



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.



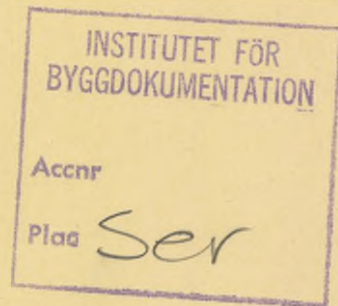
Rapport

R130:1984

**Värmelagring i berggrum i två
våningar**

Förstudie

Gunnar Gustafson



*V
Adn*

Byggeforskningsrådet

R130:1984

VÄRMELAGRING I BERGRUM I TVÅ VÅNINGAR
Förstudie

Gunnar Gustafson

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 830229-9
från Statens råd för byggnadsforskning till VIAK AB,
Göteborg.

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

R130:1984

ISBN 91-540-4241-0

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Liber Tryck Stockholm 1984

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

SID

1	SAMMANFATTNING	1
2	INLEDNING	2
3	NÅGRA FÖRUTSÄTTNINGAR	4
3.1	Byggnadsteknik	4
3.2	Borrningsteknik	5
3.3	Värme att lagra	6
3.4	Värme från lagret	6
3.5	Lagringsperiod	6
4	VÄRMEÖVERFÖRING FRÅN ETT BORRHÅL TILL OMGIVANDE BERG	7
4.1	Grundläggande samband	7
4.2	Temperaturen kring borrhålet vid stationärt till- stånd	9
4.3	Temperaturen kring borrhålet vid konstant värme- flöde	9
4.4	Temperaturen i borrhålet vid stationärt tillstånd	10
5	NÅGOT OM FLÖDEN OCH BORRHÅLSAVSTÅND	12
5.1	Bergets termiska egenskaper	12
5.2	Borrhålsavstånd	12
5.3	Lagringskapacitet hos ett borrhål	13
5.4	Inlagringsflöde	14
6	FÖRDELNING AV FLÖDEN MELLAN OLIKA BORRHÅL	15
6.1	Flödesförhållanden i borrhålet	15
6.2	Laminärt flöde i ett borrhål	16
6.3	Hydrostatiskt tryck i ett borrhål	17
6.4	Viskositet och densitet hos vatten vid olika tem- peraturer	17

6.5	Tryckskillnad mellan övre och undre ändan av ett borrhål	19
6.6	Flödesförändring genom strypning av borrhålet	21
7	MODELLBERÄKNING AV TEMPERATURER I OCH KRING BORRHÅLET	23
7.1	Differensformulering av problemet	23
7.2	Inre randvillkor	25
7.3	Yttre randvillkor	26
7.4	Programmets uppbyggnad	26
7.5	Beräkningsexempel	27
7.6	Temperatur i och kring borrhålet	28
7.7	Utgångstemperaturen och uttagen effekt	31
7.8	Effektivitetsmått	32
8	VÄRMEFÖRLUSTER	35
8.1	Transienta förluster för den första drifttiden	35
8.2	Transienta förluster för medellånga drifttider	36
8.3	Stationära förluster	36
8.4	Sammansatt värmeförlustkurva	37
8.5	Anvärmning	37
9	OPTIMERING AV BORRHÅLSAVSTÅND	39
9.1	Ingående förutsättningar	39
9.2	Marginalkostnadsfunktionen	39
9.3	Kostnadsoptimering	40
10	VÄRMELAGER I GÖTEBORG - ETT EXEMPEL	42
10.1	Spillvärmekälla	42
10.2	Urladdning	42
10.3	Lagrets dimensionering	43
10.4	Layout	43
10.5	Värmeförlust och anvärmning	46
10.6	Urladdningsflöde och returtemperaturer	47
10.7	Byggkostnader	48
11	REFERENSER	49

1 SAMMANFATTNING

Följande rapport redovisar förutsättningarna för att bygga stora värmelager i berg med en teknik som utvecklats från värmelagring i konventionella bergrum. Tekniken bygger på att kontakten mellan berg och värmebärare ökas genom att hål borraras mellan två bergrumsvåningar. På så vis sker värmelagringen både i berget och i vattnet i bergrummen.

Studien har visat att lagring bör vara tekniskt och praktiskt genomförbar även om lagret får något annorlunda egenskaper än ett konventionellt bergrum.

Studien avslutas med en jämförande ekonomisk kalkyl för denna typ av lager och ett bergrumslager om 50 GWh. Kalkylen visar att ett bergrumslager med samma karakteristika har ca 25 % högre byggkostnad än den föreslagna tekniken.

2 INLEDNING

För värmelagring i stor skala har olika koncept prövats. Som ett första steg utfördes lagren som isolerade gropar där uppvärmt vatten lagrades från sommar till vinter. Emellertid finner man att denna teknik har sina begränsningar, dels att den specifika kostnaden för lagret endast sjunker obetydligt sedan en viss storlek uppnåtts.

Nästa steg i utvecklingen var att flytta ned lagret i ett bergrum. Två sådana anläggningar har utförts i Avesta och Uppsala. Med en sådan förläggning sänks den specifika kostnaden vid stora volymer, och för ett lager i storleksordningen större än 100.000 m^3 bör tekniken under gynnsamma förhållanden vara lönsam.

För att ytterligare sänka den specifika kostnaden har flera modifierade förslag lagts fram. Dels att inte lasta ut allt berg ur bergrummet utan att lämna kvar en väsentlig mängd block, som får utgöra en del av lagret, dels att kombinera ett borrhålslager med bergrum.

Nackdelen med ett konventionellt borrhålslager är att en omfattande rördragning fordras för att föra ned värmen i borrhålen. Dessa rör är känsliga för mekanisk åverkan och svåra att justera in, vilket är en väsentlig nackdel för driftsäkerheten hos ett sådant system.

I varje bergrum lagras en del värme i botten och väggen. Genom att utföra rummet i två våningar och förbinda dem med borrhål ökar man denna kontaktyta väsentligt, se figur 2.1.

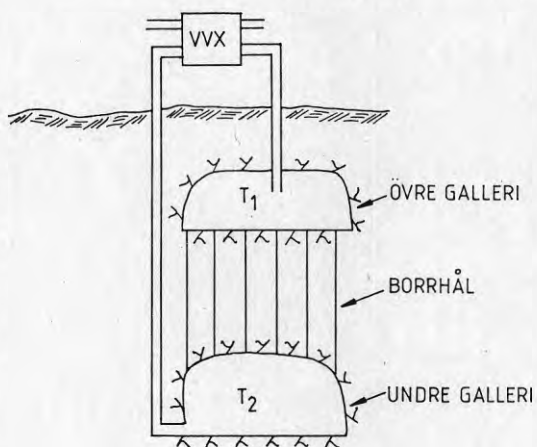


Fig 2.1 Bergrumslager i två våningar

Genom att utföra lagret på detta vis vinner man dels de installations- tekniska fördelar, som ett normalt bergrum har, med enkla in- och utlagringsanordningar, dels kan man hålla en viss temperaturskiktning i lagret för att bibehålla en så hög temperatur som möjligt.

Följande rapport behandlar funktion och dimensionering av bergrumslager i två våningar. Vidare ges som exempel en principutformning av ett dylikt lager med en kapacitet av 50 GWh för ett aktuellt exempel i Göteborg.

3 NÅGRA FÖRUTSÄTTNINGAR

3.1 Byggnadsteknik

Byggande av bergrum och tunnlar har mycket gamla traditioner i Sverige. Under 1960- och 1970-talen genomfördes en massiv utbyggnad av oljelager för olika syften. Detta medförde dels en specifik kostnadsänkning för berggrumsbyggande, dels att en optimal utformning av rummen provades ut.

Normalt är därför berggrumsanläggningar utformade som ett antal parallella skepp. Spännvidden är 15-20 m och höjden 20-30 m. Det inbördes avståndet mellan skeppen är 20-40 m. Se fig 3.1.

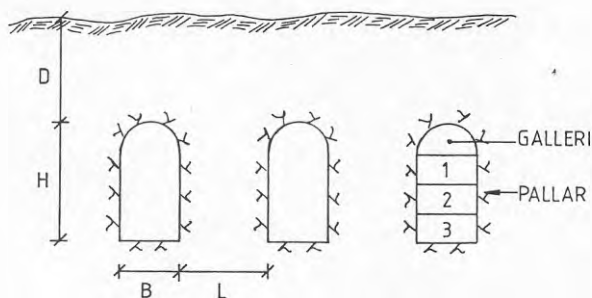


Fig 3.1 Berggrumslager i flera skepp

Normalt utsprängs rummen genom att ett galleri med en höjd av 4-8 m anläggs, varefter resterande berg tas i 2 till 4 pallar.

För ett berggrumslager i två våningar kan gallerisprängningstekniken utnyttjas, vilket skulle ge ett utrymme i övre och undre galleri med en bredd av ca 20 m och en höjd av ca 5 m.

Detta skulle ge möjlighet att utnyttja konventionell borrhinsutrustning i det övre galleriet.

För att ge lagret tillräcklig volym anläggs flera skepp parallellt.

3.3 Värme att lagra

Ett värmelager bli sannolikt ekonomiskt endast i det fall spillvärme finns tillgängligt i stora kvantiteter. Man finner vidare att lagrets kapacitet är i stort sett proportionellt mot temperatursvinget. Detta medför att man vill ha så hög temperatur som möjligt på det värme som skall lagras.

Det som begränsar temperaturen uppåt är främst bergets kemiska stabilitet då inga känsliga installationer finns och rummet kan sättas under tryck för att undvika kokning.

Av olika praktiska skäl är 120°C sannolikt den högsta temperatur, som kan ledas fram till värmeväxlaren ovan lagret, vilket medför en högsta laddningstemperatur av ca 115°C i rummet.

Olika studier av bergets kemiska stabilitet (Ronge & Claesson, 1982) har visat att en temperatur av ca 115°C bör vara möjlig.

3.4 Värme från lagret

Ett konventionellt fjärrvärmenät bör kunna tillgodogöra sig värme ned till ca $+60^{\circ}\text{C}$. Med värmeväxlingsförluster medför det en lägsta temperatur i lagret av ca $+65^{\circ}\text{C}$. Största temperatursving blir således 50°C ($65\text{-}115^{\circ}\text{C}$).

3.5 Lagringsperiod

Överskottsvärme för lagring finns främst under sommarmånaderna, maj-september, och värmen tillgodogöres under den kallaste delen av vintern, januari-mars. Under mellantiderna sker inte något uttag från lagret om inte det utnyttjas som haverireserv.

Kortare lagringsperioder kan dock tänkas om spillvärmekällan avger värme intermittent. I detta fall kan lagrets övre gallerier utnyttjas som effektutjämning.

4 VÄRMEÖVERFÖRING FRÅN ETT BORRHÅL TILL OMGIVANDE BERG

4.1 Grundläggande samband

Värmen överförs genom direktkontakt mellan värmebäraren, vatten, och borrhålsvägg, då inga rörsystem finns i hålet. Detta medför att övergångsmotståndet mellan borrhål och vägg blir lågt.

