



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

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



Rapport

R47:1988

Anläggningsteknik för gropvärmelager i jord

Teknisk och ekonomisk studie

Caroline Magnusson
Jan Sundberg

R
Jull

INSTITUTET FÖR
BYGGDOKUMENTATION

Accnr

Plad

Ser

Byggforskningsrådet

R47:1988

ANLÄGGNINGSTEKNIK FÖR GROPVÄRMELAGER
I JORD

Teknisk och ekonomisk studie

Caroline Magnusson
Jan Sundberg

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 870342-7
från Statens råd för byggnadsforskning till Statens
geotekniska institut, Linköping.

REFERAT

Syftet med denna studie har varit att studera tekniskt och ekonomiskt hur några olika förstärkningsmetoder skulle kunna användas i samband med byggande av gropvärmelager med vertikala väggar i jord.

Lera är ett bättre material att bygga gropvärmelager i än t ex berg då värmeförlusterna blir mindre samt att inläckande eller utläckande vatten ej kan förekomma. Jorden måste dock förstärkas för att en rimlig geometri hos lagret skall erhållas.

De jordförstärkningsåtgärder som studerats är kalkpelare, jetinjektering, sänkbrunn och slitsmur. Olika geotekniska egenskaper har också beaktats.

Vid stora lerdjup blir jordförstärkningsåtgärder mycket kostsamma. Vid lerdjup mellan 5 och 15 meter är samtliga ovanstående metoder kostnadsmässigt intressanta. För en magasinsvolym av 40 000 m³ blir kostnaden för markarbeten, tätning och isolering drygt 100 kr/m³. Dessa kostnader avser ett alternativ där urgrävning och uppfyllning kombineras. Ett gropvärmelager som urgrävs till 10 m djup efter jordförstärkning med kalkpelare, sänkbrunn eller slitsmur kan utföras till en kostnad av 150-200 kr/m³. Dessa kostnader kan jämföras med t ex en icke trycksatt tank på 40 000 m³, där kostnader för tank och grundläggning uppgår till ca 400 kr/m³. Kostnaderna för ett gropvärmelager på 10 000 m³ är ca 50% högre än för volymen 40 000 m³. Om lagerbyggnadskostnaden är 100-200 kr/m³ och om antalet energiom-sättningar per år är fler än en, kan lagret enligt en marginalkostnadsbetraktelse tåla en kostnad för laddningsenergin.

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

Denna skrift är tryckt på miljövänligt, oblekt papper.

R47:1988

ISBN 91-540-4889-3

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Svenskt Tryck Stockholm 1988

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

SID

FÖRORD

SAMMANFATTNING

1.	BAKGRUND OCH FÖRUTSÄTTNINGAR	1
2.	ANLÄGGNINGSTEKNIK FÖR GROPVÄRMELAGER I LERA	6
2.1	Behov av förstärkningsåtgärder	6
2.2	Grop utan förstärkningsåtgärder	9
2.3	Kalkpelarförstärkning	9
2.4	Jetinjektering	13
2.5	Sänkbrunn	17
2.6	Slitsmur	18
2.7	Massbalans	20
3.	UTFORMNING AV TÄTSKIKT OCH ISOLERING	21
4.	VÄRDERINGAR AV TEKNIKER OCH METODER	23
4.1	Värmeförluster	23
4.2	Täck- och tätskikt	28
4.3	Tillämpningar	29
5.	KOSTNADER	31
5.1	Marginalkostnadsbetraktelse	31
5.2	Kostnader för förstärkningsåtgärder	35
5.3	Kostnader för respektive lagerutformning	35
5.4	Övriga kostnader	40
6.	SLUTSATSER	42
	REFERENSER	44
	BILAGOR	

FÖRORD

Denna rapport utgör redovisning av BFR-projekt 870342-7 och behandlar anläggningsteknik för gropvärmelager i lera. Syftet har varit att studera hur och till vilken kostnad olika jordförstärkningsåtgärder kan användas vid byggande av gropvärmelager. Ursprungligen avsågs att studera förstärkningsåtgärder i olika jordar som lera, silt, sand och morän. Eftersom vissa av förstärkningsmetoderna endast är tillämpliga i lera har dimensionering och kostnadsberäkningar enbart utförts för lera. Kostnaderna för att använda en jordförstärkningsmetod i annan jord än lera, där det är möjligt, är trots allt i samma storleksordning.

Rapporten grundar sig på stabilitets- och konstruktionsberäkningar på ett antal studerade fall. Kostnader har tagits fram dels baserade på utförda lager och använd teknik dels på bedömningar.

Under projektets gång har kontakt tagits med Ove Magnusson, Skanska, Leif Eriksson, Studsvik Energiteknik och Bo Carlsson, Terranova. Dessa har bidragit med tekniska och ekonomiska uppgifter. Jan Sundberg vid Statens geotekniska institut har författat avsnitten om värmeförluster (4.1) och marginalkostnadsbetraktelse (5.1) samt deltagit i diskussioner, främst angående täcksikt. Synpunkter har också erhållits av Bengt Rydell vid Statens geotekniska institut.

Linköping, januari 1988

Caroline Magnusson

SAMMANFATTNING

Naturvärmekällor tex solvärme ger stora värmetilskott sommartid då värmebehovet är lågt. Det omvända förhållandet råder vintertid. Säsongsvärmelagring i gropmagasin kan då vara en möjlighet att överbrygga denna obalans. Fördelen med gropvärmelager i jämförelse med andra lagertyper (slangar i jord och berg, akvifervärmelager m.fl.) är att stora effekter momentant kan lagras in och tas ut. Gropvärmelagren kan därför vara mycket betydelsefulla vid värmeproduktion för att kapa effekttoppar. Kraftvärmeverk kan under vissa perioder ha ett kraftbehov som är större än värmebehovet varvid överskottsvärmen måste kylas bort. Under andra perioder kan det omvända förhållandet råda. Gropvärmelager kan därför fylla en viktig funktion i många sammanhang.

Gropvärmelager har hittills enbart byggts i berg. En anledning till detta är att för att värmeförlusterna skall kunna begränsas till en rimlig nivå måste gropen vara djup vilket i jord är omöjligt utan förstärkningsåtgärder. Jord är ur värmeförlustsynpunkt ett bättre omgivningsmedium än berg. Värmeförlusterna blir nämligen pga de termiska egenskaperna större i berg än i jord vid i övrigt lika förhållanden. I geotekniska sammanhang är jordförstärkningsåtgärder vanliga.

Syftet med denna studie har varit att tekniskt och ekonomiskt studera hur några olika jordförstärkningmetoder kan användas i samband med byggande av gropvärmelager i lera. De jordförstärkningsåtgärder som har ingått i studien är kalkpelare, jetinjektering, sänkbrunn och slitsmur vilka har jämförts med att schakta med naturliga släntlutningar så att jordförstärkningsåtgärder ej behövs. Två lagervolymer har beaktats, 40 000 m³ och 10 000 m³. Ett antal olika geotekniska förutsättningar har också beaktats. I samtliga fall består jorden av lera/silt. Däremot har studerats hur olika hållfasthet hos jorden och hur olika djup till fast botten påverkar valet av och mängden förstärkningsåtgärd samt kostnaderna för åtgärderna.

Kalkpelarmetoden innebär pelarvis stabilisering av jorden (leran) in situ genom inblandning av kalk, cement eller annat stabiliseringsmedel. Efter härdning har jordens lastupptagande förmåga väsentligt förbättrats. Kalkpelarna görs för närvarande inte längre än 15 meter vilket av stabilitetsskäl begränsar metodens tillämpbarhet i samband med gropvärmelager till områden där lerdjupet är mindre än 15 meter. Den färdiga kalkpelaren är ca 0.5 meter i diameter och pelarna sätts med detta centrumavstånd så att en mur bildas. När erforderlig mängd kalkpelare har satts kan gropen grävas ur innanför det stabiliserade området.

Jetinjektering är en metod som kan användas i de flesta jordarter och till ett djup av 25 meter. En vatten-cement blandning sprutas ut i jorden med hjälp av en jetstråle. Antingen bildas pelare eller en skärmvägg. Jetinjektering utförs till erforderlig bredd utefter den planerade gropens ytterkant och gropen grävs ur på samma sätt som vid kalkpelarförstärkning.

Med sänkbrunn avses en cylinderformad betongkonstruktion som trycks ner i jorden. Betongkonstruktionen har formsatts, armerats och gjutits på markytan ovanför aktuellt läge. Sänkbrunnen är dimensionerad för att klara jordtrycken då gropen grävts ur.

Med slitsmurstekniken erhålles samma resultat som med sänkbrunnsteknik. Det som skiljer är byggtekniken. I slitsmursfallet används en i jorden urgrävt dike som form för gjutning. Diket är lika djupt som den blivande gropen. Denna metod kan användas i de flesta jordarter.

Ytterligare ett alternativ har studerats kallat massbalansalternativet. Där grävs halva gropen ur (5 meter) och massorna används för att bygga upp resterande höjd (5 meter) ovan markytan. Samtliga av ovan beskrivna förstärkningsmetoder kan användas för förstärkning av jorden. Därefter byggs en betongmur upp kring omkretsen på den blivande gropen och slutligen grävs massorna ur och läggs bakom denna.

Av de utförda dimensioneringarna och kostnadssammanställningen har följande slutsatser dragits.

- Vid stora lerdjup (>15 meter) blir jordförstärkningsåtgärderna kostsamma. Vid lerdjup mellan 5-15 meter blir samtliga metoder mycket ekonomiska intressanta.
- Massbalansalternativen ger de lägsta kostnaderna ca 110 kr/m³ för volymen 40 000 m³ och ca 200 kr/m³ för volymen 10 000 m³.
- Kostnaden för en 10 meter djup urschaktad grop förstärkt med kalkpelare, sänkbrunn eller slitsmur ligger något högre än för massbalansalternativen, ca 160 kr/m³ för volymen 40 000 m³ och ca 250 kr/m³ för volymen 10 000 m³.
- Jetinjektering är den dyraste jordförstärkningsmetoden. Det bör dock observeras att jetinjektering kan användas i alla jordarter och att kostnaderna i jämförelse med en traditionell ståltank på markytan ändå kan bli lägre.

Kostnaden för att bygga gropen i naturlig släntlutning är ca 200 kr/m³ för volymen 40 000 m³ och ca 320 kr/m³ för volymen 10 000 m³. I jämförelse med då sidorna är vertikala ökar värmeförlusterna vid högtemperaturlagring mycket drastiskt vilket inte värderats i kostnadssammanställningen. Det ökade behovet av markareal, ca 3-6 ggr så mycket, har ej heller värderats.

