



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

R116:1982

**Bergtunnel som
lågtemperaturlager
för sjövärm**

Förstudie i Gullspång

**Jonas Hallenberg
Anders Ericsson**

INSTITUTET FÖR
BYGGDOKUMENTATION

Accnr

Plac *See*

*K
2/1/82*

Byggeforskningsrådet

R116:1982

BERGTUNNEL SOM LÅGTEMPERATURLAGER
FÖR SJÖVÄRME

Förstudie i Gullspång

Jonas Hallenberg
Anders Ericsson

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 811157-9
från Statens råd för byggnadsforskning till Gullspångs
Kraftaktiebolag, Örebro.

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

R116:1982

ISBN 91-540-3789-1
Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

LiberTryck Stockholm 1982

INNEHÅLL

SAMMANFATTNING	5
1. ALLMÄNT OM PROJEKTET	7
1.1 Bakgrund	7
1.2 Problem	8
1.3 Projektet	8
2. VÄRMESÄNKA	11
2.1 Allmänt	11
2.2 Värmesystem	11
2.3 Energi- och effektbehov	12
2.4 Värmepumpstorlek	13
2.5 Systemlösning	14
2.6 Energibehov ur värmelager	15
3. VÄRMELAGER	17
3.1 Allmänt	17
3.2 Lagringsprincip i Gullspång	18
3.3 Värmeförluster	20
3.3.1 Inledning	20
3.3.2 Modell för förlustberäkning	20
3.3.3 Värmeförluster utan energiuttag	24
3.3.4 Värmeförluster vid energiuttag	25
3.4 Temperaturskiktning	27
3.5 In- och utläckage av lagrat vatten	28
3.6 Utlösningar och utfällningar	29
4. SYSTEMLÖSNING	31
4.1 In- och utloppsledningar	31
4.1.1 Ledningar för värmepumpanläggning	31
4.1.2 Ledningar för värmelagret	32
4.2 Energiflöden	33

5.	KOSTNADER	35
5.1	Investeringar	35
5.2	Energikostnader	35
5.3	Lönsamhet	35
	REFERENSER	36

SAMMANFATTNING

För att pröva ny teknik avser Gullspångs Kraftaktiebolag att uppföra en värmepumpanläggning om 45 kW för uppvärmning av och tappvarmvattengenerering i en planerad nybyggnad i Gullspång. Energikälla för värmepumpanläggningen utgörs av säsongslagrat sjövatten från sjön Skagern. Som lager nyttjas en ca 10 000 m³ stor befintlig och nedlagd kraftverkstunnel. Lagret och omgivande bergolymer laddas med energi när sjövatten sommartid genomströmmar tunneln. Av denna förstudie, som främst behandlar tekniklösningar, framgår bl a att:

- temperaturen på värmepumpanläggningens energikälla, dvs lagrat vatten, kommer att variera från ca +17°C i slutet av augusti till ca +7,5°C i månadsskiftet april - maj.
- värmeförlusterna från lagret vid stationära förhållanden ej uppgår till mer än ca 15% vilket motsvarar en nedkylning av lagrat vatten på ca 1,7°C
- lagrets storlek, 10 000 m³, är lagom stort för erforderligt energiuttag, ca 100 MWh
- in- och utläckage av lagrat vatten i viss mån kan töra på lagret
- inga speciella bekymmer behöver befaras med utlösningar och utfällningar vid denna typ av lågtemperaturlagring

Merinvesteringsbehovet vid anslutning av en värmepump med tillhörande ledningar samt iordningställande av lager beräknas uppgå till ca 400 tkr. Genom värmepumpdrift sjunker behovet av inköpt energi från nominellt 155 MWh till ca 60 MWh, vilket ger ett energipris från värmepumpanläggning på ca 9 öre/kWh vid elpriset 28 öre/kWh. Inkluderas kapitalkostnaden ökar energipriset från värmepumpanläggningen till en med elpriset jämbördig nivå.

1 ALLMÄNT OM PROJEKTET

1.1 Bakgrund

Kostnaderna för uppvärmning av bostadshus och andra lokaler samt beredning av tappvarmvatten har under senare år ökat kraftigt i Sverige. Merparten av årsenergiförbrukningen för dessa ändamål täcks med importerad olja vilket även har fått till följd att vi blivit mer och mer ekonomiskt beroende av de oljeexporterande länderna. För att minska detta beroende krävs en övergång till energislag som kan produceras och förädlas inom landet. En inhemska energiform som redan har stor och som kan få ännu större betydelse i dessa sammanhang är vattenproducerad elenergi. I ett kortare perspektiv förväntas även kärnkraftsproducerad el att få stor betydelse för en reducering av oljeberoendet.

För att effektivisera användningen av den elenergi som redan finns tillgänglig och den andel som tillkommer planeras och projekteras för närvarande ett flertal värmepumpsystem. Värmepumpen som maskin har nämligen förmåga att leverera i storleksordningen 2 à 3 gånger mer värmeenergi än tillförd drivenergi, vanligen el. Förutsättningen är dock att någon lågvärdig energikälla finns tillgänglig. Exempel på lågvärdiga energikällor är bl a sjövattnet, grundvattnet, avloppsvattnet, uteluft och industriell spillvärme.

Problemet med den energikälla som kanske har störst potential, sjö-, älv- och havsvattnet, är att denna är som kallast när värmen som bäst behövs nämligen under vintern. I vissa fall kan t ex sjö- och älvvattnet vintertid vara så kallt (nära 0°C) att de med dagens teknologi ej går att nyttja för värmepumpdrift och i andra fall krävs alltför betungande investeringar för att bemästra temperaturproblemen.

Ett alternativt sätt blir då att försöka konservera en del av den värme sjövattnet mottar sommartid, för att på så sätt erhålla högre temperatur vintertid. Detta kan i princip göras mycket enkelt genom att sommarvarmt (+15°- +20°C) sjövattnet exempelvis leds till någon form av berggrum. När

energi sedan behövs pumpas vattnet till en värmepump för energiavgivning och återförs sedan till lagret.

1.2 Problem

För att motivera alla typer av värmepumpprojekt bör följande faktorer vara helt eller delvis uppfyllda:

- värmesänka med ej för högt temperaturkrav
- näralliggande värmekälla (vattendrag)
- tillgång på ej för dyr drivenergi

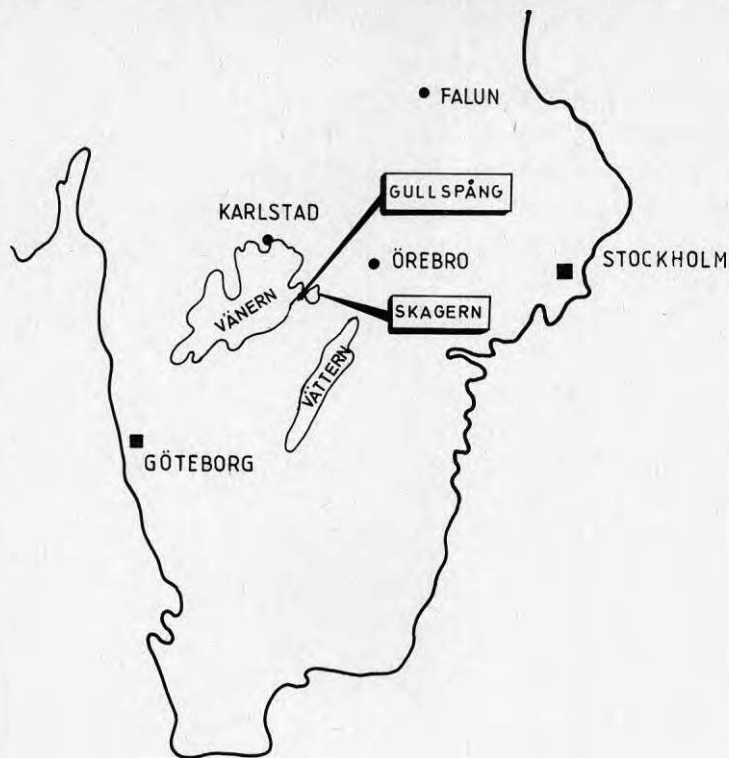
Vid lagring krävs dessutom att man har en lämplig och näralliggande lagringsvolym. Några av de speciella problem som kan uppstå vid lagring är:

- stora värmeförluster
- in- och utläckage av vatten
- vattenkemiska problem
- höga investeringar

Mycket stor betydelse har här värmeförluster, varför dessa bör beaktas särskilt noga.

