



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

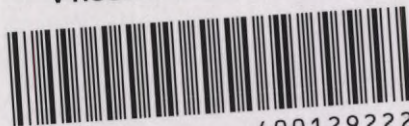
R21:1992

Värmelager i lera

**Utvärdering
Söderköping**

Caroline Magnusson m fl

V-HUSETS BIBLIOTEK, LTH



15000

400129222

Byggforskningsrådet

R21:1992

LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA
VÄG- OCH VATTENBYGGNAD
BIBLIOTEKET

VÄRMELAGER I LERA

Utvärdering
Söderköping

Caroline Magnusson m fl

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 860805-5
från Byggforskningsrådet till Statens geotekniska institut,
Linköping.

REFERAT

Projektet har syftat till att med mätdata värdera energianläggningens tekniska funktion och ekonomiska resultat. I rapporten delges vunna erfarenheter och insamlade mätdata. Resultatet har värderats för att ge underlag till rekommendationer.

Anläggningen har fungerat väl under de fyra år den varit i drift. Energikostnaden för anläggningen inklusive kapitalkostnaden (6% realränta, 20 års avskrivningstid) är cirka 40 öre/kWh. Som underlag, till utvärderingen av anläggningen, har mätdata använts som samlats in via ett automatiskt mätadorsystem. Mätadorsystemets tillförlitlighet har delvis varit bristfällig, varför manuell mätinsamling blivit ett värdefullt komplement i utvärderingen. Totalsystemets årsmedelvärdefaktor är 1,7. Kringutrustningen förbrukar 25% av tillförd elektrisk energi. Markvärmepåslarnas prestanda, som utvärderats, visar god överensstämmelse mellan simulerad och beräknad värmeöverföring.

Den geotekniska utvärderingen visar att flera parametrar förändras långsamt och med små utslag. I vissa fall finns svårigheter att avgöra om variationerna är en verklig förändring eller om de ligger inom felmarginalen för respektive undersökningsmetod. Portrycken varierar med lagertemperaturen och pendlar kring ett värde som efter tre års drift fortfarande är högre än det ursprungliga men som tenderar att svänga in mot sitt ursprungliga värde. Till följd av värmelagring har mark sättningar med maximalt 0,13 m erhållits. Den geotekniska påverkan utanför lagret är mycket begränsad.

I Byggeforskningsrådets 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.

R21:1992

ISBN 91-540-5458-3
Byggeforskningsrådet, Stockholm

gotab 96024, Stockholm 1992

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

	SID
1. SAMMANFATTNING	1
2. PROJEKTBAKGRUND	5
2.1. Experimentbyggnadsprojektet	5
2.2. Mät- och utvärderingsprojektet	6
3. ANLÄGGNINGSBESKRIVNING	7
3.1. Lokalisering av anläggningen	7
3.2. Energi- och effektbehov	8
3.3. Anläggningskomponenter	10
4. INSTALLATION AV MARKVÄRMEVÄXLARE	13
4.1 Markvärmeväxlare	13
4.2 Installationsarbete	14
4.3. Slutsatser	18
5. MÄTSYSTEM	19
5.1. Utformning av mätsystem	19
5.2. Erfarenhet av mätinsamlingssystem	20
5.3. Slutsatser	21
6. ANLÄGGNINGENS DRIFTSFUNKTION	23
6.1. Erfarenhet av anläggningens drifts-, styr-, och reglerfunktion	23
6.2. Energitekniskt mätprogram	23
6.3. Utvärdering av mätresultat	24
6.3.1 Sankeydiagram	24
6.3.2 Värmepumpsprestanda	27
6.3.3 Lagerprestanda	30
6.3.4 Energitekniska data	32
6.4. Slutsatser	36
7. TERMISK RESPONSTEST AV MARKVÄRMELAGER	37
7.1. Inledning	37
7.2. Lervärmelagret	37
7.2.1 Grundläggande data	37
7.2.2 Laddningsvillkor	38
7.2.3 Markens termiska egenskaper	38
7.2.4 Värmebärrarfluid	38
7.2.5 Värmeöverföring mellan fluid och mark	39

7.2.6	Markens begynnelsestemperatur	39
7.3.	Beräkningsmetod	39
7.4.	Känslighetsanalys	40
7.5.	Stratifierad mark	44
7.6.	Slutsatser	47
8.	GEOTEKNISK PÅVERKAN	48
8.1.	Geotekniskt mätprogram	48
8.1.1	Referensmaterial	48
8.1.2	Mättillfällena	48
8.1.3	Studerade parametrar, mätmetoder och mätpunkter	48
8.2.	Resultat av mätdatainsamling	49
8.2.1	Ursprungliga förhållanden - referensmätning 1983	50
8.2.2	Förhållanden efter slanginstallation	50
8.2.3	Förhållanden under lagrets användning 1987 - 1991	50
8.3.	Utvärdering av mätresultat	52
8.3.1	Förkonsolideringstryck och kompressionsmodul	53
8.3.2	Porvattentryck	53
8.3.3	Sättningar	54
8.3.4	Skjuvhållfasthet	55
8.3.5	Densitet och vattenkvot	56
8.3.6	Förändringar utanför lagret	56
8.4.	Slutsatser	57
9.	KOSTNADER	58
9.1.	Anläggningskostnader	58
9.2.	Driftskostnader	58
9.3.	Energikostnader	59
9.4.	Värdering av kostnader	59
10.	SLUTSATSER	61
11.	REFERENSER	63

BILAGA 1. Detaljerad beskrivning av energitekniska mätdata samt justering av mätdata från värmemängdsmätare.

BILAGA 2. Sammanställning av laboratorieresultat av geotekniska parametrar.

BILAGA 3. Sammanställning av driftskostnader

FÖRORD

Denna rapport utgör redovisning av mät- och utvärdering för uteluftvärmepump och värmelager i lera för skola och sporthall i Söderköping (BFR nummer 860805-5). Rapporten är främst riktad till personer som arbetar med forskning och utveckling av värmelager i lera.

Syftet med projektet har varit att studera anläggningens systemfunktion, energi- och effektprestanda för hela anläggningen och för olika delar av denna, geotekniska följdverkningar i och utanför värmelagret orsakade av temperaturfluktuationer i lagret samt att utvärdera en ny installationsmetod som använts för markvärmeväxlare i lera. Slutligen har en ekonomisk utvärdering utförts.

I projektet har från Söderköpings kommun Åke Olofsson och Leif Siverklev deltagit. Ett värdefullt arbete har utförts av Lars Andrén och Bengt Fredriksson på Ramunderskolan som under fyra år skött den manuella insamlingen av mätdata. Projektansvarig har varit Björn Karlsson, Linköpings tekniska högskola och projektledare Bengt Rydell, Statens geotekniska institut (SGI). Caroline Magnusson, SGI samt Kjessler & Mannerstråle AB har under större delen av projektet svarat för handläggningen och även skrivit huvuddelen av denna rapport. Ulf Bergdahl, SGI och Jan Sundberg, Terratema AB har bidragit med värdefulla synpunkter. Mätsystemuppbyggnad och mätdatainsamling har utförts av Olov Lindholm, Björn Löfroth, Lovisa Bergenståhl och Marti Lehtmets, samtliga SGI. Marti Lehtmets har även gjort energiutvärderingar. Geotekniska undersökningar har utförts av Veijo Puustinen, Kjell Hidsjö och Mats Ahlfeldt, SGI. Med en termisk responstest som underlag har Göran Hellström vid Lunds tekniska högskola genomfört en känslighetsanalys av värmelagret. Peder Dahlöf, NCC teknik i Göteborg har medverkat i den energitekniska utvärderingen.

1. SAMMANFATTNING

I Söderköping byggdes 1987 en värmepumpanläggning med uteluftkylare och markvärmelager i lera. Befintliga oljepannor fungerar som spetsvärmekälla. Oljepannorna har tidigare värmeförsörjt Ramunderskolan och då skolan skulle byggas ut med en sporthall valdes att frångå oljeeldning som huvudsaklig värmekälla. Enerkiprojektet har finansierats med experimentbyggnadslån från Byggforskningsrådet till Söderköpings kommun.

Syftet med experimentbyggnadsprojektet har bl.a. varit att undersöka om uteluftvärmepumpar kan göras effektivare och mer ekonomiska på vinterhalvåret med hjälp av ett värmelager. Värmelagret konstruerades med en ny typ av värmeväxlare där installationsteknik för det s.k. dubbla U-röret utvecklades.

I anslutning till experimentbyggnadsprojektet har ett mät- och utvärderingsprojekt genomförts för att studera värmeteknisk, geoteknisk och byggnadsteknisk funktion samt det ekonomiska resultatet, vilket denna rapport redovisar. Mät- och utvärderingsprojektet har också finansierats av Byggforskningsrådet.

Uppföljningen har pågått från 1987 till sommaren 1991.

Anläggningsbeskrivning

Anläggningen för värmeförsörjning består av 4 delar:

- Uteluftkylare (Fläkt Svenska AB, 420 kW),
- markvärmelager i lera,
- värmepump (STAL VRP55E) och
- oljepannor.

Anläggningens energibehov är ca 2 500 MWh/år och effektbehovet är ca 1 100 kW.

Värmelagret består av 382 stycken dubbla U-rör till 18 meter under markytan. Lagrets volym är 36 000 m³. Lagret laddas med maximalt 40 °C och töms med lägst 1 °C.

Installation av värmeväxlare

Installationen genomfördes med en pålkran. Slangen fördes in i ett fodderrör och trycktes därefter ner till erforderligt djup. Slangarna kopplades ihop i markytan. Vid tryckprovningen visade det sig att kopplingarna ej höll tätt varför dessa togs bort och slangarna svetsades ihop. Isolering lades ut ovanpå en sandbädd och överst lades befintliga grusmassor så att ytan kan fungera som en parkeringsplats. Installationsarbetena gick mycket smidigt och pålkranens kapacitet

användes väl då hela dess slaglängd, 18 meter utnyttjades. Kopplingsarbetena tog ca 10 % av arbetstiden i anspråk.

Mätssystem

Mätdata insamlas huvudsakligen med ett automatiskt mätsystem. Som komplement görs dagliga manuella avläsningar. Det automatiska mätsystemet består av en mät dator, mätstationer och mätgivare. Mätdata kan överföras till SGI via telenätet. Aktuella mätdata kan även visas på en bildskärm vid mät datorn. För att rationellt kunna följa upp ett projekt är en god tillgänglighet till mätdata viktig.

Ett automatiskt mätsystem är också nödvändigt för att få tillräckligt med mätdata för att kunna genomföra en ordentlig utvärdering. Det har dock visat sig olämpligt att helt förlita sig på automatiska system då oförutsedda faktorer som ger avbrott i mätinsamlingen ibland uppstår. Värmemängdsmätarna har medfört mycket felsökningsarbeten. Någon mätare har varit olyckligt placerad och vid några mätare har temperaturdifferensen varit mindre än planerat. Mätarna har således uteslutit små värmemängder vilka under en längre tidsperiod ändå blir väsentliga värmemängder. Det är väsentligt att alla driftsfall noga tänks igenom för att få underlag för val av mätare för mätuppföljning.

Anläggningens driftsfunktion

Under de fyra år som anläggningen varit i drift har den fungerat väl. Cirkulationspumphaverier har inträffat men efter byte till en större pump har problemet lösts. Ursprungligen planerades att värmeinlagring och uttag skulle ske mellan vissa tidpunkter. Så har emellertid inte skett utan vaktmästarna har själva kunnat avgöra när det varit dags för byte mellan olika driftsfall. Denna manuella driftsstrategi har lett till ett bättre utnyttjande av anläggningen.

Det energitekniska mätprogrammet har delats upp i tre områden och beskriver värmepumparnas och lagrets prestanda samt övriga energitekniska data. Det totala systemets årsmedelvärmefaktor som är 1,7 är mindre än projekterat vilket delvis beror på felaktiga förutsättningar vid projekteringen. Värmepumparnas årsmedelvärmefaktor är ca 2,6. Den stora skillnaden mellan värmepumparnas och systemets värmefaktor speglar ett komplext energisystem där kringutrustning förbrukar mycket energi.

Värmelagret har aldrig tömts helt vilket beror på onormalt varma vintar. Inlagringseffekten ligger i juni kring 400 kW och sjunker succesivt med ökande lagertemperatur till 70 kW i oktober. Inlagringseffekten i juni är ca 60 W/m värmväxlare eller 15 W/m slang.

Knappt 1 800 MWh/år har värmepumpinstalleringen levererat till förbrukaren. För ett normalår är projekterat värde 2 050 MWh. Oljeförbrukningen har reducerats med 80 %, enligt projekterat mål vilket också innebär att miljöbelastningen minskat i samma omfattning. Olja står för 19 % av energiförbrukningen, uteluft för 15 %, värmelager för 36 % och el för 30 %.

Termisk responstest av värmelager

En termisk responstest av värmelagret har utförts. Responstestet omfattar ca 7 veckor med i huvudsak veckovis konstant tillförd effekt. Fluid- och marktemperatur samt fluidflöde har uppmätts.

Responstestet har utvärderats med hjälp av en detaljerad numerisk modell. Modellen förutsätter att värmetransporten i leran sker genom värmeledning. Ett inledande känslighetsanalys visar att den mest betydelsefulla osäkerheten gäller lagrets begynnelsestemperatur, lagrets värmeledningsförmåga och U-rörens skänkelavstånd.

Överensstämmelsen mellan uppmätt och beräknad värmebalans är god för de fall då begynnelsestemperatur och värmeledningsförmåga ligger närmast uppskattade värden. Osäkerheten i beräknad värmebalans bedöms vara maximalt 10 %.

Resultatet av den termiska responstestet är att enklare dimensioneringsprogram för förstudier och förprojekteringar kan utvecklas med tillräcklig noggrannhet. Det är också värdefullt att utveckla metod för insitumätning av värmeledningsförmågan. Slutligen är en installationsmetod som "garanterar" ett visst skänkelavstånd också betydelsefull.

Geoteknisk påverkan

För att studera vilken påverkan på marken som erhålls p.g.a. lagerbyggnation och temperaturförändringar vid drift av lagret har geotekniska provtagningar regelbundet genomförts i och utanför lagret. Efter att lagret togs i drift har sättningsmätningar och provtagningar utförts minst 1 ggr/år och porvattentrycket har mätts kontinuerligt.

Efter slanginstallation noterades att vattenkvot och skjuvhållfasthet sjunkit något medan övriga parametrar inte visat någon förändring.

Många parametrar har förändrats mycket lite och ibland efter ett oförklarligt mönster. Det har därför varit svårt att avgöra om en förändring verkligen är en förändring eller felmarginaler inom provtagnings- och laboriemetodik eller helt enkelt naturliga variationer. För att kunna förklara varför förändringar sker eller varför de

inte sker och för att bedöma vad som eventuellt kommer att ske framöver krävs längre mätserier än tre år.

Efter drygt 3-års geoteknisk uppföljning har följande noterats. Förkonsolideringstryck och kompressionsmodul uppvisar ingen förändring vilket delvis kan bero på att leran är överkonsoliderad och att förkonsolideringstrycket inte uppnåtts vid belastningen från lagerverksamheten. Det kan även bero på att ingen insitumetod finns för mätningar av dessa parametrar där temperaturförhållandena under provning är samma som vid aktuell lagertemperatur.

Porvattentrycken ökar kraftigt då lagertemperaturen stiger och minskar då lagertemperaturen sjunker. Trycken pendlar kring ett värde som fortfarande är högre än ursprungligt porvattentryck men som tenderar att närma sig det ursprungliga värdet.

Marken komprimeras vid uttag och hävs vid inlagring vilket beror på porvattentryckets variationer. Maximalt har marken komprimerats 13 cm härrörande från värmelagringspåverkan från dess att lagret byggdes fram till sommaren 1991.

Skjuvhållfastheten mätt insitu bedöms ha sjunkit med ökad lagertemperatur.

Ingen säker förändring av densitet och vattenkvot har påvisats.

Påverkan på jorden 8 m utanför lagret har enbart observerats på porvattentrycken som varierar något med temperaturvariationerna i lagret.

Kostnader

Anläggningskostnaderna uppgick 1987 till 5,5 miljoner kronor. Av dessa hör ca 1,4 miljoner till värmelagret och 2,6 miljoner till värmepump, uteluftkylare, elpanna samt kringutrustning. Kulvertar kostade ca 0,5 miljoner och byggnader samt projektering ca 1 miljon kronor.

Driftskostnaderna har varit knappt 0,5 miljoner kronor per år, inklusive moms.

Med 6 % realränta och 20 års avskrivning erhålls att anläggningskostnaderna blir i samma storleksordning som driftskostnaderna. Energiförbrukningen är med dessa förutsättningar ca 40 öre/kWh.

2. PROJEKTBAKGRUND

2.1. Experimentbyggnadsprojektet

Intill Ramunderskolan i Söderköping byggdes 1987 en ny sporthall. Den befintliga skolan uppvärmdes med tre oljepannor. Oljepannornas kapacitet var ej tillräcklig för att även värma sporthallen. En lösning var att installera en elpanna i sporthallen. Ett annat alternativ var att samordna energiförsörjningen för skolan och sporthallen för att få en miljövänligare och billigare uppvärmning.

Uteluftvärmepump är ett vanligt alternativ till olje- och elpannor. På vinterhalvåret när uteluften har lägst temperatur är verkningsgraden på värmepumpen låg. Tidvis kan temperaturen dessutom bli så låg att värmepumpen måste stängas av och driften klaras med enbart el eller olja. Med en differentierad eltaxa mellan sommar och vinter ger värmepumpen dessutom en sämre ekonomisk vinst. Genom att ansluta ett värmelager till uteluftkylaren och värmepumpen kan sommarens överskottsvarme och den varme som sommartid produceras med hjälp av billig el lagras.

Söderköpings kommun beslöt att bygga en anläggning bestående av uteluftkylare, värmepump, värmelager samt befintliga oljepannor. Vintertid tas varme från värmelagret, vår och höst tas värmen från uteluftkylarna och sommartid laddar uteluftkylarna lagret. Anläggningen klarar på så vis att försörja brukaren med varme året runt. Oljepannorna används som spetslastvärmekälla. I Kungsbacka och Kullavik har ett liknande koncept provats men där värmekällan är sol i stället för uteluft.

Energiprojektet har samfinansierats av Söderköpings kommun och Byggnadsforskningsrådet med ett experimentbyggnadslån på 2,7 Mkr.

Experimentbyggnadsprojekt har som syfte att föra ut tekniken från ett forsknings- och utvecklingsstadium fram till anläggningar fungerande i normal drift. Beroende på systemdelars olika utvecklingsnivåer blir det vanligen vissa delar av anläggningen som kommer att vara av störst intresse att följa och utvärdera. Återigen andra delar kan ha nått ett marknadsstadium och blir därför observerade mer i sin systemfunktion.

Syftet med denna anläggning har bl.a. varit att göra uteluftvärmepumpar effektivare och mer ekonomiska på vinterhalvåret med hjälp av ett värmelager i lera.

2.2. Mät- och utvärderingsprojektet

I anslutning till projektet har ett mät- och utvärderingsprojekt genomförts för att studera värmeteknisk, geoteknisk, byggnadsteknisk och ekonomisk funktion, vilket denna rapport redovisar. Uppföljningen har till vissa delar varit en förutsättning för beviljandet av BFR-lånet.

En primär målsättning i experimentbyggnadsprojektet är givetvis att få anläggningen att fungera på avsett vis. Den normala driftuppföljningen från ägare och teknisk personal sörjer för detta och där kommer erfarenheter att erhållas för den mera forskningsinriktade utvärderingen.

Mätinsamling och bearbetning av resultat är delvis datorbaserad och delvis manuell. Utvärderingen är ett komplement till den normala driftuppföljningen och beräknades till att börja med pågå från sommaren -87 till sommaren -89. På grund av att anläggningen togs i drift några månader senare än projekterat och vissa problem med mätsystemet till en början uppstod har mätuppföljningen förlängts till sommaren -91.

I rapporten redovisas energianläggningens värmefaktorer, levererade energimängder, energibalanser, erfarenheter från anläggningens drift-, styr- och reglerfunktion samt erfarenheter av mätinsamlingssystemet. Genomförd termisk responstest av markvärmelagret har resulterat i en känslighetsanalys som också redovisas.

De värmelager som byggts tidigare är belägna på västkusten där leran avsatts under saltvattenförhållanden. I Söderköping är leran däremot av sötvattentyp. De geotekniska undersökningarna har som syfte att studera förändringar i lerans geotekniska egenskaper och om det föreligger någon skillnad i påverkan på olika leror vid värmelagring.

I Söderköping installerades en ny typ av värmeväxlare, dubbelt U-rör med ett avstånd mellan skänklarna på 0,5 meter. Den nya värmeväxlaren medförde också att ny installationsmetod skulle tas fram vilken beskrivs.

3. ANLÄGGNINGSBESKRIVNING

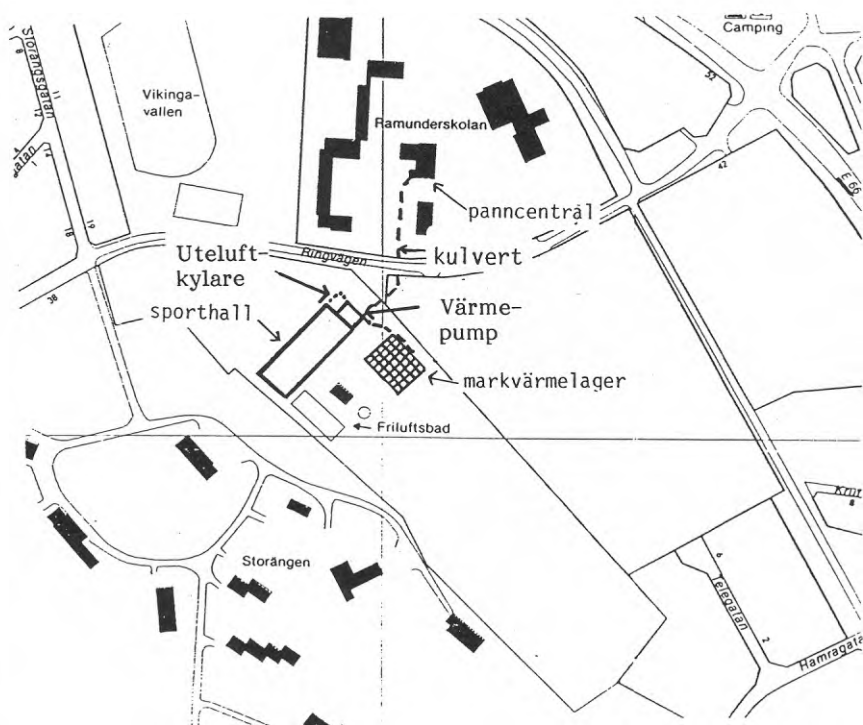
Söderköpings kommun beslöt 1985 att bygga en sporthall intill Ramunderskolan i Söderköping. Ramunderskolan hade då ett årligt energibehov om ca 1 750 MWh. Energibehovet för den tillkommande sporthallen bedömdes till ca 760 MWh/år. I skolan fanns tre oljepannor som hade en energi- och effektkapacitet som översteg behovet i skolan men ej tillräckligt för att klara den tillkommande sporthallens behov. Värmeförsörjningen för både skolan och sporthallen samordnades med en värmepumpanläggning där de befintliga oljepannorna används som spetsvärmekälla.

Värmeförsörjningsanläggningen upphandlades som totalentreprenad, vilken utfördes av BPA Byggproduktion AB, Norrköping. I förfrågningsunderlaget angavs principiell utformning och funktionskrav. Eftersom anläggningen skulle innehålla ett värmelager i lera med delvis oprövad teknik angavs relativt detaljerade föreskrifter för lagrets utformning, tex markvärmeväxlare, rörsystem för samlingsledningar och överbyggnad inklusive isolering.

Förfrågningsunderlaget, daterat 850426, utformades av Statens geotekniska institut (SGI) och RNK Installationskonsult AB, Göteborg. I entreprenaden ingick viss utrustning för reglering och mätning, främst avsedd för den efterföljande mät- och utvärderingen. Som tilläggsarbete installerades dessutom ytterligare mätutrustning dels av BPA, dels av SGI.