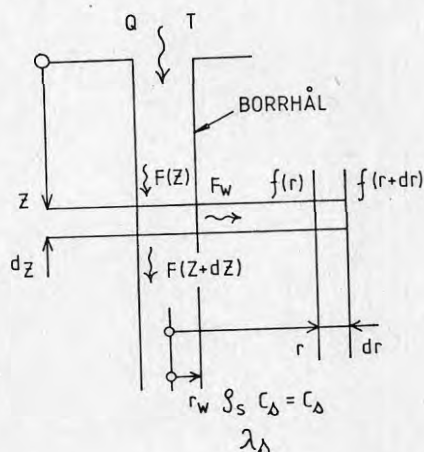
En rimlig approximation är vidare att anta värmeflödet radiellt kring borrhålet, med hänsyn till att avståndet mellan hålen är mycket mindre än deras längd.

Om omgivningstemperaturen sättes till $T_0 = 0$ blir värmeflödet i borrhålet:

$$F = Q \cdot C_w \cdot T$$

4.1

Där Q är flödet i borrhålet och $C_w = \rho_w \cdot c_w$, produkten av vattnets densitet och värmekapacitet, se fig 4.1.



$$F(Z) = Q \cdot C_w \cdot T(Z)$$

$$F_w = \int \cdot dz$$

$$f(r) = -\frac{dT(r)}{dr} \cdot \lambda \cdot 2\pi r$$

Fig 4.1 Värmeöverföringen från ett borrhål

För borrhålet kan då följande samband ställas upp:

$$Q \cdot C_{\omega} \cdot T(z) - f \cdot dz = Q \cdot C_{\omega} \cdot T(z + dz) \quad 4.2$$

Eller

$$\frac{dT}{dz} = - \frac{f(z, t)}{Q \cdot C_{\omega}} \quad 4.3$$

För området utanför borrhålet gäller följande samband:

$$f(r) - \frac{\partial T}{\partial t} \cdot C_s \cdot 2\pi r \cdot dr = f(r + dr) \quad 4.4$$

Eller

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{C_s}{\lambda} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad 4.5$$

Vid stationärt tillstånd försvinner högerledet i denna ekvation:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad 4.6$$

Tillsammans utgör ekvationerna 4.3 och 4.5 ett komplicerat system av differentialekvationer. För våra syften kan inledningsvis några enklare dellösningar utnyttjas.

4.2 Temperaturen kring borrhålet vid stationärt tillstånd

I analogi med grundvattenflödet, som följer samma flödeslagar som värme, har ekvation 4.7 följande lösning (Thiem 1906):

$$T_w = \frac{f}{2\pi\lambda} \cdot \ln \frac{R_0}{r_w} \quad 4.7$$

I denna ekvation är R_0 en integrationskonstant, som kan ses som en influensradie kring borrhålet. T_w är temperaturhöjningen vid borrhålsväggen.

4.3 Temperaturen kring borrhålet vid konstant värmefflöde

Om värmefflödet vid brunnsväggen, f , är konstant kan temperaturfördelningen kring borrhålet bestämmas som:

$$T = \frac{f}{4\pi\lambda} \int_u^\infty \frac{e^{-x}}{x} dx = \frac{f}{4\pi T} W(u) \quad 4.8a$$

$$u = \frac{r^2 c_s}{4\lambda t} \quad 4.8b$$

Även detta i analogi med grundvattenflödet kring en brunn (Theis 1935).

Funktionen $W(u)$ kan serietvecklas så att:

$$W(u) = -0,5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - \dots \quad 4.9$$

Vi finner här att för långa tider, $u < 0,01$, att serien kan approximeras med de två första termerna. Under dessa förhållanden gäller approximationen:

$$T = \frac{f}{4 \pi \lambda} \cdot \ln \frac{2,25 \lambda t}{r^2 C_s} \quad 4.10$$

Om denna funktion sättes till noll ger detta en möjlighet att beräkna ett approximativt värde på influensradien kring borrhålet.

$$R_0 = \sqrt{\frac{2,25 \lambda t}{C_s}} \quad 4.11$$

4.4 Temperaturen i borrhålet vid stationärt tillstånd

Vid stationärt tillstånd kan värmeflödet från borrhålet bestämmas med ekvation 4.7.

$$f = \frac{2 \pi \lambda T(z)}{\ln R_0/r_w} \quad 4.12$$

Tillsammans med ekvation 4.3 erhålles

$$\frac{dT}{dz} + \frac{2 \pi \lambda}{Q C_w \cdot \ln R_0/r_w} \cdot T = 0 \quad 4.13$$

Hjälpvariabeln $\beta = 2 \pi \lambda / C_w \ln R_0/r_w$ ger:

$$\frac{dT}{dz} + \frac{\beta T}{Q} = 0 \quad 4.14$$

Randvillkoren är $T(0) = T_0$ och $T(\infty) = 0$. Differentialekvationen får därmed följande lösning:

$$T = T_0 \cdot e^{-\beta z/Q} \quad 4.15$$

Temperaturen i hålet kommer således att avta exponentiellt längs hålet.

5 NÅGOT OM FLÖDEN OCH BORRHÅLSAVSTÅND

5.1 Bergets termiska egenskaper

Ett stort värmelager kan främst tänkas byggas i ett urberg av god kvalitet. Det svenska urberget består huvudsakligen av granitiska bergarter och olika gnejser. De kan variera ganska mycket i sammansättning, vilket också medför en variation i termiska egenskaper.

De termiska egenskaperna hos dessa bergartstyper har utretts i andra sammanhang, se bl a Ericsson 1984. Då denna utredning är av principiell karaktär kommer egenskaperna hos en normalbergart att användas. Värmeledningsförmågan väljes till $\lambda = 3,1 \text{ W/mK}$, värmekapaciteten till $c_s = 0,8 \text{ kJ/kg}$ och densiteten till $\rho = 2650 \text{ kg/m}^3$. Detta motsvarar sammansättningen hos en granodiorit. En sammansättning, som också är representativ för en normal gnejs.

Man bör dock påpeka att vid en detaljundersökning för ett verkligt objekt, bör de rådande termiska parametrarna för bergarten i fråga användas.

5.2 Borrhålsavstånd

Borrhålen bör sitta så tätt att värmets från hålet kan nå hela bergvolymen. Tidigare har visats att influensradien för värmefronten är en funktion av bergets termiska parametrar och lagringstiden. Lagringsperioden är ca tre månader och med den valda normalbergarten erhålles:

$$R_0 \approx \sqrt{\frac{2,25 \lambda T_L}{c_s}} = \sqrt{\frac{2,25 \cdot 3,1 \cdot 3 \cdot 30 \cdot 86400}{0,8 \cdot 10^3 \cdot 2650}} = 5,06 \text{ m} \quad 5.1$$

Detta värde anger gränsen för påverkan och för att berget skall utnyttjas måste avståndet mellan hålen vara högst detta avstånd.

Borrhålen kan då tänkas vara placerade i ett hexagonalt mönster enligt figur 5.1.

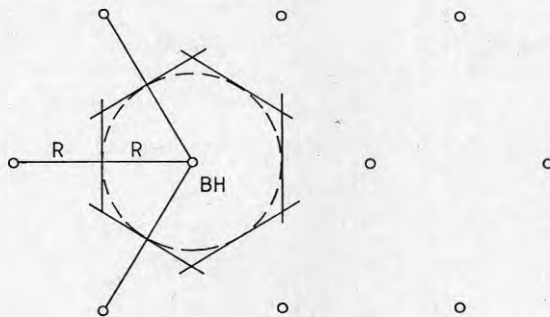


Fig 5.1 Hexagonalt borrhålsmönster

Influensområdet kring varje borrhål kan då approximeras med en cylinder med radien R . R bör enligt ovan vara ca 1,5 - 2,5 m.

5.3 Lagringskapacitet hos ett borrhål

Om borrhålet har längden L blir lagringskapaciteten ca:

$$W \approx \pi R^2 L \cdot C_s \cdot \Delta T \quad 5.2$$

Enligt tidigare är största borrhålslängd $L = 100$ m och temperatursvinget ca 50°C .

Detta medför med $R = 2$ m

$$W_H \approx \pi \cdot 2^2 \cdot 100 \cdot 2 \cdot 12 \cdot 10^6 \cdot 50 = 13,3 \cdot 10^{10} \text{ J} = 36,9 \text{ MWh}$$

5.4 Inlagringsflöde

Vid inlagringen tänkes temperatur och flöde på det tillförda vattnet vara konstant. Temperaturen vid utflödet kommer då att variera under inlagringscykeln. För att approximativt beräkna flödet i borrhålet kan man anta att den varierar linjärt med tiden, se figur 5.2.

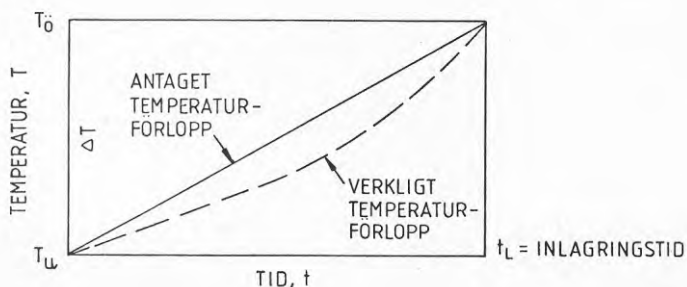


Fig 5.2 Principbild av temperaturförloppet efter borrhålet

Med det antagna temperaturförloppet kan den inlagrade energin beräknas som

$$W_L = \frac{Q \cdot c_w \cdot \Delta T \cdot t_L}{2} \quad 5.3$$

Med de angivna förutsättningarna ger detta ett flöde i borrhålet

$$Q = \frac{2W_H}{c_w \cdot \Delta T \cdot t_L} = \frac{2 \cdot 13,3 \cdot 10^{10}}{4,18 \cdot 10^6 \cdot 50 \cdot 3 \cdot 30 \cdot 86400} = 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \quad 5.4$$

Om borrhålet har en dimension av diam = 0,1 m erhålles en vattenhastighet av

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{1,6 \cdot 10^{-4}}{\pi \cdot 0,05^2} = 0,021 \text{ m/s} \quad 5.5$$

6 FÖRDELNINGEN AV FLÖDET MELLAN OLIKA BORRHÅL

Borrhålen kommer att fungera som ett stort antal parallellkopplade kanaler mellan det övre och det undre galleriet i berggrummet. Det som kommer att styra flödet i varje hål är tryckskillnaden mellan gallerierna och flödesmotståndet i borrhålet. Tryckskillnaden mellan gallerierna kommer att styras av pumpningen av vattnet i systemet. I det följande kommer stabiliteten av flödet i ett borrhål att undersökas med hänsyn till strypning av hålet.

