



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

R33:1988

**Teknikutveckling för
värmelagring med vertikala rör i
jord och berg**

**Peter Wilén
Anders Johansson
Ingvar Rhen**

R
Jall

INSTITUTET FÖR
BYGGDOKUMENTATION

Accnr

Plac

Ser

Byggforskningsrådet

R33:1988

TEKNIKUTVECKLING FÖR VÄRMELAGRING
MED VERTIKALA RÖR I JORD OCH BERG

Peter Wilén
Anders Johansson
Ingvar Rhen

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 840591-5
från Statens råd för byggnadsforskning till Geologiska
institutionen, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.

REFERAT

Rapporten är slutrapport för ett samarbetsprojekt mellan Jordvärmegruppen på CTH och Danmarks Geotekniske Institut i Lyngby. Projektet behandlar metoder att anlägga värmelager i mark med vertikala rörsystem. Projektets första del är redovisad i rapporten "Metoder och kostnader för anläggande av värmelager i mark med vertikala rör. Förstudie". Den är utgiven i Jordvärmegruppens vid CTH serie, nr 21 1986. I den redovisas en inventering av neddrivnings- och borrhningsmetoder för värmeväxlare i lös lera och berg, jämförelser mellan olika typer av värmeväxlare samt kostnadsberäkningar.

Samarbetsprojektet redovisas med två separata slutrapporter, en för varje land och detta är slutrapporten för den svenska delen. Den innefattar resultat från utförda neddrivningsförsök i lera samt kostnadsberäkningar.

Den nya tekniken som utvecklats vid CTH för att sätta enkla U-rör i lera baseras på att U-röret sätts ned oskyddat i ett moment med en neddrivningslans. Neddrivningsmetoden fungerade utmärkt på försöksplatserna i Söderköping och Göteborg och neddrivning gjordes ned till 18 m djup med pålkran. I Söderköping gjordes en kapacitetstest som visar på att 120 U-rör per dag går att sätta med en pålkran.

Kostnadsmässigt innebär de nya neddrivningsmetoderna att ett lager i lera kan byggas till lägre kostnad än tidigare. Ett lager med enkla U-rör med ett hålavstånd på ca 2 m kan byggas för ca 8 kr/m³ eller ca 40 kr per meter nedstick, isolerat i markytan.

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.

R33:1988

ISBN 91-540-4882-6

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Svenskt Tryck Stockholm 1988

INNEHÅLL

FÖRORD

SAMMANFATTNING

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1	INLEDNING	1
1.1	Beskrivning av projektet	1
1.2	Sammanfattning av förstudien	2
2	NEDDRIVNINGSMETODER I LERA	4
2.1	Tidigare använda metoder	4
2.2	Utveckling av neddrivningsmetoder	5
3	FÄLTFÖRSÖK I SÖDERKÖPING	8
3.1	Geotekniska förhållanden	8
3.2	Neddrivning med dubbla U-rör (BPA)	9
3.3	Neddrivningsförsök med enkla U-rör (CTH)	11
3.4	Kapacitetstest (CTH)	16
4	FÖRSÖK I GÖTEBORG, SÄVEDALEN	18
4.1	Geotekniska förhållanden	18
4.2	Utförda försök med enkla U-rör (CTH)	19
5	BELASTNING PÅ SLANG VID NEDDRIVNING I LERA	20
5.1	Beskrivning av belastningen	20
5.2	Allmänna egenskaper för polyetenrör	20
5.3	Hållfasthetsegenskaper för polyeten	21
5.4	Fältnätningar av töjning och spänning i slangen vid neddrivning	28
5.5	Spänningar i slangen i förhållande till lerans skjuvhållfasthet	30

6	NEDDRIVNINGSFÖRSÖK UTFÖRDA AV DGI	34
6.1	Inledning	34
6.2	Beskrivning av försöksmetoder och resultat	34
6.3	Kostnader	35
7	VÄRMEÖVERFÖRING MELLAN FLUID OCH LAGER	36
7.1	Allmänt	36
7.2	Jämförelse mellan olika typer av värmväxlare	40
8	ANLÄGGNINGSKOSTNAD FÖR VÄRMELAGER MED VERTIKALA RÖR	43
8.1	Allmänt	43
8.2	Anläggningskostnad för lager i lera	45
8.3	Kostnader för lager i moränlera och berg	54
9	SLUTSATSER	56
9.1	Lager med vertikala rör i lera	56
	REFERENSER	58
	BILAGA	60

FÖRORD

Föreliggande rapport är slutrapport för ett samarbetsprojekt mellan Jordvärmegruppen på CTH och Danmarks Geotekniske Institut (DGI) i Lyngby. Projektet behandlar metoder att anlägga värmelager i mark med vertikala rörsystem. Projektets första del är redovisad i rapporten "Metoder och kostnader för anläggande av värmelager i mark med vertikala rör. Förstudie". Den är utgiven i Jordvärmegruppens vid CTH serie, nr 21 1986. I den redovisas en inventering av neddrivnings- och borrhningsmetoder för värmväxlare i lös lera och berg, jämförelser mellan olika typer av värmväxlare samt kostnadsberäkningar.

Samarbetsprojektet redovisas med två separata slutrapporter, en för varje land och detta är slutrapporten för den svenska delen. Den innefattar resultat från utförda neddrivningsförsök i lera samt kostnadsberäkningar.

I projektet har Bernt Bäckström varit projektledare för den svenska delen. I projektet har förutom DGI även högskolorna i Luleå och Lund, BPA, Göteborgs Betongpålar samt Statens Geotekniska Institut (SGI) medverkat.

Vi tackar Mogens Porsvig och Ellis Sörensen vid DGI, och alla andra som medverkat i projektet för ett gott samarbete.

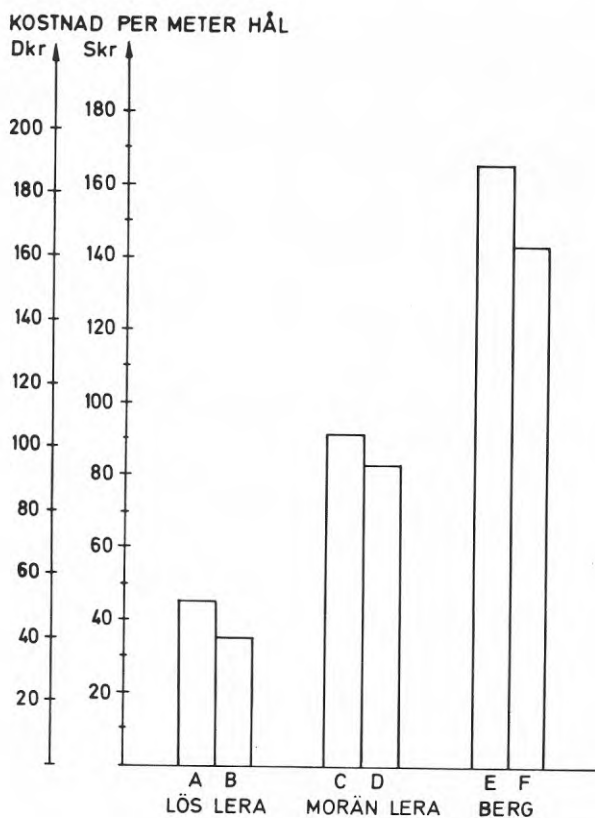
Göteborg i juni 1987

Peter Wilén

SAMMANFATTNING

Samarbetsprojektet behandlar neddrivningsmetoder för värmväxlare i lera, sand/silt, moränlera och berg samt kostnaderna för att bygga värmelager för säsongslagring. I en förstudie till den svenska delen av projektet konstaterades kostnadsläget och teknikläget för lager med vertikala rör i lera, sand och berg, och i detta projekt har en metod för enkla U-rör i lera utvecklats och provats. Samtidigt har BPA utvecklat en metod för dubbla U-rör i lera som också redovisas. Danmarks Geotekniske Institut (DGI) har provat tre olika metoder i sand och moränlera.

En samlad framställning av projektets resultat framgår av nedanstående figur. Kostnadsberäkningarna gäller dels en mindre anläggning med värmepump på 5-10 kW till ett enbostadshus (stapel A, C, E), dels ett större värmelager med en lagerkapacitet på ca 500 MWh vid 10°C temperaturutnyttjande i lagret (stapel B, D, E). Lagren är jämställda ur värmeöverföringssynpunkt och är inte isolerade i markytan. För det större lagret ingår även en administrationskostnad på 10%.



Den nya tekniken som utvecklats vid CTH för att sätta enkla U-rör i lera baseras på att U-röret sätts ned oskyddat i ett moment med en neddrivningslans. Genom att använda en neddrivningslans med en slank profil och en speciell spets som skyddar slangens nedre del och bereder väg kan dragkrafterna som uppstår på slangen minimeras. Neddrivningsförsök har utförts i Söderköping och i Sävedalen i Göteborg. Försöken i Söderköping gjordes i en lera med inslag av silt och sandskikt som tilltog mot djupet. I Sävedalen gjordes försöken i en helt annan typ av lera, en lös lera som närmast kan beskrivas som en kvicklera. Neddrivningsmetoden fungerade utmärkt på båda försöksplatserna och gjordes ned till 18 m djup med pålkran. I Söderköping gjordes en kapacitetstest som visar på att 120 U-rör per dag går att sätta med en pålkran.

Töjningarna på slangarna vid neddrivningen mättes vid båda försöksplatserna. I Sävenäs blir påfrestningen på slangen liten (neddrivningslansen sjönk av sin egen och hejarens vikt till fullt djup i den lösa leran). Sand och siltskikten i leran i Söderköping gjorde att neddrivningen på slutet måste göras genom att slå med hejaren varvid töjningen på slangen vid ett tillfälle blev på gränsen till vad som kan tillåtas.

BPA:s metod med dubbla U-rör användes vid bygget av värmelagret i Söderköping. Med metoden sätts dubbla U-rör ned helt skyddade till 18 m djup med pålkran. Kapaciteten var i genomsnitt 25 dubbla U-rör per dag till 18 m djup.

Kostnadsmässigt innebär de nya neddrivningsmetoderna att ett lager i lera kan byggas till lägre kostnad än tidigare. De båda metoderna bör gå att använda för ett lagerdjup på 25 m (den högsta höjd som en pålkran enkelt kan förlängas till) med bibehållen kapacitet. Då kan ett lager med enkla U-rör med ett hålavstånd på ca 2 m byggas för ca 8 kr/m³ eller ca 40 kr per meter nedstick, isolerat i markytan. En utveckling av kopplingar och ledningssystem i markytan kan ytterligare sänka kostnaden. För att lagret ska vara intressant vid högre lagringstemperaturer måste metoder att isolera lagret mot förluster uppåt studeras.

1 INLEDNING

1.1 Beskrivning av projektet

Projektets syfte var att undersöka metoder för att anlägga värmelager i berg, sand/silt och lera. Uppdelningen av projektet har varit att Danmark undersökt medelfasta och fasta jordtyper (sand, silt och moränlera) och Sverige lös lera och berg.

Inom projektet har fyra samarbetsmöten hållits, 1984 två möten den 24 januari på CTH och den 10 oktober på DGI, 1985 den 5 september på CTH och det sista mötet den 3 september 1987 på DGI.

I projektets första del gjordes en inventering av olika metoder samt kostnadsberäkningar för värmelager i lera, sand/silt och berg. Resultaten från den första delen visade att det är två delkostnader som är mest intressanta att försöka reducera. Det gäller kostnader för neddrivning och borrning samt rör- och sammankopplingskostnader.

Den andra delen av projektet som denna rapport gäller innefattar utveckling av metoder och neddrivningsförsök i lera. Parallellt har motsvarande borrhings och neddrivningsförsök gjorts i sand/silt och moränlera av DGI i Danmark. DGI:s arbete är mycket kortfattat beskrivet i kapitel 6 i denna rapport. Utifrån resultaten från försöken har nya kostnadsberäkningar för värmelager med vertikala rör utförts.

Den första delen av projektet var huvudsakligen inriktad på lågtemperaturlager i mark med värmepump. Det är dock även intressant att lagra värme vid högre temperaturer, t ex lagring av spillvärme och solvärme. Vid lagring vid högre temperaturer än 15-20°C måste olika möjligheter att isolera lagrets överyta undersökas. Det har inte ingått i detta projekt men är en väsentlig punkt vid denna typ av lagring. Det gäller speciellt om värmepump inte används vilket ställer höga krav på lagertemperaturen vid energiuttag under uppvärmningssäsongen.

Den danska slutrapporten med titeln "Vertikale jordslanger - Nedbringingsmetoder" är utgiven i Energiministeriets värmepumpforskningsprogram rapportserie. Rapporten distribueras genom Tekniska Institutets förlag.

1.2 Sammanfattning av förstudien

Kostnaden för att anlägga ett värmelager i mark med vertikala rör som värmeväxlare kan huvudsakligen delas upp i tre delar:

1. Borrning och neddrivning av de vertikala rören, värmeväxlarna.
2. Hopkoppling av de vertikala rören med horisontella samlingsledningar i markytan.
3. Arbeten i markytan, schaktning, återställning och eventuell isolering.

Neddrivningen av värmeväxlare kan i lös lera göras genom nedpressning av en ihålig påle eller lans med en speciellt utformad spets som skydd. I friktionsmaterial kräver neddrivningen jämfört med lera större och dyrare maskiner, eventuellt med rotation, spolning och vibrering.

I det svenska urberget är hammarborrning med topp- eller sänkhammare dominerande. Idag sker brunnsborrning nästan uteslutande med sänkhammarriggarna i dimensionen 4.5"-6.5" ned till ca 200 m djup. Den hydrauldrivna topphammarriggen har dock klara fördelar vid mindre dimensioner (<3") och håldjup under 75 m. Borrningskostnaden för mindre borrhålslager och korta borrhålsängder bör därmed kunna reduceras betydligt jämfört med borrning med sänkhammarutrustning.

Olika typer av värmeväxlare har jämförts, men då U-rör av polyetenplast förefaller vara lämpligast med hänsyn taget till kostnad, hantering, täthet, sammankoppling och beständighet har arbetet begränsats till dessa.

Vid anläggande av marklager i befintlig bebyggelse måste lagret betala största delen av schakt- och återställningsarbetena i markytan. Vid utförandet av lagret är det därför viktigt att schaktning undviks och speciellt att transport av schaktmassor minimeras. Vid nyproduktion eller i de fall att markytan ska bearbetas oavsett om ett marklager ska anläggas behöver inte hela kostnaden för markarbetena bekostas av lagret.

Inom förstudien gjordes kostnadsberäkningar för några mindre lågtemperaturlager. I beräkningarna förutsätts att schaktningsarbetena minimeras och att ingen isolering görs av lagrets överyta och sidor. Speciellt kostnaderna för lager i sand och silt var betydligt mer osäkra än för de övriga marktyperna. Följande kostnader (i 1986 års priser) per meter värmväxlare erhöles:

berg	160-200 kr
sand/silt	ca 75 kr
lös lera	60-70 kr

I förstudien bedömdes kostnadssänkningar vara möjliga i samtliga fall men den största reduktionen bedömdes möjlig i lös lera där upp mot en halvering borde vara möjlig att uppnå. Även i berg borde kostnaden kunna sänkas något om borrhingskostnaden kan sänkas, vilket kan vara möjligt med utvecklingen som pågår på topphammarborrning.

2 NEDDRIVNINGSMETODER I LERA

2.1 Tidigare använda metoder

De värmelager med vertikala värmeväxlare som hittills byggts i Sverige har utförts genom nedpressning (nedtryckning) med pålkran, mindre traktorgrävare eller manuellt.

I Lindälvsskolan i Kungsbacka och i Kullavik gjordes neddrivningen med pålkran och en ihålig påle med rektangulärt tvärsnitt. Installationen görs i flera moment. Först pressas pålen ned i marken till önskat djup (vid Lindälvsskolan skarvades 2 st 18 m långa pålar till 35 m djup). En platta tätar i pålens botten. I pålen "foderröret" för man sedan ned ett förtillverkat U-rör med hjälp av ett lod. Slangen vattenfylls varefter tryckluft ansluts som skjuter ut locket i botten så att leran tränger in och låser fast U-röret i leran. Därefter lyfts foderröret upp, skänklarna hålls isär av lodet som följer med upp. Skänkelavståndet blir ca 15 cm och i genomsnitt sätts 15-20 nedstick per dag (en pålkran och tre man).

Neddrivning av oskyddade U-rör direkt utan foderrör har gjorts i Alingsås där ett par anläggningar till ett djup av 16 m har byggts. En speciell spets skyddar slangen vid neddrivningen som gjordes manuellt med en kedjematare (en utrustning som normalt används för geotekniska undersökningar).