I ovanstående kostnader ingår jordförstärkning, jordschakt, borttransport av massor, tätskikt, isolering och lock. För en ståltank om 40 000 m³ ligger kostnaderna för motsvarande arbeten (grundläggning, markarbeten och tank) på ca 400 kr/m³. Gropvärmelager kan således kostnadmässigt konkurrera med ståltankar. Dessutom blir värmeförlusterna mycket mindre från gropvärmelagret.

I system där gropvärmelagret enbart omsätts en gång per år måste den lagrade energin vara gratis för att erhålla rimlig energikostnad. Om lagret däremot omsätts 20 gånger per år måste skillnaden i kostnad för laddningsenergi och ersättningsenergi uppgå till 5 öre/kWh för att lagret skall minska energikostnaden.

1. BAKGRUND OCH FÖRUTSÄTTNINGAR

Bakgrund

Vid tillämpningar där t ex solfångare används i kombination med ett värmelager eller där t ex ett värmelager används i anslutning till ett kraftvärmeverk för att utjämna obalans mellan kraft- och värmebehov måste stora effekter momentant kunna lagras och tas ut. Lagret kan fungera både som korttidslager och som säsongslager.

Den effekt som är möjlig att ladda med eller ta ut ur ett värmelager där värmelagringsmediet är jord eller berg beror av värmeväxlarens storlek, värmeledningsförmågan och temperaturskillnaden mellan vätskan i slangen och omgivande mark. I ett värmelager där värmelagringsmediet är vatten beror in- och urladdningseffekt av temperaturskillnaden mellan in- och utgående vatten och möjligt flöde. Den relativt sett högre temperaturen som kan hållas då lagringsmediet är vatten i jämförelse med jord/berg samt den relativt sett högre värmeväxlarkapaciteten medför att betydligt större effekter kan lagras eller tas ut ur ett lager i vatten.

Lågtemperaturlager med temperaturen mindre än 50°C måste anslutas till en värmepump för att värmen skall kunna tillgodogöras för uppvärmningsändamål. El är, vid differentierad taxesättning, som dyrast vid delar av dessa perioder. Högtemperaturlager med temperaturer över 70°C behöver normalt ingen värmepump vilket således är fördelaktigt då inget elberoende föreligger. Värmelagring i jord/berg kräver ofta värmepump för att erforderlig temperatur skall erhållas. Vatten kan däremot utan problem värmas till temperaturer mellan 50°C - 90°C och därför är inte en värmepump nödvändig vid lagring av värme i vatten.

Vid högtemperaturvärmelagring i vatten behöver volymen vara ca 10.000 m³ för tillämpningar på mindre gruppcentralnivå, t ex i kombination med solfångare och ca 5000-50 000 m³ för tillämpningar i kombination med fjärrvärme/kraftvärme.

Värmelager där värmelagringsmediet utgörs av vatten kan indelas i tankar, berggrum, nedlagda gruvor och tunnlar samt gropar (gropmagasin).

Ståltankar används idag enbart för korttidslagring då dessa är oisolerade eller mycket lite isolerade.

Berggrum måste vara mycket stora (>50.000 m³) för att värmeförlusterna skall kunna hållas på en rimlig nivå. Nedlagda gruvor och tunnlar har ofta stor mantelyta i jämförelse med volymen vilket medför stora värmeförluster varför endast värmelagring vid låga temperaturer är ekonomisk.

Värmelagring av varmvatten i gropar bedöms enligt Energilagring (1986) vara lämpligt i gropar av storlek mellan 10.000 m³ och 50.000 m³. Vattnet har en temperatur av 50°C-90°C och lagret skall kunna fungera som dygns-, vecko- eller säsongslager eller som en kombination av dessa. I Sverige har hittills endast ett fåtal gropvärmelager byggts och då företrädesvis i berg.

Teknik

I berg kan en grop med vertikala väggar sprängas ut, väggarna tätas och värmeisolerats. Byggekostnaderna för dessa gropar är i dagsläget höga då sprängningsarbeten är kostsamma. Tätskikt som tål höga temperaturer behövs för att förhindra att kallt vatten läcker in i gropen eller att det uppvärmda vattnet läcker ut ur gropen. Väggar och botten måste värmeisoleras.

Släntlutningarna hos en grop i jord (grus, sand, silt och lera) kan utan förstärkningsåtgärder inte göras brantare än ca 1:3 i sand och

grus och ca 1:8 i lera och silt vid ett gropdjup på 10 m och med geotekniska egenskaper enligt det studerade alternativet. Lagrets överyta blir mycket stor och får till följd att värmeförlusterna blir stora om inte mängden isolering ökas. Stora markytor tas dessutom i anspråk. Genom att förstärka jorden kan branta släntlutningar erhållas även för gropar i jord.

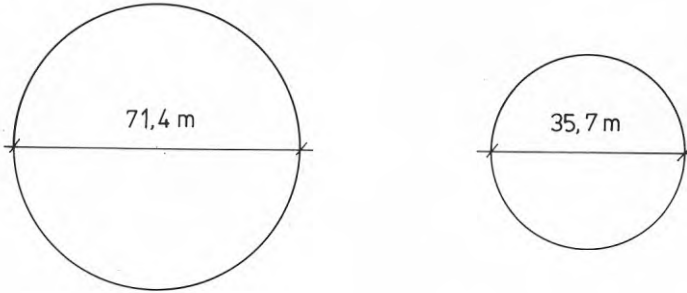
Studerade alternativ

I denna teknisk-ekonomiska studie har granskats olika förstärkningsåtgärder, som kan användas i främst lera/silt för att möjliggöra byggande av gropar med vertikala väggar.

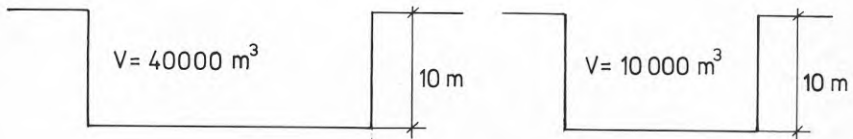
De alternativ som har studerats är jordstabilisering med kalkpelare alternativt jetpelare, att bygga en slitsmur eller en sänkbrunn som står emot jordtrycken och slutligen ett massbalansalternativ där halva gropdjupet grävs ur efter jordförstärkning med någon av ovanstående metoder och övre halvan av gropdjupet byggs upp ovan naturlig markyta. Dessa alternativ har jämförts med att bygga i oförstärkt jord med naturlig släntlutning i lera/silt.

Två volymer har beaktats. För tillämpningar i samband med kraftvärmeverk bedöms volymen 40.000 m^3 vara realistisk och för tillämpningar i samband med solfångare vid gruppcentraler bedöms 10.000 m^3 vara lämplig volym. I båda fallen har höjden på gropen valts till 10 m. Med vertikala väggar blir då diametern 71,4 m för $V=40\ 000 \text{ m}^3$ och 35,7 m för $V=10\ 000 \text{ m}^3$ se figur 1.1.

PLAN



SEKTION



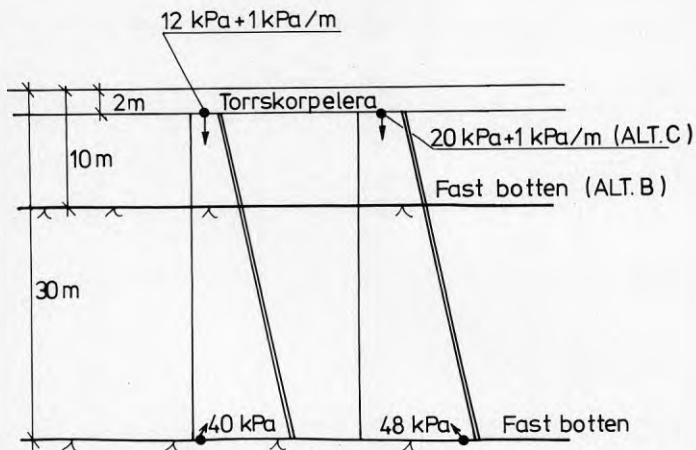
Figur 1.1. Lagervolymer och geometri.

Den schematiska jordprofilen utgörs av lera/silt med överst två meter torrskorpa. Därunder är skjuvhållfastheten 12 kPa och tillväxer med 1 kPa/m till fast botten, 30 m under markytan. Dessa förutsättningar kallas alternativ a.

Vissa specialfall har beaktats som är:

- alt b) fast botten ca 10 m under markytan.
- alt c) skjuvhållfastheten är 20 kPa + 1 kPa/m räknat från underkant torrskorpa.
- alt d) alt b och c kombinerat.
- alt e) schaktning under vatten. Hållfasthetsegenskaper enligt ursprungsalternativ.

De geotekniska förutsättningarna visas i figur 1.2.

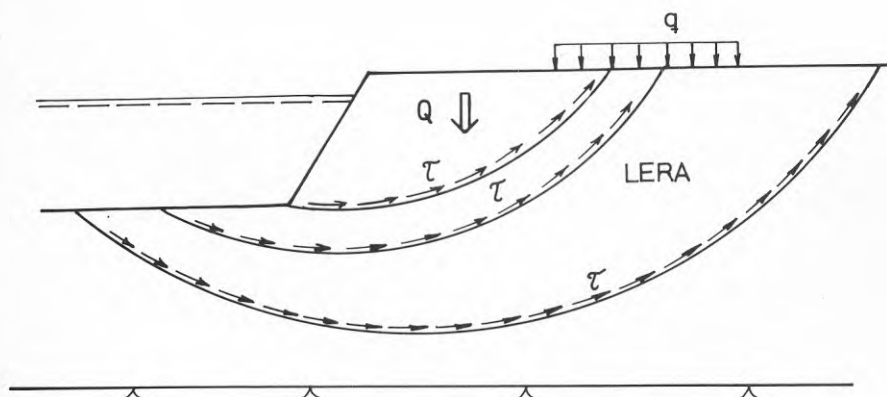


Figur 1.2. Geotekniska förutsättningar.

2. ANLÄGGNINGSTEKNIK FÖR GROPVÄRMELAGER I LERA

2.1 Behov av förstärkningsåtgärder

För att gropvärmelager med vertikala väggar skall kunna utföras i lera måste jorden på något sätt förstärkas. Jorden måste ha tillräcklig säkerhet mot släntskred och bottenuppträckning, se figur 2.1 och 2.2. Normalt krävs att säkerhetsfaktorn (F) större än 1,5.



