



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.



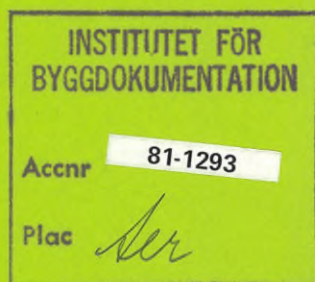
Rapport

R98:1981

Säsongslagring av värme i berg

**Förstudie av borrhålslager för
cirka 1 000 lägenheter**

**Håkan Kadesjö
John Sintorn**



Byggforskningsrådet

Ser

R98:1981

SÄSONGLAGRING AV VÄRME I BERG

Förstudie av borrhålslager för
cirka 1 000 lägenheter

Håkan Kadesjö
John Sintorn

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 780794-7
från Statens råd för byggnadsforskning till Kadesjös
Ingenjörbyrå AB, Västerås.

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

R98:1981

ISBN 91-540-3541-4
Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

LiberTryck Stockholm 1981 154484

INNEHÅLL

SID

	SAMMANFATTNING	5-7
1	INLEDNING	8
1.1	Problemet	8
1.2	Projektet	8
1.2.1	Förstudie, etapp 1	8
1.2.2	Etapp 2, föreliggande studie	8
2	LADDNINGSTRATEGI	9
3	ACKUMULATORUTFÖRANDET	10
3.1	Allmän beskrivning	10
3.2	Detaljutförande	13
3.2.1	Berggrunden	13
3.2.2	Cirkulationshål för laddning och urladdning	14
3.2.3	Isolering av markytan	14
3.2.4	Rörsystem mellan hål och buffert-tank	14
3.2.5	Bufferttank	15
3.2.6	Värmepump	17
3.2.7	Styrsystem	19
4	KOSTNADSKALKYL INGAENDE KOMPONENTER	21
4.1	Berggrund	21
4.2	Cirkulationshål för laddning och urladdning	21
4.3	Isolering av markytan	21
4.4	Rörsystem mellan hål och buffert	21
4.5	Bufferttank	21
4.6	Värmepump	22
5	BERÄKNING AV ANLÄGGNINGSKOSTNAD FÖR ALTERNATIVA LAGERUTFÖRANDE	23
5.1	Lageralternativ 1. Total ackumulatorkapacitet ca 12.000 MWh	23
5.1.1	Mängdbeskrivning alt 1	23
5.1.2	Kostnadsberäkning alt 1	23
5.2	Lageralternativ 2. Total ackumulatorkapacitet ca 30.000 MWh	25
5.2.1	Mängdbeskrivning alt 2	25
5.2.2	Kostnadsberäkning alt 2	25
5.3	Lageralternativ 3. Total ackumulatorkapacitet ca 60.000 MWh	27
5.3.1	Mängdbeskrivning alt 3	27
5.3.2	Kostnadsberäkning alt 3	27
6	BERÄKNING AV INLAGRAD NYTTIG ENERGIMÄNGD	29
6.1	Databeräkning utförd med eget utvecklade dataprogram	29
6.1.1	Teoretisk beräkningsmodell	29
6.1.2	Programbeskrivning	29
6.1.3	Beräkningsförutsättning	30
6.1.4	Beräkningsresultat	30

INNEHÅLL	SID	
6.2	Databeräkning utförd av Johan Claesson och Göran Hellström, Tekniska Högskolan Lund	31
6.3	Sammanfattning av resultatet från båda beräkningsmodellerna	31
7	BERÄKNING AV LAGRINGSKOSTNAD	32
7.1	Förutsättning	32
7.2	Kalkyl	32
7.2.1	Akkumulatoralternativ 1 kapacitet 10.000 MWh	32
7.2.2	Akkumulatoralternativ 2 kapacitet 27.000 MWh	33
7.2.3	Akkumulatoralternativ 3, kapacitet 57.000 MWh	33
BILAGA 1	Förstudie, etapp 1	34
BILAGA 2	Rörsystem mellan hål och bufferttank	41
BILAGA 3	Solinstrålning i Älvkarleby	42
BILAGA 4	Värmeverksbelastning vid Västerås Kraftvärmeverk 1979	44
BILAGA 5	Simulering av värmetransport i borrhålslager. Claesson, Hellström	47
BILAGA 6	Simulering av värmetransport i borrhålslager. Kadesjö	58
LITTERATUR		77

SAMMANFATTNING

Säsongslagring av värme i mark

Lagring av värme i större eller mindre kvantiteter har sedan länge förekommit. Vanligaste medium för lagringen är vatten respektive ånga (Ruthackumulatören) men även andra medier användes t ex sand (t ex i ackumulerande elektriska värmeelement). Värmelagring syftar vanligen till utjämning av värmebehovet vid industriella processer eller mellan dag och natt respektive weekend och arbetsdagar för lokaluppvärmning särskilt då värmets alstras i samband med produktion av mekanisk energi.

I och med att intresse uppstått för användning av solenergi uppsamlad med solfångare för lokaluppvärmning och beredning av förbrukningsvarmvatten har behov framkommit av möjlighet till lagring av värme från sommar till vinter - säsongslagring. Det blir därvid fråga om lagring av betydande kvantiteter värme under lång tid. Hittills tillämpade metoder ger besvärande hög kostnad. Billigast tänkbara medium för värmelagringen borde i stort sett orörd mark vara. Problemet är då att tillföra marken värmets och att vidtaga sådana åtgärder som förhindrar att värmets bortföres från marken på annat sätt än genom för ändamålet anordnad uttagning vid förbrukning. En metod för sådan lagring har utarbetats av Kadesjö's Ingenjörbyrå AB på initiativ och under medverkan av civilingenjör John Sintorn. Metoden har detaljkonstruerats för lagring i berggrund men torde med små modifikationer kunna tillämpas även för annan lämplig mark.

Värmen tillföres och avges berggrunden via vertikala borrhål.

Genom att låta vatten varmare än berget cirkulera i dessa hål och härvid avge sitt värme till berget uppladdas ackumulatören. Vid urladdning vänds förloppet och vatten kallare än berget cirkulerar och upptar värme från berget. För att ej förorenas eller bortledas får det cirkulerande vattnet ej komma i direkt kontakt med berget.

Temperaturen hos vattnet från solfångarna varierar under dygnets olika timmar liksom under dagar med olika solstrålning och utetemperatur. För att erhålla en jämn och fullständig laddning av ackumulatören är det gynnsamt med konstant temperatur hos laddningsvattnet och med lång laddningstid. Den senare uppnås genom insättande i laddningskretsen av ett dygnsmagasin i form av en vattentank som laddas med varmt vatten från solfångarna under dagen och varifrån ackumulatören tillföres varmvatten med konstant temperatur fördelat över hela dygnet. När solinstrålning är så låg att solfångarna ej kan leverera vatten med föreskriven inladdningstemperatur måste inladdningen stoppas, såvida ej åtgärder vidtagits som medger inladdning på lägre temperaturnivå i ackumulatören, vilket här ej är fallet. I stället föreslås insättning av en värmepump, som vid sådant tillfälle höjer temperaturen hos vattnet till avsedd nivå före inmatningen.

Insättning av värmepump betyder tillskott av inköpt energi men höjer verkningsgraden hos solfångarna och möjliggör ett bättre utnyttjande av ackumulatören. Om och i vilken utsträckning detta är lönsamt beror på flera faktorer - kostnaden för energitillskottet, ökningen av utvunnen solvärme, ökat utnyttjande av

ackumulatören etc. En optimering kan ske först då ingående storheter är kända - energipris, kostnad och verkningsgradsdata för solfångare, temperaturnivå, ackumulatorkostnad. Elenergi bör normalt vara billig sommartid och vi bedömer som sannolikt att en måttlig insats av värmepumpenergi i flertalet fall är berättigat. Värmepumpen kan även användas vid urladdning för höjning av förbrukningsvattnets temperatur. Sådan temperaturhöjning kan erfordras t ex vid stark kyla om ledningsnätet och avslutna avnämnares värmesystem dimensionerats så att högre temperatur erfordras, eller om vid slutet av eldnings säsongen ackumulatörns temperatur sjunker under det värde avnämarna kräver. Man kan då med värmepumpar "suga ur" mera energi ur ackumulatören. Eftersom denna senare användning av värmepumpen avser vintertid då elkraft normalt är dyrare kan det tänkas vara fördelaktigare att driva värmepumpen med t ex dieselmotor eller att ersätta den med en mindre bränsleeldad värmecentral. En sådan torde sannolikt alltid vara ekonomiskt motiverad för att täcka de sällan förekommande högsta belastningstopparna vid exceptionellt låg utetemperatur och även som reserv.

De anläggningsdata vi har valt bedömer vi som liggande nära optimum för matning av ett i det närmaste konventionellt uppvärmningssystem.

De framtagna kostnaderna för att säsongslagra värmeenergi enligt ovan beskriven metod 7-11 öre/kWh är enligt vår bedömning så låga att ett kommersiellt utnyttjande borde vara möjligt. En väsentlig förutsättning är dock att lagret har en tämligen stor volym minst 10.000 MWh. Innan dess måste dock lagringsmetoden testas i mindre skala. Visserligen utnyttjas i stort sett enbart konventionell och väl utvecklad teknik vid utförandet av ackumulatören men praktiska försök i liten skala måste göras för att testa ackumulatörns funktion. Det teoretiskt beräknade in- och urladdningsförloppet borde alltså kontrolleras bättre.

Vidare måste problematiken kring sammankopplingen av ackumulatör med värmepump, bufferttank, solfångare och fjärrvärmesystem studeras. Detta forskningsuppdrag har enbart översiktligt berört denna problematik men funnit att för lagrets funktion som även ekonomi är dessa delar av stor betydelse. I presenterad kalkyl har dessa komponenter endast överslagsmässigt dimensionerats.

För att påskynda utvecklingen av en kommersiell ackumulatör föreslås följande fortsatta studier:

- a) Fältförsök med testackumulatör i enlighet med förstudie, bilaga 1.
- b) Förprojektering av ett komplett system med solfångare alternativt spillvärme, bufferttank, värmepump och ackumulatör.
- c) Förstudie för att ta fram lämpliga platser för ett pilotlager.
- d) Förstudier av de olika lokaliseringar som tagits fram i förstudie c).
- e) Uppförande av pilotanläggning.

Studierna a), b), c) och viss mån d) kan bedrivas parallellt, förslagsvis under 1981, medan uppförande av pilotanläggning borde kunna påbörjas hösten 1982.

1 INLEDNING

1.1 Problemet

Detta forskningsuppdrag avser att utreda de tekniska och ekonomiska förutsättningarna för att utnyttja befintlig berggrund som värmeackumulator för säsongsmässig lagring av energi.

1.2 Projektet

Den tänkta värmeackumulatoren skall utgöras av berggrunden, vilken från ytan perforeras med vertikala borrhål.

Kalkyler har genomförts för lagerstorlekarna

ca 10.000 MWh

ca 25.000 MWh

ca 50.000 MWh

1.2.1 Förstudie, etapp 1

För att teoretiskt klargöra värmeströmningsförloppen runt in- och urladdningshålen har en förstudie redan utförts. Denna avsåg även att ta fram kostnadsunderlag för en försöksackumulator avsedd att testa det framtagna teoretiska materialet. Rapport från denna förstudie, se bilaga 1.

1.2.2 Etapp 2, föreliggande studie

Etapp 2 av detta forskningsuppdrag avser att för 3 alternativa värmeackumulatorstorlekar enligt föreslagen princip:

- a) bestämma utförandet
- b) beräkna anläggningskostnaden
- c) beräkna in- och urladdningsförlopp
- d) beräkna lagringsförlusterna
- e) beräkna lagringskostnad/säsong(Kr/kWh)
- f) sammanfatta resultatet och om resultatet är tillfredsställande föreslå ett fullskaligt pilotprojekt.

2 LADNINGSSSTRATEGI

Det finns flera olika laddningsstrategier att välja på. Genom att på olika sätt styra cirkulation av det varma vattnet till lagret under laddningen kan man erhålla temperaturgradienter i lagret med olika utseende. T ex:

- a) Horisontell gradient med högsta temperatur i mitten.
- b) Vertikal gradient med högsta temperaturen vid ytan alternativt botten av lagret.
- c) Ingen gradient. Samma temperatur i hela lagret.

Laddningsstrategi b) med högsta temperatur närmast markytan har valts.

Det totala flödet av varmt vatten fördelas lika på alla hål.

Härigenom uppnås följande fördelar:

- a) Rörsystem för matning av vatten till laddningshålen får en enkel och ekonomisk uppbyggnad.
- b) Enkelt styrsystem. Ventiler ej nödvändiga vid varje borrhål.
- c) Låg vattenhastighet i laddningshålen ger låga tryckförluster och ekonomisk dimensionering.
- d) Temperaturgradient önskvärd. Lokala höga temperaturer i lagret gör det möjligt att tidvis vid urladdningsfasen direkt få ut erforderlig temperatur på utgående uppvärmt vatten från lagret utan att tillsatsvärmning (värmepump) behöver användas.

3 ACKUMULATORUTFÖRANDET3.1 Allmän beskrivning

Den allmänna principen för lagrets uppbyggnad och funktion framgår av fig 1 och fig 2 med textförklaring enligt nedan.

LADDNING

1. SOLFÅNGARE

Under sommarhalvåret tas värme upp via solfångare. Utgående temperatur hålles relativt låg från solfångarna för att dessa skall arbeta med hög verkningsgrad.

Temperaturen optimeras mot kostnad för energi till värmepumpen.

Värme behöver naturligtvis ej komma från solen utan kan vara spillvärme eller annan liknande värme.

2. VÄRMEPUMP

Temperaturnivån hos det utgående vattnet från solfångarna höjs vissa tider med hjälp av värmepump.

Härigenom kan:

- a) Värme från solfångarna, som har lägre temperatur än lagret, lagras in.
- b) Uppladdningen ske snabbare.
- c) Temperaturnivån och därigenom ackumulatorkapaciteten ökas.

3. BUFFERTTANK

För att utjämna variationerna i energitillförseln till berglagret mellanlagras det uppvärmda vattnet från solfångarna i en isolerad bufferttank. Härigenom kan laddning ske dygnet runt.

4. MARKISOLERING

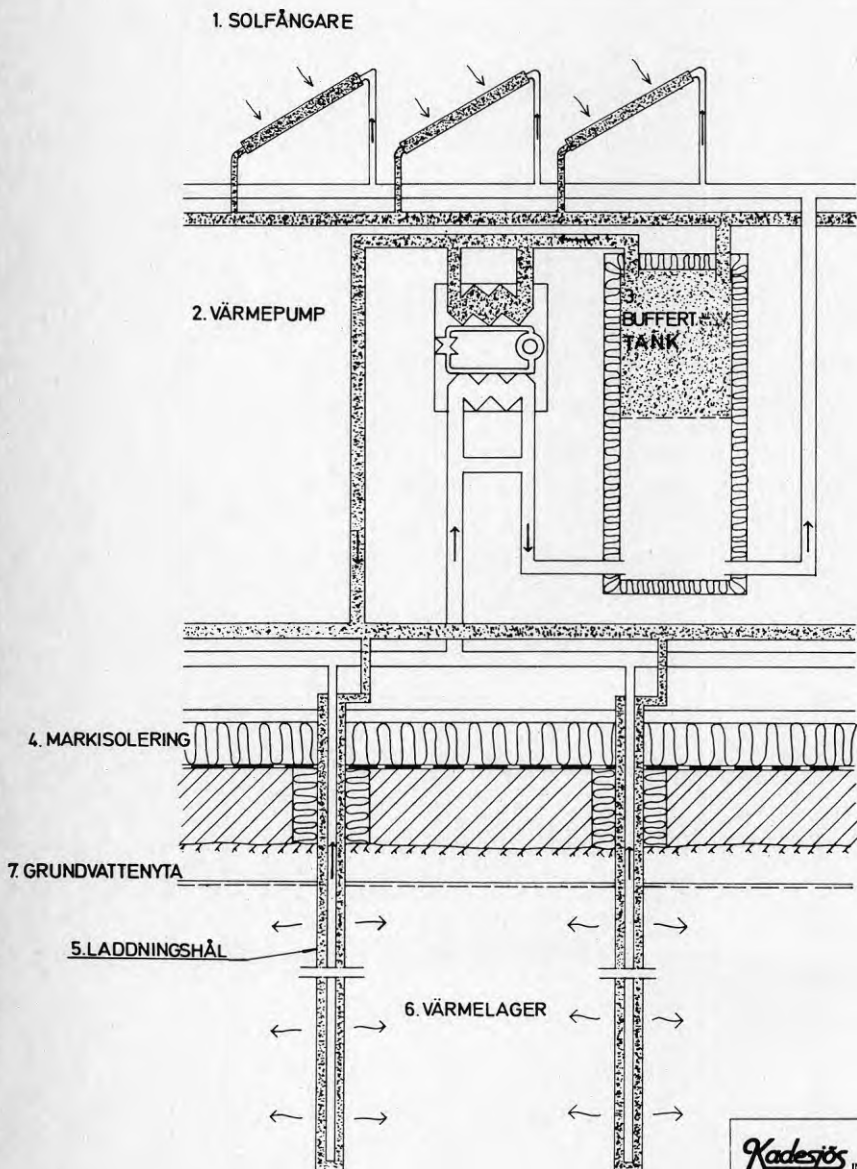
För att värmeförlusterna skall bli låga måste lagrets överyta i marken både värmeisoleras och diffusionstätas.


5. LADDNINGSHAL

Värmet från det uppvärmda varmvattnet överförs till berget via vertikalt borrarade hål i berggrunden, längd 50-150 m, diameter 11,5 cm.

