nr : 1
Utförd av : KH
Datum : 900417



SGI
581 01 Linköping
013 - 11 51 00

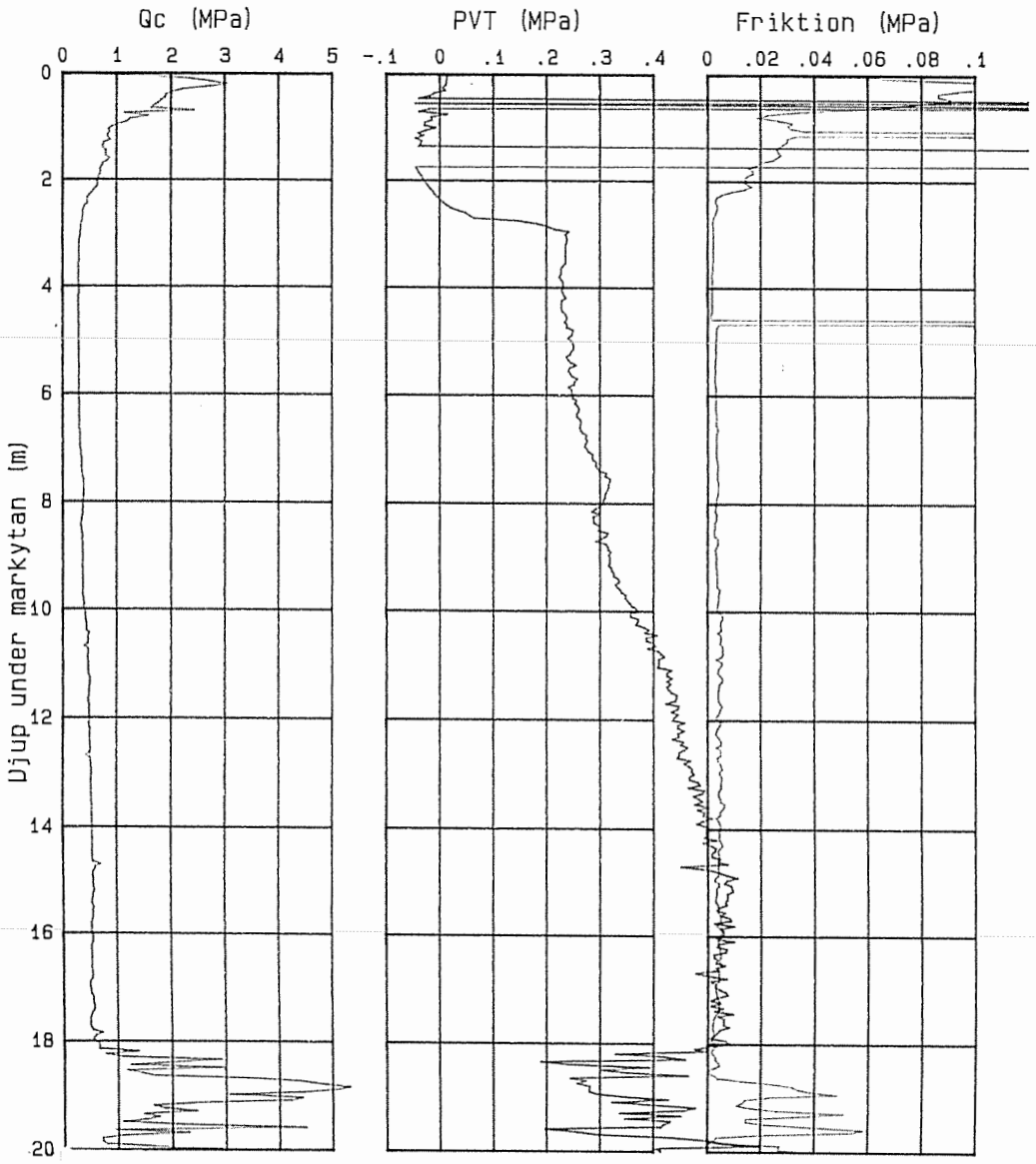
Uppdragsg.: SGI
Proj. nr. : 515748919-5
Plats : SMÅBÅTSHAMNEN
Filnamn : HAMN-2

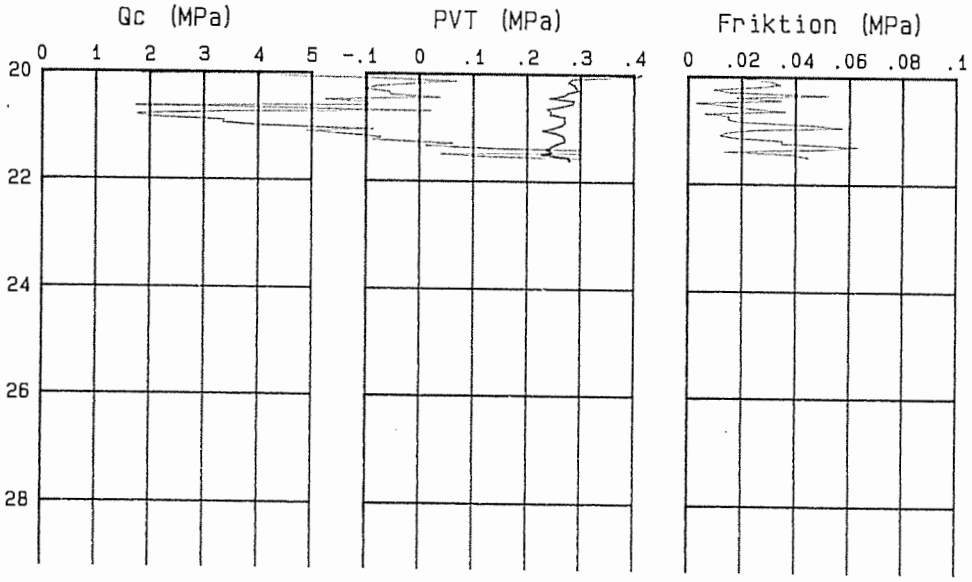
Spets nr.: 3063
Hål nr : 2
Utförd av : KH
Datum : 900417