1.3 Projektet

I Gullspång, beläget mitt emellan Mariestad och Kristinehamn, har Gullspångs Kraftaktiebolag sedan gammalt haft en kraftstation i Gullspångsälven som rinner mellan sjöarna Skagern och Vänern. Se fig 1.



Figur 1 Geografiskt läge av Gullspång

Åren 1906 - 1908 byggdes i Gullspång Sveriges vid denna tidpunkt största kraftstation med en effekt på ca 20 MW. För detta kraftverk sprängdes en ca 10 000 m³ stor underjordisk utloppstunnel med längden ca 200 m och tvärsnittsytan 50 m². För att vinna fallhöjd och effektivitet byggdes 1972 en ny kraftstation med effekten 40 MW varvid den gamla kraftstationen revs och utloppstunneln stod outnyttjad.

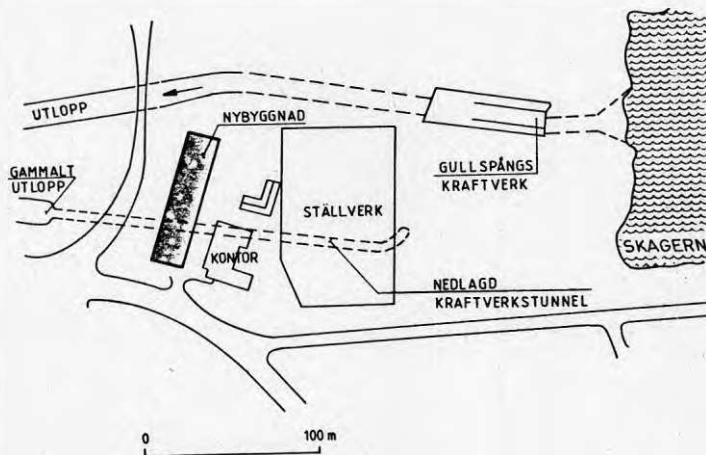
Som kraftbolag har Gullspångs Kraftaktiebolag för avsikt att pröva och utveckla nya former av elenergiutnyttjande.

En tämligen ny sådan är utnyttjande av värmepumpsystem. Vid en nybyggnation av kontor, förråd, garage- och verkstadslokal i Gullspång har man därför för avsikt att pröva och utvärdera värmepumpdrift vid uppvärmning och generering av tappvarmvatten. Energikälla till värmepumpanläggningen utgörs av sjövatten från sjön Skagern. För att ytterligare nå gynnsammare driftvillkor för värmepumpanläggning skall den nedlagda utloppstunneln tjäna som värmelager för sommarvarmt sjövatten.

2 VÄRMESÄNKA

2.1 Allmänt

Den tidigare omnämnda byggnation har byggnadsytan 1 400 m² och byggnadsvolymen 9 000 m³. Läget av nybyggnaden i förhållande till befintlig bebyggelse och befintlig underjordisk kraftverkstunnel framgår av fig 2.



Figur 2 Översiktsplan

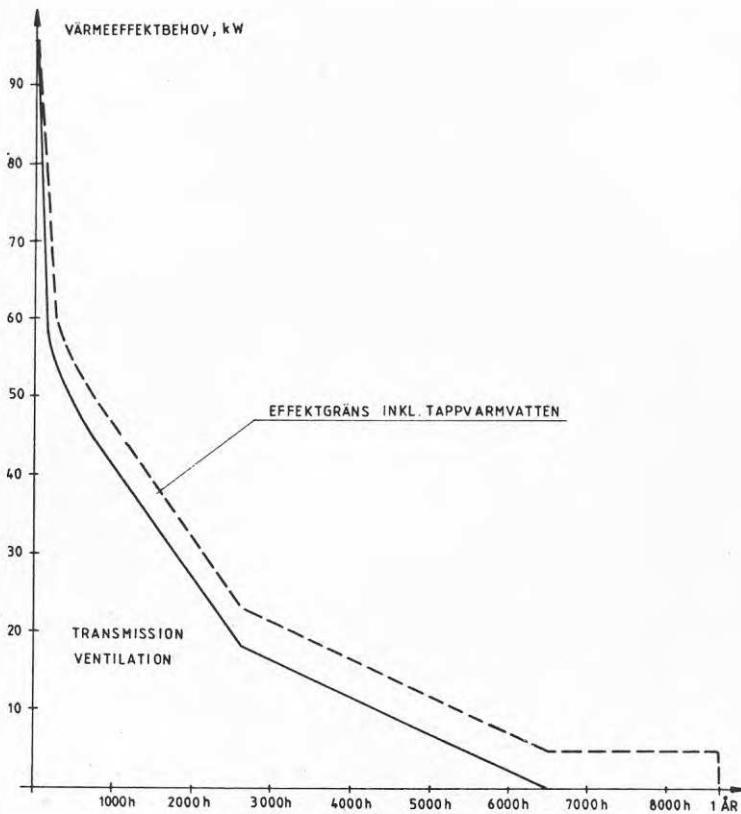
Nybyggnaden kommer att innehålla kontorsplatser samt förråd, garage, tvätthall, smörjhall och verkstad.

2.2 Värmesystem

Värmesystemet utföres som ett vattenburet system för lågtemperatur, +55°C/+45°C, vilket ger bra driftvillkor för en värmepumpänläggning. I värmesystemet ingår de sedvanliga delarna radiatorsystem, ventilationsaggregat och utrustning för tappvarmvattengenerering.

2.3 Energi- och effektbehov

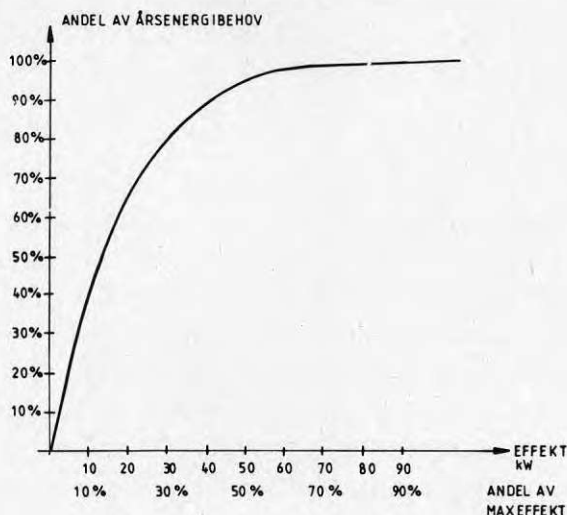
Årsenergibehovet för nybyggnaden är beräknat till ca 155 MWh/år uppdelat på ca 105 MWh/år för transmissionsförluster, ca 35 MWh/år för ventilationsförluster samt ca 15 MWh/år för tappvarmvattengenerering. Maximalt effektbehov är beräknat till 93 kW för transmissions- och ventilationsförluster samt ca 5 kW för tappvarmvattengenerering. Varaktigheten för effektbehovet framgår av figur 3.



Figur 3 Varaktighetsdiagram

Av figur 3 framgår att höga effektbehov har ovanligt kort varaktighet vilket beror på att ventilationsaggregaten ej är i drift dygnet runt, utan endast i mindre utsträckning under dagtid, vardagar.