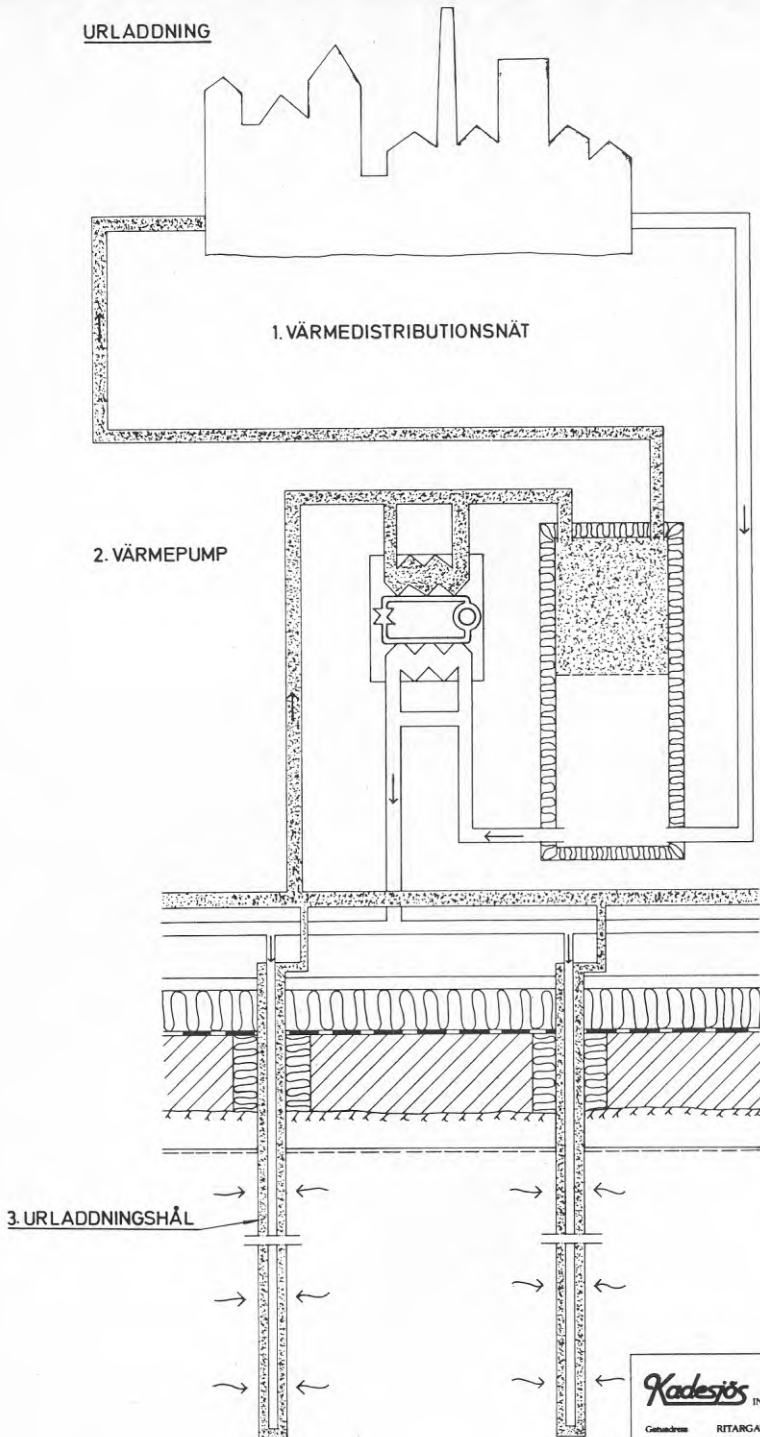
Hålen är tätt infodrade mot omgivande berg och försedda med ett centralt isolerat rör, som möjliggör vattencirkulation längs hålet.


Medeltemperaturen i berget varierar från ca 70°C efter laddning till ca 30°C efter urladdning.



 Kadesjö INGENJÖRSBYRÅ AB			SÄSONGSLAGRING AV VÄRME I BERG	
			PRINCIPFÖRÄNDE LADDNING	
Gatuadress	RITARGATAN 2 VÄSTERÅS			
Postadress	BOX 3056 720 03 VÄSTERÅS			
Telefon	021-43 74 10			
VÄSTERÅS	1981-01-15		SKALA	
RITAD	KONSTRUERAD	GRANSKAD	ARBETSNR	RITNINGSNR
			3466	

URLADDNING



 INGENJÖRSBYRÅ AB Gataadress RITARGATAN 2 VÄSTERÅS Postadress BOX 3036 720 03 VÄSTERÅS Telefon 021-13 74 10			SÄSONGLAGRING AV VÄRME I BERG	
			PRINCIPFÖRÄNDE URLADDNING	
VÄSTERÅS	1981-01-15	SKALA		
RITAD	KONSTRUERAD	GRANSKAD	ARBETSNR	RITNINGSNR
			3466	

6. VÄRMELAGER

Värme tillföres och lagras i berggrunden via laddningshålen. För att hålla lagringsförlusterna låga måste lagret vara förhållandevis stort. Medeltemperatur laddad ackumulator ca 70°C. Medeltemperatur urladdad ackumulator ca 30°C.

7. GRUNDVATTENYTAN

inom lagret hålls konstant genom pumpning eller vid behov infiltrering i yttre randhål. Härigenom förhindras grundvattenströmningen genom lagret och därav uppkomma lagringsförluster.

URLADDNING

1. VÄRMEDISTRIBUTIONSNET

Uppvämt vatten från värmelagret distribueras direkt eller via värmepump till ett fjärrvärmenät

utgående temperatur ca 65°C
returtemperatur ca 35°C

2. VÄRMEPUMP

Värmepumpen kopplas in när utgående vattentemperatur från lagret ej räcker till för aktuellt värmebehov. Temperaturnivån i utgående vatten höjes härmed till erforderlig nivå.

3. URLADDNINGSHAL

Vatten värms upp av den uppvärmda bergvolymen genom cirkulation i de vertikala hål som tidigare använts för inlagring av värme.

3.2 Detaljutförande

3.2.1 Berggrunden

Lagret bör placeras i plan terräng och med bergytan nära markytan.

Inga speciella krav ställes på bergkvaliteten. Det är dock en viss fördel om berget inte är alltför sprickigt. För att grundvattenströmningen skall bli minimal genom lagret måste vid lagrets horisontella ränder installeras pumpbrunnar på avstånd som bestäms av bergets täthet där grundvattenytan kan kontrolleras. Genom tillförsel eller pumpning av vatten hålles denna konstant.

För de undersökta ackumulatorerna har förutsatts att berget består av normalt sprickig gnejs eller granit, vilket ger följande bergkonstanter.

Värmeledningskoefficient $\sigma_b = 3,5 \text{ W/m.grad}$

Värmekapacitet $C_b = 2,16 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3 \text{ grad}$.

Temperaturhöjning i ackumulatören under laddningsperioden
 $\Delta T = 40^\circ\text{C}$

$Q = 24 \text{ kWh/m}^3 \text{ berg}$.

Pumpbrunnar antages placerade på c/c 25 m längs ränderna. Vidare förutsättes ackumulatorns överyta avjämnad med ett jordlager 0-2 m tjockt.

3.2.2 Cirkulationshål för laddning och urladdning

Cirkulationshål \varnothing 115 mm utföres med 4 1/2" sänkborrhustrustning till ett djup av 50-150 m.

Med denna utrustning innehålles följande borrhåstoleranser:

Avvikelse i vertikal led: 10 mm/m

Avvikelse borrhåsdiameter: max -5 mm.

Före borrning avtas eventuellt matjordslager och markytan avjämnas.

Borrningen utföres via ett 250 mm foderrör av betong som först föres ner till bergöverytan men om denna ligger ytligt minst 1,0 m.

Borrhålen infodras med plaströr \varnothing 95 mm typ WIRSBO PEX med förstärkt försluten botten. Dessa levereras i 10 m:s längder försedda med sänkvikter. Rören fylles med vatten och föres under kontinuerlig skarvning ner i borrhålen. Grundvattenytan i magasinet förutsetts ligga nära bergöverytan varför tryckpåkänningen på röret blir liten. Ett inre isolerat kopparrör \varnothing 18 mm monteras i mitten av foderröret. Utrymmet mellan betongrör och plaströr isoleras i markytan med rörsålar av hård mineralull. Vid markytan avslutas foderrör och inrerör i en gemensam koppling. Se bilaga 2.

Avståndet mellan hålen har satts till 3,0 m, vilket enligt beräkningen kap 7 ger ett tillräckligt snabbt in- och urladdningsförlopp.

3.2.3 Isolering av markytan

Markytan avjämnas med grus med fall mot ränderna. Ytan belägges med en ångspärr av skarvklustrad plastfolie för att förhindra värmeförluster genom avdunstning från ackumulatorn.

På ångspärren utföres en isolering med 15 cm cellplast som göres tät och körbar genom asfaltbeläggning.

En dylikt yta lämpar sig väl som uppställningsyta för solfångare. Skall yta användas för annan bebyggelse måste en anpassning göras för de laster som då påföres.

3.2.4 Rörsystem mellan hål och bufferttank

Rörsystemet ovan mark som förbinder bufferttank och hål är uppbyggt i moduler om 144 hål/modul. Se bilaga 2. I systemet finns expansionstank. Rörsystemet är utfört av PEX-rör i dimensioner mindre än DN 1235.

Ledningarna understöds med träpallar. PEX-rören understöds med skenor av bockad plåt eller läggs på kabelstegar.

Rörsystemet förses med reglerventiler med mätuttag så att flöden kan inregleras för varje hålpar och varje grenledning.

Rörledningarna isoleras med mineralull och asfaltpapp typ takpapp för värmeförluster och mot nederbörd.

3.2.5 Bufferttank

Den tillförda värmen till lagret är ej kontinuerlig. Solen t ex avger sin värme till markytan med mycket varierande intensitet allt efter tidpunkt på dygnet och hur klar himlen är.

Bergets förmåga att under en viss tid uppta en viss mängd energi från cirkulationshålen är beroende av bl a avstånden mellan cirkulationshålen. Mindre hålavstånd ger större värmeupptagningsförmåga men också högre anläggningskostnad.

Genom att utnyttja en bufferttank där den energi som inte omedelbart hinner tas upp eller avges mellanlagras hålles anläggningskostnaden på en optimal nivå. Bufferttanken skall kunna mellanlagra 2/3 av den under ett dygn maximalt tillförda eller uttagna energin.

a) Dimensionering för max tillförd energi

Bufferttankens volym kan bestämmas om man känner till hur stor del av den under lagringssäsongen totalt tillförda energin som maximalt kan komma under ett dygn.

Genom mätningar gjorda i Älvkarleby 1978 på solinstrålning, se bilaga 3, får man en uppfattning om dessa förhållanden.

Medeleffekt Juli	361 W/m ²
" Augusti	285 W/m ²
" September	175 W/m ²
Medelvärde Juli-September:	273 W/m ²
Medeleffekt max.dygn (29 juli):	470 W/m ²

Medelvärdet Juli-September antages även gälla för April-Juni och medeleffekten blir under lagringssäsongen 273 W/m².

Följande samband antages nu gälla:

$$\frac{Q_B}{Q} = \frac{Q_{SF}^{max} \cdot \frac{2}{3}}{Q_{SF}} = \frac{Q_{SI}^{max} \cdot \frac{2}{3}}{Q_{SI}}$$

Q_{SI} = Totalt under lagringssäsongen inkommande energi från solen/m².

Q_{SI}^{max} = Maximalt under ett dygn inkommande energi från solen/m².

Q_{SF} = Totalt under lagringssäsongen inlagrad energi från solfångare/m².

Q_{SF}^{max} = Maximalt under ett dygn inlagrad energi från solfångare.

Q = bergackumulatorns lagringskapacitet kWh

Q_B = bufferttankens kapacitet kWh.

Med en 5 månaders lagringssäsong och med solinstrålningsvärden enligt ovan erhålles följande förhållande mellan berg och buffertlagrets kapacitet:

$$Q_B = \frac{470 \cdot 24 \cdot \frac{2}{3}}{273 \cdot 24 \cdot 30 \cdot 5} = \frac{1}{131} \approx \frac{1}{130}$$

$$Q_B = \frac{Q}{130}$$

Med ett $\Delta T = 30^\circ\text{C}$ i bufferttanken och $\Delta T = 40^\circ\text{C}$ i berget kan bufferttankens volym beräknas:

V_B = volym buffert.

V_{BL} = volym berglager.

C_b = värmekapacitet berg

C_v = värmekapacitet vatten.

$$Q = 40 \cdot C_b \cdot V_{BL}$$

$$V_B = \frac{Q_B}{30 \cdot C_v} = \frac{Q}{130 \cdot 30 \cdot C_v} = \frac{40 \cdot C_b \cdot V_{BL}}{30 \cdot C_v \cdot 130}$$

$$C_v = 2 \cdot C_b \cdot \text{ger} \quad V_B = \frac{40 \cdot C_b \cdot V_{BL}}{30 \cdot 2 \cdot C_b \cdot 130} = \frac{V_{BL}}{195}$$

$$V_B = \frac{V_{BL}}{195}$$

b) Dimensionering för max avgiven energi

Beräkning av värmebehovets variation under urladdnings-säsongen 16 september - 14 april fås genom jämförelse med statistik som erhållits från Tekniska Verken i Västerås, se bilaga 4.

Från denna fås följande värden:

Max. dygnsförbrukningen vecka 38-15	14424 MWh
Med. dygnsförbrukningen vecka 38-15	7739 MWh
Totalförbrukningen under vecka 38-15	1625180 MWh

Borrhålsackumulatorns erforderliga max dygnseffekt och lagringskapacitet antages nu ha samma relation som max. dygnsförbrukningen och totalförbrukning i Västerås kommun.

Samma samband som för inlagrad energi kan ställas upp:

$$\frac{Q_B}{Q} > \frac{Q_{\text{max FB}} \cdot \frac{2}{3}}{Q_{\text{FB}}} = \frac{Q_{\text{V-AS}} \cdot \frac{2}{3}}{Q_{\text{V-AS}}} = \frac{14424 \cdot \frac{2}{3}}{1625180} = \frac{1}{169}$$

$$Q_B > \frac{Q}{169}$$

$Q_{\text{V-AS}}$ = Totalförbrukning energi i Västerås under V38-15.

Q_{V-AS}^{max} = Max. dygnsförbrukning energi i Västerås under V 38-15 MWh.

Q_{FB} = Totalt urladdad energi ur bergackumulatorm V38-15 MWh

Q_{FB}^{max} = Max. urladdad energi ur bergackumulatorm under ett dygn V38-15

Med ett $\Delta T = 30^{\circ}C$ i bufferttanken och $\Delta T = 40^{\circ}C$ i berget blir

$$V_B = \frac{C_b \cdot VBL \cdot 40}{2C_b \cdot 169 \cdot 30} = \frac{VBL}{253} < \frac{VBL}{195}$$

Inladdningsskedet är alltså dimensionerande för bufferttankens storlek.

3.2.6 Värmepump

Inkommande respektive utgående vattentemperatur vid laddning respektive urladdning kan höjas genom att värmepump kopplas in. Härigenom uppnås flera fördelar:

- a) Vid lagring av solenergi kan en större del av den infallande solenergin lagras

För att solfångarnas verkningsgrad skall vara hög måste utgående temperatur hållas låg. Om lagrets temperatur är högre kan vissa tider ingen inlagring ske. Med värmepump kan den utgående vattentemperaturen höjas till erforderlig nivå innan inlagring sker.

På samma sätt kan vid urladdning temperaturen på från ackumulatorm utgående vatten höjas när så erfordras.

- b) Mindre erforderliga dimensioner på ledningsnätet

Vid värmedistribution under urladdningsskedet kan, då effektefterfrågan är stor, utgående vattentemperatur höjas. Fjärrvärmenätet kan härigenom vid konstant returtemperatur arbeta med mindre flöden varför erforderlig dimension på ledningsnätet blir mindre.

- c) Ökad lagringskapacitet

Genom höjning av ingående vattentemperatur vid laddning kan värmeackumulatorms max. temperatur höjas. På samma sätt genom höjning av utgående vattentemperatur vid urladdning kan ackumulatorms kapacitet ökas.

Följande dimensioneringskriterie för värmepumpen har bedömts realistisk.

Värmepumpen skall:

- a) Vid max. laddningseffekt höja temperaturnivån på inkommande vatten till bergackumulatorm $10^{\circ}C$, vid medeleffekt $20^{\circ}C$ och vid min. effekt $40^{\circ}C$.
- b) Vid max. urladdning höja temperaturnivån på utgående vatten till fjärrvärmenätet $20^{\circ}C$.

Beräkning av erforderlig värmepumpeffektLaddning:

e_p = erforderlig effekt värmepump (MW).

ΔT_p = temperaturhöjning över värmepump.

e = laddningseffekt.

\bar{e} = medelladdningseffekt.

e^{\max} = max. dygsladdningseffekt.

e^{\min} = min. dygsladdningseffekt.