3.1. Lokalisering av anläggningen

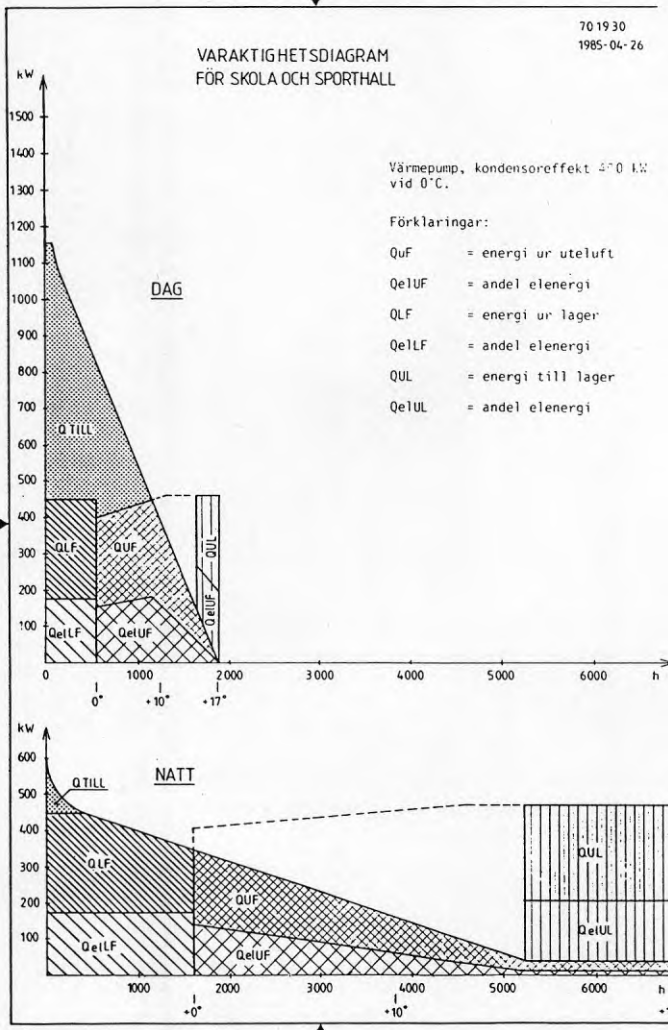
I figur 3.1 visas en situationsplan över området. Uteluftkylarna har placerats utefter nordöstra gaveln på sporthallen och har ett bullerskydd i form av ett högt plank. Värmepumparna står i värmepumprummet som ligger vägg i vägg med sporthallen. Värmen lagras i lera och lagret har placerats där lerdjupen är som störst och så nära värmepumparna som möjligt för att minimera kulvertlängder. I den södra delen av skolan finns oljepannorna. En kulvert förbinder oljepannorna och skolan med värmepumpen och sporthallen.



Figur 3.1. Situationsplan över området.

3.2. Energi- och effektbehov

Ett varaktighetsdiagram över skolan och sporthallen visas i figur 3.2. Där framgår att det föreligger en stor variation mellan dag och natt. Behoven baseras på uppmätta behov i skolan och projekterade behov för sporthallen. Efter att värmeanläggningen togs i drift har en del energisparåtgärder gjorts i skolan vilket till viss del förändrar förhållandena. Se vidare kapitel 6.



Figur 3.2. Varaktighetsdiagram för skola och sporthall baserade på uppmätta energi- och effektbehov för skolan och bedömda behov för sporthallen.

I figur 3.3 redovisas energibehoven för skolan och sporthallen uppdelade per månad. Behoven är även här baserade på uppmätta värden för skolan och projekterade värden för sporthallen. Energiförbehoven har också minskat något efter energisparåtgärder i skolan. I figuren framgår att förhållandena är tämligen extrema genom att det totala energiförbehovet i stort sett fördelas på nio månader istället för på normalt tolv månader.

Månad	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Året
Utetemperatur, °C	-2,9	-3,0	-0,1	5,3	11,0	15,4	17,7	16,4	12,2	7,1	2,7	0,0	6,8
Behov MWh													
Skola	282	282	250	193	92				80	140	185	250	1750
Sporthall	113	114	99	71	42	18	11	11	35	61	84	98	760
Summa	395	396	349	264	134	18	11	11	115	201	269	348	2510

Figur 3.3. Energiförbehov månadsvis för skola och sporthall baserade på uppmätta behov i skolan och bedömda behov för sporthallen.

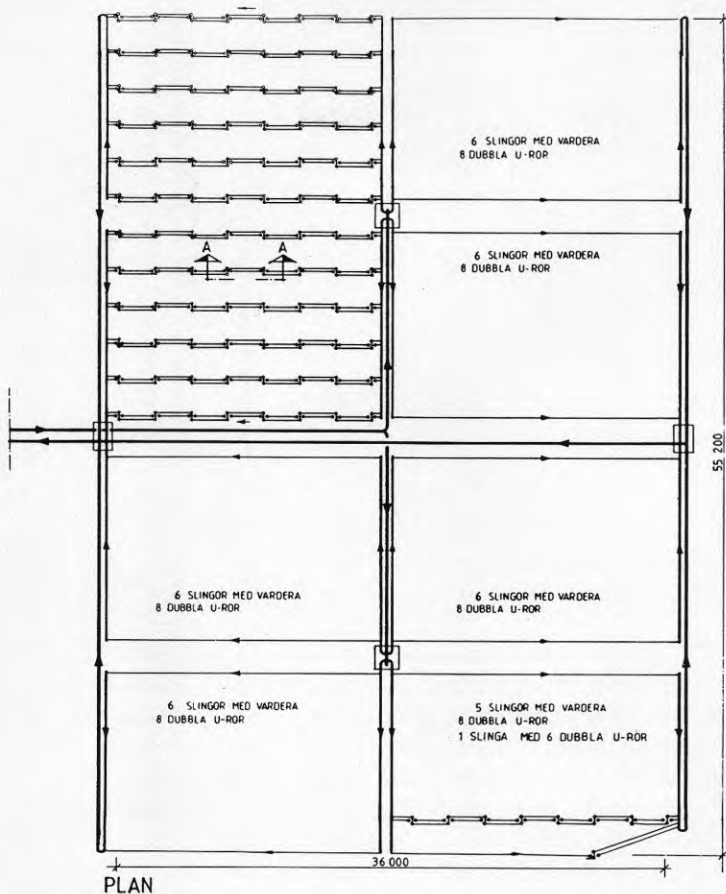
Värmeförsörjningssystemet ska efter utbyggnad beseras på ca 50 % olja och el samt ca 50 % "gratisvärme" från uteluft och värmelager.

3.3. Anläggningskomponenter

Uteluftkylarna är från Fläkt Svenska AB. Köldmediet som cirkulerar är CaCl₂ (STAL BRINE 130).

Värmepumparna är två stycken och av fabrikatet STAL VRP55E. Kompressortypen är en öppen skruvkompressor och använder R-12 som köldmedium. Motorn är eldriven. Värmepumparna är utrustade med underkylare.

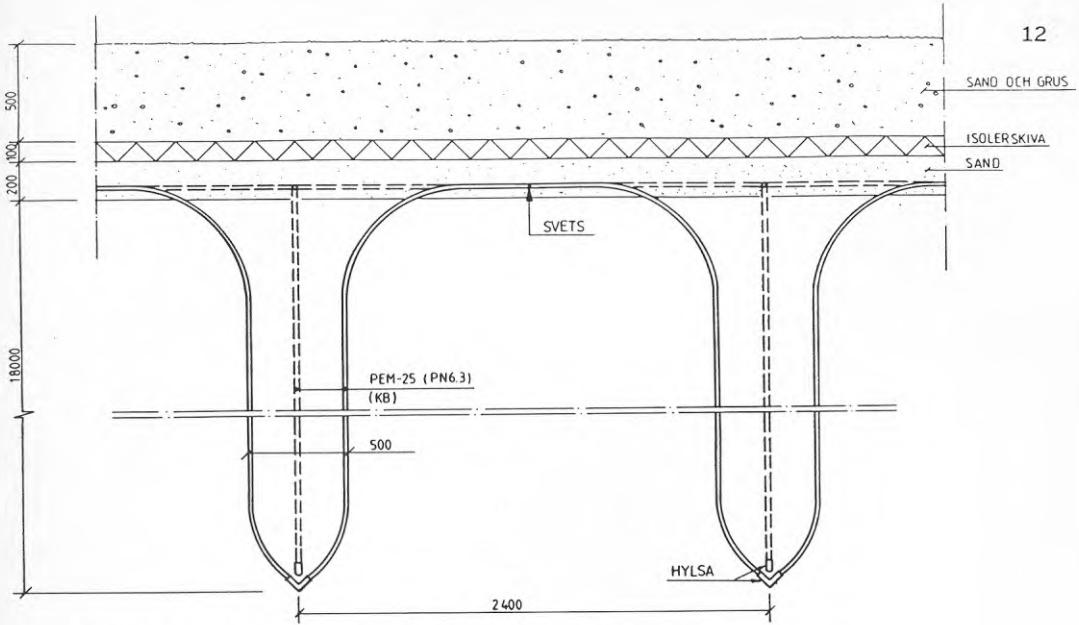
Värmelagret består av 382 dubbla U-rör till 18 meter under markytan. Värmelagret är indelat i fyra identiska kvadranter. Åtta värmeväxlare är seriekopplade med varandra och i övrigt är slangarna i lagret parallellkopplade, se figur 3.4. Lagrets volym är ca 36 000 m³ och yttermåttarna är LxBxH = 55x36x18 meter.



Figur 3.4. Värmelagret i plan.

Värmeväxlingen sker genom att varm vätska cirkuleras i plastslangarna vid laddning medan en kallare vätska än omgivande mark cirkuleras vid uttag. Under laddning är vätskan av geotekniska skäl maximalt $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Det har ännu inte utretts vad som kan hända med leran om temperaturen är högre. När lagret är fulladdat har leran en temperatur av ca $28\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vätskans temperatur får aldrig understiga $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ för att undvika frysning av leran.

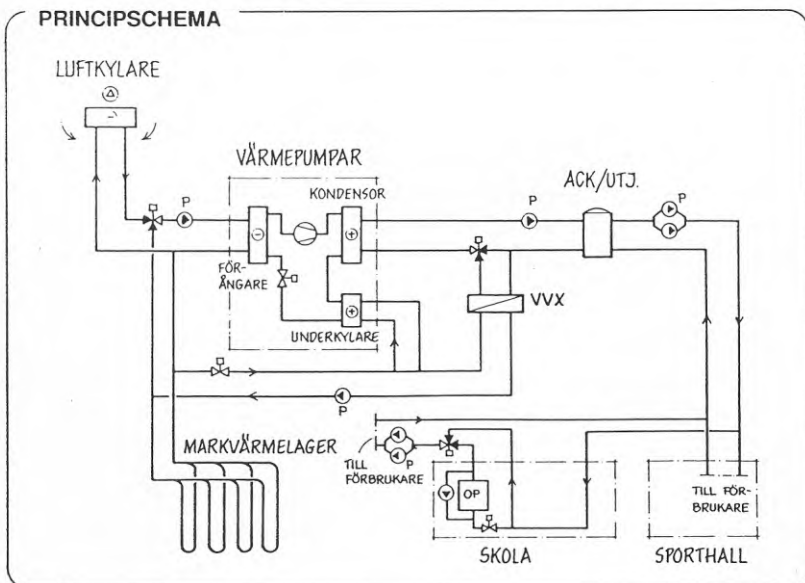
Slangen är av polyeten, PEM, 25 mm ytterdiameter och varje värmeväxlare består av två U-formade vertikala rörslingor i två vinkelräta plan. Avståndet mellan skänklarna på U-rören är 0,5 meter och mellan varje värmeväxlare 2,4 meter, se vidare figur 3.5. Fördelningsledningar och slangkopplingar ligger i en 20 cm sandbädd. Ovanpå detta ligger 10 cm isolering (Markisol 20) och överst finns ett 50 cm sand- och gruslager. I slangsystemet cirkuleras köldbärarvätska, samma som i uteluftkylarna, CaCl_2 (STAL BRINE 130).



Figur 3.5. Sektion av markvärmväxlare.

Energi hämtas från uteluften när utetemperaturen överstiger ca $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Överstiger värmepumpens kapacitet anläggningens värmebehov laddas lagret i första hand via värmepumpens kondensör och underkylare. Vid ökat värmebehov i anläggningen minskas värmeinlagringen successivt tills enbart underkylarna laddar lagret. Vid lägre utetemperatur än $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ hämtas energi från lagret. Överstiger anläggningens värmebehov vad värmepumpen kan hämta från lagret kopplas oljepannorna in.

Ett förenklat principschema över anläggningen framgår av figur 3.6.



Figur 3.6. Förenklat principschema över anläggningen.

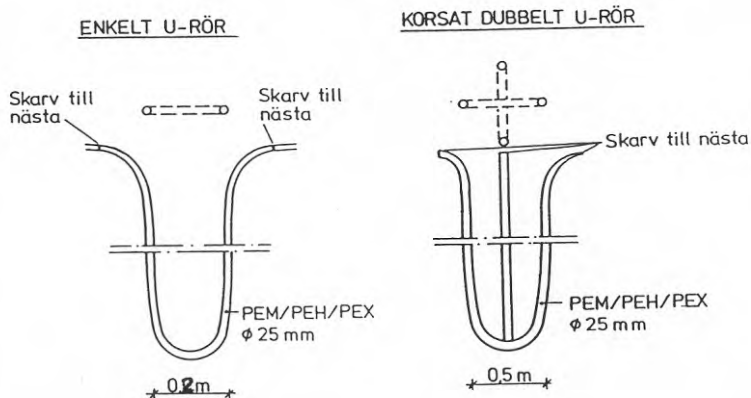
4. INSTALLATION AV MARKVÄRMEVÄXLARE

4.1. Markvärmesväxlare

I tidigare byggda värmelager i lera med vertikala slangsystem (Kungsbacka, Kullavik och Utby) har den enskilda värmesväxlaren haft formen av ett enkelt U-rör. Den har kallats U-rör (eller hårnål) därför att slangen formar ett U i marken med 10 - 40 m höjd och ca 0.2 m mellan skänklarna. Slangen består av polyeten med ca 20 mm diameter. Centrumavståndet mellan varje enskilt U-rör har varit ca 1.8 m, se figur 4.1. U-rören har kopplats eller svetsats ihop i markytan.

I Söderköping har istället valts att använda ett dubbelt U-rör. Syftet var att öka effektiviteten hos markvärmesväxlaren för att dels minska kostnaderna för lagret, dels för att få en markvärmesväxlare som bättre kan inlagra och utlagra höga effektpulser. Det dubbla U-röret består av två enkla U-rör som ligger vinkelrätt mot varandra och korsar varandra i botten, se figur 4.1. Avståndet mellan skänklarna valdes till 0,5 m. Värmetekniskt är det gynnsamt med ett så stort avstånd mellan skänklarna som möjligt (max halva centrumavståndet mellan enskilda U-rör). 0,5 m ansågs vara den installationstekniska begränsningen. Slangen har 25 mm ytterdiameter. Utformningen innebär att avståndet mellan varje U-rör kunde ökas från ca 1,8 m till 2,4 m. Lagerytan i Söderköping är 2 000 m² vilket innebär att med centrumavståndet 2,4 m behövdes 347 st dubbla U-rör vilket kan jämföras med 617 st enkla U-rör med centrumavståndet 1,8 m.

Efter installationsarbetet mättes avståndet mellan skänklarna eftersom detta är av relativt stor betydelse för värmeeffektkapaciteten. Det visade sig att de flesta U-rören hade ett skänkelavstånd på ca 0,4 m. För att kompensera för försämrade effektkapacitet installerades 382 st U-rör i stället för de 347 st projekterade. Längst ner på U-röret sitter en koppling därför att slangen inte klarar att krökas så att det blir 0,5 meter mellan skänklarna. I markytan har slangarna svetsats ihop. Det kan påpekas att det finns dyrare kvaliteter på slang (PEX) som klarar mindre krökningsradier och högre temperaturer.



Figur 4.1. Enkelt och dubbelt U-rör.

4.2. Installationsarbete

Markytan där lagret placerades bestod av en grusbelagd parkeringsplats intill sporthallen. Under gruset fanns 18 meter lera som skulle användas för värmelagring. Gruslagret som var ca 0,5 meter tjockt schaktades bort för att sedan återanvändas. Torrskorpeleran bibehölls.

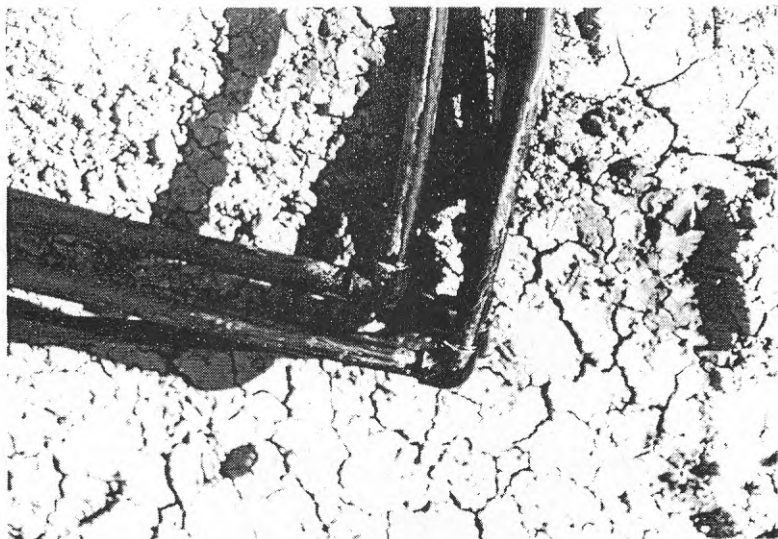
Med en pålkran och specialtillverkat verktyg, se figur 4.2, trycktes slang ner till 18 meter under markytan. Leran övergår på detta djup i sand och grus. Den använda pålkranen kunde trycka till 18 meter utan skarvning.



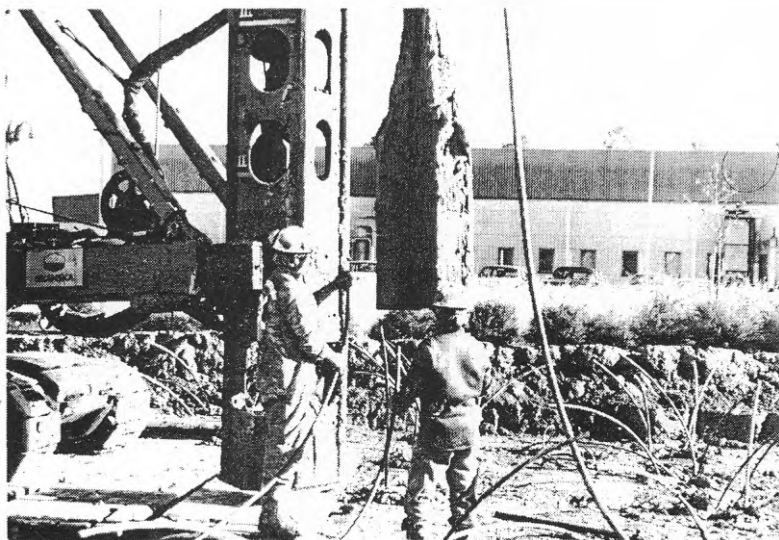
Figur 4.2. Pålkran med specialtillverkat foderrör.

Slangen kapades i drygt 20 meters längder och skarvades två och två med en koppling så att de formar ett U-rör, se figur 4.3. Två sådana U-rör fördes upp i det specialtillverkade foderröret, se figur 4.4. Genom att naja fast en platta i form av ett kors, se figur 4.5, hölls slangen på plats i foderröret. Foderröret trycktes sedan ner till erforderligt djup med pålkranen. Med enbart något slag trycktes slangen ner till ca 15 meter och därefter behövdes ytterligare ett tiotal slag för att komma ner till avsett djup. Därefter trycktes bottenplattan bort med hjälp av tryckluft. På så vis fick slangen en enkel förankring i botten. Slutligen drogs foderröret upp.

När U-rören installerats kopplades dessa ihop med en koppling i markytan. Vid provtryckningen konstaterades att kopplingarna inte höll tätt. En del till och med lossnade. Dessa problem berodde enligt entreprenören på för stora toleranser i kopplingarnas dimensioner. Samtliga kopplingar togs bort och slangarna svetsades istället ihop, se figur 4.6. På nytt provtrycktes lagret och denna gång kunde erforderligt tryck hållas.



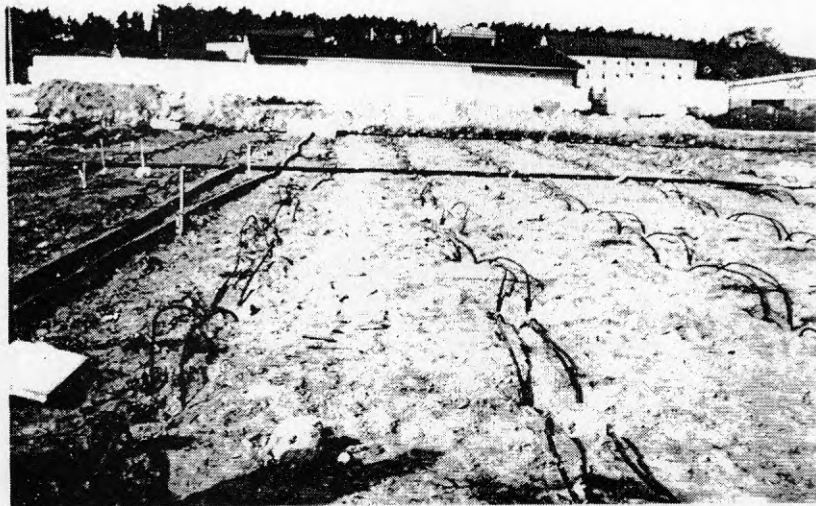
Figur 4.3. Förtillverkade U-rör med koppling i botten.



Figur 4.4. Iförande av slang i foderrör.

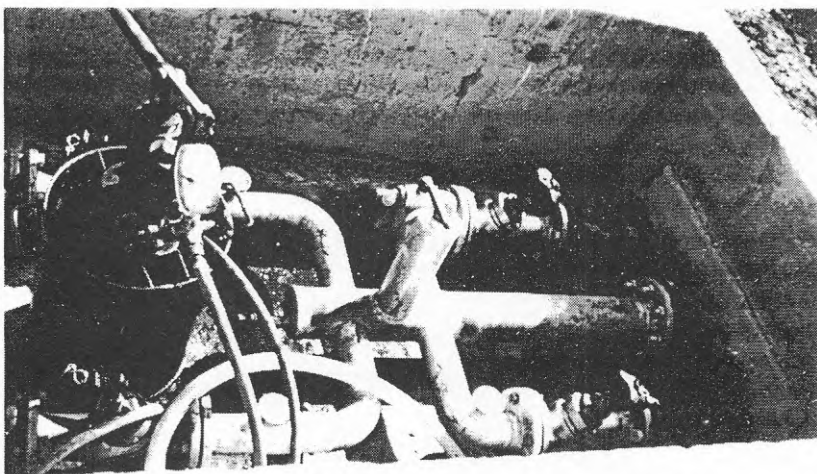


Figur 4.5. Bottenplatta för förankring av slangen.



Figur 4.6. Ihopsvetsade slangar i markytan.

Samlingsledningar lades ut på leran och samtliga ledningar täcktes med sand för att skyddas mot eventuella skador från stenar och dylikt. Fyra kopplingsbrunnar av betong för styr- och reglerutrustning samt luftningsventiler utfördes, se figur 4.7. Dessa går att komma åt från markytan. Ovanpå sanden placerades två lager isolering bestående av totalt 0,1 m cellplast. Den bortschaktade sanden och gruset lades ovanpå isoleringen och lagerytan används som parkeringsplats på samma vis som tidigare.



Figur 4.7. Kopplingsbrunn av betong med styr- och reglerutrustning samt luftningsventiler.

4.3. Slutsatser

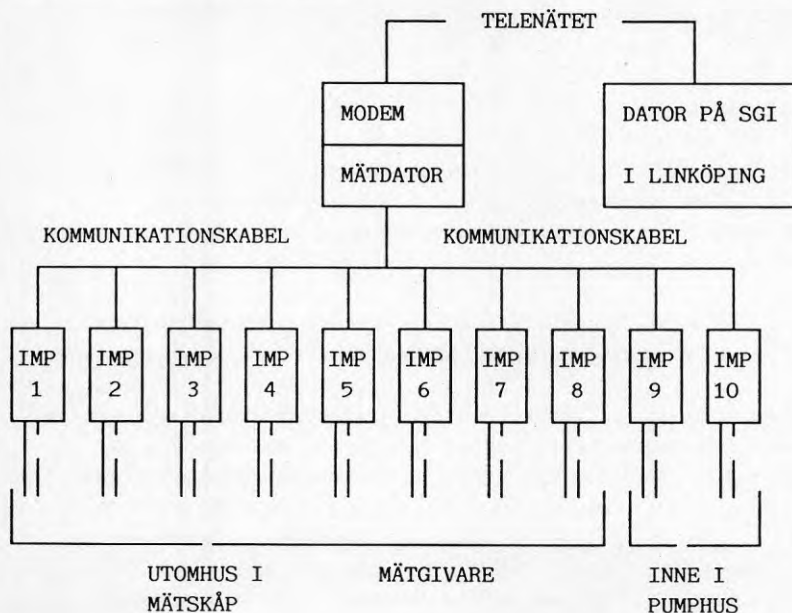
Arbetet med att trycka ner U-rören till 18 meter under markytan har gått mycket smidigt. Det framtagna foderröret fungerade bra och det kritiska avståndet mellan skänklarna, som skulle vara 0,5 m, har nästan uppfyllts. Pålkranen som användes har en geider som klarar att trycka ner slang 18 meter ner i marken utan skarvning, vilket påverkar den tid som åtgår för att bygga lagret. Eftersom lagerhöjden är 18 m har pålkranens kapacitet utnyttjats väl. I markytan skulle varje U-rör kopplats ihop. Det visade sig att slangarna och kopplingarna hade för stora toleranser, så att de ej höll tätt. Kopplingarna fick bytas ut mot svetsar. De kopplingar som sitter i botten på U-röret och som monterats på fabrik höll däremot för trycket.