Genom att varaktighetskurvan har denna struktur så täcker exempelvis en effektinsats av endast 1/3 (ca 35 kW) av toppeffektbehovet hela 85% av årsenergibehovet. I figur 4 framgår hur stor andel av årsenergin som täcks vid olika effekter.



Figur 4 Andel av årsenergibehov som täcks vid olika effekter

2.4 Värmepumpstorlek

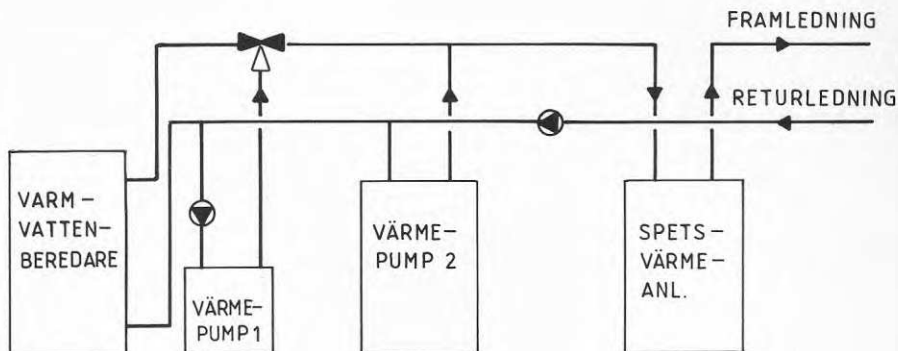
Om ingen hänsyn tas till begränsningen i tillgång på lågvärdig energi, i detta fall lagrat sjövattnet, så bör värmepumpen dimensioneras så att lägsta årskostnader uppnås.

Utförs en kostnadsanalys finner man att värmepumpen bör ge i storleksordningen 45 kW värmeeffekt vid sjövattemperaturen ca +10°C och värmevattentemperaturen ca +55°C. Eftersom även tappvarmvatten skall genereras och denna process alltid kräver +55°C värmevatten så är det i detta projekt en fördel att välja två värmepumpaggregat, ett mindre för alternativen tappvattengenerering eller uppvärmning och ett större för enbart uppvärmning. På detta sätt undviks att hela värmepumpanläggningen alltid måste arbeta med +55°C värmevatten, vilket ger längre livslängd och bättre verkningsgrad.

Ett alternativ till två värmepumpar, med tanke på tappvarmvattenberedningen, hade varit att välja enbart ett värmepumpaggregat men då utrustat med hetgasvärmväxlare varmed tappvarmvatten kan beredas. Nackdelarna med denna lösning består i dels att detta aggregat ej kan producera tappvarmvatten sommartid samt dels att det vid driftstopp ej finns någon extra värmepump. Till alternativets fördel kan räknas en något lägre kostnad.

2.5 Systemlösning

Planerad nybyggnad i Gullspång uppvärms i huvudsak med en värmepumpänläggning på ca 45 kW värmeeffekt. Lågvärdig energikälla för värmepumpen utgörs av sjövattnen som lagras i en befintlig underjordisk kraftverkstunnel. Totalt effektbehov för nybyggnaden är beräknat till 98 kW. Således erfordras när effektbehovet överstiger 45 kW en till värmepump kompletterande värmeproduktionsanläggning, s k spetsvärmeanläggning. Denna utgörs vanligen av en olje- eller elpanna. Sammantaget fås en systemlösning för uppvärmning och generering av tappvarmvatten enligt nedanstående figur.



Figur 5 Systemschema

2.6 Energibehov ur värmelager

Nybyggnaden kräver ca 155 MWh/år. Av figur 4 framgår att en värmepumpanläggning om 45 kW täcker 90% eller ca 140 MWh/år. I storleksordningen 2/3 av denna energimängd skall levereras i form av lågtemperaturrenergi vilket ger ett maximalt energiuttag ur värmelagret på ca 100 MWh. Restande 1/3 från värmepumpanläggningen täcks med drivenergi, el.

Med hänsyn till det varierande energibehovet under året krävs att värmelagret kan leverera nedanstående ungefärliga och maximala månadsvisa energimängder. I tabellen redovisas även erforderliga temperaturreduceringar i det 10 000 m³ stora värmelagret.

<u>Månad</u>	<u>Energi ur lager</u>	<u>Temp reduc</u>
Januari	16 MWh	1.4°C
Februari	16 MWh	1.4°C
Mars	14 MWh	1.2°C
April	9 MWh	0.8°C
Maj	5 MWh	0.4°C
Juni	1 MWh	0.1°C
Juli	1 MWh	0.1°C
Augusti	1 MWh	0.1°C
September	4 MWh	0.3°C
Oktober	7 MWh	0.6°C
November	12 MWh	1.0°C
December	<u>14 MWh</u>	<u>1.2°C</u>
	100 MWh	8.6°C

3 VÄRMELAGER

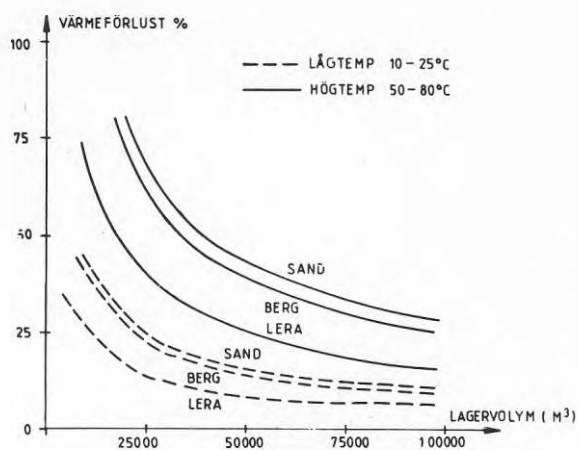
3.1 Allmänt

Sommartid finns ofta ett överskott av energi från olika lågtemperaturrenergikällor, bl a sjövattnen. För att kunna utnyttja dessa överskott när de som bäst behövs, vintertid, krävs ett lager. I detta projekt utgör vatten energibärare, vilket innebär att en av få möjliga lagringsplatser är under markytan. Med denna energibärare finns i princip tre olika systemlösningar för lagring under markytan:

- 1 Lagring i berggrum
- 2 Lagring i akviferer (grus,sand)
- 3 Rörslingor i mark (lera)

Om lagring skall vara meningsfull krävs att värmeförlusterna är tillräckligt små. Avgörande faktorer som påverkar förlusterna är materialegenskaper, temperaturförhållanden och lagergeometri. Med tanke på temperaturförhållanden brukar lager indelas i två grupper, lågtemperaturlager (10-25°C), och högtemperaturlager (50-80°C). Lågtemperaturlager kan exempelvis laddas med sommarvarmt sjövattnen och högtemperaturlager med exempelvis värme från industrier, sopförbränningsanläggningar etc.

Hur materialegenskaper runt värmelager och temperaturförhållanden påverkar värmeförlusterna för ett sfäriskt lager som funktion av olika volymer illustreras schematiskt i figur 6.

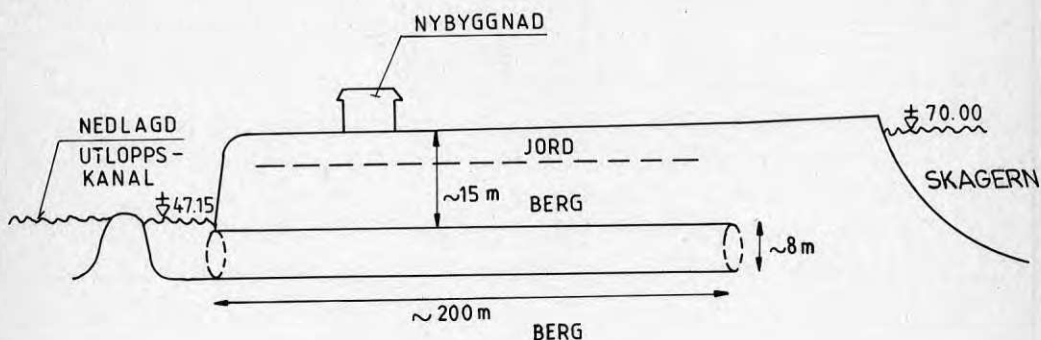


Figur 6 Värmeförluster vid olika lagervolymer
(sfäriskt lager)

Av figur 6 framgår bl a att man bör välja lågtemperaturlager vid behov av små lagervolymer och högtemperaturlager vid behov av större lagervolymer. Vidare framgår att endast lågtemperaturlagring kan bli aktuell för Gullspång med dess befintliga bergtunnel på 10 000 m³.