6.1 Flödesförhållanden i borrhålet

Tryckförlusterna i ett borrhål kan allmänt uttryckas med ekvation 6.1:

$$-\frac{dh}{dL} = a \cdot v + b \cdot v^2 \quad 6.1$$

Där $-dh/dL$ utgör trycklinjens gradient. Den första termen, $a \cdot v$, utgör laminära förluster och den andra $b \cdot v^2$ turbulenta. Vid låga hastigheter dominerar de laminära förlusterna och vid höga hastigheter de turbulenta. Övergången styrs av Reynolds tal:

$$R_C = \frac{v \cdot D \cdot \rho}{\mu} \quad 6.2$$

Vid de i lagret aktuella temperaturerna, $T = 90^\circ\text{C}$, är vattnets densitet, $\rho = 965 \text{ kg/m}^3$ och viskositeten, $\mu = 0,31 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$. För ett borrhål med diametern 0,1 m och hastigheten $v = 0,05 \text{ m/s}$ blir Reynolds tal

$$R_C = \frac{0,021 \cdot 0,1 \cdot 965}{0,31 \cdot 10^{-3}} = 6540$$

De Wiest, 1965, anger ett värde av ca 2100 under vilket rörlöde alltid är laminärt. Det ovan angivna är väsentligt högre, men torde trots det ligga inom övergångsområdet mellan laminärt och turbulent flöde. I den fortsatta härledningen antages dock flödet vara laminärt.

6.2 Laminärt flöde i ett borrhål

Vid ett laminärt flöde uppkommer en parabolisk hastighetsfördelning, se figur 6.1.

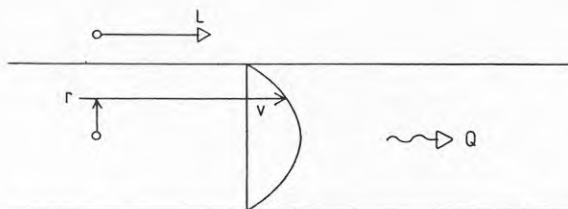


Fig 6.1 Hastighetsfördelningen i ett rör vid laminärt flöde

Enligt Poiseilles lag råder följande samband mellan trycklinjens gradient och flöde:

$$Q = - \frac{dh}{dL} \cdot \frac{\pi r^4}{8} \cdot \frac{\rho g}{\mu} \quad 6.3$$

Den tryckgradient i röret, som orsakas av flödet kan således beräknas som:

$$- \frac{dp}{dL} = \frac{8}{\pi} \cdot \frac{Q}{r^4} \cdot \mu (T) \quad 6.4$$

Där i detta sammanhang det är nödvändigt att ta hänsyn till att viskositeten är en funktion av temperaturen.

6.3 Hydrostatiskt tryck i ett uppvärmt borrhål

Det hydrostatiska trycket i ett borrhål tillväxer med produkten av densitet och jordacceleration:

$$\frac{dp_2}{dz} = \rho(T) \cdot g \quad 6.5$$

Även i detta fall måste hänsyn tas till att densiteten är en funktion av temperaturen.

6.4 Viskositet och densitet hos vatten vid olika temperatur

I figurerna 6.2 och 6.3 anges densitet och viskositet hos vatten för de temperaturer som är aktuella för lagret. Om temperaturerna, T , räknas från lagrets bastemperatur, 65°C , erhålles:

$$\rho(T) = r_1 + r_2 T = 978 - 0,64 T \quad 6.6$$

$$\mu(T) = m_1 + m_2 T = 0,42 \cdot 10^{-3} - 4 \cdot 10^{-6} \cdot T \quad 6.7$$

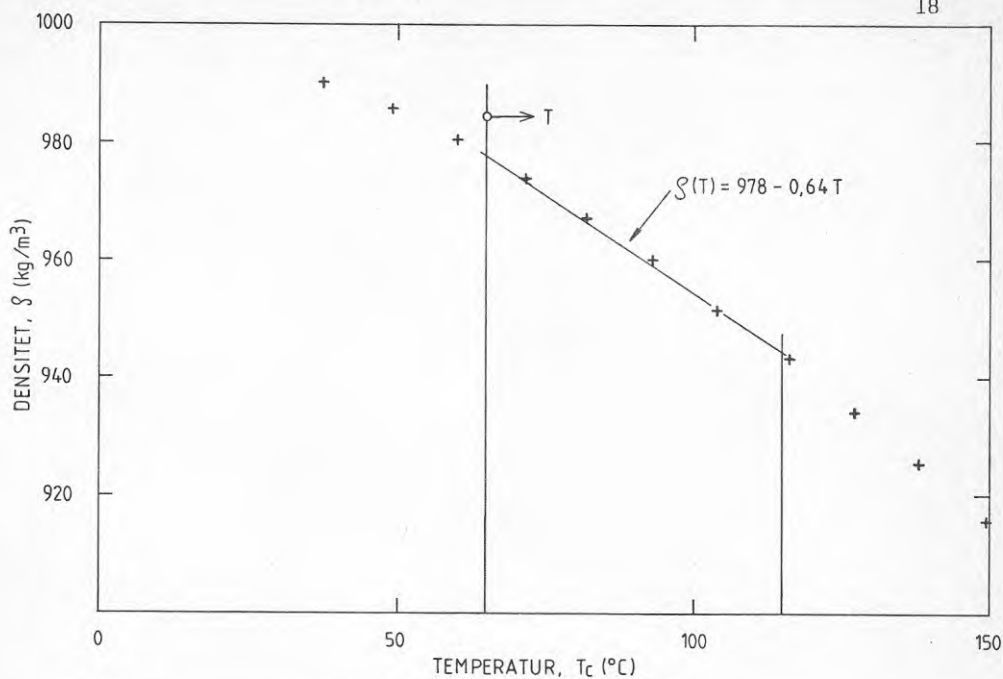


Fig 6.2 Densiteten hos vatten vid olika temperatur

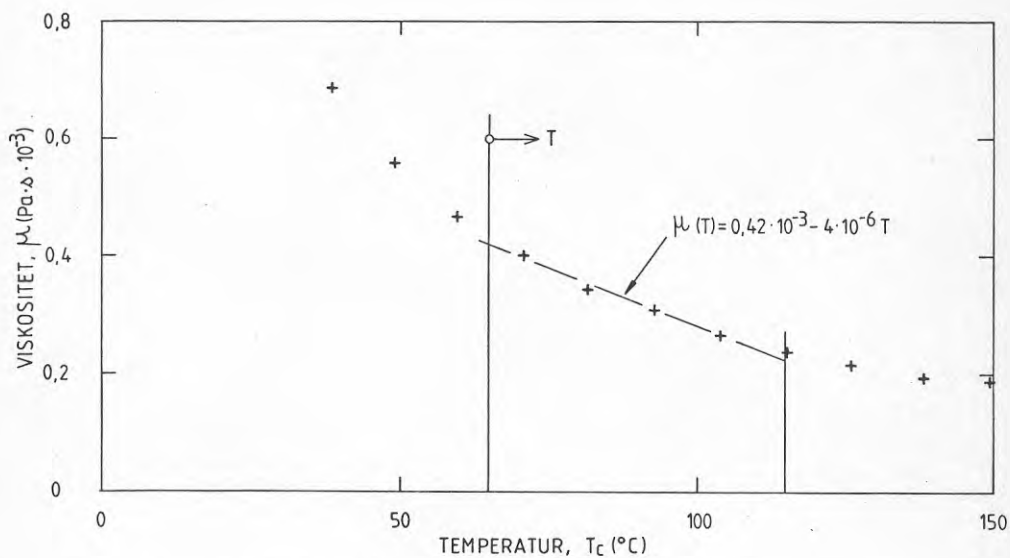


Fig 6.3 Viskositeten hos vatten vid olika temperaturer

6.5 Tryckskillnad mellan övre och undre ändarna av ett borrhål

Tryckskillnaden mellan de båda ändarna av ett borrhål i lagret, $p_B - p_A$, byggs upp dels av ett hydrostatiskt tryck, p_2 , dels av en tryckförlust genom flödet, p . Se figur 6.4.

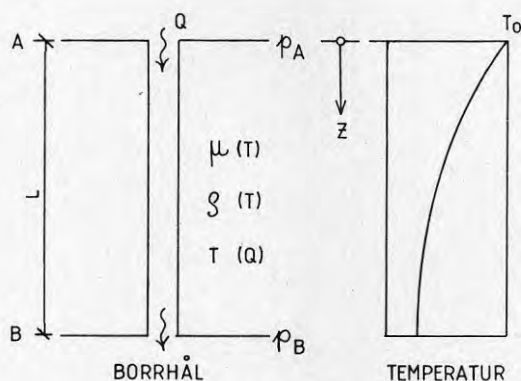


Fig 6.4 Tryck vid olika ändar borrhålet

Tryckskillnaden, som bestäms av pumpningen gtenom systemet, kan således för varje borrhål bestämmas som:

$$p_B - p_A = p_2 - p_1 = g \int_0^b \rho(z) dz - \frac{8}{\pi} \cdot \frac{Q}{r^4} \int_0^b \mu(z) dz \quad 6.8$$

Vidare gäller att båda viskositet och densitet är funktioner av borrhålstemperaturen samt att denna i sin tur är en funktion av flödet. Vid stationärt tillstånd gäller enligt tidigare:

$$T = T_0 \cdot e^{-\beta z/Q} \quad 6.9a$$

$$\beta = 2\pi\lambda/C_\omega \cdot \ln R_0/r_\omega \quad 6.9b$$

Då både viskositet och temperatur kan approximeras med rätlinjiga funktioner i det aktuella intervallet gäller:

$$\int_0^L \mu(z) dz = L (m_1 + m_2 \bar{T}) \quad 6.10$$

$$\int_0^L \rho(z) dz = L (r_1 + r_2 \bar{T}) \quad 6.11$$

Där \bar{T} betecknar medeltemperaturen i borrhålet. Denna kan beräknas som:

$$\bar{T} = \frac{1}{L} \int_0^L T_0 \cdot e^{-\beta z/Q} dz = \frac{T_0 Q}{L \beta} (1 - e^{-\beta L/Q}) \quad 6.12$$

Således erhålles:

$$p_1 = \frac{8}{\pi} \cdot \frac{Q}{r^4} \cdot L (m_1 + m_2 \cdot \frac{T_0 Q}{L \beta} (1 - e^{-\beta L/Q})) \quad 6.13$$

$$p_2 = gL (r_1 + r_2 \cdot \frac{T_0 Q}{L \beta} (1 - e^{-\beta L/Q})) \quad 6.14$$

6.6 Flödesförändring genom strypning av borrhålet

Tryckskillnaden mellan övre och undre borrhålsända kan uttryckas som:

$$p_B - p_A = p_2(Q) - p_1(Q, r) \quad 6.15$$

Om uttrycket differentieras med avseende på r erhålles

$$0 = \frac{dp_2}{dQ} \cdot \frac{dQ}{dr} - \frac{dp_1}{dQ} \cdot \frac{dQ}{dr} - \frac{dp_1}{dr} \quad 6.16$$