5. MÄTSYSTEM

5.1. Utformning av mätsystem

Det automatiska mätsystemet består av en mät dator, tio mätstationer och ett antal mätgivare anslutna till respektive mätstation. Mät datorn är kopplad till ordinarie telenät via ett modem. Respektive mätstation är kopplad till fabrikat Solatron (Isolated Measurement Pod, IMP) är kopplad till mät datorn via en kommunikationskabel.

Mätprogrammet i datorn hämtar av mätgivarna genererade mätdata från samtliga tio mätstationer. Aktuella mätvärden kan även visas på den till mät datorn anslutna bildskärmen. Mätvärden som lagras i datorn kan vid behov överföras via telenätet till SGI i Linköping, se figur 5.1.



Figur 5.1. Schematisk uppbyggnad av det automatiska mätinsamlingsystemet i Söderköping samt anslutning till SGI i Linköping.

Temperaturgivarna är platinagivare s k Pt100-givare vars nominella resistans är 100 ohm DIN 4376, standard grade.

Värmemängdsmätarna är av typ Clorius Toshiba bestående av induktiv flödesmätare Toshiba Tosmac, integreringsverk Combimeter RVV 82-13, temperaturgivare Pt100 och temperaturgivare Combimeter ITH 33-D32.

Flödesmätarna är av typ Clorius Toshiba bestående av induktiv flödesmätare Toshiba Tosmac och volymräkneverk Combimeter RV 82-12.

Porvattentryckgivarna av typ Bat med mätsignal i ett kabelpar.

Elenergi till värmepump, fläktar och cirkulationspumpar mäts med konventionella elmätare.

5.2. Erfarenhet av mätinsamlingssystem

Återkommande problem med datorn och främst skivminnet har uppstått. Efter att datorn placerats i ett kylskåp har datorfelen upphört. Utvecklingen av datorprogram för bearbetning av rådata samt redovisningsprogram hade ej slutförts då mätningarna började vilket försvårade och försenade bearbetningen av data. De stora datamängderna var svåra att föra över via telefonnätet utan störningar.

Fördelen med det automatiska mätinsamlingssystemet är att man snabbt kan lagra en stor mängd data och hämta data via telenätet. Kvaliteten hos mätdata är bättre jämfört med manuell mätning. Även presentation av mätningarna i form av diagram, tabeller etc underlättas. Manuella mätningar som komplement till de automatiska har visat sig nödvändiga för uppföljningens skull.

Pt100-givarna, som mäter temperaturen, har fungerat bra medan porvattentryckgivarna har haft en något hög felfrekvens.

Hösten 1987 slets kommunikationskabeln av, mellan mätskåpet och mätdata-torn, i samband med grävmaskinsarbeten. Kablaget reparerades och driftstörningar konstaterades därefter. Felintensiteten tenderade till att öka vår och höst, vilket med stor sannolikhet beror på att kabelbrottet ej avhjälpes på rätt sätt, dvs kabelskarven är inte vattentät. En ny luftkabel installerades och trots den nya kabeln kvarstod viss driftstörning. Den långa luftledningen (≈ 150 m) var emellertid känslig för störningar från två-taktsmotorer, radiosändare, åsknedslag etc. Efter byte av kommunikationsnätets anpassningskomponent (120Ω i serie med en kondensator) våren -91 och jordning av skärmen till kommunikationskabeln i mätskåpet har driftstörningarna uteblivit.

Ritningsunderlaget som i detalj ska visa lägesplacering av alla kabelrör i marken är bristfälligt och saknas delvis. Markering av kabelrör med plastband i jorden saknas. En underhållsmanual för hela mätsystemet saknas också, vilket har resulterat i att drift och underhåll försvårats.

Generellt har värmemängdsmätarna fungerat otillfredsställande under

den energitekniska utvärderingen. Detta är beklagligt då värmemängdsmätarna är den viktigaste komponenten i en energiteknisk utvärdering. Värmemängdsmätarna består av temperaturgivare av typ Pt100 alternativt Ni100 samt induktiv flödesgivare. Mycket arbete har lagts ned för att komma tillrätta med problemen. Leverantören har utfört flera kalibreringar av givare. Temperaturgivare har kontrollerats och i något fall har metoden att mäta temperatur med en enstaka insticks-givare bytts ut mot ett system av givare på utsidan av röret. Även integreringsverken har undersökts.

Den mest sannolika orsaken till att värmemängdsmätarna visar fel värde är en för liten temperaturdifferens mellan inkommande och utgående temperatur. Vid låga effektuttag är det inte ovanligt att temperaturdifferensen är mindre än 2 °C. Därför är det viktigt att temperaturgivarna har rätt noggrannhet samt att de placeras så att största möjliga temperaturdifferens uppstår. I Söderköping har det senare varit svårt att åstadkomma för värmemängdsmätare 1 eftersom en öppen utjämnings-tank stör temperatur bilden vid värmemängdsmätaren. Integreringsverket som använts i värmemängdsmätaren har en undre gräns för temperaturdifferensen på 4 °C, det vill säga större än aktuell temperaturdifferens enligt ovanstående. Enligt leverantören av värmemängdsmätarna garanteras ej beräkningarnas riktighet vid detta drifttillstånd.

Utöver värmemängdsmätare 1 som beskrivits i föregående text har även liknande mätare använts för att beräkna levererad värme från värmepumparnas underkylare samt för tillförd och avgiven energimängd vid omsättning av lagret. Värmemängdsmätare 2 vid värmepumparnas underkylare har inte alls kunnat användas på grund av allt för små temperaturdifferenser. Värmemängdsmätarna till och från lagret, 5A respektive 5B, har fungerat så tillvida att rimliga värden erhållits. Det är dock möjligt att även dessa visat för små energimängder. Anledningen till dubbla värmemängdsmätare är att laddning och tömning sker vid reverse-rat flöde vilket var billigare att mäta med två standardmätare än en mer komplex mätare som kan mäta flödet i två riktningar. Eventuellt vore en lösning med en värmemängdsmätare för båda driftcyklerna mer tillförlitlig.

5.3. Slutsatser

Det automatiska mätsystemet och anslutningen via telenätet till SGI har varit praktiskt, då detta system kan mäta, lagra och överföra stora datamängder på ett snabbt sätt. Det är också enkelt att kontrollera hur mätningarna går. Utvecklingen av datorbearbetningsprogram hade ej slutförts vid uppstart av uppföljningsprojektet vilket medfört problem vid dataöverföringar.

Trots kravet på maximalt en veckas avbrott uppstod opåverkbara situationer som medförde större tidsavbrott. I dessa situationer har den

manuella mätinsamlingen, som utfördes dagligen av vaktmästarna på skolan varit ett värfullt komplement till den automatiska mätdatainsamlingen.

I projektet har det genomgående varit problem med värmemängdsmätarna. Dessa har troligtvis placerats olyckligt och haft för dålig kapacitet att mäta små temperaturdifferenser.

6. ANLÄGGNINGENS DRIFTSFUNKTION

6.1. Erfarenhet av energianläggningens drifts-, styr- och reglerfunktion

Under de fyra år som anläggningen varit i drift har den fungerat väl. Efter normala inkörningsproblem har inga anmärkningsvärda störningar inträffat. Ramunderskolan och sporthallen har under hela perioden haft en hög värmekomfort inomhus vilket indikerar att uteluft/markvärmearläggningen tillsammans med de oljeeldade spetslastpannorna producerat efterfrågad mängd energi med tillräcklig effekt.

Ett läckage i en svetsskarv på stamledningen till marklagret, som uppstod omkring ett år efter uppstart, är den enda störning som inträffat vad gäller lagrets funktion. Läckaget åtgärdades inom ramen för gällande garantiåtagande av entreprenören BPA/Norrköping.

Planerad service av värmepumpar har genomförts med ett intervall om 5000 driftstimmar vilket ungefär motsvarar ett servicetillfälle per år (6000 driftstimmar per år och värmepump). Värmepumparnas axeltätning har havererat cirka en gång per värmepump och år. Haverifrekvensen är enligt värmepumpleverantören normal men det innebär att freon (R12) av storleksordningen 10 liter läcker ut per värmepump och gång.

Ursprunglig pump för lagercirkulation har havererat flera gånger med skurna lager eller brand i elmotor som följd. Orsaken till pumphaverierna kan finnas i ett stort tryckfall över den filteranläggning för rening av värmebärarmedium som är monterad efter pumpenheten. Pumpen blir sannolikt överbelastad. Upprepade haverier föranledde byte till större pumpenhet sommaren 1990. Den nya cirkulationspumpen har fungerat utan anmärkning.

Övergång mellan olika driftsfall (laddning/tömning) förutsätter manuell injustering av styr- och reglerutrustning tills stabil drift erhålls. Arbetet är av rutinkaraktär och tar en dag i anspråk.

Utrymmet i maskinhallen är väl tilltaget vilket medfört att reparationer och service varit lätt att utföra.

6.2. Energitekniskt mätprogram

Anläggningens energitekniska funktion har undersökts genom ett mät- och undersökningsprogram. Ett sådant program genomförs dels för att utvärdera det ekonomiska utfallet av anläggningar finansierade med experimentbyggnadslån, dels för forskning och utveckling (FoU).

Mätdata har dels samlats in via ett datorbaserat mätsystem, jämför

kapitel 5, dels har driftspersonal vid anläggningen skrivit dagliga driftsrapporter. Insamlade mätdata har bearbetats och sammanställts för att ge underlag till del- och slutrapportering av mät- och utvärderingsprojektet. Där inte annat anges presenteras mätdata som månadsmedelvärde.

Det energitekniska mätprogrammet har delats upp i tre områden. Två av dem är forskningsorienterade och beskriver: Värmepumparnas prestanda (kap 6.3.2) och lagrets prestanda (kap 6.3.3 och 7). Det sista området innehåller energitekniska data (kap 6.3.4) som bland annat riktar sig till Söderköpings kommun och driftspersonal.

Vid utvärderingen har konstaterats att en av värmemängdsmätarna visat fel. Mätfelet beror troligtvis på att felaktiga temperaturskillnader mellan tillopp och retur uppmätts. Nedanstående utvärdering baseras på att uppmätta värden från denna mätare justerats. Uppmätta värden, felsökning och hur justeringen gjorts framgår av bilaga 1.

6.3. Utvärdering av mätresultat

6.3.1. Sankeydiagram

Energibalansen (tillförd/utvunnen energi) för värmeförsörjningsanläggningen redovisas i ett Sankeydiagram. Sankeydiagrammet är sammanställt för driftsåret 1990 och baseras på summering av månadsvärden, jämför figur 6.1.

Ur diagrammet kan följande prestanda beräknas, energikvantitet i MWh:

TOTALSYSTEMETS ÅRSVERKNINGSGRAD

Totalsystemets årsverkningsgrad = $T_v = 90\%$

$T_v = \text{tillförd energimängd} / \text{utvunnen energimängd}$

TOTALSYSTEMET ÅRSMEDELVÄRMEFAKTOR

Totalsystemet årsmedelvärmefaktor = $T_{VF} = 1,7$

$T_{VF} = \text{utvunnen energi ur VP} / \text{systemets totala elförbrukning}$

VÄRMEPUMPARNAS ÅRSMEDELVÄRMEFAKTOR VID LADDNING

Värmepumparnas årsmedelvärmefaktor vid laddning = $TVP_{vl} = 2,7$

$TVP_{vl} = \text{utvunnen energi ur VP(laddning) / tillförd el till VP(laddning)}$

VÄRMEPUMPARNAS ÅRSMEDELVÄRMEFAKTOR VID TÖMNING

Värmepumparnas årsmedelvärmefaktor vid tömning = $TVP_{vt} = 2,5$

$TVP_{vt} = \text{utvunnen energi ur VP(tömning) / tillförd el till VP(tömning)}$

ENERGITÄCKNINGSBIDRAG

Totalt utvunnen energimängd = $405+505+1280 = 2\ 190\ \text{MWh}$

Täckningsbidrag från olja = $405/2190 = 0,185 = 18,5\%$

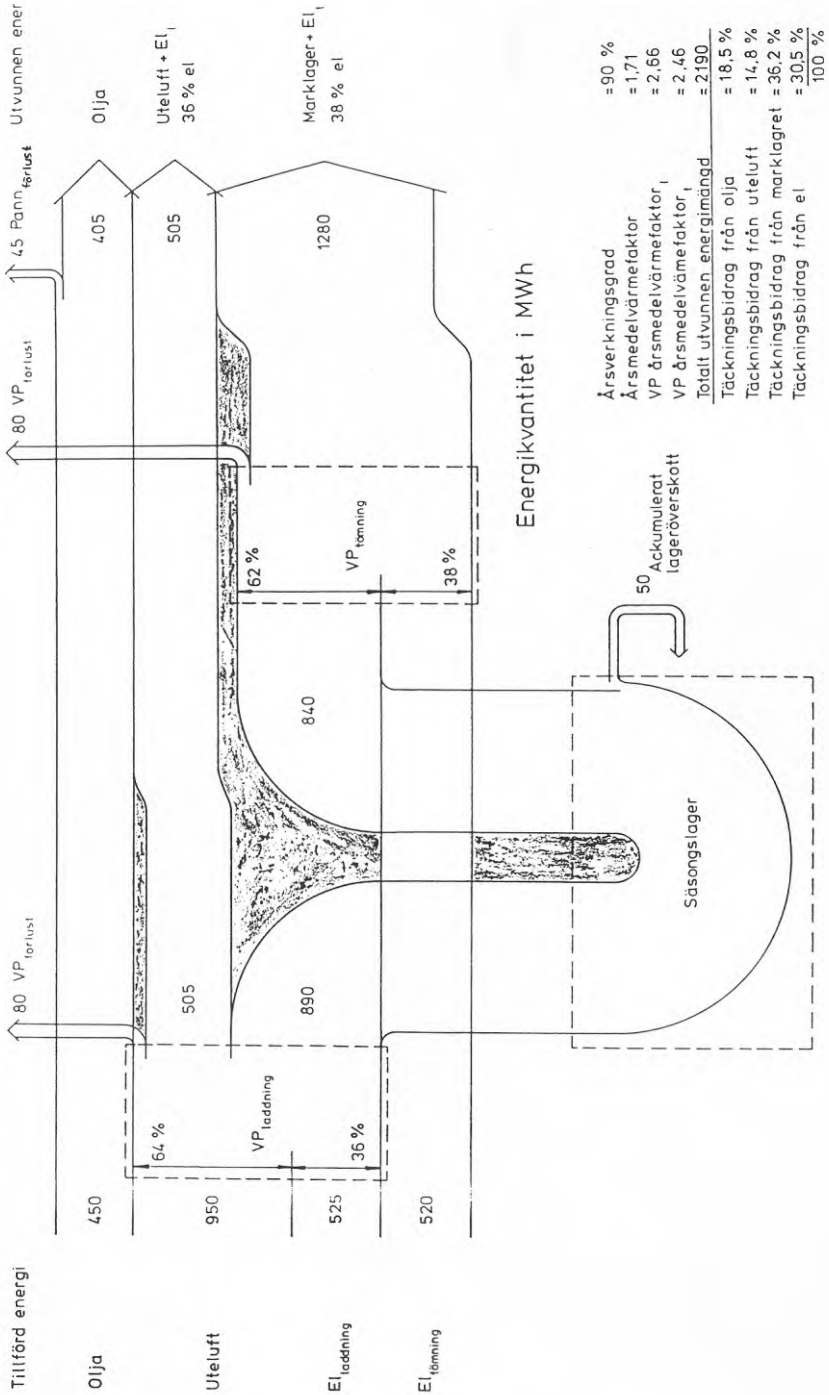
Täckningsbidrag från uteluft = $(0,64*505)/2190 = 0,148 = 14,8\%$

Täckningsbidrag från marklagret = $(0,62*1280)/2190 = 0,362 = 36,2\%$

Täckningsbidrag från el = $(0,36*505)+(0,38*1280)/2190 = 0,305 = 30,5\%$

100 %

SÖDERKÖPINGS VÄRMELAGER
Sankeydiagram för totalsystemet 1990



Figur 6.1. Sankeydiagram för totalsystemet värmesäsongen 1989-90.

Jämfört med projekterande data från kapitel 3 kan följande läsas ur Sankeydiagrammet:

Kalkylerat värmebehov för fastigheten (2500 MWh/år) är cirka 300 MWh/år högre än det verkliga utfallet (2190 MWh/år). Orsaken till den lägre energiförbrukningen är att de utvärderade vintrarna har varit varmare än normala.

Markvärmelagret har levererat mer energi och uteluftkylarna motsvarande mängd mindre energi än planerat. Energitäckningen från marklager och uteluft i kombination med värmepump uppfyller projekterade mål. Målet uppfylls med en betydligt lägre årsvärmefaktor (1,7) än projekterat (2,5). Sannolikt är detta en felaktig förutsättning från projekteringen. En låg årsvärmefaktor avspeglar i det aktuella fallet inte dåligt fungerande värmepumpar utan snarare det komplexa energisystemet. Med denna tekniska systemlösning är det svårt att erhålla en hög värmefaktor.

Oljeförbrukningen har reducerats med 80% enligt projekterat mål.

6.3.2. Värmepumpsprestanda

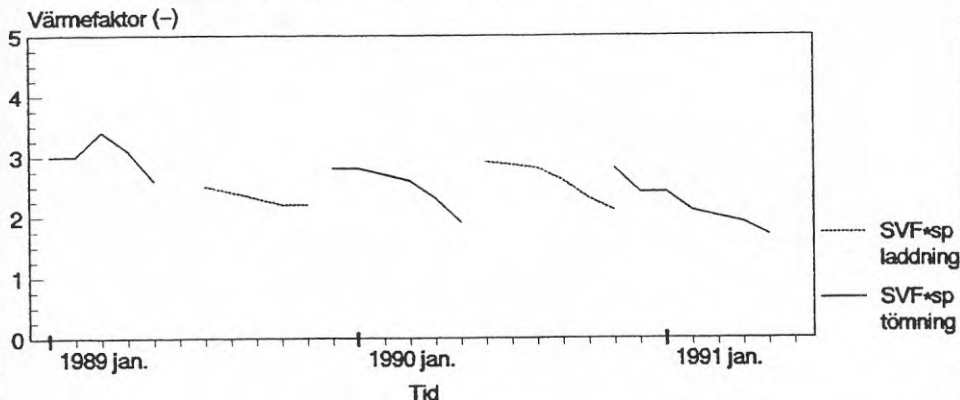
Värmepumparnas värmefaktor, VF, definieras som kvoten mellan utvunnen energimängd och tillförd elektrisk energi. Värmepumparna arbetar i två driftcykler. Under den varma årstiden (laddning av lagret) levererar värmepumparna energi dels direkt till förbrukaren (värmemängdsmätare VM1), dels till markvärmelagret (värmemängdsmätare VM5A). Under den kalla årstiden (tömning av lagret) levererar värmepumparna all energi direkt till förbrukaren (VM1). Separata elmätare för dels värmepumparna, dels totala systemets elförbrukning har använts för att kunna utvärdera värmepumparnas värmefaktor och hela anläggningens systemvärmefaktor, SVF.

Vid laddning varierar systemets värmefaktor, SVF+sp, fallande med tiden, mellan 2,9 och 2,1, se figur 6.2. Värmefaktorn varierar vid tömning mellan 3,4 och 1,7. Systemvärmefaktorn och värmepumparnas värmefaktor har försämrats för varje ny tömningscykel. Detta beror sannolikt på lägre lagertemperatur. En lägre lagertemperatur sänker värmepumparnas förångningstemperatur vilket påverkar systemvärmefaktorn och värmepumparnas värmefaktor negativt. Förhållanden på värmepumparnas kondensorsida kan anses ha varit konstanta för respektive kalenderår eftersom utomhusklimatet (varma vintrar) varit likvärdigt under den energitekniska utvärderingen.

SÖDERKÖPING VÄRMELAGER

Värmepumpsprestanda 1989-91

Uppskattad systemvärmefaktor, SVF+sp
baserad på totalsystemets elförbrukning



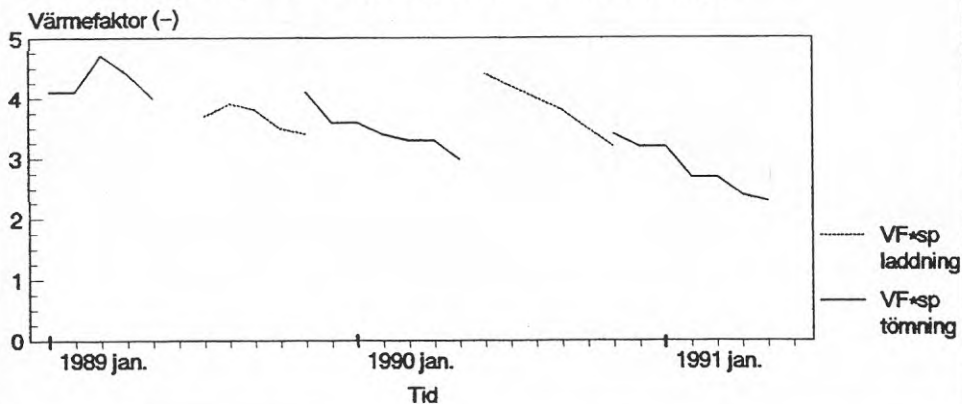
Figur 6.2. Systemets totala justerade värmefaktor

I figur 6.3 ges enbart värmepumparnas värmefaktor, VF+sp. Förhållandet mellan systemvärmefaktor och värmepumparnas värmefaktor avspeglar kringutrustningens elektriska förbrukning. Vid laddning förbrukar kringutrustningen drygt 30 % av total elektrisk förbrukning. Vid tömning är motsvarande siffra omkring 25 %. Drift av luftkonvektor har påtaglig inverkan på den högre elförbrukningen under laddning.

SÖDERKÖPING VÄRMELAGER

Värmepumpsprestanda 1989-91

Uppskattad värmefaktor, VF+sp
baserad på värmepumparnas elförbrukning



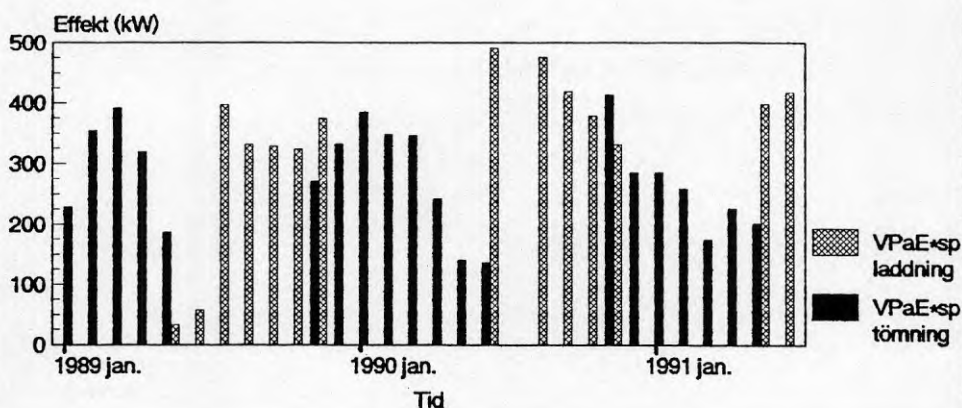
Figur 6.3. Värmepumparnas justerade värmefaktor.

Värmepumparnas avgivna justerade värmeeffekt, VP_{aE+sp}, se figur 6.4, varierar mellan 33 och 491 kW vilket ger ett medelvärde av cirka 300 kW. Medelvärdet baseras på samtliga observationer vilket sannolikt inte alltid är den bästa lösningen. Vid omställning mellan olika driftsfall, vilket ofta skett mitt i en månad, erhålls avvikande extremvärden. Detta kan bero på rutinerna för mätdatabehandling men också på att värmepumparna i inledningsskedet av varje driftcykel arbetar under föränderliga förhållanden. Därför är det lämpligt att dra slutsatser från erhållna mätdata efter att ha uteslutit extremvärden. Under laddningscykeln avger värmepumparna storleksordningen 400 kW vilket stämmer väl överens med projekterande data från kapitel 3. Avgiven värmeeffekt från värmepumparna under tömningscykeln är i storleksordningen 300 kW. Den senare siffran är cirka 100 kW under projekterat värde utan känd säker orsak.