3.2 Lagringsprincip i Gullspång

I Gullspång skall en nedlagd kraftverkstunnel nyttjas som lager. Geometrisk utformning och läge i förhållande till sjön Skagern framgår av figur 7.



Figur 7 Läge av tunnel

För att stänga av tunneln mot den nedlagda utloppskanalen har en jordvall placerats strax utanför tunnelns mynning. Kvarvarande fri vattenyta isoleras.

Sommartid genomströmmas lagret av sjövatten från sjön Skagern. På detta sätt laddas inte bara själva vattenvolymen utan även omgivande bergvolym. Från höstkanten eller när sjön blir kallare än vattnet i lagret, stängs tillförseln av sjövatten. Vid behov pumpas tunnelvatten till värmepumpen samt efter energiavgivning tillbaka till tunneln. Efter tunnelns stängning påbörjas en successiv avkylning av den instängda vattenmassan dels beroende på värmepumpens energiuttag och dels beroende på värmeförluster till omgivande berg. När sjövattnet i Skagern under våren blir varmare än tunnelvattnet öppnas ånyo tunneln för genomströmning.

3.3 Värmeförluster

3.3.1 Inledning

Värmeförlusterna från vattnet i tunneln till omgivande berg kan uppdelas i en tidsberoende del och i en tidsoberoende del, stationära förluster. De tidsberoende förlusterna är sådana som avklingar efter ett antal års drift och de stationära förlusterna sådana som kvarstår. Eftersom värmepumpanläggningen skall fungera redan första året, då de totala förlusterna är som störst, så måste båda typerna beaktas.

Vidare framgår av 2.5 att värmepumpanläggningen är dimensionerad för en maximal energimängd ur värmelagret på ca 100 MWh/år vilket under ett år motsvarar ca +9°C temperatursänkning av vattenmassan i tunneln. Undantas sommarperioden blir temperatursänkningen ca + 8°C. Eftersom en så liten värmepumpanläggning som 45 kW ej klarar låga vattentemperaturer utan stora fördyringar, så innebär detta att värmeförlusterna i detta fall bör studeras noga. En kall sommar, med kallt sjövatten, kan exempelvis innebära en starttemperatur i lagret på kanske ej mer än ca 15°C vilket ger en temperatur på blott +7°C (+15-8°C) när värmepumpanläggningen tagit sin del och det utan beaktande av förluster! Visserligen är då detta under extrema förhållanden både vad avser värmeuttag och starttemperatur.

För att i detalj kunna studera och simulera olika driftfall har en modell framtagits för de förhållanden som kommer att råda.

3.3.2 Modell för förlustberäkning

I alla modeller för förlustberäkningar ingår värmeledningsekvationen, vilken i en dimension och cylinderkoordinater ser ut som

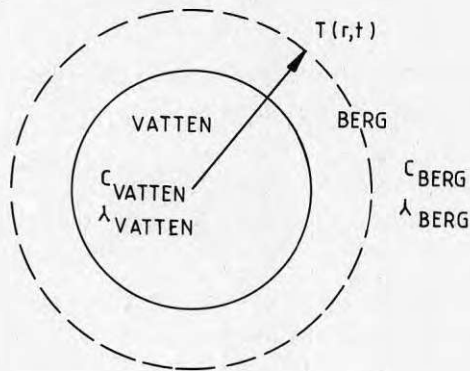
$$\frac{dT(r,t)}{dt} \cdot \frac{c}{\lambda} = \frac{d^2T(r,t)}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dT(r,t)}{dr}$$

där $T(r,t)$ = temperaturen vid tiden t i en punkt med avståndet r från centrum av cylindern (tunneln)

c = värmekapacitet

λ = värmeledningsförmåga

Eftersom tunneln är mycket långsträckt, ca 200 m med en radie av blott ca 4 m så kan förlusterna från ändytorna försummas, därav endast en-dimensionell värmeledningsekvation. Således studeras endast temperaturvariationer för ett tvärsnitt av tunneln, se figur 8.



Figur 8 Beräkningsområde

Randvillkoren för beräkningarna bestäms av antagandet att tunneln omsluts av en oändlig bergmassa. Detta är ej helt korrekt eftersom avståndet mellan tunnelns mantelyta och markyta är ca 15 m. Avståndet är dock så stort att det endast ger marginella avvikelser från helt verkliga förhållanden.

För att lösa ekvationen approximeras denna med differens-ekvationer som beräknas med hjälp av ett för detta projekt framtaget datorprogram. I princip har två beräkningsfall studerats närmare:

- förluster och temperaturförhållanden när energi ej uttages ur värmelagret
- förluster och temperaturförhållanden när energi uttages ur värmelagret

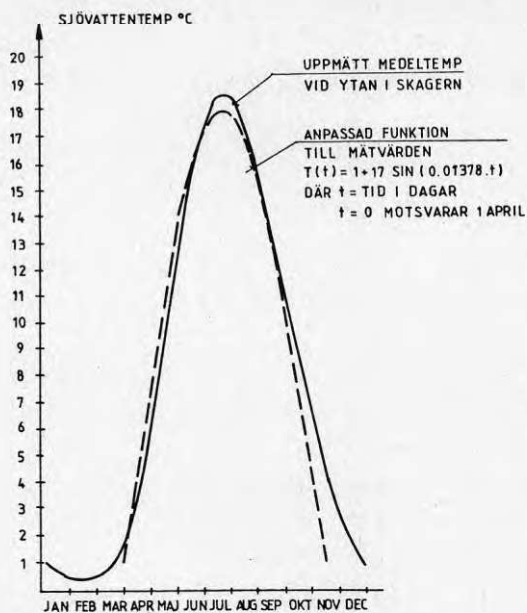
Gemensamt för beräkningarna är följande:

- tunneln öppnas för sjövattnensläpp när sjöns temperatur överstiger tunnelvattnets temperatur
- tunneln stängs för sjövattnensläpp när sjöns temperatur understiger tunnelvattnets temperatur
- sjöns temperatur approximeras med funktionen
$$T(t) = 1 + 17 \times \text{SIN}(0.01378 \times t)$$

där t = tid i dagar

för t : 0 - 180 (1 april - 1 okt)

I figur 9 framgår funktionens överensstämmelse med uppmätta medeltemperaturer för det vatten i sjön Skagern som skall brukas.



