

BeFo

Hetvattenlagring i bergtrum

Bergtekniska konsekvenser av lagring
av varmt vatten i oinklädda bergutrymmen

S Bjurström, H Cederberg, T Hansson, R Lindskog,
J Martna

Stiftelsen bergteknisk forskning - BeFo
forskningsprojekt 720552 - 5, BFR

Slutrapport Etapp 1

HETVATTENLAGRING I BERGRUM

Bergtekniska konsekvenser av lagring av varmt
vatten i oinklädda bergutrymmen

av

S Bjurström, H Cederberg, T Hansson,
R Lindskog & J Martna

Stockholm 1974

Denna rapport hänförs sig till forskningsanslag
720552 - 5 från Statens råd för byggnadsforskning
till Stiftelsen Bergteknisk Forskning - BeFo.

FÖRORD

Forskningsuppgiften "Hetvattenlagring i bergrum" ingår som projekt i Stiftelsen bergteknisk forskning - BeFo:s ramprogram och är i detta planerat till utförande under tiden 1972-1975.

Projektet är ursprungligen baserat på ett forskningsförslag utarbetat inom Skånska Cementgjuteriet AB i samarbete med bl a Västerås Kraftvärmeverk AB. Under utredningstiden har målsättningen vidgats att även beakta problem som kan uppstå när varmt vatten transporteras i oinklädda bergtunnlar. Ett förslag, som utarbetats inom Stockholms Elverk i samband med planering för framtida fjärrvärmedistribution från kärnvärmeverk.

Med hänsyn till att projektet är stort och komplicerat samt berör många skilda teknikområden tillsatte BeFo:s ledningsgrupp i januari 1972 en s k referensgrupp för projektets styrning. I denna ingår tekn dr Sten G A Bergman, övering Sten Brännfors, tekn lic Sten Bjurström, övering Gunnar Friström, civing Tor Hansson, övering Gösta Jansson, civing Sven Rydman samt övering Karl Arthur Scherman. Under 1973 utökades referensgruppen med dir Lars Netzler och övering Bengt Oknemark.

Under referensgruppen har en särskild arbetsgrupp, bestående av tekn lic Sten Bjurström, civing Hans Cederberg, civing Tor Hansson, civing Rolf Lindskog samt fil lic Juri Martna, svarat för genomförandet av utredningsetapp I, som omfattat probleminventering och analys, begränsad laboratorieprovning samt förberedande arbete och planering för efterföljande fältförsök.

För detta arbete beviljade Statens Råd för Byggnadsforskning 1972 95 000:- under rubriken "Hetvattenlagring i bergrum" (forskningsanslag nr 720552-5). Härvid förutsattes att BeFo i samverkan med Vattenfall, VAST, Stockholms Elverk och Västerås Kraftvärmeverk AB/Aroskraft AB bidrog med minst samma belopp. Arbetet med etapp I, som påbörjats våren 1972

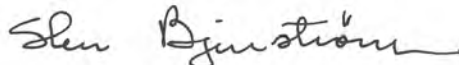
och efter hand diskuterats inom referensgruppen var i huvudsak slutförd under 1974 , med undantag för idag pågående långtidsprovning med betong och plaster.

Arbetet har utförts av arbetsgruppens medlemmar med stöd av "externt" anlita expertis. En lista över utförda s k särskilda utredningar återfinns bak i rapporten. Förutom föreliggande rapport har arbetet resulterat i program dels för studier av termospänningar kring ett stort bergrum, dels för ett samarbetsprojekt med bl a Stockholms Elverk, där flera viktiga delar i ursprungsprojektet naturligt kunnat inarbetats. För närvarande (nov- 1974) genomföres delar av dessa fältförsök.

För stöd och uppmuntran i arbetet samt den hjälp som lämnats arbetsgruppen av referensgruppen och "externt" anlita expertis m fl framföres ett varmt tack.

Stockholm i november 1974

Stiftelsen bergteknisk forskning - BeFo



Sten Bjurström
Projektledare

SAMMANFATTNING

De bergtekniska konsekvenserna av att lagra och transportera uppvärmt vatten i oinklädda bergrum resp tunnlar har översiktligt studerats genom litteraturstudier samt begränsade utredningar och laboratorieförsök. Även om utredningsresultaten i delar är tillämpbara på olje- och gaslager har problemområdet här begränsats till ackumulering av hetvatten i ett oinklätt bergrum. I undersökningen har problemområdena uppdelats i fem huvudgrupper:

- . Värmetekniska förhållanden i berg.
- . Fysikaliska-mekaniska effekter med åtföljande instabilitet i berget på grund av varmt vatten, övertryck samt hög och varierad temperatur.
- . Förändringar av kemisk natur hos berget kring lagringsrummet och lagringsvattnet.
- . Effekter av hetvattenlagring på bergmassan och grundvatten i bergrummets omgivning.
- . Möjligheter att förstärka berget resp förhindra "kemiska" effekter vid hetvattenlagring.

Undersökningen visar att området tidigare är föga studerat och att det saknas användbara resultat betr huvuddelen av ovannämnda problemområden. Då stabilitetsproblemen och grundläggande värmetekniska problem bedömts ha störst intresse i nuvarande kunskapsläge har två fältförsök påbörjats i syfte att experimentellt försöka belysa överensstämmelsen mellan vissa teoretiska överväganden och verkligheten.

Då området är bergtekniskt komplicerat och svåröverblickbart samt att resultaten ofta brister i allmängiltighet på grund av varierande berggrundsförhållanden, torde det på kort sikt vara omöjligt att få fram annat än mycket approximativt underlag för konstruktionsarbetet. Det bör dock påpekas att detta förhållande idag gäller huvuddelen av våra berganläggningar, inklusive oljelagren, men med den skillnaden att man där har erfarenhet från utförda anläggningar i full skala.

I N N E H Å L L S F Ö R T E C K N I N G

	<u>Sid</u>
Förord	1
1 Inledning	3
2 Beskrivning av problemområdet	4
3 Utförd utredning	5
4 Tekniska förutsättningar	6
5 Bergtekniska problem vid hetvattenlagring i bergrum	9
5.1 Värmeförlust och temperaturfördelning kring hetvattenlager i berg	9
5.2 Mekaniska effekter av hetvattenlagring i berg	24
5.3 Förändringar av kemisk natur hos berg och lagringsvatten	42
5.4 Inverkan av hetvatten på lerzoner i berg	49
5.5 Effekter av hetvattenlagring på grundvatten och omgivande berg	55
5.6 Problem i samband med förstärkning och tätning	60
5.7 Bergförstärkning och tätning	61
6 Pågående och fortsatta undersökningar	70
7 Sammanfattning för byggforskningen	72
8 Utförda utredningar och litteraturförteckning	

1 INLEDNING

Vid värmeverk, kraftvärmeverk och kärnkraftverk, där produktionen inte ekonomiskt kan regleras efter belastningsvariationerna behöver man metoder att lagra energi för utjämning av belastning på aggregaten. Idag sker sådan utjämning eller ackumulering ofta i värmeisolerade stålbehållare ovan jord. I och med att erforderliga ackumulatorvolymerna ökar upp till 10-40 000 m³ är denna lösning ej längre tilltalande. Tanken har då uppkommit att förlägga ackumulatorerna i berg.

Energiackumulering i form av hetvatten lagrat i oinklädda berggrum är idag en föga känd lösning, som dock bedöms vara ekonomiskt/tekniskt attraktiv, då bergackumulatorer förefaller kunna erbjuda tämligen väl isolerade och billiga stora lagringsvolymerna. Genom hetvattenlagring tänker man sig att kunna i första hand utjämna dags- och veckovariationer i energiproduktion och energiuttag, men även utjämning över månader och t o m årstider kan vara aktuellt.

Distribution av fjärrvärme sker idag oftast i isolerade stålrör belägna i torra bergtunnlar. För värmedistribution från större värmeverk, t ex kärnvärmeverk, förutses dessa installationer synnerligen omfattande och kostnadskrävande. Med anledning härav har man från t ex Stockholms Elverk utarbetat ett idéförslag, där en del av den framtida fjärrvärmedistributionen sker med hjälp av varmt vatten i oinklädda bergtunnlar. Förutom de fördelar som ett slopande av rörinstallationerna medför kommer dessa tunnlar att ge buffertkapacitet vid driftavbrott och ej dränera omgivningen och orsaka grundsänkningar.

2 BESKRIVNING AV PROBLEMMOMRÅDET

Lagring av heta produkter under tryck i bergrum berör en rad mycket komplicerade och i flera fall litet kända bergtekniska problemområden. Att hetvattenlagring medför problem är man klar över. Historiskt sett är ju tillförsel av värme till berget det sätt på vilket man genom tillmakning brutit sönder berget i forna tider. Å andra sidan tyder erfarenheter av lågtemperaturlagring och överslagsberäkningar på att lagring bör kunna ske upp till vissa gränser - beroende helt på de lokalt rådande bergtekniska förhållandena - med begränsade skador i ytligaste berget närmast rummet.

Då de bergtekniska konsekvenserna av hetvattenlagring ej tidigare systematiskt utretts krävs omfattande utrednings- och försöksarbete innan man kan konstruera en hetvattenackumulator i berg. Relevanta erfarenheter i litteraturen från analoga problemområden är mycket sparsamt förekommande och några mer omfattande direkta uppgifter rörande olika bergtekniska effekter när varma media förvarats i stora bergrum har ej påträffats. Området har dock tidigare översiktligt behandlats av bl a Lindbo (14). Som framgår av det följande måste man bl a beakta inverkan av hög vattentemperatur och högt tryck på rummets stabilitet, på mineral- och bergarters löslighet och lagringsvattnets kvalitet, på förstärkning och på omgivande jord- och bergmassor.

UTFÖRD UTFREDNING

Det större forskningsprojektet, av vilket den här redovisade utredningen endast utgör inledande skede, har till syfte att ge bergtekniskt underlag för utformning och konstruktion av en hetvattenackumulator i berg. Man har därvid förutsett följande utredningsetapper:

- Etapp I Inventering och analys av bergtekniska problem och svårigheter, som kan uppstå vid lagring av hetvatten i berg. Kompletterande, begränsad laboratorieprovning inom vissa väsentliga problemområden. Förberedelser för och utarbetande av program för fältförsök i etapp II.
- Etapp II Fältförsök i syfte att belysa vissa "nyckelfrågeställningar". Fältförsök för utvärdering av termospänningar kring ett stort bergrum pågår (nov -74) i oljelager vid Marvikens oljekraftverk.
- Etapp III Fältförsök i stor skala alternativt omfattande uppföljande mätningar i mindre hetvattenackumulator. Utökad laboratorieprovning i syfte att ge detaljerat underlag för konstruktionslösningar.