SÖDERKÖPING VÄRMELAGER

Värmepumpsprestanda 1989–91

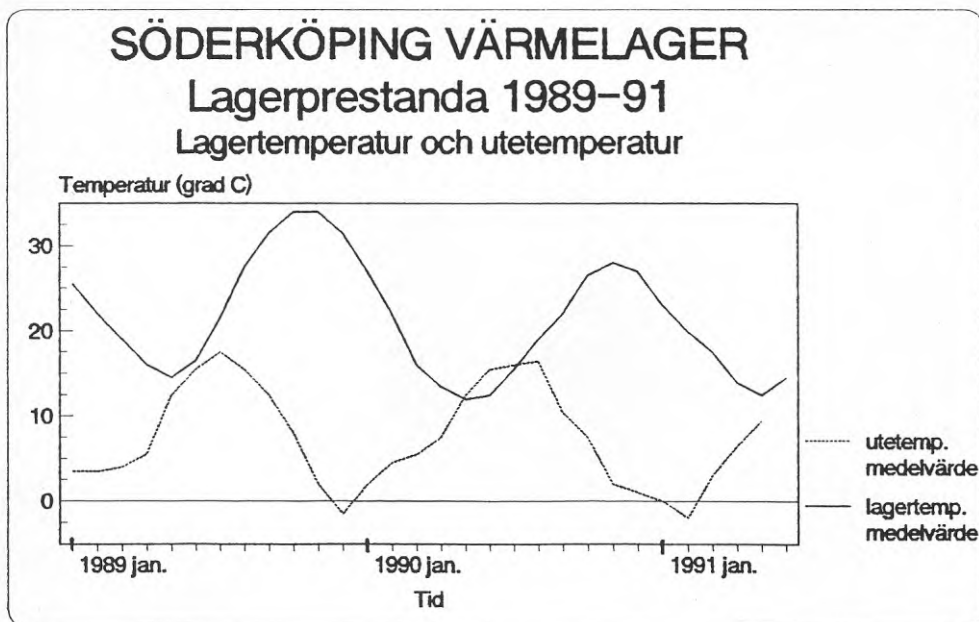
Avgiven uppskattad värmeeffekt, VP_{aE+sp}



Figur 6.4. Avgiven justerad värmeeffekt från värmepumparna.

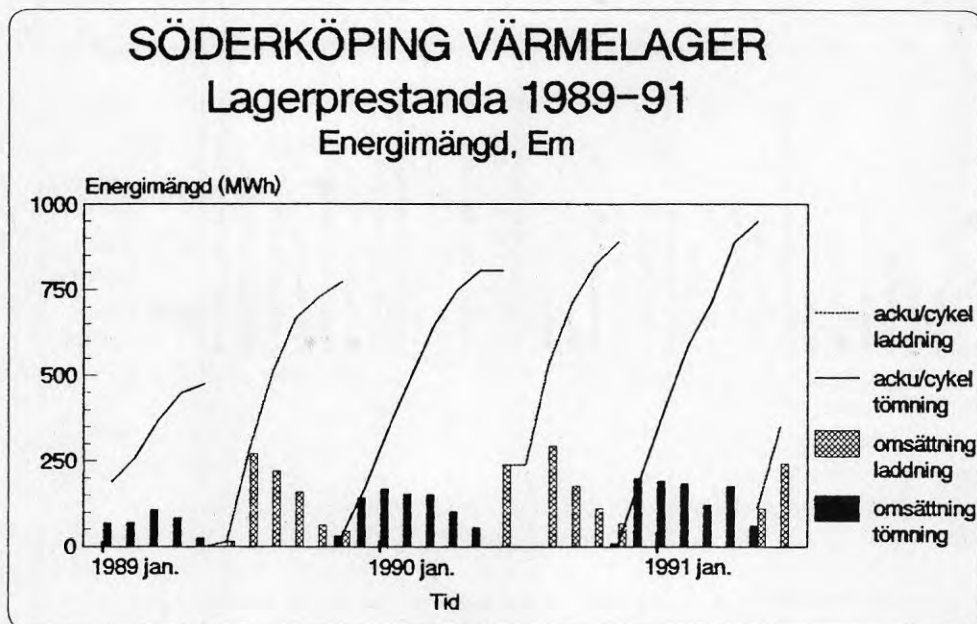
6.3.3. Lagerprestanda

Trots att vintrarna under utvärderingsperioden varit varmare än normalt har värmelagret avgivit en större energimängd till förbrukaren än projekterat. Värmelagret var projekterat att hålla en lagermedeltemperatur mellan 8 °C och 28 °C. I figur 6.5 framgår att lagertemperaturen snarare legat mellan 10 °C och 31 °C. De varma vintrarna och normala somrarna har lett till att lagret aldrig tömts på värme i den omfattning som var kalkylerat. På våren när lagret håller en temperatur av ca 10 °C och utetemperaturen sakta stiger så har det varit fördelaktigare att slå över till uteluftkylarna innan lagret tömts. Under sommaren har det sedan inte varit något problem att få in erforderlig värme för att ladda lagret fullt. Under sommaren 1990 stod lagret stilla under en månad vilket direkt syns på inlagrad energimängd. Den uteblivna inlagringsenergin motsvarar ca 3 °C lagertemperatur vilket väl stämmer överens med föregående års lagertemperatur efter avslutad inlagringsperiod.



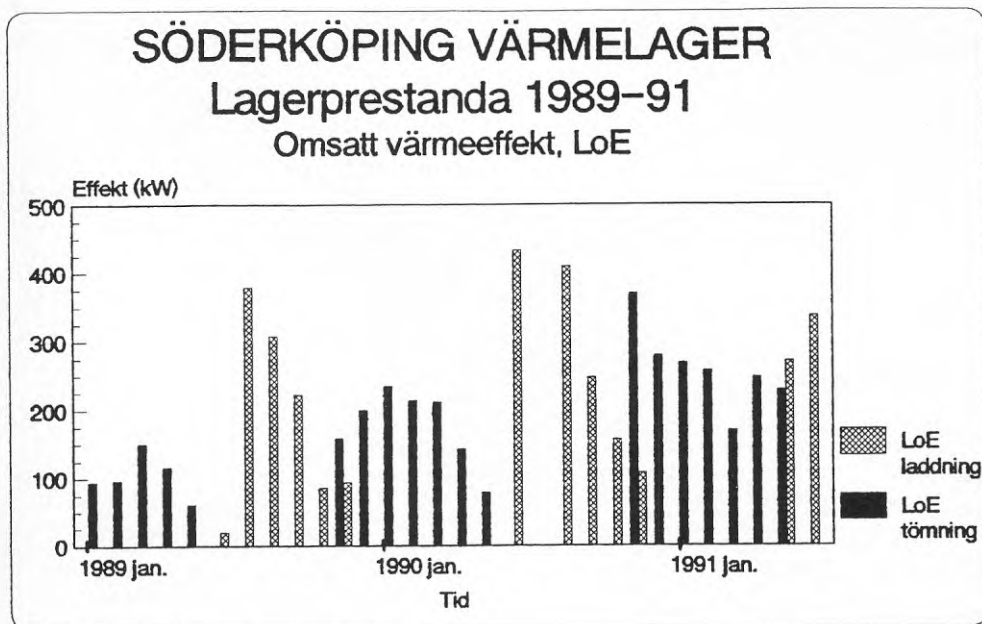
Figur 6.5. Utetemperatur och lagermedeltemperatur.

I figur 6.6 framgår att lagret laddats med ca 800 MWh under 1989 och 1990 och uttaget ur lagret varit ca 900 MWh under 1990 och 1991. Att uttaget varit större än inlagringen har resulterat i att lagret successivt fått en lägre temperatur.



Figur 6.6. Lagerprestanda, energimängder till och från lagret.

Inlagringseffekten i juni baserad på månadsmedelvärdet ligger kring 400 kW och sjunker successivt till ca 70 kW i oktober, se figur 6.7. Under september och oktober laddas lagret med underkylarna på värmepumpen som inte ger högre effekt. Att effekten sjunker under sommaren beror helt enkelt på att lagertemperaturen ökar efterhand som värme lagras. Inlagringseffekten i juni är drygt 1 kW/värmeväxlare eller 60 kW/meter värmeväxlare eller 15 W/meter slang. Effekten vid uttag varierar upp till knappt 400 kW.



Figur 6.7. Lagerprestanda, effekter till och från värmelagret.

I kapitel 7 redovisas en känslighetsanalys av ingående parametrar för värmelagrets kapacitet.

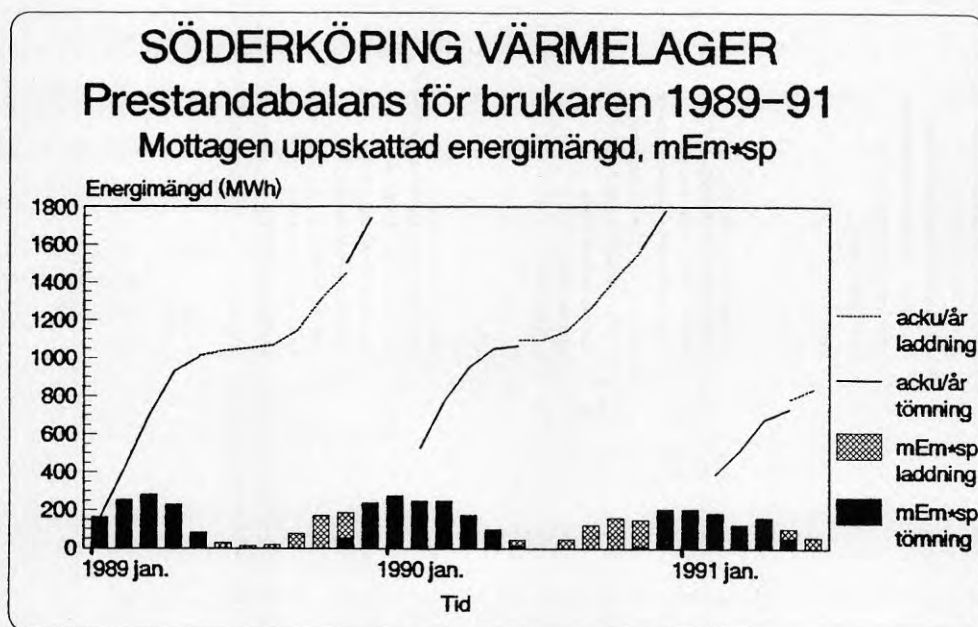
6.3.4. Energitekniska data

I figur 6.8 åskådliggörs till skolan och sporthallen levererad energimängd, mEm+sp, (exkl. olja) baserat på summering av varje månadsvärde. För kalenderår 1989 och 1990 har totalt 1 700 MWh respektive 1 800 MWh värmeenergi mottagits. Motsvarande projekterande indata, baserat på normalår var 2 050 MWh/år. Lägre verklig energiförbrukning beror troligtvis på mildare vintrar än normalår.

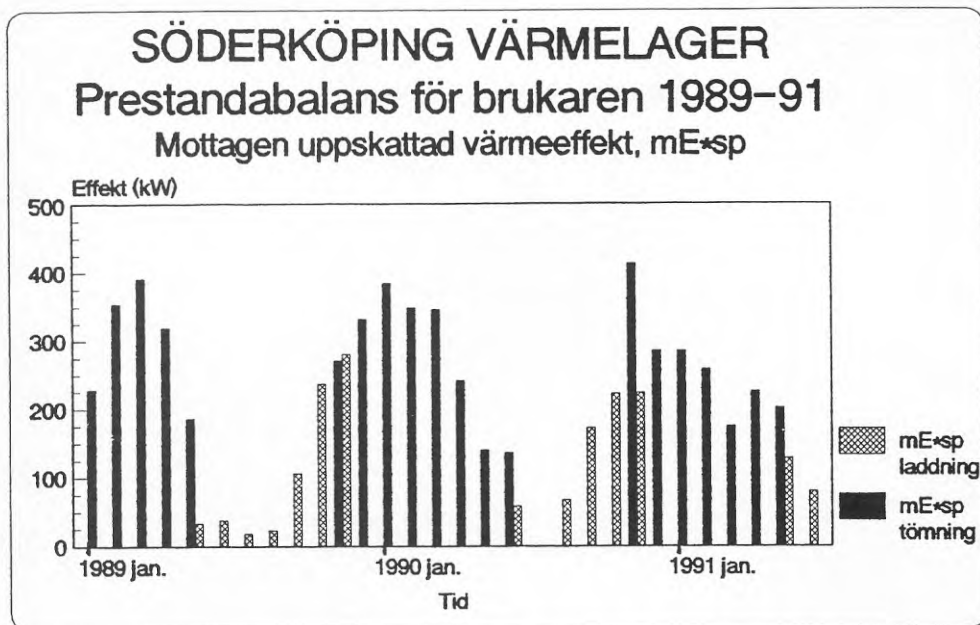
Staplarna i figur 6.8 visar levererad energimängd till förbrukaren per månad. Följande extremvärden, per månad, gäller för respektive kalenderår:

kalenderår (MWh)	maxleverans (MWh)	minleverans
1988-89	282 (mars)	13 (juli)
1989-90	277 (januari)	0 (juli avställt)
1990-91	205 (januari)	57 (juni)

Maximal, av brukaren, mottagen värmeeffekt, $mE+sp$, varierar runt 300 kW för eldningssäsongerna exkl. spetslast från oljepannor, vilket framgår av figur 6.9. Maximalt effektuttag har skett i mars månad för eldningssäsong 1988-89, i januari för 1989-90 och i november för vintersäsongen 1990-91.



Figur 6.8. Levererad justerad energimängd till Ramunderskolan och sporthallen.



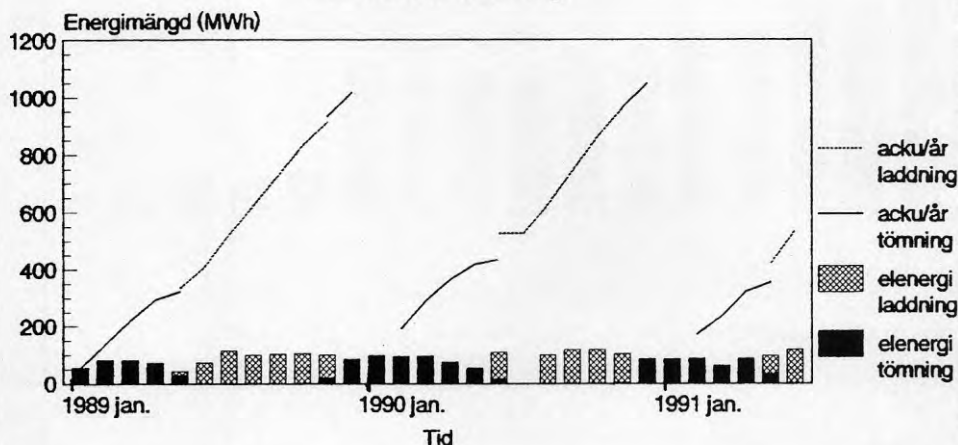
Figur 6.9. Mottagen justerad värmeeffekt av förbrukaren.

Kurvorna i figur 6.10 visar förbrukad elektrisk energi per kalenderår baserat på summering av månadsvärden. I figuren särskiljs laddningsperiod och tömningsperiod. Elförbrukningen avser inte enbart elförbrukningen i värmepumpen vid laddning respektive tömning utan totala elförbrukningen. Under 1989 förbrukades totalt 1 000 MWh elektrisk energi. Motsvarande siffra för 1990 blev 1 050 MWh. Kurvornas brantare stigning under laddningscyklerna indikerar en högre elektrisk förbrukning än under tömning av lagret. Samma indikation avspeglas i figur 6.2 och 6.3 där värmefaktorn är sämre under laddning av lagret än vid tömning av detsamma. De rasttrade staplarna visar en relativt jämn, drygt 100 MWh, elektrisk förbrukning per månad vid laddning av lagret. Vid tömning av lagret förbrukas mest elektrisk energi, i mitten av perioden, under de kalla vintermånaderna enligt de svarta staplarna. Förbrukad elektrisk energi varierar från 100 MWh (mars 1990) till 50 MWh (maj 1990).

SÖDERKÖPING VÄRMELAGER

Prestandabalans för brukaren 1989-91

Förbrukad elenergi



Figur 6.10. Förbrukad elektrisk energi

Oljeförbrukning har sammanställts i figur 6.11 per kalenderår. Siffrorna baseras på, av Söderköpings kommun uppgiven förbrukad oljemängd. Energiinnehållet i 1 m³ olja har ansatts till 10 MWh.

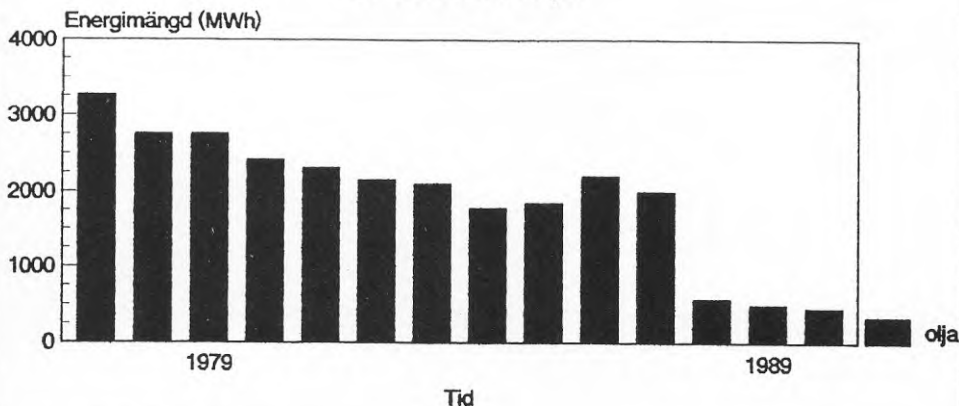
Oljeförbrukningen visar med något undantag (1986/1987) en fallande trend. Maximalt förbrukades 1977, 327 m³ olja. 1990 var förbrukningen nere i 45 m³. Det tydliga språnget mellan 1987 och 1988 indikerar tidpunkten då energianläggningen konverterades från att ha varit enbart oljeeldad till att bli kombinerat försörjd av uteluft/markvärme och oljeeldning som spetslast. Vid samma tidpunkt ökade även skolans energi- och effektbehov på grund av idrifttagande av en ny sportanläggning.

Sammanfattningsvis har oljeförbrukningen minskat med cirka 75 % från 200 m³/år före konverteringen av anläggningen till 50 m³/år efter ombyggnaden. Egentligen är reduktionen av oljeförbrukningen ännu större eftersom anläggningen dessutom utökades med sporthallens energibehov på cirka 500 MWh i samband med konverteringen av energianläggningen. Tar man hänsyn till det tillkommande energibehovet blir reduktionen av oljeförbrukningen cirka 80 %. Reducerad oljeeldning har givetvis även minskat miljöbelastningen i motsvarande grad.

SÖDERKÖPING VÄRMELAGER

Prestandabalans för brukaren 1977-90

Oljeförbrukning 10 MWh/M3 olja



Figur 6.11. Oljeförbrukning vid Ramunderskolan i Söderköping.

6.4. Slutsatser

Anläggningen har fungerat väl utan onormala störningar. Uteluftkylare, värmelager, värmepumpar och oljepannor har producerat efterfrågad energi och effekt.

Värmepumparnas axeltätning har havererat ca en gång per år. Haverifrekvensen är enligt leverantören normal men det innebär att freon (R12) av storleksordningen 10 liter per pump och gång släpps ut.

Övergång mellan laddning och tömning av lagret har gjorts manuellt av vaktmästarna. I projekteringsskedet planerades vissa datum för denna övergång, men då vaktmästarna har uppgifter om lagrets medeltemperatur, ger dessa bedömningar om lämplig tidpunkt för övergång bättre utnyttjande av lagret. Exempelvis var november månad 1990 den kallaste perioden vintern 90/91. Lagret utnyttjades då för värmeförsörjning för skolan och sporthallen eftersom vaktmästarna hade bytt från uteluftdrift till lagerdrift några veckor innan det planerade datumet.

Totalsystemets årsmedelvärmefaktor (utvunnen energi ur värmepumpar/tillförd el till hela systemet) är 1,7. Värmepumparnas årsmedelvärmefaktor är ca 2,6. Skillnaden mellan värmepumparnas värmefaktor och systemvärmefaktorn speglar ett komplext energisystem. Kringutrustning förbrukar ca 25 % av tillförd elektrisk energi. Värmelagret har aldrig tömts helt, vilket beror på onormalt varma vintrar.

Oljeförbrukningen har reducerats med 80 %, enligt projekterat mål, vilket också innebär att miljöbelastningen minskat i samma omfattning.

7. TERMISK RESPONSTEST AV MARKVÄRMELAGER

7.1. Inledning

Ett markvärmelager i lera består av en lervolym i vilken en markvärmeväxlare har anbringats. Värmetransporten till och från lagret sker via värmebärrarfluiden som cirkulerar genom markvärmeväxlaren.

Markvärmeväxlarens värmeöverföringskapacitet är en viktig parameter vid dimensionering av lagret. Ett sätt att uppskatta denna parameter är att utföra ett s.k. termisk responstest. Metoden har tidigare beskrivits för markvärmelager i berg (Mogensen 1983; Claesson et al 1985; Eskilson 1987). Grundtanken är att starta från ostörda temperaturförhållanden i marken, tillföra en konstant värmeeffekt under en period motsvarande ungefär en vecka och därvid mäta fluidtemperaturens respons. För enkla typer av markvärmeväxlare kan resultatet utvärderas med hjälp av analytiska formler. För mer komplicerade typer av markvärmeväxlare eller vid variationer i tillförd effekt är en numerisk modell av den termiska processen i och kring markvärmeväxlaren nödvändig.

Följande beskriver analysen av ett termisk responstest genomfört för markvärmelagret i Söderköping. Markvärmelagret använder en tidigare oprövad typ av markvärmeväxlare ett s.k. dubbelt U-rör. En detaljerad beräkningsmodell har framtagits för att simulera den termiska processen för detta fall.

7.2. Lervärmelagret

7.2.1. Grundläggande data

Värmelagret i Söderköping utgörs av en lervolym på ca 36.000 m³. Värmeväxlingen mellan värmebärrarfluid och mark sker via 382 s.k. dubbla U-rör, vilka når ett djup av 18 m. Det dubbla U-röret består av fyra vertikala slangar som är parvis sammankopplade i botten. De två U-rören placeras korsvis. Slangen har diametern 25 mm och är gjord av polyeten med medeldensitet (PEM, PN6,3, vägg tjocklek 2 mm, värmeledningsförmåga 0,36 W/mK). Skänkelavståndet, d.v.s. avståndet mellan två sammankopplade plaströr, är 0,5 m vid neddrivningen. Man kan dock räkna med att plaströren sjunker in något mot varandra när pålningsdonet avlägsnas. Några stickprovsmätningar har visat att skänkelavståndet varierar i lagret. Skänkelavståndets medelvärde bedöms vara 0,40-0,45 m. De dubbla U-rören är placerade i ett kvadratisk gitter om 16 gånger 24 st, så att avståndet mellan näraliggande nedstick är 2,4 m. Värmebärraren fördelas från en centrumkulvert på 48 parallellkopplade linjer med vardera 8 seriekopplade dubbla U-rör.

Mätprogrammet för värmelagret omfattade värmebärarens inlopps- och utloppstemperatur till lagret, fluidflödet, och marktemperaturer. Mätningen av marktemperaturer koncentrerades till en fjärdedel av lagret. För denna del mättes även fluidflödet i två grenlinjer.

7.2.2. Laddningsvillkor

Laddningsvillkoren utgörs av timvis uppmätta värden på inloppstemperatur och fluidflöde till hela lagret. De flödesmätningar som utfördes vid den utvalda fjärdedelen av lagret fungerade otillfredsställande och har ej använts. Inloppstemperaturens variation framgår av figur 7.6 eller 7.10. Under de första 7 dyggen tillfördes en medeleffekt på ca 53 kW. Därefter höjdes medeleffekten till ca 294 kW under 7 dygn för att sedan följas av 7 dygn med medeleffekten 54 kW. Efter denna period ökades åter effekten. Då mätningarna avslutades efter 22,5 dagar hade 79.3 MWh tillförts lagret. Fluidflödet är i stort sett konstant under responstestet. Medelvärde är 0,02395 m³/s. För att erhålla flödet i en plastslang skall detta värde divideras med 96. Uppmätt värmebalans har beräknats med utgångspunkt från uppmätta värden på in- och utloppstemperatur, fluidflöde och uppskattat värde på värmebärarfluidens värmekapacitet.

7.2.3. Markens termiska egenskaper

Lagervolymen innehåller väsentligen två skikt med olika material. Det övre skiktet, mellan 0 och 12 m, består av lera. Det undre skiktet, mellan 12 och 18 m, utgörs av siltig lera. Markens termiska egenskaper har uppskattats med utgångspunkt från uppmätt skrymdensitet och volymsvattenhalt. Från dessa värden bestämdes vattenkvoten i det övre skiktet till ca 65 % och i det undre skiktet till ca 55 %. Enligt Sundberg (1986: fig. 7.1) bör då värmeledningsförmågan i det övre skiktet ligga nära 1,0 W/mK, emedan värmeledningsförmågan i det undre skiktet med något större osäkerhet bedöms vara 1,25 W/mK. Den volumetriska värmekapaciteten uppskattas till 3,4 MJ/m³K för det övre skiktet och till 3,3 MJ/m³K för det undre skiktet.