Figur 9 Sjövattentemperaturer

- till tunneln insläppt sjövatten antas blandas helt med i tunneln befintligt vatten
- sjövattenflödet till/från värmelagret motsvarar en omsättning i månaden av tunnelvattnet
- begynnelsestemperatur i tunnelvatten och omgivande berg antas vara $+6^{\circ}\text{C}$, vilket ungefär motsvarar luftens årsmedeltemperatur i Gullspång
- för materialkonstanterna i figur 8 har ansatts:

$$C_{\text{vatten}} = 4.2 \times 10^6 \text{ J/m}^3\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\lambda_{\text{vatten}} = 0.6 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$$

$$C_{\text{berg}} = 2.2 \times 10^6 \text{ J/m}^3\text{ }^{\circ}\text{C}$$

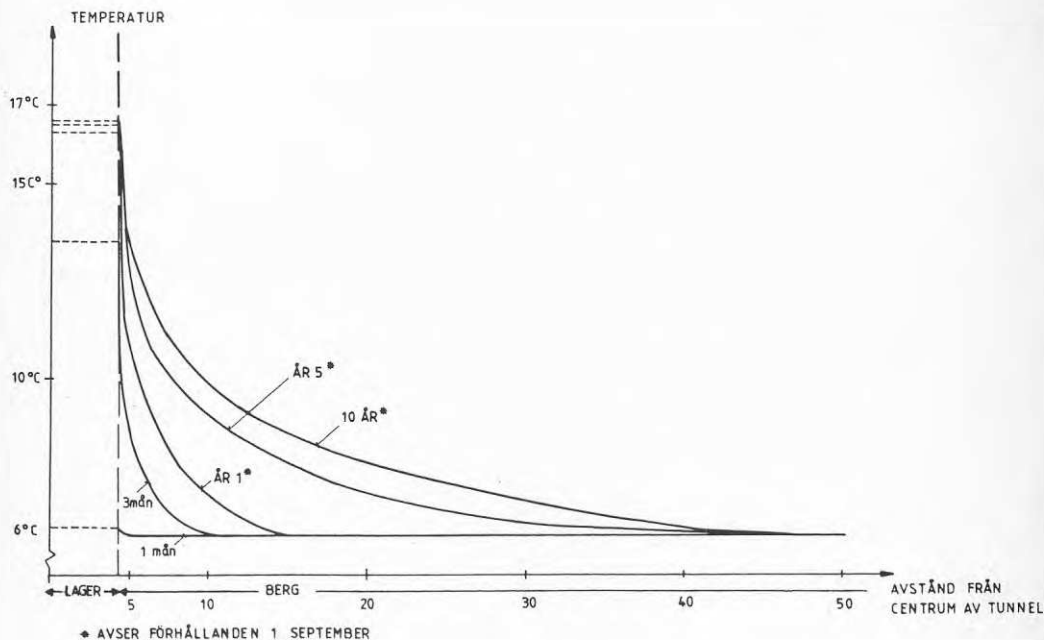
$$\lambda_{\text{berg}} = 3.0 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$$

3.3.3 Värmeförluster utan energiuttag

Förlusterna har beräknats för en fysisk tid av 10 säsonger. Med de förutsättningar som råder för kalkylerna ger denna beräkning följande resultat, när energi ej uttages:

- starttemperatur i lagret efter laddning blir ca $+17^{\circ}\text{C}$ oberoende av tiden
- sluttemperaturen i lagret kommer att variera mellan ca 11.6°C efter första året och ca 13.1°C efter tionde året
- öppnings- och stängningstid för sjövattnengenomströmning blir i mitten av maj respektive mitten av augusti
- värmeförlusterna uppgår under första året till ca 50% för att sedan avta till ca 35% när stationära förhållanden råder

För att exemplifiera värmens inträngning i tunnelväggarna som funktion av tiden hänvisas till figur 10 nedan.



Figur 10 Omgivande tunnelväggars uppvärmning

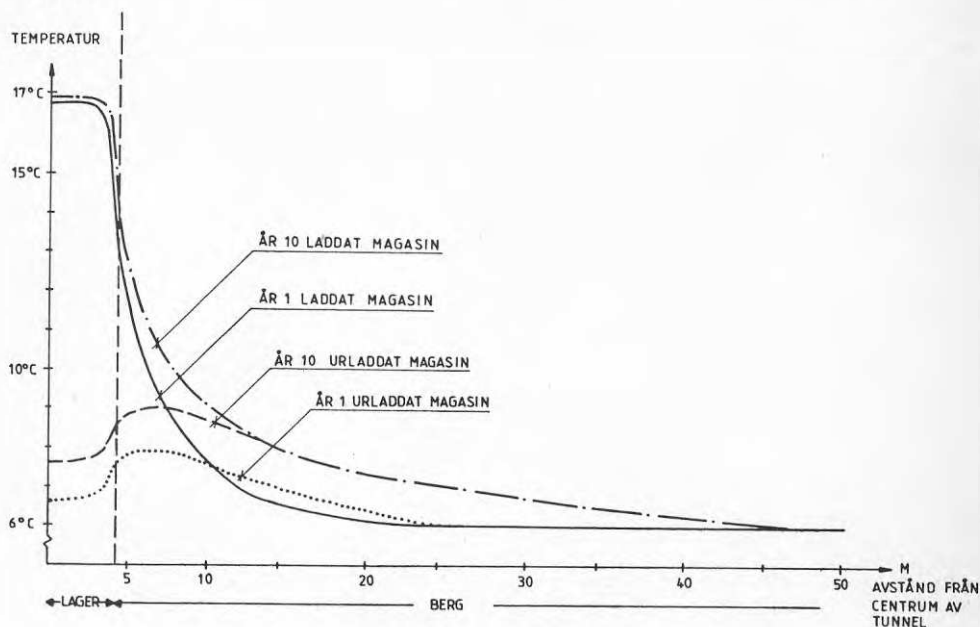
3.3.4 Värmeförluster vid energiuttag

Denna beräkning simulerar de "verkliga" förhållandena som kommer att råda, d v s med hänsyn till troliga energiuttag från lager till värmepump. Temperaturen i lagret kommer således att minska både beroende på förluster till berg samt beroende på värmepumpanläggningens kontinuerliga energibehov. I modellen konkretiseras värmepumpens energiuttag genom en successiv kontinuerlig temperatursänkning av vattnet i lagret enligt den i 2.5 redovisade tabellen. Av denna framgår att temperatursänkningen av vattenmassan i lagret kommer att variera från ca $0.05^{\circ}\text{C}/\text{dag}$ i januari till ca $0.003^{\circ}\text{C}/\text{dag}$ under sommaren. Denna påtvingade nedkylning får naturligtvis positiva konsekvenser för värmeförlusterna till omgivande berg, eftersom medeltemperaturdifferensen mellan lager och berg minskar. I slutet av uppvärmningssäsongen, feb - april, fås t o m värmetillskott från berg till lager.

Som ovan har beräkningarna utförts under en fysisk tid av 10 år eller säsonger. Resultaten i huvuddrag blir:

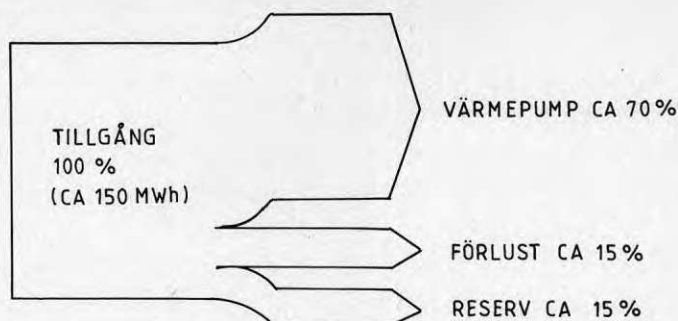
- starttemperaturen i lagret efter laddning blir ca 17°C
- sluttemperaturen i lagret kommer att variera mellan ca 6.6°C efter första året och ca 7.6°C efter tionde året
- öppnings- och stängningstid för genomströmmande sjövattnet blir omkring 1 maj respektive 20 augusti
- värmeförlusterna uppgår under första året till drygt 20% för att sedan avta till knappt 15% när stationära förhållanden råder. Uttryckt i temperaturförlust fås ca $2,4^{\circ}\text{C}$ resp ca 1.4°C .
- när stationära förhållanden råder fås ett energitillskott från omgivande berg under perioden feb - april motsvarande en temperaturhöjning i lagret på ca 0.6°C

I figur 11 redovisas temperaturförhållande i tunnel och berg när lagret är fulladdat respektive urladdat för säsong 1 och 10.