Föreliggande rapport behandlar etapp I. På grund av att projektet aktualiserar så många olika typer av bergtekniska problem med ett komplicerat mönster av kopplingar och samband med varandra, har det varit nödvändigt att ge etapp I en översiktlig och omfattande utformning. Syftet har varit att belysa omfattningen av de svårigheter man kan stöta på samt att söka påvisa vilka problem som intar väsentliga "nyckelpositioner" i problemkomplexet. Arbetet har i huvudsak omfattat litteratursgranskning, problemanalys samt laboratorieprovning.

4 TEKNISKA FÖRUTSÄTTNINGAR

Behovet av energi varierar under dygnet (veckan, månaden osv) på annat sätt än produktionen. Skillnaden i producerad och förbrukad energi kan lagras i form av värme i en varmvattenackumulator. Denna uppvärms resp avkyles beroende på om värmebehovet utifrån underskrider resp överskrider verkets kapacitet. Principen för ackumulatorn framgår av figur 1. Som framgår av figuren tas vid urladdning det uppvärmda vattnet från ackumulatorns övre del och avkylt returvatten pumpas in i rummets nedre del. Uppvärmningen av vattnet kan ske antingen med kylvatten eller med elenergi, beroende på typ av kraftproducent.

Arbetstemperaturen hos lagringsvattnet kan för olika tänkbara ackumulatoranvändningar komma att ligga mellan $80-220^{\circ}\text{C}$, vilket innebär att det inre ång- och vattentrycket kan vara 0-20 atö.

De högre temperaturerna avser hetvattenackumulering i anslutning till kärnkraftverk och bör ses på sikt. I första hand är temperaturer varierande mellan $80-100$ à 120°C och $80-140$ à 160°C aktuella.

Lämpligt temperaturintervall beror i hög grad på hur ackumulatorvattnet uppvärms. Sker uppvärmningen med hjälp av kylvatten som vid värmeverk och kraftvärmeverk, torde det vara realistiskt att räkna med temperaturer lägre än 125°C . I många fall torde lämplig temperatur vara lägre, bl a beroende på distributionsnätets utformning.

Tidigare nämnd varmvattentransport i oinklädda bergtunnlar bedöms ske vid temperaturer omkring 100°C .

Om uppvärmning av ackumulatorvattnet sker med hjälp av elenergi, kan det vara fördelaktigt att göra lagren så "energitäta" som möjligt. I dessa fall kan man väl tänka sig temperaturer upp till 140 à 160°C . I vissa

fall ända upp till 220°C .

Även om man på sikt förutser att utjämning i energikonsumtion kan ske över månader och år, torde dygns- och veckoslutsutjämningar vara av intresse i första hand.

Sålunda borde ackumulatorkapaciteten för ett lågtemperaturlager ($80-135^{\circ}\text{C}$) täcka 2 å 3 dagars behov, vilket för ett kraftvärmeverk för en medelstor stad motsvarar ca $30\,000\text{ m}^3$. Härvid förutsättes uppvärmnings- resp tömningstider på i storleksordningen 12 timmar.

För kortare tider bedöms lämpliga lagringsvolymerna vara ca $4\,000 - 30\,000\text{ m}^3$, medan rum med volymer upp till $100 - 200\,000\text{ m}^2$ kan bli aktuella för lagring över längre tider.

Ur värmeteknisk synpunkt är en hög och smal rumsprofil att föredra, varför en stående cylinder torde vara lämplig för mindre lagringsrum.

Andra former, t ex gallerier av tunnlar är dock tänkbara i vissa speciella fall.

Det vatten som kan komma till användning förutsättes vara obehandlat vatten från ytvattentäkt ("Mälarvatten"). Lagringen förutsättes vidare ske i "normalt", hårt svenskt urberg och i första hand i helt oinklädda rum. Lagringen skall utföras på ett sådant sätt att minsta möjliga påverkan sker på omgivningen. Genom att i första hand balansera inre övertryck och yttre grundvattentryck kan utbytet mellan varmt ackumulatorvatten och omgivande grundvatten reduceras till ett minimum, jfr pkt 5.51

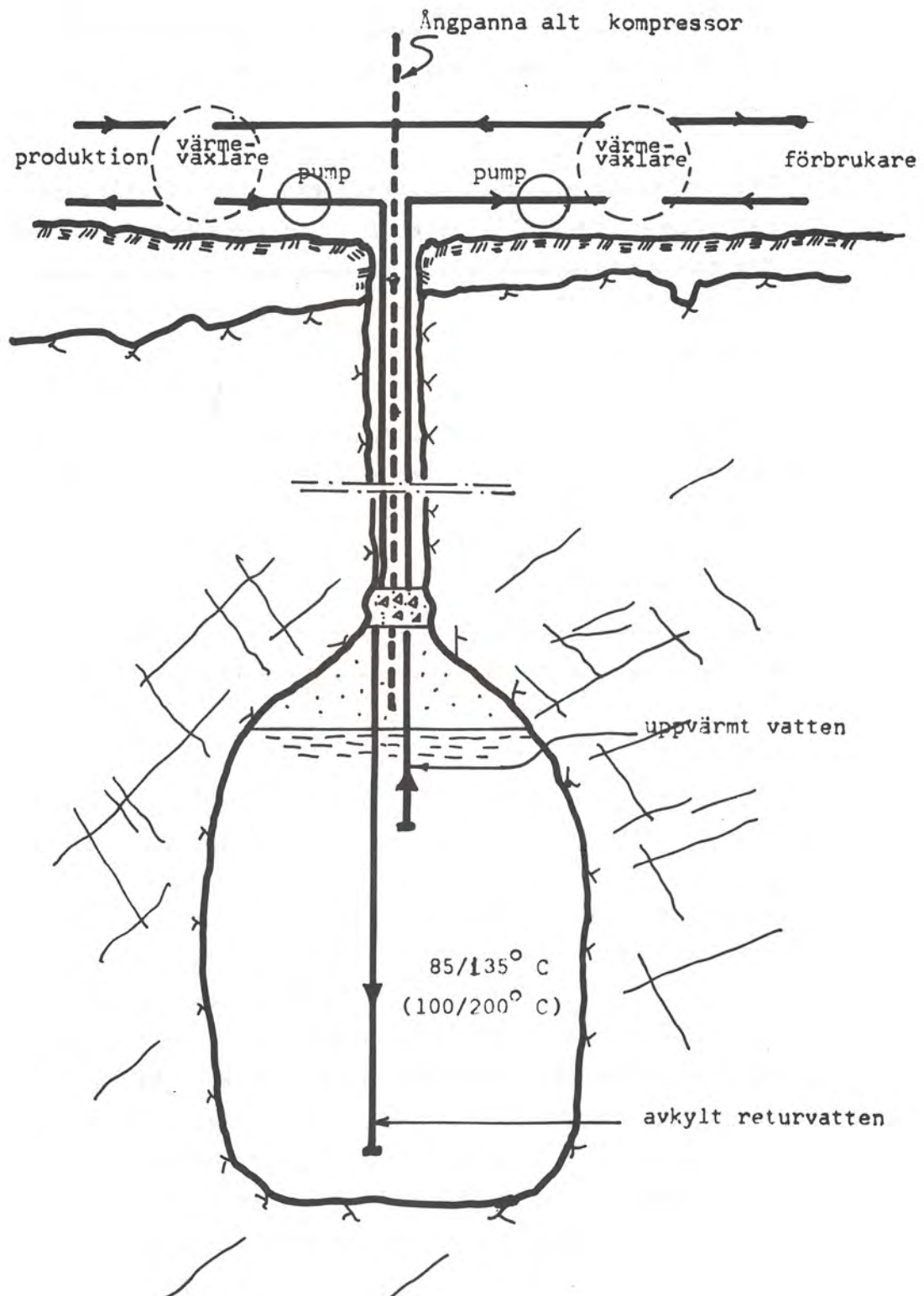


Fig 1 Princip för hetvattenackumulator

5 BERGTEKNISKA PROBLEM VID HETVATTENLAGRING I BERGRUM

I det följande redovisas en rad skilda problem och svårigheter, som kan vara aktuella vid lagring av hetvatten under övertryck i stora bergrum. Materialet är baserat på dels sammanställningar av litteraturuppgifter och praktiska erfarenheter, dels på särskilda expertutredningar och laboratorieförsök. Under punkt 8 återfinns en förteckning över dessa s k särskilda utredningar.

De bergtekniska problem, som bedömts vara av vikt vid lagring av varmt vatten med varierande temperatur i bergrum, kan sammanfattas i följande huvudrubriker.

- . Värmetekniska förhållanden i berg.
- . Fysikaliska-mekaniska effekter med åtföljande instabilitet i berget på grund av varmt vatten, övertryck samt hög och varierad temperatur.
- . Förändringar av kemisk natur hos berget kring lagringsrummet och lagringsvattnet.
- . Effekter av hetvattenlagring på bergmassan och grundvatten i bergrummets omgivning.
- . Möjligheter att förstärka berget resp förhindra "kemiska" effekter vid hetvattenlagring.

5.1 Värmeförlust och temperaturfördelning kring hetvattenlager i berg

Temperatur- och värmeförhållanden kring hetvattenlagret spelar självklart stor roll för anläggningens driftsekonomi. Faktorer som rådande temperaturförhållanden och bergmassans värmeledningsförmåga är även styrande för de värmegradienter som kommer att råda i bergmassan, vilka i sin tur bestämmer den spänningsfördelning som kommer att råda i berget kring hetvattenlagret.

Frågor som man ur värmeteknisk/bergteknisk synpunkt
önskar besvarade är bl a

- . Hur lång tid tar det att värma upp berget till
fortfarighetstillstånd? Hur mycket värme krävs?
- . Hur blir temperaturgradienterna i berget vid
uppvärmning? Vid fortfarighet och varierande
lagringstemperatur?
- . Hur snabbt leder en bergmassa värme, dvs hur
stora blir värmeförlusterna under uppvärmnings-
skedet och i fortfarighetstillstånd?

De erfarenheter från t ex olje- och köldlager som man
har idag, tyder på att man kan förvänta tämligen gynn-
samma förhållanden beträffande bergets isolerande för-
måga. Som framgår av beräkningarna under avsnitt 5.1.2
är förlusterna mindre än några % under vissa antagna
förhållanden. Man måste då hålla i minnet att använda
ingångsvärden på olika bergkonstanter är mycket unge-
färliga och baserade på homogena bergarter och ej på
en bergmassa genomkorsad av sprickor och slag. Erfaren-
heter av ett fåtal uppföljande undersökningar antyder
dock att i fält uppmätta värden överensstämmer med
teoretiskt beräknade värden med rimlig felmarginal.

5.1.1 Bergarters värmeledningstal

För värmeberäkningarna är bergets värmeledande förmåga
viktigaste parametern. I ett isotropt homogent material
beror värmeledningsförmågan av en enda materialkonstant,
värmeledningstalet λ , och denna är en funktion av tempe-
ratur, tryck och andra variabler.