Försök med en mindre bandgående borrarutrustning har gjorts av VIAK i ett tidigare BFR-projekt. Försöken gjordes på några olika ställen i stockholmstrakten med en hydraulisk borrhög typ Borros samt en borrarbandvagn även den av Borros fabrikat. Maximal tryckkraft för utrustningen var 70 kN och dragkraft 110 kN. Vid försöken undersöktes dels erforderlig kraft och möjligt neddrivningsdjup i olika fasta leror, dels gjordes en test av kapaciteten. Vid försöken användes polyetenslang PEM 32 mm som drevs ned oskyddade som U-rör med en speciell spets som skydd. Som neddrivningsrör användes borrarstänger 32 mm i 2.5 m längder som skarvades under neddrivningen.

I spetsen ligger slangen i en halvcirkelformad skåra med en bredd obetydligt större än slangdiametern. Det installerade U-röret får ett skänkelavstånd på ca 30 cm. Sammanfattningsvis fungerar metoden bra i lös lera med en max skjuvhållfasthet av ca 20 kPa och ett max neddrivningsdjup av 15-20 m. Vid fastare leror eller större lerdjup erfordras en förankring av borrhjgen vilket sänker kapaciteten för metoden. Om borrhjgen inte förankras kan tre man sätta i max 3 nedstick per timme (inkl neddrivning, koppling, vattenfyllning och provtryckning). Praktiskt bör ca 20 nedstick per 8-timmars arbetsdag vara möjligt att erhålla. Kapacitetstesten gjordes till 14 m djup och utan förankring av borrhjeopen.

2.2 Utveckling av neddrivningsmetoder

Målsättningen med en utvecklad neddrivningsmetod är att sänka kostnaden för lagret, vilket medför en sänkt kostnad för den energi som lagras och används. Effektivare värmeväxlare ger även de en lägre kostnad för den lagrade energin eftersom energiutnyttjandet inom givet temperaturintervall blir större. Bäst resultat erhålls givetvis vid en kombination av dessa två utvecklingsmöjligheter.

Motståndet vid neddrivning består av spetsmotstånd och friktion/kohesion. Tvärsnittsarean och spetsens form avgör spetsmotståndet och mantelarean avgör friktionen/kohesionen. De bör vara så små som möjligt. Ökat motstånd kräver kraftigare utrustning, både maskinutrustning och foderrör/neddrivningslans. Det medför högre kostnader för neddrivningen. En neddrivningslans med bred spets medför dock möjlighet till effektivare värmeöverföring per meter värmeväxlare, (t ex större skänkelavstånd vid U-rör eller dubbla U-rör). Detta reducerar antalet nedstick. En slank konstruktion av neddrivningslansen kan samtidigt ge både en god värmeväxlare och utföras med en liten neddrivningskraft.

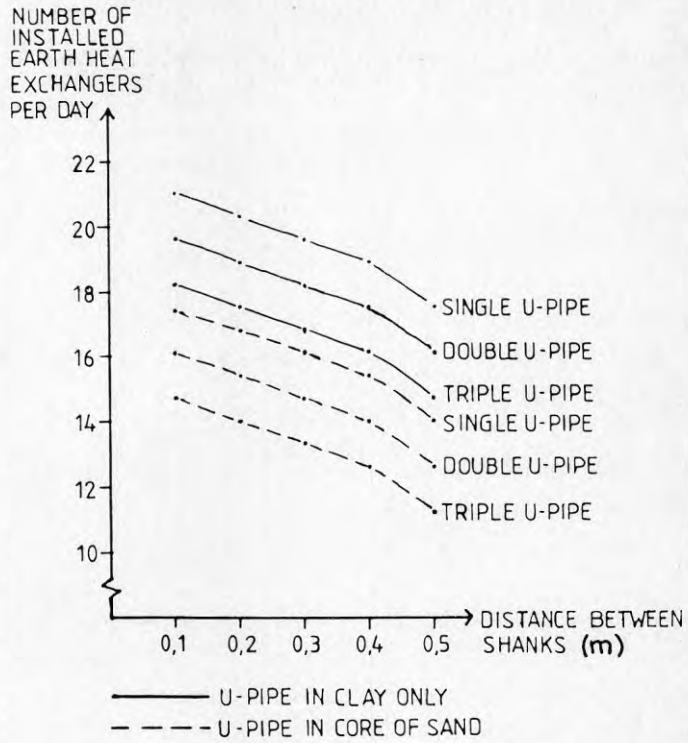
Olika typer av värmeväxlare ställer olika krav på neddrivningsutrustning. Det gäller t ex storlek på maskin och möjligheter att skarva neddrivningspåle. Ytterligare en skillnad mellan olika värmeväxlare är omfattningen av anslutningsarbetet mellan de ver-

tikala rören och samlingsledningar i markytan. Det bör gå att hitta lagringskoncept som ger byggnadskostnader som är betydligt lägre än de som byggts hittills. Genom att prova nya neddrivningsmetoder, analysera värmeväxlarnas effektivitet och bedömma omfattningen av arbetsmomenten i markytan kan nya koncept studeras.

BPA har utvecklat en metod att med pålkran sätta ned dubbla U-rör som värmeväxlare, en metod och utformning som har använts för lagret vid Ramunderskolan i Söderköping. Metoden och hur den fungerar är beskrivet i kapitel 4.2. Med den sätts dubbla U-rör av polyeten ned till 18 m djup och ett skänkelavstånd av ca 0.5 m.

I den första delen av detta projekt visades på möjligheten att förenkla neddrivningen och minska arbetsmomenten genom att låta slangen följa med neddrivningslansen delvis oskyddad utanpå densamma. I Kungsbacka gjordes vissa försök med detta med en påle med en rektangulär profil för ett par år sedan. Töjningen på slangen visade sig bli allt för stor och försöken avbröts. Genom att använda en slank profil som ger en obetydlig undanträngning av jorden och om slangen delvis kan skyddas av neddrivningslansen bör dessa dragkrafter minska betydligt. I förstudien föreslogs att försök borde göras med oskyddad slang och en neddrivningslans med en U- eller I-profil som tvärsnitt. Det är utvecklingen av den utrustningen och försök med den som varit det huvudsakliga arbetet i detta projekt. Med den metoden kan enkla U-rör med skänkelavstånd på 10-50 cm eventuellt större sättas. En beskrivning av utrustningen och försöken i Söderköping och Sävenäs finns beskrivet i kap 3.3 och kap 4.

Kapaciteten vid neddrivning av olika typer av värmeväxlare har ställts samman av Statens Geotekniska Institut. Uppgifterna är hämtade från olika entreprenörer som utfört anläggningar och utifrån dessa erfarenheter uppskattat kapaciteten även för dubbla och trippla U-rör. Av figur 2.1 där resultatet är sammanställt framgår att kapaciteten genomgående minskar då skänkelavståndet ökar. Dubbla och trippla U-rör och sanddränen ger ökade kostnader för neddrivningen (minskad kapacitet) jämfört med det enkla U-röret.



Figur 2.1 Kapacitet vid neddrivning av värmväxlare i lera. (Hellström, Palmgren, Rydell 1985)

3 FÄLTFÖRSÖK I SÖDERKÖPING

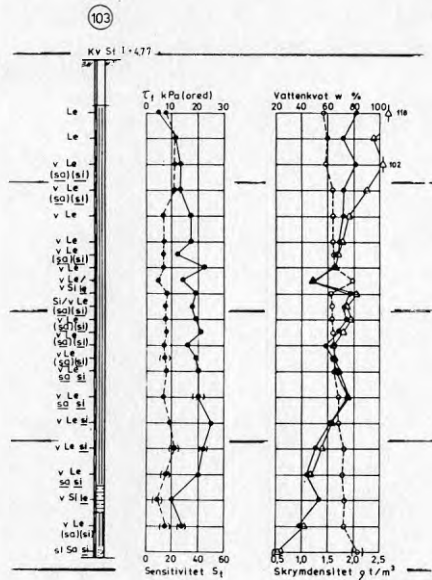
3.1 Geotekniska förhållanden

Neddrivningsförsöken utfördes oktober 1986 vid Ramunderskolan i Söderköping i samband med att BPA utförde ett värmelager på platsen. Geotekniska undersökningar har tidigare utförts av Hylanders Geobyrå AB och för blivande bad och sporthall med värmelager av Statens Geotekniska Institut. Denna kortfattade beskrivning är huvudsakligen hämtad från SGI:s undersökningar.

Provområdet ligger på en vidsträckt sedimentslätt. I den västra delen av området finns en utomhusbassäng och vid platsen för värmelagret där försöken skett finns en grusad parkeringsplats.

Lagerföljden har följande uppbyggnad: överst finns ett lager av 0.5-1.0 m sand och grus. Därefter följer 1-2 m torrkorpelera som överlagrar 16-17 m lera. Leran är homogen ned till ca 4 m och därunder innehåller den silt och sandskikt. Skikten är några mm tjocka ned till ca 11 m, därefter cm-tjocka och tätt förekommande ned till 18 m djup. På 8 m djup finns ett ca 10 cm tjockt skikt. Den varviga leran övergår på ca 17 m djup till varvig silt med ler- och sandskikt.

Leran är något överkonsoliderad, 10-20 kPa och skjuvhållfastheten varierar mellan 10 och 25 kPa. Sensitiviteten är ca 13. Densiteten varierar från 1500 kg/m^3 i den homogena leran till ca 1800 kg/m^3 i den undre delen av jordprofilen. Vattenkvoten är ca 90% i den homogena leran och varierar mellan 70 och 80% på större djup än 4 m. Se figur 3.1 och bilaga 1.



Figur 3.1 Sammanställning av geotekniska parametrar för försöksplatsen.

3.2 Neddrivning med dubbla U-rör (BPA)

BPA har tidigare utvecklat en metod för neddrivning av U-rör i lera. Metoden användes vid lagren i Kungsbacka och Kullavik och är beskriven i kap 2. I samband med projekteringen av lagret i Söderköping utvecklade BPA metoden för att sätta ned dubbla U-rör med ett skänkelavstånd på ca 0.5 m. Det är en värmeväxlarutformning som är betydligt mer effektiv än ett enkelt U-rör med 15-20 cm skänkelavstånd som användes i Kungsbacka. Båda metoderna är patenterade.

Neddrivningen utförs med en slank neddrivningslans med ett kryss-tvärsnitt. Längst ut på krysset sitter fyra skyddsror som löper utefter hela lansens längd. I dessa ligger värmeväxlarna skyddade

vid neddrivningen och vid nederänden skyddar en skyddsplåt värmeväxlarna. Metodens fördelar är dels att slangen är helt skyddad under hela neddrivningen, dels att en effektiv värmeväxlare erhålls. Kortfattat går neddrivningen till på följande sätt:

1. Lansen tas helt upp och hänger fritt i pålkranen. U-rören stoppas in färdiga nedifrån in i skyddsroren.
2. Skyddsplåten av plattjärn najas fast underst och hela lansensätts ned på marken och riktas in.
3. Neddrivning med pålkranens hejare. Vid försöksplatsen sjönk lansens av sin egen och hejarens tyngd de första 6-10 m därefter fullföljdes neddrivningen med hejaren.
4. Då fullt djup erhållits skruvas de fyra skyddshylsor av som sitter överst på rören. Vatten fylls därefter i slangarna varefter skyddshylsorna skruvas på igen. En tryckluftsslang ansluts till ett av de fyra rören på lansens (rörens har förbindelse med varandra) tryckluften släpps på från kompressorn samtidigt som lansens dras upp en kort bit. På detta vis lossas skyddsplåten från lansens och U-rören förankras i leran.
5. När lansens dragits upp ett par meter släpps trycket och lansens dras upp hela vägen och värmeväxlarslangen sitter kvar i marken.
6. Lansens skottas ren från lite lera, flyttas till platsens för nästa värmeväxlare och är klar att laddas igen.

Två man arbetar med dessa arbetsmoment och en man sköter pålkranen. Dessutom arbetar en man med att kapa och svetsa ihop U-rören och en man provtrycker de installerade värmeväxlarna. Totalt sattes i genomsnitt 25 värmeväxlare per arbetsdag då lagret i Söderköping byggdes. Kapaciteten är därmed betydligt högre än den uppskattning som tidigare gjorts för neddrivning av dubbla U-rör, se figur 2.1. Det var första gången metoden användes och den kan troligen utvecklas så att arbetsmomenten kan minskas och kapaciteten därmed öka ytterligare något. I figur 3.2 visas bilder från arbetena med metoden i Söderköping.



Figur 3.2 Bilder som visar olika moment vid neddrivning av dubbla U-rör.

3.3 Neddrivningsförsök med enkla U-rör (CTH)

Metoden bygger på att arbetsmomenten vid neddrivningen bör kunna minska betydligt om värmväxlarslangen kan följa med delvis oskyddad utanpå neddrivningslansen. Problemen som uppstår med töjning av slangen kan minimeras och bemästras med en slank profil hos neddrivningsbalken som minskar jordundanträngningen och därmed friktionen mellan slang och omgivande jord.

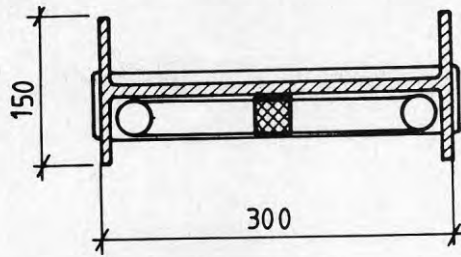
Försöken utfördes med en standard I-balk IPE-300 med mått enligt figur 3.3. Två stycken 10 m långa inköptes och skarvades på platsen. Övre änden byggdes om så att den passade in i slagdynan på pålkranen. Vid den nedre delen spetsades flänsarna och spetsar i form av standard likflänsig vinkelstång som fungerar både som skydd och som förankring togs fram. Några olika utformningar av spetsar togs fram och provades, se figur 3.4.

Neddrivningen går till på följande vis:

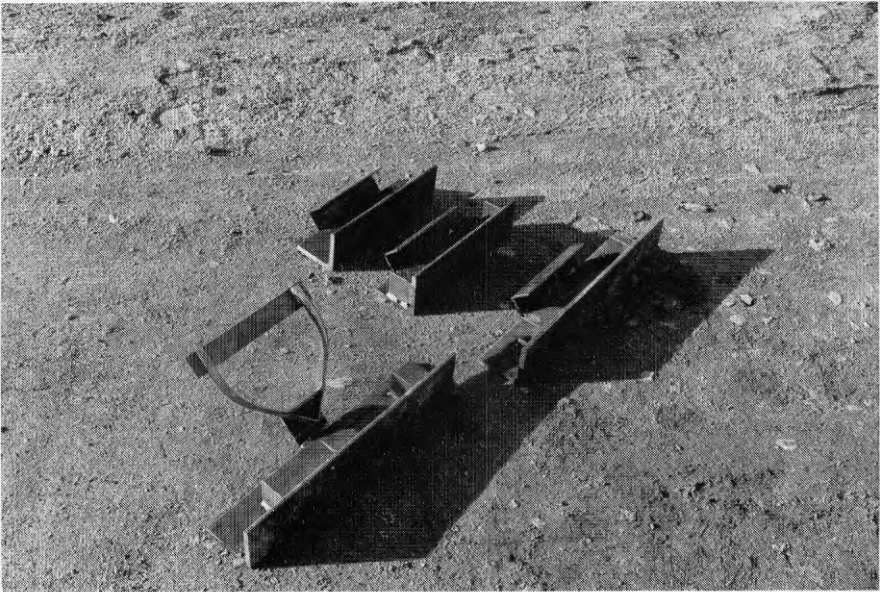
1. Neddrivningslansen är uppe helt. Spetsen med U-röret sätts under lansens spets och hålls fast.
2. Lansen riktas in och neddrivning med pålkranens hejare görs tills önskat djup har nåtts.
3. Upptagning av lansen görs direkt och kranen flyttas till platsen för nästa nedstick.

Metoden fungerade helt enligt planerna. Eftersom balken dras upp ur marken direkt efter neddrivningen hinner inte någon lera fastna vid den. Därmed bibehålls det slanka tvärsnittet hela tiden. Spetsarnas utformning som ankare fungerade perfekt, ingen tendens att någon slang ville följa med upp igen fanns vid något försök. Däremot skadades ett par slangar vid neddrivningen, de klämdes sönder mellan lansen och spetsen. Detta orsakades av att några spetsar var något felaktiga och inte satt riktigt på plats då neddrivningen startade. Utformningen av spetsarna och materialval för dessa kräver en del ytterligare arbete, men i princip fungerar utformningen bra. Vid neddrivning på detta vis då slangarna ligger oskyddade utsätts de för töjning. Vid försöken i Söderköping mättes töjningen på enklaste sätt med hjälp av vajrar. Beskrivning av dessa mätningar och resultaten framgår av kapitel 5.