Figur 11 Temperaturförhållanden i lager och berg före och efter energiuttag år 1 och år 10

I figur 12 redovisas hur tillgänglig energimängd vid fulladdning, ca 150 MWh, fördelas under en säsong till värmepump respektive omgivande berg (värmeförluster). För värmepumpenläggningen avses enbart den energimängd som nyttjas när tunneln är stängd, d v s under perioden 20 augusti - 1 maj.



Figur 12 Lagrets energibalans

3.4 Temperaturskiktning

Anledningen till att man ofta eftersträvar temperaturskiktning i lagringssammanhang består i att man vill utnyttja ett varmare vatten till värmepumpen än aktuell medeltemperatur i lagret. Temperaturskiktning kan uppnås genom att det vatten som tillförs värmepumpen tas från lagrets topp, medan avkyllt vatten från värmepumpen återförs till lagrets botten. Med den struktur tunneln har i Gullspång (längd 200 m, diameter 8 m) så är betingelserna för temperaturskiktning ogynnsamma. Faktorer som påverkar möjligheterna till temperaturskiktning är i huvudsak

- geometri
- temperaturspann mellan vatten in/ut
- till lagret påförd mekanisk energi, dvs omrörnings-tendenser vid intag och kanske främst utsläpp till tunneln

För att vara på säkra sidan så har i samtliga beräkningar antagits total omblandning i magasinet. Alla andra situationer med i viss mån utvecklad temperaturskiktning kan bara förbättra driftbetingelserna.

3.5 In- och utläckage av lagrat vatten

Anledningen till att man studerar in- och utläckage beror på att man vill kvantifiera och helst undvika oönskade nedkylningar av värmelagret. Om man antar att inläckande vatten helt blandas med värmelagret, dvs att utläckande vatten alltid håller en temperatur som motsvarar lagrets medeltemperatur, så kan nedkylningen beskrivas av sambandet

$$\Delta T = (T_1 - T_0) e^{-tF/V} - T_0$$

där ΔT = avkylningen under tiden t

T_1 = lagrets starttemperatur

T_0 = temperatur på inläckande vatten

F = in-/utläckageflöde

V = lagrets volym

Det bör noteras att ovanstående ekvation även styr uppvärmningen av värmelagret när lagret öppnas för sjövattnengenomströmning. Flödet är i det fallet ca 250 l/min (= 1 omsättning/månad).

För att exemplifiera verkan av in-/utläckage så fås under en 9 månaders period avkylningen ca 2°C respektive ca 0,5°C vid nedan ansatta värden:

$T_1 = 17^\circ\text{C}$ $T_0 = 8^\circ\text{C}$ $F = 10 \text{ l/m}$ $V = 10\,000 \text{ m}^3$	\Rightarrow	$\Delta T = 2^\circ\text{C}$	$T_2 = 17^\circ\text{C}$ $T_0 = 8^\circ\text{C}$ $F = 5 \text{ l/m}$ $V = 10\,000 \text{ m}^3$	\Rightarrow	$\Delta T = 0,5^\circ\text{C}$
----------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------	------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------	--------------------------------

Av figur 7 framgår att tunneln står under vattentryck från den högre nivån i sjön till den lägre nivån i den nedlagda utloppskanalen. Detta innebär att ett eventuellt inläckage måste kompenseras av ett lika stort utläckage.

För att bestämma inläckande vattenflöde krävs mycket ingående och kostsamma studier både i form av beräkningar och fältstudier vilka ej ryms inom detta projekt. För lagret i Gullspång kan först konstateras att projektet ej står och faller med storleken på läckageflödet,

eftersom detta vatten kommer att hålla en temperatur som alltid är större än ca $+6^{\circ}\text{C}$, pga den värme som under sommaren inträngt i bergväggarna. Några större läckageflöden uppemot 5 - 10 l/min eller större blir det dock troligen inte fråga om i detta fall, eftersom synliga bergväggar vid inspektion bedömts vara täta. Endast ett mindre ras har ägt rum under perioden 1909 - 1982. Den del av lagret som är känsligast för läckage är den efter tunnelutloppet upplagda jordvallen, se figur 14 nedan. Utläckage genom denna förutsätter dock motsvarande inläckage från tunnelväggar. Risken för sistnämnda inläckage bedöms dock som liten. Alternativet till jordvall är en betongpropp, men pga stor fördyring med en sådan lösning kan denna ej rekommenderas i detta projekt.

3.6 Utlösningar och utfällningar

I lagringssammanhang i bergrum påtalas ofta risker för utlösningar och utfällningar vid vattnets kontakt med bergytor. Dessa processer är i hög grad temperaturberoende varför problemen först uppstår vid högtemperaturlagring. Exempelvis startas ofta utlösning av kiseltsyra med påföljande igensättningsbekymmer vid lagring av vatten som är varmare än $+60^{\circ}\text{C}$ - $+70^{\circ}\text{C}$. I detta projekt, med lågtemperaturlagring, behöver man således ej befara några speciella bekymmer till följd av själva lagringen. Dock må sedvanlig hänsyn tas till kvaliteter på nyttjat sjövattnet från sjön Skagern.

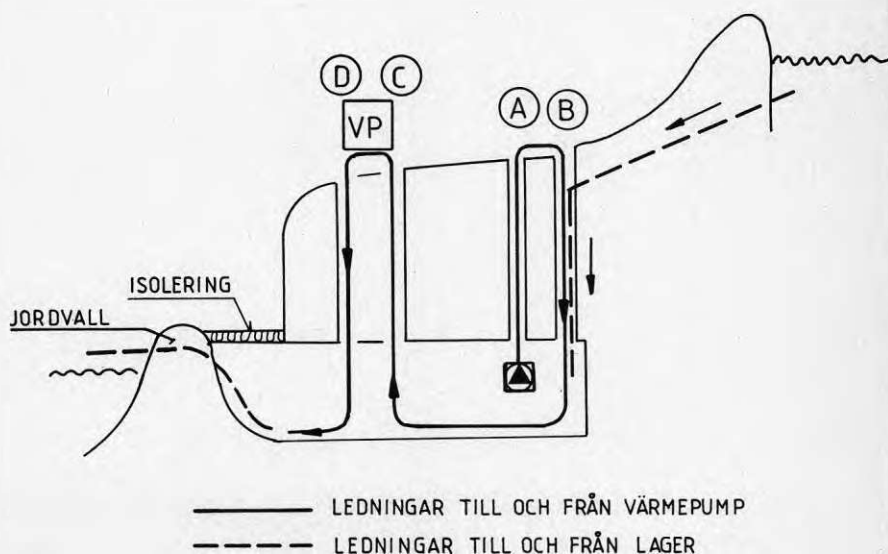
4 SYSTEMLÖSNING

4.1 In- och utloppsledningar

Ledningssystemet kan betraktas som två enheter, en enhet för värmepumpens vattenförsörjning och en för tunnelns.

4.1.1 Ledningar för värmepumpanläggning

För att överföra energi från lagret till värmepumpen pumpas vatten från lagret till värmepumpen för avkyllning. Efter avkyllning återförs vattnet till tunneln. För att undvika rundgång, dvs att få tillbaka nyss nedkyllt vatten till värmepumpen, så bör in- och uttagspunkter placeras så långt som möjligt från varandra. Lämpligen placeras intaget vid den punkt där vattnet från sjön släpps in i tunneln för att man på så sätt alltid skall kunna utnyttja varmaste vatten. Utloppet från värmepumpen placeras således i andra änden av tunneln. Se figur 13.