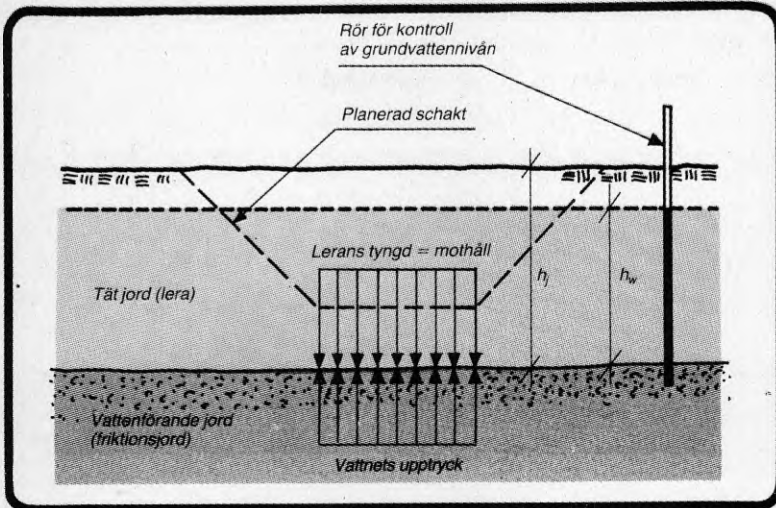
$$F = \frac{\text{mothållande moment}}{\text{pådrivande moment}}$$

Mothållande moment består av skjuvhållfastheten, τ , utefter glidytan och om gropen är vattenfylld egenvikten från denna.

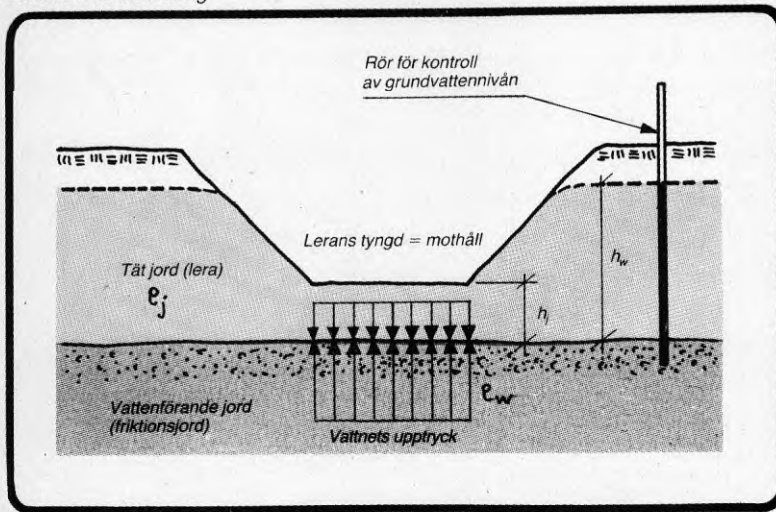
Pådrivande moment består av egenvikten av massorna ovan glidytan, Q , samt eventuell last, q .

Figur 2.1. Säkerhetsfaktorn, F, mot släntstabilitet.

Mothåll före schaktning



Mothåll efter schaktning



Figur 2.2. Säkerhet mot bottenuppträckning, SBEF (1985).

$$h_j \cdot e_j > h_w \cdot e_w$$

Risken för släntras respektive bottenuppträckning är som störst under byggnadstiden eftersom gropen då ej är vattenfylld. När gropmagasinet tagits i drift kommer gropen alltid att vara vattenfylld (om inga reparationer el dyl måste utföras som kräver att gropen töms) vilket väsentligt förbättrar säkerheten. Vid dimensionering av förstärkningsåtgärder har utgått från att $F = 1,5$ även i byggskedet. I vissa fall måste schaktningsarbetet utföras under vatten för att stabilitetskraven skall kunna uppfyllas.

Då den fasta botten (t ex friktionsjord eller berg som glidyten ej kan gå ner i) ligger 30 meter under markytan (fall a) söker sig glidyterna ner under förstärkningsåtgärder och blir då långa och djupa. Då den fasta botten ligger 10 m under markytan (fall b), dvs i princip i botten på gropen, kan inte dessa långa och djupa glidytor bildas. Stabilitetsåtgärderna blir då mindre omfattande eftersom de inte behöver utföras till samma djup som i fall a. Risken för bottenuppträckning blir däremot betydligt större eftersom lerans tyngd (= mothåll) minskar.

Spontning är en förstärkningsåtgärd som ofta används vid schaktning i tätorter. Spontning är dyrbart och i detta fall då sponten inte kan återanvändas utan måste sitta kvar blir metoden enligt överslagsberäkningar betydligt kostsammare än övriga alternativ.

Förstärkningsåtgärderna måste givetvis utföras innan gropen grävs ur. När kalkpelare eller jetinjektering utförs kommer gropens sidor att bestå av stabiliserad lera. Lera kan i praktiken betraktas som ett "tätt" material (permeabiliteten $k < 10^{-9}$ m/s) vilket innebär att det inte finns någon risk för vattenläckage genom leran.

2.2 Grop utan förstärkningsåtgärder

Geometrin hos en grop i lera utan förstärkningsåtgärder beror till stora delar på lerans skjuvhållfasthet, djupet till fast botten och gropens djup. Förutsättningar för beräkningarna i denna studie framgår av kap 1.

Utförda beräkningar (alt a) visar att för erforderlig säkerhet kan gropens sidor ej göras brantare än ca 1:8 för volymen 40.000 m³ och ca 1:7 för volymen 10.000 m³. Gropen får formen av en kon med djupet 8,5 m respektive 6 m.

Om gropen är vattenfylld, 8 m vatten (alt e) kan släntens sidor schaktas i lutningen 1:2 och gropen får då formen av en stympad kon med djupet 10 m.

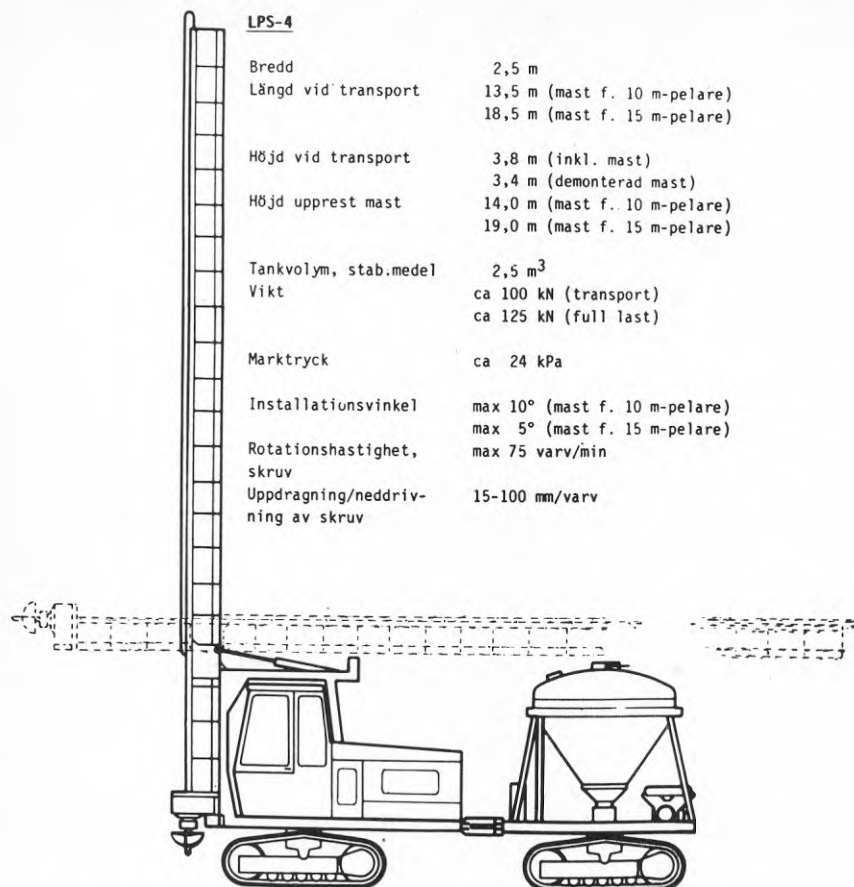
2.3 Kalkpelarförstärkning

Metodbeskrivning

Kalkpelarmetoden innebär pelarvis stabilisering av lös jord in situ genom inblandning av kalk, cement eller annat stabiliseringsmedel. Stabiliseringen medför framför allt förbättrade deformationsegenskaper hos jorden (minskad kompressibilitet) samt förbättrad lastupptagande förmåga totalt (ökad skjuvhållfasthet).

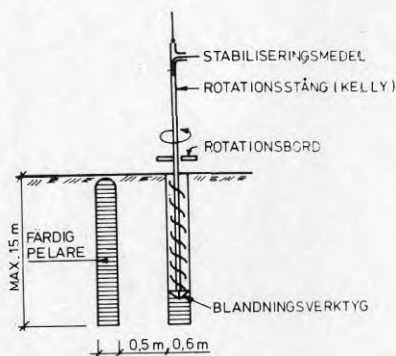
Metoden har praktiskt använts i drygt 10 års tid. Tillämpningsområdena har främst varit grundförstärkning för uppfyllnader, t ex vägbankar, stabilisering av ledningsschakter i stället för spont samt grundläggning av ledningar. På senare tid har metoden även använts vid grundläggning av byggnader och vid stabilisering av slänter.

Kalkpelarna kan för närvarande inte utföras längre än 15 m på grund av befintliga kalkpelarmaskinens längsta mast, se figur 2.3.

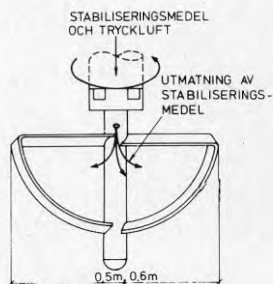


Figur 2.3. Skiss på kalkpelarmaskin, Ahnberg (1986).

Under neddrivningen av inblandningsverktyget roteras detta samtidigt som det trycks ned, se figur 2.4. Används maximal hastighet till 15 m djup tar detta moment ca 2 minuter. Stabiliseringsmedlet blåses ut med hjälp av tryckluft genom ett munstycke alldeles ovan inblandningsverktyget. Inblandningen sker genom att inblandningsverktyget roteras under uppdragning. Jord och stabiliseringsmedel rörs om och blandas. En 15 m lång pelare tillverkas på ca 8 min.



a) Principfigur.