SGI
581 01 Linköping
013 - 11 51 00

Uppdragsg.: SGI	Sond nr.: 3063
Proj. nr. : 515748919-5	Hål nr : 3
Plats : SMÅBÅTSHAMNEN	Utförd av : KH
Filnamn : HAMN-3	Datum : 900418

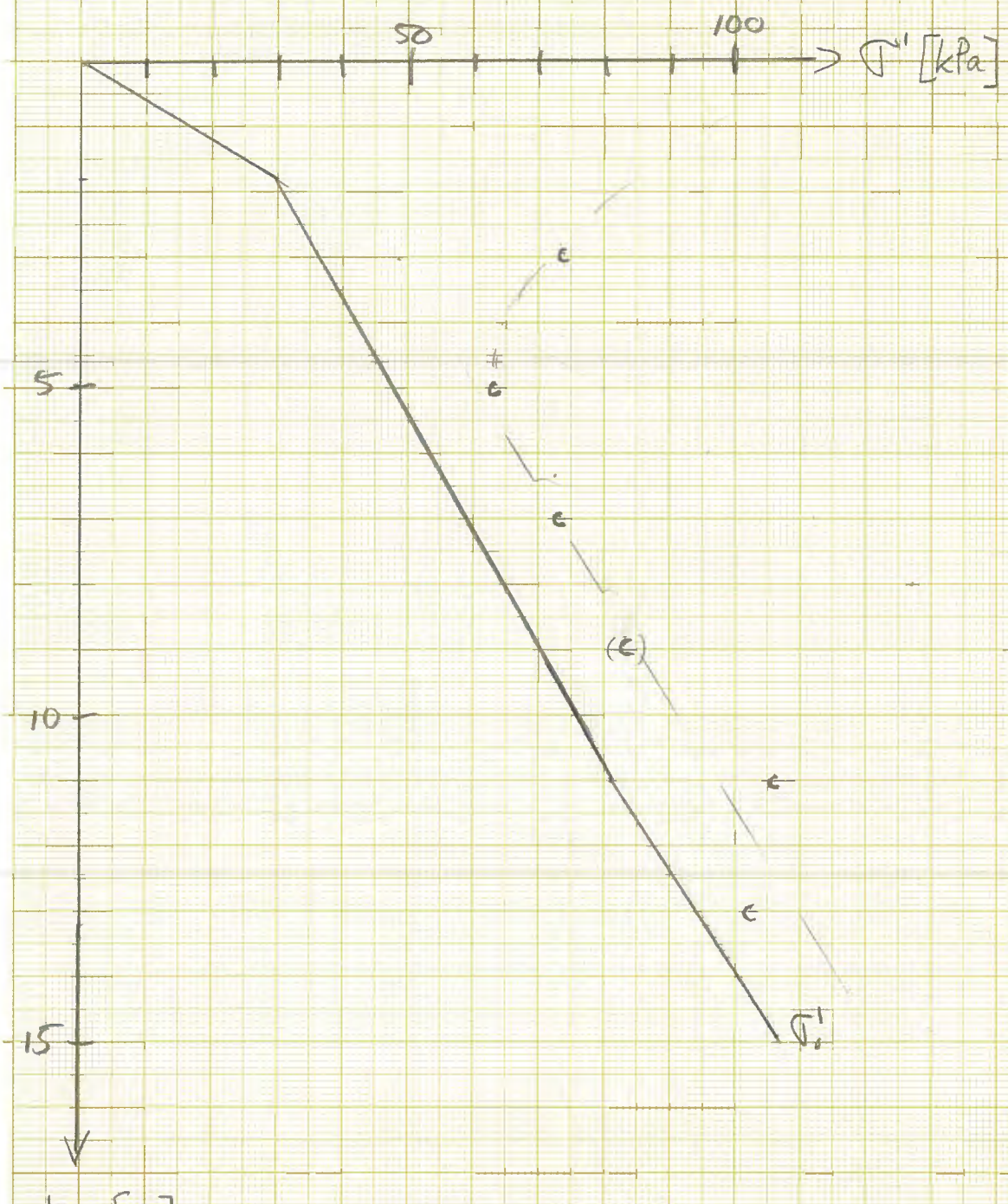




Sammanställning av σ'_c vid småbåtshamnen i Linköping

SGI Varia 278

Bilaga 2
900510 AR



c = förkonsolideringstryck enligt ces-försök

SI 32501 514 A4 1 1 mm

Värmeteknisk projektering

För att dimensionera markvärmeväxlarna utgår man från det uppskattade energilagringsbehovet samt hur snabbt lagret kommer att omsättas. De erhållna effekterna matas sedan in i ett beräkningsprogram som resulterar i det antal markvärmeväxlare som behövs för att teoretiskt täcka energi-och effektbehoven.