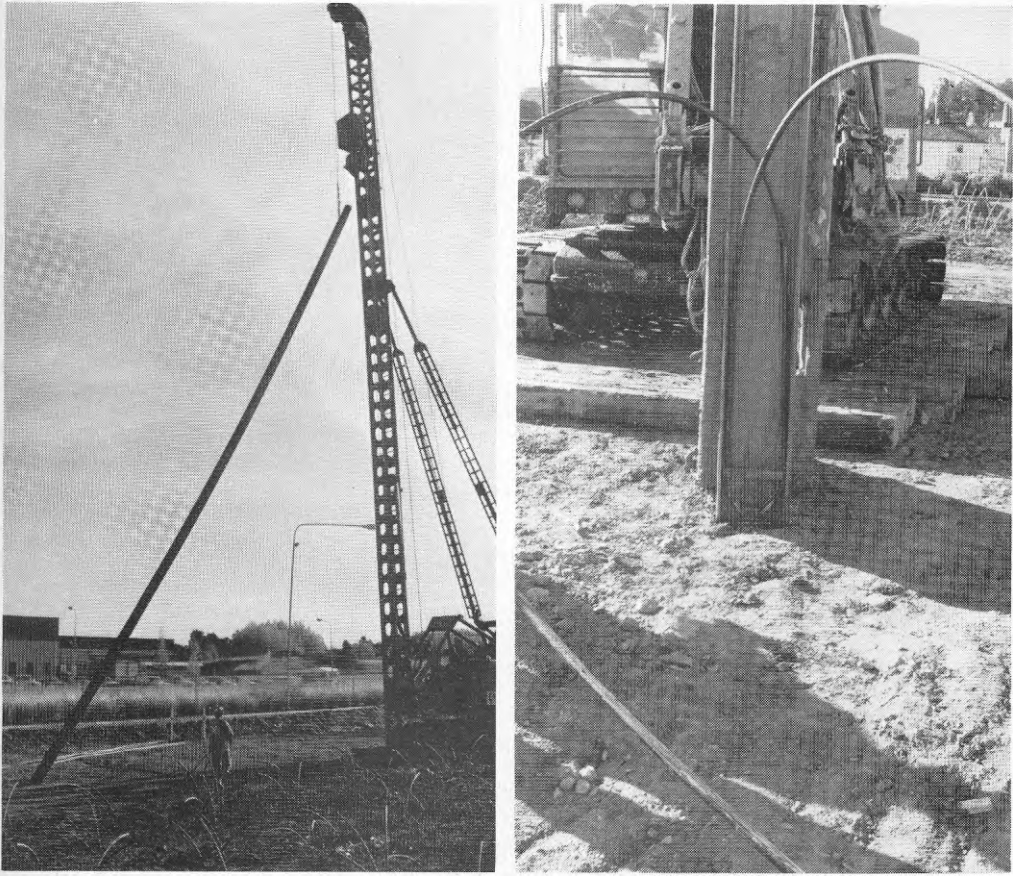
Vid försöken matades slangen ned manuellt vilket kräver två man. Kranen kan kompletteras med styrningar för värmväxlarlangan. Då skulle totalt två man förutom pålkransföraren krävas vid ett lagerbygge. I figur 3.5 och 3.6 visas några bilder från försöken.



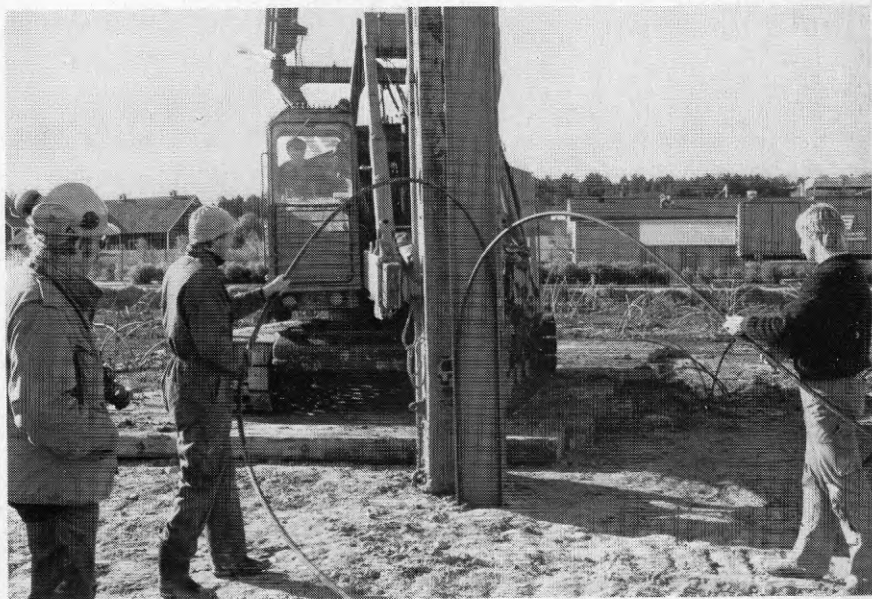
Figur 3.3 Neddrivningsbalk av I-profil IPE300.



Figur 3.4 Exempel på utformning av spetsar.



Figur 3.5 Bilder som visar några av momenten vid neddrivning av enkla U-rör med I-balk.



Figur 3.6 Bilder som visar några av momenten vid neddrivning av enkla U-rör med I-balk.

3.4 Kapacitetstest (CTH)

För att kunna göra en uppskattning av hur många U-rör som kan sättas ned på en arbetsdag gjordes en enkel kapacitetstest i samband med försöken i Söderköping. 15 U-rör med spetsar iordningställdes och neddrivningen gjordes av den ordinarie arbetsstyrkan vid pålkranen. Försöken gick till så att två man drog fram det färdiga U-röret, satte dit spetsen och höll fast den vid neddrivningslansens nedre ände. Under neddrivningen matade de ned varsin slang in i I-balkens vinklar. Efter neddrivningen drogs neddrivningslansen upp direkt, ett nytt U-rör och spets togs fram och pålkranen sattes i läge för nästa neddrivning.

På detta vis sattes de 15 U-rören på 40 minuter. Detta gjordes utan att personalen hade någon speciell vana vid metoden, man kan därför förvänta sig att resultatet kan förbättras något. Vid bygge av ett helt lager tillkommer en del arbetsmoment som inte är taget hänsyn till vid den ovan angivna kapaciteten. Vid försöken gjordes ingen förflyttning av pålkranen och därmed inte heller någon förflyttning av pålkransmattorna. Detta ger ett litet tillägg varför ett rimligt antagande kan vara att 15 U-rör i genomsnitt sätts på en timme, dvs vi antar att pålkransförflyttning, mattförflyttning och lite annat tar ca 20 minuter per timme. Det innebär att ca 120 U-rör bör kunna sättas på en 8-timmars arbetsdag. Kan tekniken utvecklas ytterligare kan denna siffra öka. I Söderköping hade leran rikligt med silt- och sandskikt de sista 5-6 meterna vilket medförde att pålkransföraren fick slå ett antal slag för att få ned I-balken. I en lösare lera där balken sjunker av egen och hejarens tyngd går neddrivningen snabbare vilket förbättrar kapaciteten.

Kapaciteten med denna metod att driva ned U-rören oskyddade är avsevärt högre än den tidigare använda metoden med ett skyddande foderrör. Jämför figur 2.1. Om dragpåkänningen på slangen kan accepteras ur hållfasthets- och täthetssynpunkt kan kostnaden för lagret sänkas. Beräkningar för hur totalkostnaden för lagret kan påverkas redovisas i kapitel 8.

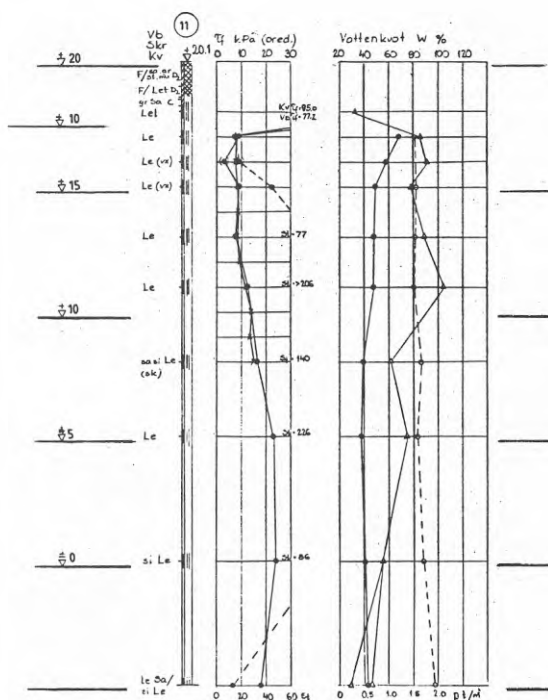
Kapaciteten bör inte minska om en något större I-balk används, som medger ett skänkelavstånd på 35-45 cm. Ur värmeöverförings-synpunkt bör en I-balk av typ IPE-400 vara lämplig som neddrivningslans. Den bör ge ett skänkelavstånd på ca 35 cm. Att ytterligare öka skänkelavståndet för enkla U-rör ger endast marginella förbättringar, (se kapitel 7 där olika värmeslans jämförs).

4 NEDDRIVNINGSFÖRSÖK I GÖTEBORG, SÄVEDALEN

4.1 Geotekniska förhållanden

Försöken gjordes tillsammans med Göteborgs Betongpålar AB i samband med att de utförde provpålning för en utbyggnad av Sävenäs sopstation. En geoteknisk undersökning för området har utförts av Flygfältsbyrån i Göteborg varifrån den geotekniska beskrivningen huvudsakligen är hämtad. Försöken gjordes i december 1986.

Området är beläget på södra sidan av Sävenäs dalgång och utgörs idag huvudsakligen av en avgrusad yta. Jordlagren består överst av fyllning med matjord till 0.4-1.7 m djup. Under fyllningen följer en torrskorpelera med en varierande mäktighet, 0.4-0.8m. Under torrskorpelera följer en högsensitiv lera, (kvicklera) ned till ca 35 m djup. Lerans skjuvhållfasthet har uppmätts till 8-10 kPa strax under torrskorpelera och den ökar svagt mot djupet. Portrycksfördelningen är relativt rätlinjig med en trycknivå strax under nuvarande markyta. En sammanställning av undersökningarna framgår av figur 4.1.



Figur 4.1 Skjuvhållfasthet, vattenkvot, sensitivitet och skrymdensitet vid försöksplatsen, Sävenäs.

4.2 Utförda försök med enkla U-rör (CTH)

Neddrivningsförsöken gjordes på samma sätt, med samma neddrivningslans och samma typ av spetsar som vid försöken i Söderköping. Fyllningsmaterialet närmast markytan och en kortare mast på pålkranen gjorde försöken något omständigare att göra. Med en pryl skapades först ett hål med en diameter av ca 0.3 m och ca 3 m djup i vilket I-balken med spetsen ditsatt placerades. Därefter drevs balken med värmväxlaren ned till fullt djup ca 19 m under markytan. Detta innebar att inget kapacitetstest kunde göras men metoden provades och fungerade lika bra som i Söderköping. Den annorlunda leran krävde mycket liten kraft för att penetreras, I-balken med värmväxlaren sjönk av egen och hejarens vikt ned till fullt djup. Spetsen fungerade väl som ankare och höll kvar slangen då balken drogs upp. Töjningsmätning gjordes på samma sätt som i Söderköping och dessutom provades att mäta krafterna som slangen utsätts för med hjälp av en lastcell. Resultaten från dessa mätningar framgår av kapitel 5. I figur 4.2 visas en bild från försöken i Sävenäs.



Figur 4.2 Neddrivningsförsök vid Sävenäs, Göteborg.

5 BELASTNING PÅ SLANG VID NEDDRIVNING I LERA

5.1 Beskrivning av belastningen

Vid fältförsöken som utfördes av Geologiska institutionen, CTH, i Söderköping och i Sävenäs har plastslangen delvis varit oskyddad vid neddrivningen (försöken är beskrivna i kapitel 3 och 4). Det innebär att plastslangen utsattes för en dragbelastning vid neddrivningen. Belastningen på slangen innebär att den töjs under en kort tidsperiod, och att töjningen kan ligga kvar en tid efter neddrivningen. Även om dragpåkänningen inte är så stor att den ger brott kan den påverka slangens hållfasthetsegenskaper och livslängd. Det är därför väsentligt att studera vilken belastning som påfördes slangen vid försöken och att studera plastslangens draghållfasthetsegenskaper.

5.2 Allmänna egenskaper för polyetenrör

Polyeten är en termoplast som tillverkas genom polymerisation av etengas. Genom att variera tillverkningsbetingelserna, tryck och temperatur, samt genom tillsats av katalysatorer, erhålls polyeten med olika egenskaper. De olika kvaliteterna klassificeras efter densiteten, enligt följande:

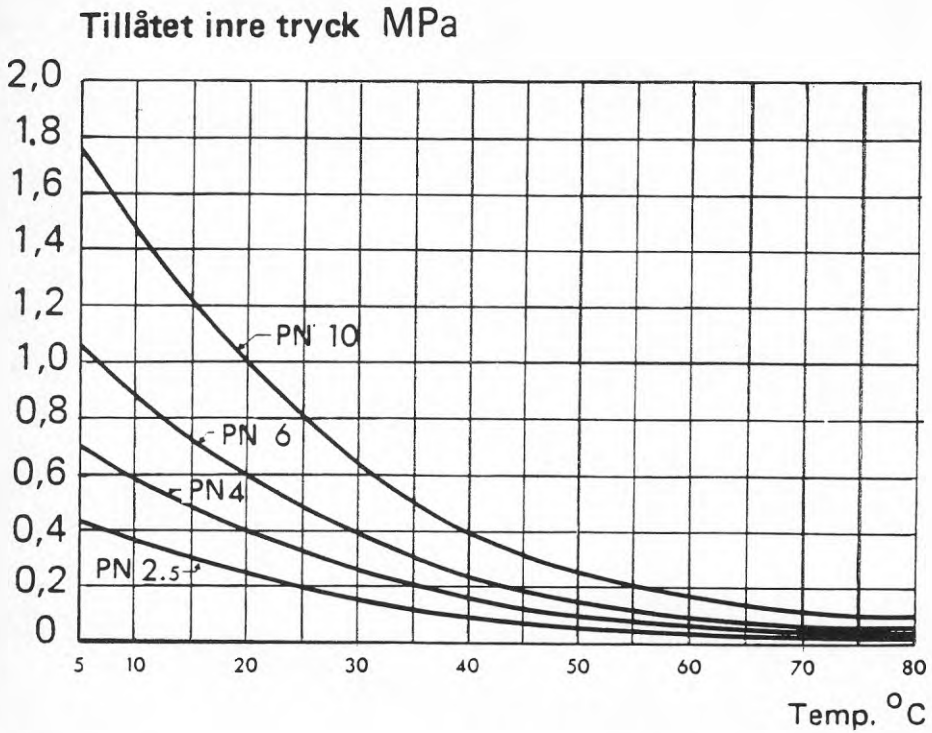
PEL	920-930 kg/m ³
PEM	930-940 kg/m ³
PEH	940-960 kg/m ³
PEX	(ca 940 kg/m ³)

PEX är ett speciellt högdensitetspolyeten som genom en speciell tillverkningsprocess ges en mera förnätad struktur än konventionell PEH. Skillnaderna i egenskaper är att PEH är styvare och tätare än PEL. Hårdhet och draghållfasthet är också högre för PEH, som också är mera resistent mot kemikalier. Vad gäller de termiska egenskaperna så ökar värmeledningsförmågan och värmekapaciteten med densiteten, medan värmeutvidgningskoefficienten minskar. Egenskaperna för PEM ligger nära PEH, utom vad gäller kemikalieresistens och tryckhållfasthet där egenskaperna helt motsvarar PEH. Speciellt för PEX-rör är att hållfastheten minskar betydligt långsammare med stigande temperatur än för övriga PE-rör.

PEX-rör kan användas vid driftstemperaturer upp till 80-90°C, medan övriga PE-rör har en övre gräns vid ca 60°C. Både PEM- och PEH-rör är väl lämpade för användning i jordvärmelager, såvitt inlagringstemperaturen inte är för hög. PEH har något bättre hållfasthetsegenskaper och värmetekniska egenskaper, men är något dyrare. I de försök som redovisas i denna rapport är det genomgående PEM-rör, tryckklass PN 6.3, som använts.