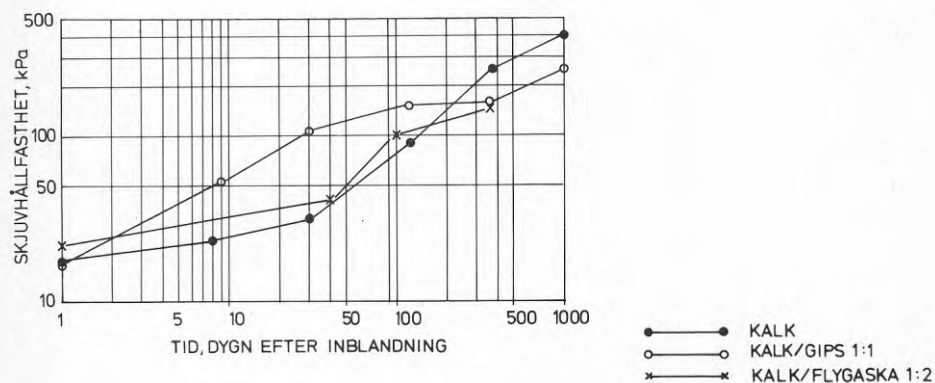


b) Inblandningsverktyg.

Figur 2.4. Tillverkning av pelare, Ahnberg (1986).

Den färdiga kalkpelaren är 0,5-0,6 m i diameter. För att kalkpelarna ska samverka och bilda en "mur" måste dessa placeras med centrumavståndet 0,5 m.

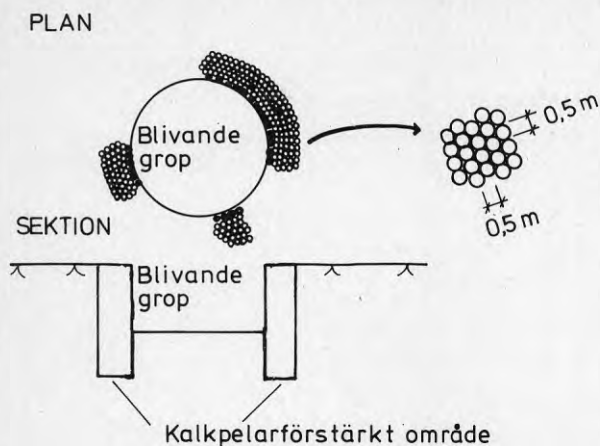
Som stabiliseringsmedel kan osläckt kalk, cement, gips och flygaska användas. Hållfastheten har bedömts i laboratorieförsök och tillväxer med tiden vilket mycket approximativt visas i figur 2.5.



Figur 2.5. Approximativ hållfasthetstillväxt för några olika stabiliseringsmedel.

Tillämpning

Vid kalkpelarförstärkning för ett gropvärmelager sätts kalkpelare i ett flertal cirklar där den innersta cirkeln har en diameter som är lika stor som diametern på den blivande gropen. Antalet cirklar och längden på kalkpelarna beror på fasta bottens läge och jordens skjuvhållfasthet. Kalkpelarna sätts med centrumavståndet 0,5 m både utefter själva cirkeln samt mellan cirklarna så att dessa bildar en "mur", se figur 2.6.



Figur 2.6. Principskiss över kalkpelarförstärkning.

Vid beräkningarna av stabiliteten har hållfastheten efter 1 månad hos stabiliseringsmedlet kalk/flygaska använts. Detta innebär att gropen ej kan grävas ur förrän 1 månad efter att kalkpelarna tillverkats men medför samtidigt att säkerhetsfaktorn successivt ökar.

2.4 Jetinjektering

Metodbeskrivning

Jetinjektering är en metod som kan användas i de flesta jordarter och till ett djup av 25 m. Som injekteringsmedel används en vatten-cementblandning. Där stora krav på täthet ställs, kan cementen blandas med bentonit. Injekteringen kan formas till en pelare med diametern 1,0-2,5 m eller skärmväggar med tjockleken 0,05-0,2 m.

Utförandet av en jetpelare omfattar tre moment, se figur 2.7. Till att börja med borrar ett pilothål med ca 150 mm diameter. Därefter dras borrstål och borrkrona upp och ett injekteringsrör sänks ner i hålet till botten. Under långsam rotation lyfts injekteringsröret uppåt. En jetstråle av luft och vatten under högt tryck bryter ner jordens kornskelett och injekteringsmedel (cement och vatten) sprutas in i den

uppluckrade jorden. Under själva injekteringsmomentet strömmar överskottsslam bestående av jord, vatten och cement upp genom pilothålet. Slammet måste deponeras i sedimentationsbassänger eller borttransporteras.

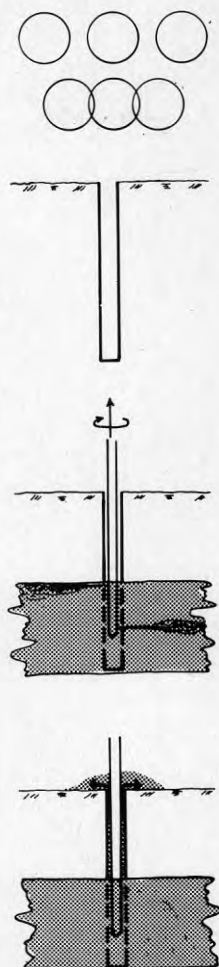
Vid utförandet av en tätskärm, se figur 2.8, borrar pilothål, med diametern 150 mm, i en rad c/c 0,5-2,0 m i det blivande skärmläget. Injekteringen riktas mot bredvidliggande hål varvid en panel formas mellan de två hålen. Slammet strömmar upp genom det hål som strålen riktas mot. Slammet tas omhand som vid pelarinjektering.

Den utrustning som krävs för att utföra en jetinjektering är bormaskin för jordborrningsutrustning, injekteringsutrustning och slambehandlingsutrustning.

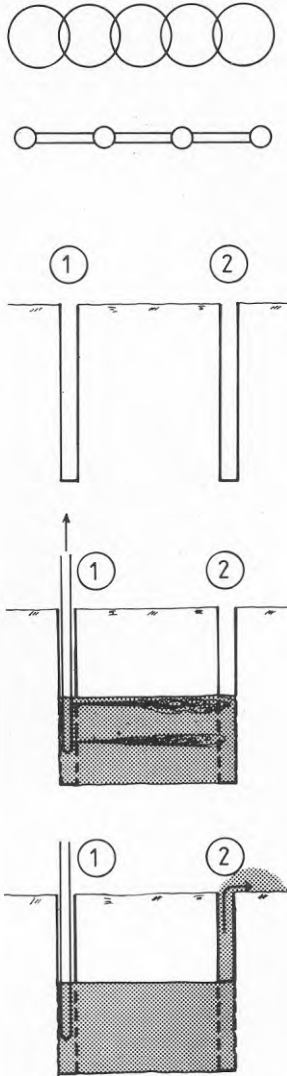
Skjuvhållfastheten i jetinjekterad lera är ca 300 kPa.

Tillämpning

Jetpelare eller skärmväggar sätts i en cirkel med samma diameter som den blivande gropen. Bredden på "muren" måste vara minst 2 meter för erforderlig säkerhet. Bredden samt till vilket djup "muren" måste utföras beror på fasta bottens läge samt jordens skjuvhållfasthet. Efter att jorden på detta sätt förstärkts kan gropen grävas ur.

Jetpelare

Figur 2.7. Utförande av jetpelare, Eriksson (1982).

Tätskärmar

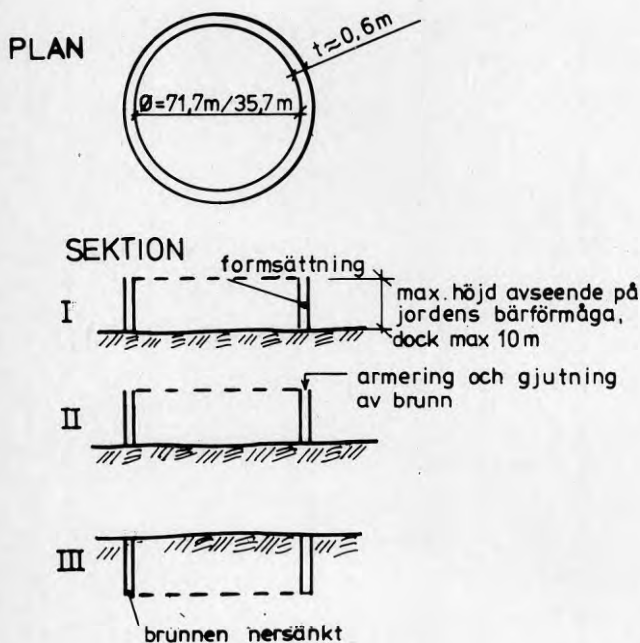
Figur 2.8. Utförande av jetskärm, Eriksson (1982).

2.5 Sänkbrunn

Med sänkbrunn avses i detta projekt en cylinderformad betongkonstruktion som utgör stabiliserade och tätande skärm mellan vattnet i gropen och omgivande lera.

Arbetsutförandet är följande:

Formsättning utförs på markytan i det läge i plan där brunnen skall gjutas och tryckas ner. Därefter armeras och gjuts till en och samma höjd runt om. Brunnen trycks ner tills överkanten är i markytan. Om marken kan bära trycket från hela brunnen armeras, gjuts och trycks brunnen ner i en enda etapp. Om marken däremot har för låg hållfasthet så att brunnen sjunker ner innan den är färdiggjuten uppdelas höjden på flera etapper. När första delen har armerats, gjutits och tryckts ner armeras och gjuts nästa del ovanpå den förra tills erforderlig höjd har erhållits, se figur 2.9.



Figur 2.9. Arbetsmetodik för sänkbrunn.

För att styra sänkbrunnen till rätt läge måste troligtvis nedborrade stag användas.

När sänkbrunnen kommit på plats kan leran innanför grävas ur.

2.6 Slitsmur

Alternativet slitsmur resulterar i samma lagerutformning som sänkbrunnsalternativet. Skillnaden mellan dessa metoder ligger i byggmetodiken. I slitsmursfallet används ett i jorden urgrävt dike som form för gjutning i stället för att bygga en form på markytan.

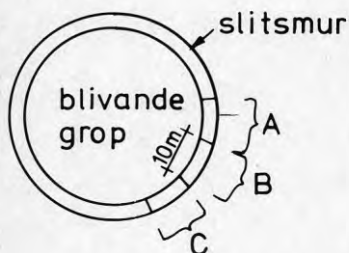
Arbetet går till på följande sätt, se figur 2.10.

En 10 m djup grav, ca 0,6-1,0 m bred, grävs utefter den blivande gropens omkrets. Grävning samt armering och gjutning i graven sker successivt i ca 10 m intervaller så att graven inte står öppen en längre tid. Det är möjligt att lägga in isolerskivor av t ex cellplast i bakkanten på graven innan gjutningen. Isolerskivorna kan läggas till önskvärt djup t ex från markytan och till halva grophöjden, 5 m. Armering och isolering sker i "korgar" som sänks ned från markytan före gjutning.