ΔT_s = temperaturhöjning över solfångare.

$$e_p = \frac{e \cdot \Delta T_p}{\Delta T_s}$$

$$\bar{e} = \frac{Q}{5 \cdot 30 \cdot 24} \quad (5 \text{ mån. laddningssäsong})$$

$$e^{\max} = \frac{470}{273} \cdot \bar{e} \quad (\text{se 3.2.5, a})$$

$$e^{\min} = \frac{80}{273} \quad (\text{se tabell bilaga 3})$$

$$\Delta T_s = 20^\circ\text{C}$$

$$e_p > \begin{cases} e^{\max} \cdot \frac{10}{20} = \frac{470 \cdot 10}{273 \cdot 20} \cdot \bar{e} = 0,86 \bar{e} \\ \bar{e} \cdot \frac{20}{20} = \bar{e} \\ e^{\min} \cdot \frac{40}{20} = \frac{80 \cdot 40}{273 \cdot 20} \cdot \bar{e} = 0,59 \bar{e} \end{cases}$$

$$e_p > \bar{e} = \frac{Q}{3600}$$

$$Q = 10.000 \text{ MWh} \rightarrow e_p = \frac{10.000}{3.600} = 2,78 \text{ MW}$$

$$Q = 25.000 \text{ MWh} \rightarrow e_p = \frac{25.000}{3.600} = 6,94 \text{ MW}$$

$$Q = 50.000 \text{ MWh} \rightarrow e_p = \frac{50.000}{3.600} = 13,9 \text{ MW}$$

Urladdning

\bar{e} = medel urladdningseffekt.

e^{\max} = max. dygNSURLaddningseffekt

ΔT_d = max. temperaturdifferens i fjärrvärmenät = 30°C

$$\bar{e} = \frac{Q}{7 \cdot 30 \cdot 24} \quad (7 \text{ månaders urladdningssäsong})$$

$$e^{\max} = \bar{e} \cdot \frac{14424}{7739} = 1,86 \cdot \bar{e} \quad (\text{Se 3.2.5, b})$$

$$ep = e^{\max} \cdot \frac{\Delta T_p}{\Delta T_d} = 1,86 \cdot \frac{Q}{7 \cdot 30 \cdot 24} \cdot \frac{\Delta T_p}{\Delta T_d}$$

$$\Delta T_p = 20^\circ\text{C} \quad \Delta T_d = 30^\circ\text{C}$$

$$Q = 10.000 \text{ MWh} \rightarrow ep = \frac{10.000}{4065} = 2,46 \text{ MW}$$

$$Q = 25.000 \text{ MWh} \rightarrow ep = 2,46 \cdot 2,5 = 6,15 \text{ MW}$$

$$Q = 50.000 \text{ MWh} \rightarrow ep = 2,46 \cdot 5 = 12,3 \text{ MW}$$

Laddningsskedet dimensionerande.

3.2.7 Styrssystem

a) Laddning

Beräkning av flöde och temperatur mellan solfångarkretsen och bufferttank

Vattenflödet till solfångarna q_s^{in} bestäms så att en konstant temperaturstegring ΔT_s uppnås över dessa. Bestämning av ΔT_s beror på typ av solfångare och andra för närvarande ej kända faktorer. Ett realistiskt värde på ΔT_s har i den fortsatta behandlingen satts till 20°C .

Framledningstemperaturen för solfångarna T_s^{in} väljes så att optimal verkningsgrad uppnås för dessa. Låg temperatur vid svag solinstrålning, högre temperatur vid god instrålning.

Vattnet från solfångarna mellanlagras i bufferttanken eller föres direkt ner i bergackumulatören och kyls av.

Bestämning av flöde och temperatur mellan bergackumulatören och bufferttank

Vattnet till bergackumulatören tas från bufferttanken.

Varje dygn bestäms hur mycket volymen varmt vatten i bufferttanken ökat eller minskat, ΔV_b

Flödet q_b^{in} ökas eller minskas nu med $\Delta q_b^{\text{in}} = \frac{\Delta V_b}{24} / \text{tim}$

Det varma vattnet måste kylas av i ackumulatören, så att returtemperaturen ej blir högre än T_s^{in} annars sjunker solfångarnas verkningsgrad.

Har utgående vatten från ackumulatören för hög temperatur uppnås inte detta.

Värmepumpen måste då kopplas in för att kyla utgående vatten från ackumulatören så att önskvärt temperaturfall erhålles. Värmen från denna kylning utnyttjas för att höja framledningstemperaturen till ackumulatören.

b) UrladdningBestämning av flöde och temperatur mellan värmedistributionsystem (fjärrvärmenät) och bufferttänk

Vattenflödet i fjärrvärmenätet bestäms så att vid normal förbrukning en konstant temperaturdifferens ΔT_d uppnås mellan framledningstemperatur T_d^{in} och returtemperaturen T_d^{retur} . Flödet ökar alltså vid ökad energiförbrukning.

Värdet på ΔT_d och T_d^{in} bestäms av de enskilda energiabbonenternas värmesystem.

Värmesystem som arbetar med låg framledningstemperatur och därigenom lågt T_d^{in} är önskvärt men medför större radiatorytor och därigenom högre kostnader på värmedistributionsidan. En realistisk kompromiss bedöms vara att välja värmesystem som arbetar med fram- respektive returtemperatur på 55 respektive 35°C. Härigenom kan T_d^{in} bestämmas till 60°C och T_d^{retur} till 40°C. Vid högre förbrukning höjes T_d^{in} .

Bestämning av flöde och temperatur mellan bergackumulator och bufferttänk

Varje dygn konstateras om volymen varmt vatten i bufferttanken ökat eller minskat, ΔV_b

Flödet q_b^{in} ökas eller minskas nu med

$$\Delta q_b^{in} = \frac{\Delta V_b}{24}$$

Om vid detta flöde framledningstemperaturen till bufferttanken är lägre än T_d^{in} kopplas värmepumpen in.

Framledningstemperaturen höjes härigenom till T_d^{in} genom att returtemperaturen på vattnet från bufferttanken till bergackumulatören sänkes.

Temperaturdifferensen mellan bergackumulatören och urladdningsvatten kommer därför att öka, vilket gör att urladdningseffekten ökar.

T_d^{in} antages vid medelförbrukning vara 60°C och höjes vid ökad förbrukning till max 70°C.

4 KOSTNADSKALKYL INGAENDE KOMponenter

För att bestämma anläggningskostnaden för lager av denna typ har lagret delats upp i ett antal olika komponenter som å-prissatts.

Prissättningen är baserad dels på uppgifter från olika leverantörer och entreprenörer och dels på kalkylverk och egna detaljkalkyler och grundar sig på en ackumulatorstorlek av 10.000 MWh.

Vid större lager har å-priserna sänkts något.

Dessa å-priser används sedan i kapitel 5 för att beräkna totalkostnaden för olika lageralternativ.

4.1 Berggrund

Bergackumulatören antages förlagd på sådan mark som ej ämnas för bebyggelse. Markkostnaden antages vara jämförlig med skogs- eller åkerbruksmark med byggnadsförbud nära stad.

Markkostnad	2:- /m ²
Borrhål för pumpbrunn	80:- /m
Pump inkl. styrutrustning	2.500:- /pumpbrunn

4.2 Cirkulationshål för laddning och urladdning

Borrkostnad ø 115 m	60:- /m
Foderrör ø 95 mm material	40:- /m hål
Foderrör ø 95 mm montage	7:50/m hål
Isolering innerrör ø 18 mm material	10:- /m hål
Isolering innerrör ø 18 mm montage	2:50/m hål
Betongrör och isolering av foderrör vid markytan	400:- /hål

4.3 Isolering av markytan

Borttagning av matjordslager	5:- /m ²
Avjämning och avgrusning av markytan	15:- /m ²
Ångspärr	10:- /m ²
15 cm cellplast	40:- /m ²
Asfaltbeläggning inkl. bärlager	40:- /m ²

4.4 Rörsystem mellan hål och buffert

Kostnader för komplett rörinstallation ovan mark för en 144 håls modul beräknas till 195.000:-.

Utförandet framgår av bilaga 2.

Utslaget på alla hål ger det en kostnad av	1.350:- /hål
--	--------------

4.5 Bufferttank

Isolerad tank	200:- /m ³
Styrsystem 10% av tankkostnad	20:- /m ³

4.6 Värmepump

Det finns för närvarande på grund av bristande efterfrågan ej värmepumpar i standardutförande framtagna som är anpassade för aktuella temperaturnivåer. Någon teknisk svårighet att göra denna anpassning finns dock ej. Detta gör det svårt att få fram en väl underbyggd kalkyl för värmepumpen. Med ledning av de förfrågningar som gjorts torde dock en komplett värmepump med byggnad och installation kunna kalkyleras till ca 700:-/kW installerad effekt. Då förutsetts att efterfrågan på stora värmepumpar ökat med åtföljande produktionsökning, konkurrens och därav prispress.

I kalkylen kommer ej driftkostnaden för värmepumpen i form av drivmedel, el eller dieselolja, att ingå, då denna ej på ett avgörande sätt bedöms påverka kalkylen. Detta förutsätter

att i stort sett all externt tillförd energi till värmepumpen i form av dieselolja eller el kan återanvändas antingen genom tillförsel till bergackumulator under sommar eller till fjärrvärmenätet under vinter.

5 BERÄKNING AV ANLÄGGNINGSKOSTNAD FÖR ALTERNATIVA LAGERUT-FÖRÄNDE

5.1 Lageralternativ 1. Total ackumulatorkapacitet ca 12.000 MWh

5.1.1 Mängdbeskrivning alt. 1

Lagervolym	500.000 m ³
Lageryta	10.000 m ²
Håldjup	52 m
c/c-avstånd hål	3 m
Antal hål $\frac{10.000}{3 \cdot \frac{3}{2} \cdot \sqrt{3}}$	1.283 hål

Lagervolym bufferttank	
$\frac{500.000}{195}$	2.600 m ³
c/c pumpbrunnar	25 m
Antal pumpbrunnar	12 st

5.1.2 Kostnadsberäkning alt 1

Markkostnad

Tomtkostnad	25.000 m ² å	2:-/m ²	50.000:-
Borrning för pumpbrunnar	120 m å	80:-/m	9.600:-
Pump och ledningar	12 st å	2.500:-/st	30.000:-

Cirkulationshål

Borrkostnad		60:-/m	
Foderrör ø 95 mm		47:50/m	
Innerrör ø 18 mm		<u>12:50/m</u>	
	66.716 m å	120:-/m	8.005.920:-
Betongrör inkl. isolering	⁸ 1.283 st å	400:-/st	513.200:-

Markisolering

Matjordsavtagning		5:-/m ²	
Avjämning och avgrusning av mark		15:-/m ²	
Ångspärr		10:-/m ²	
Isolering		40:-/m ²	
Asfaltbeläggning		<u>40:-/m²</u>	
	10.000 m ² å	110:-/m ²	1.110.000:-

Rörssystem mellan hål och buffert

VVS-installation ovan mark	1.283 hål å	1.350:-/st	<u>1.732.050:-</u>
Transport			11.450.770:-

		Transport	11.450.770:-
<u>Bufferttank</u>			
Isolerad tank		200:-/m ³	
Styrsystem		<u>20:-/m³</u>	
	2.600 m ³ å	220:-/m ³	572.000:-
<u>Värmepump</u>			
Pump inkl. byggn.	3.000 kW å	700:-	2.100.000:-
Projektering och administration			500.000:-
Initial uppvärmning från 8°C till 30°C			
<u>10.000 · $\frac{22}{40}$</u>			<u>550.000:-</u>
Total anläggningskostnad		<u>Kronor</u>	<u>15.172.770:-</u>

Kalkylen är baserad på kostnadsläget i December 1980.

I kalkylen ingår ej mervärdesskatt.

5.2 Lageralternativ 2. Total ackumulatorkapacitet ca 30.000 MWh

5.2.1 Mängdbeskrivning alt 2.

Lagervolym		1.250.000 m ³
Lageryta		12.500 m ²
Håldjup		102 m
c/c-avstånd hål		3 m
Antal hål	<u>12.500</u>	1.604 hål
	$2 \cdot \frac{3}{2} \cdot \sqrt{3}$	

Lagervolym bufferttank		
<u>1.250.000</u>		6.500 m ³
195		
c/c pumpbrunnar		25 m
Antal pumpbrunnar		18 st

5.2.2 Kostnadsberäkning alt 2.

Markkostnad

Tomtkostnad	25.000 m ² å	2:-/m ²	50.000:-
Borrning för pumpbrunnar	180 m å	80:-/m	14.400:-
Pump och ledningar	18 st å	2.500:-/st	<u>45.000:-</u>
			109.400:-

Cirkulationshål

Borrkostnad		58:-/m	
Foderrör ø 95 mm		46:-/m	
Innerrör ø 18 mm		<u>11:50/m</u>	
	163.608 m å	115:50	18.896.724:-
Betongrör inkl. isolering	1.604 st å	400:-	641.600:-

Markisolering

Matjordsavtagning		5:-/m ²	
Avjämning och avgrusning av mark		15:-/m ²	
Ångspärr		10:-/m ²	
Isolering		40:-/m ²	
Asfaltbeläggning		<u>40:-/m²</u>	
	12.500 m ² å	110:-/m ²	1.375.000:-

Rörssystem mellan hål och buffert

VVS-installation ovan mark	1.604 hål å	1.300:-/hål	<u>2.085.200:-</u>
		Transport	23.107.924:-

		Transport	23.107.924:-
<u>Bufferttank</u>			
Isolerad tank		190:-/m ³	
Styrsystem		<u>19:-/m³</u>	
	6.500 m ³ å	209:-/m ³	1.358.500:-
<u>Värmepump</u>			
Pump inkl. byggn.	7.000 kW å	700:-	4.900.000:-
Projektering och administration			1.000.000:-
Initial uppvärmning från 8 ⁰ C till 30 ⁰ C			
$\frac{25.000 \cdot 22}{40} \cdot 100:-$			<u>1.375.000:-</u>
Total anläggningskostnad		<u>Kronor</u>	<u>31.741.424:-</u>

Kalkylen är baserad på kostnadsläget i December 1980.

I kalkylen ingår ej mervärdesskatt.

5.3 Lageralternativ 3. Total ackumulatorkapacitet ca 60.000 MWh

5.3.1 Mängdbeskrivning alt 3

Lagervolym	2.500.000 m ³
Lageryta	25.000 m ²
Håldjup	102 m
c/c-avstånd hål	3 m
Antal hål <u>25.000</u>	3.208 hål
	$3 \cdot \frac{3}{2} \cdot \sqrt{3}$
Lagervolym bufferttank	12.900 m ³
<u>2.500.000</u>	
195	
c/c pumpbrunnar	25 m
Antal pumpbrunnar	25 st

5.3.2 Kostnadsberäkning alt 3

Markkostnad

Tomtkostnad	25.000 m ² å	2:-/m ²	50.000:-
Borrning för pumpbrunnar	250 m å	80:-/m	20.000:-
Pump och ledningar	25 st å	2.500:-/st	<u>62.500:-</u>
			132.500:-

Cirkulationshål

Borrkostnad		57:-/m	
Foderrör ø 95 mm		45:-/m	
Innerrör ø 18 mm		<u>11:-/m</u>	
	327.216 m å	113:-/m	36.975.408:-
Betongrör inkl. isol.	3.208 st å	400:-	<u>1.283.200:-</u>

Markisolering

Matjordsavtagning		5:-/m ²	
Avjämning och avgrusning av mark		15:-/m ²	
Ångspärr		10:-/m ²	
Isolering		40:-/m ²	
Asfaltbeläggning		<u>40:-/m²</u>	
	25.000 m ² å	110:-/m ²	<u>2.750.000:-</u>

Rörssystem mellan hål och buffert

VVS-installation ovan mark	3.208 hål å	1.275:-/st	<u>4.090.200:-</u>
		Transport	45.231.308:-

		Transport	45.231.308:-
<u>Bufferttank</u>			
Isolerad tank		180:-/m ³	
Styrsystem		18:-/m ³	
	12.900 m ² å	198:-/m ³	2.554.200:-
<u>Värmepump</u>			
Pump. inkl. byggn.	14.000 kW å	700:-	9.800.000:-
Projektering och administration			1.500.000:-
Initial uppvärmning från 8°C till 30°C			
$\frac{50.000 \cdot 22}{40} \cdot 100:-$			<u>2.750.000:-</u>
Total anläggningskostnad		<u>Kronor</u>	<u>61.835.508:-</u>

Kalkylen är baserad på kostnadsläget i December 1980.

I kalkylen ingår ej mervärdesskatt.

6 BERÄKNING AV INLAGRAD NYTTIG ENERGIMÄNGD

Under kapitel 5 har beräknats anläggningskostnader för ett antal alternativa lager. För att erhålla lagringskostnader måste lagringsförmågan beräknas.

Detta har skett med hjälp av databeräkningar som dels utförts av Johan Claesson och Göran Hellström, Lunds Tekniska Högskola, dels med eget utvecklat dataprogram.

Bedömning av in- och urladdningsförloppet blir vid strikt tillämpning av teoretiska formler mycket omfattande. För att underlätta beräkningarna har en förenklad beräkningsmodell använts.

6.1 Databeräkning utförd med eget utvecklat dataprogram

Med hjälp av teoretiska formler framtagna av Johan Claesson, Lunds Tekniska Högskola, för värmeströmning i aktuell typ av lager har ett dataprogram utvecklats för att beräkna värmeförloppet i ackumulatorn. Denna beräkning tar hänsyn till temperaturgradienter i laddningsvattnet och tillåter även varierande in- och urladdningseffekt. Programmet har dock den begränsningen att ingen hänsyn tas till:

- Vertikal värmeströmning i ackumulatorn (berget).
- Akkumulatorförluster.
- Insvängningsförloppet vid ändrad temperatur i laddningshålet.

6.1.1 Teoretisk beräkningsmodell

Avgiven respektive tillförd energi ΔQ på en sträcka ΔL längs ett cirkulationshål under tiden Δt kan approximativt uttryckas med följande förenklade formel

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = (\bar{T}_v - \bar{T}_b) \times K \Delta L \text{ där}$$

K = konstant som beror av cirkulationshålens invändiga diameter, dess avstånd sinsemellan och bergets värmelägningsförmåga och värmekapacitet.