7.2.4. Värmebärarfluid

Värmebärarfluiden består av Stal brine 130, vilket huvudsakligen utgörs av 32 % (vikt) CaCl₂. Uppgifter om fluidens hydrauliska och termodynamiska egenskaper har hämtats från VDI-Wärmeatlas (1988). För en fluid med 29,9 % CaCl₂ ges följande värden vid temperaturen 20 °C:

Densitet	1 283 kg/m ³
Specifik värmekapacitet	2,784 kJ/kgK
Värmeledningsförmåga	0,554 W/mK
Viskositet	3 510 · 10 ⁻⁶ kg/ms
Prandtl's tal	17,8

Den volumetriska värmekapaciteten, vilken ges av produkten av densitet och specifik värmekapacitet, blir $3,6 \text{ MJ/m}^3\text{K}$.

7.2.5. Värmeöverföring mellan fluid och mark

Värmeöverföring mellan fluid och mark beror av strömningsförhållandet i plastslangen, fluidens termohydrauliska egenskaper och värmemotståndet i plastslangen. Reynold's tal för strömningen är 5 570 vid temperaturen $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Detta indikerar strömning i övergångszonen mellan laminära och turbulenta förhållanden. Nusselt's tal för värmeöverföringen blir då 55, vilket ger värmeövergångsmotståndet $0,01 \text{ K/(W/m)}$ (Hellström 1991a). Plastslangens värmemotstånd är $0,08 \text{ K/(W/m)}$. Kontaktmotståndet mellan plastslangens yttervägg och omgivande vattenmättad lera antas vara försumbart. Detta ger sammantaget ett värmemotstånd R_p mellan fluiden och marken omedelbart utanför plastslangen på $0,09 \text{ K/(W/m)}$.

7.2.6. Markens begynnelsestemperatur

Marktemperaturen har mätts i 52 punkter i en fjärdedel av lagret och i 8 punkter utanför lagret. Medeltemperaturen av mätpunkterna i lagret är $13 \text{ }^\circ\text{C}$ vid responstestets start. Mätpunkterna är med avsikt placerade mittemellan närliggande markvärmeväxlare. Responstestet har föregåtts av en kortare period med måttlig laddning, vilket gör att temperaturen är något högre närmare plastslangarna. Under förutsättning att vi antar att medeleffekten är densamma som under de tre första simulerade dyggen, ca 50 kW , medför detta att lagrets medeltemperatur bör ligga ca $0,3 \text{ }^\circ\text{C}$ högre. En realistisk bedömning är att lagrets medeltemperatur är ca $13,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

7.3. Beräkningsmetod

En simuleringsmodell som ger en detaljerad beskrivning av den kopplade termiska processen med konvektiv värmetransport i de dubbla U-rören och konduktiv värmeledning i den omgivande marken har utvecklats. Modellen simulerar 8 st seriekopplade dubbla U-rör med hänsyn tagen till värmebärrarfluidens kapacitiva förmåga. Den termiska processen i marken beskrivs genom superposition av cylindersymmetriska lösningar kring varje skänkel av U-rören. Värmebalansen beräknas med en explicit finita differens metod (FDM).

Begynnelsestemperaturen i marken och värmemotståndet mellan värmebärrarfluid och marken omedelbart utanför ett plaströr ges av konstanta värden. Under den inledande känslighetsanalysen antas markens termiska egenskaper vara homogena. I den avslutande analysen antas marken bestå av ett övre skikt mellan 0 och 12 m djup och ett undre skikt mellan 12 och 18 m djup med olika termiska egenskaper.

Laddningsvillkoren utgörs av uppmätta värden på inloppstemperatur och fluidflöde. Simuleringsmodellen beräknar utloppstemperatur och värmebalans.

Erfarenheter från ett termiskt responstest i Luleå visar att en modell med liknande uppbyggnad ger god noggrannhet under den tid responstestet varar (Hellström 1991b).

7.4. Känslighetsanalys

De fria parametrar i beräkningsmodellen som kan påverka värmebalansen under responstestet är:

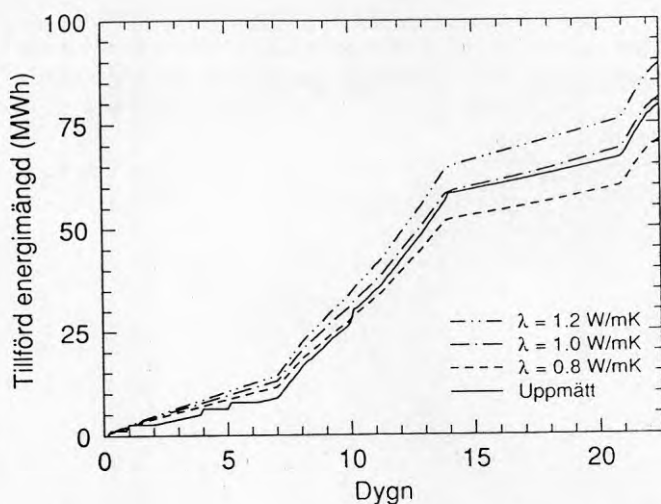
- Markens termiska egenskaper; Värmeledningsförmågan λ (W/mK) och volumetrisk värmekapacitet C (J/m³K).
- Temperaturen T_0 i värmelagret vid responstestens början.
- Värmemotståndet R_p mellan värmebärande fluiden i plastslangarna och marken omedelbart utanför dessa slangar.
- Avståndet B_u mellan U-rörens skänklar.

Det framgår av beskrivningen i avsnitt 7.2 att värdet på dessa parametrar är förknippad med en viss osäkerhet. För att utröna hur den beräknade värmebalansen påverkas av en ändring av någon av dessa parametrar har en känslighetsanalys genomförts. Markens termiska egenskaper, värmeledningsförmåga och värmekapacitet, antas då vara homogena.

Data för referensfallet:

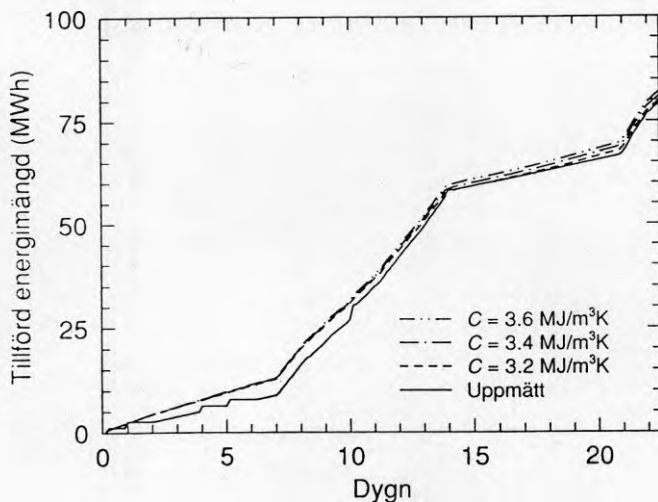
- | | |
|----------------------------------|-------------------------|
| - Värmeledningsförmåga λ | 1,0 W/mK |
| - Volumetrisk värmekapacitet C | 3,4 MJ/m ³ K |
| - Begynnelsestemperatur T_0 | 13 °C |
| - Värmemotståndet R_p | 0,09 K/(W/m) |
| - U-rörens skänkelavstånd B_u | 0,4 m |

Resultatet av känslighetsanalysen presenteras i figur 7.6. Figur 7.1 visar ackumulerad tillförd energi under responstestet vid variation av markens värmeledningsförmåga λ . Markens värmemotstånd minskar då värmeledningsförmågan ökar. Drivande temperaturdifferens är proportionell mot skillnaden mellan inloppstemperatur och markens begynnelsestemperatur. Ett minskat värmemotstånd i marken medför därför att tillförd energimängd ökar. En osäkerhet i uppskattningen av värmeledningsförmågan på 10 % ger en osäkerhet i uppskattad tillförd energimängd vid responstestens slut på 5 MWh.



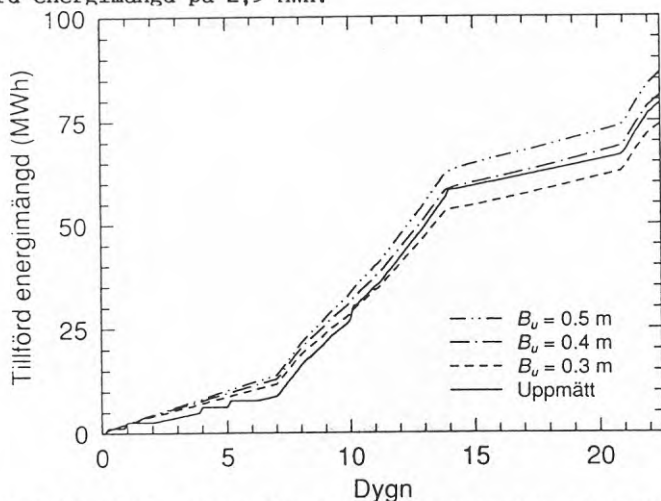
Figur 7.1. Uppmätt och beräknad tillförd energimängd i MWh som funktion av antalet dygn sedan responstestets start. Variation av markens värmeledningsförmåga λ i W/mK.

Figur 7.2 visar ackumulerad tillförd energi vid variation av markens volumetriska värmekapacitet C . Känsligheten för en ändring av denna parametrar är obetydlig.



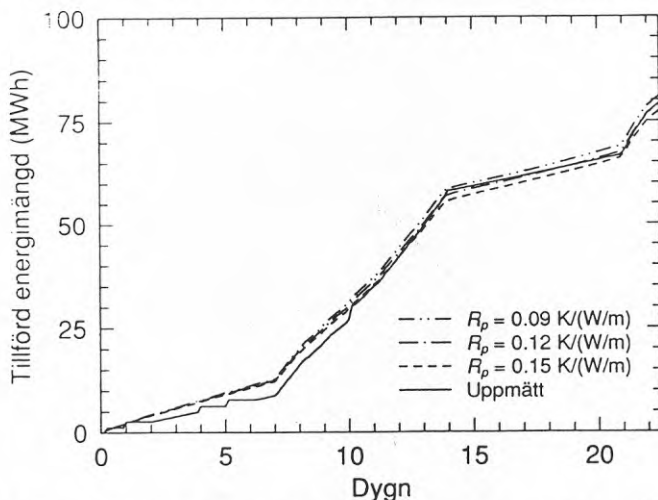
Figur 7.2. Uppmätt och beräknad tillförd energimängd i MWh som funktion av antalet dygn sedan responstestets start. Variation av markens volumetriska värmekapacitet C i J/m^3K .

Inverkan av skänkelavståndet B_u visas i figur 7.3. Ett mindre avstånd ökar den termiska influensen mellan skänklarna, vilket medför försämrade värmeöverföring. En osäkerhet på 0,05 m ger en osäkerhet i tillförd energimängd på 2,5 MWh.



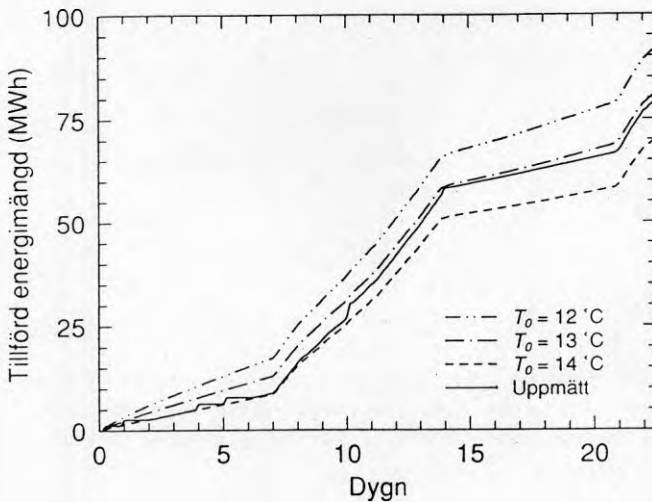
Figur 7.3. Uppmätt och beräknad tillförd energimängd i MWh som funktion av antalet dygn sedan responstestets start. Variation av U-rörens skänkelavstånd B_u i m.

Uppskattningen av värmemotståndet R_p (K/(W/m)) mellan värmebärarfluid och marken omedelbart utanför ett plaströr bedöms vara relativt god. Enligt figur 7.4 har ett fel i denna parameter liten betydelse.



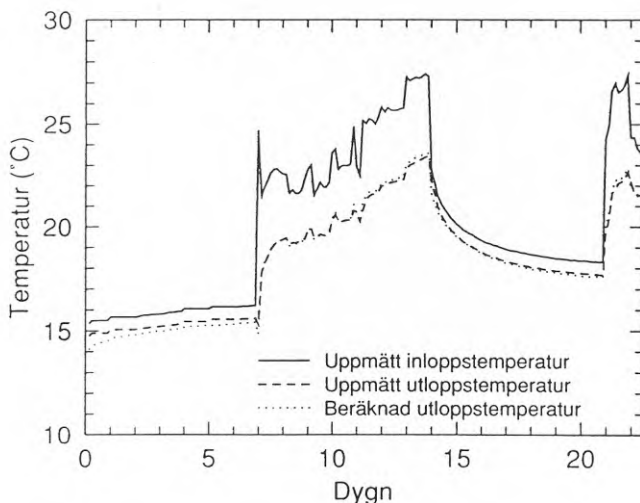
Figur 7.4. Uppmätt och beräknad tillförd energimängd i MWh som funktion av antalet dygn sedan responstestets start. Variation av värmemotståndet R_p i K/(W/m) mellan värmebärarfluid och marken omedelbart utanför ett plaströr.

Markens begynnelsestemperatur påverkar tillgänglig drivande temperaturdifferens för värmeöverföringen, så att en högre temperatur ger lägre tillförd värmemängd. Känsligheten för denna temperatur visas i figur 7.5. En osäkerhet i uppskattningen på $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ger en osäkerhet i tillförd energimängd på 5 MWh.



Figur 7.5. Uppmätt och beräknad tillförd energimängd i MWh som funktion av antalet dygn sedan responstestetets start. Variation av marktemperatur T_0 i $^{\circ}\text{C}$ vid starten av responstestet.

Figur 7.6 visar uppmätt inlopps- och utloppstemperatur samt beräknad utloppstemperatur för referensfallet. Under de första dygnen sker en viss insvängning av den beräknade utloppstemperaturen mot den uppmätta utloppstemperaturen. Den beräknade utloppstemperaturen fortsätter sedan att ligga något under den uppmätta, vilket kan tyda på att markens begynnelsestemperatur för referensfallet är något för låg.



Figur 7.6. Uppmätt inlopps- och utloppstemperatur samt beräknad utloppstemperatur i °C som funktion av antalet dygn sedan responstestetets start. Data för referensfallet ges i avsnitt 7.4.

Känslighetsanalysen visar att osäkerheten i värmeledningsförmåga, begynnelsestemperatur och skänkelavstånd har störst betydelse. Osäkerheten vad beträffar volumetrisk värmekapacitet och värmemotståndet mellan värmebärarfluid och mark har liten betydelse.

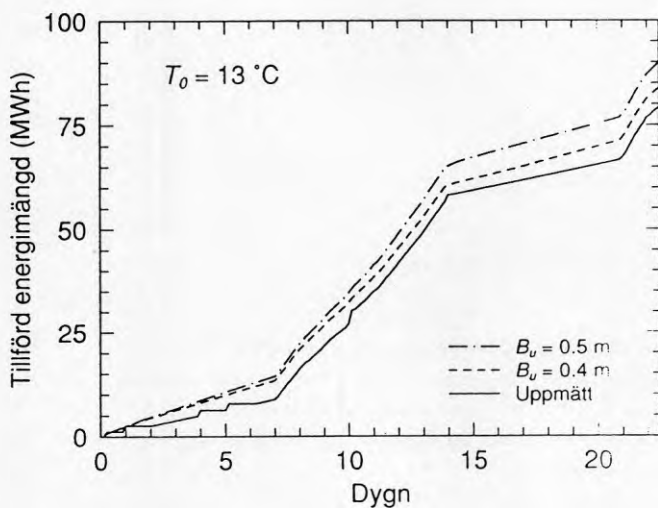
7.5. Stratifierad mark

Marken i lagervolymer består väsentligen av två skikt med olika termiska egenskaper. Det övre skiktet ligger mellan 0 och 12 m djup och det undre skiktet mellan 12 och 18 m.

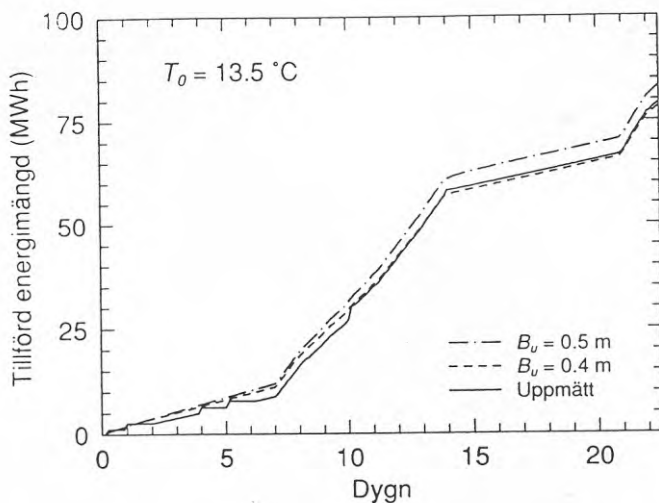
Grunddata för fallet med stratifierad mark:

- | | |
|---|-------------------------|
| - Värmeledningsförmåga, övre skikt | 1,0 W/mK |
| - Värmeledningsförmåga, undre skikt | 1,25 W/mK |
| - Volumetrisk värmekapacitet, övre skikt | 3,4 MJ/m ³ K |
| - Volumetrisk värmekapacitet, undre skikt | 3,3 MJ/m ³ K |
| - Värmemotståndet R_p | 0,09 K/(W/m) |

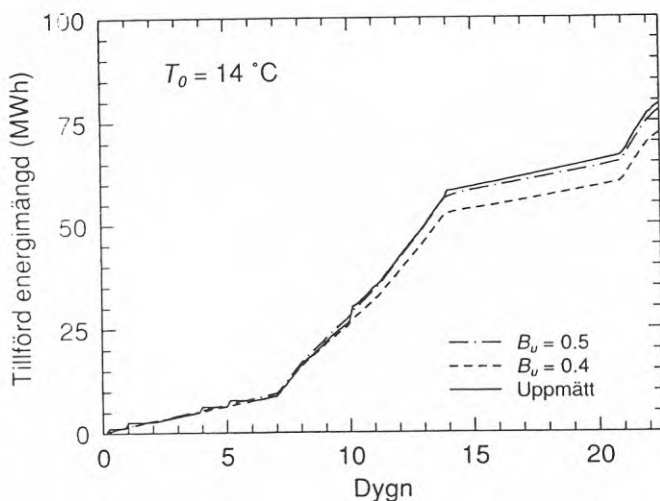
Enligt känslighetsanalysen har markens begynnelsestemperatur T_0 och plastslangarnas skänkelavstånd B_u stor inverkan på beräkningsresultatet. 6 fall med $T_0=13, 13,5$ och 14 °C samt $B_u=0,4$ och $0,5$ m har simulerats, se figur 7.7-7.9. Den bästa överensstämmelsen erhålls för $T_0=13,5$ och $B_u=0,4$, vilket närmast motsvarar uppskattade värden av dessa parametrar. Fluidtemperaturer för detta fall visas i figur 7.10.



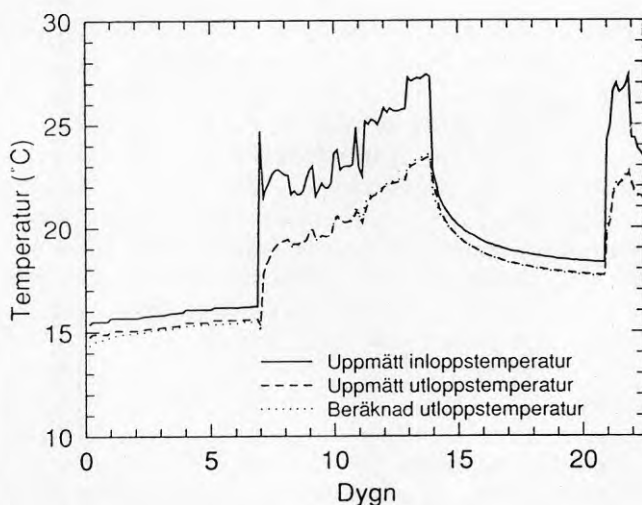
Figur 7.7. Uppmätt och beräknad tillförd energimängd i MWh som funktion av antalet dygn sedan responstestets start. Temperaturen T_0 vid responstestets start är 13 °C. U-rörens skänkelavstånd B_u är $0,4$ och $0,5$ m. Övriga data enligt avsnitt 7.5.



Figur 7.8. Uppmätt och beräknad tillförd energimängd i MWh som funktion av antalet dygn sedan responstestets start. Temperaturen T_0 vid responstestets start är $13,5 \text{ }^\circ\text{C}$. U-rörens skänkelavstånd B_u är 0,4 och 0,5 m. Övriga data enligt avsnitt 7.5.



Figur 7.9. Uppmätt och beräknad tillförd energimängd i MWh som funktion av antalet dygn sedan responstestets start. Temperaturen T_0 vid responstestets start är $14 \text{ }^\circ\text{C}$. U-rörens skänkelavstånd B_u är 0,4 och 0,5 m. Övriga data enligt avsnitt 7.5.



Figur 7.10. Uppmätt inlopps- och utloppstemperatur samt beräknad utloppstemperatur i °C som funktion av antalet dygn sedan responstestets start. Temperaturen T_0 vid responstestets start är 13,5 °C. U-rörens skänkelavstånd B_u är 0,4. Övriga data enligt avsnitt 7.5.

7.6. Slutsatser

Ett termiskt responstest har utförts på markvärmeverklaren och därefter utvärderats med en numerisk modell. Känslighetsanalysen visar att den mest betydelsefulla osäkerheten gäller lagrets begynnelsestemperatur, lagrets värmeledningsförmåga och U-rörens skänkelavstånd. Utveckling av ett mätinstrument där värmeledningsförmågan kan mätas insitu är därför betydelsefull. En installationsmetod som "garanterar" ett visst skänkelavstånd är också väsentlig. Överensstämmelsen mellan uppmätt och beräknad värmebalans är god för de fall då dessa parametrar ligger närmast uppskattade värden. Osäkerheten i beräknad värmebalans bedöms vara maximalt 10 %. Pga den goda överensstämmelsen mellan simuleringar och verkligt utfall kan enklare beräkningsprogram utvecklas för förstudier och förprojekteringar.

8. GEOTEKNISK PÅVERKAN

8.1. Geotekniskt mätprogram

8.1.1. Referensmaterial

Under en förstudie av värmelagret (Rydell mfl 1984) utfördes 1983 noggranna fältundersökningar för att kunna bestämma lämplig placering av ett värmelager. Dessa omfattade trycksondering, viktsondering, porvattentrycksondering samt upptagande av ostörda prover med kolvprovtagare. Värdena representerar också utgångsvärden eller opåverkade förhållanden. Resultatet av referensmätningen redovisas i 8.2.1. Eftersom en påverkan från omgivningen successivt pågår togs prover, förutom i lagret, även i en punkt utanför lagret. Meningen är att kunna studera påverkan på leran i och strax utanför lagret som härrör från temperaturvariationerna p.g.a värmelagring och värmeuttag. Andra yttre omständigheter ingår inte i denna eventuella förändring.

8.1.2. Mättillfällen

Den första geotekniska undersökningen som ligger till grund för fortsatta mätningar gjordes 1983, se ovan. Efter att slangarna installerats utfördes mätomgång två (87-04). Lagret hade då ännu inte tagits i drift vilket innebär att ingen temperaturpåverkan hade kunnat ske.

Under nästföljande tre år har fem mätomgångar genomförts. Till att börja med efter en laddning och uttag (88-06) samt efter två laddningar och uttag (89-05). Vid dessa mättillfällen var marktemperaturen i stort sett samma som naturlig marktemperatur. Mätprogrammet gjordes vid detta tillfälle om då det bedömdes som intressant att utföra provtagningar dels när lagret var fulladdat (ca 30 °C), dels när lagret var urladdat och således hade normal marktemperatur. Nästföljande mättillfällen utfördes därför efter tre laddningar och två uttag (89-10), efter tre laddningar och uttag (90-06) och efter fyra laddningar och tre uttag (90-11). Vid det sistnämnda tillfället gjordes även en referensmätning i en punkt utanför lagret. Marksättningen har även mätts efter fyra laddningar och uttag (91-05).