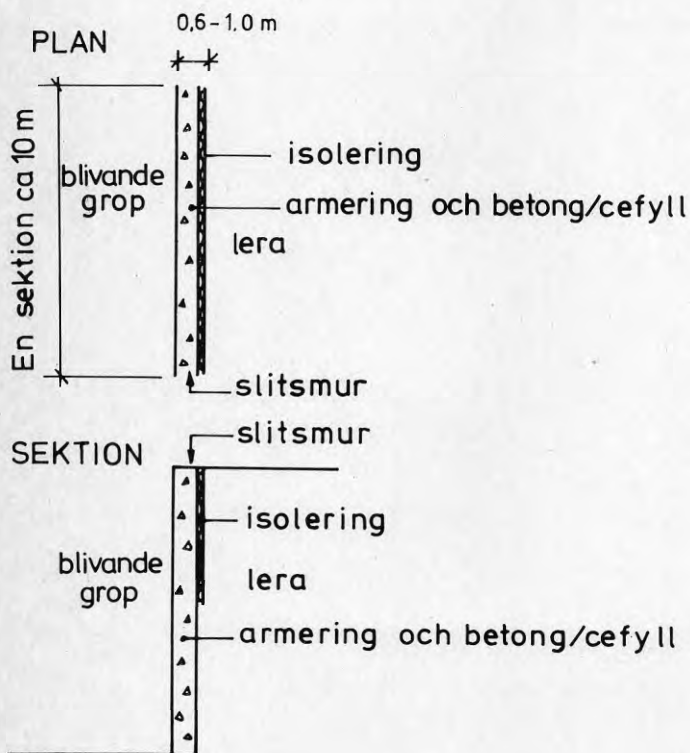
När slitsmuren är färdig runt hela omkretsen kan gropen grävas ur.

I stället för betong kan cementstabiliserad flygaska, som bl a marknadsförs under namnet Cefyll, användas. Cefyll är, ifall avståndet till kolförbränningsanläggningar är litet, betydligt billigare än betong. Tryckhållfastheten hos Cefyll är däremot lägre än för betong och slitsmuren måste därför göras ca 50% bredare. Erfarenheterna från att använda Cefyll är små och måste utvecklas ytterligare för att användas i dessa sammanhang.

PLAN



1. A grävs ur till 10 m (gropdjup)
2. B -"-
3. A isoleras om så önskas
4. A armeras och gjuts
5. C grävs ur till 10 m
6. B isoleras om så önskas osv.



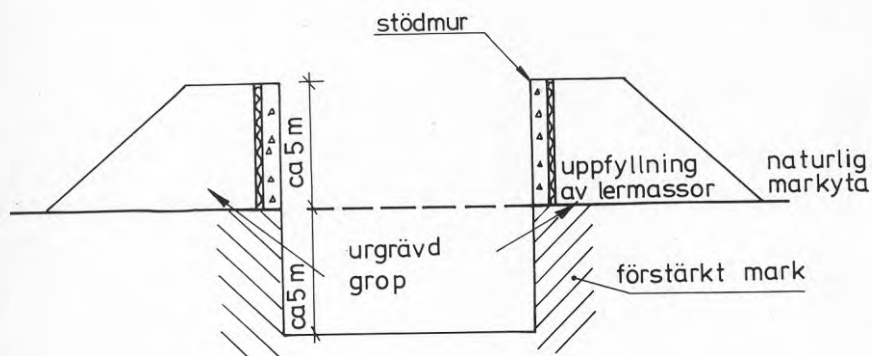
Figur 2.10. Arbetsmetodik för slitsmur.

2.7 Massbalans

För att minska kostnaderna för borttransport av lermassorna som grävs ur har ett alternativ studerats där målsättningen har varit massbalans.

Marken förstärks med någon av tidigare beskrivna metoder (kalkpelare, jetinjektering, sänkbrunn eller slitsmur). En 4-5 m hög stödmur byggs utefter den blivande gropens omkrets. Vid urgrävning av gropen läggs massorna på baksidan av stödmuren, se figur 2.11.

Isolering, t ex cellplast, kan läggas in bakom betongen före gjutningen.



Figur 2.11. Principskiss massbalansalternativ.

3. UTFORMNING AV TÄTSKIKT OCH ISOLERING

I de alternativ där gropens väggar består av stabiliserad lera måste dessa på något vis täckas. Annars finns risk för att lerpartiklar och lermineraller löses ut och orsakar oacceptabla problem. Som separationsskikt kan gummiduk, betong eller metall användas, se vidare kapitel 4.2.

När en slitsmur eller sänkbrunn skall utgöra gropens begränsning schaktas leran bort fram till betongväggen. Betongväggen utgör på så vis även tätskikt. I botten på gropen måste en bottenplatta gjutas för att separera vattnet i gropen från underliggande lera.

Lera har en relativt låg värmeledningsförmåga ($\lambda_{\text{lera}} \approx 1,0$ W/m, °C, $\lambda_{\text{berg}} \approx 3,5$ W/m, °C) vilket medför att det inte är lika viktigt att isolera sidorna och botten på en grop i lera som på en grop i berg. För att begränsa värmeförlusterna genom gropens överyta krävs dock samma mängd isolering i båda dessa fall.

Som underlag för kostnadsberäkningarna har följande utformningar av tätskikt och isolering valts.

Gropvärmelagrets överyta eller lock har samma utformning i samtliga fall och består uppifrån sett av en butylgummiduk för skydd mot regn och snö samt 0.5 meter isolering av cellplast. Detta bärs upp av uppspända virar mellan kanten på lagret och en pelare i mitten av lagret.

Då gropmagasinet byggs i oförstärkt jord görs slänterna i lutningen 1:7-1:8, se kapitel 2.2. Slänterna täcks med 10 cm armerad betong. Värmeisoleringen bestående av 0,5 m cellplast läggs i markytan runt lagret med bredden 2 m.

I alternativen där jordförstärkningen utgörs av kalkpelare eller jetinjektering tätas botten med 10 cm svagt armerad betongplatta. Sidorna tätas med 0.6 mm kopparplåt.

I alternativen sänkbrunn och slitsmur utgör jordförstärkningsåtgärderna även tätskikt i sidled. Botten tätas med 10 cm svagt armerad betongplatta.

Massbalansalternativet utformas på olika vis beroende på val av förstärkningsåtgärd. I samtliga fall tätas botten med 10 cm svagt armerad betongplatta. Om kalkpelare eller jetinjektering utförts tätas sidorna utefter den urschaktade gropen med 6 mm kopparplåt. Utefter den övre delen där en betongmur byggts upp fungerar muren som tätskikt. När förstärkningsåtgärderna består av en sänkbrunn eller slitsmur behövs ingen ytterligare tätning i sidled. Isolering läggs in vertikalt bakom betongmuren och består av 0.5 m cellplast från markens överkant och till 2 m djup.

4. VÄRDERINGAR AV TEKNIKER OCH METODER

De fem olika förstärkningsåtgärderna samt referensalternativet "grop utan förstärkningsåtgärder" har utvärderats ekonomiskt i kapitel 5. Kostnader för förstärkningsåtgärder, tätskikt, isolering, m m har medtagits.

Värmeförlusterna har beräknats för olika utformningar på lagret se kapitel 4.1. Förlusterna kan värderas i årliga ökade/minskade energikostnader relativt referensalternativet. Värdet av värmeförlusterna är ej inkluderade i kostnadsberäkningarna i kapitel 5.

Det finns andra fördelar och nackdelar med respektive förstärkningsåtgärd som generellt sett inte går att värdera i kronor. Dessa är t ex kostnader för markareal, vilka således ej är medtagna i kostnadsberäkningarna.

I detta kapitel påpekas fördelar och nackdelar i dessa avseenden med respektive utförande som i ett aktuellt fall kan ha stor betydelse.

4.1 Värmeförluster

Värmeförluster från gropvärmelager är viktiga att beakta vid säsongslagring av värme. Vid ökat antal energiomsättningar i ett lager tenderar emellertid de relativa värmeförlusterna att minska för att slutligen gå mot noll.

En rad faktorer påverkar ett lagers värmeförluster varav de viktigaste är eventuellt grundvattenläckage genom lagret, lagrets geometri och storlek, temperaturnivå, grad av isolering samt markens värmeöverförande egenskaper.

Värmeförlusterna från ett gropvärmelager kan delas in i förluster direkt mot mark ($Q_{m,mark}$) samt förluster genom ovanliggande isolering ($Q_{m,iso}$) och sidoisolering. Den totala stationära värme-

förlusten Q_m kan därför skrivas:

$$Q_m = Q_{m, iso} + Q_{m, mark}$$

Enligt Claesson et al (1985) kan delförlusterna uttryckas som

$$Q_{m, iso} \approx \frac{\lambda_i (T_m - T_0)}{d_i} (\pi \cdot R^2 + \pi \cdot R \cdot D_i)$$

$$Q_{m, mark} = \lambda_{mark} \cdot (T_m - T_0) R \cdot h (H/R, D_i/H)$$

λ_i = Isoleringens värmekonduktivitet, W/m, K

d_i = " tjocklek, m

D_i = Vertikalt kantisoleringsdjup, m

T_m = Årsmedeltemperatur för lageryta, °C

T_0 = Årsmedeltemperatur för markyta, °C

R = Lagrets radie, m

H = Vertikalt lagerdjup, m

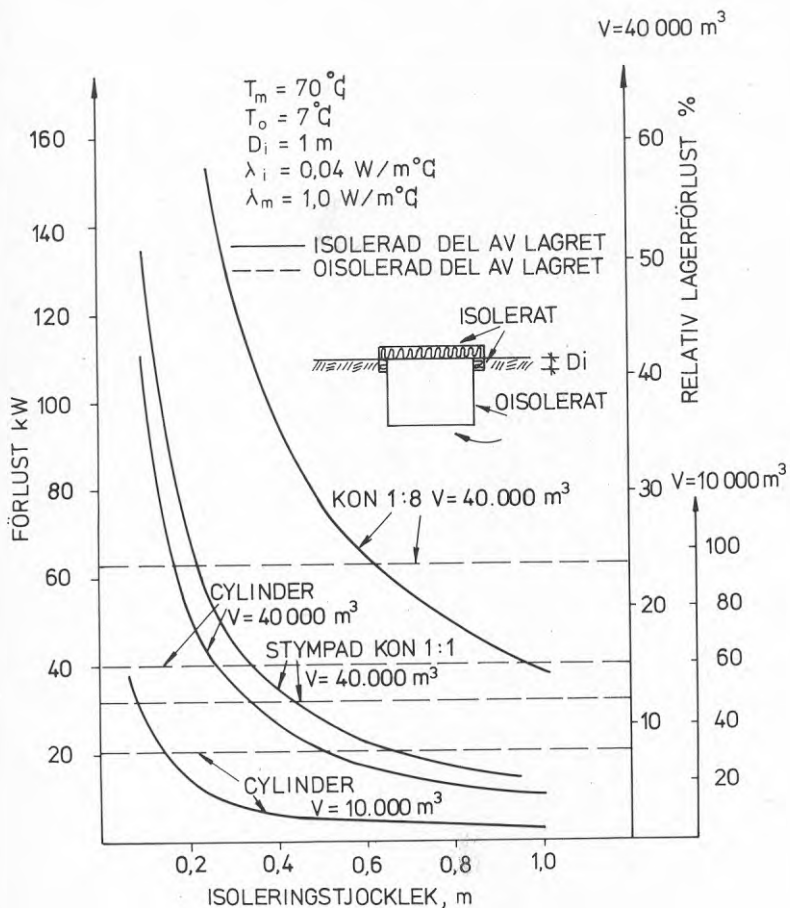
λ_{mark} = Markens värmekonduktivitet, W/m, K

Som ses i uttrycken ovan är förlusten från den isolerade delen av lagret direkt proportionell mot lagrets medeltemperatur samt isoleringens tjocklek och egenskaper. Från den oisolerade delen av marklagret är förlusten direkt proportionell mot temperaturen i lagret och markens värmeledningsförmåga. Lagrets geometri och storlek är också viktiga parametrar.