Eller:

$$\frac{dQ}{dr} = \frac{\frac{dp_1}{dr}}{\frac{dp_2}{dQ} - \frac{dp_1}{dQ}} \quad 6.17$$

Vi finner:

$$\frac{dp_1}{dr} = \frac{8}{\pi} Q \cdot \frac{-4}{r^5} \cdot L (m_1 + m_2 \bar{T}) = \frac{-4}{r} \cdot p_1 \quad 6.18$$

$$\frac{d\bar{T}}{dQ} = \frac{T_0}{\beta L} (1 - e^{-\beta L/Q}) + \frac{T_0}{Q} \cdot e^{-\beta L/Q} \quad 6.19$$

$$\frac{dp_1}{dQ} = \frac{8L}{\pi r^4} (m_1 + m_2 \bar{T} + Q m_2 \frac{d\bar{T}}{dQ}) = \frac{p_1}{Q} + \frac{8Q L m_2}{\pi r^4} \cdot \frac{d\bar{T}}{dQ} \quad 6.20$$

$$\frac{dp_2}{dQ} = gLr_2 \frac{d\bar{T}}{dQ} \quad 6.21$$

Under de förhållanden som antagits för berggrummet erhålles:

$$\frac{dQ}{dr} = 0,65 \cdot 10^{-6}$$

Om uttrycket utvecklas erhålles:

$$\frac{dQ}{Q} = \left(\frac{dQ}{dr}\right) \cdot \frac{r}{Q} \cdot \frac{dr}{r} \quad 6.22a$$

$$\frac{dQ}{Q} = 0,65 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{0,05}{1,6 \cdot 10^{-4}} \cdot \frac{dr}{r} = 2,0 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{dr}{r} \quad 6.22b$$

En måttlig förändring av radien ger således en helt obetydlig förändring av flödet.

Systemet kommer således att vara i stort sett opåverkat av strypning och genom densitetsskiktningen uppkommer en mycket jämn fördelning av flödet. Något speciellt fördelningssystem behövs således inte.

7 MODELLBERÄKNING AV TEMPERATUR I OCH KRING BORRHÅLEN

För att göra en beräkning av temperaturerna i och kring borrhålet möjlig måste bättre beräkningsmetoder än de tidigare angivna approximativa metoderna användas. För detta ändamål har en numerisk modell av lagringssystemet bygts upp. En sådan modell är i och för sig också en approximation men rand- och begynnelsevillkor kan bättre efterliknas än i enkla analytiska formler. För beräkningarna har en bordsdator, Epson Hx20, utnyttjats.

7.1 Differensformulering av problemet

För lösning av flödesekvationer har finita differensmetoden utnyttjats. Värmeflödet kring borrhålet är radiellt och följande differentialekvation gäller för värmeflödet i berget:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{C_S}{\lambda} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad 7.1$$

Om området kring berget delas in i ringar med tjockleken Δr erhålles med beteckningar enligt figur 7.1:

$$\frac{\partial T}{\partial r} \approx \frac{T_{m+1} - T_m}{\Delta r} \quad 7.2a$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \approx \frac{T_{m+1} - 2 T_m + T_{m-1}}{(\Delta r)^2} \quad 7.2b$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} \approx \frac{T_m^{t+\Delta t} - T_m}{\Delta t} \quad 7.2c$$

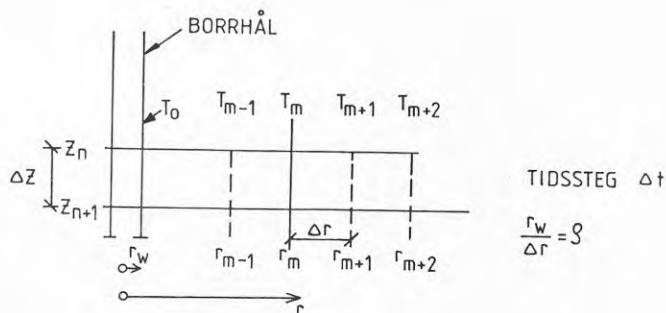


Fig 7.1 Differensnät för modellberäkning

Med dessa antaganden antages värmeflödet kring borrhålet vara radiellt och den vertikala komponenten försummas. Detta bör vara berättigat, då influensradien under en lagringsperiod som tidigare visats bör vara ca 5 m medan borrhålslängden är omkring 100 m.

Differentialekvationen kan således omformas till:

$$\frac{T_{m+1} - 2T_m + T_{m-1}}{\Delta r^2} + \frac{1}{(m+\rho)\Delta r} \cdot \frac{T_{m+1} - T_m}{\Delta r} = \frac{C_S}{\lambda} \cdot \frac{T_m^{t+\Delta t} - T_m}{\Delta t} \quad 7.3$$

Eller:

$$T_m^{t+\Delta t} = T_m + \frac{\lambda \cdot \Delta t}{C_S (\Delta r)^2} \left[(T_{m+1} - 2T_m + T_{m-1}) + (T_{m+1} - T_m) / (\rho + m) \right] \quad 7.4$$

Temperaturen efter nästa tidssteg kan således direkt beräknas om temperaturerna vid ett visst tillfälle är kända. Enligt McWorther och Sunada (1977) är lösningen stabil om:

$$\frac{\lambda \cdot \Delta t}{C_S (\Delta r)^2} < \frac{1}{2} \quad 7.5$$

7.2 Inre randvillkor

Vid borrhålsvägen kan flödet approximeras med:

$$f = \frac{(T_0 - T_1) 2 \pi \lambda}{\ln(r_\omega + \Delta r) / r_\omega} \quad 7.6$$

Vidare gäller att värmeflödet i borrhålet är:

$$H_n = Q \cdot C_\omega \cdot T_{n0} \quad 7.7$$

Samt att

$$H_n = H_{n-1} - f_n \cdot \Delta z \quad 7.8$$

En kombination av dessa tre ekvationer gör det således möjligt att beräkna borrhålstemperaturen vid nivån n enligt:

$$H_n = H_{n-1} + (T_{n0} - T_{n1}) \cdot 2\pi\lambda \Delta z / \ln(1 + 1/\rho) \quad 7.9a$$

$$T_{n0}^{t+\Delta t} = H_n / QC_\omega \quad 7.9b$$

7.3 Yttre randvillkor

Som tidigare nämnts blir influensområdet kring varje borrhål vid ett hexagonalt borrhålmönster approximativt en cylinder med halva borrhålsavståndet som radie. Av symmetriskäl kan cylinderns mantelyta betraktas som en isolerande yta. Detta innebär att något värme flöde inte kan passera. För randen, nodpunkt M, gäller då:

$$T_M^{t+\Delta t} = T_M - \frac{\lambda}{C_S} \cdot \frac{2(\rho+M+1)}{2M+2\rho-1} \cdot \frac{\Delta t}{(\Delta r)^2} \cdot (T_M - T_{M-1}) \quad 7.10$$

7.4 Programmets uppbyggnad

Programmet kan för godtycklig tid beräkna temperaturen i de olika nodpunkterna. Indata utgör flöde genom borrhålet, ingångstemperatur, termiska data för berggrunden samt tidssteg och nodpunktsavstånd.

7.5 Beräkningsexempel

I det följande kommer programmet att användas för att redovisa lagrets funktion. Som ett första exempel ges emellertid temperaturen i en skiva med en meters tjocklek. Ingångstemperaturen är 50°C . I figur 7.2 visas temperaturen efter olika tider från inlagringsstart.

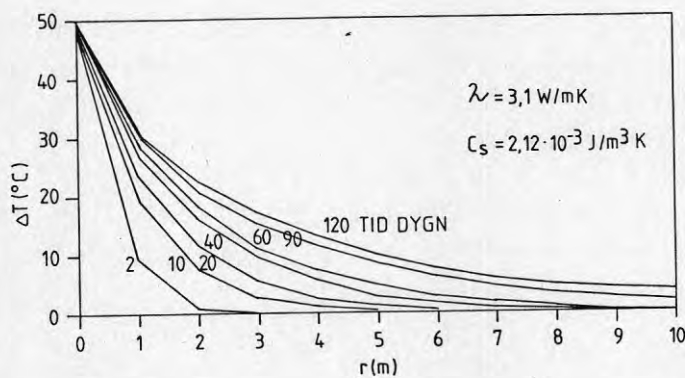


Fig 7.2 Temperaturen kring borrhålet efter olika tid

Som framgår av figuren är temperaturen vid den influensradie, som beräknats efter 90 dygn ca 9°C eller knappt 20 % av inlagringstemperaturen. Approximationen kan därför anses rimlig.

7.6 Temperatur i och kring borrhålet

För att få en orientering av lagrets funktion har körningar med olika flöden i borrhålet utförts. Temperaturen i varje nodpunkt har beräknats vid olika tidpunkter efter det att in- eller utlagring startats. I det följande redovisas två av dessa fall mera utförligt.

I det första fallet redovisas förloppet vid ett flöde i borrhålet av $Q = 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$. För beräkningsexemplet gäller vidare att temperatursvinget är 50°C och att den tidigare redovisade normalbergarten, $\lambda = 3,1 \text{ W/mK}$ och $c = 2,12 \cdot 10^6 \text{ J/M}^3\text{K}$, används. I figur 7.3 a-f visas temperaturen kring borrhålet efter olika tider. Man finner att för denna kapacitet leds temperaturen relativt snabbt genom borrhålet och att den sedan sprider sig radiellt kring hålet. Nederst till vänster på varje delfigur visas utgångstemperaturen.

I nästa fall redovisas förloppet vid ett flöde av $Q = 4 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$. Vi finner här att vi snarare får en vertikal temperaturspridning kring borrhålet och lagret kommer att fyllas uppifrån och ned.