Porvattentryck har uppmätts kontinuerligt med start i samband med den första uppladdningen.

8.1.3. Studerade parametrar, mätmetoder och mätpunkter

De parametrar som studerats är skjuvhållfasthet uppmätt med vingborr och från rutinanalys på kolvborrprover. Från rutinanalysen bestäms även densitet, vattenkvot, finlekstal och sensitivitet. CRS-försök (Constant Rate of Strain) har genomförts på kolvborrproverna varur förkonsolideringstryck och kompressionsmodul studerats. Sättningar har

följts med hjälp av bälgslangmätningar. Porvattentryck har mätts med BAT-mätare.

Provtagningar, mätningar av porvattentryck och sättningar har utförts i lagret, 8 meter utanför lagret och i en referenspunkt. Prover har tagits från flera nivåer i varje punkt, porvattentrycket har mätts på två nivåer i varje punkt och sättningarna varje meter från lagrets överyta till lagrets underkant.

I samband med projekteringen av värmelagret bestämdes aktuell plats för värmelagret av läget för sporthallen. I ett sent skede bestämdes att sporthallen skulle flyttas något vilket möjliggjorde att lagret kunde placeras där lerdjupen var mäktigare. I och med platsbytet ligger den första provtagningen (som ska utgöra referens före lagerbyggnad) strax utanför lagret. Provtagningen som utfördes efter slanginstallationen gjordes också utanför lagret, då det bedömdes olämpligt att ta prover i lagret med risk för att skada slangar. Dessutom är den horisontella variationen i ett lerområde relativt liten.

Då de genomförda provtagningarna inte uppvisade någon förändring bestämdes att de efterföljande mätpunkterna trots allt (utom referensmätningen vid det sista mättillfället) skulle utföras i lagret inom ett område som är ca 30 m² (Lagrets yta är 2 000 m²). En av orsakerna till att ta prover i lagret var att temperaturspridningen utanför lagret var så begränsad att om proverna togs på ett säkert avstånd från yttersta slangraden kunde inga större förändringar förväntas. Varje sådan mätpunkt i lagret ligger mitt emellan fyra värmeväxlare för att minimera risken för att slangar skulle kunna skadas av mätinstrumentet. Leran har givetvis utsatts för en större påverkan närmast slangen där lerans temperatur kan bli upp till 40 °C jämfört med temperaturen mitt emellan slangarna som uppnår en temperatur av ca 30 °C. Det är emellertid svårt att utföra någon provtagning intill slangen.

Sensitivitet, förkonsolideringstryck, kompressionsmodul och skjuvhållfasthet bestämd med kolvorrprovtagning bedöms påverkas av omgivningstemperaturen efter upptagandet av proverna och fram tills laboratoriebestämningen är utförd. Resultaten av dessa provtagningar är därför ej helt pålitliga. Skjuvhållfasthet och sensitivitet har också bestämts insitu (direkt i jorden) och resultaten av dessa mätningar bedöms vara tillförlitligare.

8.2. Resultat av mätdatainsamling

Diagram för varje parameter har uppritats. I ett och samma diagram finns alla mättillfällen med för att enkelt kunna se om parametern har förändrats. Dessa diagram finns redovisade i bilaga 2. I nedanstående text redogörs för det väsentligaste från diagrammen.

8.2.1. Ursprungliga förhållanden - referensmätning 1983.

Jorden består överst av en meter torrskorpelera som följs av ca 2 m sulfidfläckig lera. Under detta innehåller leran siltskikt som ökar i antal och tjocklek med djupet för att övergå helt i silt och sand ungefär 19 meter under markytan. Leran är överkonsoliderad, ca 10 - 20 kPa. Skjuvhållfastheten är ca 15 kPa närmast under torrskorpan, ökar med ca 0,5 kPa/m under de nästföljande 10 metrarna (ca 13 meter under markytan) och är därunder ca 20 kPa ner till 19 m som är den understa provtagningsnivån.

Skrymdensiteten är ca 1,5 t/m³ under torrskorpan och ökar med djupet till ca 1,8 t/m³ 18 meter under markytan. Vattenkvoten ligger kring 70 % ner till ca 13 meter under markytan. Under denna nivå får silt- och sandskikten en allt större betydelse vilket medför att vattenkvoten successivt sjunker från 70 % ner till 40 % 18 meter under markytan. Kompressionsmodulen ligger mellan 200 och 400 kPa ner till 13 meter under markytan. Vid den understa mätnivån är modulen väsentligt högre ca 1 300 kPa.

8.2.2. Förhållanden efter slanginstallation

Inga säkra förändringar har observerats. Inga relevanta värden på sättningar och porvattentryck finns mellan dessa mättillfällen.

8.2.3. Förhållanden under lagrets användning 1987 - 1991

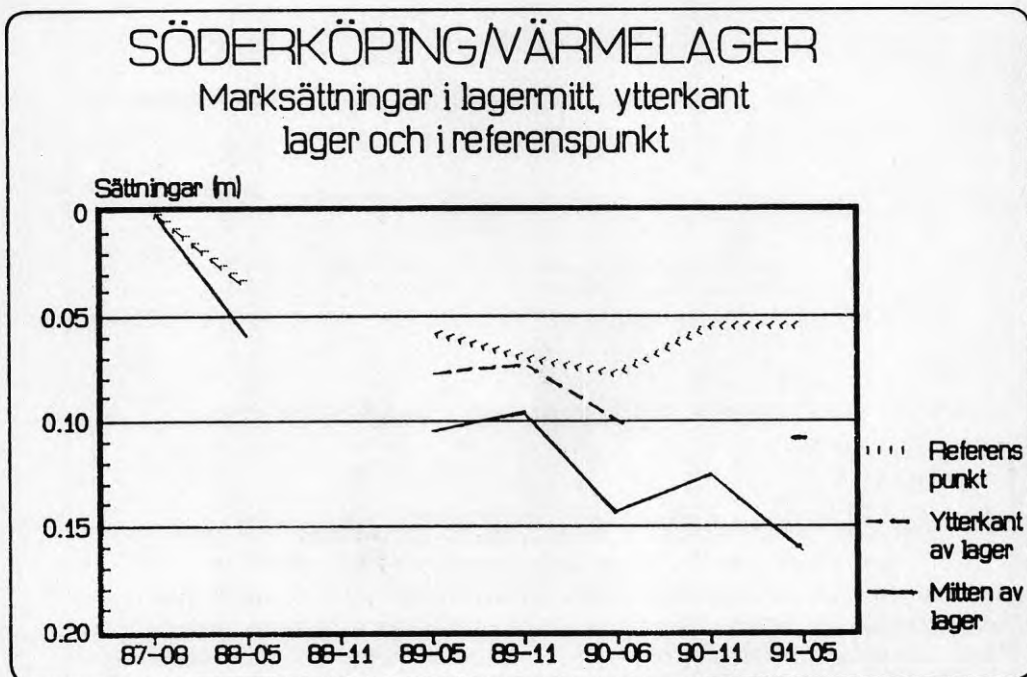
Förändringar i förhållandena under lagrets användning beror på den belastning som temperaturvariationerna är orsak till. Temperaturförändringarna kan påverka en eller flera parametrar som sedan i sin tur påverkar andra. Temperaturen i marken strax utanför en slang har varierat mellan maximalt 40 °C och ca 5 °C. Medeltemperaturen i lagret har legat mellan 32 °C och 10 °C. I en punkt 8 meter utanför lagret syns ingen temperaturfluktuation men temperaturen är ca 1 °C högre än i referenspunkten (7 °C).

En jämförelse mellan CRS-försöken visar att förkonsolideringstrycken varit relativt konstanta med tiden. Förkonsolideringstrycken är något högre efter inlagringsperioden än efter uttagsperioden men skillnaderna är inte signifikanta. Kompressionsmodulen som också erhålls från CRS-försöken uppvisar inte någon förändring.

Skjuvhållfastheten har bestämts i laboratorium på kolvborrprover och in-situ med vingborr. Skjuvhållfastheten uppmätt med vingborr bedöms sjunka något med ökad temperatur. Skjuvhållfastheten uppmätt på kolvborrprover visar ingen förändring.

Skrymdensiteten och vattenkvoten uppvisar ingen förändring.

Bälgslangsättningsmätningarna visar att lagret komprimeras, d.v.s. att marken sätter sig då lagertemperaturen sjunker och att marken hävs då lagertemperaturen ökar, se figur 8.1. Totalt sett kan en kvarstående sättning konstateras. Efter tre inlagrings- och uttagsperioder har markytan i en punkt i lagrets mitt sjunkit ca 16 cm. I ytterkanten av lagret har markytan sjunkit ca 10 cm. Även i referenspunkten har markytan sjunkit ca 5 cm.



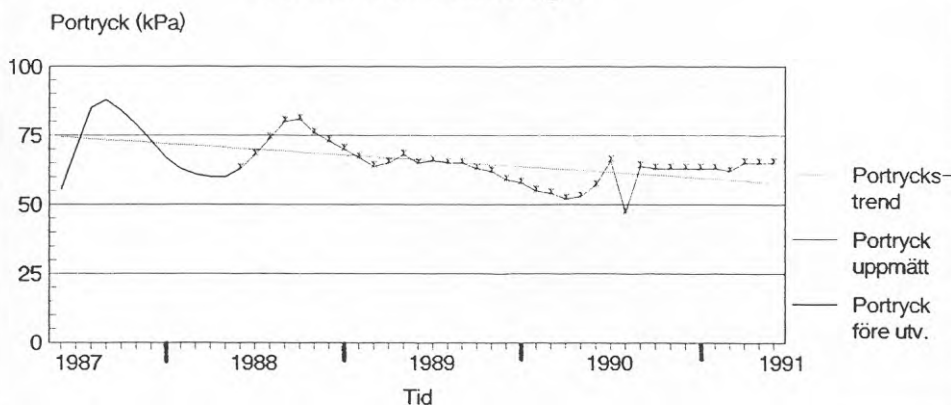
Figur 8.1. Sättningar med tiden i en punkt i lagrets mitt, vid lagrets kant och referenspunkt.

Porvattentrycken visas i figur 8.2. Fram till 88-06 är värdena bedömda p.g.a. av problem med mätdatansamlingssystemet. Därefter har systemet fungerat ganska bra. En bedömning av ursprungligt porvattentryck är att detta uppgick till ca 55 kPa vilket sedan ökade kraftigt under första laddningssäsongen till ca 90 kPa för att sjunka under nästföljande uttagsperiod till ca 60 kPa. Bedömningen av det ursprungliga porvattentrycket baseras bl.a. på trycket i en referenspunkt utanför lagret. Andra säsongen när mätvärden finns tillgängliga ökade porvattentrycken till ca 80 kPa och sjönk under uttagsperioden till ca 65 kPa. Under tredje laddningsperioden ökade trycken något och sjönk under uttagsperioden till ca 55 kPa. Fjärde säsongen har inletts med en porvattentrycksökning till ca 65 kPa. Därefter har något outrett hänt med mätsystemet. Porvattentrycket sjönk momentant och ligger därefter konstant.

SÖDERKÖPING VÄRMELAGER

1987-91

Portryck
i centrum av värmelager



Figur 8.2. Porvattentryck i mitten av lagret som funktion av tiden.

De prover som tagits i leran 8 meter utanför lagret uppvisar ingen påverkan. Porvattentrycken i samma punkt är ca 5-10 kPa högre än i referenspunkten (ungefär 55 kPa). Något liknande porvattentryckets cykliska variation som sker i lagret har inte observerats utanför lagret. Ingen sättning utöver den som sker i referenspunkten har observerats 8 meter utanför lagret.

8.3. Utvärdering av mätresultat

För att kunna dra generella slutsatser krävs en längre uppföljning än tre år. Förändringar i de geotekniska egenskaperna är en långsam process vilket inte minst visats här. Det är således mycket svårt att dra slutsatser om de förändringar som påvisats är en fortgående process som kan få följdverkningar i framtiden, eller om de successivt kommer att avta eller helt enkelt återgå till ursprungliga värden. Många av de förändringar som observerats ligger inom felmarginalen för respektive mätmetod. Därför är det också svårt att säga att en förändring verkligen har skett eller om den ska hänföras till brister i mätmetoden.

Nedanstående slutsatser avser de förändringar som hittills observerats. Eventuellt kan andra förändringar uppkomma längre framåt i tiden.

8.3.1. Förkonsolideringstryck och kompressionsmodul

Förkonsolideringstrycket anger vilket tryck som leran tidigare varit belastad med. Leran vid värmelagret i Söderköping är något överkonsoliderad vilket innebär att förkonsolideringstrycket, d.v.s. det tryck som leran tidigare varit utsatt för är större än det tryck som leran utsätts för idag. Leran kan därför utsättas för belastning upp till förkonsolideringstrycket utan att stora sättningar erhålls. Kompressionsmodulen anger hur stora sättningar som erhålls vid belastning utan horisontell utvidgning.

Förkonsolideringstrycket och kompressionsmodulen uppvisar ingen signifikant förändring varken med tiden eller mellan uppladdat och urladdat lager.

Det vore logiskt att kompressionsmodulen hade ökat något till följd av den belastning som leran utsätts för i form av temperaturvariationer som ger upphov till porvattentryckbelastningar. Detta har dock inte hittills observerats. Eftersom ingen förändring observerats skulle det kunna bero på att leran fortfarande är överkonsoliderad och förkonsolideringstrycket således ännu inte uppnåtts.

Förkonsolideringstrycket ökar då porvattentrycket ökar över det normala värdet (förkonsolideringstrycket = effektivspänningen - porvattentrycket). Förkonsolideringstrycket bör inte kunna sjunka förrän porvattentrycket sjunkit till ett värde som understiger det ursprungliga värdet motsvarande överkonsolideringsgraden.

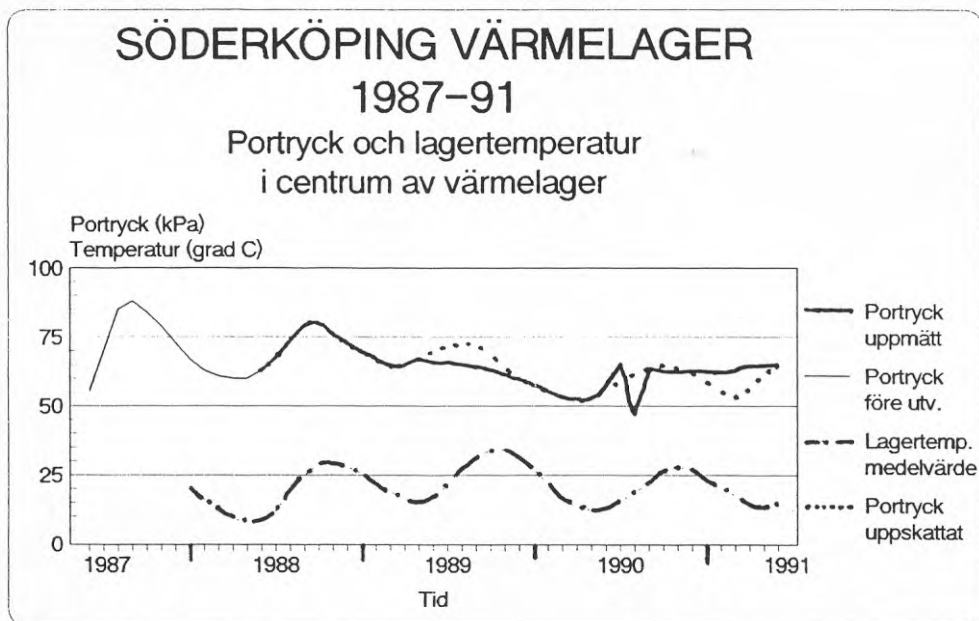
8.3.2. Porvattentryck

I figur 8.3 finns dels uppmätta porvattentryck, dels bedömda porvattentryck mot bakgrund av uppmätta värden och ett troligt beteende hos porvattentrycket. Porvattentrycken visar en tydlig tendens till att öka omedelbart när laddningen börjar vilket härrör från vattnets expansion vid höjd temperatur. Vattnets transporthastighet i lera är så liten att porvattentrycken inte hinner jämnas ut. Så fort som intensiteten i inlagringen minskar, september till november, slutar porvattentrycken att öka. En del vatten hinner då troligtvis att via siltskikten dräneras bort. Porvattentrycken sjunker sedan omedelbart efter att inlagringen avslutats och sjunker ytterligare så länge som ett rejält uttag pågår. Vattnet minskar i volym vid temperatursänkningen och porvattentrycken sjunker därför. En sugeffekt uppstår och en del vatten bedöms sugas tillbaka via siltskikten. När värmeuttaget minskar under våren upphör porvattentrycken att minska. Det finns också en tendens till att porvattentrycken successivt närmar sig ursprungliga värden, vilket framgår av kurvan över porvattentryckstrend.

I värmelagret i Kungsbacka (Rhen 1988) erhöles vid något tillfälle en

kraftig porvattentrycksförändring som där antogs kunna bero på att sprickor uppstår i leran och hydraulisk kontakt med andra tryck uppstår. I slutet av mätperioden har portrycket ett outrett beteende som även i detta fall skulle kunna förklaras på detta sätt. Det bedöms även troligt att ett fel uppstått i mätsystemet.

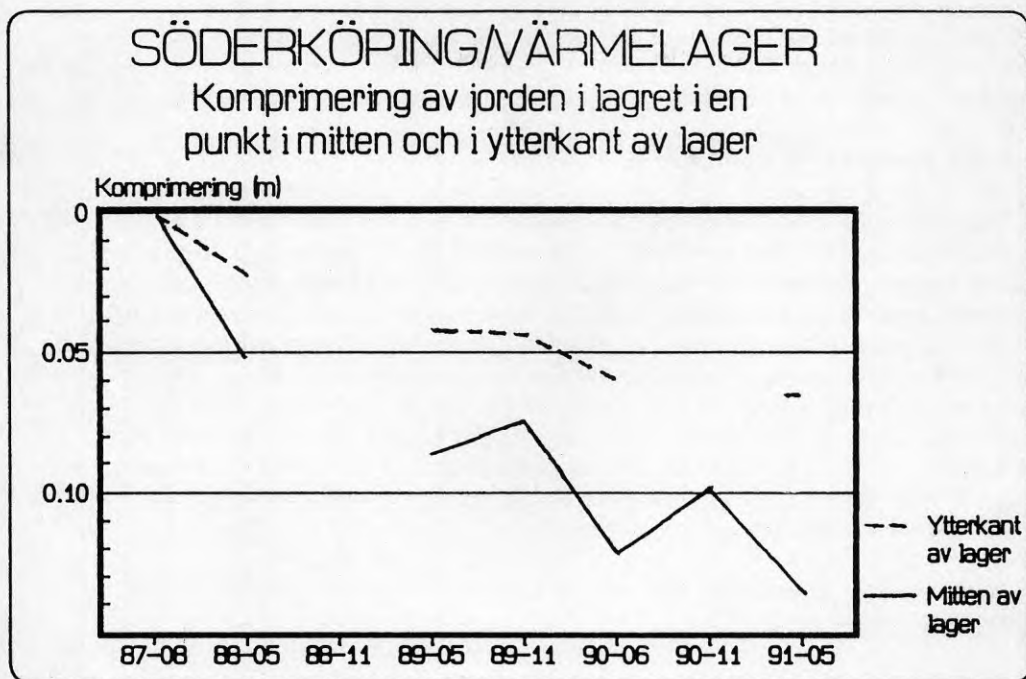
I Kungsbacka har porvattentrycken också ökat vid inlagring och sjunkit vid uttag. En väsentlig skillnad är dock att portrycken i Kungsbacka hela tiden pendlar kring referensvärdet medan i Söderköping ligger portrycket hittills och pendlar ovanför ursprungsvärdet. Antagligen är det högre temperaturspannet i Söderköping (7 - 32 °C mot 7 - 14 °C) orsak till detta.



Figur 8.3. Uppmätta och bedömda porvattentryck samt marktemperatur i en punkt i lagrets mitt som funktion av tiden.

8.3.3. Sättningar

Sättningen i referenspunkten utanför lagret sker huvudsakligen i lagren under bälgslangens bottenpunkt vilket måste härröra från en regional sättning. Ett par cm sättning härrör också från kompression i sandlagret ovanför leran. Detta framgår av bilaga 2. Genom att dra bort dessa sättningar från den totala sättningen kan man säga att lerlagret som mest har komprimerats ca 13 cm härrörande från värmelagringpåverkan, mellan sommaren 1987 innan laddningen av lagret påbörjades och våren 1991 efter urladdningsperioden, se figur 8.4. I ytterkanten på lagret uppgår motsvarande komprimering till ca 6 cm:



Figur 8.4. Total sättning av markytan samt kompression av marken i värmelagret som funktion av tiden.

Det bör dock observeras att leran på aktuell plats är överkonsoliderad och att sättningen troligtvis hade blivit större om marken varit normalkonsoliderad. Om porvattentrycket återgår och understiger ursprungligt tryck bedöms sättningarna därefter öka.

I Kungsbacka är leran också överkonsoliderad. Där uppmättes en sättning av ca 3 cm i lagret. Sättningarna i Söderköping är betydligt större vilket bedöms bero på den högre temperatur och högre temperaturspann som föreligger där.

8.3.4. Skjuvhållfasthet

Skjuvhållfastheten bestämd på kolvorrprover visar ingen förändring utanför mätnoggrannheten. Värdena bedöms dessutom vara osäkra eftersom leran innehåller många tunna siltskikt som påverkar bestämningen i laboratoriet. I Kungsbacka har inte heller skjuvhållfastheten förändrats i lagrets övre del medan den ökat något i lagrets undre del. Något motsvarande har inte kunnat påvisas i Söderköping.

Skjuvhållfastheten uppmätt med vingborr har sjunkit något vid ökad

temperatur. Det är dock oklart om hållfasthetsminskningen beror på temperaturhöjningen i leran eller det cyklade temperaturförloppet. Det finns också en möjlighet att skjuvhållfastheten redan från början varit något högre i punkten utanför lagret, där det första provet togs, än vad hållfastheten var i lagret där proverna sedan tagits.

8.3.5. Densitet och vattenkvot

Någon tendens till förändring av vattenkvot och densitet har inte kunnat påvisats. Porvattentrycket ökar mer vid inlagring av värme än vad trycket minskar vid värmeuttag. Den kvarstående portryckshöjningen borde dränera ut porvattnet via silt- och sandskikten i leran och lett till en minskad vattenkvot. En lägre vattenkvot skulle också resultera i en högre densitet. Dessa förväntade förändringar har dock ej påvisats, vilket kan bero på att tre år är en för kort utvärderingsperiod för geotekniska parametrar. En annan aspekt är att lagret som mest har sjunkit 13 cm vilket medför att en vattenvolym av $0,13 \text{ m}^3/\text{m}^2$ dränerats bort från lagret. Detta motsvarar en förändring av vattenkvoten på mindre än 1 % vilket inte är mätbart.

Värmelagret i Kungsbacka har inte heller haft någon förändring i vattenkvot och densitet.

8.3.6. Förändringar utanför markvärmelagret.

Markens normala temperatur är ca $7 \text{ }^\circ\text{C}$. Temperaturen i en punkt 8 meter utanför lagret är ca $8 \text{ }^\circ\text{C}$. Förändringar som kan uppstå utanför lagret kan dels bero på den lokala temperaturhöjningen, dels på den porvattentryckshöjning som erhålls från verksamheten i lagret.

De parametrar som ej uppvisat någon signifikant förändring i lagret (förkonsolideringstryck, kompressionsmodul, skjuvhållfasthet, densitet och vattenkvot) har inte heller förändrats i marken utanför lagret. Porvattentryckets cykliska pendlning i lagret har inte observerats utanför lagret. Däremot kan noteras att porvattentrycket ligger konstant 5-10 kPa högre i punkten 8 meter utanför lagret än trycket i referenspunkten. Markytans nivå har inte förändrats mer i punkten 8 meter utanför lagret än i referenspunkten. Eftersom sättningarna bedöms vara kopplad till temperaturen är det ett förväntat resultat.

8.4. Slutsatser

För att utvärdera den påverkan som lagret medför på geotekniska parametrar, är 3 års utvärdering i underkant. Någon parameter har förändrats snabbt och syns direkt, men för att kunna förklara dessa förändringar krävs en längre uppföljningstid. De flesta parametrar förändras dock långsamt och det är ofta svårt att avgöra om det verkligen är en förändring eller felmarginaler inom provtagnings- och laboratoriemetodiken eller helt enkelt naturliga variationer.

Förkonsolideringstryck och kompressionsmodul uppvisar ingen förändring, vilket delvis kan bero på att lera är överkonsoliderad och förkonsolideringstrycket inte uppnåtts vid belastningen för lagerverksamheten.

Skjuvhållfastheten uppmätt insitu, med vingborr, har sjunkit något med ökad lagertemperatur.

Porvattentrycket ökar kraftigt då lagertemperaturen stiger och minskar då temperaturen sjunker. Trycket pendlar kring ett värde som fortfarande är högre än ursprungligt porvattentryck, men som tenderar att närma sig det ursprungliga porvattentrycket.