De stationära värmeförlusternas beroende av lagerstorlek, lagergeometri och isoleringstjocklek illustreras i figur 4.1. Vid liten isoleringstjocklek domineras värmeförlusterna av förluster genom isolerade delar av lagret. En utplaning av värmeförlustens storlek erhålls dock vid ökad isoleringstjocklek. Värmeförlustens andel av den uttagbara energimängden beror även starkt av lagrets storlek. Det bör observeras att stationära förhållanden först inträder efter ett antal år. De instationära förlusterna dessförinnan är större.

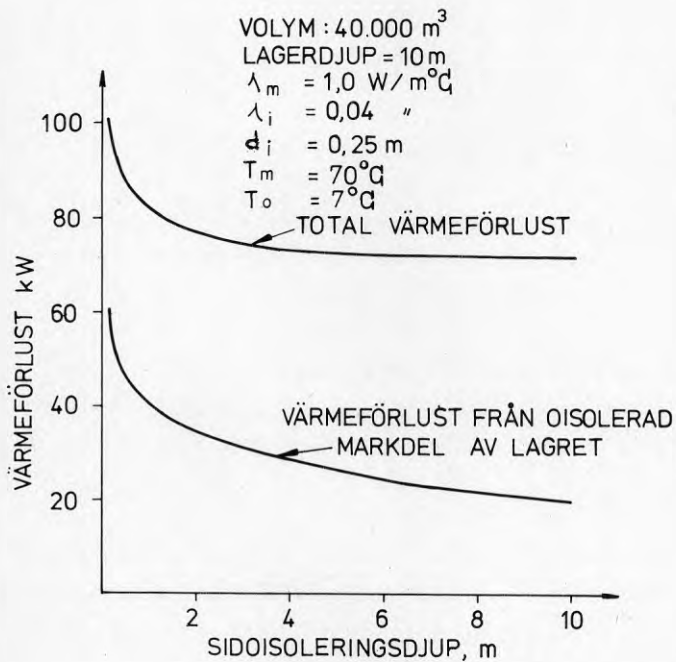
Lagrets geometri har också en anseelig inverkan. Om ett lager byggs i konform i stället för cylinderform med bibehållen volym ökar värmeförlusterna genom lock- och kantisolering kraftigt. Detta kan kompenseras med en ökad isoleringstjocklek. Förlusten mot den oisolerade markdelen tenderar att minska för en relativt spetsig kon för att sedan åter öka för en trubbigare kon. Förklaringen består i två motverkande processer. Dels minskar värmeförlusten vid ökad konform pga att energin får transporteras en lång sträcka innan den når markytan. Värmeförlusterna ökar dock samtidigt pga att omslutningsarean ökar kraftigt. Beräkningen av värmeförlust från oisolerad del av lagret för kon med lutning 1:8 är approximativ.

Den relativa lagerförlusten kan definieras som kvoten mellan värmeförlust och inlagrad nyttjningsbar energimängd. Av figur 4.1 framgår det att en kon med lutning 1:8 har ca 50% lagerförlust vid en isolertjocklek av 0,5 m vilket är mer än dubbelt så mycket som en cylinder med samma djup och isoleringstjocklek ($d_1=0,5\text{m}$). Vid så höga värmeförluster är dock förutsättningen för resonemanget ej längre relevant eftersom den avsedda temperaturen i lagret har reducerats.



Figur 4.1. Stationär värmeförlust och relativ lagerförlust från gropvärmelager. Förlusterna är uppdelade i isolerad och oisolerad del av lagret. Det utnyttjningsbara energiinnehållet i lagret är baserat på $\Delta T=50\text{ }^\circ\text{C}$ och endast en energiomsättning i lagret per år.

I figur 4.2 visas den vertikala sidoisoleringens inverkan på värmeförlusterna för en cylinder. Som synes krävs endast ett måttligt kantisoleringdjup för att totalförlusten skall plana ut, under givna förutsättningar.



Figur 4.2. Värmeförlustens inverkan av olika sidoisoleringdjup, D_i

4.2 Täck- och tätskikt

Tätskiktet skall utgöra ett separerande skikt mellan vattnet i gropmagasinet och omgivande mark. Vilket tätskikt som kan användas beror på flera faktorer som:

- temperaturnivå
- om vattnet i gropen värmeväxlas eller används direkt till t ex ett fjärrvärmenät
- om gropens sidor är förstärkta med en betongmur eller om jorden är i direkt kontakt med vattnet
- permeabiliteten hos omgivande jordart

I dagsläget kan tätskikten tillverkas av gummi, metall eller betong. I denna studie har förutsatts att den maximala vattentemperaturen är 90 °C vilket innebär att gummidukar ej är lämpade.

En metalliner som omsluter hela gropen bedöms enligt Eriksson, Zinko vid Studsvik Energiteknik kunna göra gropen syrediffusionstät. Metallinen klarar också höga temperaturer. Metalliner har ännu ej testats men utveckling pågår.

Chalmers tekniska högskola, geologiska institutionen, har i laboratorieskala undersökt betongs urlakningsegenskaper vid vattentemperaturer mellan 90 °C och 200 °C. Av studien (Claesson, T; in paper) framgår att betongsort, temperaturnivå och tid för temperaturpåverkan är viktiga parametrar. Inledningsvis erhålls höga koncentrationer av många joner i vattnet. Successivt avtar dock de flesta jonkoncentrationerna kraftigt med tiden, speciellt om kvartssand använts som ballastmaterial. En ökning av reaktionstemperaturen medför inte alltid en ökad jonkoncentration i reaktionsvattnet. Det innebär också en ökad utfällning av tidigare lösta specier på tillgängliga ytor samtidigt som reaktionsförloppet påskyndas. Utfällningen på betongytorna minskar därmed fortsatt urlakningsbenägenhet för betongen. Hur betong uppför sig vid en varierande temperatur inom intervallet 50-90 °C omfattas ej av studien. Några alarmerande hållfasthetsminskningar har ej observe-

rats vid hetvattenpåverkan.

Lera som vanligtvis är vattenmättad kan betraktas som ett syrediffusionstät material. Syrediffusionstät grop krävs när vattnet används direkt, i ett fjärrvärmenät utan att värmväxlas. Betong är däremot ej diffusionstät men kan användas i gropar i lera även då krav på diffusionstäthet ställs.

Den lockkonstruktion som ingår i kostnadsberäkningarna är ej diffusionstät. Om syrediffusionstäthet är ett krav måste locket kompletteras med t ex ett metallskikt.

4.3 Tillämpningar

I referensalternativet tas stora markarealer i anspråk eftersom släntlutningarna är flacka. Erforderlig markyta är ca 13.000 m² (V=40000m³) och ca 5500 m² (V=10 000 m³) vilket kan jämföras med 4000 m² och 1000 m² för motsvarande volymer med vertikala väggar (kalkpelare, jetinjektering, slitsmur och sänkbrunn). I kombinationsalternativet behövs 4000 m² för själva gropvärmelagret (V=40 000 m³) och ytterligare ca 6000 m² runt lagret för uppfyllnad av massor. De 6000 m² runt lagret kan användas som parkmark.

Erforderlig markyta för respektive förstärkningsåtgärd kan i varje enskilt fall värderas ekonomiskt eftersom marken på en aktuell plats kan prissättas. Kostnaden per m² markyta kan variera mycket beroende på om det är intill bebyggelse eller ej. I tabell 5.2 och 5.3 har pga den generella tillämpningen markytebehovet ej prissatts.

Geologiska och geotekniska faktorer har betydelse för valet av förstärkningsåtgärd.

Slitsmur och sänkbrunn är lämpligt att utföra till maximalt 10 meters djup. Om lerdjupen är större än ca 12 meter kan ej erforderlig säkerhet mot släntstabilitet erhållas då glidyterna söker sig nedåt under

förstärkningen. Eventuellt kan, om jordens hållfasthet ökar mycket med djupet, erforderlig säkerhet trots allt fås. Slitsmurs- och sänkbrunnalternativen är därmed endast tillämpbara då lerdjupet är ungefär detsamma som djupet på gropen (10-12 m) eller då lerans hållfasthet är betydligt högre än ca 20 kPa. Slitsmurstekniken kan även användas i andra jordar.

Kalkpelare kan sättas till 15 m under markytan. Lerdjupen kan således utan problem vara 15 m. Om lerdjupen är större än 15 m måste lerans hållfasthet även här vara så hög att glidytorerna inte söker sig ner under förstärkningen.

Jetinjektering kan utföras i alla jordarter till 25 m under markytan. Denna jordförstärkningsmetod kan därför tillämpas vid mäktiga jorddjup.

I denna studie har de ekonomiska förutsättningarna för gropvärmelager studerats enbart i lera. Det bör dock påpekas att jetinjektering och slitsmur går att utföra även i silt, sand och morän.

Geologiska och geotekniska faktorer styr således valet av förstärkningsåtgärd till de metoder som är möjliga i varje enskilt fall.