Bergarter är ej homogena och de mineral som uppbygger
dem har i allmänhet låg symmetri, dvs de är ej iso-
tropa. Man kan alltså få olika λ -värden för olika
delar av bergarten. Om inga avsevärda avvikelser från
isotropi existerar, kan man i beräkningar använda ett

genomsnittligt värmeledningstal, om detta har bestämts från ett tillräckligt stort prov. Sådana faktorer som skiktning, skiffrighet och sprickighet kan dock orsaka märkbara förändringar i olika riktningar.

I figur 2 har sammanställts värden för vanliga svenska bergarter. Det bör observeras att dessa värden gäller bergarter och skiljer sig något från de värden som gäller för bergmassan, där hänsyn måste tas till sprickor och slag m m.

Värmeledningstalet är - som framgår av fig 2 - något beroende av temperatur och tryck, vilket bör beaktas vid noggranna beräkningar.

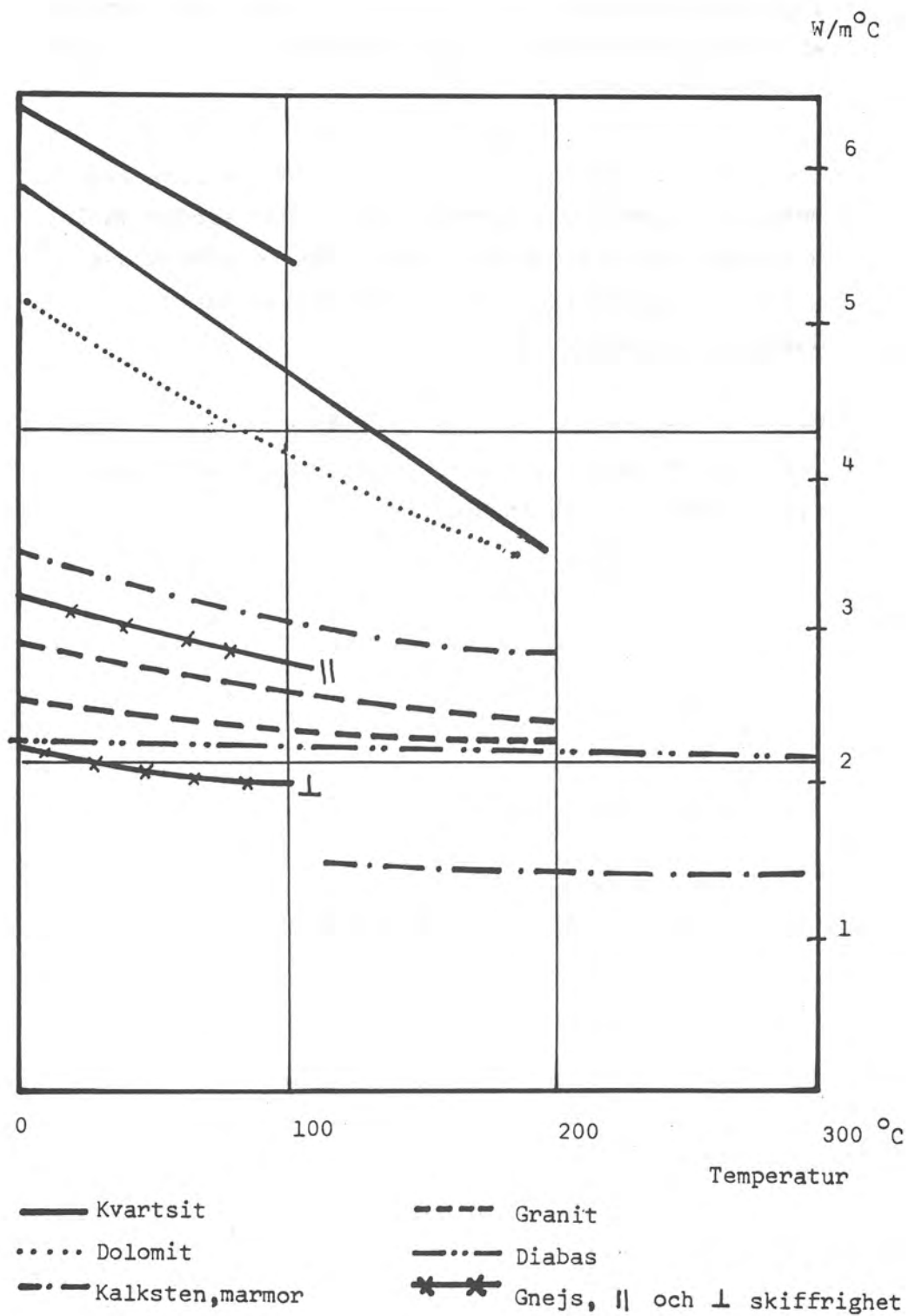


Fig 2 Bergarternas värmeledningstal vid högre temperaturer. Enligt ett flertal olika undersökningar, urval ur Birch et al 1942.

För beräkning av värmefördelningen krävs dessutom kännedom om bergmassans specifika värme. En bergarts värmekapacitet beror på dess mineralogiska sammansättning och med kännedom om denna och de ingående mineralens specifika värme, kan man beräkna bergartens värmekapacitet. I (2) kap 8 ges exempel på värden på specifika värmet hos några bergarter.

5.1.2 Temperaturfördelning och värmeförlust vid 4 000 m³ bergackumulator

För att ge storleksordningar när det gäller temperaturfördelning (temperaturgradienter) och värmeförlust vid hetvattenlagring i oinklätt bergrum har exemplifierande beräkningar genomförts för en 4 000 m³ stor bergackumulator (figur 1). Beräkningarna har utförts för två temperaturintervaller, nämligen 80/135°C och 100/200°C. Motsvarande spänningsberäkningar redovisas under pkt 5.2.1. Beräkningarna har genomförts med hjälp av ett särskilt datorprogram för rotationssymmetriska temperaturfält.

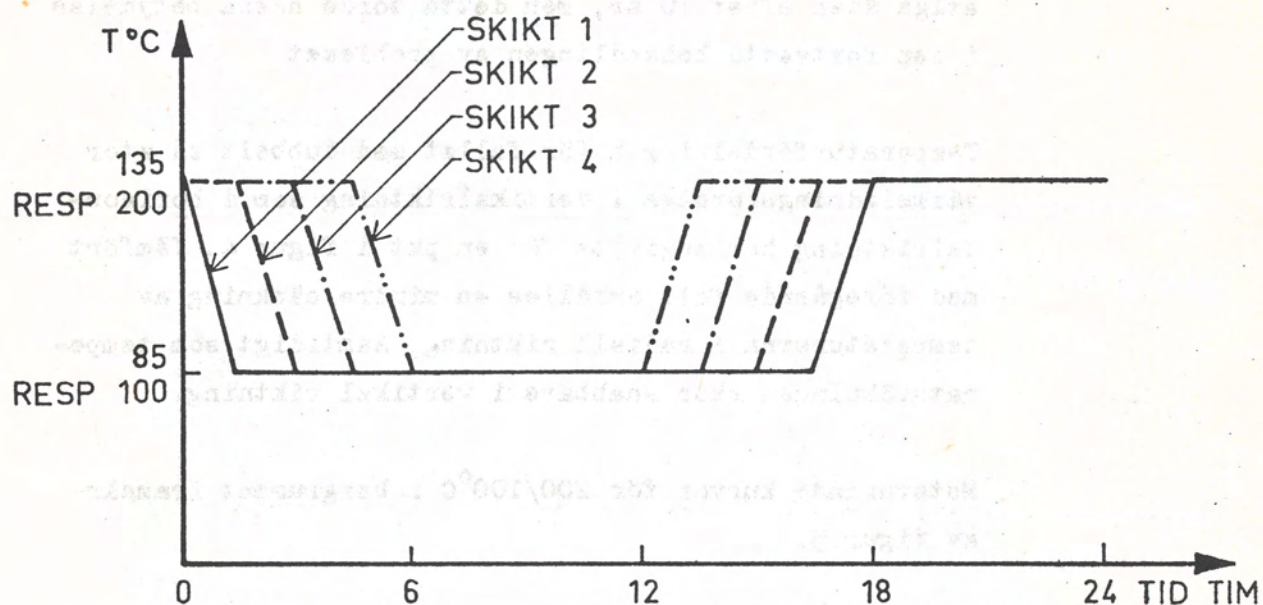
Temperaturfördelningen i berget har beräknats dels för långtidsvariationer, dels för dygnsvariationer.

Vid beräkningarna använda temperaturvariationer framgår av figur 3. Det har antagits att det varma vattnet avtappats uppifrån och kallt vatten tillförts nerifrån. Detta byte av vatten har antagits ske inom loppet av 6 timmar. Återmagasineringsringen av varmt vatten börjar uppifrån efter 12 timmar och är fullbordad efter ytterligare 6 timmar. Dygnsmedeltemperaturen i de olika skikten har använts som randtemperatur på insidan för att beräkna långtidsvariationen. Bergets starttemperatur har satts till $+8^{\circ}\text{C}$, liksom marktemperaturen.

Följande termiska data har använts:

Värmeövergångstalet mellan vatten och berg (innerytorna)	$250 \text{ W/m}^2\text{C}$
Värmeövergångstalet vid ytterytorna	oändligt
Värmeledningsförmåga i berget	$3,0 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$
Specifik värme i berget	$1,96 \text{ Ws/m}^3\text{C}$

Det kan tänkas att den effektiva värmeledningen i vertikal riktning är, på grund av masstransport i sprickor, större än i horisontell riktning. För att undersöka inverkan härav, har beräkningen utförts även för det fall att värmeledningen i vertikalriktning är dubbelt så stor som i horisontalriktning.



DYGN S MEDELTEMPERATUR °C

SKIKT NR 135/85 200/100

1	101	131
2	107	144
3	113	156
4	119	169

Fig 3 Schematisk temperaturvariation under ett dygn

a. Temperaturfördelning:

Temperaturfördelningens långtidsbeteende framgår av figur 4 för temperaturen $135/85^{\circ}\text{C}$ inuti bergrummet för fallet med samma värmeledningsförmåga, såväl vertikalt som horisontellt. Temperaturerna fortsätter att sakta stiga även efter 10 år, men detta torde sakna betydelse i den fortsatta behandlingen av problemet.

Temperaturfördelningen för fallet med dubbelt så stor värmeledningsförmåga i vertikalriktning som i horisontalriktning har angivits för en pkt i figur 4. Jämfört med föregående fall erhålles en mindre sänkning av temperaturerna i radiell riktning, samtidigt som temperaturökningen sker snabbare i vertikal riktning.

Motsvarande kurvor för $200/100^{\circ}\text{C}$ i bergrummet framgår av figur 5.