Marken komprimeras vid uttag och hävs vid inlagring. Maximalt uppstår marksättningar till 13 cm orsakat av värmelagringspåverkan.

Ingen säker förändring av densitet och vattenkvot har påvisats.

Påverkan på de geotekniska egenskaperna hos leran utanför lagret är mycket begränsad. Porvattentrycket har höjts något i en punkt ca 8 meter utanför lagret. Marksättningar, förkonsolideringstryck, kompressionsmodul, skjuvhållfasthet, vattenkvot och densitet har inte förändrats.

9. KOSTNADER

9.1. Anläggningskostnader

I anläggningskostnaderna ingår uteluftkylare, värmepumpar, värmelager, elpanna, kringutrustning, byggnader m.m. Eftersom oljepannorna är befintliga ingår ej kapitalkostnaden för dessa.

Den totala kostnaden uppgick 1987 till	5 480 kkr
varav	
värmepump, uteluftkylare, elpanna, kringutrustning mm	2 650 kkr
markvärmelager	1 400 kkr
kulvertar	500 kkr
byggnader, projektering, moms m.m.	930 kkr

9.2. Driftskostnader

Anläggningens driftkostnader består av kostnader för förbrukad energi i form av elektricitet och olja samt service-/underhållskostnader. Personalkostnaden för tillsyn och service/underhåll som utförts av vaktmästarna vid anläggningen har ej belastat projektet eftersom denna verksamhet ingår i personalens ordinarie sysselsättning.

Driftskostnaderna har sammanställts för kalenderår 1988-90, se tabell 9.1. Uppgifterna kommer från Söderköpings kommun. För kalenderår 1990 ingår mervärdesskatt (moms).

Driftskostnaderna är för respektive kalenderår följande:

år	förbrukad el elmängd (kWh)	el kostnad (kr/kWh)	olje- förbrukning (m ³)	olja kostnad (kr/m ³)	service och underhåll (kr/år)	SUMMA drifts- kostnad (kkr/år)
1988	1 178 552	0,29	57	1 632	25 591	459
1989	1 075 240	0,32	50	1 980	4 362	451
1990	1 073 368	0,35	45	2 475	60 588	545

Tabell 9.1. Sammanställning av driftskostnader.

9.3. Energikostnader

Energikostnaden har beräknats för värmepumpanläggningen med värmelager för åren 1988 - 1990.

Med 6 % real ränta och 20 års avskrivning fås en annuitetsfaktor på 0,0872.

Kapitalkostnad = 5 480 kkr x 0,0872 = 478 kkr/år

Drifts- och underhållskostnader (medelvärde)=	484 kkr/år
Summa	962 kkr/år

Energiförbrukningen under dessa år har varit 2 200 MWh/år pga varma vintrar. Under ett normalår är energiförbrukningen ca 2 500 MWh. Kapitalkostnaden bör därför beräknas utifrån normalårs energiförbrukning 2 500 MWh/år medan driftskostnaden baseras på förbrukad energi 2 200 MWh/år.

$478 \text{ kkr} / 2\,500 \text{ MWh} + 484 \text{ kkr} / 2\,200 \text{ MWh} = 0.41 \text{ kr/kWh}$.

9.4. Värdering av kostnader

KAPITALKOSTNADER

Kostnaderna för värmepumpar, uteluftkylare, elpanna, kringutrustning, kulvertar, byggnader, projektering, moms m.m. består av konventionell teknik. Kostnaderna för dessa delar bedöms kunna minskas något.

Markvärmelagret var den osäkra komponenten i anläggningen. Kostnaden för lagret bedöms kunna minskas väsentligt. Till viss del beror den höga kostnaden av att alla kopplingar i markytan fick bytas ut mot svetsar. Efter diskussioner med entreprenörer m.fl. har Magnusson (R37:1991) visat att värmelagret skulle kunna byggas till en kostnad av 1 100 kkr exkl. moms i 1990 års prisnivå. Söderköpingslagret byggdes för 39 kr/m³ (ca 49 kr/m³ i 1990 års prisnivå) vilket således borde kunna minskas till 32 kr/m³. Denna kostnadsminskning hade medfört följande:

$32 \text{ kr/m}^3 \times 36\,000 \text{ m}^3 = 1\,152 \text{ kkr}$ i 1990 års prisnivå.

1 152 kkr motsvarar ca 900 kkr i 1987 års prisnivå.

1 400 - 900 kkr = 600 kkr.

$600\,000 \text{ kr} \times 6\% \text{ realränta i } 20 \text{ år} = 600\,000 \times 0.0872 = 52\,320 \text{ kr/år}$.

$52\,320 \text{ kr/år} / 2\,500\,000 \text{ kWh/år} = 2 \text{ öre/kWh}$.

DRIFTSKOSTNADER

Anläggningens totala driftskostnader påverkas både av inköpta servicetjänsters och energislagens prissättning samt förbrukad energimängd vilket indirekt påverkas av utomhusklimatet. Att kommentera anläggningens totala driftskostnad är svårt utifrån den korta utvärderingstiden. Inget tyder dock på att driftskostnaden är anmärkningsvärd. Tittar man på de enskilda kostnadsslagen ser man att oljepriset stigit kraftigt med drygt 20 % per år. Elektriska kostnaden har stigit mera måttligt med cirka 10 % per år. Servicekostnaderna har varierat kraftigt under den tid utvärderingen varat. För framtiden kan man erfarenhetsmässigt anta att kostnaderna för service/underhåll kommer att öka. Mera osäkert är från vilken årlig kostnadsnivå man skall utgå ifrån samt ökningstakten på kostnaderna.

ENERGIKOSTNADER

Om oljepannorna fortsättningvis hade värmeförsörjt skolan och den nybyggda sporthallen hade värmts med en konventionell elpanna kan följande beräkning göras.

Investeringskostnaden för elpannan är ca 100 000 kr.

Med 6 % real ränta och 10 års avskrivning fås annuitetsfaktorn 0,1359.

Kapitalkostnad: = 100 000 kr x 0,1359 = 14 kkr/år.

Driftskostnad:

Olja till skolan

$1/10\ 000\ \text{kWh/m}^3 \times 1\ 450\ 000\ \text{kWh/år} \times 0,9 \times (1\ 632 + 1\ 980 + 2\ 475\ \text{kr/m}^3)/3\ \text{år} = 265\ \text{kk}/\text{år}$

El till sporthallen

$750\ 000\ \text{kWh/år} \times (0,29 + 0,32 + 0,35\ \text{kr/kWh})/3\ \text{år} = 240\ \text{kk}/\text{år}$

El för övrigt

$100\ 000\ \text{kWh/år} \times (0,29 + 0,32 + 0,35\ \text{kr/kWh})/3\ \text{år} = 32\ \text{kk}/\text{år}$

Service 50 kkr/år

Den specifika energikostnaden blir då

$14 + 265 + 240 + 32 + 50\ \text{kk}/\text{år} / 2\ 200\ 000\ \text{kWh} = 0,27\ \text{kr/kWh}$.

Energikostnaden för värmepump och värmelageralternativet är således ca 14 öre/kWh högre än om oljepannorna utnyttjats maximalt och kompletterats med en elpanna. I skillnaden ligger bl.a. kostnader för teknikutveckling samt värdet av att utsläpp av svaveloxider m.m. från oljepannorna minskat med 80 %.

10. SLUTSATSER

1. Om värmelager ska kunna vara ekonomiskt motiverbara bör värmepumpen användas antingen vid inlagring eller vid värmeuttag men ej för både inlagring och uttag.

2. Det är betydelsefullt att fastställa den högsta temperatur som kan tillåtas vid värmelagring i lera med hänsyn till geotekniska konsekvenser för att det ska vara möjligt att avgöra nyttan av sådana lager.

3. Kulvertkostnaderna är stora. Teknikutveckling med plöjning av kulvert kan vara ett sätt att sänka kostnaderna.

4. Kostnaderna för lagret bedöms kunna minskas väsentligt, bla med hjälp av ny metodik där slangen installeras "skarvlös".

5. Utvärderingsprojektet har ej kunnat visa om uteluftkylaren generellt blir mer ekonomisk då ett värmelager ansluts till systemet. Det bedöms dock krävas relativt stora skillnader i energikostnad mellan sommar och vinter, lägre lagerkostnad samt att värmepumpen inte används för både inlagring och uttag av värme.

6. Miljöförhållandena har förbättrats genom att oljeförbrukningen har minskat med ca 200 m³ per år. Denna minskning ska vägas mot att ca 20 liter freon (R12) släpps ut varje år. Idag finns dock betydligt miljövänligare freoner.

7. Den geotekniska påverkan av temperaturhöjning och temperaturcykling består huvudsakligen av måttliga sättningar av markytan. Portrycken förändras med aktuell lagertemperatur. Påverkan utanför lagret är knappt märkbar. Ett värmelager med temperatur upp till 40 °C bör kunna placeras på de flesta ställen utan att medföra skador på bebyggelse mm (obs punkt 8).

8. Eftersom förändringar i jord sker mycket långsamt ger tre års utvärdering av den geotekniska påverkan inte tillräckligt underlag för definitiva slutsatser.

9. Vid dimensionering av ett värmelager har jordens värmeledningsförmåga, avståndet mellan skänklarna på U-rören och markens begynnelse-temperatur stor betydelse för överensstämmelsen mellan simulering och verkligt utfall.

Att kunna bedöma eller mäta värmeledningsförmågan i marken på aktuell plats för ett lager är därför väsentlig.

Vid installationen av U-rören är det viktigt att projekterat avstånd kan erhållas. Antingen måste skänkelavståndet "garanteras" med en tillförlitlig metod för installation eller att skänkelavståndet i efterhand kan kontrolleras och antalet värmeväxlare justeras med avseende på installationsresultatet.

10. Det simuleringsprogram (Markvärmegruppen i Lund, DST) som använts för detaljprojektering av lagret har tillräcklig noggrannhet. Programmet förutsätter att värmen överförs rent konduktivt. Eftersom simuleringarna stämmer mycket bra överens med lagrets kapacitet kan bekräftas att värmeöverföringen enbart är av konduktiv art. Begränsningen är snarare antagna ingångsdata avseende jordens egenskaper.

Det krävs däremot relativt stor arbetsinsats för att simulera ett värmelager, vilket kan vara befogat vid en detaljprojektering. För enklare studier typ förstudie och förprojektering finns det däremot behov av utveckling av enklare simuleringsprogram.

11. REFERENSER

Claesson, Eftring, Eskilsson och Hellström. En handbok om termiska analyser. Byggforskningsrådet T16-18:1985. Stockholm 1985.

Eskilsson. Thermal Analyses of Heat Extraction Boreholes (avhandling). Lunds tekniska högskola, matematisk fysik. Lund 1987.

Hellström. Ground Heat Storage, Thermal Analyses of Duct Storage systems, Part 1: Theory (avhandling). Lunds tekniska högskola, matematisk fysik. Lund 1991.

Hellström. Bedrock Heat Store in Luleå. Numerical Simulation for 1983-1988. Lunds tekniska högskola, matematisk fysik. Lund 1991.

Informationsblad, BFRs experimentbyggnadsprojekt, Anläggning: Söderköping - Uteluftkylare, markvärmelager och värmepumpar. Statens råd för byggnadsforskning S2:1988. Stockholm 1988.

Magnusson. Geotechnical Aspects of Heat Storage in Soft Clay - Follow-Up Observation of a Heat Store in Söderköping. Artikel to THERMASTOCK '91, 5th International Conference on Thermal Energy Storage, Scheveningen, The Netherlands, May 13-16, 1991. Statens geotekniska institut, SGI varia 327. Linköping 1991.

Magnusson, Bergenståhl, Rydell och Dahlöf. Värmepumpanläggning med värmelager i lera för skola och sporthall i Söderköping. Mätning och utvärdering, delrapport 1, 1987 - 1989. Statens geotekniskainstitut, SGI varia 265. Linköping 1990.

Magnusson och Lehtmetts. Markvärmeväxlare för högttemperaturlager i lera. Värmetekniska beräkningar, installationsmetoder och kostnader. Byggforskningsrådet R37.1991. Stockholm 1991.

Mogensen. Fluid to Duct Wall Heat Transfer in Duct System Heat Storages. Proceedings of International Conference on Subsurface Heat Storage. Byggforskningsrådet D16:1983. Stockholm 1983.

Palmgren och Hellström. Heat Storage in Clay - A Technical and Economical Evaluation of Vertical Earth Heat Exchangers. Artikel to ENERSTOCK '85, 3rd International Conference on Energy Storage for Building, Heating and Cooling, Toronto, Canada, September 22-26, 1985.

Rhen. Sunclay-anläggningen i Kungsbacka. Teknisk uppföljning av värmelagret. Chalmers tekniska högskola, Jordvärmegruppen, rapport nr 27. Göteborg 1988.

Rydell, Adolfsson, Abrahamsson och Palmgren. Värmelagring i lera för skola och sporthall i Söderköping, förstudie. Byggforskningsrådet R181:1984. Stockholm 1984.

Rydell och Palmgren. Geoteknisk utredning för bad- och sporthall, STG 190, 196 (Storängen), Söderköpings kommun. Statens Geotekniska Institut, Dnr 2-456/84. Linköping 1985.

Rydell, Magnusson och Dahlöf. Värmelagring i lera med värmepump för skola och sporthall i Söderköping, projektering. Statens geotekniska institut, SGI varia 186. Linköping 1986.

Sundberg. Värmeöverförande egenskaper i svenska jordar. Värme-konduktivitet, specifik värmekapacitet och latent värme. Byggforskningsrådet R104:1986. Stockholm 1986.

Sundberg. Högtemperaturlager i lera. Geoteknik, systemteknik och kostnadskalkyler. Byggforskningsrådet R40:1990. Stockholm 1990.

VDI-Wärmeatlas, Berechnungsblätter für den Wärmeübergang, 5., erweiterte Auflage. Dusseldorf 1988.

BILAGA 1

DETALJERAD BESKRIVNING AV MÄTDATA SAMT JUSTERING AV DATA FRÅN VÄRMEMÄNGDSMÄTARE.

1. Inledning

De mätdata som erhållits visar bl.a. att levererad energimängd från energianläggningen är i samma storleksordning som uppoffrad elektrisk energi för att producera denna värme till förbrukaren. Systemvärmefaktorn skulle då vara ca 1,0 vilket är orimligt. Samtidigt visar uppmätt systemvärmefaktor ett värde på 2,0 vilket således är skilt från 1,0 samtidigt som även denna värmefaktor är oroväckandes låg. Med anledning av detta redovisas i denna bilaga dels de uppmätta data som senare reviderats och dels hur mätdata från värmemängdsmätare 1 har konstaterats visa felaktiga värden samt hur dessa justerats för att ligga till grund för redovisade resultat.

Utvärderingen baseras på månadsmedelvärden om inget annat anges.

2. Uppmätta värden - Värmepumpsprestanda

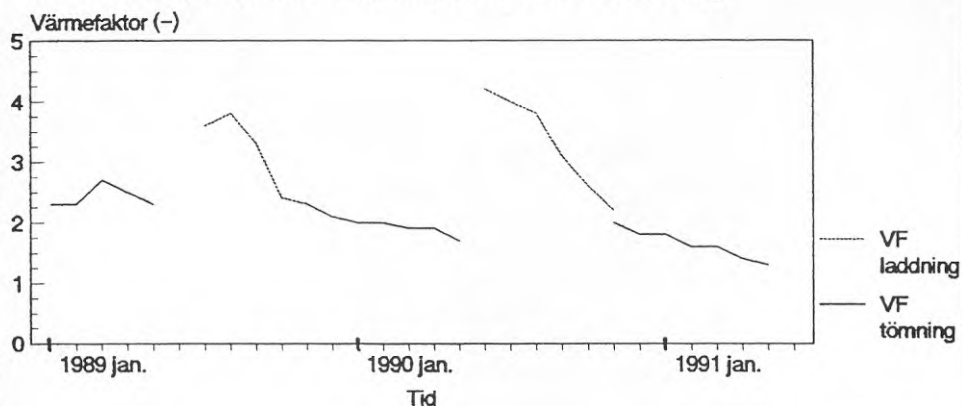
Värmepumparnas värmefaktor, VF, definieras som kvoten mellan utvunnen energimängd och tillförd elektrisk energi. Värmepumparna arbetar i två driftcykler. Under den varma årstiden (laddning av lagret) levererar värmepumparna energi dels direkt till förbrukaren (värmemängdsmätare VM1), dels till markvärmelagret (värmemängdsmätare VM5A). Under den kalla årstiden (tömning av lagret) levererar värmepumparna all energi direkt till förbrukaren (VM1). Värmepumparnas och det totala systemets (inklusive värmepumparna) förbrukning av elektrisk energi är mätt med separata elmätare. Separata elmätare möjliggör presentation av dels värmepumparnas värmefaktor, dels hela anläggningens systemvärmefaktor, SVF.

Vid laddning varierar värmepumparnas värmefaktor, fallande med tiden, mellan 4,2 och 2,2, se figur 1. Ingen markant skillnad av värmefaktorn sker mellan laddningscykel 1989 och 1990. Värmefaktorn varierar vid tömning mellan 2,7 och 1,3. För varje ny tömningscykel tenderar värmefaktorn att försämrast.

SÖDERKÖPING VÄRMELAGER

Värmepumpsprestanda 1989-91

Värmefaktor, VF
baserad på värmepumparnas elförbrukning



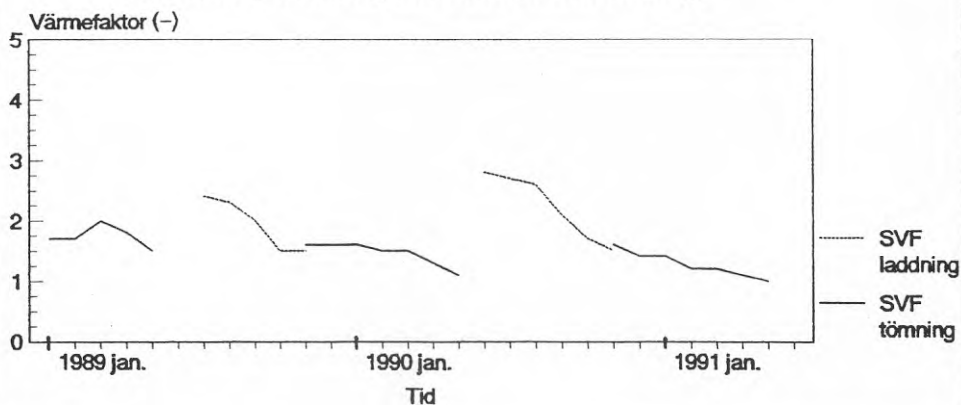
Figur 1. Värmepumparnas värmefaktor.

Systemvärmefaktorn vid start av laddningscykel är ca 2,8 och sjunker till ca 1,5 vid slutet av laddningscykeln. Detta beteende är likartat från år till år. Systemvärmefaktorn vid tömning faller också på liknande sätt successivt från ca 2,0 till ca 1,0. Det har också observerats att för varje ny tömningscykel har systemvärmefaktorn

SÖDERKÖPING VÄRMELAGER

Värmepumpsprestanda 1989-91

Systemvärmefaktor, SVF
baserad på totalsystemets elförbrukning



Figur 2. Systemets totala värmefaktor.

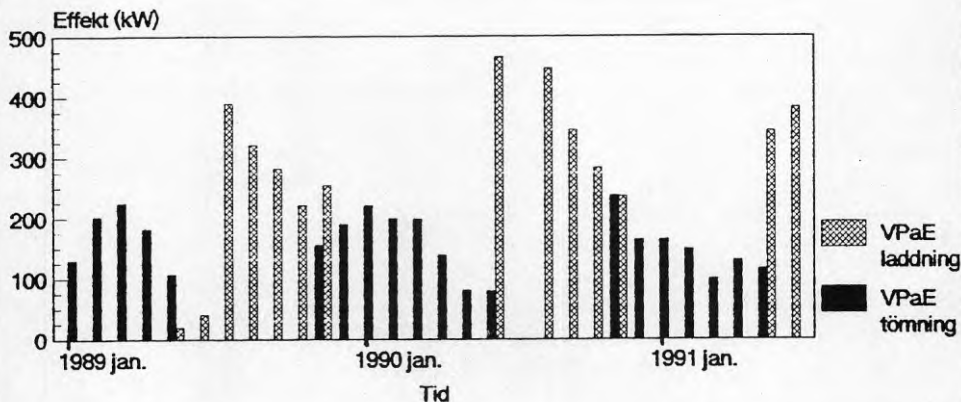
Förhållandet mellan systemvärmefaktor och värmepumparnas värmefaktor avspeglar kringutrustningens elektriska förbrukning. Vid laddning förbrukar kringutrustningen drygt 30% $((2,2-1,5)/2,2 = 32 \%)$ av total elektrisk förbrukning. Vid tömning är motsvarande siffra omkring 25% $((2,7-2,0)/2,7 = 26 \%)$.

Värmepumparnas avgivna värmeeffekt, VP_{aE}, se figur 3, definieras som kvoten mellan utvunnen energimängd (VM1) och värmepumparnas driftstid. Driftstiden är baserad på manuella mätdata om ett dygns intervall.

SÖDERKÖPING VÄRMELAGER

Värmepumpsprestanda 1989-91

Avgiven värmeeffekt, VP_{aE}



Figur 3. Avgiven värmeeffekt från värmepumparna.

Värmepumparnas avgivna värmeeffekt varierar mellan 19 och 466 kW. För uppdelning mellan laddnings- och tömningscyklerna varierar effekterna mellan 19 och 466 kW respektive 78 och 236 kW. Avgiven värmeeffekt under laddningsperioden faller med tiden med avtagande utetemperatur.

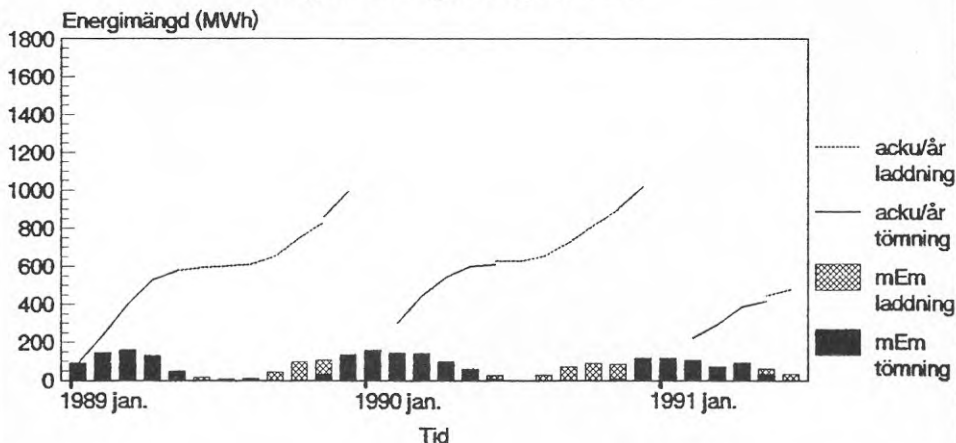
3. Uppmätta värden - Energitekniska data

Brukarens mottagna energimängd, mEm , (exkl. olja) är baserad på värmemängdsmätare 1 (VM1) såväl under laddnings- som tömningscykel. Mottagen energimängd av Ramunderskolan och sporthallen har ackumulerats (manuell summering månadsvis) per kalenderår och visas i figur 4.

SÖDERKÖPING VÄRMELAGER

Prestandabalans för brukaren 1989-91

Mottagen energimängd, mEm



Figur 4. Levererad energimängd till förbrukare.

Staplarna i figur 4 visar levererad energimängd till Ramunderskolan per månad. Följande extremvärden, per månad, gäller för respektive kalenderår:

kalenderår (MWh)	maxleverans (MWh)	minleverans
1989	161 (mars)	7 (juli)
1990	158 (januari)	0 (juli avställt)
(1991)	117 (januari)	33 (juni dittills)

I figur 4 åskådliggör kurvorna ackumulerad energimängd per år baserat på summering av varje månadsvärde. För kalenderår 1989 och 1990 har totalt 995 MWh respektive 1 019 MWh värmeenergi mottagits av förbrukaren.