Följande indata och beteckningar används vid beräkningar:

Testyta 1: V=1000 m^3, h=10 m, cykling 30-70 ^{0}C i lagertemperatur
Testyta 2: V=1000 m^3, h=10 m, konstant 70 ^{0}C i lagertemperatur
Testyta 3: V=1000 m^3, h=10 m, endast slanginstallation
Testyta 4: V=1000 m^3, h=10 m, cyklisk frysning/tining
Testyta 5: A=100 m^2, referensyta

Max fluidtemperatur T_M, väljes till 80 ^{0}C

Drivande medeltemperatur (fluid-lager) ΔT_D, antaget till 10 ^{0}

Temperaturfall fluid ΔT_F, antaget till 5 ^{0}

Lerans specifika energiinnehåll C_l, antaget till 1 kWh/m^3K

Antal cykler, antaget till 2 dvs 2000 timmar per uppvärmning/avkylning

Testyta 1

Inlagrad energi: $Q=V_1 \cdot C_l \cdot \Delta T_1$

V_1=1000 m^3

C_l=1 kWh/m^3K

ΔT_1=70-30=40 ^{0}

$Q=1000 \cdot 1 \cdot 40=40$ MWh/cykel

Antal cykler: två, vilket ger t=2000 timmar

Netto effektbehov: $\dot{Q}_N=Q/t$

$\dot{Q}_N=40\ 000/2\ 000=20$ kW

Brutto effektbehov: Kompensering för värmeförluster uppskattas till 45 % per uppvärmning vilket ger brutto effektbehov

$\dot{Q}_B=1,45 \cdot 20=29$ kW

Kyleffektbehov: För att kyla testfält 1 behövs en värmeväxlare (sjövattenkyld) med kyleffekt

$\dot{Q}_{kyl}=20$ kW

Testyta 2

Analogt testyta 1 förutom kompensering för värmeförluster. En högre medeltemperatur i lagret jämfört med testyta 1 ger uppskattningsvis 60 % värmefärluster per uppvärmning. Brutto effektbehov blir

$\dot{Q}_B = 1{,}6 \cdot 20 = 32$ kW

Testyta 1 och 2

Testyta 1 och 2 kommer att samköras. Den dimensionerande effekten Q blir

$\dot{Q}_D = \dot{Q}_{B1} + \dot{Q}_{B2} - \dot{Q}_{N1}$

$\dot{Q}_D = 29 + 32 - 20 = 41$ kW

Testyta 4

Lagertemperatur: -5 °C till +5 °C

Antal cykler: två, vilket ger t=2000 timmar

Latent värme: Vid fasförändring av lera (0 °C) frigörs energi motsvarande vattnets isbildningsvärme/smältentalpi korrigerat med en faktor 0,7 för lerans porositet. Utöver denna energiförändring skall lagret höja/sänka sin temperatur ΔT_4 med 10 °C under 2000 timmar.

Volymkorrektion: Eftersom inte hela lagervolymen kommer att frysas/tinas korrigeras volymen.

Avgiven kylenergi: $Q = l_{f,\ H_2O} \cdot 0{,}7 \cdot m_l + V_4 \cdot C_l \cdot \Delta T_4$

$l_{f,\ H_2O}$ = latent värme, vatten = 334 kJ/kg ≈ 0,093 kWh/kg

l_l = latent värme, lera = $0{,}093 \cdot 0{,}7 = 0{,}065$ k

m_l = massa, lera = $1000\,m^3 \cdot \varrho_l \approx 1000 \cdot 100$ $1 \cdot 10^6$ kg

$v_4 = 1000\ m^3$

$C_l = 1$ kWh/m³K

$\Delta T_4 = -5 - (+5) = 10$ °

$Q = 0{,}065 \cdot 10^6 + 1000 \cdot 1 \cdot 10 = 75 \cdot 10^3$ kWh/cykel

Brutto kyleffekt: Låg temperaturnivå ger liten värmetillförsel till lagret. Netto kyleffekt~brutto kyleffekt. Antag att 10 % av lagervolymen fryses (V~energimängden) under 2000 timmar.

$\dot{Q}_B = Q \cdot 0{,}10/t$

$\dot{Q}_B = 75 \cdot 10^3 \cdot 0{,}10/2000 = 3{,}75$ kW

Med en värmefaktor på 3 erhålls avgiven brutto effekt

$\dot{W}_B \approx 5{,}5$ kW

Denna värmeeffekt måste anläggningen kunna kyla bort (sjövattenkyld värmeväxlare).

Datorstödd beräkning av antalet markvärmeväxlare per testfält.