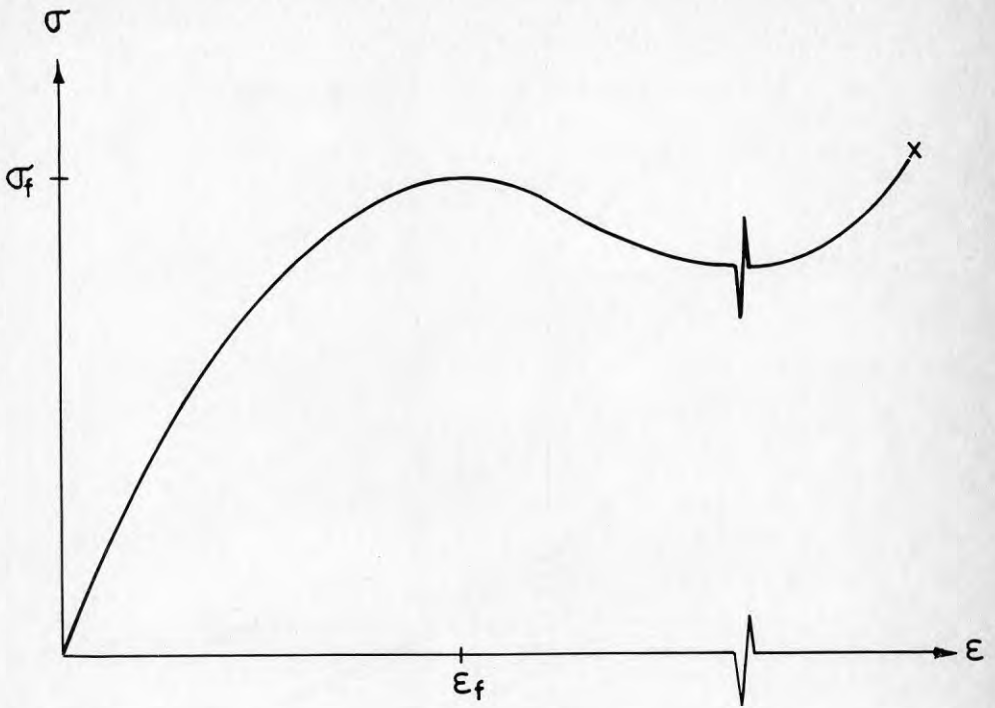
5.3 Hållfasthetsegenskaper för polyeten

Polyeten har liksom andra plaster mycket speciella hållfasthetsegenskaper. Det är ett viskoelastiskt material, dvs en belastning leder till en momentan elastisk töjning samt en tidsberoende krypning. Såväl materialets E-modul som brottdragspänningen är starkt beroende av temperatur och tid. PEH och PEM har god spänningsskorrosionsresistens mot normalt förekommande medier, men oxiderar långsamt i luft vilket medför en försprödning. Oxidationen ökar med ökad temperatur och under inverkan av UV-ljus. Som skydd mot detta tillsätts därför antioxidant och sot, vilket skyddar mot UV-ljus. Eftersom PE-rör har använts huvudsakligen för VA-ändamål är de dimensioneringsregler som finns baserade på hållfastheten i rent vatten. I dessa sammanhang är det långtidshållfastheten som är dimensionerande, normalt 50 år vid 20°C, medan det vid neddrivning av slang i jord är korttidshållfastheten, vilken är betydligt högre. I figur 5.1 framgår tillåtet inre tryck i PEH- och PEM-rör av olika tryckklass och som funktion av temperatur. Diagrammet gäller för 50 års belastning.



Figur 5.1 Tillåtet inre tryck för PEH- och PEM-rör vid 50 års livslängd.

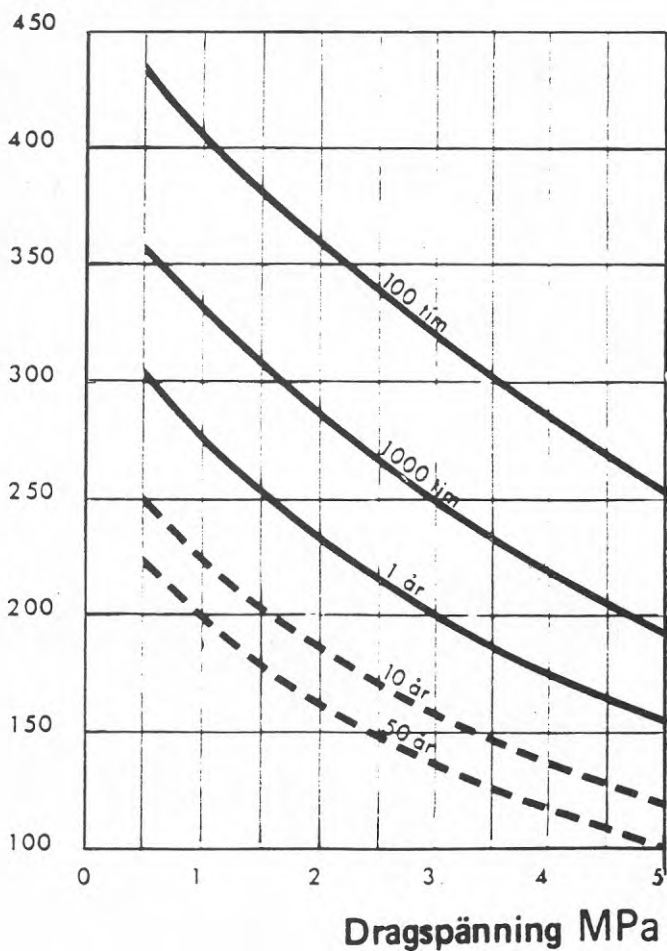
Lasttöjnings sambandet för polyeten är principiellt framställt i figur 5.2. För PEH-rör gäller att draghållfastheten σ_f (flytgräns) vid korttidsbelastning är ca 20 MPa. Töjning till flytgränsen är 16% medan brotttöjningen är 600% eller mer. Detta gäller vid 20°C.



Figur 5.2 Principiellt spännings-deformationssamband för polyeten.

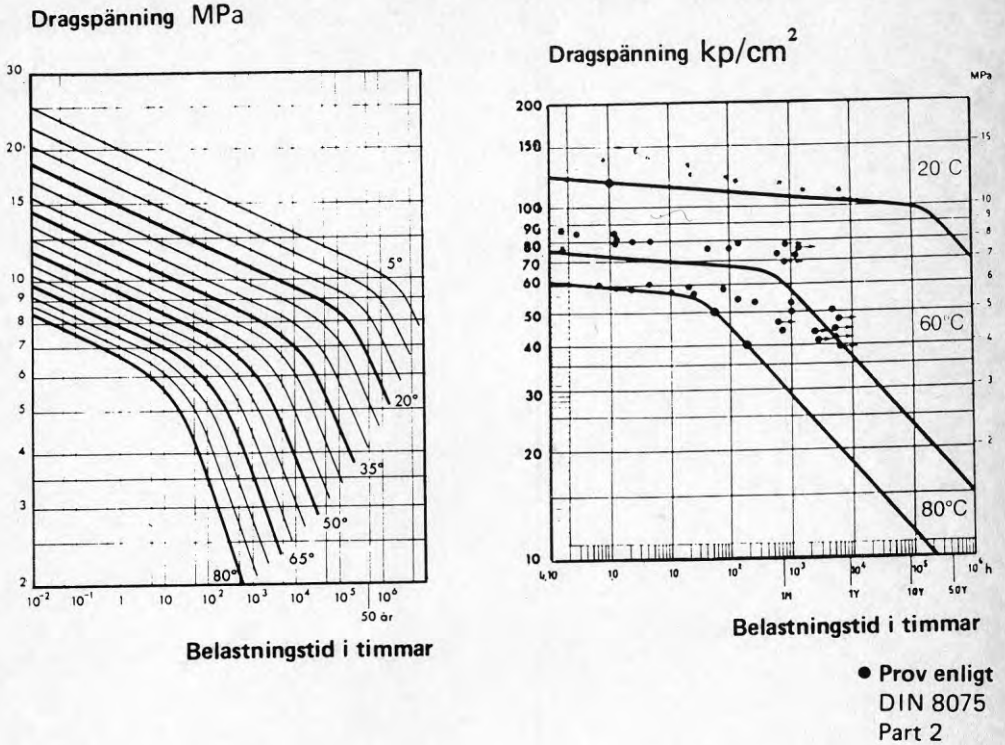
E-modulen vid korttidsbelastning brukar anges till 800-900 MPa, men som framgår av figur 5.2 är sambandet mellan spänning och deformation ej rätlinjigt i något intervall. Detta innebär att, för att Hooke's lag ska kunna tillämpas, måste värdet på E-modulen väljas med hänsyn till spänning, tid och temperatur. I figur 5.3 redovisas E-modulens variation med spänningen vid olika belastningstider.

E-modul MPa



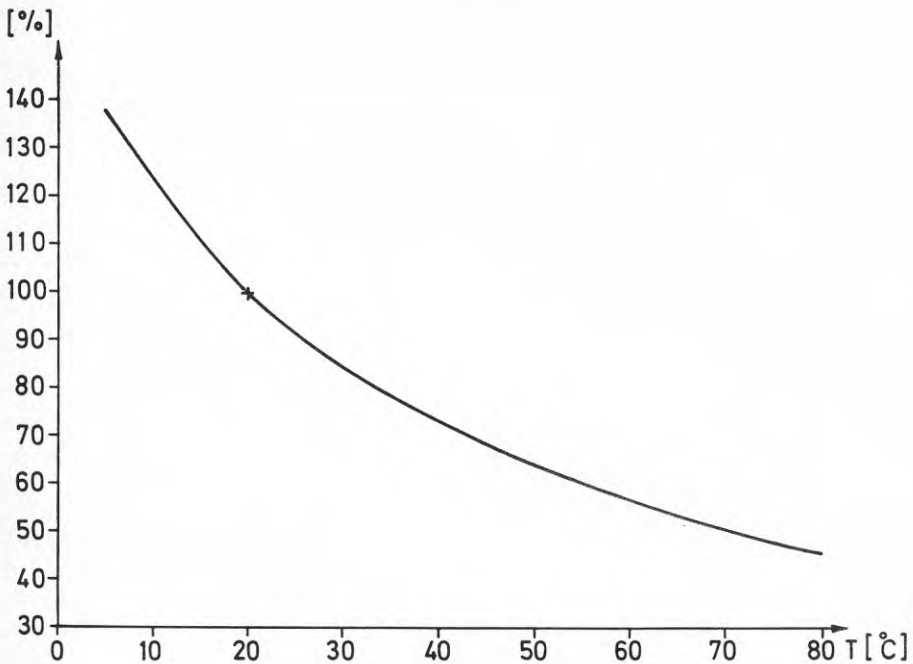
Figur 5.3 E-modul för PEH-rör vid +20°C som funktion av spänning.

Brottdragspänningens beroende av temperatur och belastningstid för PEH-slang framgår av figur 5.4. Det vänstra diagrammet är hämtat ur Svensk Standard SS 3362. Enligt en fabrikantuppgift, högra diagrammet, har polyetenet idag bättre hållfasthetsegenskaper.



Figur 5.4 Samband mellan brottspänning och belastningstid för PEH, enligt Svensk Standard SS 3362 resp för rör tillverkade av Unifos DGDS 2467BL.

Vid neddrivning av slang i jord är hållfasthetens tidsberoende mindre intressant. Själva neddrivningen tar bara ca en halv minut, varefter belastningen minskar. Hållfasthetens temperaturberoende däremot har stor betydelse. Figur 5.5 redovisar dragbrotts-spänningens relativa variation med temperaturen. PE-rör som ligger ute i solsken sommartid kan uppnå en temperatur där hållfastheten bara är hälften av den vid $+20^{\circ}\text{C}$. Vid lägre temperaturer än $+20^{\circ}\text{C}$ ökar hållfastheten kraftigt, men i gengäld ökar sprödheten vilket kan leda till brott om röret stötblastas.



Figur 5.5 Brotttdragsspänningens relativa variation med temperaturen vid korttidsbelastning av PEH-rör.

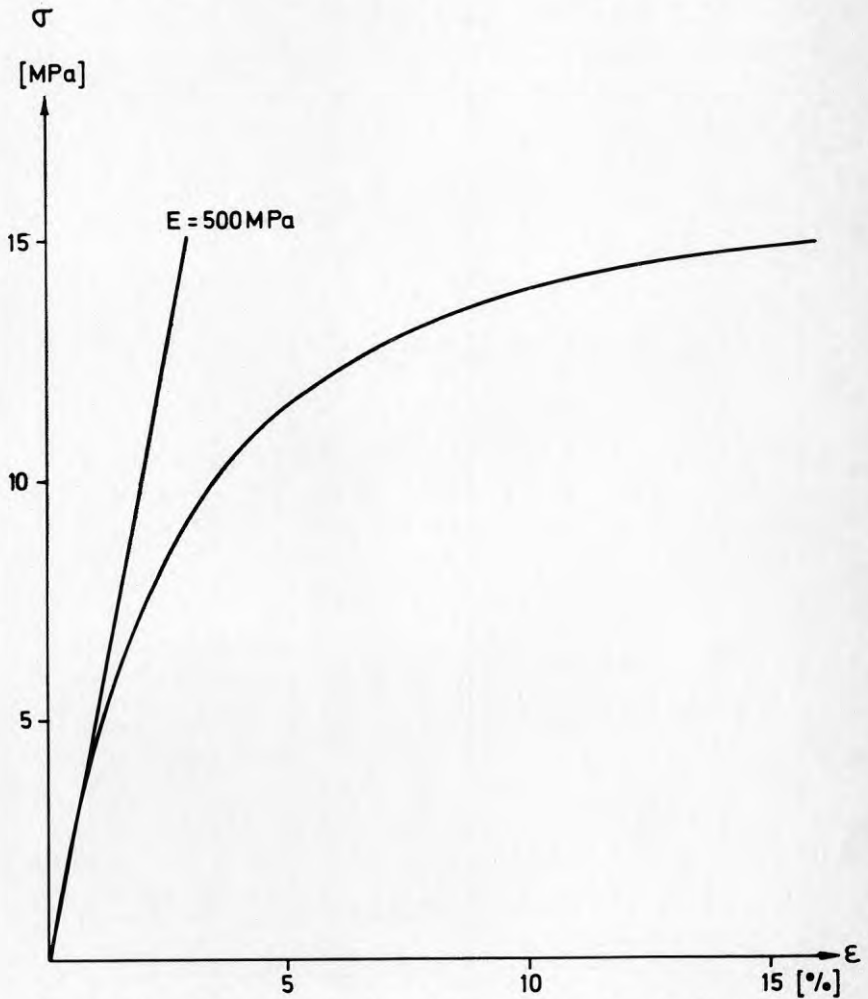
Enligt normkraven i SS 3362 ska PEM-rör tåla ett inre tryck av 11.8 MPa under en timma vid 20°C. För PEH-rör gäller samma krav under belastningen 14.7 MPa. Hållfastheten för PEM är alltså ca 80 % av den för PEH. Vid de neddrivningsförsök som utförts har PEM-rör med följande tillverkningsdata använts:

Tryckklass	6.3
Ytterdiameter	25 mm
Vägg tjocklek	2.0 mm

För att bestämma dess egenskaper har dragprov utförts i lab. vid 20°C. Proven utfördes under så kort tid, ca en minut, som neddrivningen tar. I tabell 5.1 refereras uppnådd draghållfasthet, till flytgräns, och i figur 5.6 är sambandet mellan spänning och töjning framställt. Dessutom dragtestades slangar som skarvats med rak muff eller L-rör. Slutsatsen av dessa prov är att en väl utförd skarv inte utgör en försvagning av slangen.

Tabell 5.1 Uppmätt flytgräns för PEM-rör, korttidsbelastning vid temperaturen 20°C.

Försök	Flytgränslast (N)	Flytspänning (MPa)
1	2100	14.4
2	2300	15.9
3	2250	15.6
4	2150	14.9
5	2050	14.2
medelv.	2170	15.0

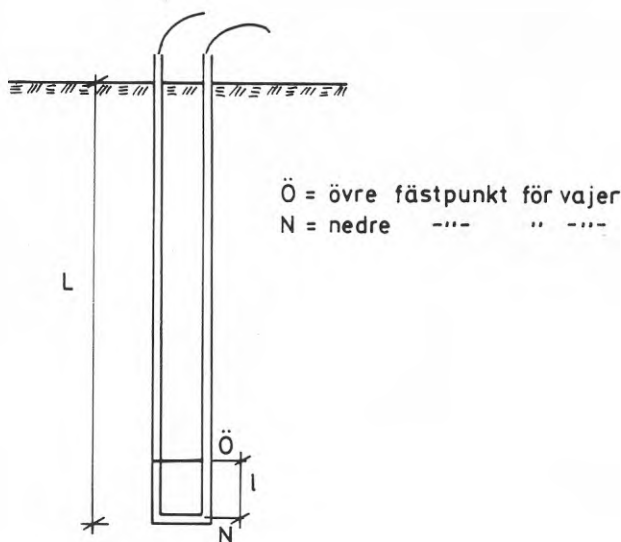


Figur 5.6 Uppmätt spännings-töjningssamband, korttidsbelastning vid temperaturen 20°C.

5.4 Fältmätningar av töjning och spänning i slangar vid neddrivning

Töjningsmätningar genomfördes i Söderköping och Sävenäs. De utfördes på så sätt att en vajer fästes i botten på U-röret och en annan vajer 1 eller 2 m högre upp i slangens. En vajer inuti vardera U-rörsskänkel leddes så upp till markytan. Genom att under neddrivningen mäta hur mycket som vajrarna drogs in i slangarna erhöles ett mått på töjningarna. I figur 5.7 illustreras mätningarna och i tabellerna 5.2 och 5.3 redovisas resultaten.