Inverkan av dygnsvariationerna på temperaturfördelning har studerats för det fall att den vertikala värmeledningsförmågan är dubbelt så stor som den horisontala, dvs $\lambda_{\text{vert}} = 2 \lambda_{\text{hor}}$. Resultatet i några punkter är redovisade i figurerna 6 och 7. Som synes är temperaturförändringarna begränsade till ett skikt av berget, som är mindre än 1 m tjockt.

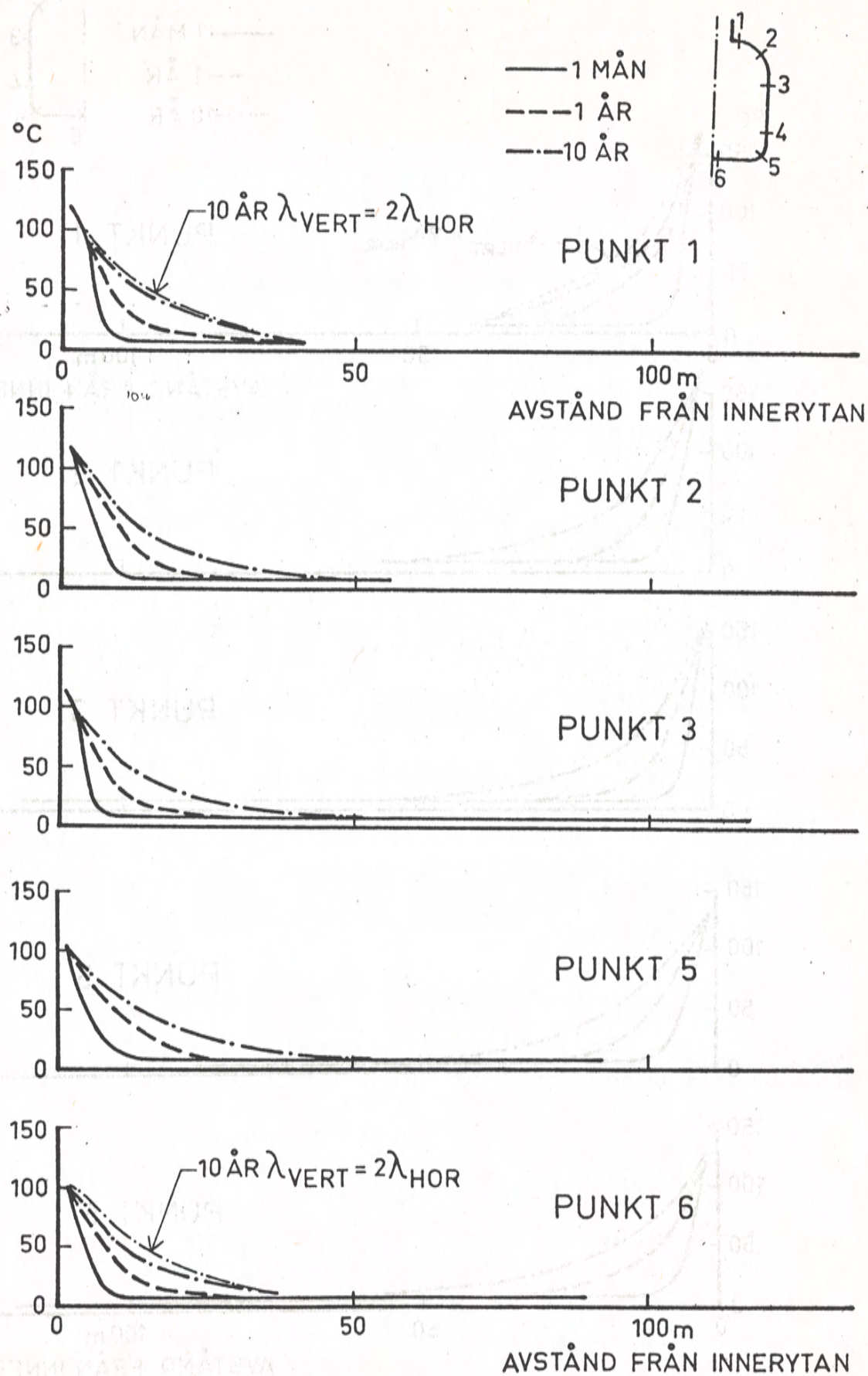


Fig 4 Temperaturfördelning 135/85°C

$$\lambda_{\text{hor}} = \lambda_{\text{vert}}$$

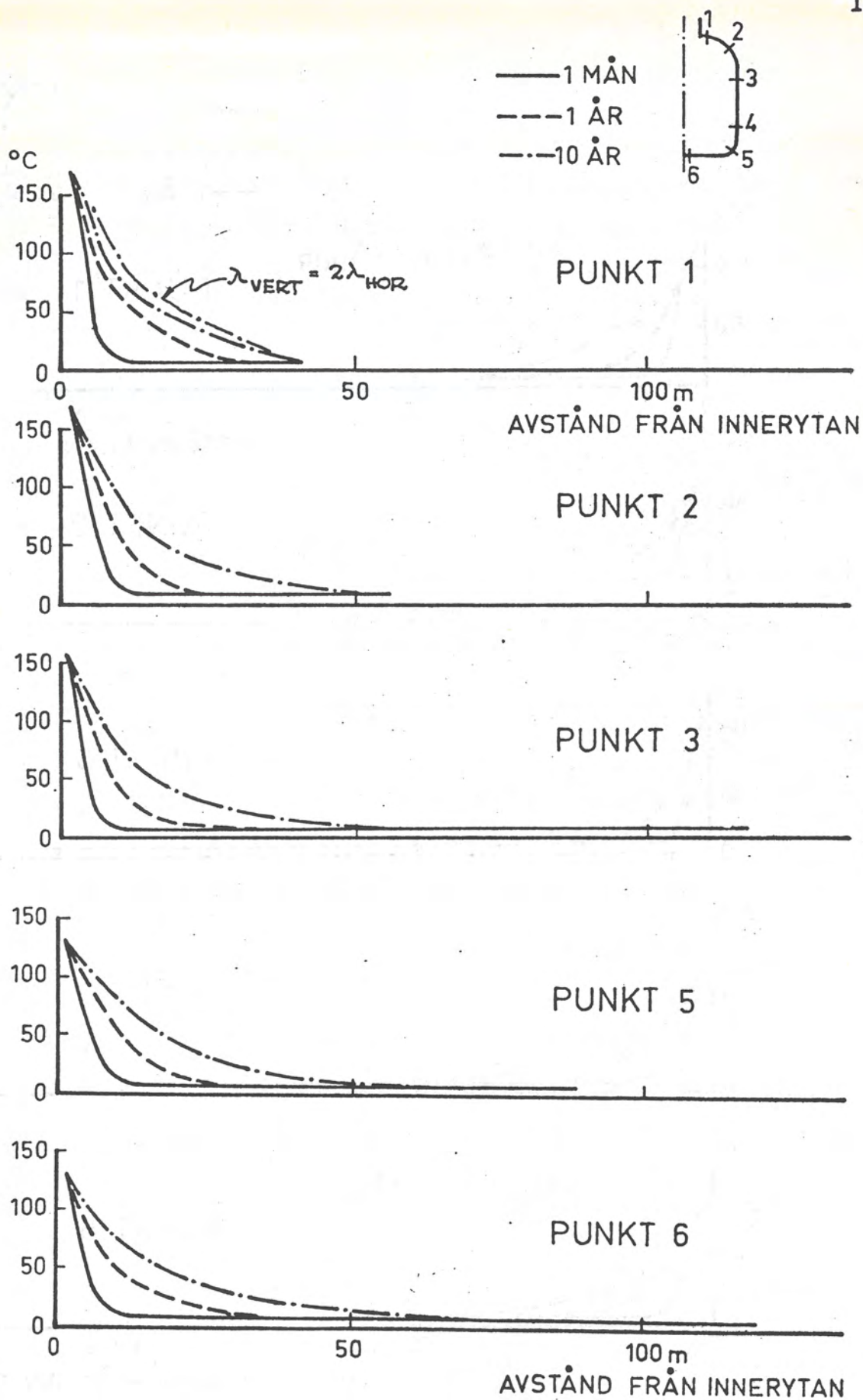


Fig 5 Temperaturfördelning 200/100°C

$$\lambda_{\text{vert}} = \lambda_{\text{hor}}$$

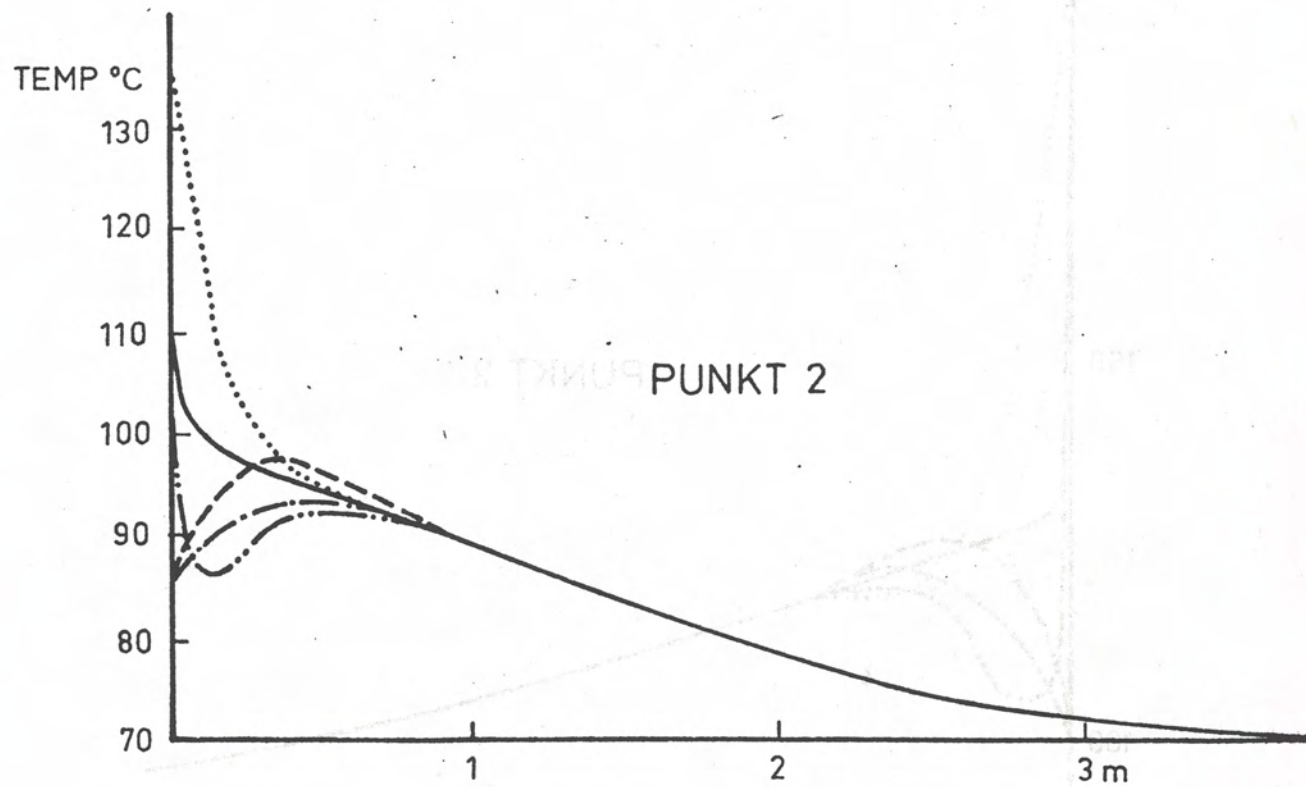
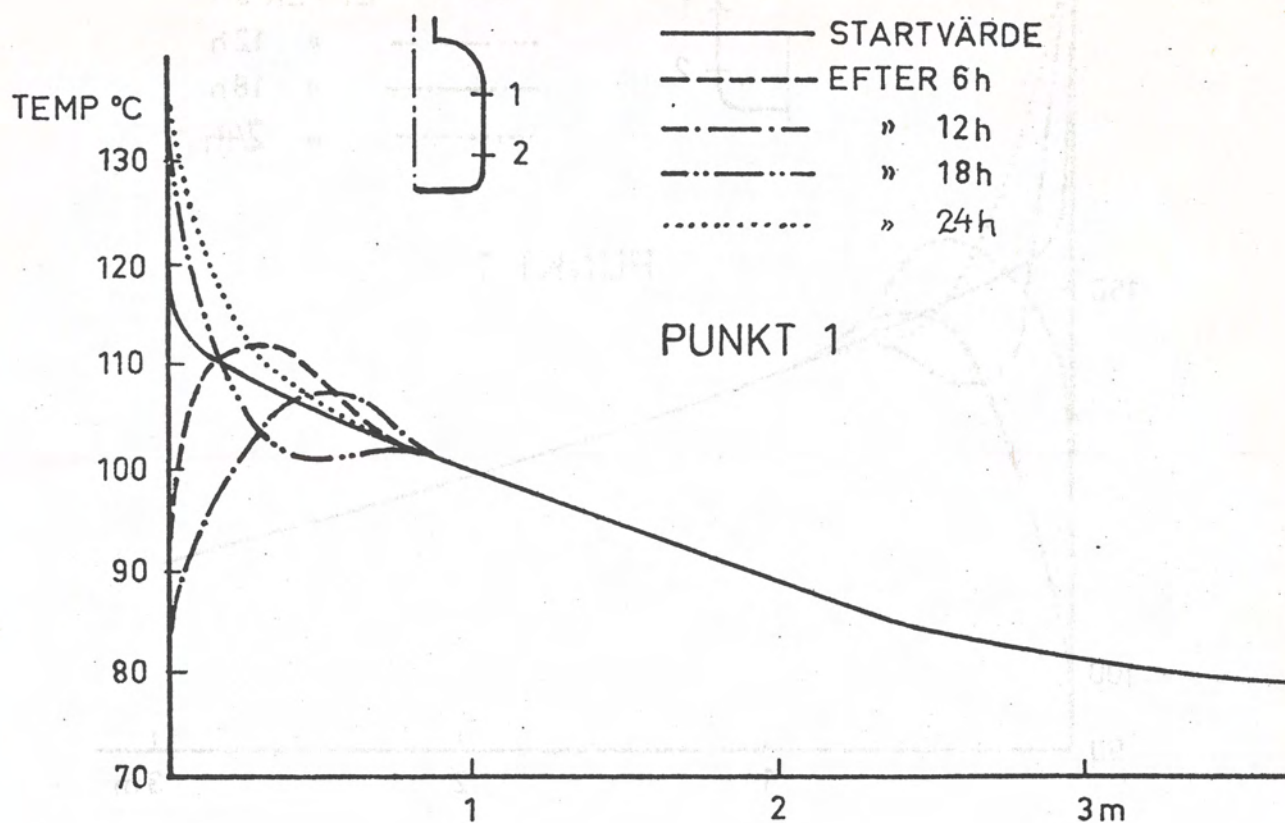
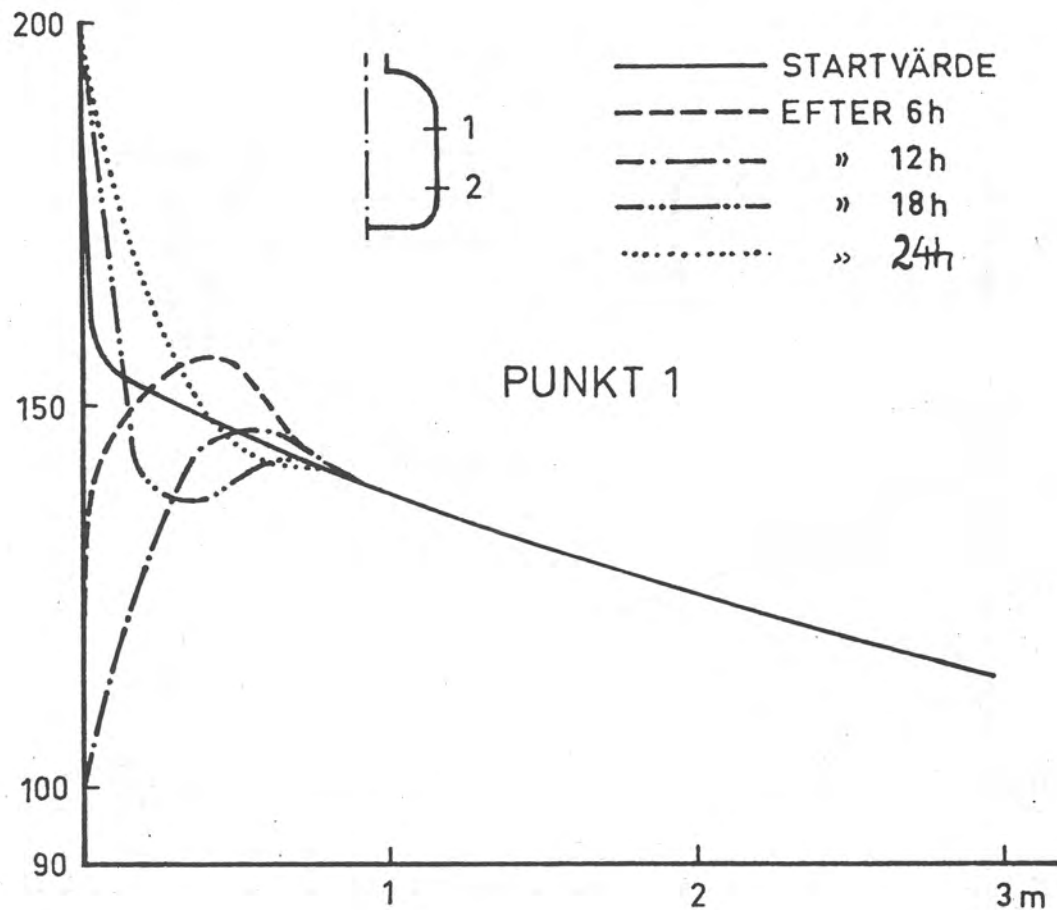


Fig 6 Temperaturens dygnsvariation 135/85°C

TEMP °C

20



TEMP °C

200

150

100

90

PUNKT 2

1

2

3m

Fig 7 Temperaturrens dygnsvariation 200/100°C

b. Värmeförluster:

Värmeförlusternas långtidsvariation framgår av figur 8 för 135/85-fallet med lika värmeledningsförmåga i bägge riktningarna. Förlusterna stabiliserar sig vid ca 1 MWh/dygn vid 10 år efter starten. Motsvarande slutvärde för fallet med dubbelt så högt λ -värde i vertikalriktning som i horisontalriktning blir ca 1,3 MWh/dygn, dvs ca 30 % högre.

För 200/100°-fallet är motsvarande förluster avbildade i figur 9. Slutvärdena blir här ca 1,5 resp 1,8 MWh/dygn för de olika värmeledningsalternativen. Här är också avbildade förlusterna i skikt 4, dvs ungefär motsvarande ångrummet.

Värmeförlusternas korttidsvariation under ett tidsintervall av 24 timmar visas i figur 10 för 135/85°-fallet och i figur 11 för 200/100°-fallet.

På grund av att beräkningen har startats med 135° resp 200°C, vilka avviker från skiktens medeltemperaturer, erhålles för de första timmarna av cykeln något för höga förluster. Bortsett från dessa initialvärden uppgår de största förlusterna till 655 resp 1220 KWh/h vid de olika temperaturfallen. Under vissa delar av dygnet erhålles värme från berget som maximalt uppgår till 520 resp 950 KWh/h.