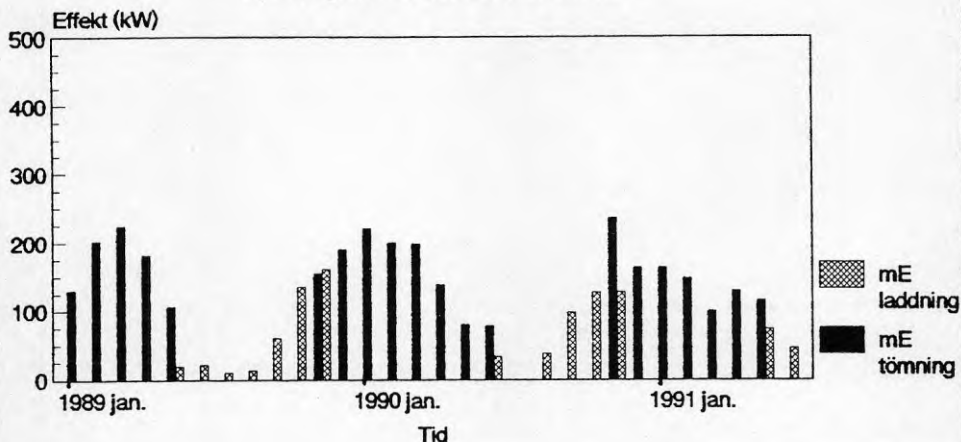
Mottagen månadsmedelvärmeeffekt, mE, definieras som kvoten mellan emottagen energimängd (VM1) och driftstid för energileverans. Driftstiden är baserad på manuella mätdata om ett dygns intervall.

Maximal emottagen värmeeffekt varierar runt 200 kW för varje eldningssäsong 1989-90. Staplarna i figur 5 visar att maximalt effektuttag skett i mars månad för eldningssäsong 1989. motsvarande siffror för 1990 och 1991 är januari respektive november månad. Under hösten (slutet av lagrets laddningssäsong) ökar skolans behov av värmeeffekt med fallande utetemperatur.

SÖDERKÖPING VÄRMELAGER

Prestandabalans för brukaren 1989-91

Mottagen värmeeffekt, mE



Figur 5. Mottagen värmeeffekt av skolan.

4. Justering av värmemängdsmätare 1.

De mätdata som erhållits visar bl.a. att ca 1 000 MWh/år har levererats från energianläggningen (exkl. olja) till brukaren, se figur 4, värmemängdsmätare 1. Mängden uppoffrad elektrisk energi för att producera denna värme är i samma storleksordning vilket framgår av figur 6.6. Systemvärmefaktorn skulle i detta fall vara 1,0 vilket är orimligt. Systemvärmefaktorn enligt figur 2 är omkring 2,0 vilket dels är skilt från 1,0 samtidigt som även 2,0 är ett oroväckandes lågt värde.

Två möjligheter föreligger. Antingen är energibehovet årligen cirka 1 000 MWh (exkl. olja) och anläggningen har dålig prestanda eller så är mätdata, sannolikt VM1, felaktig. Det förra är föga sannolikt då energibehov från anläggningen uppskattats och beräknats, genom oljeförbrukning före konvertering, till cirka 1 750 MWh. Den tillkommande sporthallens energiförbrukning bedömdes till 760 MWh/år. Kvar återstår en sannolikt felaktig värmemängdsmätare 1 (VM1).

För att uppskatta felet på värmemängdsmätare 1 genomfördes en grov överslagsräkning. Som bas för denna beräkning användes delar av projekterande data från projektansökan med BFR-nummer 860805-5.

Följande data förutsattes vid projekteringen:

Energibehov	2 500	MWh/år
Energitillförsel uteluft/lager/VP	2 050	MWh/år
Energitillförsel olja	450	MWh/år
Energileverans från lager	650	MWh/år
Effektbehov	1,5	MW
Effektillförsel värmepump	0,4	MW
Årsvärmefaktor	2,5	-
Oljereduktion	80	%

Tab 1 Data från projektering.

Felet på värmemängdsmätaren kan uppskattas genom följande formulering:

$(\text{Energibehov} * X) - \text{Energi,olja} - \text{VM1 enl. givare} = \text{Faktor}$

Energibehov	2 500 MWh/år
X	Reduceringsfaktor för varm vinter, lägre energibehov
Energi,olja	Cirka 500 MWh/år
VM1	Cirka 1 000 MWh/år, avläst värde på felaktig värmemängdsmätare 1
Faktor	Faktor med vilket avläst VM1-värde skall adderas för att få sannolikt VM1-värde

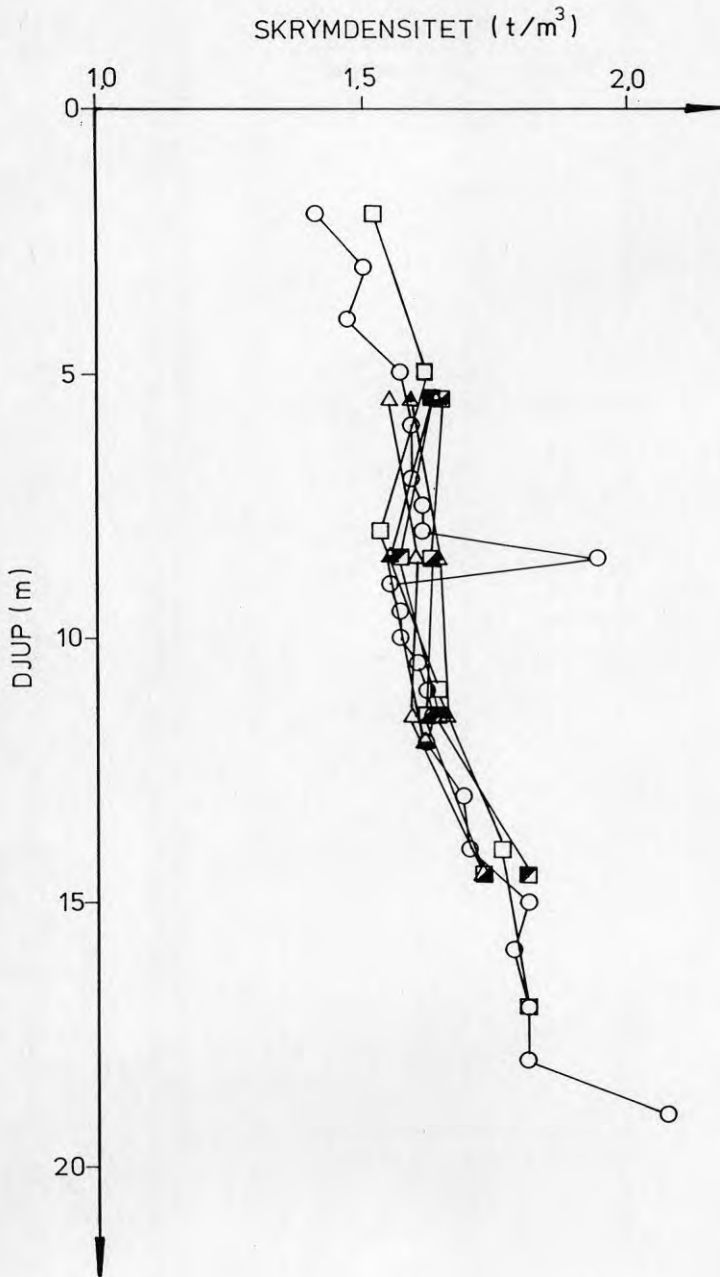
$$(2\ 500 * 0,9) - 500 - 1\ 000 = 750$$

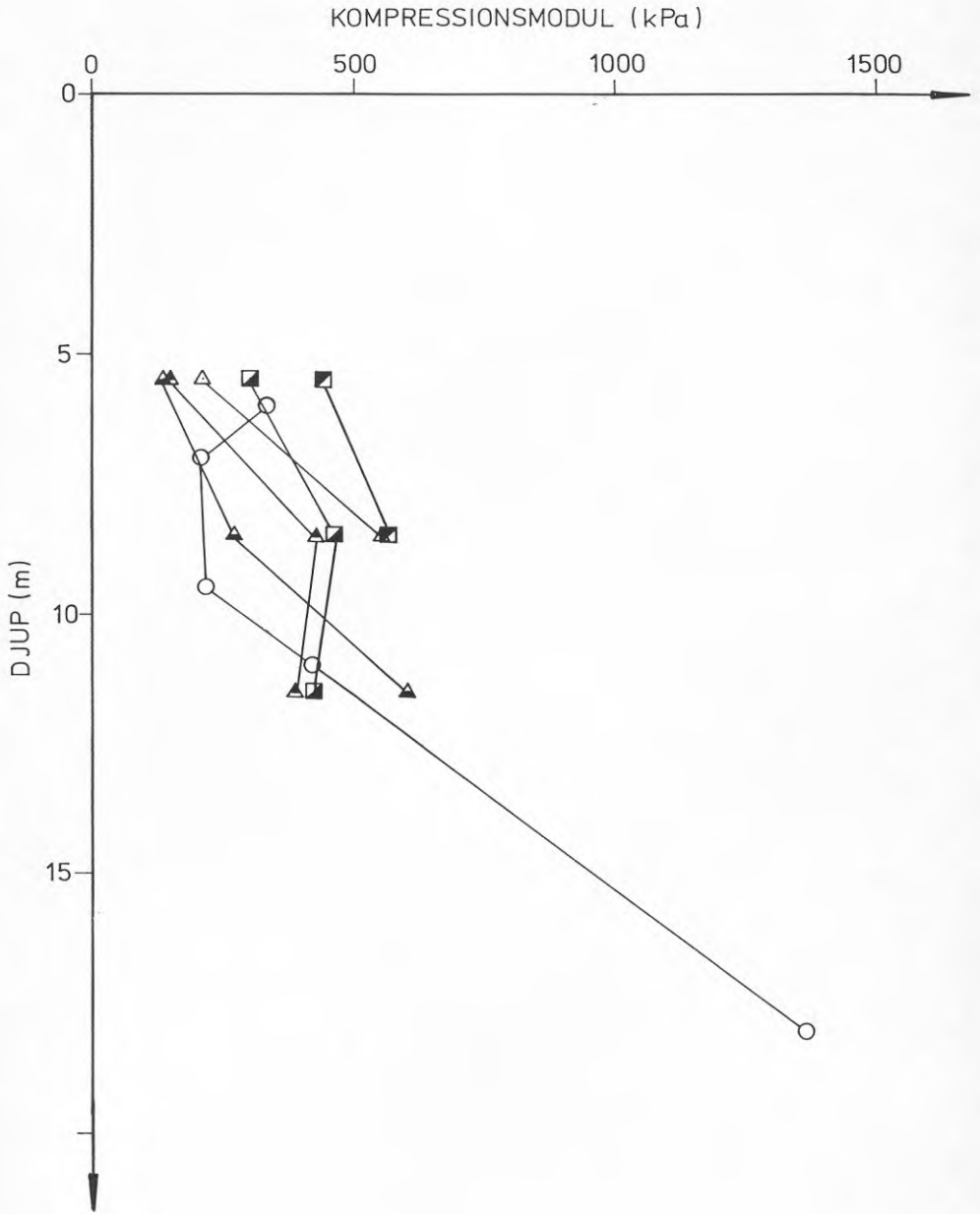
Värmemängdsmätare 1 bör visa 1 750 MWh istället för 1 000 MWh. Avläst värde på VM1 bör alltså multipliceras med en faktor cirka 1,75 för att få den sannolikt levererade energimängden till förbrukaren.

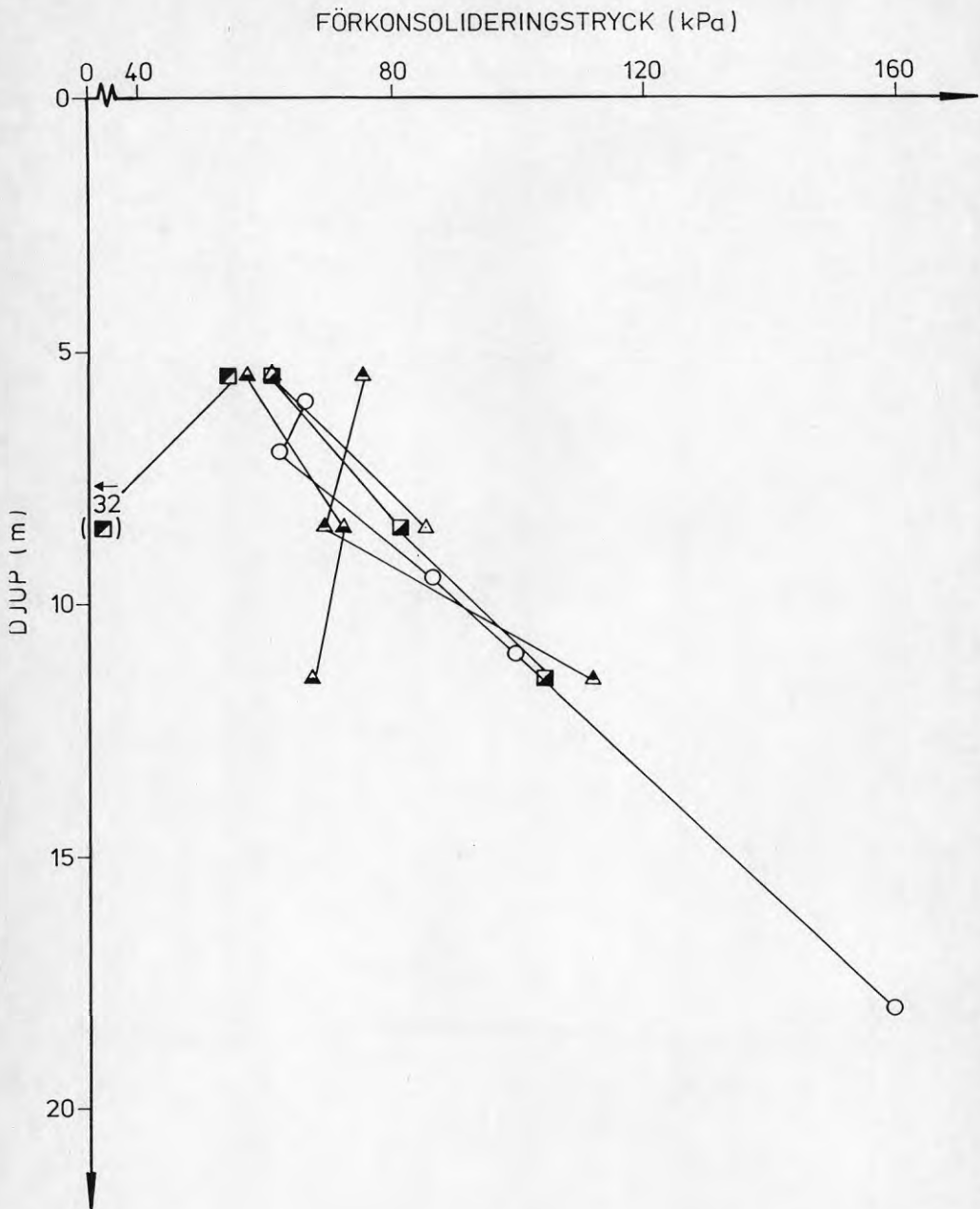
BILAGA 2

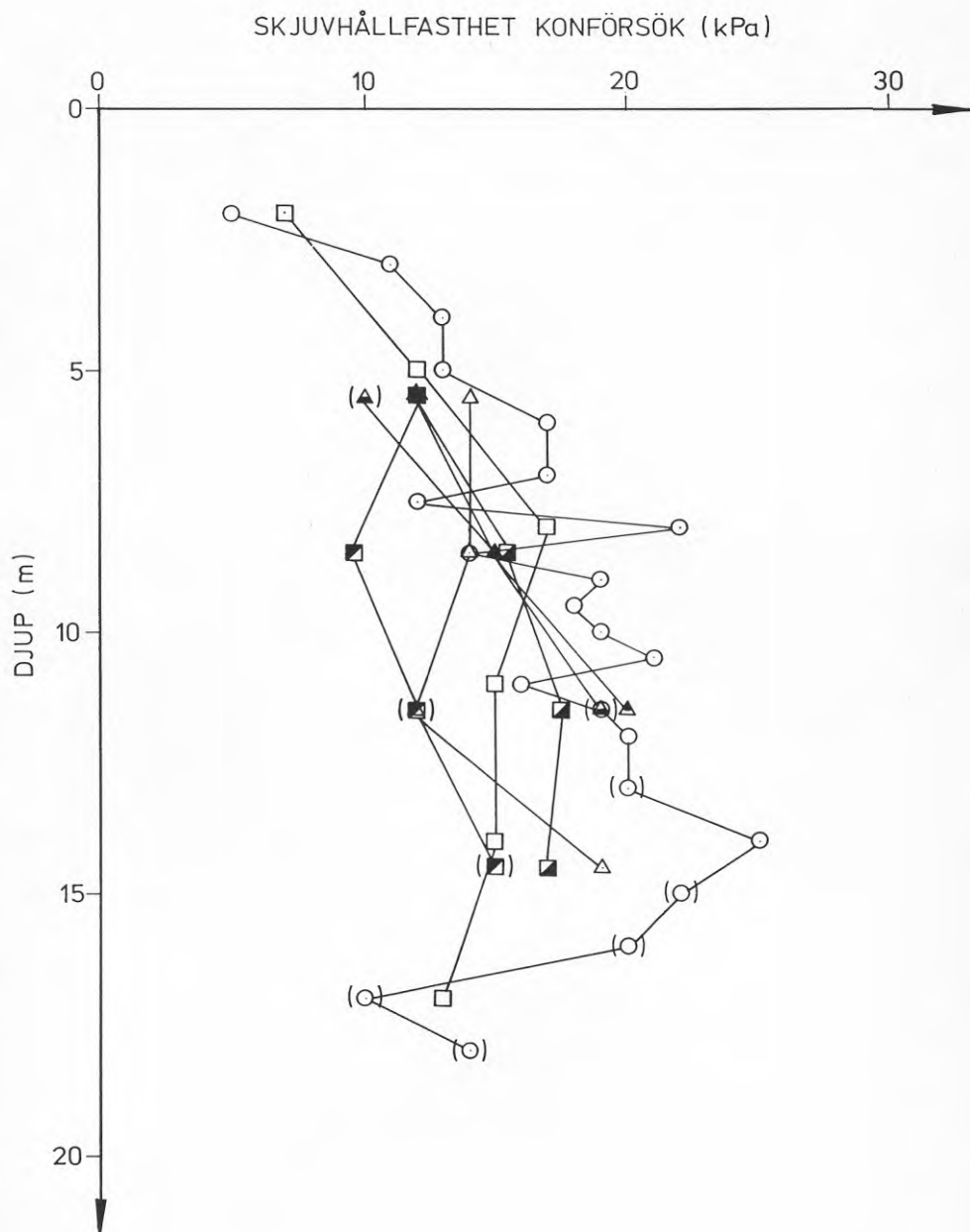
SAMMANSTÄLLNING AV LABORATORIERESULTAT AV GEOTEKNISKA
PARAMETRAR

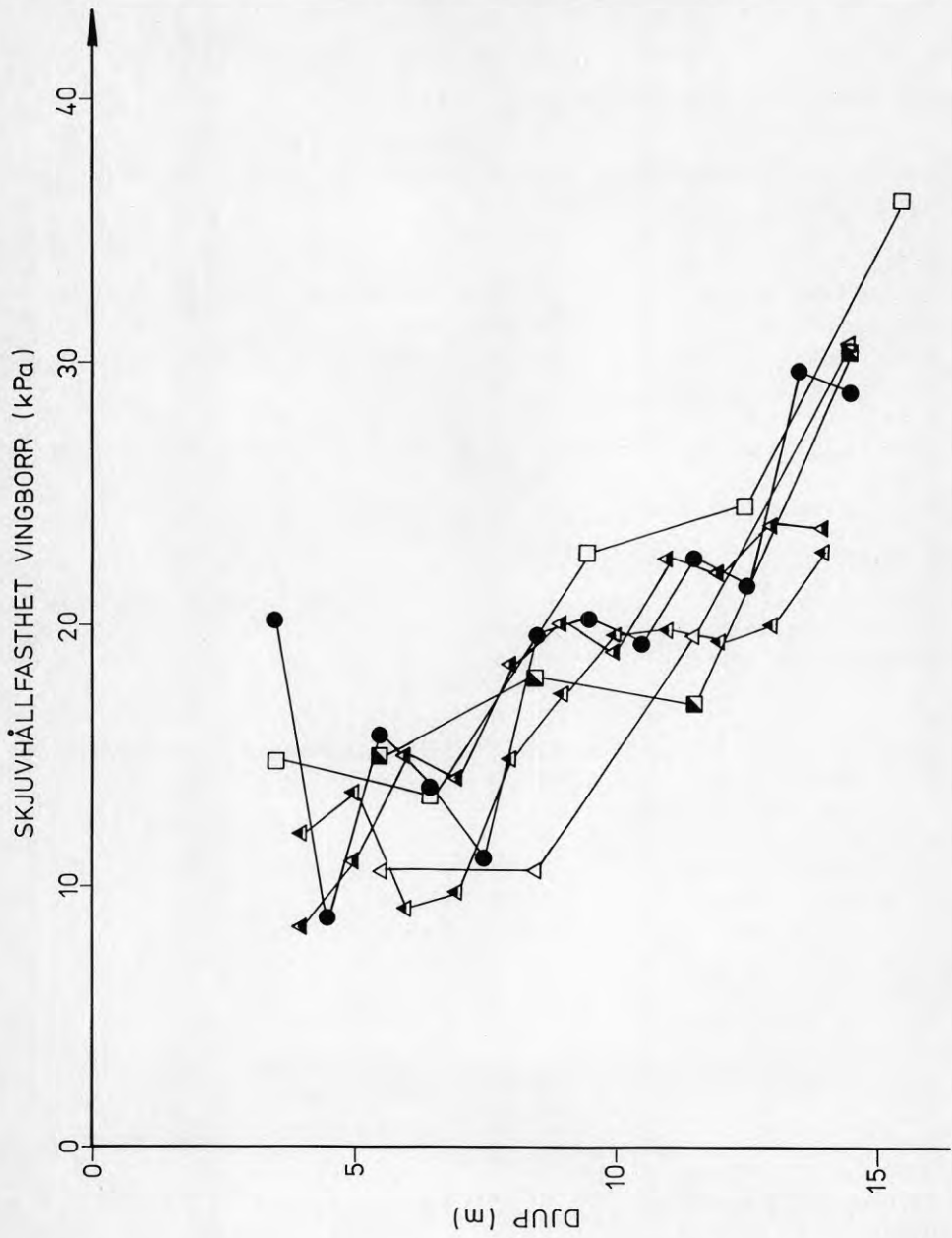
- 8309 REFERENS UTANFÖR
LAGER
- 8704 EFTER SLANGINSTALLATION,
FÖRE LADDNING, UTANFÖR
LAGER
- 8806 1 LADDNING OCH 1 UTTAG,
I LAGER
- 8905 2 LADDNING OCH 2 UTTAG,
I LAGER
- △ 8910 3 LADDNING OCH 2 UTTAG,
I LAGER
- ▲ 9006 3 LADDNING OCH 3 UTTAG,
I LAGER
- ▲ 9011 4 LADDNING OCH 3 UTTAG,
I LAGER
- 9011 4 LADDNING OCH 3 UTTAG,
REFERENS UTANFÖR LAGER











BILAGA 3

SAMMANSTÄLLNING AV DRIFTSKOSTNADER

Förbrukad elektrisk energimängd och kostnader för denna omfattar för respektive kalenderår följande:

1988

Specifik elkostnad	0,29	kronor/kWh (medel av tot.kost)
Förbrukad elmängd	1178552	kWh
Total kostnad för el	339942	kronor/år

1989

Specifik elkostnad	0,32	kronor/kWh (medel av tot.kost)
Förbrukad elmängd	1075240	kWh
Total kostnad för el	347530	kronor/år

1990

Specifik elkostnad	0,35	kronor/kWh (medel av tot.kost)
Förbrukad elmängd	1073368	kWh
Total kostnad för el	373226	kronor/år

Oljekostnaderna och oljeförbrukning omfattar för respektive kalenderår följande:

1988

Specifik oljekostnad	1632	kronor/m ³
Förbrukad oljemängd	57	m ³
Total oljekostnad	93024	kronor/år

1989

Specifik oljekostnad	1980	kronor/m ³
Förbrukad oljemängd	50	m ³
Total oljekostnad	99000	kronor/år

1990

Specifik oljekostnad	2475	kronor/m ³
Förbrukad oljemängd	45	m ³
Total oljekostnad	111375	kronor/år

Service-/underhållskostnaderna omfattar för respektive kalenderår följande poster:

1988

Kemiska förbrukningsvätskor	8489	kronor
Service/underhåll av värmepump	17102	kronor
Total kostnad	25591	kronor/år

1989

Kemiska förbrukningsvätskor	3399	kronor
Service/underhåll av värmepump	963	kronor
Total kostnad	4362	kronor/år

1990

Kemiska förbrukningsvätskor	3681	kronor
Service/underhåll av värmepump	44385	kronor
Service/underhåll av cirk.pump	12522	kronor
Total kostnad	60588	kronor/år

Summeras anläggningens driftskostnader per kalenderår fås följande totalkostnad:

1988

Total driftskostnad	458557	kronor/år(339942+93024+25591)
---------------------	--------	-------------------------------

1989

Total driftskostnad	450892	kronor/år(347530+99000+4362)
---------------------	--------	------------------------------

1990

Total driftskostnad	545189	kronor/år(373226+111375+60588)
---------------------	--------	--------------------------------