Inför neddrivningen tillverkades också en lastcell, i form av ett tunt stålrör med trådtöjningsgivare, för att direkt kunna mäta lastpåkänningen på slangens under neddrivning. Lastcellen skarvades in i ena skänkeln av U-röret, en meter från botten. Av tidskäl användes lastcellen bara en gång, vid en neddrivning i Sävenäs. Resultatet från det försöket och spänningen beräknad utifrån töjningsmätningarna och σ - ϵ -diagrammet i figur 5.6 redovisas i tabell 5.4. Värdena är korrigerade med hänsyn till temperaturen vid neddrivningstillfället.



Figur 5.7 Töjningsmätning, principskiss

Tabell 5.2 Töjningsmätningar vid neddrivningsförsök i Söderköping. L = 18 m och l = 2 m (enligt figur 5.1).

Försök	Töjning		Medeltöjning		Max.töjning	
	övre (mm)	nedre (mm)	(mm/m)	(%)	(mm/m)	(%)
1	80	100	5.6	0.56	10	1.0
2	80	210	11.6	1.16	65	6.5
3	100	100	5.6	0.56	5.6	0.56
Medelvärde				0.74		2.7

Tabell 5.3 Töjningsmätningar vid neddrivningsförsök i Sävenäs, Göteborg. L = 16 m och l = 1 och 2 m.

Försök	l (m)	Töjning		Medeltöjning		Max.töjning	
		övre (mm)	nedre (mm)	(mm/m)	(%)	(mm/m)	(%)
1	1	125	130	8.1	0.81	5	0.5
2	2	75	90	5.6	0.56	12.5	1.25
3	1	90	100	6.3	0.63	10	1.0
Medelvärde					0.67		0.92

Tabell 5.4 Erhållna max. spänningar vid neddrivningsförsök.

Försök	Söderköping (MPa)	Sävenäs (MPa)
1	4.3	1.8
2	12.6	3.9
3		3.3
4		2.7 (lastcell)
Medelvärde	8.5	2.9

5.5 Spänningar i slangen i förhållande till lerans skjuv- hållfasthet

Den påförda belastningens storlek bör bero av två saker, dels lerans skjuvhållfasthet, dels den andel av slangens mantelyta som påförs skjuvkrafterna.

Lasten kan således tecknas:

$$P = \int_0^L \int_0^{\theta} \tau(x) r d\theta dx$$

där x är längdkoordinaten längs med slangen, θ är den vinkel som anger hur stor del av slangens omkrets som skjuvkrafterna verkar på och r anger slangens ytterradie.

Vid nedtryckningen av lansen med den specialgjorda spetsen rörs leran om något och lerans skjuvhållfasthet närmast slang bör vara lägre än τ_{fU} , den odränerade hållfastheten. Slangen ligger inne i ett vinkelrätt hörn av balken varför skjuvkrafterna kan förmodas verka på ca 0.5 av slangens omkrets, dvs $\theta = \pi$ rad. I figur 5.8 och 5.9 är τ_{fU} och τ_r schematiserade utifrån de geotekniska undersökningarna.

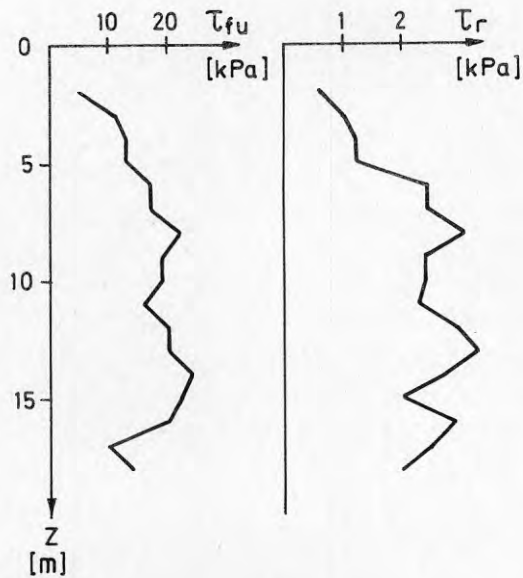
Om skjuvspänningen antas jämnt fördelad längs slangen och $\theta = \pi$ rad erhålls en mobiliserad skjuvspänning längs slangen enligt tabell 5.5, med hänsyn till uppskattad last enligt tabell 5.4. I tabell 5.6 anges lerans medelskjuvhållfasthet över neddrivningsdjupet. Av tabellerna 5.5 och 5.6 framgår att i Söderköping mobiliserades ca 10% och i Sävenäs ca 5% av odränerade skjuvhållfastheten (τ_{fU}) samt är i samma storleksordning som τ_r . Spetsen (neddrivningsdonet) för slanginstallationen i leran har därmed haft en väsentlig betydelse för att sänka lerans skjuvhållfasthet i slangens närhet. Detta har sannolikt haft en mycket gynnsam effekt för att reducera belastningen på slangen vid neddrivningen.

Tabell 5.5 Beräknad påförd skjuvspänning på slang från lera.
 $\theta = \text{II rad}$.

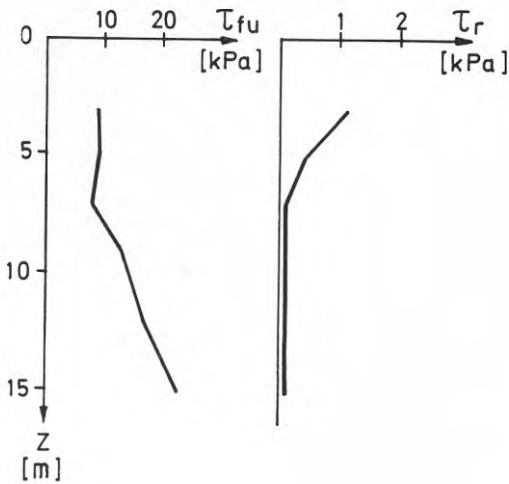
	L (m)	P (N)	τ (kPa)
Söderköping	18	1230	1.74
Sävenäs	16	420	0.67

Tabell 5.6 Lerans skjuvhållfasthet. Medelvärde över angivet djup. (Data enligt figur 5.8 och 5.9.)

	Djup (m)	τ_{fu} (kPa)	τ_r (kPa)
Söderköping	218	17	2.2
Sävenäs	316	14.5	0.2



Figur 5.8 Skjuvhållfasthet, Söderköping. (τ_r beräknad med hänsyn till i utredning angiven sensibilitet)



Figur 5.9 Skjuvhållfasthet, Sävenäs. (τ_r beräknad med hänsyn till i utredning angiven sensibilitet)

Av fabrikanter av PEM-slang rekommenderas inte töjningar över 5.5% även vid en korttidsbelastning som det är frågan om här. Vid ett av försöken i Söderköping överskreds detta värde varför det också enligt figur 5.6 kan antas att spänningen i slangen varit relativt hög. Försöken i Söderköping var emellertid något speciella. I och med att siltskiktens antal och mäktighet ökade mot djupet ökade motståndet för neddrivningen av slangen. Under neddrivningens första del sjönk lansen av sin egen och hejarens tyngd. Vid neddrivningens sista del användes hejaren för att slå ned lansen som sjönk $\frac{1}{2}$ -1 m vid varje slag. Slagens styrka varierade beroende på hur högt hejaren lyftes vid varje slag. Starka slag ger en puls genom lansen som resulterar i en relativt kraftig töjning av slangen. Töjningsförsöken i Söderköping är således även påverkade av hur hejaren användes av pålkransföraren och inte enbart av lerans skjuvhållfasthet. Vid försöket då 6.5% töjning erhöles utsattes lansen för kraftiga slag med hejaren.

Metoden är sannolikt användbar i lösa leror ned till 25-30 m djup då U-rören kan sättas ned helt utan slag. Då utsätts slangen inte för några krafter som försämrar slangens livslängd. I leror med

större inslag av sand- och siltskikt där lansen inte sjunker av egen och hejarens tyngd är det viktigt att neddrivningen görs med försiktiga slag och att töjningsmätningar utförs då och då under arbetets gång.

6 NEDDRIVNINGSFÖRSÖK UTFÖRDA AV DGI

6.1 Inledning

Danmarks Geotekniska Institut - DGI i Lyngby har utfört försök att sätta ned värmeväxlare med tre olika metoder på fyra olika platser. Försöken har utförts med relativt lätt utrustning och arbetet har varit helt inriktat på metoder som kan tillämpas för mindre anläggningar, t ex för villabebyggelse. I detta kapitel sammanfattas mycket kortfattat försöksresultaten. För mer information hänvisas till DGI:s egen slutrapport för projektet.

6.2 Beskrivning av försöksmetoder och resultat

En förutsättning vid val av försöksutrustning för att bygga vertikala värmelager för villabebyggelse är att utrustning måste finnas tillgänglig och den måste vara billig. DGI har provat tre metoder, augerborrning, jordförträngningshammare och spolutrustning. Av dessa metoder visade sig endast augerborrningen ge tillfredsställande resultat. Även jordförträngningshammaren fungerade men inte tillräckligt bra för att kunna användas praktiskt och ekonomiskt. Med augerborrning erhöles ett djup på ca 20 m vid de fyra lokalerna efter 1-2 timmars borring. I det borrarade hålet, $\varnothing 150$ mm, sattes därefter ett U-rör som värmeväxlare med ca 100 mm skänkelavstånd. Hålet efterfylldes med sand.

Jordförträngningshammare används normalt för att driva rör horisontellt t ex under vägar. Den provade modellen var en cylindrisk tryckluftshammare. Försök gjordes med PVC-rör som foderrör och med 1" och 1 1/4" galvaniserade stålrör som trycktes ned framför hammaren. Bra resultat erhöles inte med någon av metoderna. Störst djup erhöles med stålrören (10-15 m) som då själv utgör värmeväxlare (yttre röret i en coaxial värmeväxlare). Då PVC-röret används som foderrör är det risk att tryckluftshammaren fastnar i marken och det är en dyrbar utrustning att förlora på 20 m djup. Den metoden anses därmed inte praktiskt användbar.

Vid spolförsöken användes en konventionell spolutrustning för rensning av avloppsledning. Metoden provades endast vid en lokal och tillfredsställande resultat erhöles ej. Stopp på stenar

och att hålet faller in omkring spolrör och skarvmuffar var återkommande problem. Metoden kräver större vattenmängder än vad som användes vid försöken och kan då ge bättre resultat.

6.3 Kostnader

Tillfredsställande resultat erhöles endast vid försöken med augerborrning och det är därför endast den metoden som är aktuell vid en kostnadsberäkning. Kostnaden baseras på en mindre mobil borrhög eller mindre lastvagn med kran. Borrhögen och installationen av värmewäxlare sköts av 3 män. Med de kapaciteter som erhöles vid försöken blir borrhögningskostnaden 40.7-75.8 DKK per meter (35-65 SEK/m).

För en mindre anläggning för t ex en villa i Danmark (5 borrhögnar till 20 m) blir totalkostnaden för en installation inkl etablering, borrhögn, U-rör och installation och sandfyllning totalt 88-123 DKK per meter (76-106 SEK/m).

För en större anläggning (10 borrhögnar till 20 m) blir motsvarande kostnader 70-105 DKK per meter (60-90 SEK/m).

7 VÄRMEÖVERFÖRING MELLAN FLUID OCH LAGER

7.1 Allmänt

Värmeöverföringen mellan värmebäraren (fluiden) och lagret (marken) har studerats teoretiskt av Göran Hellström vid Högskolan i Lund. Beskrivningen finns i Handboken Markvärme del 2. Teorin i detta kapitel följer den i Markvärmeboken och för ytterligare studier hänvisas till den.

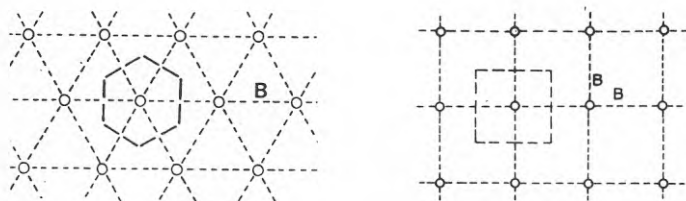
Värmeöverföringen mellan fluiden och marken kan beskrivas med värmemotståndet m_{sf} . I ett fall med en konstant effekt som avges från en markvärmeväxlare inträder efter en transient insvängningstid ett sk "steady-flux"-tillstånd, (temperaturprofilen omkring markvärmeväxlaren har en tidsberoende form). Skillnaden mellan fluidtemperaturen $T_f(t)$ och den lokala medeltemperaturen $T_m(t)$ blir konstant och proportionell mot effekten:

$$T_f - T_m = q \cdot m_{sf}$$

Detta gäller effektpulser med längre varaktighet, med tidskravet:

$$a \cdot t/R_1^2 = 0.2 \quad (\text{för hexagonalt rörgitter})$$

Samma gäller med stor noggrannhet även för kvadratisk gitter. a är temperaturledningstalet för marken som kan variera mellan $3 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ för lera och $1.5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ för berg. Typiska värden på t blir då vid ett hålavstånd av 2 m i lera ca 15 dygn och vid ett hålavstånd i berg på 4 m ca 6.2 dygn.



Figur 7.1 Hexagonalt och kvadratisk rörgitter

Värmemotståndet mellan fluiden och omgivande mark m_{sf} kan delas upp i flera delmotstånd:

$$m_{sf} = m_p + m_g$$

Värmemotståndet m_p mellan fluiden och marken strax utanför slangen består av tre komponenter:

$$\begin{array}{lll} m_{fc} & : & \text{värmemotstånd mellan fluid och plaströrets innervägg} \\ m_p & : & \text{" över plastmaterialet} \\ m_c & : & \text{" mot omgivande jord} \end{array}$$

m_{fc} beror huvudsakligen av strömningsförhållandena i plastslangen. m_p beror av rörmaterialets värmeledningsförmåga. m_c beror av kontakten mellan rör och omgivande jord och vars inverkan inte är helt klargjord.

För ett markvärmelager i lera, sand och silt bestäms värmemotståndet m_{sf} till stor del av m_g , värmemotståndet i marken. För värmeväxlersystem i jord har U-rör visat sig vara en ur kostnadsynpunkt och neddrivningssynpunkt lämplig utformning jämfört med koncentriskt enkelt rör. Här redovisas därför kortfattat värmemotståndet m_g för enkla och dubbla U-rör. För övriga typer av markvärmeväxlare hänvisas till Markvärmeboken del 2.

För ett enkelt U-rör i mark kan värmemotståndet m_{sf} delas upp i två komponenter:

$$m_{sf} = m_g + m_p/2$$

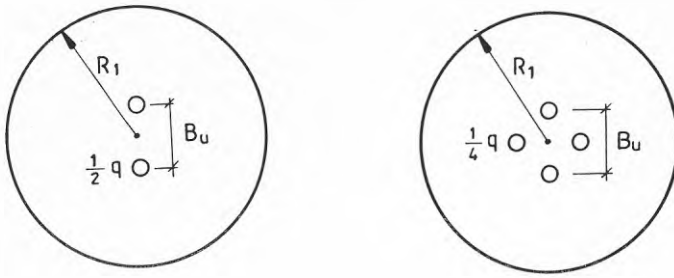
I ett hexagonalt rörgitter kan värmemotståndet m_g tecknas:

$$m_g = \frac{1}{2\pi\lambda} \left(\ln \left(\frac{R_1}{R_p} \right) - \frac{3}{4} + b^2 - \frac{1}{2} \ln(1-b^4) - \frac{1}{2} \ln \left(\frac{B_u}{R_p} \right) \right)$$

$$R_p \ll R_1, \quad R_p < (1-b) \cdot R_1, \quad B_u > 3 \cdot R_p \quad (\text{se figur 3.2})$$

där R_p = rörets ytterradie

$$b = B_u / (2 \cdot R_1)$$



Figur 7.2 Enkelt och dubbelt U-rör i hexagonalt rörgitter.
Från BFR-rapport T17:1985.