K kan enligt Johan Claesson vid konstant temperatur längs laddningshålet ges följande värde:

$$K = \frac{2 \pi \lambda}{\ln\left(\frac{D}{d}\right) - \frac{3}{4}}$$

\bar{T}_v = medeltemperaturen på vattnet i cirkulationshålet på sträckan ΔL under tiden Δt

\bar{T}_b = medeltemperaturen i berget längs cirkulationshålet på sträckan ΔL under tiden Δt

6.1.2 Programbeskrivning

Dataprogrammet beräknar stegvis med intervallet Δt , med början från tiden $t = 0$ till tiden $t = t_s$, värdet på T_b och T_v på delsträckorna ΔL längs cirkulationshålen för ett given tillförd eller avgiven värmeeffekt $E(t)$.

Ingående vattentemperatur till ackumulatorn sätts ΔT_s högre än utgående vattentemperatur från ackumulatorn. Ingångstemperaturen

är maximerad till 90°C.

Indata:

- Δt (kW): tidsintervall mellan beräkning av \bar{T}_v och \bar{T}_b
- C_b ($J/m^3 \text{ } ^\circ C$): bergets specifika värmekapacitet.
- λ ($J/m^s \text{ } ^\circ C$): bergets värmeledningstal
- t_s (tim): laddningstid
- L (m): hållängd.
- D (m): c/c-avstånd mellan hål
- d (m): håldiameter
- n : $L / \Delta L$
- E (t): Erforderlig i- eller urladdningseffekt som kan varieras på godtyckligt vis.
- ΔT_s ($^\circ C$): Ökning eller minskning av vattentemperatur efter passage genom solfångare eller fjärrvärmenät.
- T_{b0} ($^\circ C$): Initialtemperatur i ackumulatorn.
- ΔT_b ($^\circ C$): Ökning eller minskning av ackumulatorns medeltemperatur efter i- eller urladdning.

Utdata:

- Q : (kWh/hål) Värmekapacitet per fulladdat hål.
- K : ($W/m \text{ } ^\circ C$) K-värde för ackumulator.

Utskrift vid valda intervall- och tidpunkter av T_b och T_v längs laddningshålet.

6.1.3 Beräkningsförutsättning

Tillförd energi till ackumulatorn antages variera på samma sätt som solintensiteten i Älvkarleby, se bilaga 3.

Uttagen energi från ackumulatorn antages variera på samma sätt som värmeförbrukningen i Västerås, se bilaga 4.

Bergets värmekapacitet: $2,15 J/m^3 \text{ } ^\circ C$

Bergets värmeledningstal: $3,5 J/ms \text{ } ^\circ C$

Övriga ingångsdata framgår av ackumulatorbeskrivningen.

6.1.4 Beräkningsresultat

Beräkning av ackumulatoralt. 1, 2 och 3 har utförts. Vidare har en beräkning utförts för ett modifierat alt 2-utförande där c/c-avstånden mellan hålen ökats till 4 m.

Resultatet framgår av bilaga 6 som visar utskrift av \bar{T}_b och \bar{T}_v efter vissa tidsintervall, under laddning och urladdning.

6.2 Databeräkning utförd av Johan Clæsson och Göran Hellström, Tekniska Högskolan, Lund

Förutsättningar och resultat framgår i detalj av bilaga 5.

Följande sammanfattning kan göras:

Värmetransporten i ett borrhålslager har simulerats med en numerisk modell. Borrhålen penetrerar en bergmassa av granit som täcks av ett moränskikt. På markytan ovanför lagret har en isolering anbringats.

Energien föres till och från lagret med konstant effekt under villkor att temperaturen i borrhålen ej får överstiga 90°C och ej understiga 20°C. Den tillförda energimängden är given. Under den första årscykeln tas ingen energi ut ur lagret. Därefter sker största möjliga uttag som kortvarigt kan upprätthållas under kommande uttagsperioder. Beräkningen förutsätter liten vertikal temperaturdradient i in- och urladdningsvattnet.

Simuleringen omfattar 5 årscyklar. Beräkningsresultaten finns sammanfattade i bilaga 6 tabell 1. För ett röravstånd av 3 meter kan nedan angiven andel av den tillförda energimängden återvinnas:

Volym (m ³)		Tillf.energi (MWh)	Återvunnen energi (MWh)
500.000	83%	12.000	10.000
1.250.000	90%	30.000	27.000
2.500.000	95%	60.000	57.000

Om röravståndet ökas till 4 meter höjs temperaturen på vattnet i borrhålen med omkring 10 grader vid inladdning.

6.3 Sammanfattning av resultatet från båda beräkningsmodellerna

Båda beräkningarna visar att bergackumulatören i de olika versionerna med rimliga vattentemperaturer hinner laddas och urladdas inom de givna tidsramarna. Förutsättning finnes till och med att öka borrhålsavståndet till 4 m.

Göran Hellströms beräkning visar att ackumulatorförlusterna är av rimlig storleksordning, mellan 5-17%, beroende på lagerstorlek.

7 BERÄKNING AV LAGRINGSKOSTNAD

7.1 Förutsättning

Avskrivning och räntekostnader

En ackumulator av denna typ består med undantag för värmepumpen av komponenter som har mycket lång fysikalisk livslängd. Den ekonomiska livslängden torde dock vara kortare eftersom utvecklingen inom energiområdet är snabb. Här har bedömts en avskrivningstid på 30 år som realistisk.

För att beräkna räntekostnaden torde vid kalkyler av detta slag en realränta på 4% vara ett rimligt antagande.

Den årliga avskrivningen regleras så att denna och räntekostnaden tillsammans blir en fast årskostnad under hela anläggningens livstid (fast annuitet). Med insatta värden enligt ovan blir denna kostnad 5,8% på anläggningskostnaden.

Drift- och underhållskostnad

Enbart värmepump, bufferttank och rörsystem ovan mark förutsättes behöva underhåll.

För drift och tillsyn antages en halvtids driftingenjörstjänst oavsett ackumulatorstorlek.

Årlig underhållskostnad:

Värmepump	5% av anläggningskostnad
Bufferttank	2% av anläggningskostnad
Rörsystem ovan mark	2% av anläggningskostnad
Årskostnad halvtidstjänst driftingenjör	100.000:-.

Kostnad för drivmedel till värmepump tas ej upp i kalkylen i enlighet med resonemang punkt 4.2.6.

Kostnad för årlig energiförlust i ackumulatorn

Då denna utredning är begränsad till att enbart beräkna lagringskostnad för energi och en uppskattning av själva energikostnaden skulle bli både grov och mycket osäker har det ej visat sig meningsfullt att räkna fram årskostnaden för energiförlusterna i ackumulatorn. Istället anges för varje ackumulatorutförande energiförlusten som en procentsats av ackumulatorns lagringskapacitet.

7.2 Kalkyl

7.2.1 Ackumulatoralternativ 1, Kapacitet 10.000 MWh

Avskrivning och ränta	5,8 100	15.175.000	880.150:-
Underhåll värmepump	5 100	2.100.000	105.000:-
Underhåll bufferttank	2 100	570.000	11.400:-
Underhåll rörsystem ovan mark	2 100	1.730.000	34.600:-
		Transport	1.031.150:-

	Transport	1.031.150:-
Drift och tillsyn		<u>100.000:-</u>
Total årskostnad		1.131.150:-
Total lagringskostnad	$\frac{1.131.150}{10.000.000}$	<u>113:12 kr/MWh</u>
Ackumulatorförlust 17%		

7.2.2 Ackumulatoralternativ 2. Kapacitet 27.000 MWh.

Avskrivning och ränta	$\frac{5,8}{100}$	31.730.000	1.840.340:-
Underhåll värmepump	$\frac{5}{100}$	4.900.000	245.000:-
Underhåll bufferttank	$\frac{2}{100}$	1.400.000	28.000:-
Underhåll rörsystem ovan mark	$\frac{2}{100}$	2.100.000	42.000:-
Drift och tillsyn			<u>100.000:-</u>
Total årskostnad			2.255.340:-
Total lagringskostnad	$\frac{2.255.340}{27.000.000}$		83:53 kr/MWh
Ackumulatorförlust 10%			

7.2.3 Ackumulatoralternativ 3. Kapacitet 57.000 MWh.

Avskrivning och ränta	$\frac{5,8}{100}$	61.900.000	3.590.000:-
Underhåll värmepump	$\frac{5}{100}$	9.800.000	490.000:-
Underhåll bufferttank	$\frac{2}{100}$	2.600.000	52.000:-
Underhåll rörsystem och mark	$\frac{2}{100}$	4.100.000	82.000:-
Drift och tillsyn			<u>100.000:-</u>
Total årskostnad			4.314.200:-
Total lagringskostnad	$\frac{4.314.200}{57.000}$		75:69 kr/MWh
Ackumulatorförlust 5%			

Förstudie etapp 1.

1 INLEDNING

1.1 Problemet

Att via fältförsök utröna om det är tekniskt ekonomiskt möjligt att använda bef. berggrund som ackumulator för säsongsmässig lagring av värme i temperaturintervallet 40-80°C.

Den tänkta värmeackumulatoren skall utgöras av berggrunden vilken från ytan perforeras med vertikala borrhål med visst centrumavstånd. Upp- och urladdning sker via vattencirkulation i dessa hål. Värme lagras genom att vatten varmare än berget cirkuleras, värme avges genom att vatten kallare än berget cirkuleras.

För att förenkla den teoretiska behandlingen antages ackumulatoren vara uppbyggd av ett antal tangerande cylindriska bergstavar med hål i mitten. Ingen värmetransport antages ske mellan inre bergstavar i systemet. Energiförluster kommer enbart att ske vid ackumulators ränder. Projektet avser att i fält simulera förhållandena för en separat inre ackumulator den s k försöksackumulatoren under ett upp- och urladdningsförlopp

Resultatet skall läggas till grund för en ekonomisk och teknisk värdering av denna lagringsteknik.

1.2 Förstudie, etapp 1

Denna förstudie har avsetts att utförligare komplettera den teoretiska och ekonomiska utredning som utfördes i samband med ursprunglig projektansökan.

Förstudien omfattar:

- a) Teoretisk behandling av värmeledningsekvation med anpassning till projektets försöksackumulator. Denna är utförd av docent Clas Blomberg, KTH.
- b) Dataprogram för beräkning av teoretiskt värde på strömning och temperaturer i försöksackumulatoren under ett upp- och urladdningsförlopp.
- c) Teknisk redovisning av försöksackumulator.
- d) Kostnadskalkyl för fältförsök etapp 2 av projektet.

2. TEORETISK BEHANDLING OCH ANPASSNING AV VÄRMELEDNINGSEKVATION TILL FÖRSÖKSACKUMULATORN.

2.1 Inledning

Då jag inte velat och heller inte bedömt det som nödvändigt att belasta docent Blomberg med redigeringsarbete publicerar jag hans teoretiska utredning i ej renskrivet skick. Se bilaga 1.

3 DATAPROGRAM SOM GER TEORETISKA VÄRDEN PÅ STRÖMNING OM TEMPERATUR I FÖRSÖKSACKUMULATORN UNDER ETT UPP- OCH URLADDNINGSFÖRLOPP.

3.1 Programbeskrivning

Temperaturer och flöden beräknas med hjälp av de förenklade formler som Clas Blomberg härlett i sin utredning. Se under punkt 2.0.

Skede 1 och 3, upp- och urladdning

$$T = \bar{T}_0 - T_1(r) e^{-t/\tau_1}$$

där

$$\tau_1 = \frac{r_2^2}{k} f\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$

och

$$T_1 = \frac{\pi \Delta T}{f(4 + 0,13/f^2)} \frac{2}{\pi} \ln\left(\frac{r}{r_1}\right) \left(1 - \frac{1}{4f} \left(\frac{r}{r_2}\right)^2\right) + \frac{0,16}{f} \left(\frac{r}{r_2}\right)^2$$

$$X = r_2/r_1$$

med

$$f(x) = 0,486 \ln x - 0,30$$

$\Delta T = \bar{T}_0 - T_i$, skillnad mellan rörets temperatur och initialtemperatur.

\bar{T}_0 = medelvattentemperatur i skede 1 eller 3.

T_i = initialtemperatur i bergcylindern i skede 1 eller 3.

r_1 = borrhålsradie

r_2 = bergcylinderradie

$\bar{T}_0 = T_0 \pm \frac{\text{delta } T_0}{2}$, - vid laddning, + vid urladdning.

T_0 = ingångstemperatur, vatten

delta T_0 = temperaturdifferens mellan in- och utgående vatten.

Skede 2, viloskede

$$T_m = \bar{T}_0 - (\bar{T}_0 - T_s) 0,975 \left(1 - \frac{0,1}{f}\right)$$

$$\tau_1^{(2)} \approx 0,068 \frac{r_2^2}{k} \left(1 - \frac{5,8}{X_2}\right)$$

T_m = medeltemperatur i bergackumulatorn i övergången mellan skede 1 och 3.

T_s = temperatur vid ytterradie i början av skede 2.

$\tau_1^{(2)}$ = relaxtionstiden för de transienta bidragen

T_m antages inträffa efter ca 2 $\tau_1^{(2)}$.

3.3 Datakörning för olika upp- och urladdningscyklar.

Försöksackumulatorn har tilldelats följande parametervärden:

$$r_1 = 0,15 \text{ m}$$

$$r_2 = 1,5 \text{ m}$$

$$L = 40 \text{ m}$$

För att välja ett optimalt värde på r_1 och r_2 måste värmekällan, sulfångarnas effektkurvor tas i beaktande.

Om fältförsöket visar god överensstämmelse med teorin är avsikten att i etapp 3 av forskningsuppdraget göra en sådan analys.

I bilaga 2 presenteras datorberäkning av ett antal upp- och urladdningscyklar som är aktuella för fältförsöket.

Cykel	T_o	delta T_o	T_i	T_s	T_u	delta T_u	T_a
1	90	5	10	80	35	10	45
2	90	5	44	80	35	10	45
3	60	5	44	50	35	10	45
4	70	5	44	60	35	10	45

4 BESKRIVNING AV FÄLTFÖRSÖK, ETAPP II

4.1 Apparaturställning för fältförsök

Borrhål borras i formation enligt ursprunglig principritning sida 7, fig 3. Avstånd mellan hålen $2 R_2 = 3 \text{ m}$. Håldjup 40 m. På ovansidan täckes med isolering, $k = 0,2 \text{ W/m}^2 \text{ C}^0$.

I hålen placeras foderrör av galv. plåt $\phi 120 \text{ mm}$. Mellan hål och foderrör injekteras. Foderröret förseglas i båda ändar och förses med en inre cirkulationsslang av värmefast plast $\phi 30 \text{ mm}$ i enlighet med principritningens bilaga 3 fig 4. Vidare borras mindre hål i vilka termoelement monteras. Termoelementen anslutes till skrivare som med vissa intervaller registrerar temperaturen.

Installationsschema för foderrör samt reglerutrustning för vattenflödet framgår av ritning bilaga 4.

4.2 Utförande-beskrivning

Vissa möjligheter finns att försöket kan utföras i samarbete med Västerås Kraftvärmeverk

I ett av berghålen tas i samband med borringen bergproven för analys av berggrunden med avseende på spräckighet, permeabilitet etc. Grundvattnenytan kontrolleras.

Mätinstrumenten väderskyddas.

FältförsökUppladdning skede 1

Vatten med tilloppstemperatur T_o tillföres. Flödet regleras så att delta T_o blir konstant. Avläsning av temperatur och flöden sker automatiskt på skrivare. I lämpliga intervaller sker manuell kontroll där ev. oväntade mätvärden analyseras och ev. justeringar utföres. Vid temperatur T_s vid ytterradien avbrytes uppladdningen.

Vila skede 2

Vattenflödet stoppas i 2-5 dagar.

Urladdning, skede 3

Vatten med tilloppstemperatur T_u tillföres. Flödet regleras så att delta T_u blir konstant.

Avläsning lika skede 1.

Då temperaturen i ytterradien sjunkit till T_a avbrytes försöket.

Beroende på hur lång tid denna upp- och urladdningscykel tagit göres nya försökscyklar med andra ingångsdata.

Utvärdering

Uppmätta värden jämföres med teoretiska. Felprocenten uppskattas och analyseras. Formler justeras ev. Tidigare kostnadskalkyl justeras.

5. KOSTNADSKALKYL ETAPP 2

Installationer i mark

Borrkostnad

ϕ 150 mm	280 m \dot{a} 100:-	28.000:-	
ϕ 22 mm	180 m \dot{a} 30:-	5.400:-	
Foderrör av galv plåt ϕ 120 mm	280 m \dot{a} 50:-	14.000:-	
Injektering mellan galv plåt och borrhål	280 m \dot{a} 30:-	8.400:-	
Innerslang av plast ϕ 30 mm	280 m \dot{a} 15:-	4.200:-	
Termoelement inkl. montage	12 st \dot{a} 300:-	3.600:-	
Isolering av mark	80 m ² \dot{a} 50:-	<u>3.200:-</u>	66.800:-
	Transport		66.800:-

	Transport		66.800:-
<u>Installation ovan mark</u>			
Värmerör \varnothing 25 m inkl kopplingar o. isol.	30 m \bar{a} 100:-	8.000:-	
Värmeväxlare	1 st	25.000:-	
Värmemätare	1 st	4.000:-	
Reglerutrustning	1 st	15.000:-	
12-kanals punktskrivare för temperaturgivarna	1 st	10.000:-	
Punktskrivare för värmemätaren	1 st	3.000:-	
Inklädnad av instr.	1 st	<u>5.000:-</u>	70.000:-
<u>Konsultkostnader</u>			
Geoteknisk utvärdering av borrhål		3.800:-	
Projektledning		48.200:-	
Övervakning av fältförsök		16.200:-	
Utvärdering		<u>24.000:-</u>	92.200:-
Datakostnad			2.000:-
Resor och traktamenten			10.000:-
Energikostnad	40.000 Kwh \bar{a} 0,1		<u>4.000:-</u>
	<u>Totalkostnad kronor</u>		<u>245.000:-</u>

Kostnadskalkylen baseras på kostnadsläget augusti 1979. Oklarhet råder i vilken omfattning Kraftvärmeverket i Västerås (KVV) kan hjälpa till med värme och lån av värmeväxlare etc. Kalkylen avser därför alla kostnader utan hänsyn till ev. hjälp från KVV.