Testyta 1

Max effektbehov: $\dot{Q}_B = 29$ kW (enligt kapitel 4.1)

Drivande medeltemperatur: $\Delta T_D = 10$ °

Effektövergångsbehov: Markvärmeväxlarnas effektövergångsbehov kan tecknas

$\dot{Q}_B/\Delta T_D = 2{,}9$ kW/K

Slangmaterial: Välj ett värmetåligt slangfabrikat, till exempel PEX av tryckklass 0,6 MPa (vid 90 °C vattentemperatur).

Antag Ytterdiameter $D_y = 25{,}0$ mm → $D_i = 20{,}4$

Materialet har minsta bockningsradie=125 mm
Skänkelavstånd=250 mm

GROUND HEAT STORAGE

INPUT PARAMETER VALUES	
Storage volume	1000
Thermal conductivity of the ground	1.000
GHE type	Single U
GHE pattern	Quadratic
GHE active length	10
GHE spacing	1.05
Thermal resistance fluid/ground	0.0900
U-pipe radius	0.0125
U-pipe shank spacing	0.250

Thermal resistance	0.310	K/(W/m)
Cross-sectional area	1.102	m²
Heat transfer length	0.585	m
Vol. heat transfer capacity	2.924	W/(m3K)
Total heat transfer capacity	2.924	kW/K
Number of GHE	91	

Enligt beräkningsprogram krävs en minsta delning mellan markvärmeväxlarna på 1,05 m för att erhålla önskad värmeövergång. Detta motsvarar 91 styck markvärmeväxlare.

Antag Ytterdiameter D_y=32,0 mm → D_i=26,0

Materialet har minsta bockningsradie=155 mm
Skänkelavstånd=310 mm

GROUND HEAT STORAGE

INPUT PARAMETER VALUES	
Storage volume	1000
Thermal conductivity of the ground	1.000
GHE type	Single U
GHE pattern	Quadratic
GHE active length	10
GHE spacing	1.10
Thermal resistance fluid/ground	0.0900
U-pipe radius	0.0160
U-pipe shank spacing	0.310

Thermal resistance	0.284	K/(W/m)
Cross-sectional area	1.210	m²
Heat transfer length	0.586	m
Vol. heat transfer capacity	2.911	W/(m3K)
Total heat transfer capacity	2.911	kW/K
Number of GHE	83	

Enligt beräkningsprogram krävs en minsta delning mellan markvärmeväxlarna på 1,10 m för att erhålla önskad värmeövergång. Detta motsvarar 83 styck markvärmeväxlare.

Testyta 2

Max effektbehov: $\dot{Q}_B$=32 kW (enligt kapitel 4.1)

Drivande medeltemperatur: ΔT_D=10 °

Effektövergångsbehov: Markvärmeväxlarnas effektövergångsbehov kan tecknas

$\dot{Q}_B/\Delta T_D$=3,2 kW/K

Analogt följer: Antag Ytterdiameter D_y=25,0 mm → D_i=20,4

Materialet har minsta bockningsradie=125 mm
Skänkelavstånd=250 mm

GROUND HEAT STORAGE

INPUT PARAMETER VALUES	
Storage volume	1000
Thermal conductivity of the ground	1.000
GHE type	Single U
GHE pattern	Quadratic
GHE active length	10
GHE spacing	1.00
Thermal resistance fluid/ground	0.0900
U-pipe radius	0.0125
U-pipe shank spacing	0.250

Thermal resistance	0.303	K/(W/m)
Cross-sectional area	1.000	m²
Heat transfer length	0.551	m
Vol. heat transfer capacity	3.298	W/(m3K)
Total heat transfer capacity	3.298	kW/K
Number of GHE	100	

Enligt beräkningsprogram krävs en minsta delning mellan markvärmeväxlarna på 1,00 m för att erhålla önskad värmeövergång.
Detta motsvarar 100 styck markvärmeväxlare.

Antag Ytterdiameter D_y=32,0 mm → D_i=26,0

Materialet har minsta bockningsradie=155 mm
Skänkelavstånd=310 mm

GROUND HEAT STORAGE

INPUT PARAMETER VALUES	
Storage volume	1000
Thermal conductivity of the ground	1.000
GHE type	Single U
GHE pattern	Quadratic
GHE active length	10
GHE spacing	1.05
Thermal resistance fluid/ground	0.0900
U-pipe radius	0.0160
U-pipe shank spacing	0.310

Thermal resistance	0.278	K/(W/m)
Cross-sectional area	1.102	m²
Heat transfer length	0.553	m
Vol. heat transfer capacity	3.267	W/(m3K)
Total heat transfer capacity	3.267	kW/K
Number of GHE	91	

Enligt beräkningsprogram krävs en minsta delning mellan markvärmeväxlarna på 1,05 m för att erhålla önskad värmeövergång. Detta motsvarar 91 styck markvärmeväxlare.

Testyta 4

Max effektbehov: $\dot{Q}_B$=3,75 kW (enligt kapitel 4.1)

Drivande medeltemperatur: ΔT_D=10 °

Effektövergångsbehov: Markvärmeväxlarnas effektövergångsbehov kan tecknas

$\dot{Q}_B/\Delta T_D$=0,38 kW/K

Laminär strömning: Jämfört med fält 1 och 2 har fält 4 mycket mindre effektbehov. För att undvika laminär strömning (långsamt volymflöde) det vill säga sämre värmeövergångsförmåga måste volymflödet ökas. Genom att välja en klenare slangdimension förbättras förutsättningen för turbulent flöde.