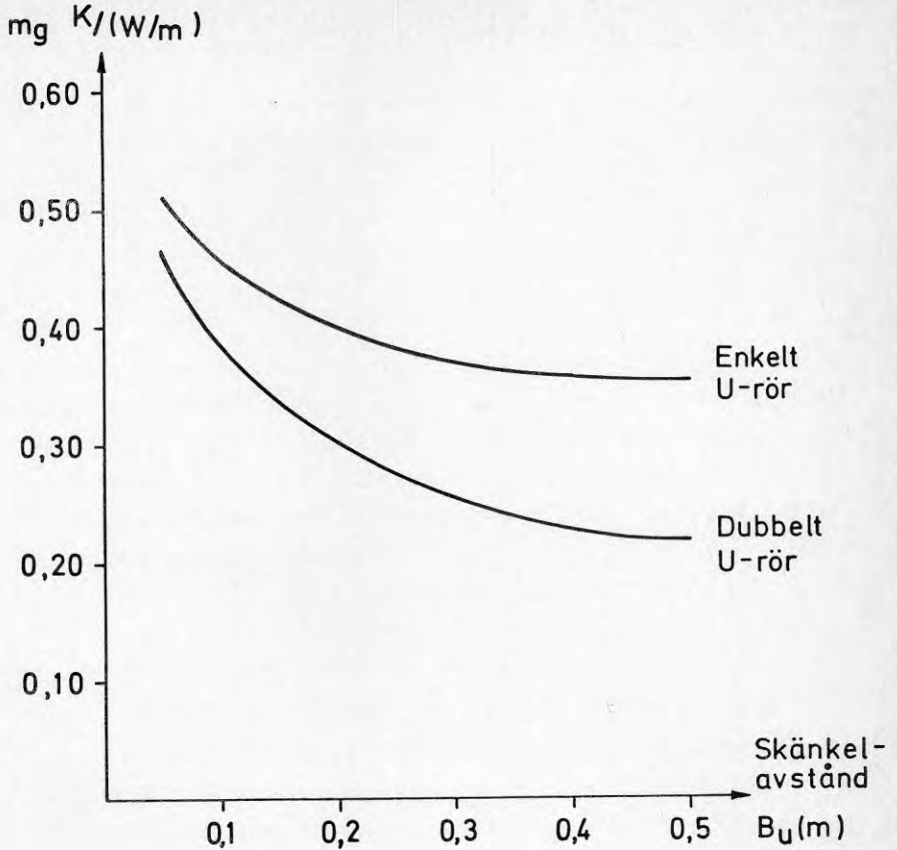
För ett dubbelt U-rör blir motsvarande värmemotstånd:

$$m_{sf} = m_g + m_p/4$$

På motsvarande sätt och med samma förutsättningar kan värmemotståndet m_g för det dubbla U-röret tecknas:

$$m_g = \frac{1}{2\pi\lambda} \left(\ln \left(\frac{R_1}{R_p} \right) - \frac{3}{4} + b^2 - \frac{1}{4} \ln(1-b^8) - \frac{3}{4} \ln \left(\frac{B_u}{R_p} \right) + 0.1733 \right)$$

I figur 7.3 jämförs värmemotståndet m_g för enkla och dubbla U-rör i lera vid olika skänkelavstånd B_u .



Figur 7.3 Variation av m_g (K/(W/m)) med skänkelavstånd för ett enkelt och dubbelt U-rör i hexagonalt rörgitter. $\lambda = 1.0$ W/mK, $R_p = 0.008$ m, $B = 2.0$ m

m_{fc} beror huvudsakligen av flödesförhållandena i plastslangen. Om flödet i rören är turbulent är värmemotståndet mellan fluid och rörvägg (m_{fc}) i stort sett försumbart. Vid laminära förhållanden kan det bli förhållandevis stort, >0.1 (K/(W/m)).

Värmemotståndet över rörväggen m_p' är direkt beroende av rörväggens tjocklek och rörmateriallets värmeledningsförmåga:

$$m_p' = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_p} \ln \left(\frac{R_{py}}{R_{pi}} \right)$$

där R_{py} resp R_{pi} är rörets yttre resp inre radie och λ_p är rörmaterialiets värmeledningsförmåga.

m_c är kontaktnotståndet mellan mellan röret och omgivande mark, vars inverkan inte är helt klargjord. Förmodligen varierar det med jordart och vattenhalt och tecknas allmänt:

$$m_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_s} \ln \left(\frac{R_{py} + \Delta R}{R_{py}} \right)$$

där R är kontaktskiktets tjocklek och λ_s dess värmeledningsförmåga. Om skiktet har en värmeledningsförmåga som är väsentligt lägre än jordmaterialiet kan det ha betydelse i dessa sammanhang. Vid vattenmättade förhållanden kan värmeledningen för kontaktskiktet dock inte bli sämre än för vatten och m_c bör därför i dessa fall i stort sett sakna betydelse.

7.2 Jämförelse mellan olika typer av värmeväxlare

Med användning av sambanden i avsnitt 7.1 kan olika typer av värmeväxlare jämföras. Genom att införa begreppet volumetrisk värmeöverföringskoefficient α_v (W/m^3K) erhålls ett mått på värmeväxlarens prestanda (Claesson, J mfl). För ett värde på α_v kan därmed olika U-rörskonfigurationer jämföras. Värmeövergångskoefficienten definieras av sambandet:

$$\alpha_v = q_v / (T_f - T_m) \quad (W/m^3K)$$

q_v anger inmatad effekt per volymsenhet av lagret, (W/m^3).

För ett lågtemperaturlager där värmepump används vid energiuttag och laddning sker med lågtemperatursolfångare eller vindkonvektorer kan en relativt hög, drivande temperaturdifferens $T_f - T_m$ accepteras, därmed kan α_v vara lågt. För ett högtemperaturlager utan värmepump som laddas med medel- eller högtemperatursolfångare kan det vara önskvärt att lagret kan ta emot och avge högre effekter per volymsenhet, samtidigt som det vid energiuttag kan vara väsentligt att ha ett litet temperaturfall mellan fluid och

lagertemperatur. Då erhålls ett högre värde på α_V . Genom att utnyttja ett korttidslager med vatten för utjämning mellan dag och natt och med lågtemperatursystem för värmedistribution (golv eller luftvärme) kan lager med ett lågt α_V även vara möjliga vid lagring vid högre temperaturer utan värmepump.

I praktiken innebär ett lågt värde på α_V att avståndet mellan nedsticken ökar, nedsticken blir färre och lagret billigare. Ett högt värde på α_V innebär på samma lagervolym fler, tätare nedstick och därmed ett dyrare lager. I tabell 7.1 och 7.2 jämförs olika typer av värmeväxlare vid $\alpha_V = 0.5$ (W/m^3K) respektive $\alpha_V = 2.0$ (W/m^3K). Jämförelsen gäller enkla U-rör med skänkelavståndet 0.35 m och dubbla U-rör med skänkelavståndet 0.45 m. I tabellerna anges avstånd mellan nedsticken samt antal värmeväxlare som krävs för ett värmelager med volymen 50 000 m^3 och nedsticksdjupet 20 m. PEM-slang med dimensionen 16 och 25 är upptagna, den klenare dimensionen är lämplig i ett lager där nedsticken kopplas parallellt och den grövre där nedsticken kopplas gruppvis i serie. För ett lager med täta stick är det förmodligen nödvändigt att gå upp ytterligare i dimension t ex till 32 mm för det seriekopplade alternativet.

Tabell 7.1 Hålavstånd och antal nedstick för enkla och dubbla U-rör som värmeväxlare, $\alpha_V = 0.5$ W/m^3K

Värmeväxlare	Skänkelavstånd (m)	Hålavstånd (m)	Antal nedstick
Enkelt U-rör \varnothing 16 mm	0.35	2.24	575
Enkelt U-rör \varnothing 25 mm	0.35	2.36	520
Dubbelt U-rör \varnothing 16 mm	0.45	2.77	376
Dubbelt U-rör \varnothing 25 mm	0.45	2.87	350

Tabell 7.2 Hålavstånd och antal nedstick för enkla och dubbla U-rör som värmeväxlare, $\alpha_v = 2.0 \text{ W/m}^2\text{K}$

Värmeväxlare	Skänkelavstånd (m)	Hålavstånd (m)	Antal nedstick
Enkelt U-rör \varnothing 16 mm	0.35	1.24	1872
Enkelt U-rör \varnothing 25 mm	0.35	1.32	1653
Dubbelt U-rör \varnothing 16 mm	0.45	1.61	1108
Dubbelt U-rör \varnothing 25 mm	0.45	1.69	1010

Ovanstående jämförelse gäller pulser med längre varaktighet, s k "steady-flux"-tillstånd. För korta effektpulser är växelverkan mellan nedstickan och även skänklarna i varje nedstick försumbar. Värmeöverföringen är då proportionell mot den totala värmeväxlarytan i lagret, dvs den totala mängden slang i marken. I det fallet är lager med dubbla U-rör något bättre, då lagret i ovanstående exempel innehåller följande värmeöverförande area:

$$\pi \cdot \varnothing \cdot \text{Antal nedstick} \cdot 20\text{m} \cdot 4 \text{ (m}^2\text{)}$$

Lagret med enkla U-rör innehåller på motsvarande sätt följande area:

$$\pi \cdot \varnothing \cdot \text{Antal nedstick} \cdot 20\text{m} \cdot 2 \text{ (m}^2\text{)}$$

Lagerexemplen i tabell 7.1 och 7.2 har utnyttjats vid kostnadsberäkningarna i kapitel 8.

8 ANLÄGGNINGSKOSTNAD FÖR VÄRMELAGER MED VERTIKALA RÖR

8.1 Allmänt

Kostnaderna som tagits fram i detta avsnitt baseras dels på de tidigare uppgifterna från förstudien, dels på uppgifter från byggda och projekterade värmelager i lera. Kostnaderna för neddrivning av värmeväxlare har beräknats utifrån de verkliga kapaciteter som erhållits vid försöken inom detta projekt samt den kapacitet som BPA erhöll med sin metod i Söderköping. Kostnaderna för samlingsledningar, ventiler och luftning har reducerats något jämfört med de kostnader som finns redovisade för projekterade och utförda anläggningar. Det går att förenkla utförandet av detta vilket motiverar denna reduktion. Någon reduktion är inte gjord med hänsyn till utveckling av enklare och billigare kopplingar utan gäller den teknik som finns idag.

Kostnadsberäkningar har gjorts för två typer av värmelager som redovisas i kapitel 7.

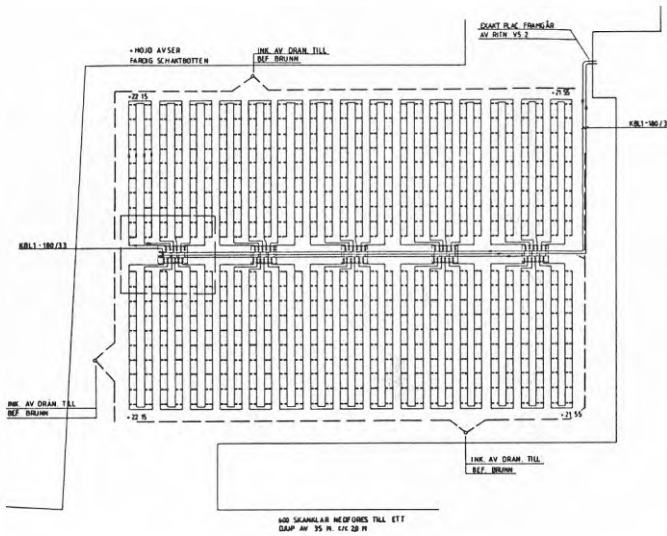
1. Värmelager med $\alpha_v = 0.5 \text{ W/m}^3\text{K}$. Det är ett lågtemperaturlager med värmepump alternativt ett medel-högtemperaturlager med en stor, drivande temperaturdifferens ($T_f - T_m$). Detta lager benämns fortsättningsvis för lågtemperaturlagret.
2. Värmelager med $\alpha_v = 2.0 \text{ W/m}^3\text{K}$. Ett medel-högtemperaturlager som utnyttjar värmen direkt för uppvärmning. Lagret har en relativt låg, drivande temperaturdifferens. Detta lager benämns fortsättningsvis högtemperaturlagret.

Antagen lagervolymer är $50\,000 \text{ m}^3$, djupet 20 m och lagret upptar därmed en markarea av $2\,500 \text{ m}^2$. Med en värmekapacitet av $1.0 \text{ kWh/m}^3\text{K}$ och ett temperatursving av 10°C i lågtemperaturlagret kan ca 500 MWh tas ut vid varje lagringscykel. Vid ett motsvarande temperatursving i högtemperaturlagret av 20°C kan 1000 MWh tas ut vid varje lagringscykel. Kostnader för eventuell värmepump eller korttidslager, solfångare och topplastpanna tillkommer.

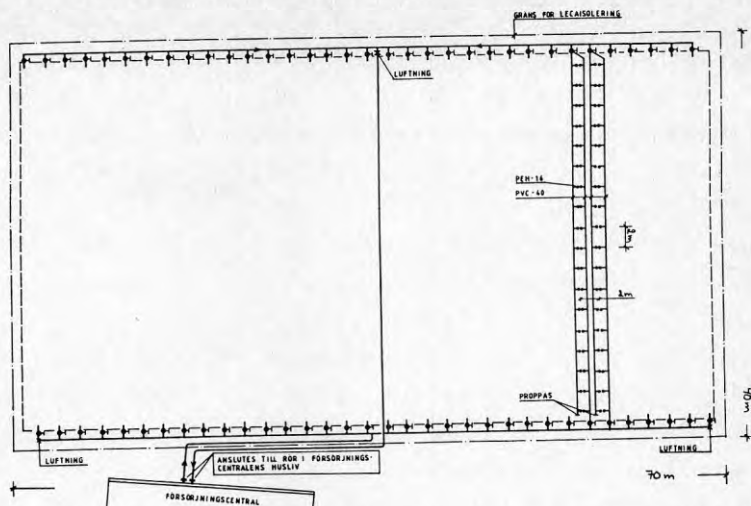
Kostnadsberäkningarna har gjorts för två kopplingsprinciper, en där alla U-rör är parallellkopplade och en där U-rören är kopp-

lade gruppvis i serie. Detta påverkar dels vilken rördimension som kan väljas ur flödessynpunkt, dels kostnaderna för kopplingar och ledningar i markytan. För dessa beräkningar har inte några noggranna dimensioneringsberäkningar ur flödessynpunkt utförts. I stället har rimliga rördimensioner valts utifrån tidigare arbete. För parallellkoppling har \varnothing 16 mm U-rör valts och fördelningsledningar med \varnothing 63 mm. För seriekoppling är U-rören \varnothing 25 mm och anslutna direkt vid kopplingsblock till samlingsledningarna.

Lagret är kvadratisk med sidlängden 50 m. Vid parallellkoppling löper samlingsledningarna antingen mitt i lagret eller utefter två av lagrets sidor. Dessa lösningar har valts för det projekterade lagret vid Karl Staaffsgatan resp lagret vid Lindälvsskolan, se figur 8.1 och figur 8.2. Kostnadmässigt är dessa lösningar troligen ganska likvärdiga.



Figur 8.1 Planskiss över projekterat värmelager i lera, Karl Staaffsgatan (BFR-rapport R89:1986).



Figur 8.2 Planskiss över värmelagret vid Lindälvs skolan (BFR-rapport R86:1986)

Samlingsrören är genomgående \varnothing 180 mm och samtliga rör av PEM. Vid seriekoppling löper samlingsledningarna med kopplingsblock även utefter två av lagrets yttre sidor. Fluiden går från pannrummet ut centralt i lagret, fördelas ut via kopplingsblocken till de seriekopplade nedstickarna och samlas åter utefter två av lagrets sidor och går tillbaka. Vid varje kopplingsblock sitter avstängningsventiler och luftare. Det gör att flödet kan forceras genom vissa slingor samt att en del av lagret kan kopplas bort vid eventuellt läckage. Det senare gäller även för det parallellkopplade lagret. Mängden nedstick för de olika värmväxlartyperna har hämtats från kapitel 7, tabell 7.1 och 7.2.

8.2 Anläggningskostnad för lager i lera

Kostnaderna baseras på följande priser på material och arbetsmoment och gäller 1986 års kostnadsnivå.

Plaströr PEM, PN6.3	\varnothing 16 mm	2 kr/m
	\varnothing 25 mm	3 kr/m
	\varnothing 63 mm	15 kr/m
	\varnothing 180 mm	150 kr/m

Plaströrskopplingar svetsmufftyp: 50 kr/ U-rör (3 st)

Kopplingsarbete för varje nedstick: 50 kr

Fördelningsledningar, totallängd = 2 · hålavstånd · antal
nedstick · 1.1. (PEM Ø 63 mm)

Sammankoppling av serieledningarna kräver samma totallängd men av
PEM Ø 25 mm i stället.

Kopplingsblocken består av förtillverkade PE-rör med avstick för
fördelningsledningar eller serieslingor. Till varje kopplings-
block ansluts 6-10 ledningar och här sitter en avstängningsventil
samt luftare. Kopplingsblocken är svetsade till samlingsledningen
och avstängningsventilen är åtkomlig från markytan via ett enkelt
rör med lock (inspektionsbrunn). Kopplingsblocket kostar komplett
med luftare och avstängningsventil 2000 kr/st. Arbetskostnaden
för montering av varje kopplingsblock är beräknat till 500 kr och
varje fördelningsledning kostar 100 kr att ansluta till kopp-
lingsblocket.

Neddrivningskostnaden är beräknad utifrån en dagskostnad på
8000 kr för pålkran med tre man. Kapaciteten för dubbla U-rör
till 20 m djup är 25 per dag och för enkla U-rör 120 per dag.
Schaktkostnaden är 100 kr/m³, schaktdjup 0.5 m ger en kostnad på
50 kr/m². Aterställningsarbetet är satt till 20 kr/m².