6 SAMMANFATTNING

Resultatet av förstudier visar:

- att upp- och urladdningsförloppet teoretiskt är så snabbt att hålantalet i värmeackumulatören kan hållas på en ur ekonomisk synpunkt rimlig nivå.

- b) att utföra fältförsök i liten skala som föreslaget torde på ett snabbt sätt och till förhållandevis låg kostnad ge svar på hur teori och praktik stämmer överens. Vidare får man en viss uppfattning om vad en uppvärmning till 80°C av berget ger för miljömässiga effekter på närmaste omgivning.

Jag anser därför att det skulle vara av stort intresse att genom etapp 2:s fältförsök testa de teoretiska resultaten.

FIG. 1
BERG AKKUMULATOR FÖR SÄSONGSVIS
LAGRING AV SOLENERGI.
PRINCIPFÖRBÄNDE

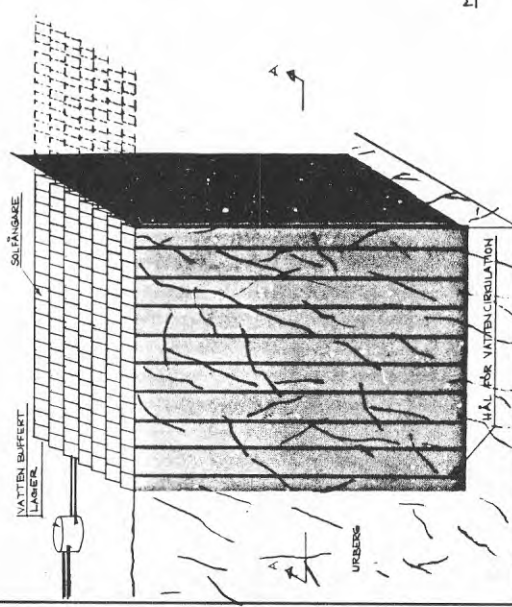
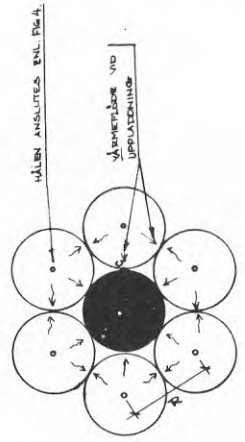


FIG. 3
TEST AKKUMULATOR
SKALA 1:100



FÖR ATT FÖRENLKA DEN TEORETISKA BEHANDLINGEN AV DEN FÖRSTÄMPLADE BERG AKKUMULATOR-ANLÄGGNINGEN, HAR EN AVSTÄMNING AV BERGSTAVAR OCH BERGSTAVARFÖR-SEDDA MED ETT VERTIKALT HÅL LÅNGS CENTRUM VIA VILKET UPP- OCH UURLADDNINGEN SKER GENOM VÄT-TENKRAUMLING.

ENERGI FÖRLUSTENA FÖR AKKUMULATORN KOMMER ATT SKA VIA BÄNDFÖRLUSTER ALLTSA FRAMFÖR ALLT VIA DE YTTRE STAVARNA.

VÄRMEUTBYTET MELLAN DE INRE BERGSTAVARNA AN-TAGES MYCKET BEGRÄNSAD. VÄRJE ENSKILT INRE BERGSTAVARFÖRSEDDA HAR EN BEGRÄNSAD VÄRMEUTBYTTEFÖR-MÖG-LIGHET. FÖR ATT ÖKA VÄRMEUTBYTET HAR EN SEPARAT AKKUMULATOR MED ISOLERAD MANTELVITA.

PROJEKTET AVSER ATT I FÄLT SIMULERA FÖRHÅLLAN-DENA FÖR EN SÄDAN SEPARAT AKKUMULATOR. DETTA UPPNÅS GENOM ATT BORRA OCH GRUPPERA SA HÄR NÄR LÄGGENDE BERG AKKUMULATORER SOM SKALL TESTAS. ÖPPNINGARNA I PRIN-CIP ARRANGERAS ENLIGT FIG 4 KAN SEDAN AKKUMULA-TORN TESTAS UNDER REALISTISKA FÖRHÅLLANDEN OCH EFTERFRÅGADDE TESTVÄRDEN ERHÅLLAS.

FIG. 4
ANSLUTNING BORRHÅL

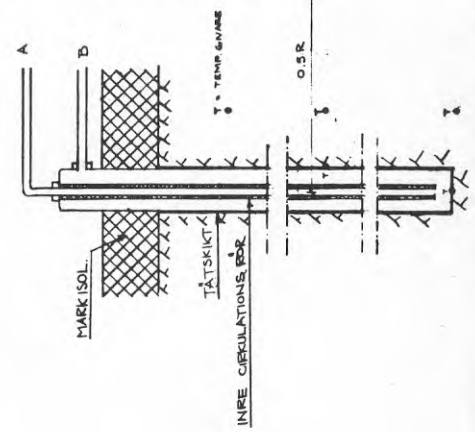
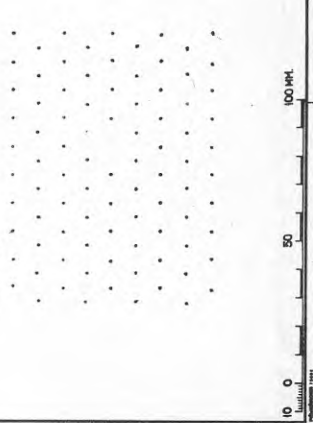


FIG. 2
SNITT A-A



UURLADDNING
B ÅR TILLOPP.
A ÅR RETUR

TILLOPPSTEMPERATUR KONSTANT.
FLÖDET I B REGLERAS SÅ ATT RETURTEMPERA-TUR I A ÅR KONSTANT.

FLÖDET REGISTRERAS PÅ SKRIVARE.
TEMPERATUREN I T-MÄRKA PUNKTER REGISTRE-RAS MED VISSA INTERVALLER.

UURLADDNING AVBRYTES NÅR EN I FÖRVÄG VALD TEMPERATUR I PUNKT C HAR NÅTTS.

UR FÖRSÖKET ERHÅLLES:
MAGASINETS TIDSBEROENDE VÄRMEUPPTAG-NINGSFÖRMÅGA.

UURLADDNING
B ÅR TILLOPP.
A ÅR RETUR

TILLOPPSTEMPERATUR KONSTANT.
FLÖDET I B REGLERAS SÅ ATT RETURTEMPERA-TUR I A ÅR KONSTANT.

FLÖDET REGISTRERAS PÅ SKRIVARE.
TEMPERATUREN I T-MÄRKA PUNKTER REGISTRE-RAS MED NOGEN AVBRYTES NÅR TEMPERATUREN I PUNKT C SKINKIT TILL EN I FÖRVÄG VALD TEMPERATUR.

UR FÖRSÖKET ERHÅLLES:
AV VATTNET UPTAGEN VÄRMEINNEHOUD-AV AKKUMULATOR AVGIVEN VÄRMEINNEHOUD-AV AKKUMULATORFÖRLUST.

MAGASINETS TIDSBEROENDE VÄRMEAVGIV-NINGSFÖRMÅGA.

Kodets INGENJÖRSBYRÅ AB
Göteborg
Kungälv
Torslanda
020374180

SÄSONGSLAGRING AV VÄRME
I BERG
TEST AKKUMULATOR

SKALA
ARBETS-NUMMER
3466

11
RITNINGEN

1978-04-01
1978-04-01

10 0 50 100 MM

BILAGA 3

Solinstrålning i Alvkarleby

Mätningar utförda i Juli - September 1978

Dag	Instrålning W/m ²			Dag	Instrålning W/m ²		
	Direkt	Diffus	Σ:a		Direkt	Diffus	Σ:a
Juli 8	191	135	326	Aug 9	270	130	400
9	209	136	345	10	324	106	430
10	54	47	101	11	304	95	399
11	78	69	147	12	307	113	420
12	276	134	410	13	228	110	338
13	230	114	344	14	149	110	259
14	104	94	198	15	178	115	293
15	222	167	389	16	112	84	196
16	263	147	410	17	295	68	363
17	182	151	333	18	277	73	350
18	243	130	373	19	287	70	357
19	232	152	384	20	280	71	351
20	228	170	398	21	272	95	367
21	242	165	407	22	98	61	159
22	292	171	463	23	129	73	202
23	331	122	453	24	219	59	278
24	184	123	307	25	70	60	130
25	106	95	201	26	58	49	107
26	312	146	458	27	104	72	176
27	302	139	441	28	96	76	172
28	273	145	418	29	306	48	354
29	315	155	470	30	210	72	282
30	306	153	459	31	73	63	136
31	308	137	445	Sept 2	57	49	106
Aug 1	247	134	381	3	43	34	77
2	230	162	392	4	115	81	196
3	179	106	285	5	168	95	263
4	143	119	262	6	47	38	85
5	143	89	232	7	115	80	195
6	57	50	103	8	212	92	304
7	107	98	215	9	109	80	189
8	293	134	427	10	60	46	106

BILAGA 3

Dag	Instrålning W/m ²		
	Direkt	Diffus	Σ:a
Sept 11	173	56	229
12	111	64	175
13	278	128	406
14	41	33	74
15	153	68	221

Redovisade värden är angivna som dygnsmedelvärden.

Tabellvärdena ger för Juli	medeleffekt	351 W/m ²
"	" " Aug. "	285 W/m ²
"	" " Sept "	175 W/m ²
"	" " 29 Juli max.effekt	470 W/m ²

BILAGA 4

Värmeverksbelastning vid Västerås Kraftvärmeverk 1979

Statistik från Tekniska Verken i Västerås

Dag	Förbrukn./tim (10 MWh/tim)	Dag	Förbrukn./tim (10 MWh/tim)	Dag	Förbrukn./tim (10 MWh/tim)
16 sept	16,4	18 okt	21,4	19 nov	25,8
17	14,6	19	21,6	20	28,3
18	14,0	20	20,0	21	29,2
19	14,5	21	23,5	22	24,0
20	15,4	22	27,2	23	22,0
21	16,1	23	26,7	24	26,2
22	16,7	24	27,1	25	24,9
23	16,8	25	28,2	26	24,4
24	16,9	26	30,0	27	31,3
25	18,1	27	29,6	28	31,7
26	15,7	28	28,0	29	26,6
27	18,0	29	30,0	30	28,0
28	18,0	30	30,9	1 dec	25,2
29	18,8	31	31,3	2	20,8
30	20,1	1 nov.	31,1	3	23,8
1 okt	24,2	2	31,2	4	23,9
2	23,5	3	28,9	5	25,6
3	23,3	4	25,0	6	28,5
4	23,6	5	24,1	7	31,7
5	26,7	6	23,7	8	37,4
6	23,9	7	27,0	9	41,1
7	23,5	8	28,7	10	40,8
8	21,8	9	30,5	11	43,2
9	18,7	10	30,7	12	48,5
10	16,5	11	29,2	13	47,1
11	13,6	12	27,2	14	46,4
12	17,4	13	28,0	15	41,8
13	19,7	14	29,5	16	41,3
14	18,5	15	29,2	17	39,0
15	18,1	16	27,9	18	45,9
16	21,8	17	26,9	19	48,5
17	22,2	18	26,0	20	43,1

BILAGA 4

Dag	Förbrukn./tim (10 MWh/tim)	Dag	Förbrukn./tim (10 MWh/tim)	Dag	Förbrukn./tim (10 MWh/tim)
21 dec	39,5	26	54,0	2 mars	30,6
22	33,9	27	55,8	3	28,1
23	27,6	28	47,1	4	29,0
24	27,1	29	41,9	5	28,6
25	28,0	30	45,6	6	28,6
26	28,0	31	48,4	7	30,9
27	29,5	1 febr	43,2	8	30,4
28	29,0	2	40,3	9	30,7
29	28,6	3	42,1	10	31,9
30	00,0	4	50,3	11	32,3
1 jan	54,0	5	52,0	12	32,8
2	49,6	6	52,0	13	34,1
3	49,8	7	41,3	14	35,7
4	51,0	8	43,8	15	38,5
5	54,9	9	41,5	16	44,2
6	43,8	10	38,3	17	48,5
7	34,5	11	38,1	18	44,6
8	34,8	12	43,6	19	37,0
9	34,0	13	56,1	20	34,4
10	41,7	14	58,7	21	32,4
11	39,0	15	60,1	22	32,4
12	39,1	16	59,2	23	31,6
13	34,0	17	51,8	24	29,2
14	34,7	18	42,4	25	27,3
15	40,8	19	36,9	26	30,1
16	43,2	20	36,4	27	26,7
17	41,5	21	38,7	28	28,9
18	41,5	22	37,9	29	27,8
19	42,8	23	38,0	30	29,5
20	40,8	24	34,2	31	28,0
21	37,8	25	33,2	1 april	29,0
22	39,5	26	30,2	2	29,6
23	41,2	27	29,6	3	28,8
24	46,6	28	30,6	4	27,5
25	53,8	1 mars	31,4	5	29,3

BILAGA 4

Dag	Förbrukn./tim (10 MWh/tim)
6 april	29,5
7	26,6
8	25,3
9	25,9
10	26,6
11	24,1
12	20,6
13	22,3
14	26,1

Redovisade värden är angivna som dygnsmedelvärden.

Tabellvärdena ger medelförbrukningen	7739 MWh/dygn
" " max. förbrukningen	14424 MWh/dygn
" " totalförbrukningen	1625180 MWh

SIMULERING AV VÄRMETRANSPORT
I BORRHÄLSLAGER

Göran Hellström

Studien utförd i samarbete med
Håkan Kadesjö, Kadesjös Ingenjörbyrå AB,
Västerås

Februari 1981

Institutionen för matematisk fysik
Lunds Tekniska Högskola
Box 725
220 07 LUND 7

I. INTRODUKTION

Värme avses att lagras i en volym av fast berg. Värmeöverföringen mellan värmebäraren och berget sker via borrhål som penetrerar lagervolymen. Värmet sprids i bergmassan genom värmeledning.

I denna studie simuleras värmelagring i granit under fem årscykler. Tre olika lagervolymer användes. Avståndet mellan rören är 3 eller 4 meter. Temperaturen på det i rören cirkulerande vattnet beräknas. De inmatade och uttagna energimängderna anges.

II. BERÄKNINGSFÖRUTSÄTTNINGAR

II.1 Lagrets utformning och termiska egenskaper

Lagret uppfyller ett cylindriskt område i berget med volymen V , höjden H och radien R . Lagret täcks av ett skyddande moränskikt med tjockleken D . En värmeisolering är placerad på markytan ovanför lagret. Se figur 1.

Berget utgörs av granit med värmeledningsförmågan 3.5 W/mK och värmekapaciteten är $2.16 \text{ MJ/m}^3\text{K}$. Motsvarande värden för moränskiktet är 1.5 W/mK och $2.0 \text{ MJ/m}^3\text{K}$. Isoleringen har värmemotståndet $3 \text{ m}^2\text{K/W}$. Begynnelsestemperaturen i hela området är 8°C . Årstidsvariationer i lufttemperaturen har försumbar inverkan på lager av den storlek som studeras här. Temperaturen vid markytan hålles därför konstant vid 8°C . Den simulerade markvolymens utsträckning utanför lagret är vald så att villkoren vid övriga ränder ej inverkar på resultatet.

Rörens radie är 0.0575 meter.

II.2 Energiutbytet med lagret

Lagringscykeln består av 5 månaders laddning, 1 månads lagring, 5 månaders uttag och 1 månads vila. Under den första cykeln sker inget uttag av energi p.g.a. att det initiiellt kalla berget måste värmas till lagrets arbetstemperatur.

Under laddningsperioden injekteras en energimängd E_{in} med en konstant effekt Q_{in} under villkoret att vattentemperaturen i rören ej får överstiga 90°C . Om denna temperatur uppnås fortsätter laddningen med vattentemperaturen 90°C . Den inmatade effekten reduceras därvid i takt med att temperaturen i lagret stiger. Man eftersträvar att under laddningsperioden injektera en energimängd motsvarande en temperaturhöjning i lagervolymen av 40°C , d.v.s.

$$E_{in} = 40 \cdot C \cdot V \quad \text{J}$$

där C är bergets värmekapacitet och V är lagervolymen. Detta ger en laddningseffekt av

$$Q_{in} = 3.04 \cdot 10^{-12} \cdot C \cdot V \quad \text{MW}$$

Under uttagsperioden önskar man ta ut en energimängd E_{ut} med en konstant effekt Q_{ut} under villkoret att temperaturen i rören ej får understiga 20°C . Om temperaturen sjunker till detta värde fortsätter uttaget med vattentemperaturen 20°C . Uttaget väljes så stort som möjligt under villkor att den fortvarigt kan upprätthållas under kommande uttagsperioder.

II.3 Numerisk modell

Den använda numeriska modellen finns beskriven i referens 1.

En lokal och en global termisk process kan särskiljas vid simulering av värmeflödet i ett borrhålslager. Den lokala processen beskriver förhållandena runt de enskilda rören. Den globala beskriver hur lagret, då lokala variationer "jämnats ut", samverkar med omgivningen. Metoden är avsedd för effektpulser som varar längre än c:a en vecka.

Temperaturfältet i lager och omkringliggande mark beräknas i ett gitter med omkring 1500 punkter. Beräkningstiden för ett fall omfattande 5 årscykler är knappt 30 sekunder (UNIVAC 1100/80).