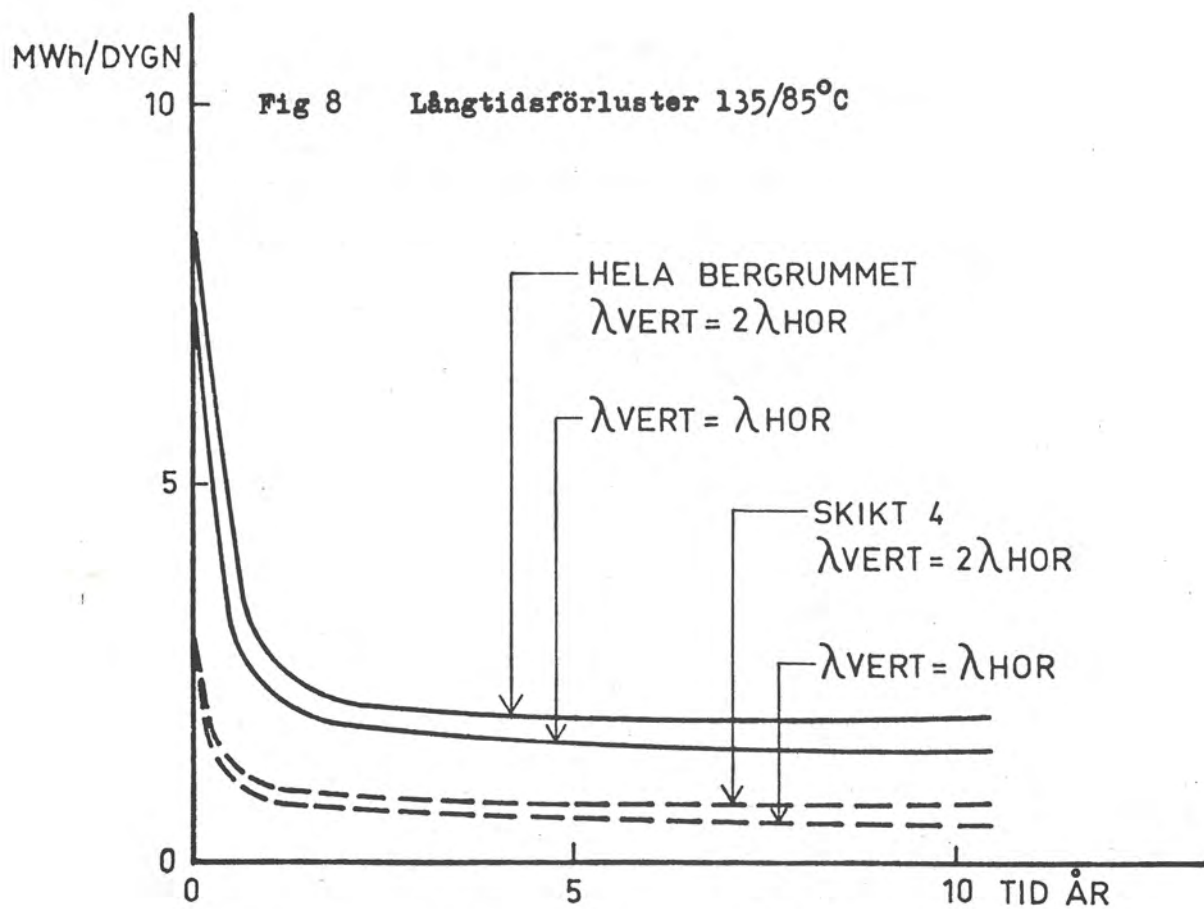
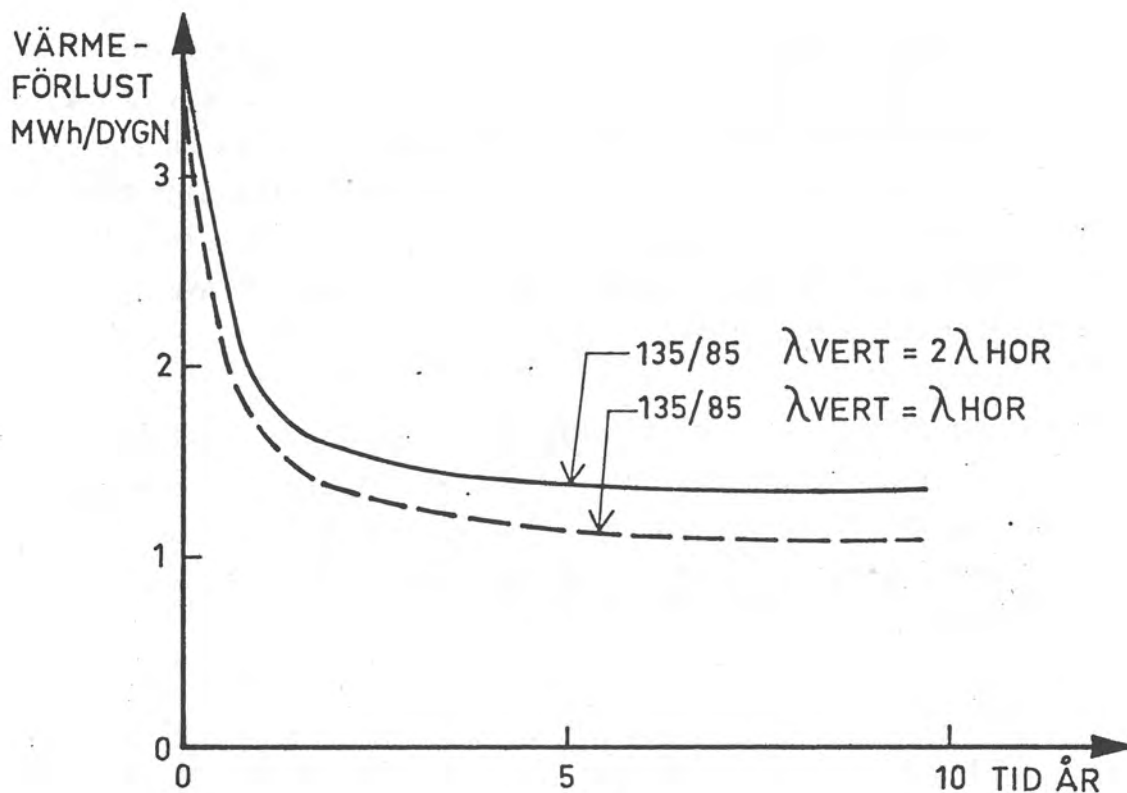
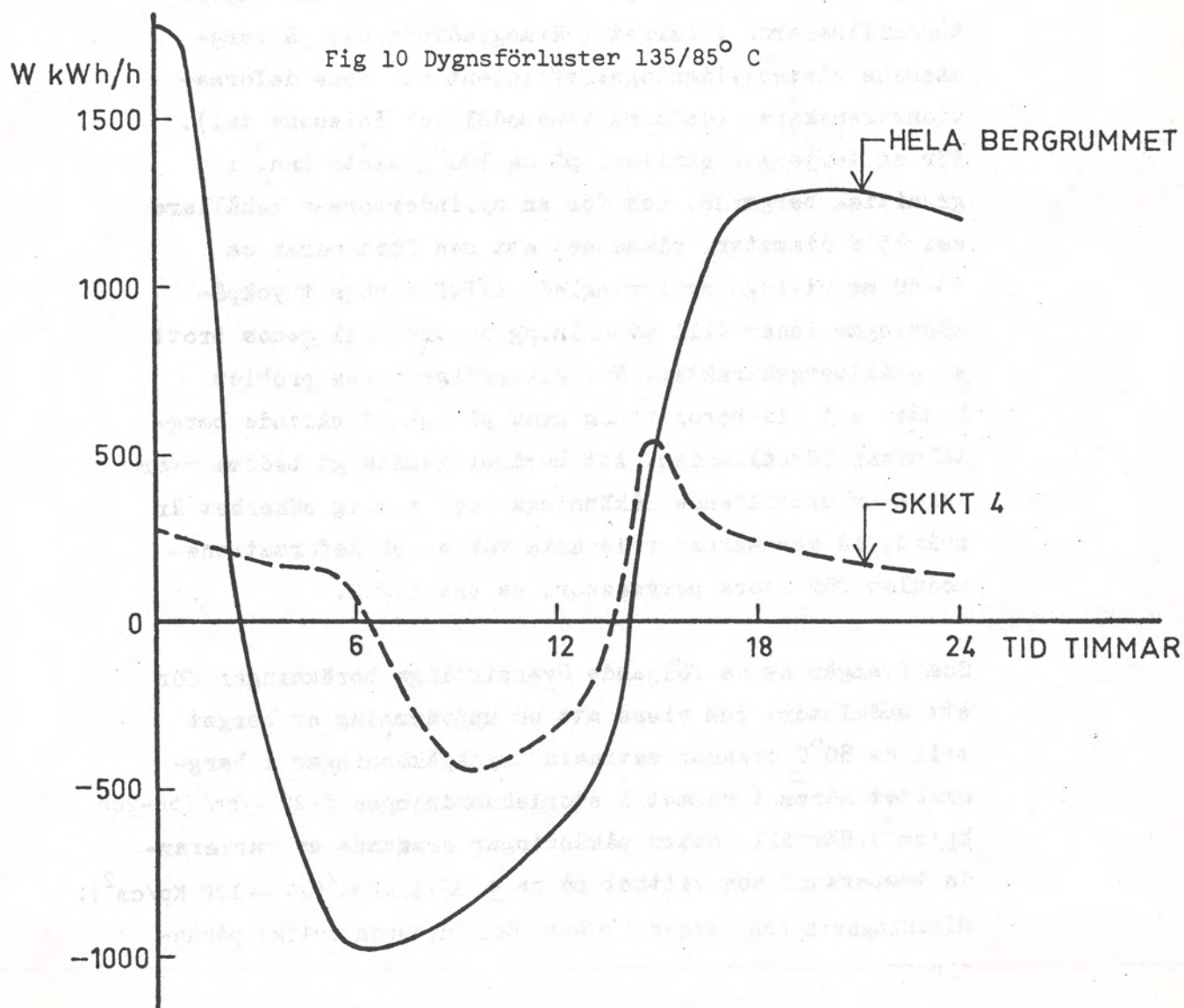
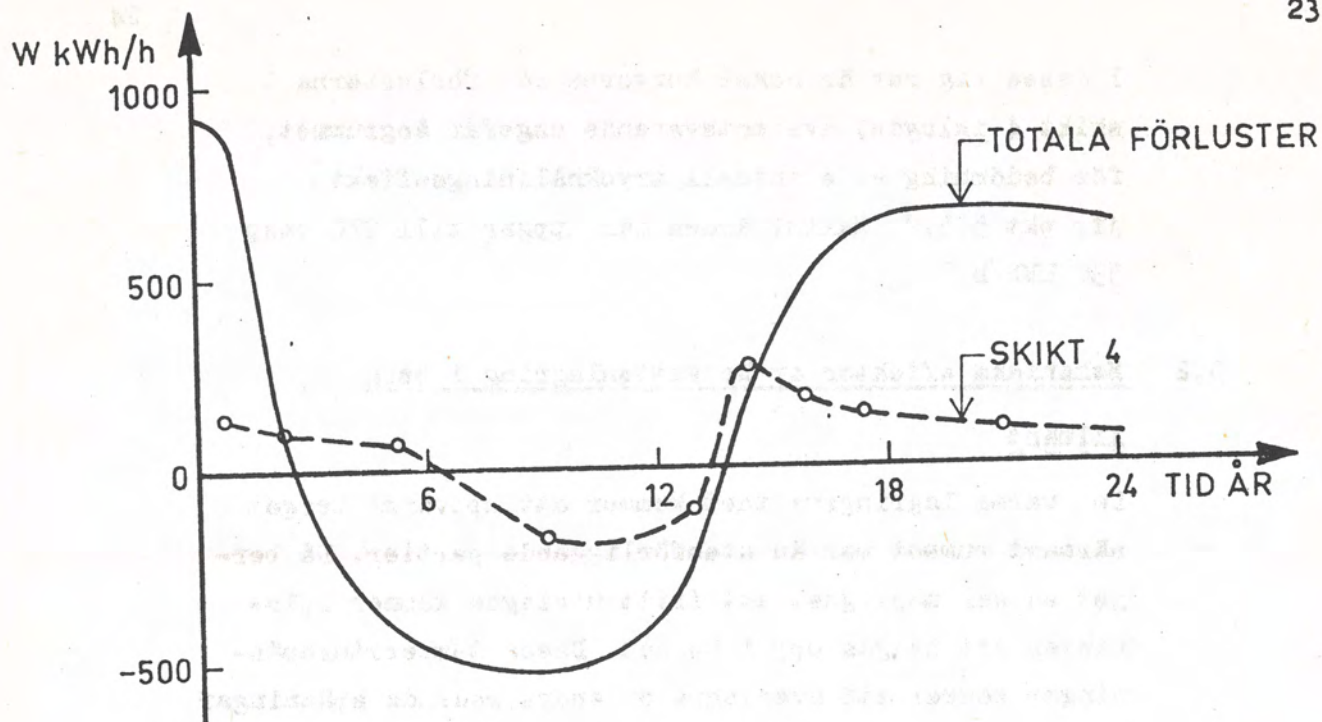


Fig 9 Långtidsförluster 200/100°C



I dessa figurer är också kurvorna för förlusterna i skikt 4 inlagda, dvs motsvarande ungefär ångrummet, för bedömning av eventuell tryckhållningseffekt, jfr pkt 5.5.2. Maximivärden här uppgår till 270 resp 530 KWh/h.