Isolering av överytan för högtemperaturlagret har ansatts till
50 kr/m² och räknat på en yta av 3000 m². Isoleringen uppåt för
detta lager är en viktig fråga som inte alls behandlats i detta
projekt. För att inte få för stora värmeförluster uppåt bör lag-
ret isoleras även åt sidorna från markytan och ned minst 5 m. Ra-
tionella metoder för att göra detta och dess kostnader har inte
behandlats.

På alla kostnader har sist lagts en administrationskostnad på
10%.

Kostnaden för ett värmelager i lera med $\alpha_v = 0.5 \text{ W/m}^3\text{K}$ utfört med enkla U-rör till 20 m djup baserat på ovanstående priser blir då enligt tabell 8.1 ca 510 kkr för det seriekopplade alternativet och ca 485 kkr för det parallellkopplade.

Motsvarande värmelager utfört med dubbla U-rör kostar ca 635 kkr utfört med seriekoppling och ca 600 kkr utfört med parallellkopplade nedstick. Se Tabell 8.2.

Kostnaden per årligt lagrad kWh blir då 0.97-1.27 kr för lagret med $\alpha_v = 0.5 \text{ W/m}^3\text{K}$.

Tabell 8.1 Kostnad i SEK för lågtemperaturlager i lera, Enkla U-rör, Skänkelavstånd 0.35 m, $\alpha_v = 0.5 \text{ W/m}^3\text{K}$

rördimension/antal vvx	Serie	Parallell
	Ø 25/520	Ø 16/575
Neddrivning av U-rör	40200	43400
U-rör	62400	46000
Fördeln.ledningar	8100	42500
Kopplingsblock	64000	32000
Samlingsledningar	52500	37500
Kopplingsarbete	62300	63900
Schaktning	125000	125000
Återställning	50000	50000
Administration	46500	44000
Totalkostnad	511000	484000
Kostnad per meter U-rör	49	42
Kostnad per m^3 lager	10.2	9.7

Tabell 8.2 Kostnad i SEK för lågtemperaturlager i lagra, Dubbla U-rör Skänkelavstånd 0.45 m, $\alpha_v = 0.5 \text{ W/m}^2\text{K}$.

rördimension/antal vvx	Serie	Parallell
	Ø 25/350	Ø 16/376
Neddrivning av U-rör	117000	125300
U-rör	84000	60200
Fördeln.ledningar	6600	34300
Kopplingsblock	64000	32000
Samlingsledningar	52500	37500
Kopplingsarbete	79900	81100
Schaktning	125000	125000
Återställning	50000	50000
Administration	58000	54500
Totalkostnad	637000	600000
Kostnad per meter vvx	90.1	80
Kostnad per m ³ lager	12.7	12

För högtemperaturlagret blir motsvarande kostnader om enkla U-rör används ca 1100-1140 kkr vid parallell- respektive seriekoppling av nedsticken, se tabell 8.3.

Motsvarande lager utfört med dubbla U-rör kostar ca 1600 kkr enligt tabell 8.4.

Anläggningskostnaden per årligt lagrad kWh blir då enligt tabell 8.3 och 8.4 mellan 1.10 och 1.68 kr.

Tabell 8.3 Kostnad i SEK för högtemperaturlager i leja, Enkla U-rör, Skänkelavstånd 0.35 m, $\alpha_v = 2.0 \text{ W/m}^3\text{K}$.

rördimension/antal vvx	Serie	Parallell
	Ø 25/1653	Ø 16/1872
Neddrivning av U-rör	115200	129800
U-rör	200800	150000
Fördeln.ledningar	14400	76500
Kopplingsblock	96000	48000
Samplingsledningar	105000	75000
Kopplingsarbete	181400	197500
Schaktning	125000	125000
Isolering av överytan	150000	150000
Återställning	50000	50000
Administration	104000	100000
Totalkostnad	1142000	1102000
Kostnad per meter U-rör	34.5	29.4
Kostnad per m^3 lager	22.8	22

Tabell 8.4 Kostnad i SEK för högtemperaturlager i leja, Dubbla U-rör, Skänkelavstånd 0.45 m, $\alpha_v = 2.0 \text{ W/m}^3\text{K}$.

rördimension/antal vvx	Serie	Parallell
	Ø 25/1010	Ø 16/1108
Neddrivning av U-rör	328200	354600
U-rör	242400	177300
Fördeln.ledningar	11300	58900
Kopplingsblock	96000	48000
Samplingsledningar	105000	75000
Kopplingsarbete	419200	452500
Schaktning	125000	125000
Isolering av överytan	150000	150000
Återställning	50000	50000
Administration	152700	149200
Totalkostnad	1680000	1641000
Kostnad per meter vvx	83.2	74
Kostnad per m^3 lager	33.6	32.8

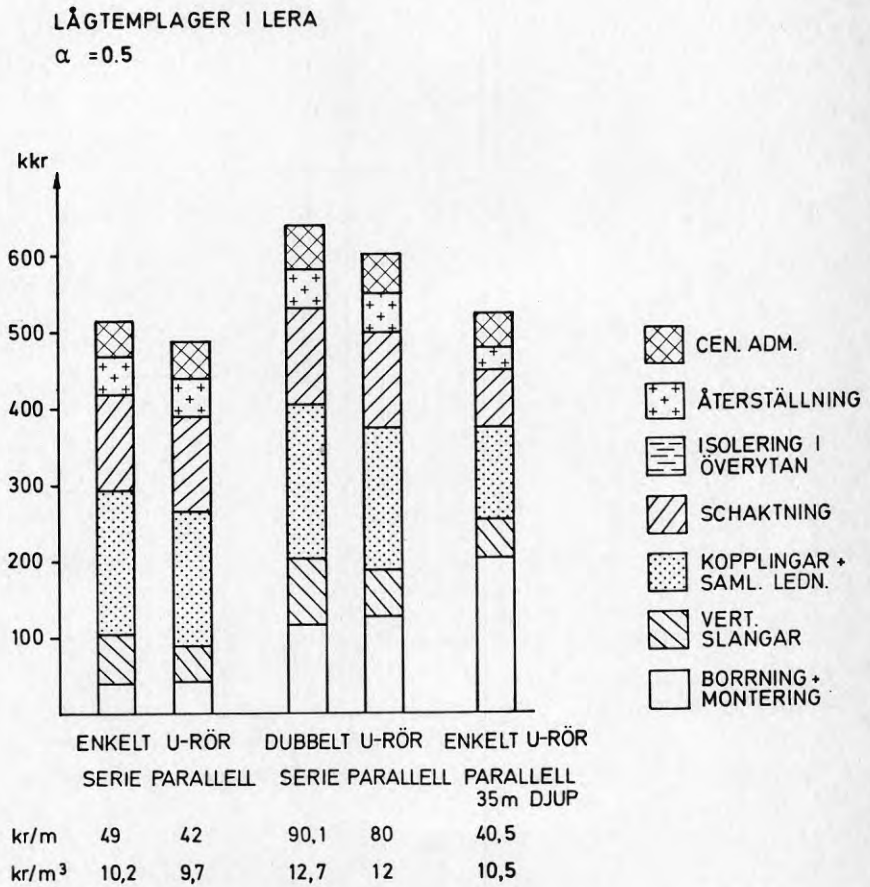
Det framgår tydligt att kostnaderna för fördelnings- och samlingsledning samt kopplingsarbetet med dessa är höga. Ett sätt att direkt minska den kostnaden är att bygga lagret djupare om jordmäktigheten tillåter det. Lagret i Kungsbacka är byggt till 35 m djup med en metod som är beskriven i kapitel 2. Värmeväxlarna är enkla U-rör med ett skänkelavstånd på ca 15 cm. I tabell 8.5 redovisas kostnader för två värmelager byggda med den metoden, ett med $\alpha_V = 0.5$ och ett med $\alpha_V = 2.0 \text{ W/m}^3\text{K}$. Volymen är densamma som tidigare, djupet är 35 m och därmed markytan reducerad till ca 1430 m^2 . Antal nedstick för lågtemperaturfallet blir 370 och för högtemperaturfallet 1210.

Tabell 8.5 Kostnad i SEK för värmelager i lera, enkla U-rör $\varnothing 16$, skänkelavstånd 0.15 m och djup 35 m.

	Lågtemp ($\alpha_V=0.5$)	Högtemp ($\alpha_V=2.0$)
Hålavstånd/antal vvx	2.12/370	1.17/1210
Neddrivning av U-rör	202300	650300
U-rör 26 km resp 85 km	52000	170000
Fördeln.ledningar	25900	46700
Kopplingsblock	24000	40000
Samlingsledning	28500	57000
Kopplingsarbete	43000	131000
Schaktning	71500	71500
Isolering av överytan		80000
Återställning	28600	28600
Administration	47600	127500
Totalkostnad	524000	1403000
Kostnad per meter U-rör	40.5	33.1
Kostnad per m^3 lager	10.5	28.1
Kostnad per årligt lagrad kWh	1.05	1.4

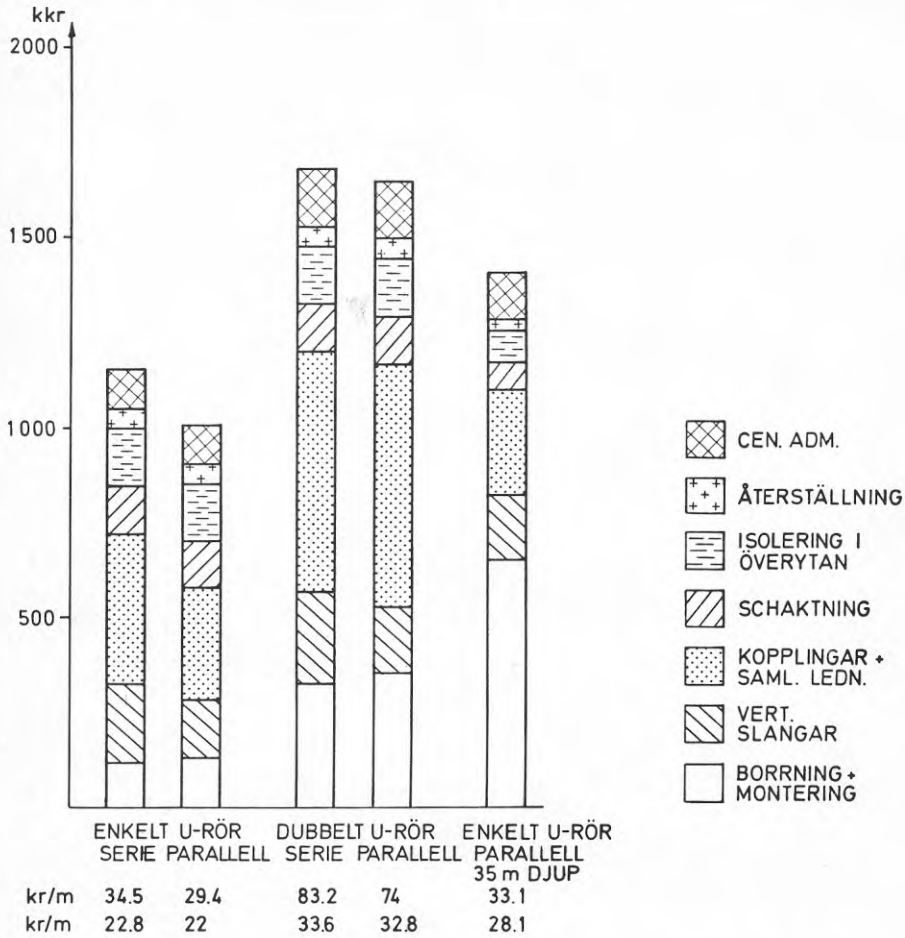
En samlad bild av kostnaderna för att bygga ett lågtemperaturvärmelager på 50 000 m³ i lera med de olika metoderna (sammanställning av tabell 8.1, 8.3 och 8.5) framgår av figur 8.3.

En motsvarande sammanställning för ett högtemperaturvärmelager (tabell 8.2, 8.4 och 8.5) framgår av figur 8.4.



Figur 8.3 Kostnadssammansättning för lågtemperaturvärmelager i lera. $\alpha_v = 0.5 \text{ W/m}^2\text{K}$.

HÖGTEMPLAGER I LERA
 $\alpha = 2.0$



Figur 8.4 Kostnadssammansättning för högtemperaturvärmelager i lera, $\alpha_v = 2.0 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Inverkan av det ökade lagerdjupet och därmed minskade kostnader för samlingsledningar och kopplingar är påtagligt. Kostnaden för lagret med 35 m djup är nästan densamma som för lagret med enkla oskyddade U-rör och något lägre än för lagret med dubbla U-rör. Då fler och tätare stick görs blir metoden med enkla oskyddade U-rör klart lägre än de övriga.

Det finns påkranar på marknaden idag som kan byggas upp till närmare 30 m höjd. Det är således möjligt att sätta värmeväxlare till åtminstone 25 m djup utan skarvning av lans med dubbla skyddade U-rör eller enkla oskyddade U-rör. Jämfört med kostnaderna i figurerna 8.1-8.4 innebär detta 25% ökade kostnader för U-rör samt något ökade kostnader för neddrivningen, uppskattningsvis 10%. Samtidigt ökar lagervolymen från 50 000 m³ till 62 500 m³. Kostnaderna för ett lager kopplat parallellt med $\alpha_v = 0.5 \text{ W/m}^3\text{K}$ blir då enligt tabell 8.6.

Tabell 8.6 Kostnad i SEK₃ för värmelager₃ i lera till 25 m djup volym 62 500 m³, $\alpha_v = 0.5 \text{ W/m}^3\text{K}$

	<u>Enkla U-rör</u>	<u>Dubbla U-rör</u>
Antal nedstick	575	376
Totalkostnad	509000	651000
Kostnad per meter vvx	35.4	69.3
Kostnad per m ³ lager	8.2	10.4
Kostnad per årligt lagrad kWh $\Delta t = 10^{\circ}\text{C}$	0.82	1.04

Kostnadsreduktionen är således 15-20% genom att utnyttja påkranhöjden maximalt för ett glest lager. För ett lager med täta nedstick $\alpha_v = 2.0 \text{ W/m}^3\text{K}$ framgår kostnaden av tabell 8.7.

Tabell 8.7 Kostnad i SEK₃ för värmelager₃ i lera till 25 m djup volym 62 500 m³, $\alpha_v = 2.0 \text{ W/m}^3\text{K}$.

	<u>Enkla U-rör</u>	<u>Dubbla U-rör</u>
Antal nedstick	1872	1108
Totalkostnad	1179000	1787000
Kostnad per meter vvx	25.2	64.5
Kostnad per m ³ lager	18.9	28.6
Kostnad per årligt lagrad kWh $\Delta t = 20^{\circ}\text{C}$	0.94	1.43

Kostnadsreduktionen blir i detta fall ca 15%.

8.3 Kostnader för lager i moränlera och berg

Kostnaderna i detta avsnitt baseras på samma baskostnader som lagren i lera (kap 8.2) förutom borrhings- och neddrivningskostnaderna som har tagits dels från DGI's försök i moränlera, dels från förstudien (JVG-rapport nr 21). Neddrivningskostnaden är satt till 100 kr/m i berg (topphammarborrning till 60 m djup, \emptyset 75 mm) och 35 kr/m i moränlera (augerborrning).

Lagren är samma som i avsnitt kap 7 och 8, dvs en lagervolym av 50000 m³ och 20 m djup. Lagret i berg avviker och har djupet 60 m samt har en större volym, 84000 m³ med hänsyn till bergmaterialets lägre värmekapacitet. Moränlera beräknas ha en värmekapacitet av $3.5 \cdot 10^6$ J/m³K och berg $2.1 \cdot 10^6$ J/m³K. Värmeledningsförmågan är 1.75 W/mK för moränlera och 3.5 W/mK för berget.

I tabell 8.8 redovisas lagret i moränlera med $\alpha_v = 0.5$ och 2.0 W/m³K och i tabell 8.9 lagret i berg vid samma förutsättningar.

Tabell 8.8 Kostnad i SEK för värmelager i moränlera, enkla U-rör \emptyset 16, skänkelavstånd 0.10 m och djup 20 m. Borrning med augerborrning enligt kapitel 6.

	Lågtemp ($\alpha_v=0.5$)	Högtemp ($\alpha_v=2.0$)
Hålavstånd/Antal vvx	2.6/455	1.4/1540
Neddrivning av U-rör	318500	1078000
U-rör 18.2km resp 61.6km	36400	123200
Fördeln.ledningar	39000	71100
Kopplingsblock	16000	32000
Samlingsledningar	37500	75000
Kopplingsarbete	54300	178000
Schaktning	125000	125000
Isolering av överytan		125000
Aterställning	50000	50000
Administration	67600	185700
Totalkostnad	745000	2043000
Kostnad per meter U-rör	82.4	66.3
Kostnad per m ³ lager	14.9	40.8
Kostnad per årligt		
lagrad kWh	1.49	2.0

Tabell 8.9 Kostnad i SEK för värmelager i berg, enkla U-rör
 Ø 25mm i Ø 75mm topphammarborrade borrhål till 60 m
 djup. Lagervolym 84 000 m³.