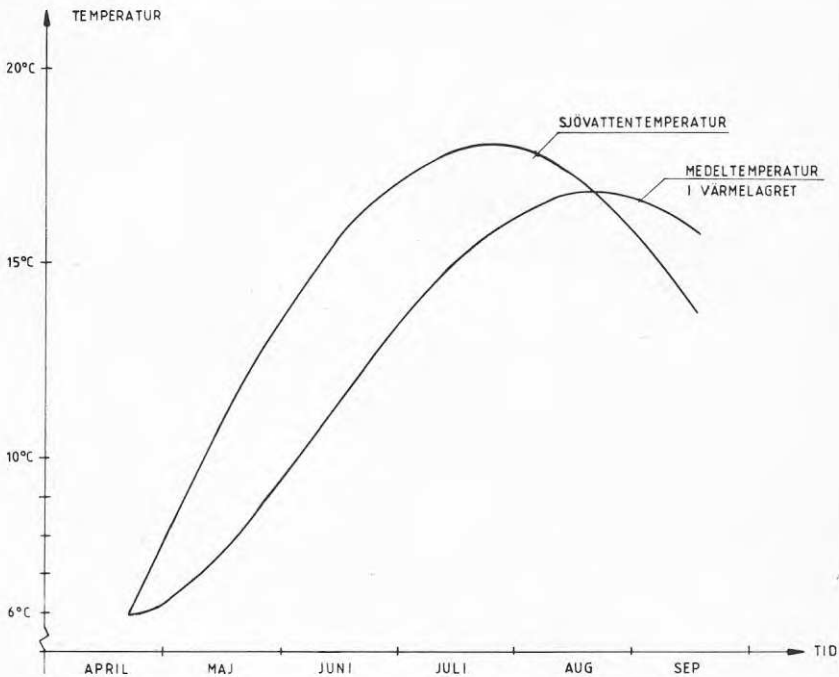


Figur 13 Ledningssystem

För att nå tunneln från markytan borras 4 hål, två närmast sjön och två under planerad byggnad. I tunneln under hål A monteras en upptagbar grundvattenpump. Denna trycker vattnet vidare från hål A till värmepumpanläggning genom hål C via en ledning genom hål B. Från värmepumpen återleds vattnet till tunnelns utloppsända genom hål D. Ett lämpligt flöde med tanke på erforderligt effektuttag samt med hänsyn till borrhålens dimensioner har befunnits vara ca $7 \text{ m}^3/\text{h}$.

4.1.2 Ledningar för värmelagret

Lagret påförs sjövattnet genom en självfallsledning i mark och vidare genom hål B. En vattenmängd, lika stor som tillförd, avleds genom ledning i jordvall. Vattenflödet planeras uppgå till minst $14 \text{ m}^3/\text{h}$ eller en omsättning per månad. Om man antar att tillfört vatten hela tiden blandas med vattnet i lagret så fås ett temperaturförlopp i värmelagret som funktion av tiden enligt figur 15 nedan. Härvid förutsätts en starttemperatur i lagret på $+6^\circ\text{C}$ samt att sjövattnets temperatur följer den sinusfunktion som beskrevs under 3.3.2.



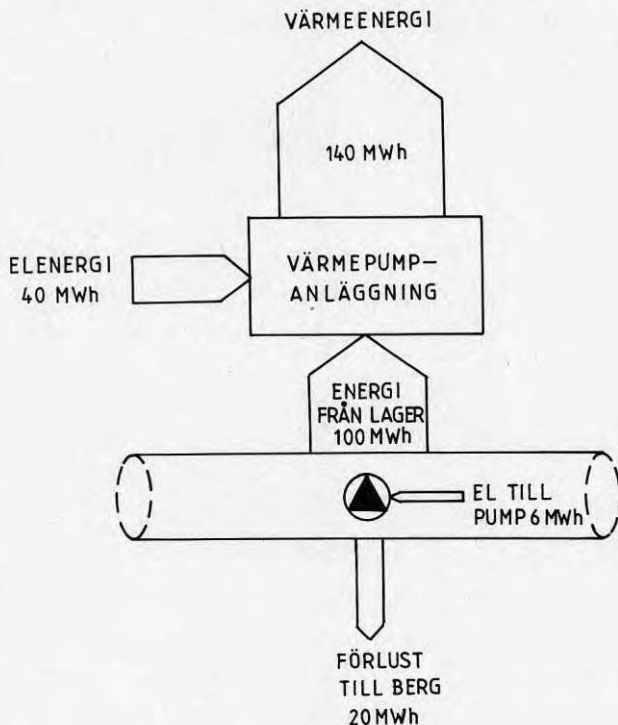
Figur 14 Temperaturhöjning i värmelagret vid sjövattnen genomströmning

I verkligheten går troligen temperaturhöjning i tunneln snabbare eftersom det vid utloppet från tunneln bör ha ansamlats ett vatten med en temperatur som är lägre än lagrets medeltemperatur.

Av figur 14 ovan framgår att lagret bör stängas för vattengenomströmning från sjön omkring den 20 augusti. Se även 3.3.3 och 3.3.4. Observera att sjövattentemperaturens maxvärde uppnås ca 1 månad tidigare än tunnelvattnets maxtemperatur.

4.2 Energiflöden

När stabila förhållanden råder kan systemets årsenergiflöden beskrivas med nedanstående diagram, figur 15. Energiberäkningen förutsätter en årsvärmefaktor på ca 3.5.



Figur 15 Energiflöden i systemet

Av figur 15 framgår att nettoenergibesparingen för denna anläggning uppgår till ca 95 MWh (140-40-6).

5 KOSTNADER

5.1 Investeringar

Nedan redovisas enbart kostnader (exkl moms) förknippade med värmepumpsystemet.

Värmepumpanläggning, 45 kW	75 tkr
Ledningsarbeten	150 tkr
Borrhål, 4 st	35 tkr
Jordvall	90 tkr
Övertäckning av fri vattenyta	10 tkr
Projektering	<u>40 tkr</u>
	400 tkr

Kostnaden för en motsvarande oljeeldad anläggning är ca 100 tkr och en elpanneinstallation kostar omkring 25 tkr.

5.2 Energikostnader

Enligt 4.2 kommer värmepumpanläggningen att leverera ca 140 MWh värme, varvid endast ca 45 MWh elenergi erfordras. Kostnaden för denna elenergi består av fast årlig avgift, energiavgift och energiskatt. Tillsammans ger det ett ekvivalent elpris på ca 28 öre/kWh och en total årskostnad på 12,6 tkr.

Motsvarande oljeanläggning skulle med 70 % årsmedelverkningsgrad förbruka 20 m³ olja per år till en kostnad av 42,5 tkr/år. Elpannealternativets energikostnad skulle med elpriset 28 öre/kWh bli ca 39,2 tkr/år.

5.3 Lönsamhet

Enligt ovan kommer värmepumpsystemet att producera värme till en kostnad av ca 9 öre/kWh exkl kapitalkostnad och kostnader för övrig drift och underhåll. Inkluderas underhållskostnader samt kapitalkostnad för 400 tkr med 15 års avskrivning för maskiner och 30 år för övrig utrustning och delar vid realräntan 4 %, så fås en total årskostnad som är jämförbar med årskostnaden för ett elpannealternativ. Årskostnaden för en oljeeldad anläggning blir avsevärt högre även med en högre realränta.