5.2 Mekaniska effekter av hetvattenlagring i berg

Allmänt

Det varma lagringsvattnet kommer att uppvärma berget närmast rummet mer än utanförliggande partier. Då berget ej har möjlighet att fritt utvidgas kommer spänningar att byggas upp i berget. Dessa temperaturspänningar kommer att överlagra ev andra rådande spänningar kring rummet. Påkänningarnas storlek beror på temperaturskillnaderna i berget (värmegradienten), på bergmassans värmeutvidgningskoefficient och dess deformationsegenskaper (deformationsmodul och Poissons tal). För en temperaturskillnad på ca 100°C måste man, i granitisk berggrund och för en cylinderformad behållare med 15 m diameter, räkna med att man förhindrar ca 15-40 mm utvidgning i ringled. Alltför höga tryckpåkänningar leder till avskalning och nedfall genom brott av smällbergskaraktär. Hur allvarliga dessa problem kommer att bli beror i hög grad på lokalt rådande bergtekniska förhållanden. Att beräkningsmässigt bedöma storleken av uppträdande påkänningar med rimlig säkerhet är svårt, då man saknar relevanta värden på deformationsmodulen för stora bergmassor, se pkt 5.2.2.

Som framgår av de följande översiktliga beräkningar för ett medelstort rum visas att en uppvärmning av berget till ca 80°C orsakar maximala tryckpåkänningar i bergskiktet närmast rummet i storleksordningen $5-20 \text{ N/mm}^2$ ($50-200 \text{ kp/cm}^2$). Härtill kommer påkänningar orsakade av varierande temperatur hos vattnet på ca $\pm 3-12 \text{ N/mm}^2$ ($30 - 120 \text{ Kp/cm}^2$). Gissningsvis kan berget i många fall uthärda dylika påkänningar.

Erfarenheter från tunneldrivning i berg där uppmätt bergtryck varit av nämnda storleksordning har i vissa fall medfört avsevärda problem med uppsprickning och smällberg. Härtill kommer att värmespanningarna under vissa geologiska förhållanden kan komma att superponeras till ett högt bergtryck som kan råda kring rummet.

5.2.1 Beräkning av spänningstillståndet kring en mindre hetvattenackumulator

Spänningsförhållandena och deras sammanhang med stabilitetsfrågorna är en kärnfråga när det gäller att bedöma möjligheten att utföra driftssäkra bergackumulatorer.

För att något mera i detalj illustrera spänningsfördelningen i berget kring hetvattenlagret, har som exempel genomförts rent elastiska beräkningar av uppträdande temperaturspanningar för bergackumulatören i figur 1, varvid man antagit en temperaturfördelning och data enligt pkt 5.1.2.

Beräkningarna tar hänsyn till dels spänningar på grund av egenvikt och inre övertryck, dels termiska belastningar på grund av temperaturgradienter. Beräkningarna har genomförts med hjälp av ett särskilt datorprogram baserat på s k dynamisk relaxation (finita difference-metod) och avsett för rotationssymmetrisk geometri och belastning. Använd beräkningsmodell

framgår av fig 12.

Spänningarna har beräknats för en temperaturfördelning rådande vid 10 år efter start av uppvärmningen för fall 85/135°C resp 100/200°C. I beräkningarna har förutsatts att den vertikala värmeledningsförmågan är dubbelt så stor som den horisontella, då detta fall ur spänningssynpunkt är ogynnsamt genom brantare temperaturgradienter.

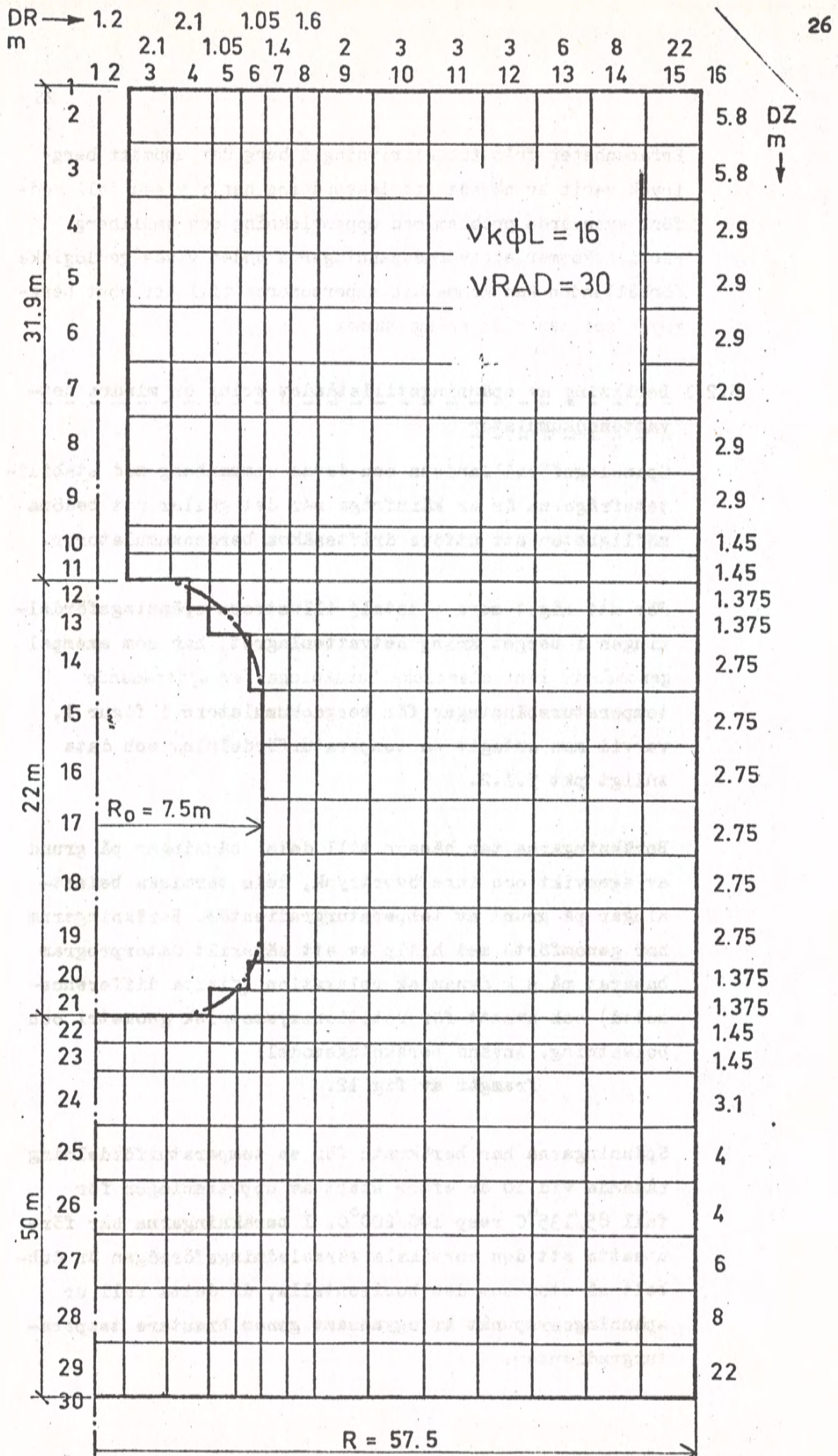


Fig 12 Beräkningsmodell för spänningsberäkning

Resultat:

Påkänningar på grund av mekanisk belastning (inre övertryck i kammaren) avviker föga från de spänningar som det på respektive djup rådande bergtrycket ger upphov till. Detta innebär således att inre övertrycket i bergrummet i stort sett utjämnar spänningsökningen vid hålrummet på grund av spänningskoncentrationsfenomen. För 135/85°C i bergrummet är spänningarna i höjd med bergrummet maximalt av storleksordningen 1 N/mm² (tryck) och således försumbara jämfört med spänningar av termiskt ursprung. Detta förutsätter dock att endast gravitationsspänningar förekommer i berget. Tektoniska spänningar av olika slag kan å andra sidan ge upphov till spänningskoncentrationer av samma storleksordning som värmespänningarna.

Spänningsfördelning i några typiska tvärsnitt av berget på grund av termisk belastning visas i figur 13 för fallet 135/85°C och i figur 14 för fallet 200/100°C.

För 85/135°C-fallet, figur 13, kan man notera att de största normalspänningarna (tryck) förekommer ungefär mitt på bergrummet. Spänningarna i ringled, (ca -12,5 N/mm²), och vertikalriktning (ca -9 N/mm²) motsvarar ungefär vad man skulle erhålla vid helt förhindrad termisk expansion. Det finns anledning att understryka att angivna spänningsvärden har beräknats under förutsättning att bergmassans deformationsmodul är 10⁴ N/mm² (100 000 kp/cm²) och Poissons koefficient ν 0,25, och att de valda "materialkonstanterna" kan variera högst avsevärt, jfr avsnitt 5.2.2 och 5.2.4.