Slangmaterial: Klenare slangdimensioner av PEX saluförs enbart i tryckklass 1,0 MPa vid (90 °C vattentemperatur).

Antag Ytterdiameter D_y=12,0 mm → D_i=8,0

Materialet har minsta bockningsradie=60 mm
Skänkelavstånd=120 mm

GROUND HEAT STORAGE

INPUT PARAMETER VALUES	
Storage volume	1000
Thermal conductivity of the ground	1.000
GHE type	Single U
GHE pattern	Quadratic
GHE active length	10
GHE spacing	2.20
Thermal resistance fluid/ground	0.0900
U-pipe radius	0.0060
U-pipe shank spacing	0.120

Thermal resistance	0.538	K/(W/m)
Cross-sectional area	4.840	m²
Heat transfer length	1.613	m
Vol. heat transfer capacity	0.384	W/(m3K)
Total heat transfer capacity	0.384	kW/K
Number of GHE	21	

REFERENSER

Adolfsson, K. & Sällfors, G., Energilagring i lera, Byggforskningsrådet, rapport R23, 1987.

Campanella, R.G., Mitchell, J.K., Influence of temperature variations on soil behavior, ASCE, vol. 94, no. SM3.1, 1968.

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 jordvärmesystem och vindkonvektor. Chalmers Tekniska Högskola, Jordvärmegruppen, rapport 2, 1981.

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 flerfamiljshus 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 värmepump för skola och sporthall i Söderköping. Projektering. Statens geotekniska institut, Varia 186, Linköping, 1986.

Rydell B. & Sundberg J., Värmelager i lera vid församlingshem i Söderköping. Geoteknisk uppföljning och utvärdering, Statens geotekniska institut, Linköping, 1987.

Rydell, B., Lundin, S-E. & Sundberg J., Teknikupphandling av markvärmelager, 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 publicerad av Statens geotekniska institut, rapport 35, Linköping, 1988.

Sundberg, J., Högtemperaturlager i lera. Geoteknik, systemteknik och kostnader. Byggforskningsrådet, under tryckning, 1990.

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.

BILAGOR

Bilaga 1: Geotekniska undersökningar i Kungälv
Bilaga 2: Geotekniska undersökningar i Linköping
Bilaga 3: Värmeteknisk projektering
Bilaga 4: VVS-teknisk projektering
Bilaga 5: Kostnadskalkyler
- 5.1 VVS
- 5.2 Lager
- 5.3 Geotekniska undersökningar
- 5.4 Isoleringsfunktion och termiska egenskaper
- 5.5 Markvärmeväxlares effektkapacitet
- 5.6 Energikostnader

Enligt beräkningsprogram krävs en minsta delning mellan markvärmeväxlarna på 2,20 m för att erhålla önskad värmeövergång. Detta motsvarar 21 styck markvärmeväxlare.

Antag Ytterdiameter D_y=15,0 mm → D_i=10,0

Materialet har minsta bockningsradie=75 mm
Skänkelavstånd=150 mm

GROUND HEAT STORAGE

INPUT PARAMETER VALUES	
Storage volume	1000
Thermal conductivity of the ground	1.000
GHE type	Single U
GHE pattern	Quadratic
GHE active length	10
GHE spacing	2.20
Thermal resistance fluid/ground	0.0900
U-pipe radius	0.0075
U-pipe shank spacing	0.150

Thermal resistance	0.502	K/(W/m)
Cross-sectional area	4.840	m²
Heat transfer length	1.559	m
Vol. heat transfer capacity	0.411	W/(m3K)
Total heat transfer capacity	0.411	kW/K
Number of GHE	21	

Enligt beräkningsprogram krävs en minsta delning mellan markvärmeväxlarna på 2,20 m för att erhålla önskad värmeövergång. Detta motsvarar 21 styck markvärmeväxlare.

Testyta 1, 2 och 4

Effektbehovet i testyta 2 är störst (32 kW) och blir därför dimensionerande. Av samordningsskäl monteras även fält 1 med samma slangdimension som fält 2. För fält 4 rekommenderas en klenare slangdimension för att lättare erhålla turbulent strömning. Tryckfallsberäkningar vid senare VVS-beräkningar avgör exakt val av slangdimesion

VVS-teknisk projektering

Utifrån effektbehoven i kapitel 4.1 dimensioneras slangar och rör med hjälp av tryckfallsnomogram. Prisfrågan och god värmeöverförande egenskaper talar för klenare dimensioner. Tryckfallet får emmellertid inte bli för högt eftersom detta ökar driftskostnaderna.

Testyta 1

Effektbehov: $\dot{Q}_B = 29$ kW $= \dot{V} \cdot \varrho \cdot C_p \cdot \Delta T_F \rightarrow$

$\dot{V} = \dot{Q}_B / \varrho \cdot C_p \cdot \Delta T_F$

$\dot{V}$=sökt

C_p=vattnets specifika energiinnehåll 4,19 kJ/kgK (80 ^{0}C)

ϱ=vattnets densitet=972 kg/m^3 (80 ^{0}C)

Antag $\Delta T_F = 5$ ^{0}

$\dot{V} = 29 \cdot 10^3 / 972 \cdot 4190 \cdot 5 = 1{,}42 \cdot 10^{-3}$ m^3/s$\approx$ 5100 dm^3/timma

Med stöd av resultat från kapitel 4.1 antas (10·10) markvärmeväxlare. → Varje slangsling motsvarar en längd av 10·20+10+30 (anslutningsslang) =240 m (0,14 dm^3/s).