	Lågtemp ($\alpha_V=0.5$)	Högtemp ($\alpha_V=2.0$)
Hålavstånd/Antal vvx	3.5/115	2.0/350
Borrning	690000	2100000
U-rör 13.8km resp 42km	41400	126000
Fördeln.ledningar	13900	23100
Kopplingsblock	8000	16000
Samlingsledningar	28500	57000
Kopplingsarbete	15500	47000
Schaktning	70000	70000
Isolering av överytan		80000
Återställning	28000	28000
Administration	89500	254700
Totalkostnad	985000	2800000
Kostnad per meter U-rör	143	133
Kostnad per m ³ lager	11.7	33.3
Kostnad per årligt lagrad kWh	1.97	2.8

9 SLUTSATSER

9.1 Lager med vertikala rör i lera

Om kostnadssammanställningarna i kap 8 granskas kan man kortfattad beskriva läget för värmelager i lera med följande punkter:

1. Den utveckling av neddrivningsmetoder som gjorts inom projektet och av BPA har inneburit en kostnadsreduktion jämfört med tidigare metoder vid lagerdjup mindre än 20-25 m. Kostnaderna för ett lager med vertikala rör i lera om ett djup av 25 m sammanfattas i tabell 9.1.

Tabell 9.1 Sammanställning av kostnader för värmelager i lera med vertikala rör.

Typ av lager	$\alpha_V=0.5 \text{ W/m}^3\text{K}$		$\alpha_V=2.0 \text{ W/m}^3\text{K}$	
	enkla	dubbla	enkla	dubbla
U-rörstyp				
SEK per m vvx	35.4	69.3	25.2	64.5
SEK per m^3 lager	8.2	10.4	18.9	28.6
SEK/kWh och år	0.82	1.04	0.94	1.43

Observera att kostnaden per årligt lagrad kWh gäller 10°C temp-utnyttjande vid $\alpha_V=0.5$ och 20°C vid $\alpha_V=2.0$.

2. Samlingsledningar, fördelningsledningar samt arbetet med koppling av dessa och de vertikala rören står för stora kostnader vid denna typ av lager.
3. Det är mycket små skillnader i kostnad mellan seriekopplade U-rör och lager med parallellkopplade, skillnaden ligger inom felmarginalen för beräkningarna.

4. Kostnaden för lagret ökar betydligt om nedsticken sätts tätare. Om samtidigt ett ökat temperaturspann utnyttjas i lagret behöver dock inte kostnaden för den lagrade energin bli högre. Lagret med $\alpha_v = 0.5 \text{ W/m}^3\text{K}$ motsvarar ungefär de prestanda som tidigare diskuterats för lager i lera (hålavstånd ca 2 m). Lagret med $\alpha_v = 2.0 \text{ W/m}^3\text{K}$ har ca 3 ggr så stor värmeyta och medger därmed värmeöverföring med betydligt lägre temperaturdifferenser mellan fluid och omgivande mark. Om stora temperaturdifferenser kan accepteras t ex användande av högtemperatursolfångare med utjämningsmagasin och lågtemperaturdistributionssystem kan ett glesare och därmed betydligt billigare marklager användas även för system utan värmepump. Sätts istället U-rören tätt kanske utjämningsstanken kan minskas och eventuellt helt sparas, vilket totalt sett kanske blir billigare. För att klara ut detta krävs värmetekniska beräkningar för hela system och kopplat till detta kostnadsberäkningar, som inte ingår i detta projekt.
5. Totalt sett lägst kostnad erhålls för enkla U-rör som drivs ned oskyddade. Skillnaden i kostnad ökar då nedsticken görs tätt.

REFERENSER

- Adolfsson, K, Sällfors, G, 1987: Energilagring i lera. Värme-strömning, värmväxlarutformning och påverkan av lerans geotekniska egenskaper. (Byggforskningsrådet) Rapport R23:1987. Stockholm.
- Andersson, O H, 1981: Borrning och dokumentation. Borrningsteknik jämte metodik för geologisk datainsamling under borrhåns gång. Thesis 8. Dep. of Quaternary Geology, University of Lund.
- Claesson, J, m fl, 1985: Markvärme, en handbok om termiska analyser, Del II. (Byggforskningsrådet) Rapport T17:1985. Stockholm.
- Engwall, L, 1984: Energilagring i lera. Test av ny metod för installation av värmväxlarrör. Särtryck av uppsats. Nordiska Geoteknikermötet 1984, Linköping 1-3 juni.
- Ericsson, L O, 1985: Värmeutbyte mellan berggrund och borrhål vid bergvärmesystem. (Geologiska inst., CTH/GU) Publ. A52, Göteborg.
- Franck, P-Å, 1986: A study of heat pump systems with low-temperature seasonal heat storage in clay. (CTH, Institutionen för värmeteknik och maskinlära). Göteborg.
- Gräslund, J, m fl, 1986: Sunclay-projektet. Utvärdering av sunclay-systemet. Andra generationens systemlösning. (Byggforskningsrådet) Rapport R84:1986. Stockholm.
- Hellström, G, Palmgren, C, Rydell, B, 1985: Heat storage in clay - A technical and economical evaluation of vertical earth heat exchangers. Proceedings from III International Conference on energy storage for building heating and cooling, Toronto, Canada, Sept 22-26, 1985.
- Ramundervärme - Statens geotekniska institut.

Rhen, I, Wilén, P, 1984: Vertikala rörsystem för lagring i sand och silt. Förstudie. (Jordvärmegruppen, Chalmers tekniska högskola) Rapport 14:1984. Göteborg.

Schunnesson, H, 1985: Borrning av värmelager. Teknik för produktionsborrning av långa grova hål för borrhålsvärmelagring i berg. (Högskolan i Luleå) Teknisk rapport 1985:24T. Luleå.

BILAGA

Sammanställning av laboratorieundersökningen, SGI
Söderköping, värmelager.

Sektion/borrhål Djup/nivå	Benämning enligt 1981 års system	Densitet Q t/m ³	Vatten- kvot w %	Finlekt- tal w _F %	Sensiti- viteten enl. konprov S _t	Skjuvhållfasthet (reducerad) τ _f kPa *)		Jord- arts- för- kortn.	Övriga under- sök- ningar**)	Anm.	PROVTAJNING datum 83-09-13 PROVTAJNINGSSERIESKAP Kv St I	LABORATORIEUNDERÖKNINGAR datum 83-09-23 GODKÄND den 83-09-23 laboratorieföret. I-M S/CEW	SAMMANSTÄLLING AV LABORATORIEUNDERÖKNINGAR Projekt Ramundervärme - värmelager i lera i Söderköping, förstudie
						Tryckprov	Konprov						
103	forts.												
11,0	Brungrå, varvig lera med tunna finsand- och siltskikt	1,62	63	59	14	16	v Le (sa) (s ₁)						
11,5	Brungrå, varvig lera med finsand- och siltskikt	1,63	65	63	(14)	(19)	*v Le sa si			*Stor spridning τ _{fu} =16-23 kPa			
12,0	Brungrå, varvig lera med finsand- och siltskikt	1,62	69	66	15	20	v Le sa si						
13,0	Brungrå, varvig lera med tunna finsand- och siltskikt	1,69	76	75	(13)	(20)	*v Le (sa) (s ₁)			*Stor spridning τ _{fu} =15-24 kPa			
14,0	Brungrå, varvig lera med täta siltskikt	1,70	63	61	19	25	v Le si						
15,0	Brungrå, varvig lera med täta siltskikt	1,81	56	51	(22)	(22)	*v Le si			*Stor spridning τ _{fu} =13-31 kPa			
16,0	Brungrå, varvig lera med täta finsand- och siltskikt	1,78	47	44	(17)	(20)	*v Le sa si			*Stor spridning τ _{fu} =16-22 kPa			
17,0	Grå, varvig silt med täta lerskikt	1,81	58 ¹ 33 ²	54 ¹	(9,6) ¹	(10)	*v Si le			*Stor spridning τ _{fu} =5,1-21 kPa ¹ gjord på le ² gjord på Si			
18,0	Grå, varvig lera med täta finsand- och siltskikt	1,81	42	39	(15)	(14)	*v Le (sa) (s ₁)			*Stor spridning τ _{fu} =10-21 kPa			
19,0	Grå siltig finsand med siltskikt	(2,07)	(22)				si Sa si			Fritt vatten			

*) Underreckning av värden anger att skjuvhållfastheten bör reduceras. Rekommenderade korrektionsfaktorer anges i ledig kolumn eller i bilaga

1 kPa = 1 kN/m² ≈ 0,1 Mp/m²

Lediga kolumner är avsedda för resultat av specialundersökningar, t. ex. Atterbergs gränser, glödgningsförlust, kapillaritet, tjälfarlighet, permeabilitet.

**) Övriga undersökningar (se bilagor)

skj = direkta skjuvförsök
komp = kompressionsförsök
korn = kornfördelning

pac = packningsförsök

Tabellnr, plancher o. likn.

Littera, uppteckningar o. likn.
Dnr 1-174/83

STATENS GEOTEKNISKA INSTITUTET

SAMMANSTÄLLING AV
LABORATORIEUNDERÖKNINGAR

Projekt
Ramundervärme - värmelager i lera
i Söderköping, förstudie

Projekt

SAMMANSTÄLLING AV
LABORATORIEUNDERÖKNINGAR

Företag/institution

STATENS GEOTEKNISKA INSTITUTET

Projekt
Ramundervärme - värmelager i lera
i Söderköping, förstudie

Projekt

SAMMANSTÄLLING AV
LABORATORIEUNDERÖKNINGAR

STATENS GEOTEKNISKA INSTITUTET

STATENS GEOTEKNISKA INSTITUTET

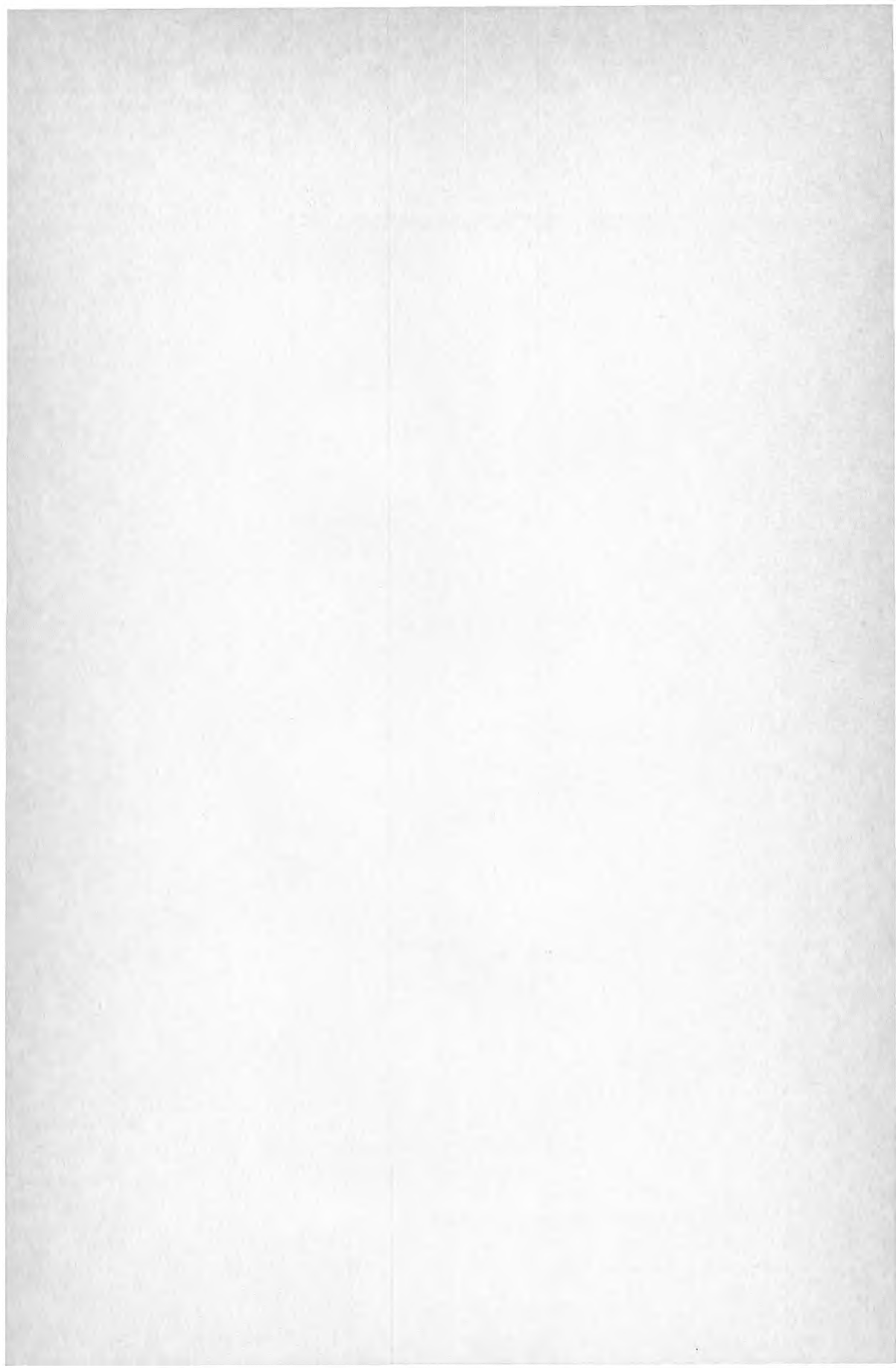
Sektion/borrhål Djup/nivå		Benämning enligt 1981 års system		Densitet ρ t/m ³	Vatten- höjd w %	Finleka- tal w f %	Sensiti- vitet em. konprov S _t	Stjinhållsättet (reducerad T _f kPa *) Tryckprov Konprov	Rek. KORR. fakt.	Jord- arts- för- nigen** korth.	Anm.
103											
2,0 m		Grå lera, sulfidfläckig	1,41	118	82	15	4,5	0,9	Le		
3,0		Grå lera, sulfidfläckig	1,50	95	71	23	11		Le		
4,0		Grå, varvig lera med tunna finsand- och siltskikt	1,47	102	81	22	13	0,9	v Le (sa) (si)		
5,0		Brungrå, varvig lera med tunna finsand- och siltskikt	1,57	90	72	22	13		v Le (sa) (si)		
6,0		Brungrå, varvig lera	1,59	76	72	13	17		v Le		Störda varv
7,0		Brungrå, varvig lera	1,59	71	68	14	17		v Le		
7,5		Brungrå, varvig lera med tunna finsand- och siltskikt	1,61	68	63	13	12		v Le (sa) (si)		
8,0		Brungrå, varvig lera med enstaka gruskorn	1,61	65	66	13	22		v Le		Störda varv
8,5		Kontakt: Brungrå, varvig lera/ Grå, varvig silt med lerskikt	1,94 ¹	48 26 ²	48	8,6	14		v Le/ v Si le		1 gjord på v Si le, resten av rutin gjord på v Le
9,0		Kontakt: Grå silt/Brungrå, varvig lera med tunna finsand- och silt- skikt	1,55	82	77	16	19		Si/ v Le (sa) (si)		2 gjord på v Si All rutin gjord på v Le Kontakt i öb.
9,5		Brungrå, varvig lera med tunna finsand- och siltskikt	1,57	75	71	15	18		v Le (sa) (si)		
10,0		Brungrå, varvig lera med tunna finsand- och siltskikt, enstaka gruskorn	1,57	78	74	15	19		v Le (sa) (si)		
10,5		Brungrå, varvig lera med tunna finsand- och siltskikt	1,60	72	69	16	21		v Le (sa) (si)		

*) Undersökning av värden anger sitt skjuvhållsättet bör
reducerade korrelationsfaktorer anges i ledig
kolumn eller i bilaga
1 kPa = 1 kN/m² ≈ 0,1 Mp/m²

Lediga kolumner är avsedda för resultat av specialundersök-
ningar, t. ex. Alterbergs gränser, glödningförlost, kapillaritet,
tjälrlighet, permeabilitet.

**) Övriga undersökningar (se bilagor)
ski = direkta skjuvförsök
komp = kompressionsförsök
korn = kornförhållning

Företag/institution STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT		SAMMANSTÄLLNING AV LABORATORIEUNDERSÖKNINGAR	
PROVTAGNING datum 83-09-13		Projekt Ramundervärme - värmelager i lera i Söderköping, förstudie	
LABORATORIEUNDERSÖKNINGAR datum 83-09-23		Dnr 1-174/83	
PROVTAGNINGSPREPARAT Kv St I		GODKÄND den 83-09-23	
laboratorieförest. I-M S/CEW		Littera, uppdragsnr o. likn.	
		Tabellnr, planschnr o. likn.	



**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 840591-5
från Statens råd för byggnadsforskning till Geologiska
institutionen, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.**

R33: 1988

ISBN 91-540-4882-6

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Art.nr: 6708033

**Abonnemangsgrupp:
Ingår ej i abonnemang**

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

Cirka pris: 39 kr exkl moms