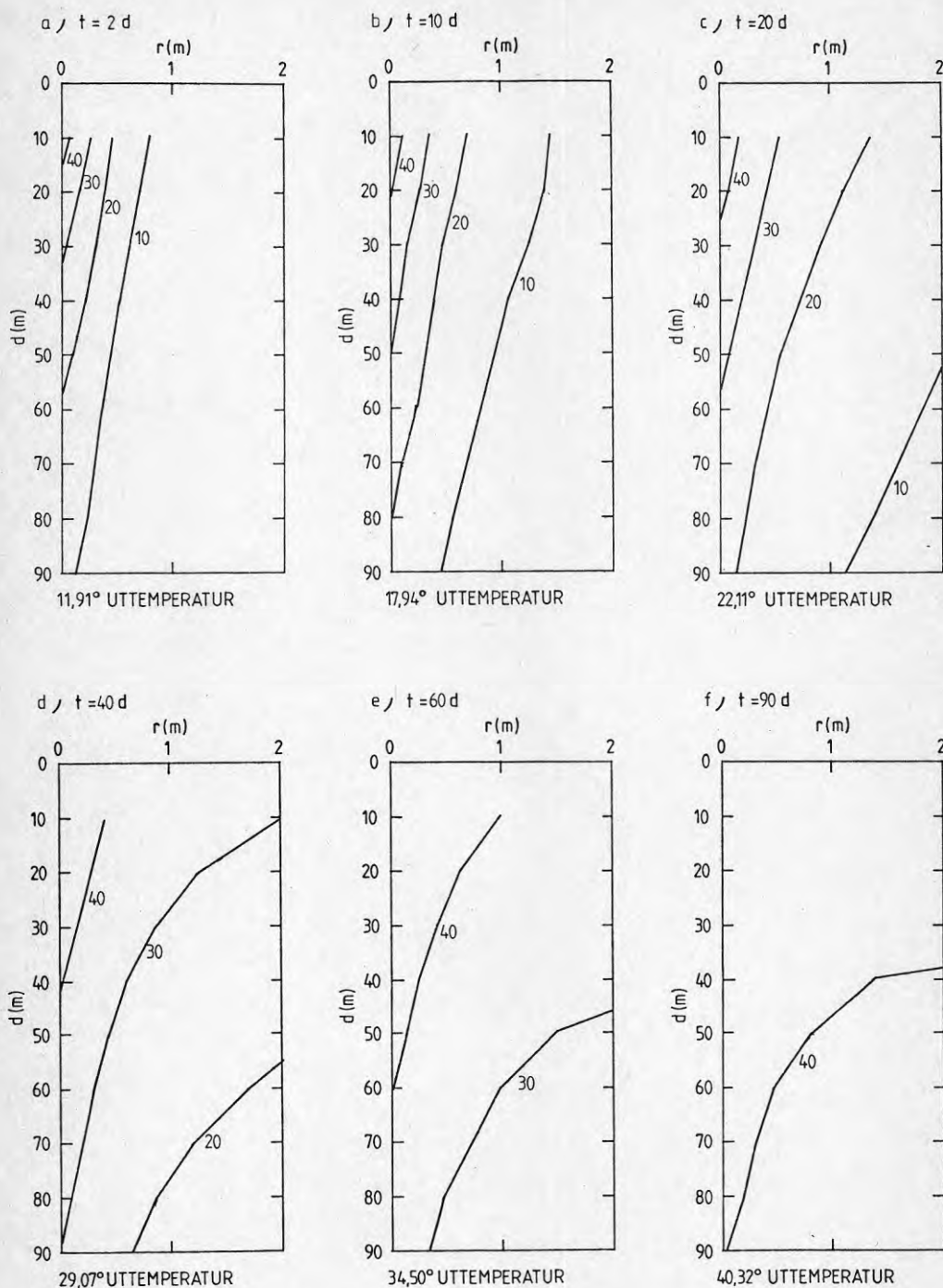


Fig 7.3 Temperaturen kring borrhålet vid olika tider.
 Flöde i borrhålet $Q = 1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$

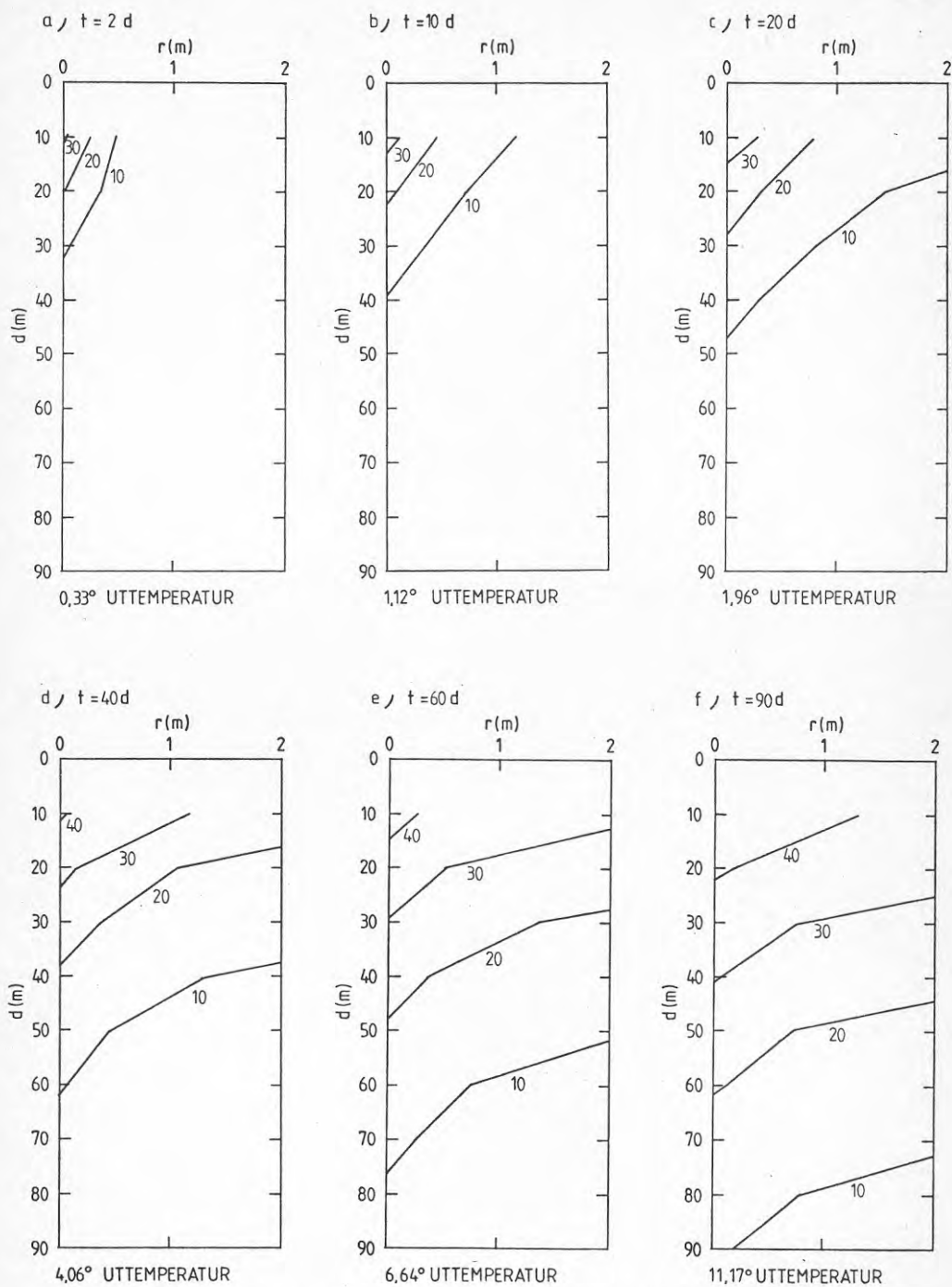


Fig7.4 Temperaturen kring borrhålet vid olika tider.

Flöde i borrhålet $Q = 4 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$

7.7 Utgångstemperaturen och uttagen effekt

I figur 7.5 redovisas utgående temperatur från borrhålet för de ovan redovisade fallen. För det större flödet finner vi att temperaturen snabbt stiger upp till ca 20°C för att därefter långsamt stiga mot sluttemperaturen.

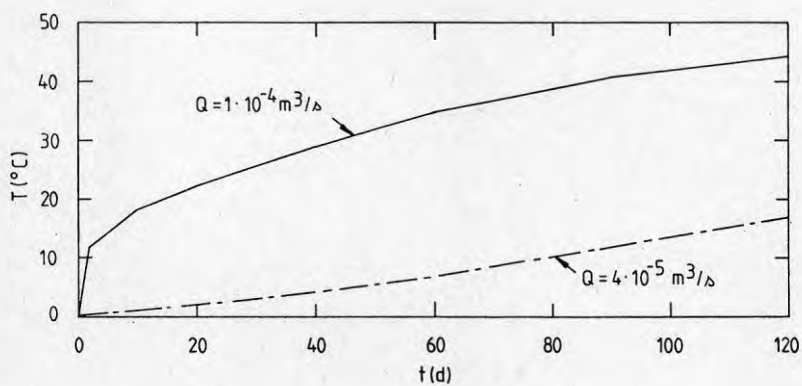


Fig 7.5 Utgångstemperatur från borrhålet

För det lägre flödet kommer under hela inlagringsperioden temperaturen att ligga lågt.

Utgångstemperaturen är direkt kopplad till den lagrade effekten så att:

$$P = (T_0 - T) \cdot C_\omega \cdot Q$$

7.11

I figur 7.6 redovisas lagringseffekten i de två fallen. Det högre flödet ger en stor inlagringseffekt i början av perioden som sedan avklingar. Det lägre flödet ger en i stort sett jämn effekt. Kurvorna skär varandra efter ca 50 dygn. Vi finner således att skillnaden i värmemängd inte är så stor trots att flödesskillnaden är avsevärd. Vilket flöde som skall väljas beror därför i hög grad på värmekällans karakteristika.

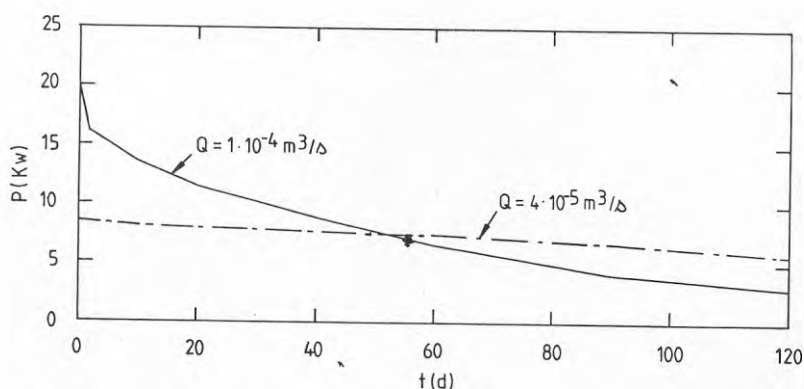


Fig 7.6 Lagringseffekt i borrhålet

7.8 Effektivitetsmått

För att ge en möjlighet att dimensionera lagret måste något mått på hur mycket värme som kan lagras i varje borrhål ställas upp. Dessutom bör också lagringseffekten i borrhålet kunna karakteriseras. För detta definieras följande parametrar:

$$\eta_T = \frac{\text{Inlagrad energi}}{\text{Lagerkapacitet}} = \frac{C_w \cdot Q}{C_s \pi R^2 \cdot T_0} \cdot \int_t (T_0 - T) dt \quad 7.12$$

$$\eta_Q = \frac{\text{Inlagrad energi}}{\text{Tillgänglig energi}} = \frac{1}{t T_0} \cdot \int_t (T_0 - T) dt \quad 7.13$$

Den första anger hur mycket värme som lagrats in dividerat med total teoretisk lagerkapacitet. Ju högre värde η_T har desto bättre utnyttjas den tillgängliga bergvolymen.

Den andra parametern anger hur stor andel av den i värmeflödet tillgängliga mängden som lagrats in i berget.