Tryckfallsnomogram (70 ^{0}C) ger tryckförlust för

D_i=20,4 mm → 0,12 kPa/m → 29 kPa/slinga

D_i=26,0 mm → 0,04 kPa/m → 10 kPa/slinga

Den klenare dimensionen accepteras både med avseende på tryckfall och den höga temperaturen.

Testyta 2

Effektbehov: $\dot{Q}_B = 32$ kW $= \dot{V} \cdot \varrho \cdot C_p \cdot \Delta T_F \rightarrow$

$\dot{V} = \dot{Q}_B / \varrho \cdot C_p \cdot \Delta T_F$

$\dot{V}$=sökt

C_p=vattnets specifika energiinnehåll 4,19 kJ/kgK (80 ^{0}C)

ϱ=vattnets densitet=972 kg/m^3 (80 ^{0}C)

Antag $\Delta T_F = 5$ ^{0}

$\dot{V}=32\cdot10^{3}/972\cdot4190\cdot5=1{,}57\cdot10^{-3}$ m^3/s≈
5600 dm^3/timma

Med stöd av resultat från kapitel 4.1 väljes (10·10) markvärmeväxlare. → Varje slangsling motsvarar en längd av 10·20+10+30 (anslutningsslang) =240 m (0,16 dm^3/s).

Tryckfallsnomogram (70 °C) ger tryckförlust för

D_i=20,4 mm → 0,15 kPa/m → 36 kPa/slinga

D_i=26,0 mm → 0,05 kPa/m → 12 kPa/slinga

Den klenare dimensionen accepteras både med avseende på tryckfall och den höga temperaturen.

Testyta 1 och 2

Till testfält 1 och 2 väljs PEX-slangar med dimension 25,0/20,4 i tryckklass 0,6 MPa (vid 90 °C vattentemperatur). Både fält 1 och 2 monteras med 100 markvärmeväxlare fördelade på tio slingor. Testyta 1 blir något överdimensionerad.

Testyta 4

Drift av testyta 4 förutsätter glykolinblandning (propylen) för att förhindra frysning av köldbärarvätskan.

Effektbehov: $\dot{Q}_B=3{,}75$ kW$=\dot{V}\cdot\varrho\cdot C_p\cdot\Delta T_F$ →

$\dot{V}=\dot{Q}_B/\varrho\cdot C_p\cdot\Delta T_F$

$\dot{V}$=sökt

C_p=glykols (35 vikt-%) specifika energi innehåll=3,8 kJ/kgK (-10 °C)

ϱ=glykolblandningens densitet=1020 kg/m^3 (30 °C)

(Ej sammanfallande extremvärden av C_p och ϱ)

Antag $\Delta T_F=5$ °

$\dot{V}=3{,}75\cdot10^{3}/1020\cdot3800\cdot5=1{,}93\cdot10^{-4}$ m^3/s≈
700 dm^3/timma

Med stöd av resultat från kapitel 4.1 antas (2·12) markvärmeväxlare. → Varje slangslinga motsvarar en längd av 12·20+25+30 (anslutningsslang) =295 m (0,10 dm^3/s).

Med detta lilla flöde och en slandimension enligt föregående testytor fås ej önskvärd

laminär strömning. Välj därför en klenare dimension.

Tryckfallsnomogram (70 ^{0}C) ger tryckförlust för

D_i=8,0 mm → 0,18 kPa/m → 53 kPa/slinga

D_i=10,0 mm → 0,1 kPa/m → 30 kPa/slinga

Tryckfallen gäller för vatten. För glykol (35 vikts-%, fryspunkt -20 ^{0}C) skall tryckfallet multipliceras med en faktor 1,6 enligt VVS-handböcker.

1,6·53 → 85 kPa/slinga

1,6·30 → 48 kPa/slinga

Den klenare dimensionen accepteras både med avseende på tryckfall och glykolinblandning.

Glykolmängd:

Glykolmängd≈$\pi \cdot D_i^2/4 \cdot 35$ %·total slanglängd →

$\pi \cdot 0{,}008^2/4 \cdot 0{,}35 \cdot 590 \approx 0{,}01$ m^3=10 dm^3

Kostnadskalkyl för VVS-installation av panncentral till försöksfält i lera

Investeringskostnad:

Kalkylen är uppdelad i två delar. Del A täcker kostnader för testyta 1 och 2. Del B innehåller de kostnader som tillkommer för att dessutom genomföra cyklisk frysning/värmning i testyta 4.