II.4 Temperaturförhållanden kring enskilda rör

När en konstant effekt förs till eller från lagret när temperaturförloppet kring rören, efter en insvängningstid av c:a 1 vecka, ett kvasistationärt tillstånd där temperaturen T_f i röret och medeltemperaturen T_m i lagret stiger lineärt i tiden [2]. Då effekten är Q , lagervolymer V och bergets värmeledningsförmåga λ kan skillnaden mellan dessa två temperaturer skrivas

$$T_f - T_m = \frac{\ell^2 Q}{\lambda V}$$

Parametern ℓ är en funktion av röravståndet δ och rörets radie R_0 :

$$\ell^2 = \frac{1}{2} R_1^2 \left\{ \ln\left(\frac{R_1}{R_0}\right) - \frac{3}{4} \right\}$$

där

$$R_1 = 0.525 \delta$$

Rören antas vara placerade i knutpunkterna i ett mönster av lik-sidiga trianglar där sidlängden δ är lika med röravståndet.

I dessa beräkningar har övergångsmotståndet för värmeöverföring mellan vattnet i borrhålet och det omgivande berget försumrats. Denna effekt ger en ökad differens mellan vattentemperaturen och medeltemperaturen i lagret. Ändringen ges av

$$T_f^1 - T_f = \frac{R_1^2 Q}{2R_0 V} \cdot m$$

där T_f^1 är den nya vattentemperaturen, R_0 är rörradien och m är övergångsmotståndet ($m^2 K/W$).

III. RESULTAT

Sex fall omfattande tre olika lagervolymer med röravståndet 3 eller 4 meter har simulerats. Givna grunddata samt beräknade uttagna effekter och energimängder är sammanfattade i tabell 1. Ingen energi tas ur lagret under den första cykeln. De beräknade värdena för

uttagen energimängd, drivande temperaturdifferens och effektivitet gäller därför från och med den andra årscykeln.

Temperaturen på vattnet i borrhålen ges i figurerna 2-4. De hel-dragna linjerna gäller för ett röravstånd på 3 meter och de streckade för ett avstånd på 4 meter. Den högre drivande temperaturdifferens som ett större röravstånd ger kan tydligt urskiljas. De minskade borkostnaderna skall vägas mot att inmatningstemperaturen stiger med knappt 10°C .

Förlusterna från lagret till omgivningen är små i förhållande till inmatad och uttagen effekt. En konstant effekt ger därför en vattentemperatur som ökar linjärt i tiden.

IV. SAMMANFATTNING

Värmetransporten i ett borrhålslager har simulerats med en numerisk modell. Borrhålen penetrerar en bergsmassa av granit som täcks av ett moränskikt. På markytan ovanför lagret har en isolering anbringats.

Energien föres till och från lagret med konstant effekt under villkor att temperaturen i borrhålen ej får överstiga 90°C och ej understiga 20°C . Den tillförda energimängden är given. Under den första årscykeln tas ingen energi ut ur lagret. Därefter sker största möjliga uttag som fortvarigt kan upprätthållas under kommande uttagsperioder.

Simuleringen omfattar 5 årscykler. Beräkningsresultaten finns sammanfattade i tabell 1. För ett röravstånd av 3 meter kan nedan angiven andel av den tillförda energimängden återvinnas:

Volym (m^3)	
500,000	83%
1,250,000	90%
2,500,000	95%

Om röravståndet ökas till 4 meter höjs temperaturen på vattnet i borrhålen med omkring 10 grader vid inladdning.

REFERENSER

1. Claesson, J. och Johansson, M., 1979. Continuous heat source model for ground heat storage. Swedish Council for Building Research, Document D34:1980.
2. Claesson, J., 1980. Värmotstånd mellan cylinderregion och centrumrör. Notis 1980/7. Institutionen för matematisk fysik, Lunds Tekniska Högskola, Fack 725, 220 07 Lund 7.

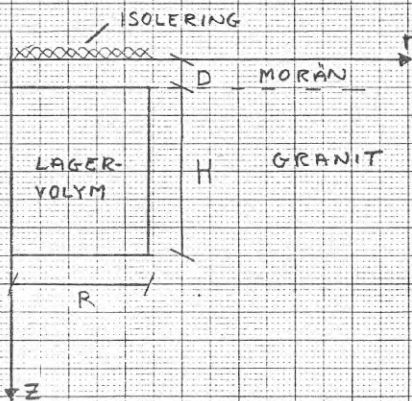
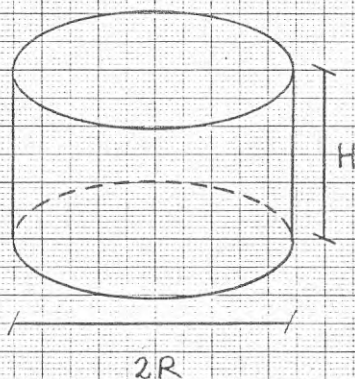
	Volym	Höjd	Radie	Röravstånd	λ	Effekt vid laddning	Effekt vid uttag	Inmatad energi- mängd	Uttagen energi- mängd	Drivande tem- peraturdiffe- rens	$T_f - T_m$ (°C)	Effektivitet
	$V(m^3)$	$H(m)$	$R(m)$	$\delta(m)$	$\lambda(m)$	$Q_{in}(MW)$	$Q_{ut}(MW)$	$E_{in}(GWh)$	$E_{ut}(GWh)$	in	ut	η
1a	$5 \cdot 10^5$	50	56	3	1.78	3.29	2.74	12.0	10.0	6.0	-5.0	0.83
1b	"	"	"	4	2.51	"	"	"	"	11.8	-9.8	0.83
2a	$1.25 \cdot 10^6$	100	63	3	1.78	8.22	7.40	30.0	27.0	6.0	-5.4	0.90
2b	"	"	"	4	2.51	"	"	"	"	11.8	-10.7	0.90
3a	$2.5 \cdot 10^6$	100	89	3	1.78	16.44	15.61	60.0	57.0	6.0	-5.7	0.95
3b	"	"	"	4	2.51	"	15.29	"	55.8	11.8	-11.0	0.93

Tabell 1. Grunddata och beräknade uttagna effekter och energimängder för de fall som simulerats. Den drivande temperaturdifferensen och lagrets effektivitet är angivna. Ingen energi tas ur lagret under den första cykeln.

BORRHÄLSLAGRETS UTFORMNING.

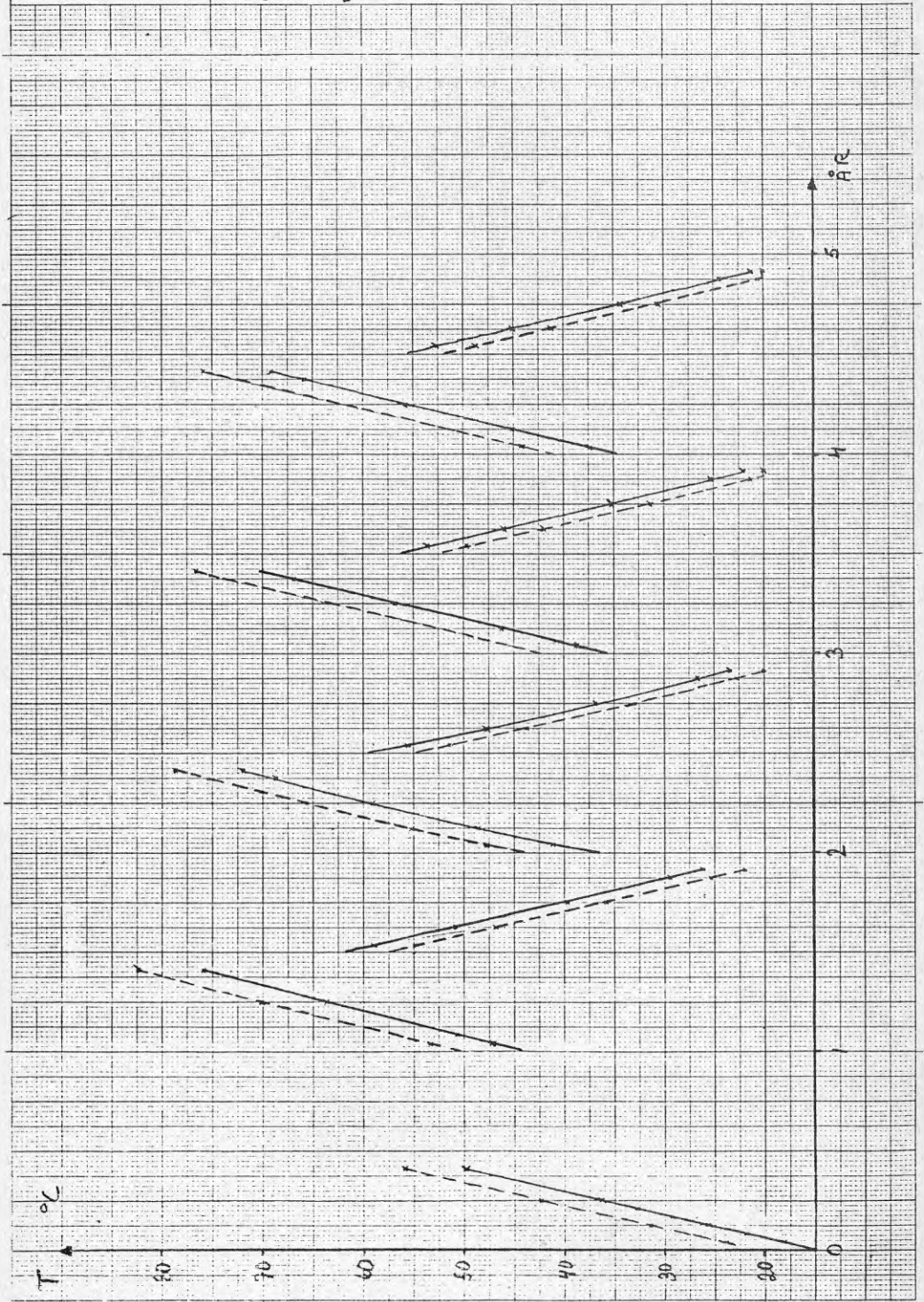
FIGUR 1

LAGRET HAR HÖJDEN H OCH
 RADIEN R . DET BEFINNAR SIG I GRANIT
 OCH ÄR TÄCKT AV ATT MORÄNSVIKT
 MED TJOCKLEKEN D . EN ISOLERING HAR
 ANBRINGITS PÅ MARKYTAN OVANFÖR
 LAGRET.



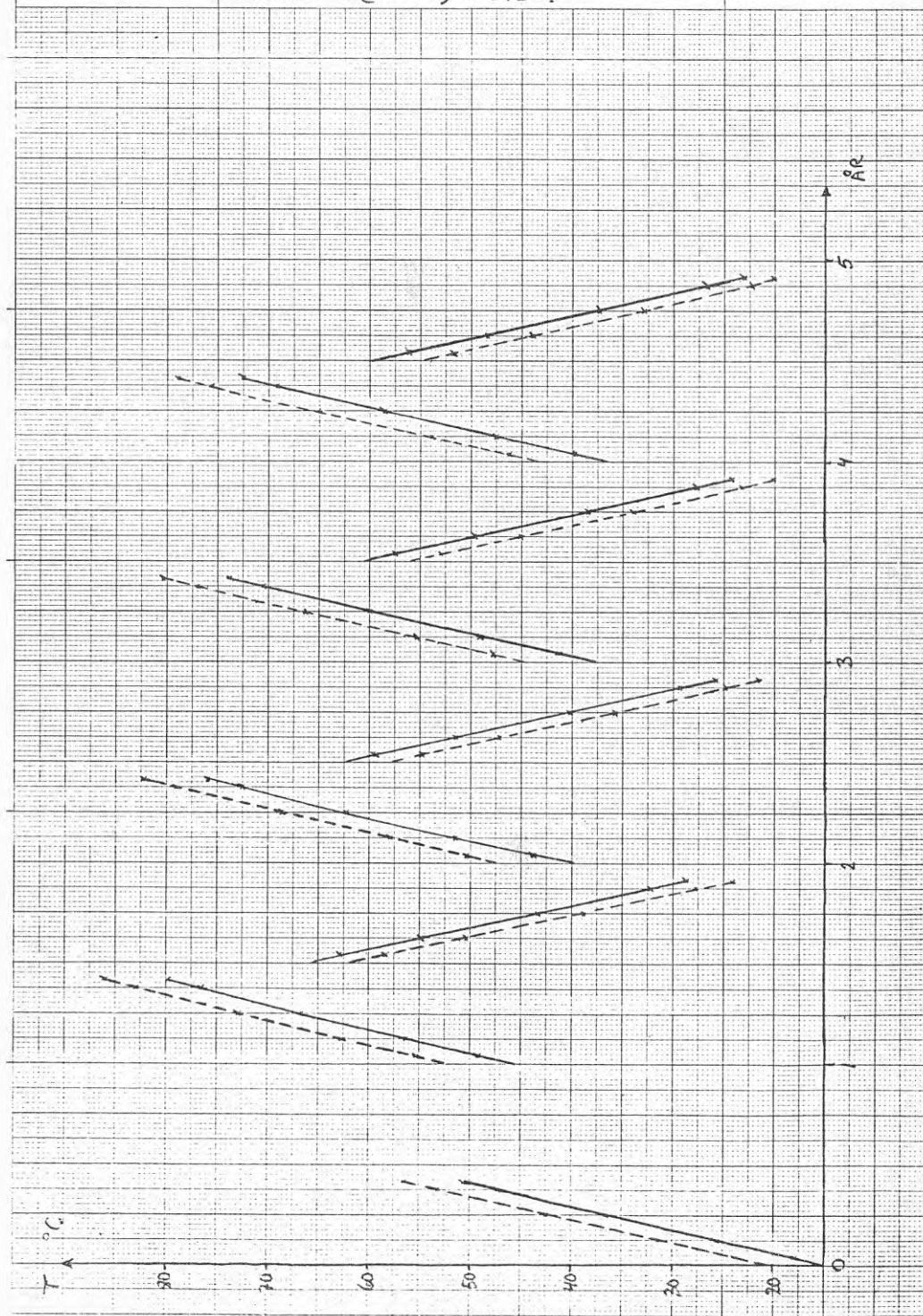
FIGUR 2

VATTENTEMPERATUREN I BORK-
HÅLEN UNDER 5 ÅRS CYKLER.
LAGRETS VOLYM ÄR $5 \cdot 10^5 \text{ m}^3$ OCH
REÄRNVISNINGEN ÄR 3 (—) ELLER
4 (----) METRER.



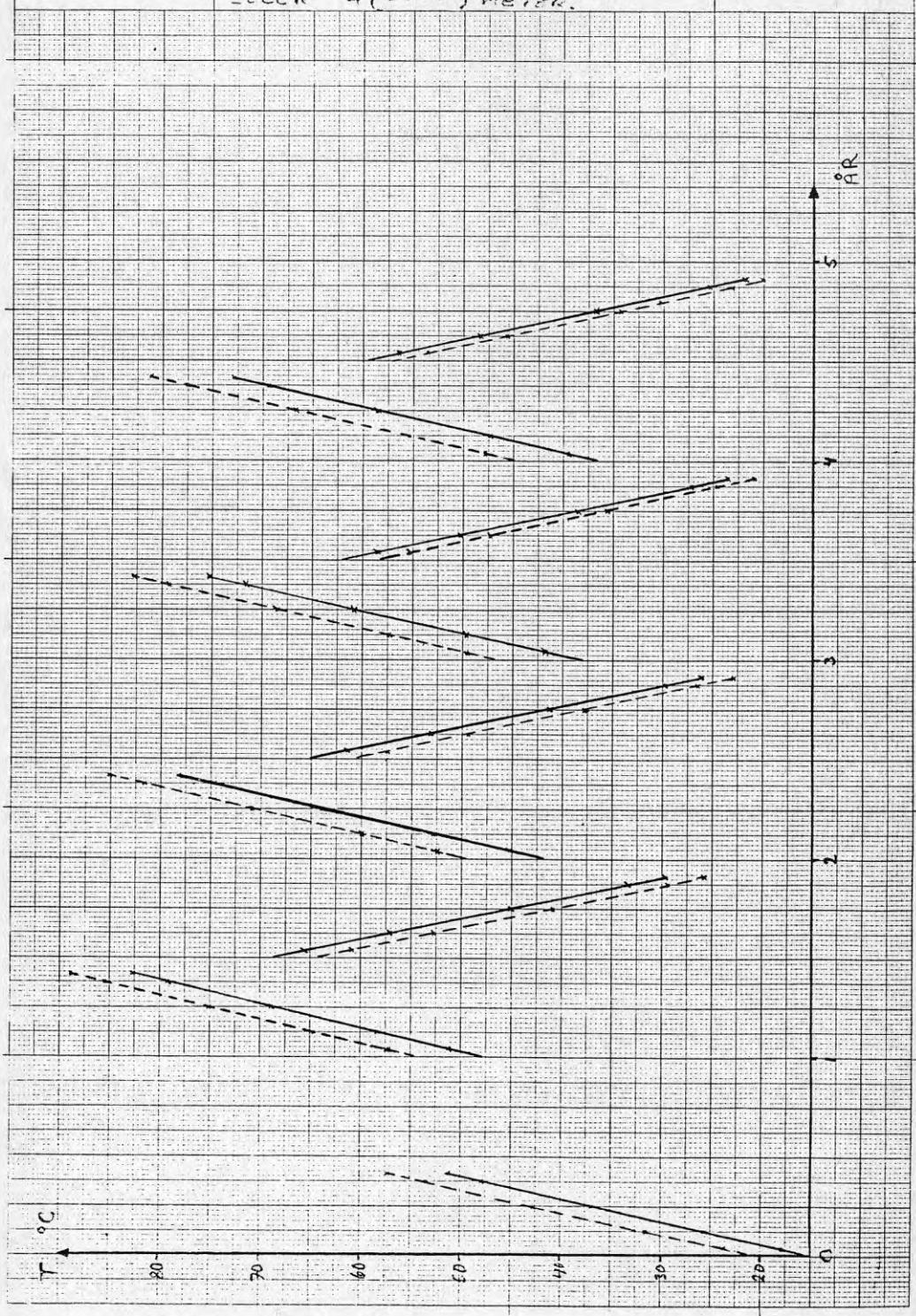
FIGUR 3

VATTENTEMPERATUREN I RÖR-
HÅLEN UNDER 5 ÅRSKVALER.
LÄKETS VOLYM ÄR $1.25 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
OCH RÖRAVSTÅNDET ÄR 3 (—)
ELLER 4 (- - -) METER.