I figur 7.7 redovisas η_T som funktion av flödet i borrhålet vid olika borrhålsavstånd. Vi finner att inlagrad värmemängd är relativt oberoende av flödet och i stort sett styrs av borrhålsavståndet, $D = 2R$.

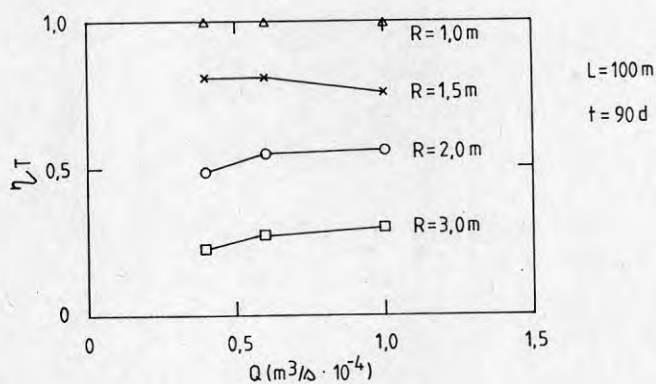


Fig 7.7 Lagrets verkningsgrad som funktion av borrhålsavstånd

I figur 7.8 redovisas η_Q som funktion av flöde och borrhålsavstånd. Denna parameter styrs till största delen av flödet på samma sätt som visats i figur 7.6.

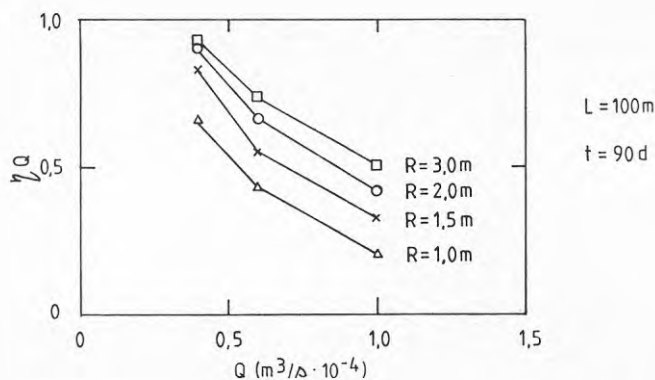


Fig 7.8 Inlagrad värmemängd dividerad med tillgänglig som funktion av flödet

Dessa förhållanden kan tas som utgångspunkt vid en dimensionering av lagret. Då η_T är relativt oberoende av flödet väljes först ett optimalt borrhålsavstånd, varefter flödet väljes med hänsyn till värmekällans karakteristiska egenskaper.

8 VÄRMEFÖRLUSTER

Värmeförlusterna kring lagret förutsättes främst ske genom ledning. Claesson et al (1983) har visat att lagrets värmeförluster styrs av medeltemperaturen i lagret och att relativt enkla analytiska formler för värmeförlustberäkningar kan användas med god noggrannhet jämfört med mera komplicerade numeriska modellsystem. Detta angreppssätt kommer därför att användas här.

8.1 Transienta förluster för den första drifttiden

Under inledningskedet sker värmeflödet i stort sett rakt ut från lagrets begränsningsyta. Man kan därför för kortare tider räkna med ett endimensionellt flöde, se figur 8.1.

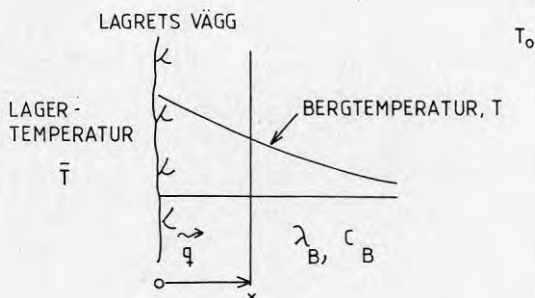


Fig 8.1 Värmeflöde från lagrets väggar

För endimensionellt transient värmeflöde från en yta med konstant temperatur gäller: (se Huisman 1972)

$$q_0 = \frac{\bar{T} - T_0}{\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{\frac{\lambda_B \cdot c_B}{t}} \quad 8.1$$

För den inledande lagringsperioden kan således denna formel användas om flödet fördelas över den kring lagret omskrivna ytan.

8.2 Transienta förluster för medellånga drifttider

För medellånga drifttider övergår flödet till att bli sfärsikt kring lagret. Claesson et al (1983) har angivit de transienta förlusterna från en sfär med konstant temperatur:

$$Q = 4 \pi R \lambda_B (\bar{T} - T_0) \cdot \left(1 + R \sqrt{\frac{C_B}{\pi \lambda_B t}} \right) \quad 8.2$$

8.3 Stationära förluster

För mycket långa tider uppnår förlusterna ett stationärt förhållande. För att anpassa geometrin bättre till den verkliga kan de stationära förlusterna från ett ellipsoidformat lager enligt Claesson et al (1983) anges till:

$$Q = 4\pi\lambda_B (\bar{T} - T_0) (A + B + L) / (3 - (A + B + L) / 2 D_M) \quad 8.3$$

Där A, B och L är ellipsens halvaxlar och D_M djupet till ellipsoidens centrum.

8.4 Sammansatt värmeförlustkurva

Om dessa olika uttryck för värmeförlusterna sätts samman i ett diagram erhålles en god approximativ kurva för de tidsberoende värmeförlusterna från lagret. Ett exempel redovisas i figur 8.2.

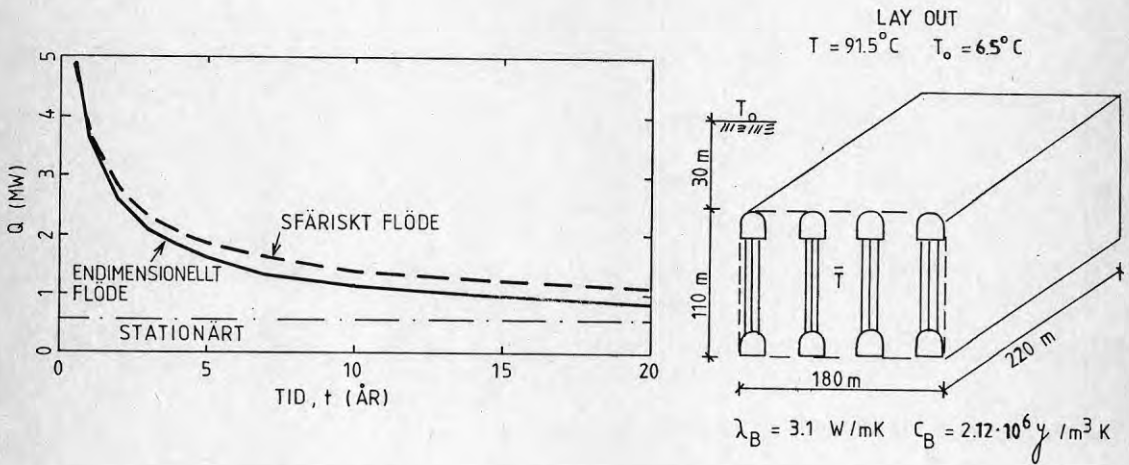


Fig 8.2 Värmeförluster från lager

Med dessa metoder kan således lagrets värmeförluster enkelt uppskattas.

8.5 Anvärmning

Som framgår av figur 8.2 är värmeförlusterna stora i inledningsfasen. Detta värme åtgår för att värma upp berget kring lagret och bör betraktas som en investering i lagret.

Om vi betraktar ekvation 8.2 finner vi att värmeförlusterna kring ett sfäriskt lager kan uttryckas som summan av två termer. Den första representerar de stationära förlusterna och den andra det transienta flöde som krävs för att värma upp berget kring lagret. De senare är de egentliga anvärningsförlusterna:

$$Q_A = 4R^2 \cdot (\bar{T} - T_0) \cdot \sqrt{\frac{\lambda_B C_B}{\pi t}} \quad 8.4$$

Om dett flöde integreras över tiden erhålles anvärningsförlusten som:

$$E_A = \int_0^t dt \cdot 4R^2 (\bar{T} - T_0) \cdot \sqrt{\frac{\lambda_B C_B}{\pi t}} = \frac{8R^2}{\sqrt{\pi}} (\bar{T} - T_0) \cdot \sqrt{\lambda_B C_B t} \quad 8.5$$

I figur 8.3 redovisas den ackumulerade anvärningsförlusten för det ovan visade exemplet.

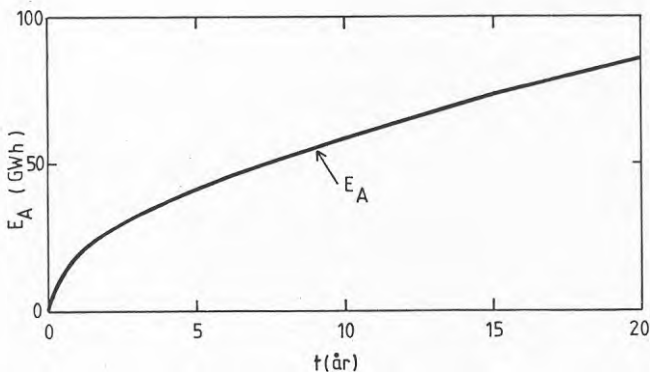


Fig 8.3 Anvärningsförluster

Man bör dock framhålla att denna modell är approximativ, då den förutsätter ett sfäriskt lager i en oändlig omgivning. För de första åren torde dock de beräknade mängderna vara rättvisande.

9 OPTIMERING AV BORRHÅLSAVSTÅND

Som framgår av det tidigare varierar lagrets effektivitet med olika borrhålsavstånd. Vi finner emellertid att kostnaden för lagret också beror av borrhålsavståndet. Någonstans bör det ur ekonomisk synpunkt gå att finna ett optimalt borrhålsavstånd.

9.1 Ingående förutsättningar

Av borrhningstekniska skäl kan avståndet mellan övre och undre galleri inte sättas större än ca 100 m. Detta medför att transportens längd är låst oberoende av borrhålsavståndet. Vidare måste av arbetstekniska skäl höjden i gallerierna vara ca 5 m.

Utsprängningskostnaderna för galleriet är hösten 1982 ca 105 kr/m³ och borrhningskostnaden 85 kr/m i Göteborgstrakten.

9.2 Marginalkostnadsfunktionen

Borrhålsavståndet optimeras så att marginalkostnaden, K, för att lagra en kWh blir så låg som möjligt. Vi söker således minimum av K.

$$K = \frac{\text{Kostnaden för ett borrhål + gallerier}}{\text{Värmekapaciteten för ett borrhål + gallerier}} \quad 9.1$$

Effektiva värmekapaciteten för ett borrhål blir enligt ekvation (7.12).

$$C_{BH} = \eta_T \cdot C_B \cdot \pi R^2 \cdot T_0 \cdot L \quad 9.2$$

Där R betecknar halva borrhålsavståndet och L borrhålslängden. Vi har tidigare funnit att η_T är i stort sett oberoende av flöde i hålet, se figur 7.7.