Del A

Benämning	Dim.	Antal (styck)	Kostnad (kronor)	Arbetstid (timmar)
Elpanna	55*60	1	25000	5
Säkerhetsutr.		1	6000	6
Exp.-kärl	50 l	1	3000	2
Pump P0		1	5000	3
Shuntgrupp		2	20000	6
Värmemängdsm.		2	6000	3
Pump P5		1	5000	3
Värmeväxlare	25 kW	1	15000	8
Pump P3		1	6000	4
Exp.-kärl	80 l	1	4000	3
Rörinst.	50 m		8000	50
Armaturer			10000	10
Isolering			5000	
Kylkrets ext.	200 m		7000	20
Silkorgar		2	1000	5
Oförutsätt			20000	24
			146000	152
Arbetskostnad 152 h·300 kr=			46000	
Summa totalt del A			192000	

Del B

Benämning	Dim.	Antal (styck)	Kostnad (kronor)	Arbetstid (timmar)
Värmepump	6 kW	1	35000	5
Exp.-kärl	80 l	1	4000	3
Shuntgrupp		1	10000	5
Rörinst.			4000	40
Armaturer			5000	6
Isolering			4000	
Glykolpåfylln.		1	4000	5
Glykol			1000	
Oförutsätt			10000	10
			77000	74
Arbetskostnad 74 h·300 kr=			22000	
Summa totalt del B			99000	

Kostnader för styr- och reglerutrustning, elentreprenad och "panncontainer" är ej medräknade i någon av kalkylerna. Den sammanlagda kostnaden för dessa poster uppskattas till 100000 kronor.

Den slutliga totala kalkylen för VVS-installationen blir enligt följande:

Del A, testyta 1 och 2	192 000 kronor
Del B, testyta 4	99 000 kronor
Övrig entreprenad	100 000 kronor
	391 000 kronor

FÖRSÖKSFÄLT FÖR HÖGTEMPERATURLAGRING 1990-05-10

Kostnader

En kostnadsberäkning av de olika försöksytorna har utförts. Följande beteckningar används.

yta 1	Konstant temperatur 70°C
yta 2	Cyklisk temperatur 30-70°C
yta 3	Endast slanginstallation
yta 4	Cyklisk frysning-tining

Kostnaderna fördelade sig enligt följande (se äv bilaga):

	kr
Etablering	30000
Markarbeten	15000
Markisolering 40-30cm,plastfolie	60000
Värmeväxlare	50000
koppling, samlingsledning, div VVS	30000
Summa	185000

För de olika ytorna erhålls följande kostnader:

Yta 1 Inkl etablering	185000
Yta 2	155000
Yta 3	50000
Yta 4	95000
Summa	485000
Byggherreomkostnader 20%	97000
Oförutsett 10%	49000
Totalsumma	631000

Kostnadsberäkningen har grundat sig på beräkning. En bättre kostnads-uppskattning fodrar större insats men ger säkrare resultat.

Kostnadskalkyl för genomförande av undersökningsprogram / temperaturpåverkan på leras geotekniska egenskaper i försöksfält.

Driftkostnader:

Tidsåtgång för mätning och utvärdering bedöms till följande:

1:a året:

Fältundersökning i uppvärmda fält:	4 tillfällen á 1,5 dag:	6	mandagar
Fältundersökning i fryst fält:	4 tillfällen á 1 dag:	4	mandagar
Mätning av 9 bälgslangar och 5 peglar:	12 tillfällen á 1 dag:	12	mandagar
Utvärdering av labinsats och fältprover i uppvärmda fält:	2 dagar per mättillfälle:	8	mandagar
Utvärdering av labinsats och fältprover i fryst fält:	2 dagar per mättillfälle:	8	mandagar
Utvärdering av bälgslangsmätningar:	1 dag per mättillfälle:	12	mandagar
Utvärdering och drift av datainsamling		12	mandagar
Summa:		62	mandagar

Rutinundersökningar	4800	kronor
Hyra fältutrustning	42000	kronor
Summa:	46800	kronor

2:a och 3:e året kan insatserna minskas med 33 %: 41 mandagar/år
31400 kronor/år

Totalsumma: (62+41+41) 144 mandagar

Total driftskostnad, arbetstid;: 144 mandagar	437800	kronor
Total driftskostnad, geoprislistan:	109600	kronor
Total driftkostnad:	547400	kronor

Investeringskostnader:

Ivesteringskalkylen är uppdelad i två delar. Del 1 täcker kostnader för instumenteringen i Linköping. Del 2 innehåller de kostnader som tillkommer vid lokalisering i Kungälv.

Del 1

Benämning	Dim.	Antal (styck)	Kostnad (kronor)	Arbetstid (mandagar)
Fältarbete				
portrycksm.	BAT	19	44184	4
automatik		10	70000	
bälgslang		9	8858	6
temp.mätare		19	68000	6
peglar		5	5000	2
Bandvagn	504		18000	
Mätinsamling		1	50000	5
Etablering				2
			264000	25
Arbetskostnad 25 dagar·2560 kr=			64000	
Summa totalt del 1			328000	

Del 2

Benämning	Dim.	Antal (styck)	Kostnad (kronor)	Arbetstid (mandagar)
Etablering				2 (en dag extra)
Traktamente			8592	
Hotell			16200	
Resor			4000	
			29000	2
Arbetskostnad 2 dagar·2560kr=			5120	
Summa totalt del 2			34000	

Investeringskalkylen för geotekniska instrumenteringen blir enligt följande:

Lokalisering i Linköping	328000 kronor
Lokalisering i Kungälv	328000+34000=362000 kronor

Av den totala investeringskostnaden för instumenteringen är 13000 kronor att hänföra till testyta 4 (cyklisk frysning/uppvärmning).