VATTENTEMPERATUREN I BOKHÄLLEN
 UNDER 5 ÅRS CYKLER. LAGRETS
 VOLYM ÄR $2.5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ OCH
 RÖRSTÄNDET ÄR 3 (—)
 ELLER 4 (----) METER.

FIGUR 4



SÄSONGSLAGRING AV VÄRME I BERG. PROJ.NR: 780794-7
 KADESJÖS INGENJÖRSBYRÅ AB
 BERÄKNING AV TEMPRATURFÖRLOPP I BORRHÅLSACKUMULATOR I BERG

LADDNING:

Delta t (tim)	:	2	
Cb (J/msC)	:	2160000	
LAMBDAb (J/msC)	:	3.5	$v_1 =$ vattenhast. yttre rör: $q: 5,75$ (m/tim)
ts (tim)	:	3601	
L (m)	:	50	$v_2 =$ vattenhast. inre rör: $v_1: 30$ (m/tim)
D (m)	:	3	
d (m)	:	0.095	
n	:	20	
DELTA tp	:	600	
DELTA Lp	:	1	
DELTA Ts (C)	:	20	
Tbo (C)	:	30	
DELTA Tb (C)	:	40	
Q (Kwh/hål)	:	8482.30	
K (W/mC)	:	8.14	

t (tim)	x(m)	q(kW):	Tb (°C)	Tv (°C)
1.25	X X	2.88	44.19	50.01
3.75	X X		41.49	48.80
6.25	X X		39.52	47.48
8.75	X X		37.94	46.13
11.25	X X		36.66	44.78
13.75	X X		35.60	43.48
16.25	X X		34.72	42.24
18.75	X X		33.99	41.06
21.25	X X		33.37	39.97
23.75	X X		32.86	38.96
26.25	X X		32.42	38.03
28.75	X X		32.06	37.18
31.25	X X		31.75	36.41
33.75	X X		31.49	35.71
36.25	X X		31.26	35.08
38.75	X X		31.08	34.51
41.25	X X		30.92	34.00
43.75	XX		30.78	33.54
46.25	XX		30.67	33.14
48.75	XX		30.57	32.77
48.75	-XX		30.57	32.77

t (tim) x(m)	q(kW):	2.66	Tb(°C)	Tv(°C)
1.25		XX	59.66	61.32
3.75		XX	58.50	60.88
6.25		X X	57.35	60.34
8.75		XX	56.20	59.71
11.25		X X	55.06	58.99
13.75		X X	53.93	58.22
16.25		X X	52.82	57.39
18.75		X X	51.73	56.52
21.25		X X	50.66	55.62
23.75		X X	49.62	54.70
26.25		X X	48.60	53.76
28.75		X X	47.62	52.82
31.25		X X	46.67	51.87
33.75		X X	45.75	50.93
36.25		X X	44.87	50.00
38.75		X X	44.02	49.08
41.25		X X	43.21	48.18
43.75		X X	42.43	47.30
46.25		X X	41.69	46.43
48.75		X X	40.98	45.60
48.75		X X	40.98	45.60

t (tim) x(m)	3600	q(kW):	3.17	Tb (°C)	Tv (°C)
1.25				XX 78.82	81.72
3.75				X X 77.82	81.22
6.25				X X 76.83	80.65
8.75				X X 75.83	80.03
11.25				X X 74.84	79.36
13.75				X X 73.84	78.65
16.25				X X 72.84	77.90
18.75				X X 71.83	77.12
21.25				X X 70.83	76.30
23.75				X X 69.82	75.47
26.25				X X 68.81	74.61
28.75				X X 67.80	73.73
31.25				X X 66.79	72.83
33.75				X X 65.78	71.92
36.25				X X 64.78	71.00
38.75				X X 63.77	70.07
41.25				X X 62.78	69.13
43.75				X X 61.79	68.18
46.25				X X 60.80	67.23
48.75				X X 59.83	66.28
48.75				X X 59.83	66.28

BERÄKNING AV TEMPRATURFÖRLOPP I BORRHÅLSACKUMULATOR I BERG

URLADDNING

DELTA t (C) :2
 ts (tim) :5000
 DELTA tp :500
 DELTA Lp :1
 DELTA Ts(C) :20

t (tim) : x(m)	500	q(kW):	1.38	Tb (°C)	Tv (°C)
48.75		XX		57.57	55.19
46.25		XX		58.56	56.19
43.75		XX		59.54	57.18
41.25		XX		60.53	58.18
38.75		XX		61.52	59.17
36.25		XX		62.52	60.16
33.75		XX		63.52	61.16
31.25		XX		64.52	62.15
28.75		XX		65.52	63.15
26.25		XX		66.53	64.15
23.75		XX		67.53	65.15
21.25		XX		68.54	66.16
18.75		XX		69.55	67.16
16.25		XX		70.55	68.17
13.75		XX		71.56	69.17
11.25		XX		72.56	70.18
8.75		XX		73.56	71.18
6.25		XX		74.56	72.18
3.75		XX		75.56	73.18
1.25		XX		76.55	74.18

t (tim) x(m)	2000	q(kW):	1.64	Tb (°C)	Tv (°C)
48.75		X X		48.15	45.14
46.25		XX		49.15	46.14
43.75		X X		50.15	47.14
41.25		XX		51.15	48.14
38.75		X X		52.15	49.14
36.25		XX		53.14	50.13
33.75		X X		54.14	51.13
31.25		XX		55.14	52.13
28.75		X X		56.13	53.13
26.25		XX		57.13	54.13
23.75		X X		58.13	55.12
21.25		XX		59.13	56.12
18.75		X X		60.13	57.12
16.25		XX		61.13	58.12
13.75		X X		62.13	59.12
11.25		XX		63.13	60.12
8.75		X X		64.13	61.12
6.25		XX		65.13	62.12
3.75		X X		66.13	63.12
1.25		XX		67.13	64.12

t (tim) x(m)	q(kW):	1.64	T _b (°C)	T _v (°C)
48.75	XX		23.60	20.59
46.25	X X		24.60	21.59
43.75	XX		25.60	22.59
41.25	X X		26.60	23.59
38.75	XX		27.60	24.59
36.25	X X		28.60	25.59
33.75	XX		29.60	26.59
31.25	X X		30.60	27.59
28.75	XX		31.60	28.59
26.25	X X		32.60	29.59
23.75	XX		33.60	30.59
21.25	X X		34.59	31.58
18.75	XX		35.59	32.58
16.25	X X		36.59	33.58
13.75	XX		37.59	34.58
11.25	X X		38.59	35.58
8.75	XX		39.59	36.58
6.25	X X		40.59	37.58
3.75	XX		41.59	38.58
1.25	X X		42.59	39.58

SÄSONGSLAGRING AV VÄRME I BERG. PROJ.NR: 780794-7
 KADESJÖS INGENJÖRSEYRÅ AB
 BERÄKNING AV TEMPRATURFÖRLOPP I BORRHÅLSACKUMULATOR I BERG

LADDNING:

Delta t (tim) : 1
 Cb (J/msC) : 2160000
 LAMBDAb (J/msC) : 3.5
 ts (tim) : 3601
 L (m) : 100
 D (m) : 3
 d (m) : .095
 n : 20
 DELTA tp : 200
 DELTA Lp : 1
 DELTA Ts (C) : 20
 Tbo (C) : 30
 DELTA Tb (C) : 40
 Q (Kwh/hål) : 16964.60
 K (W/mC) : 8.14

v_1 = vattenhast. yttre rör: $q \cdot 5,75$ (m/tim)

v_2 = vattenhast. inre rör: $v_1 \cdot 30$ (m/tim)

t (tim) :	600	q(kW):	5.75	Tb (°C)	Tv (°C)
x(m)					
2.50	X X			44.17	50.01
7.50	X X			41.47	48.80
12.50	X X			39.50	47.48
17.50	X X			37.93	46.13
22.50	X X			36.64	44.79
27.50	X X			35.59	43.48
32.50	X X			34.71	42.24
37.50	X X			33.98	41.07
42.50	X X			33.36	39.98
47.50	X X			32.85	38.97
52.50	X X			32.41	38.04
57.50	X X			32.05	37.19
62.50	X X			31.74	36.42
67.50	X X			31.48	35.72
72.50	X X			31.26	35.08
77.50	X X			31.07	34.52
82.50	X X			30.91	34.00
87.50	XX			30.79	33.55
92.50	XX			30.66	33.14
97.50	XX			30.57	32.77

t (tim) x(m)	q(kW)	5.32	Tb (°C)	Tv (°C)
2.50		XX	59.67	61.33
7.50		XX	58.51	60.90
12.50		X X	57.36	60.36
17.50		XX	56.22	59.72
22.50		X X	55.07	59.01
27.50		X X	53.95	58.23
32.50		X X	52.83	57.41
37.50		X X	51.74	56.54
42.50		X X	50.67	55.64
47.50		X X	49.63	54.71
52.50		X X	48.61	53.78
57.50		X X	47.63	52.84
62.50		X X	46.68	51.89
67.50		X X	45.76	50.95
72.50		X X	44.87	50.02
77.50		X X	44.03	49.10
82.50		X X	43.21	48.20
87.50		X X	42.43	47.31
92.50		X X	41.69	46.45
97.50		X X	40.98	45.61

t (tin) x(m)	q(kW)	Tb (°C)	Tv (°C)
2.50	6.33	73.85	81.77
7.50		77.86	81.26
12.50		76.87	80.70
17.50		75.88	80.08
22.50		74.88	79.41
27.50		73.88	78.70
32.50		72.88	77.95
37.50		71.87	77.17
42.50		70.87	76.35
47.50		69.86	75.52
52.50		68.84	74.66
57.50		67.83	73.78
62.50		66.82	72.88
67.50		65.81	71.97
72.50		64.81	71.05
77.50		63.80	70.12
82.50		62.81	69.18
87.50		61.81	68.23
92.50		60.83	67.28
97.50		59.85	66.32
97.50		59.85	66.32

BERÄKNING AV TEMPRATURFÖRLOPP I BORRHÅLSACKUMULATOR I BERG

URLADDNING

DELTA t (C) : 2
 ts (tim) : 5000
 DELTA tp : 1
 DELTA Lp : 1
 DELTA Ts(C) : 20

t (tim) : x(m)	500	q(kW):	2.76	Tb (°C)	Tv (°C)
97.50		XX		57.62	55.25
92.50		XX		58.60	56.24
87.50		XX		59.59	57.23
82.50		XX		60.58	58.22
77.50		XX		61.57	59.21
72.50		XX		62.56	60.21
67.50		XX		63.56	61.20
62.50		XX		64.56	62.20
57.50		XX		65.57	63.20
52.50		XX		66.57	64.20
47.50		XX		67.58	65.20
42.50		XX		68.59	66.20
37.50		XX		69.60	67.21
32.50		XX		70.61	68.22
27.50		XX		71.61	69.22
22.50		XX		72.61	70.23
17.50		XX		73.62	71.23
12.50		XX		74.61	72.23
7.50		XX		75.61	73.23
2.50		XX		76.61	74.23

t (tim) x(m)	2000	q(kW):	3.28	T _b (°C)	T _v (°C)
97.50		X X		48.20	45.19
92.50		XX		49.20	46.19
87.50		X X		50.20	47.19
82.50		XX		51.20	48.19
77.50		X X		52.20	49.19
72.50		XX		53.19	50.18
67.50		X X		54.19	51.18
62.50		XX		55.19	52.18
57.50		X X		56.18	53.18
52.50		XX		57.18	54.18
47.50		X X		58.18	55.17
42.50		XX		59.18	56.17
37.50		X X		60.18	57.17
32.50		XX		61.18	58.17
27.50		X X		62.18	59.17
22.50		XX		63.18	60.17
17.50		X X		64.18	61.17
12.50		XX		65.18	62.17
7.50		X X		66.18	63.17
2.50		XX		67.18	64.17

t (tim) x(m)	q(kW):	3.28	Tb(°C)	Tv(°C)
97.50	XX		23.65	20.64
92.50	X X		24.65	21.64
87.50	XX		25.65	22.64
82.50	X X		26.65	23.64
77.50	XX		27.65	24.64
72.50	X X		28.65	25.64
67.50	XX		29.65	26.64
62.50	X X		30.65	27.64
57.50	XX		31.65	28.64
52.50	X X		32.65	29.64
47.50	XX		33.65	30.64
42.50	X X		34.64	31.63
37.50	XX		35.64	32.63
32.50	X X		36.64	33.63
27.50	XX		37.64	34.63
22.50	X X		38.64	35.63
17.50	XX		39.64	36.63
12.50	X X		40.64	37.63
7.50	XX		41.64	38.63
2.50	X X		42.64	39.63

SÄSONGSLAGRING AV VÄRME I BERG. PROJ.NR: 780794-7
 KADESJÖS INGENJÖRSBYRÅ AB
 BERÄKNING AV TEMPRATURFÖRLOPP I BORRHÅLSACKUMULATOR I BERG

LADDNING:

Delta t	(tim)	:2
Cb	(J/msC)	:2160000
LAMBDAb	(J/msC)	:3.5
ts	(tim)	:3601
L	(m)	:100
D	(m)	:4
ä	(m)	:0.095
n		:20
DELTA tp		:600
DELTA Lp.		:1
DELTA Ts	(C)	:20
Tbo	(C)	:30
DELTA Tb	(C)	:40
Q	(kWh/hål)	: 30159.29
K	(W/mC)	: 7.35

 $v_1 =$ vattenhast. yttre rör: $q \cdot 5,75$ (m/tim)

 $v_2 =$ vattenhast. inre rör: $v_1 \cdot 30$ (m/tim)

t (tim)	:	600	q(kW):	10.23	Tb (°C)	Tv (°C)
x(m)						
2.50		X	X		40.10	52.34
7.50		X	X		38.79	51.37
12.50		X	X		37.72	50.38
17.50		X	X		36.83	49.41
22.50		X	X		36.07	48.45
27.50		X	X		35.42	47.51
32.50		X	X		34.85	46.59
37.50		X	X		34.36	45.71
42.50		X	X		33.92	44.86
47.50		X	X		33.53	44.05
52.50		X	X		33.19	43.26
57.50		X	X		32.89	42.52
62.50		X	X		32.61	41.80
67.50		X	X		32.37	41.12
72.50		X	X		32.15	40.48
77.50		X	X		31.96	39.86
82.50		X	X		31.78	39.28
87.50		X	X		31.62	38.73
92.50		X	X		31.47	38.21
97.50		X	X		31.34	37.71

t (tim) x(m)	1800	q(kW):	9.45	Tb (°C)	Tv (°C)
2.50		X X		58.56	63.83
7.50		X X		57.32	63.33
12.50		X X		56.15	62.77
17.50		X X		55.04	62.16
22.50		X X		53.98	61.53
27.50		X X		52.98	60.86
32.50		X X		52.02	60.17
37.50		X X		51.10	59.46
42.50		X X		50.21	58.74
47.50		X X		49.37	58.01
52.50		X X		48.55	57.27
57.50		X X		47.77	56.53
62.50		X X		47.03	55.79
67.50		X X		46.31	55.05
72.50		X X		45.62	54.32
77.50		X X		44.96	53.59
82.50		X X		44.32	52.86
87.50		X X		43.71	52.15
92.50		X X		43.12	51.45
97.50		X X		42.56	50.75
97.50		X X		42.56	50.75

t (tim) x(m)	3600	q(kW):	11.26	Tb (°C)	Tv (°C)
2.50				X X 78.87	85.09
7.50				X X 77.79	84.61
12.50				X X 76.72	84.10
17.50				X X 75.67	83.55
22.50				X X 74.62	82.96
27.50				X X 73.58	82.35
32.50				X X 72.55	81.71
37.50				X X 71.53	81.04
42.50				X X 70.53	80.35
47.50				X X 69.53	79.64
52.50				X X 68.55	78.92
57.50				X X 67.58	78.18
62.50				X X 66.62	77.42
67.50				X X 65.68	76.65
72.50				X X 64.75	75.87
77.50				X X 63.83	75.08
82.50				X X 62.93	74.29
87.50				X X 62.05	73.49
92.50				X X 61.18	72.68
97.50				X X 60.32	71.87
97.50				X X 60.32	71.87