Värmekapaciteten för gallerierna blir på samma sätt:

$$C_G = C_\omega \cdot \pi R^2 \cdot T_0 \cdot H \quad 9.3$$

Där H betecknar gallerihöjden. Genom att vid normala driftfall temperatursvinget i det undre galleriet inte slår igenom helt, se figur 7.5, reduceras i detta sammanhang temperatursvinget för detta med 30 %.

Kostnaden för att borra hålet beräknas som:

$$K_{BH} = L \cdot \kappa_{BH} \quad 9.4$$

Där κ_{BH} betecknar borrhålskostnaden per meter.

Kostnaden för att spränga ut galleriet är:

$$K_G = \pi R^2 H \cdot \kappa_G \quad 9.5$$

Kostnadsfunktionen blir således:

$$K = \frac{L \cdot \kappa_{BH} + 2 \cdot \pi R^2 H \cdot \kappa_G}{\eta_T \cdot C_B \cdot \pi R^2 T_0 \cdot L + 1,7 \cdot C_\omega \cdot \pi R^2 T_0 H} \quad 9.6$$

9.3 Kostnadsoptimering

Under givna förutsättningar och med effektivitetsfaktorn, η_T , given enligt figur 7.8 redovisas kostnadsfunktionen i figur 9.1.

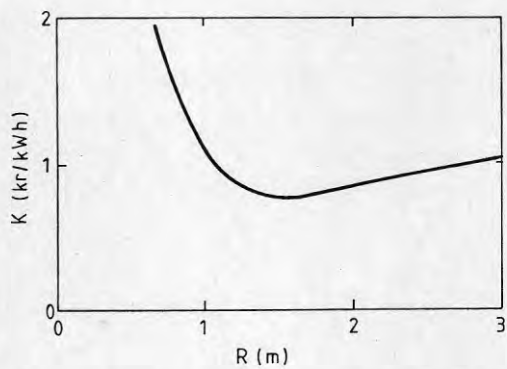


Fig 9.1 Kostnadsfunktionen K

Som framgår har marginalkostnadsfunktionen ett flackt minimum vid en radie av ca 1,6 m. Denna kan givetvis förändras vid andra priser på borring och sprängning.

10 VÄRMELAGER I GÖTEBORG - ETT EXEMPEL

Under åren 1982-1983 har för lagring av spillvärme från raffinaderier i Göteborg genomförts en serie förstudier där olika lagertyper studerats. Studierna har sedan utvärderats av Energiverken i Göteborg och resultatet förväntas under våren 1984.

För att ställa tvåvåningsbergrum mot existerande teknik har här ett lager dimensionerats och kostnadsberäknats enligt samma förutsättningar, som gällde i ovanstående studier. Då VIAK i detta sammanhang studerade ett bergrumslager kommer tvåvåningsbergrummet direkt att ställas mot ett sådant.

10.1 Spillvärmekälla

Vid raffinaderierna i Göteborg finns flera möjliga spillvärmekällor. Den sannolikt mest attraktiva är hetvatten från BP-Volvosystemet. Denna har följande karakteristika:

Framledningstemperatur	124 ⁰ C	Returtemperatur	60 ⁰ C
Flöde	64,2 kg/s	Effekt	17,3 MW
Tillgänglighet	3.000 h	Värmemängd	51,8 GWh

10.2 Urladdning

Lagrad energi laddas ur under den kallaste perioden, 15 december--15 mars, för att ersätta olja. Urladdningstiden är således ca 90 dygn.

10.3 Lagrets dimensionering

Då urladdningsperioden är kortast, ca 90 d, kommer denna att vara styrande för lagrets effektivitet. I avsnitt 9.3, har visats att det optimala borrhålsavståndet är $2R = 3,2$ m i ett hexagonalt mönster. Om den tidigare redovisade lay-outen med $L = 100$ m mellan gallerierna använts och en gallerihöjd av $H = 5$ m används kommer varje borrhål att motsvara en lagringskapacitet av:

$$C_{BH} + C_G = A_H (L \cdot C_B \cdot \eta_T + 1,7 H \cdot C_w) (T_{\max} - T_{\min}) \quad 10.1$$

Arean kan för den kring borrhålet kringskrivna sexhörningen beräknas som:

$$A_H = 2 \sqrt{3} \cdot R^2 \quad 10.2$$

Temperatursvinget i lagret anges till $T_{\max} - T_{\min} = (119 - 65) = 54^\circ\text{C}$
Effektivitetsfaktorn kan enligt figur 7.7 anges till $\eta_T = 0,75$. Vi finner således:

$$C_{BH} + C_G = 2 \cdot \sqrt{3} \cdot 1,6^2 (100 \cdot 0,59 \cdot 0,75 + 1,7 \cdot 5 \cdot 1,16) \cdot 54 = 25,91 \text{ MWh}$$

Med en önskad bruttolagringskapacitet av 51,8 GWh fordras således totalt 2.000 borrhål.

10.4 Layout

Av byggnadstekniska skäl är en spännvid av ca 16 m i gallerierna lämplig. Vidare måste mellan gallerierna en pelare med samma tjocklek, dvs 16 m, lämnas. Medelhöjden sättes till 5 m vilket ger en något högre pilhöjd. Borrhålen placeras i ett hexagonalt mönster i gallerigolvet. Med ett borrhålsavstånd om 3,2 m ger 4,5 borrhålsrader en bredd av 14,4 m, vilket ger ett avstånd från den närmsta hålraden till väggen av ca 0,8 m, se figur 10.1.

För att utnyttja galleriet bättre kan dessutom ett snedhål borrar från det övre galleriet till nästa undre galeri. Detta medför således fem borrhål per rad. Med totalt 2.000 borrhål fordras således 400 hålrader.

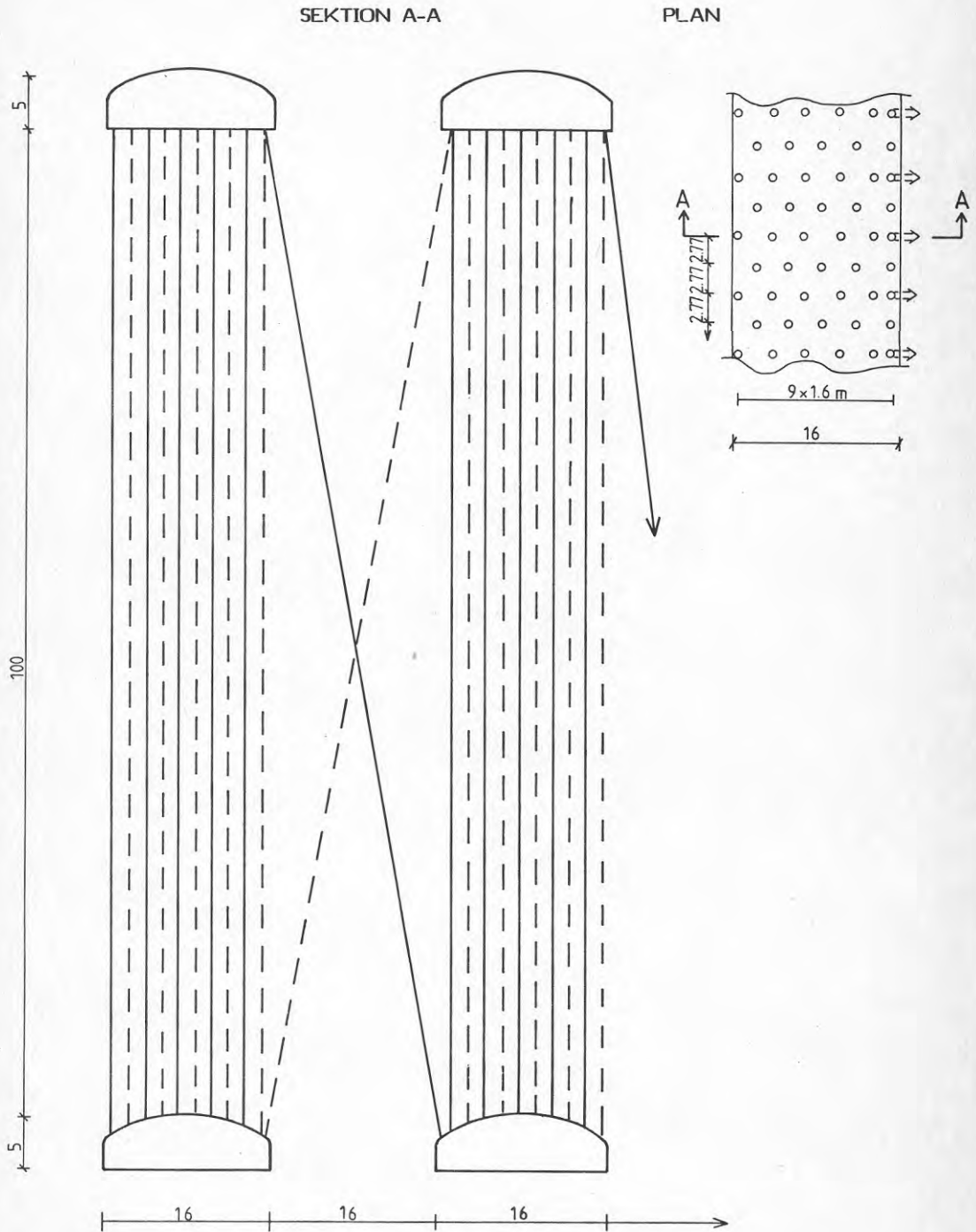


Fig 10.1 Plan och sektion för del av lagret

Avståndet mellan hålräderna bestäms av det hexagonala mönstret till $3,2 \times \sqrt{3}/2 = 2,77$ m. Totalt fordras således 1.108 m gallerier i varje våning. 6 st gallerier utföres med en länga av 185 m, vilket ger en totalbredd för anläggningen av 176 m, se figur 10.2.

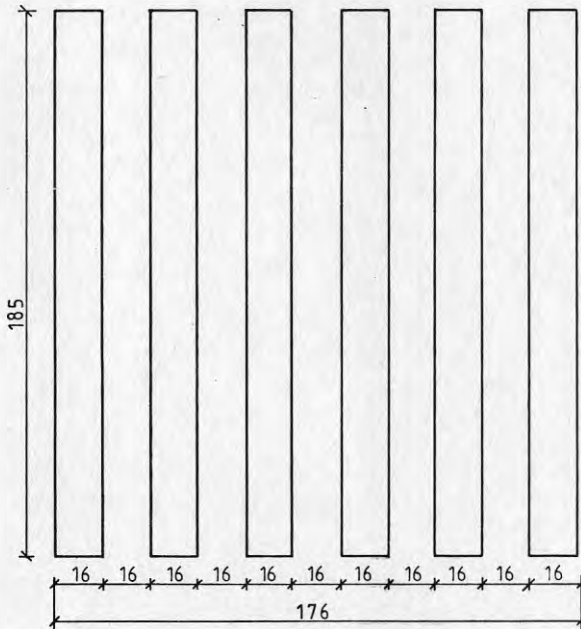


Fig 10.2 Gallerilayout

Till gallerierna för en transporttunnel med lutning 1:7,5 som föres vidare ned till den undre gallerinivån. Om övre galleriet placeras 30 m under markytan medför detta en tunnel om ca 225 m längd. Tunneln vidare ned till det undre galleriet blir $105 \times 7,5 = 787,5$ m. Till dessa sprängningsarbeten kommer vissa stigschakt, förbindelsetunnlar m m.