5. KOSTNADER

5.1 Marginalkostnadsbetraktelse

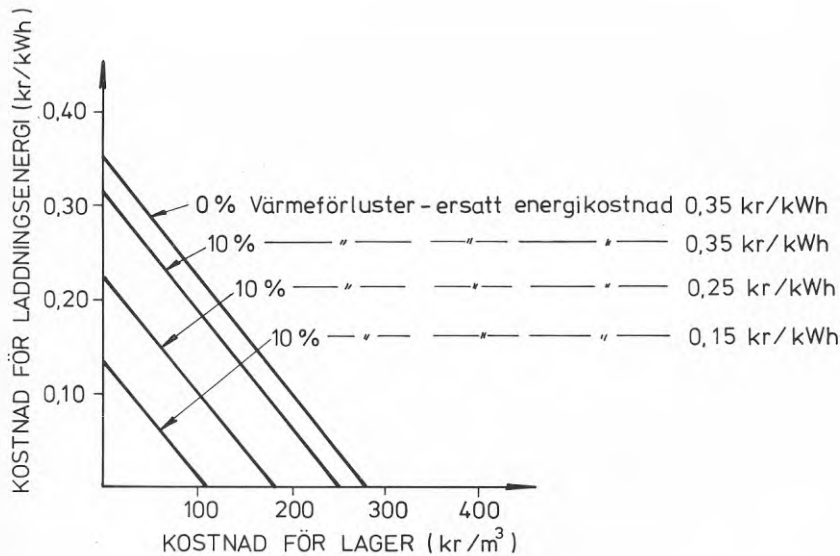
Endast ett fåtal gropvärmelager i jord är byggda i Sverige varför kostnaderna är osäkra. Den av BFR tillsatta PUL-gruppen (Program och Utvärdering för Lagring i mark och vatten) har i sin rapport Energi-lagring (1986) redovisat kostnader för gropvärmelager och ståltankar av två storlekar. Kostnaderna framgår av tabell 5.1. Kostnaden för gropvärmelager är bedömd. Kostnaderna inkluderar värmeväxlare, isolering, rör- och installationsarbeten i anslutning till lagret.

Tabell 5.1. Anläggningskostnader i 1986 års kostnadsläge för gropvärmelager och ståltankar av olika storlekar, Energi-lagring, 1986.

Volym, m ³	Anläggningskostnad , kr/m ³	
	gropvärmelager	ståltank
5000	360 - 400	340
40000	170 - 200	-
50000	-	600

Vad lagret får kosta för att vara ekonomiskt lönsamt beror förutom av anläggningskostnad till mycket stor del på rådande energipriser. För att studera detta kan marginalkostnadsbetraktelser utföras. En sådan betraktelse för värmelager med vatten som lagringsmedium är utförd i figur 5.1.

Marginalkostnadsbetraktelsen är utförd med kostnad för lager som funktion av kostnad för laddningsenergin vid olika kostnadsgränser och värmeförluster. Givna förutsättningar är följande: en årlig lageromsättning, 50°C temperatursving och med en annuitet beräknad på 30 års avskrivningstid och 6 % realränta. Kostnaden för laddningsenergin förutsätts bestå av endast en rörlig kostnad. I lagerkostnaden ingår lager samt övrig nödvändig utrustning för in- och urladdning av energi.



Figur 5.1. Tillåten lagerkostnad som funktion av laddningsenergikostnad vid olika gränskostnader och energiförluster. Avskrivningstid 30 år och 6% realränta. En energiomsättning i lagret per år.

Som framgår av figuren beror tillåten lagerkostnad starkt av kostnaden för ersatt energi och laddningsenergi. Vid gratis laddningsenergi kan en lagerkostnad av 180 kr/m³ accepteras vid ett lager med 10% värmeförluster, en lageromsättning per år samt en kostnad för den ersatta energin av 25 öre/kWh.

Antalet lageromsättningar per år är en mycket viktig faktor. Tillåten lagerkostnad ökar linjärt med antalet lageromsättningar samtidigt som den relativa värmeförlusten från lagret går mot noll. I figur 5.2 är tillåten lagerkostnad uppställd som funktion av antalet energiomsättningar i lagret vid olika kostnadsdifferenser mellan ersatt energi och laddningsenergi.

Om den inlagrade energin är solenergi kan investeringskostnaden kapitaliseras enligt följande uttryck:

$$\text{Energikostnad} = I/EU * (A + (D + U * I / 100)) / EU \quad \text{kr/kWh}$$

där

I= Investeringskostnad för solfångarsystem, kr/m²

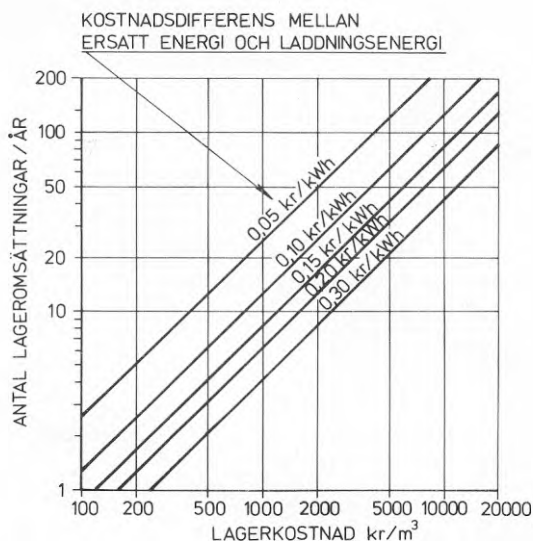
EU=Energiutbyte för solfångare, kWh/m², år

A= Annuitet

D= Driftkostnad, kr/m², år

U= Underhållskostnad, % av investering

I investering för solsystemet skall även ingå nödvändigt rörsystem.



Figur 5.2. Tillåten lagerkostnad som funktion av antalet lageromsättningar per år vid olika kostnadsdifferenser mellan ersatt energi och laddningsenergi. Följande förutsättningar gäller: Investeringskostnaden är bestämd med annuitetsmetod beräknad utifrån 30 års avskrivningstid och 6% realränta, temperaturdifferens i lagret = 50°C, 0% värmeförluster.

Om tabell 5.1 jämförs med figur 5.1 och 5.2 finner man att med nuvarande lagerkostnader kan mycket låg kostnad för laddningsenergin tolereras vid en energiomsättning i lagret per år. Korttidslagring av energi är däremot synnerligen attraktivt då en sådan kan bära stora kapitalkostnader i form av lager mm.

5.2 Kostnader för förstärkningsåtgärder

Kalkpelarförstärkning har utförts i stor utsträckning i Sverige och kostnaderna härför är väl kända. Jetinjektering har endast utförts i mindre omfattning och kostnaderna baseras på uppgifter som uppräknats med konsumentprisindex från 1980. Erfarenheterna från sänkbrunnstekniken är mindre än från slitsmurstekniken. Enligt uppgifter från entreprenörer bedöms kostnaderna för dessa metoder vara i samma storleksordning. I ett pilotprojekt bedöms dock risken för att problem skall uppstå vara större med sänkbrunnsteknik än vid slitsmursteknik.

Följande kostnader har använts vid beräkningarna:

Kalkpelare:	45 kr/m pelare med diametern 0.5 meter.
Jetinjektering:	1300 kr/m ³ skärmvägg eller 3700 kr/m pelare med diametern 2.0 meter.
Sänkbrunn i betong:	1800 kr/m ² mur och med bredden 0.6 meter.
Slitsmur i betong:	1800 kr/m ² mur och med bredden 0.6 meter.

5.3 Kostnader för respektive lagerutformning

Kostnaderna har beräknats för två storlekar på lagret, 40 000 m³ se tabell 5.2 och 10 000 m³ se tabell 5.3. Kostnaderna är angivna i 1987 års prisnivå. För respektive volym har fem olika förstärkningsåtgärder studerats och jämförts med att inte förstärka marken alls. Dessutom har olika geologiska och geotekniska förhållanden beaktats, se kapitel 1.

De olika geologiska och geotekniska förutsättningarna kan kortfattat beskrivas enligt nedanstående tabell:

alternativ	lerdjup	skjuvhållfasthet	vatten i gropen vid arbetsutförande
a	~30 m	12 kPa + 1 kPa/m	nej
b	~10 m	12 kPa + 1 kPa/m	nej
c	~30 m	20 kPa + 1 kPa/m	nej
d	~10 m	20 kPa + 1 kPa/m	nej
e	~30 m	12 kPa + 1 kPa/m	ja
massbalans	~5 m	12 kPa + 1 kPa/m	nej

De kostnadsposter som ingår är:

- jordförstärkning, jordschakt och borttransport av jordmassor.
- tätskikt i sidor och botten, värmeisolering i sidor samt lock.

Volym = 40 000 m³

lagerutformning		jordförstärkning	tätskikt	Σ Kkr	kr/m ³
		jordschakt borttransport Kkr	värmeisolering lock Kkr		
oförstärkt	a	1 320	6 543	7 863	200
	b	1 320	6 543	7 863	200
	c	1 320	6 543	7 863	200
	d	1 320	6 543	7 863	200
	e	1 480	7 407	8 887	220
kalkpelare	a	-	-	GÄR	EJ
	b	4 301	2 639	6 940	170
	c	-	-	GÄR	EJ
	d	3 120	2 639	5 759	140
	e	3 280	3 194	6 474	180
jetinjekter	a	22 595	2 639	25 234	630
	b	9 830	2 639	12 69	310
sänkbrunn	a	-	-	GÄR	EJ
	b	5 388	1 848	7 236	180
	c	-	-	GÄR	EJ
	d	5 388	1 848	7 236	180
	e	5 548	2 008	7 556	190
slitsmur	a	-	-	GÄR	EJ
	b	5 388	1 848	7 236	180
	c	-	-	GÄR	EJ
	d	5 388	1 848	7 236	180
	e	5 548	2 008	7 556	190
massbalans					
	+kalkpelare	2 280	2 236	4 516	110
	+jetinjekter	3 372	2 236	5 608	140
	+sänkbrunn	3 110	1 840	4 950	120
	+slitsmur	3 110	1 840	4 950	120

Tabell 5.2. Kostnader för olika lagerutformningar, V= 40 000 m³.