Den slutliga **totala kalkylen för temperaturpåverkan på leras geotekniska egenskaper** blir enligt följande:

Lokalisering i Linköping	
drift	661600
instrumentering (investering)	328000
Summa	989600
Lokalisering i Linköping exklusive testyta 4	
drift	661600
instrumentering (investering)	315000
Summa	976600
Lokalisering i Kungälv	
drift	661600
instrumentering (investering)	362000
Summa	1 023600
Lokalisering i Kungälv exklusive testyta 4	
drift	661600
instrumentering (investering)	349000
Summa	1 010600

Kostnadskalkyl över "Isoleringsfunktion" och "Termiska egenskaper"

ISOLERING

Tidsåtgång för mätning och utvärdering bedöms till följande:

Förberedande arbete:		2 mandagar
1:a året		
Mätning:	3 tillfällen á 1 dag:	3 mandagar
Kontinuerlig uppföljning:	1 dag per mättillfälle:	3 mandagar
Kontroll av mätare:	3 dagar per år:	3 mandagar
Summa:		9 mandagar
2:a och 3:e året kan insatserna minskas med 2/3:		3 mandagar/år
Provtagning och analys		2 mandagar
Utvärdering, rapportskrivning:		6 mandagar
Totalsumma:	(2+9+3+3+2+6)=	25 mandagar

Kostnader		kkr
Kostnad mätning, utvärdering: 25 mandagar		100
Kostnad install mätutrustning		10
Kostnad mätutrustning		15
Kostnad för labinsatser	SP	10
	SGI	10
Summa		145,000 kr

Summa investering: 25,000 kr
Summa drift: 120,000 kr

TERMISKA EGENSKAPER

Tidsåtgång för mätning och utvärdering bedöms till följande:

1:a året		
Mätning:	3 tillfällen á 1 dag:	3 mandagar
Kontinuerlig uppföljning:	1 dag per mättillfälle:	3 mandagar
Kontroll av mätare:	3 dagar per år:	3 mandagar
Summa:		9 mandagar
2:a och 3:e året kan insatserna minskas med 2/3:		3 mandagar/år

Mätning av värmekonduktivitet:	
Förberedande arbete	10 mandagar
8 mättillfällen á 1 dag	8 mandagar
Utvärdering av mätningar	5 mandagar
Summa:	23 mandagar
Utvärdering, rapportskrivning:	10 mandagar
Totalsumma: (9+3+3+23+10)=	48 mandagar

Kostnader		kkr
Kostnad mätning, utvärdering: 48 mandagar		192
Kostnad install mätutrustning		10
Kostnad mätutrustning inköp (sonder mm)		35
	hyra (datautr)	10
Kostnad för labinsatser	SGI	10
Summa		257,000 kr

Summa investering: 45,000 kr
Summa drift: 212,000 kr

Kostnadskalkyl för utvärdering av markvärmeväxlarnas effektkapacitet i testyta 1 och 2

Driftkostnad:

Tidsåtgång för mätning och utvärdering bedöms till följande:

Förberedande arbete:		2 mandagar
1:a året:		
Mätning:	4 tillfällen á 1 dag:	4 mandagar
Kontinuerlig uppföljning:	1 dag per mättillfälle:	4 mandagar
Kontroll av mätare:	2 dagar per år:	2 mandagar
Summa:		10 mandagar
2:a året:		
Mätning:	4 tillfällen á 1 dag:	4 mandagar
Kontinuerlig uppföljning:	1 dag per mättillfälle:	4 mandagar
Kontroll av mätare:	2 dagar per år:	2 mandagar
Summa:		10 mandagar
4:e året vid behov:		
Mätning:	8 tillfällen á 1 dag:	8 mandagar
Kontinuerlig uppföljning:	0,5 dag per mättillfälle:	4 mandagar
Kontroll av mätare:	2 dagar per år:	4 mandagar
Summa:		16 mandagar
Utvärdering, rapportskrivning:		10 mandagar
Totalsumma:	(2+10+10+10)	32 mandagar
Total driftskostnad: 32 mandagar		128000 kronor

Investeringskostnad:

Kostnad för inköp och montering av mätutrustning:	20000 kronor
Totalkostnad för utvärdering av markvärmeväxlarna:	148000 kronor

ENERGIKOSTNADER

Energiåtgång

Yta med konstant temperatur:
Uppvärmning: 70°·1 kwh/m^3,K·1000 m^3= 70 MWh
Förluster under 3 år: 300 MWh

Yta med varierad temperatur:
Initiell uppvärmning:
Se ovan 70 MWh
Temperaturcykling 2 ggr/år 240 MWh
Förluster under 3 år: 200 MWh

Summa 880 MWh

Elåtgång för pumpar mm 100 MWh

yta med kylning 60MWh/år 180 MWh

Kostnader:

Uppvärmda ytor

Uppvärmning mm vid ett pris av	200 kr/Mwh (netto)	176 kkr
	300	264
	500	440
Elkostnad vid ett pris av	500 kr/MWh	50

Kyld yta

Kylning vid ett pris	500 kr/Mwh	90