BERÄKNING AV TEMPRATURFÖRLOPP I BORRHÅLSACKUMULATOR I BERG

URLADDNING

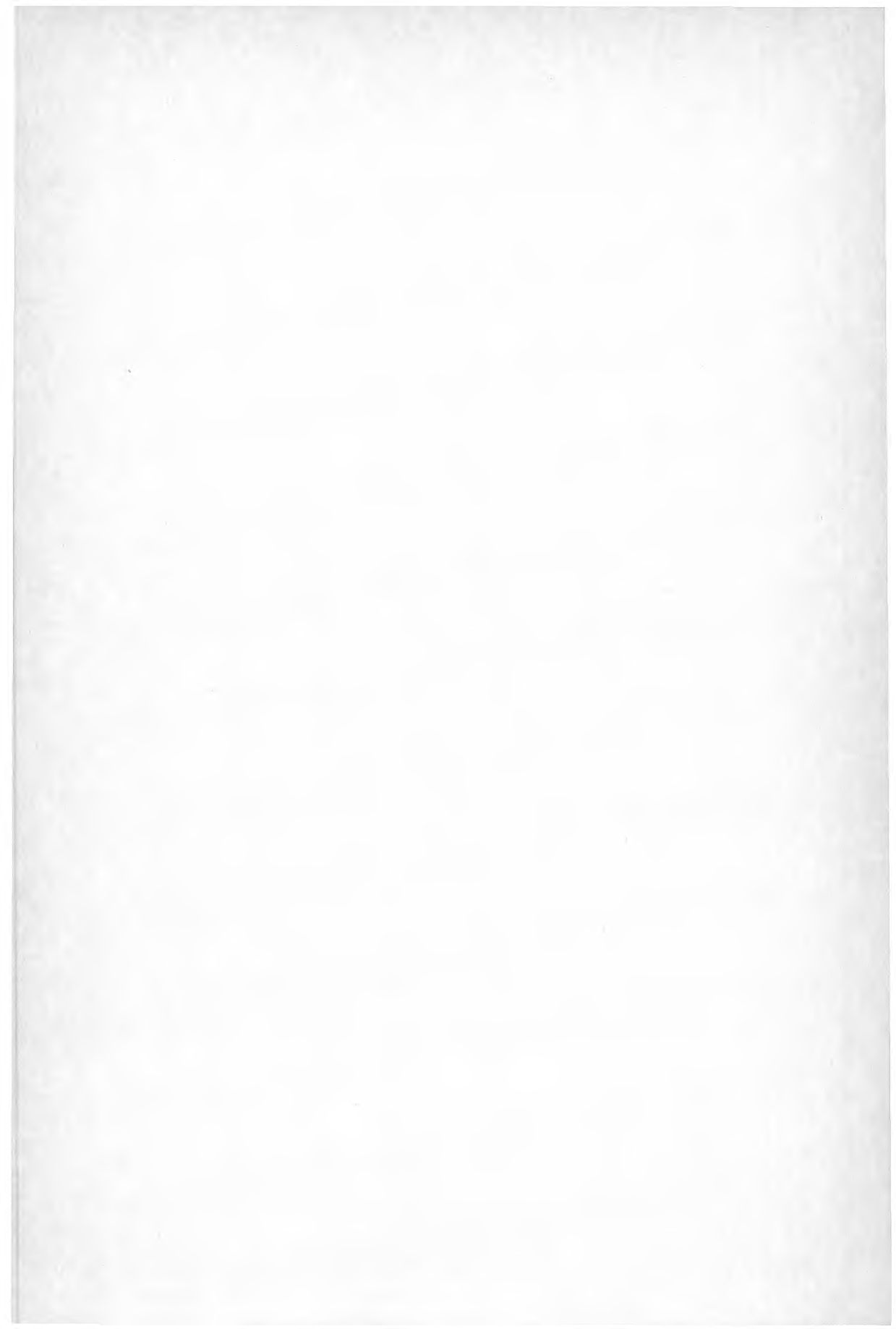
DELTA t (C) :2
 ts (tim) :5000
 DELTA tp :500
 DELTA Lp :1
 DELTA Ts(C) :20

t (tim) : x(m)	500	q(kW):	4.90	Tb (°C)	Tv (°C)
97.50	X	X		57.83	51.84
92.50		X	X	58.78	52.88
87.50	X	X		59.72	53.91
82.50		X	X	60.66	54.93
77.50		X	X	61.60	55.93
72.50		X	X	62.54	56.92
67.50		X	X	63.49	57.91
62.50		X	X	64.44	58.89
57.50		X	X	65.40	59.87
52.50		X	X	66.36	60.85
47.50		X	X	67.34	61.82
42.50		X	X	68.32	62.80
37.50		X	X	69.31	63.78
32.50		X	X	70.32	64.76
27.50		X	X	71.33	65.75
22.50		X	X	72.35	66.74
17.50		X	X	73.38	67.74
12.50		X	X	74.42	68.74
7.50		X	X	75.46	69.75
2.50		X	X	76.52	70.77

t (tim) x(m) :	2000	q(kW):	5.83	T _b (°C)	T _v (°C)
97.50	X	X		48.13	41.16
92.50	X	X		49.14	42.17
87.50	X	X		50.14	43.18
82.50	X	X		51.14	44.18
77.50	X	X		52.13	45.19
72.50	X	X		53.12	46.19
67.50	X	X		54.11	47.19
62.50	X	X		55.10	48.19
57.50	X	X		56.08	49.19
52.50	X	X		57.07	50.19
47.50	X	X		58.06	51.18
42.50	X	X		59.04	52.18
37.50	X	X		60.03	53.17
32.50	X	X		61.02	54.16
27.50	X	X		62.02	55.16
22.50	X	X		63.01	56.15
17.50	X	X		64.01	57.14
12.50	X	X		65.02	58.14
7.50	X	X		66.03	59.14
2.50	X	X		67.04	60.14

t (tim) : 4500 q(kW): 5.83
 x(m)

				Tb (°C)	Tv (°C)
97.50	X			23.54	16.61
92.50	X			24.54	17.64
87.50	X	X		25.54	18.64
82.50	X	X		26.54	19.64
77.50	X	X		27.54	20.64
72.50	X	X		28.54	21.64
67.50	X	X		29.54	22.64
62.50	X	X		30.54	23.64
57.50	X	X		31.54	24.64
52.50	X	X		32.54	25.64
47.50	X	X		33.54	26.63
42.50	X	X		34.53	27.63
37.50	X	X		35.53	28.63
32.50	X	X		36.53	29.63
27.50	X	X		37.53	30.63
22.50	X	X		38.52	31.63
17.50	X	X		39.52	32.63
12.50	X	X		40.52	33.63
7.50	X	X		41.52	34.62
2.50	X	X		42.52	35.62



LITTERATUR

- Johan Claesson, Mats Johansson, 1979. Continuous Heat Source Model for Ground Heat Storage (27 s). Rapport från Lundagruppen för värmelagring i mark, Lunds University. Departement of Mathematical Physics.
- Johan Claesson, Bengt Eftring, 1979. Optimal Thermal Insulation and Ground Heat Losses (95 s). Rapport från Lundagruppen för värmelagring i mark, Lunds University. Departement of Mathematical Physics.
- Johan Claesson, Bengt Eftring, 1978. Stationary Heat Losses from a Cylindrical Storage Volume in the Ground (20 s). Rapport från Lundagruppen för värmelagring i mark, Lunds University. Departement of Mathematical Physics.
- Tord Bengtsson, Johan Claesson, 1978. Stationary Heat Losses from a Spherical or Ellipsoidal Heat Storage (18 s). Rapport från Lundagruppen för värmelagring i mark, Lunds University. Departement of Mathematical Physics.
- Johan Claesson, Bengt Eftring, Göran Hellström, 1980. Temperature Decline of a Heated Region in the Ground (40 s). Rapport från Lundagruppen för värmelagring i mark, Lunds University. Departement of Mathematical Physics.
- Johan Claesson, 1980. Radiellt värmeuttag från djup brunn (9 s). Sammanfattning från Lundagruppen för värmelagring i mark, Lunds University. Departement of Mathematical Physics.
- Sören Andersson et al., Allmänna Ingenjörbyrå AB, 1980. Utvinning av värme ur bergbörade brunnar (86 s). Samarbetsprojekt från Lundagruppen för värmelagring i mark, Lunds University. Departement of Mathematical Physics.
- Bengt Eftring, 1980. Värmeuttag ur djupa, borrade brunnar (10 s). Samarbetsprojekt från Lundagruppen för värmelagring i mark, Lunds University. Departement of Mathematical Physics.
- Göran Hellström, 1977. Värmeledningstal i jordarter (7 s). Övriga uppsatser från Lundagruppen för värmelagring i mark, Lunds University. Departement of Mathematical Physics.
- Tord Bengtsson, 1977. Beräkning av stationära förluster från jordvärmelager (3 s). Notiser från Lundagruppen för värmelagring i mark, Lunds University. Departement of Mathematical Physics.
- Johan Claesson, 1977. Beräkning av temperaturförlopp utanför sfär (4 s). Notiser från Lundagruppen för värmelagring i mark, Lunds University. Departement of Mathematical Physics.
- Johan Claesson, notis 1980/2. Värmebalans vid motflöde mellan inre och yttre kanal (4 s). Notiser från Lundagruppen för värmelagring i mark, Lunds University. Departement of Mathematical Physics.

LITTERATUR

Bengt Efring, notis 1980/5. Formel för värmeförlust från värmelager under mark (2 s). Notiser från Lundagruppen för värmelagring i mark, Lunds University. Departement of Mathematical Physics.

Bengt Efring, notis 1980/6. Formel för stationärt värmeuttag från vertikalkör i mark (2 s). Notiser från Lundagruppen för värmelagring i mark, Lunds University. Departement of Mathematical Physics.

Johan Claesson, notis 1980/7. Värmemotstånd mellan cylinderregion och centrumrör. Notiser från Lundagruppen för värmelagring i mark, Lunds University. Departement of Mathematical Physics.

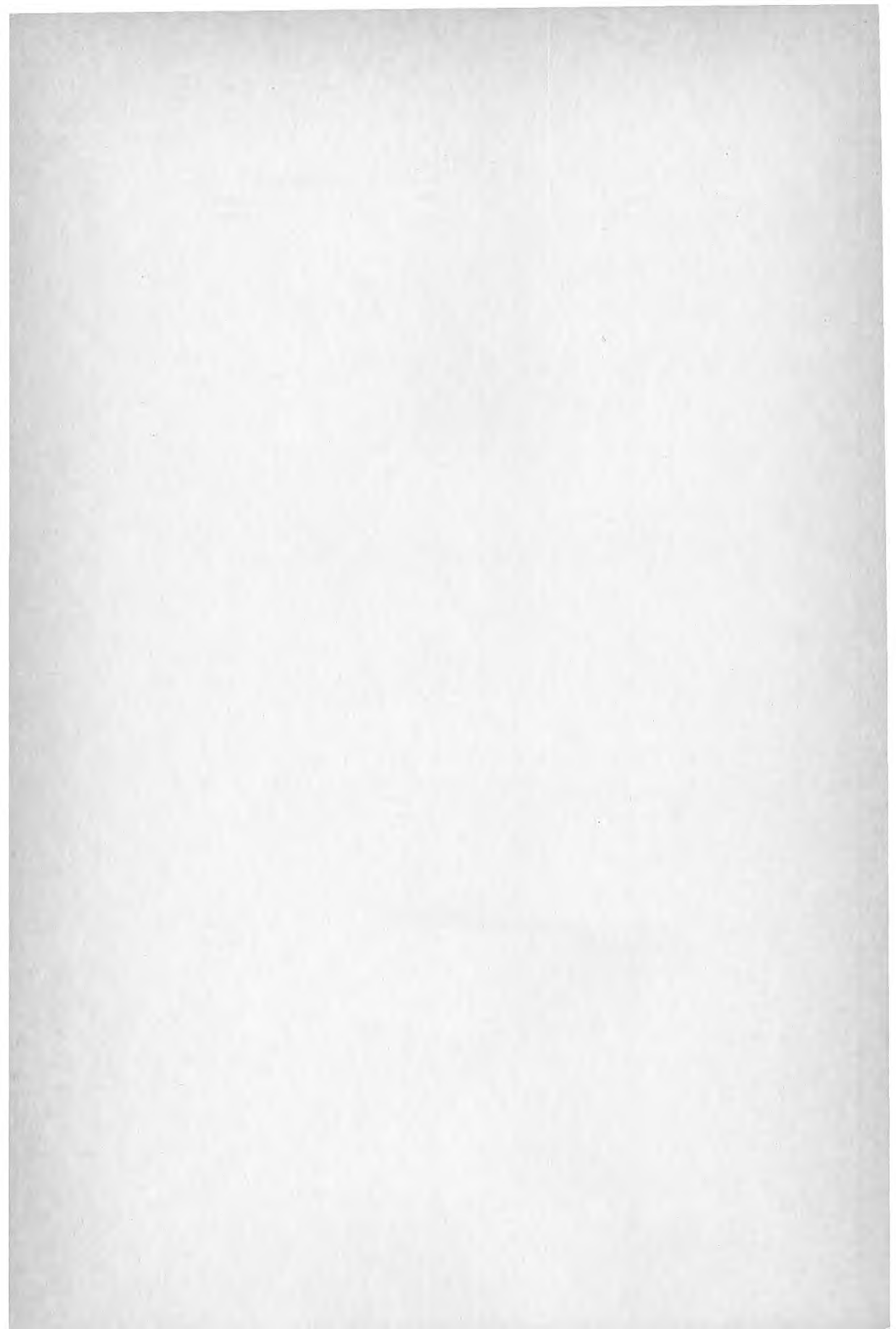
Johan Claesson, notis 1980/8. Analys av värmepulser från ett rör i mark. Notiser från Lundagruppen för värmelagring i mark, Lunds University. Departement of Mathematical Physics.

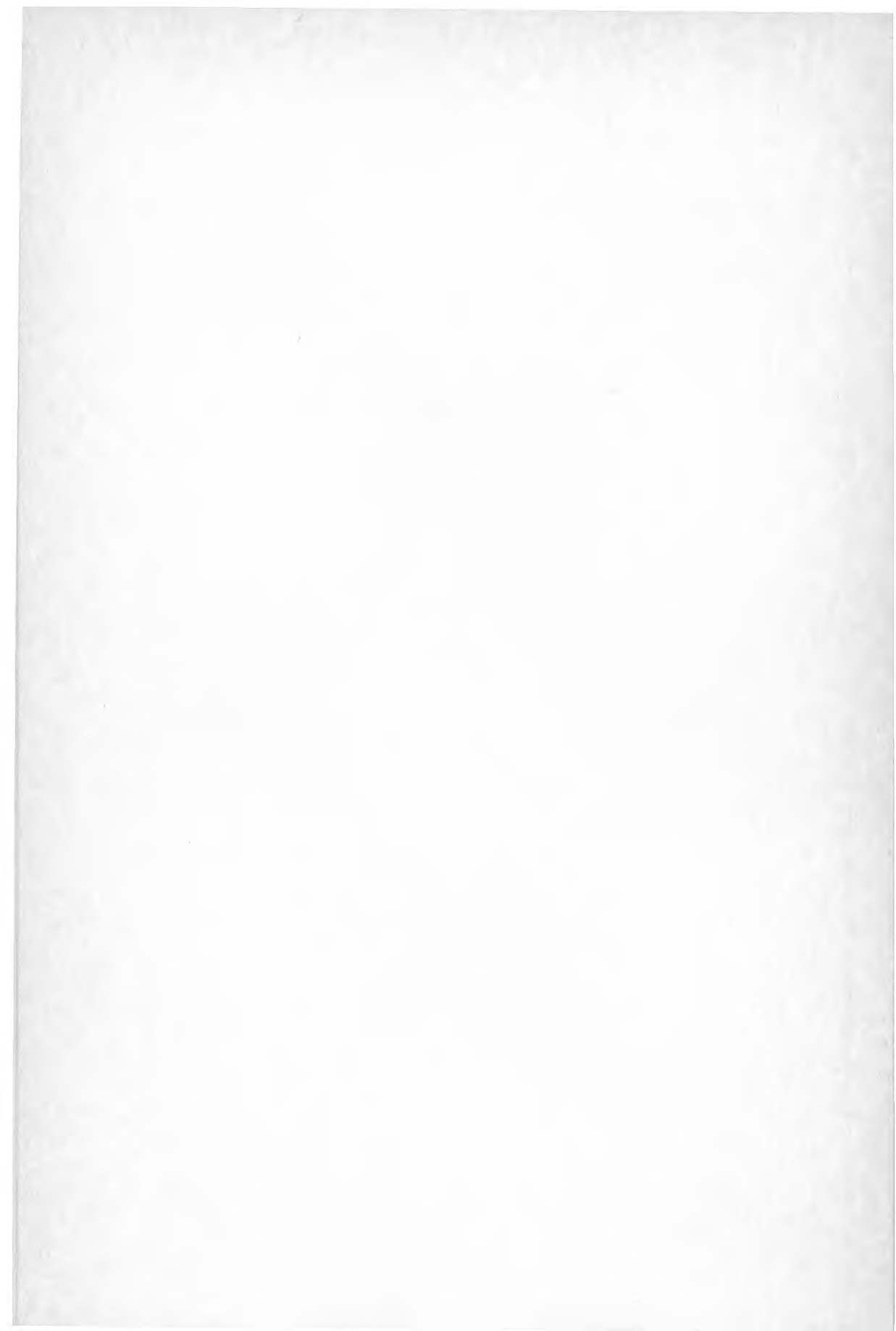
Bo Johansson, Bo Nordell, mars 1980. Berglager en anläggning för säsongslagring av värme. Forskningsrapport TULEA 1980:14, Tekniska Högskolan i Luleå, avdelning för Vattenteknik.

Lund Institute of Technology. Värmelagring i mark. Noteringar från ett seminarium 28 augusti 1980. Departement of Mathematical Physics.

Nils-Erik Wiberg 1980. Energy Storage in Soil. A finite element approach to the transient energy transport problem. Publication 80:7. Departement of Structural Mechanics. Chalmers University of Technology.

Kenneth Runesson, Harald Tägnfors and Nils-Erik Wiberg. Energy. Computer program for analysis of plane or axisymmetric conductive and convective energy transport problems. Chalmers Tekniska Högskolan. Institutionen för byggnadsstatik. Skrift 79:8. Göteborg 1979.





**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag
780794-7 från Statens råd för byggnadsforskning
till Kadesjös Ingenjörbyrå AB, Västerås.**

R98: 1981

ISBN 91-540-3541-4

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Art.nr: 6700398

**Abonnemangsgrupp:
W. Installationer**

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

Cirka pris: 30 kr exkl moms