Volym = 10 000 m³

lagerutformning		jordförstärkning	tätskikt	Σ Kkr	kr/m ³
		jordschakt	värmeisolering		
		borttransport Kkr	lock Kkr		
oförstärkt	a	330	2 831	3 161	320
	b	330	2 831	3 161	320
	c	330	2 831	3 161	320
	d	330	2 831	3 161	320
	e	370	3 203	3 573	360
kalkpelare	a	-	-	GÄR	EJ
	b	1 820	886	2 707	270
	c	-	-	GÄR	EJ
	d	1 241	886	2 127	210
	e	1 572	1 128	2 700	270
jetinjekter	a	10 968	886	11 854	1190
	b	4 585	886	5 471	550
sänkbrunn	a	-	-	GÄR	EJ
	b	2 364	484	2 848	290
	c	-	-	GÄR	EJ
	d	2 364	484	2 848	290
	e	2 404	524	2 928	290
slitsmur	a	-	-	GÄR	EJ
	b	2 364	484	2 848	285
	c	-	-	GÄR	EJ
	d	2 364	484	2 848	285
	e	2 404	524	2 928	293
massbalans					
	+kalkpelare	1 110	683	1 793	180
	+jetinjekter	1 656	683	2 339	230
	+sänkbrunn	1 609	482	2 091	210
	+slitsmur	1 609	482	2 091	210

Tabell 5.3. Kostnader för olika lagerutformningar, V= 10 000 m³.

Genom att jämföra tabell 5.2 och 5.3 framgår att kostnaden per m^3 lager blir ca 50-80% högre då lagrets volym minskar från 40 000 m^3 till 10 000 m^3 .

Av tabellerna framgår även att där djupet till fast botten är ca 30 meter blir jordförstärkningsåtgärder antingen för kostsamma (jetinjektering alt a) eller praktiskt omöjliga att genomföra (övriga alt a) om ej schaktningen utförs under vatten (alt e). Det oförstärkta alternativet a går att genomföra men värmeförlusterna blir här mycket stora. Där fast botten ligger 10 meter under markytan (alt b och d) blir samtliga förstärkningsåtgärder förutom jetinjektering kostnadsmässigt intressanta.

Där jorden har en skjuvhållfasthet av 20 kPa + 1 kPa/m (alt c) istället för 12 kPa + 1 kPa/m (alt a) förändras inte situationen märkbart. Jordens hållfasthet måste således vara betydligt högre för att få någon nämnvärd inverkan på omfattningen av mängden förstärkningsåtgärder.

Jetinjektering är en kostsam metod men metodens användbarhet i olika jordar innebär att där de andra alternativen inte går att använda kan jetinjektering ändå vara ett konkurrenskraftigt alternativ till en ståltank. Alternativ c, d och e har ej redovisats. De är ej intressanta kostnadsmässigt i jämförelse med de andra metoderna vilket framgår av alternativ a och b.

Kalkpelare, sänkbrunn och slitsmursteknik resulterar i ungefär samma kostnader. Lokala förhållanden får då stor betydelse vid val av metod. Om det finns avsättning för jordmassorna kan kostnaden för dessa alternativ minska med 25 kr/ m^3 .

Alternativet med oförstärkt mark är ca 30-50 kr/ m^3 dyrare än kalkpelare, sänkbrunn och slitsmursteknik. Det finns inte några direkta fördelar med denna metod som kompenserar skillnaden i kostnad.

Massbalansalternativen visade sig ge de lägsta kostnaderna. Kalkpelare, sänkbrunn eller slitsmursteknik som jordförstärkningsåtgärd i detta fall har ingen avgörande betydelse för kostnaderna.

Kostnaderna per m^3 lager i tabell 5.2 och 5.3 kan jämföras med ett av Studsvik Energiteknik projekterat lager om 20 000 m^3 i lera, silt och sand där motsvarande kostnader bedöms uppgå till 300 kr/ m^3 . För en 40 000 m^3 ståltank i Värtan i Stockholm uppgick enligt Paul Ingvarsson, Värtan kostnaderna för tank, grundläggning och övriga markarbeten, 1980 uppräknade med konsumentprisindex till 1987 till ca 400 kr/ m^3 .

5.4 Övriga kostnader

Den totala kostnaden för ett gropvärmelager från projekteringskedje tills anläggningen tagits i bruk kan indelas i:

1. markarbeten (t ex jordförstärkning, jordschakt, borttransport av massor, stödmur, mm)
2. tätskikt, värmeisolering och lock på groplagret
3. in- och utmatningsutrustning
4. eventuella värmeväxlare
5. samlingsledning
6. styr- och reglerutrustning
7. projektering, byggherrekostnader, oförutsett m m

I kapitel 5.3 har redovisats kostnader för punkt 1 och 2. Resterande kostnader, punkt 3-7, kan variera kraftigt beroende på typ av lager. Ett säsongsvärmelager har betydligt lägre kostnader per m^3 lager än vad ett dygnslager har.

Enligt Studsvik Energiteknik har dessa kostnader bedömts ligga mellan 100-200 kr/ m^3 för ett säsongsvärmelager om 20 000 m^3 . För en 40 000 m^3 ståltank för dygnslagring i Värtan i Stockholm uppgick denna kostnad (uppräknat med konsumentprisindex från 1980 till 1987) till ca 800 kr/ m^3 .

Om dessa kostnader appliceras på denna studie erhålls för ett säsongsvärmelager i lera med volymen $40\ 000\ \text{m}^3$ en total kostnad av omkring $250\ \text{kr}/\text{m}^3$ lagervolym. Om ett dygnslager i lera hade kunnat ersätta tanken i Värtan skulle den totala kostnaden kunnat minskats Värtanprojektets $1200\ \text{kr}/\text{m}^3$ till ca $950\ \text{kr}/\text{m}^3$.

6. SLUTSATSER

Rent tekniskt sett kan gropvärmelager med vertikala väggar byggas i de flesta jordarter om lämplig förstärkningsåtgärd väljs.

Förstärkningsåtgärden måste utföras till fast botten för att erhålla erforderlig säkerhet mot släntstabilitet.

Gropen kan dock ej alltid grävas ur till fast botten då risk för bottenuppträckning kan föreligga. För att bemästra problemen med bottenuppträckning och för att minska kostnaderna för förstärkningsåtgärder kan gropen grävas ur under vatten. Alla installationsarbeten mm måste därefter också utföras under vatten vilket kan innebära en del försvårande omständigheter.

I lera har djupet till fast botten stor betydelse för kostnader för förstärkningsåtgärder. Lerans skjuvhållfasthet har mindre betydelse.

Denna studie visar att massbalansalternativet är förmånligast och för att erhålla lägsta kostnad skall därför en plats väljas där lerdjupet är 5-10 meter. Gropen grävs ur till knappt hela lerdjupet och resterande erforderlig höjd byggs upp ovan naturlig markyta. Som förstärkningsåtgärd för den delen som grävs ur kan samtliga här studerade förstärkningsåtgärder, kalkpelare, jetinjektering, sänkbrunn och slitsmur användas. För den övre delen gjuts en mur kring omkretsen på lagret och de urgrävda massorna läggs bakom muren.

Lokala förutsättningar som geologi, tillgång på markyta mm har stor betydelse för val av metod.

När sänkbrunn- eller slitsmursteknik används kommer den urgrävda gropens sidor att vara klädda med 0.6 meter armerad betong. Enligt laborieförsök där betong utsatts för höga temperaturer har det visat sig att detta skall vara fullt möjligt och att således inte något yt-

terligare separationsskikt ska behövas. När kalkpelare eller jetinjektering används måste gropens sidor kläs med ett tätande skikt för att förhindra leran att lösas ut i vattnet. Till detta bedöms en metalliner vara lämplig.

Vid säsonsvarmelagring är de stationära värmeförlusterna från ett högt temperaturlager med vertikala sidor ca 20 %. Om lagret i stället har formen av en kon och har släntlutningar som inte kräver några jordförstärkningsåtgärder, ca 1:8, ökar värmeförlusterna till ca 50 % (volymen = 40 000 m³).

Den undre gränsen för kostnaderna för jordförstärkning, jordschakt, borttransport av massor, tätskikt, isolering och lock för ett gropvarmelager med volymen 40 000 m³ är enligt denna studie ca 100 kr/m³. Om en kostnad av 150-200 kr/m³ kan accepteras kan ett flertal av de studerade metoderna användas. Motsvarande kostnader för ett gropvarmelager med volymen 10 000 m³ är ca 50 % högre. Dessa kostnader kan jämföras med tex en icke trycksatt ståltank på 40 000 m³ där tank och grundläggning kostar ca 400 kr/m³.

Enligt en utförd marginalkostnadsbetraktelse kan det förmånligaste gropvarmelagret med en energiomsättning per år (totalkostnad ca 250 kr/m³) ej tåla någon kostnad för inladdad energi för att rimlig kostnad per kWh skall erhållas (se figur 5.1). Med 10 omsättningar per år (total lagerkostnad ca 950 kr/m³) motsvarar lagrets marginalkostnad en skillnad i energikostnad för inladdad och ersatt energi 10 öre/kWh. Motsvarande för 20 omsättningar per år är endast 5 öre/kWh (se figur 5.2).

REFERENSER

Claesson, J, m fl (1985). Markvärme. En handbok om tekniska analyser. Byggforskningsrådet T16:1985, Stockholm.

Claesson, T, (in paper). Betongs påverkan av hett vatten. Geologiska institutionen, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.

Energilagring (1986). Underlag för BFRs treårsplan 1987/88-1989/90. Byggforskningsrådet G26:1986, Stockholm.

Eriksson, L, Zinko, H (1987-1988). Personliga kontakter.

Eriksson, U, Svensson, P-L (1980). Jetinjektering för jordförstärkning och tätning. Byggforskningsrådet, rapport R143:1980, Stockholm.

Eriksson, U, Hellman, L, Svensson, P-L (1982). Jetinjektering. Exempel på tillämpningar och utförande. Styrelsen för teknisk utveckling, information no 289-1982, Stockholm.

Lundin, S-E, Widing, S (1987). Nordiskt samarbete om värmelagring i gropmagasin. NBS-E seminarium, maj 1987 i Växjö. Byggforskningsrådet, rapport R84:1987, Stockholm.

SBEF, Vägforskningsgruppen (1985). Länshållning vid schaktningsarbeten. Statens Geotekniska Institut, Linköping.

Åhnberg, H, Holm, G (1986). Kalkpelarmetoden. Resultat av 10 års forskning och praktisk användning samt framtida utveckling. Statens Geotekniska Institut Rapport no 31, Linköping.

Åhnberg, H, Holm, G, Tränk, R, Ekström, A (1987). Kalkpelare med gips som tillsatsmedel. Användning av kalk-flygaska vid djupstabilisering av jord. Om inverkan av härdningstemperaturen på skjuvhållfastheten hos kalk- och cementstabiliserad jord. Rapport no 32, Linköping.

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 870342-7
från Statens råd för byggnadsforskning till Statens
geotekniska institut, Linköping.

R47: 1988

ISBN 91-540-4889-3

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Art.nr: 6708047

Abonnemangsgrupp:
W. Installationer

Distribution:
Svensk Byggtjänst, Box 7853
103 99 Stockholm

Cirkapris: 36 kr exkl moms