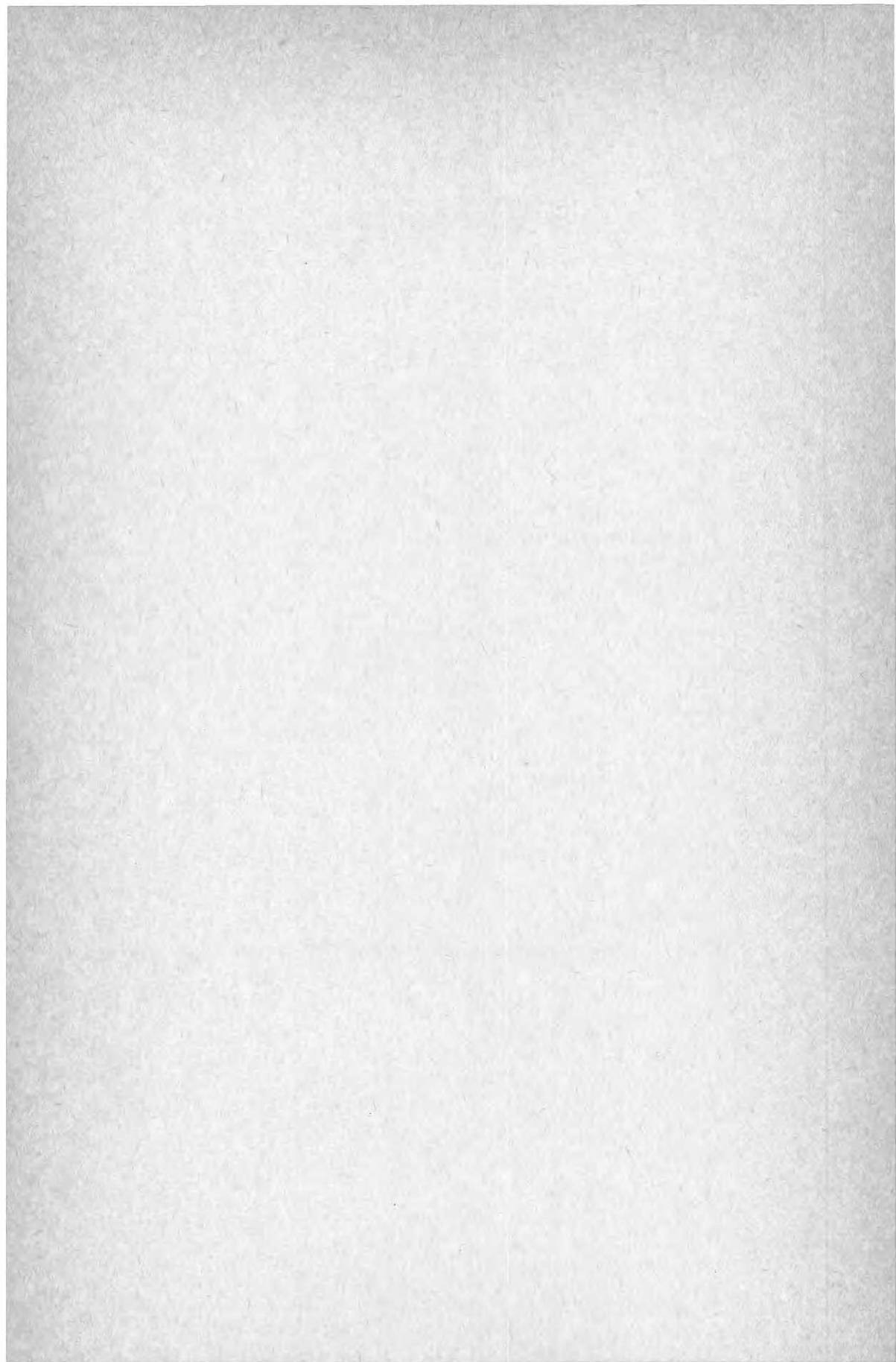
REFERENSER

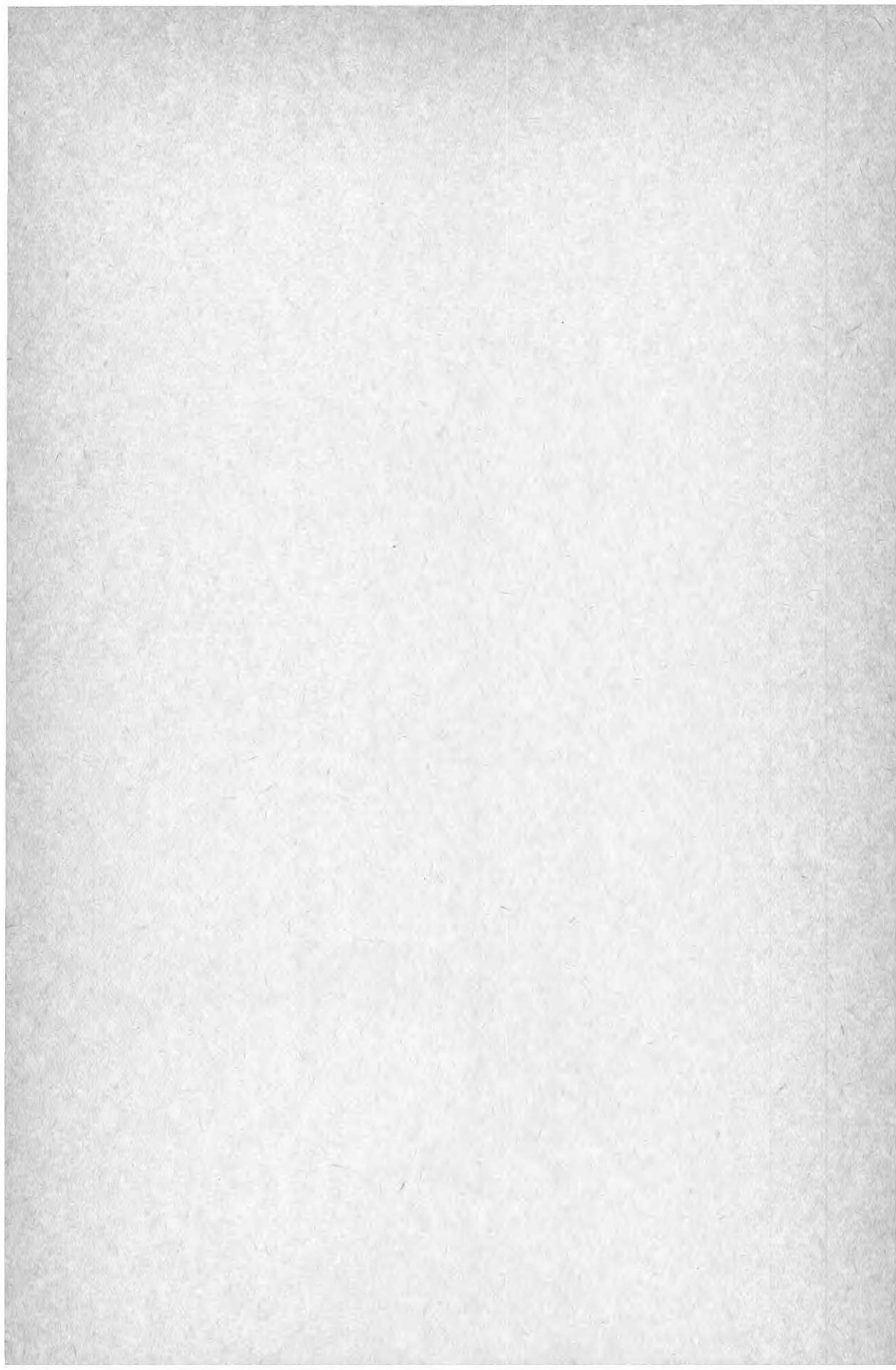
Claesson J, Eftring B och Hellström G
Temperature decline of a heated region in the ground
Lunds universitet 1980

Gustafsson G
Värmelagring i mark
Föredrag vid VIAKs 50-årsjubileum 1980

Svedinger B
Värme i jord, berg och vatten
BFR T 1:1981

Svensson T, Degerman E och Jansson B
Energiutvinning ur sjö- och havssediment
BFR R 76:1980





Denna rapport hänför sig till forskningsanslag
811157-9 från Statens råd för byggnadsforskning
till Gullspångs Kraftaktiebolag, Örebro.

R116: 1982

ISBN 91-540-3789-1

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Art.nr: 6700616

Abonnemangsgrupp:
W. Installationer

Distribution:
Svensk Byggtjänst, Box 7853
103 99 Stockholm

Cirka pris: 25 kr exkl moms