Borrningsarbetet blir som tidigare nämnts 2.000 hål á 100 m. Av borrhörningstekniska skäl väljes dimensionen $\varnothing 115$ mm.

10.5 Värmeförlust och anvärmning

De stationära värmeförlusterna kan beräknas med den approximativa formeln för en ellipsoid, ekvation 8.3, till:

$$Q = 4\pi \cdot 3,1 \cdot 83 \cdot (55 + 88 + 92,5) / (3 - (55 + 88 + 92,5) / 2 \cdot 85) = 0,43 \text{ MW} \quad 10.3$$

Om den ekvivalenta radien sättes till 95 m blir anvärningsförlusterna under 10 år

$$E_A = \frac{8 \cdot 95^2}{\sqrt{\pi}} \cdot 83 \cdot \sqrt{3,1 \cdot 2,12 \cdot 10^6 \cdot 10 \cdot 365 \cdot 86 \cdot 400} = 42,8 \text{ GWh} \quad 10.4$$

Denna värmemängd kan tillföras antingen som extra laddning eller genom att lagret laddas ur mindre.

Om anvärmning och värmeförluster tas genom att lagret laddas ur mindre erhålles de approximativa urladdningsmängder som anges i figur 10.3.

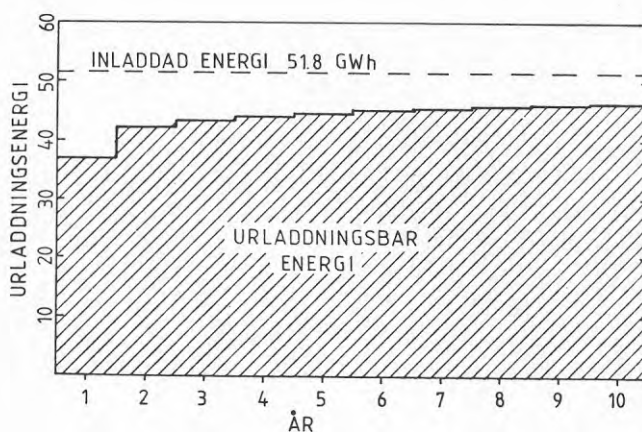


Fig 10.3 Utladdningsbar energi

10.6 Urladdningsflöde och returtemperatur

För att anpassa flöden och returtemperaturer till det verkliga fallet fordras mer detaljerade uppgifter än vad som anges i förutsättningarna ovan. Detta orsakas av att man måste ta hänsyn till hela uppvärmnings-systemets funktion för att anpassa värmets kvalitet till behovet.

Storleksordningarna kan dock anges på följande vis. Urladdningsvärme-mängden kan efter de första två åren anges till ca 45 GWh, se figur 10.3. Värmeförluster och anvärmning medför således att lagrets topptemperatur sänks i medeltal med ca 7^o C. Urladdningseffekten blir för en urladdningsperiod om 90 dagar:

$$P_u = \frac{Eu}{t} = \frac{45 \cdot 10^6}{90 \cdot 24} = 20,8 \text{ MW} \quad 10.5$$

Totalflödet genom anläggningen blir

$$Q_u = \frac{P_u}{\Delta t \cdot c_w} = \frac{20,8 \cdot 10^6}{(54-7) \cdot 4,18 \cdot 10^6} = 0,106 \text{ m}^3/\text{s} \quad 10.6$$

Fördelat på 2.000 borrhål ger detta ett flöde per borrhål av $5,3 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$. I figur 7.5 ges returtemperaturen för två olika borrhålsflöden. Som framgår av denna kommer oaktat lagringsvolymerna i gallerierna returtemperaturen att stiga med ca 12^o C vid periodens slut för ett flöde av $4 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$.

10.7 Byggkostnader

Byggkostnaderna har uppskattats med samma förutsättningar, som gällt i Göteborgsstudien. D v s en anläggning placerad vid energiverkens värmecentral vid Ryaverket och byggkostnader i göteborgsområdet hösten 1982. För värmeväxlare, kulvertar m m har samma kostnader som i den tidigare studien använts då motsvarande utrustning även används för denna typ av lager.

Sprängning och utlastning

Övre galleri	1.110x80 m ³	á	100 kr	8,9 Mkr
Undre galleri	1.110x80 m ³	á	100 kr	8,9 Mkr
Transporttunnel	1.015x45 m ³	á	135 kr	6,2 Mkr
Stigschakt m m	3.000 m ³	á	375 kr	1,1 Mkr
Summa				25,1 Mkr
Förstärkning och inklädnad				2,5 Mkr
Borrning	200.000 m	á	85 kr	17,0 Mkr
Betongkonstruktioner				1,5 Mkr
Installationer				1,8 Mkr
Summa anläggningsarbeten				47,9 Mkr
Försäljning sprängsten				-2,0 Mkr
Värmeväxlare, pump, rör				1,4 Mkr
värmekulvert				1,1 Mkr
Totalsumma				48,4 Mkr

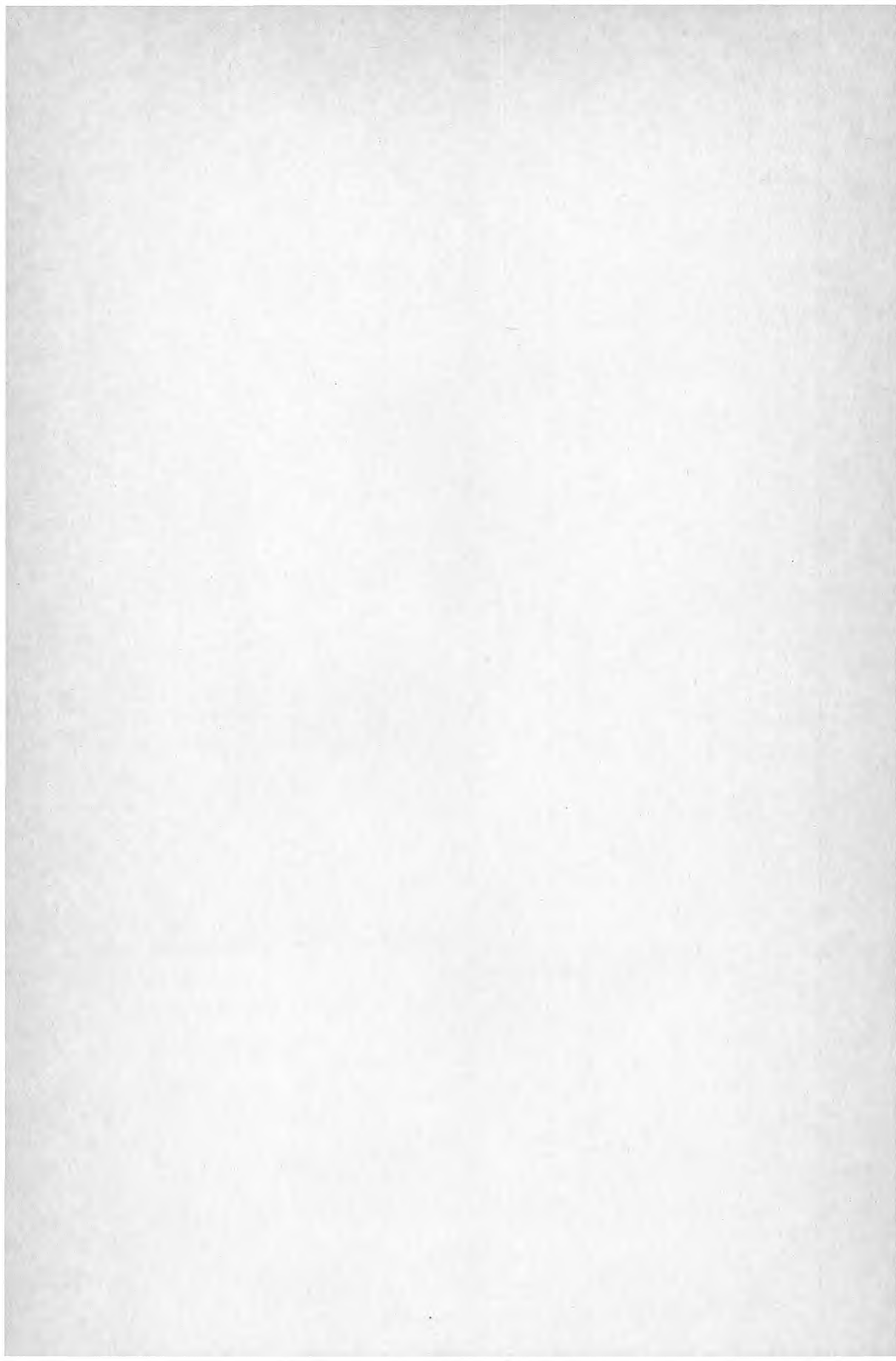
Ett bergtrum med motsvarande kapacitet och som arbetar i temperaturintervall 65-119^o C får en volym av ca 825.000 m³. Kostnaderna för ett dylikt kan beräknas till:

Sprängning och utlastning	55,8 Mkr	
Förstärkning och inklädnad	5,6 Mkr	
Betongkonstruktioner	2,0 Mkr	
Installationer	1,8 Mkr	65,2 Mkr
Försäljning av sprängsten		-6,0 Mkr
Värmeväxlare, pump rör		1,4 Mkr
Värmekulvert		1,1 Mkr
Summa		61,2 Mkr

Ett konventionellt bergtrum ger således ca 25 % högre byggkostnad än ett bergtrumslager i två våningar.

11 REFERENSER

- Claesson, J et al: Simulering av markvärmesystem,
LTH,
1984
- Claesson, T/Ronge, B: Hetvattenlagring i berg,
BEFO,
1982
- De Wiest, R J M: Geohydrology,
Wiley,
1965
- Ericsson, L O: Värmeutbyte mellan berggrund och borrhål
vid bergvärmesystem,
CTH Geologiska institutionen,
1984
- Huisman, L: Groundwater recovery,
Macmillan, London,
1972
- Thiem, G: Hydrologische Methoden,
J M Gebhardt, Leipzig,
1906
- Theis, C V: Relation between the lowering of the piezometric
surface and the rate and duration of discharge
of a well using ground water storage,
Am Geoph Union Trans vol 2,
1935



**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag
830229-9 från Statens råd för byggnadsforskning
till VIAK AB, Göteborg.**

R130: 1984

ISBN 91-540-4241-0

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Art.nr: 6704130

**Abonnemangsgrupp:
W. Installationer**

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

Cirkapris: 30 kr exkl moms