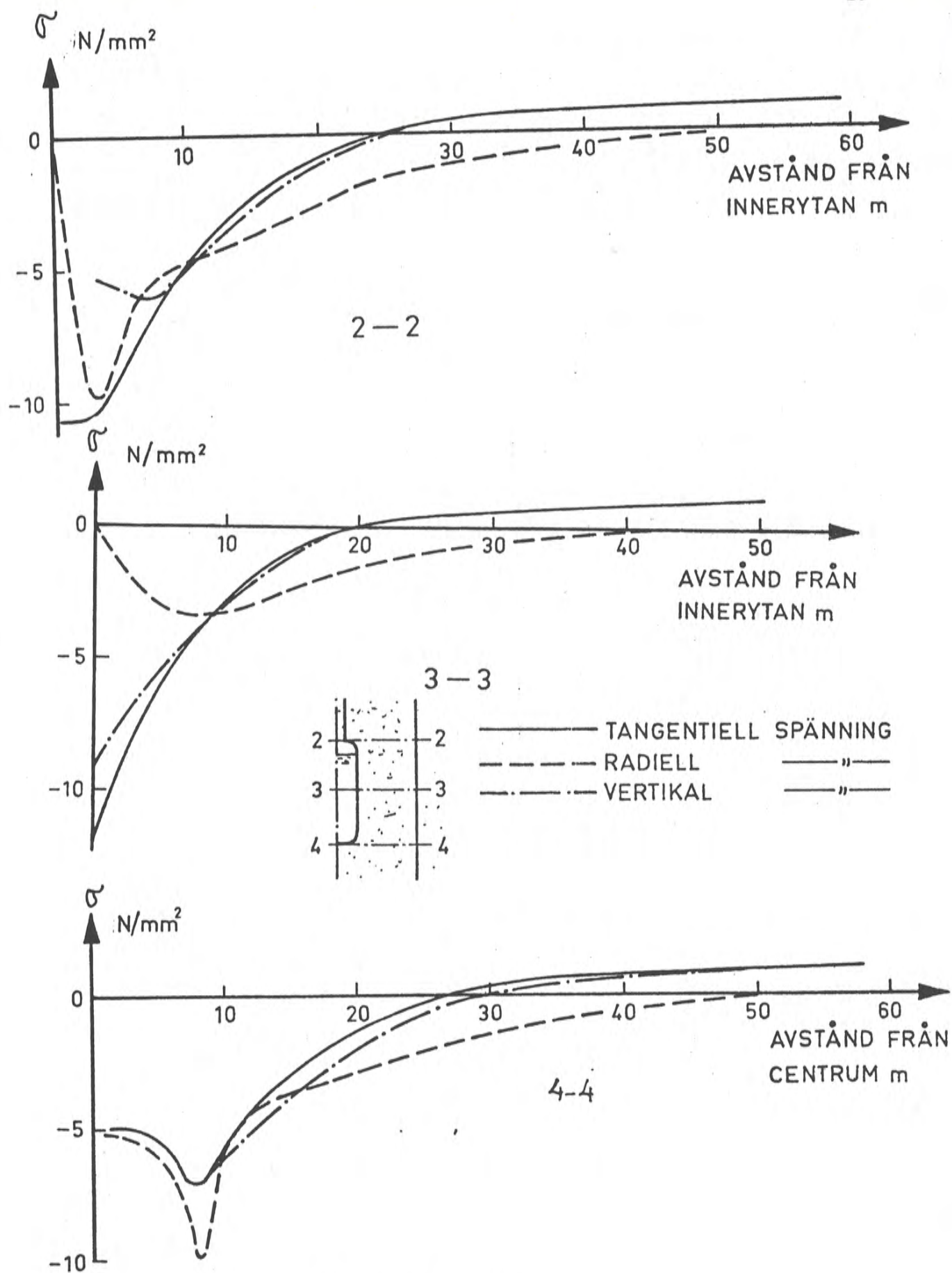


Fig 13 Värmespänningar i berget
Vattentemperatur 135/85°C

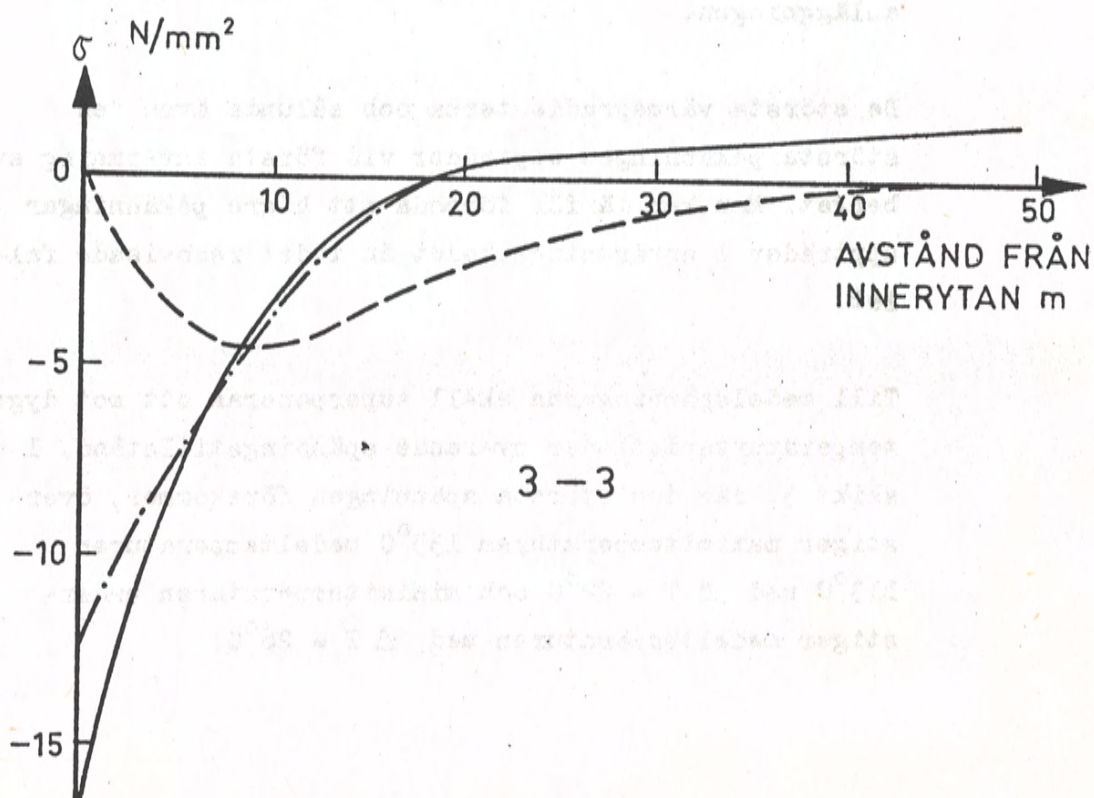
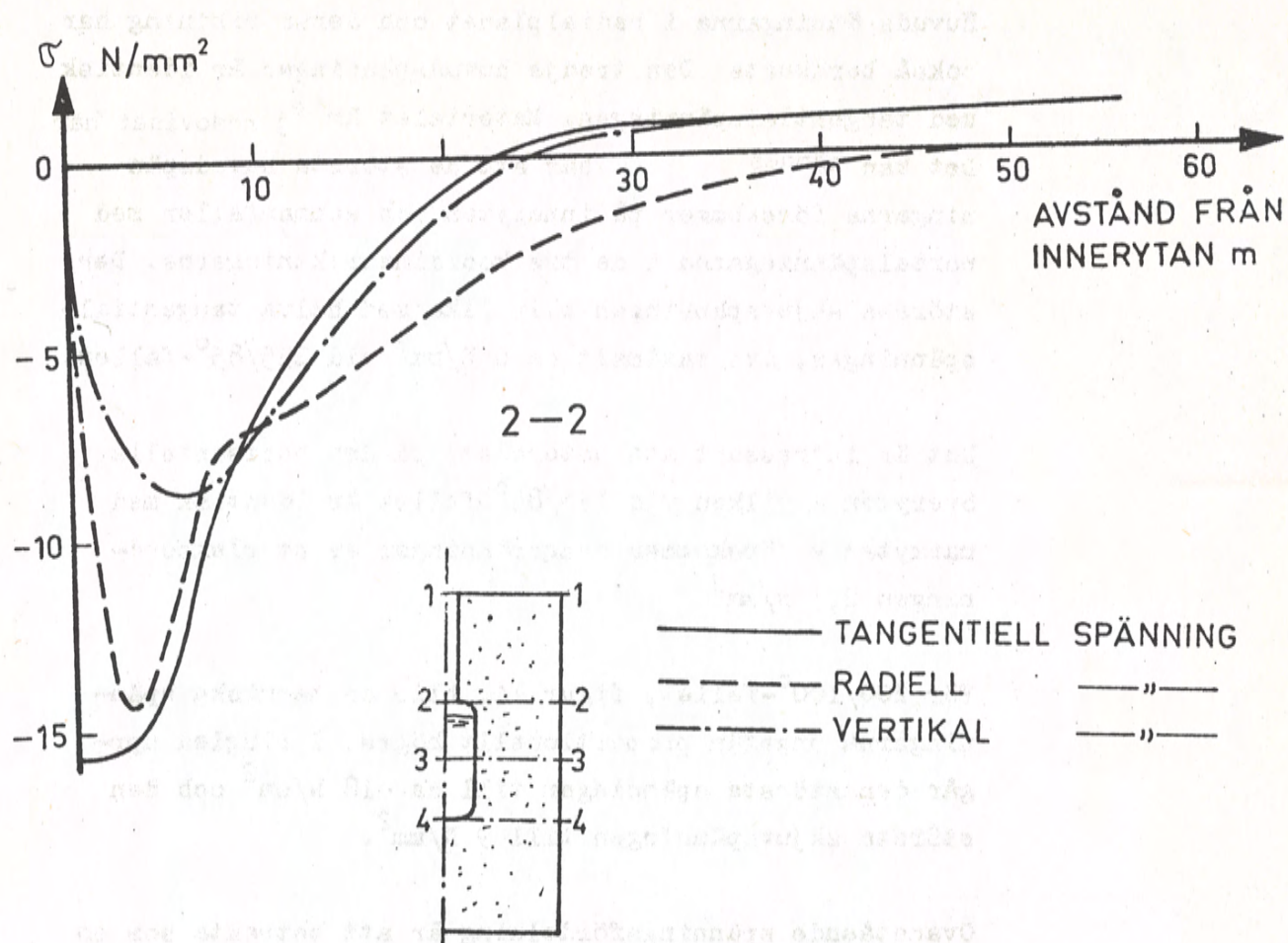


Fig 14 Värmspänningar i berget
Vattentemperatur 200/100°C

Huvudspänningarna i radialplanet och deras riktning har också beräknats. Den tredje huvudspänningen är identisk med tangentialspänningen. Materialet är ϵ_j redovisat här. Det kan nämnas här att de största huvudspänningarna förekommer på innerytan och sammanfaller med normalspänningarna i de tre koordinatriktingarna. Den största skjuvspänningen blir lika med halva tangentialspänningen, dvs maximalt ca 6 N/mm^2 vid $135/85^\circ$ -fallet.

Det är intressant att notera att på den horisontella överytan - vilken vid $135/85^\circ$ -fallet är identisk med markytan - förekommer dragspänningar av storleksordningen $2,7 \text{ N/mm}^2$.

För $200/100^\circ$ -fallet, figur 14, blir de termiska spänningarna ungefär proportionellt högre. I ringled uppgår den största spänningen till ca -18 N/mm^2 och den största skjuvspänningen till 9 N/mm^2 .

Ovanstående spänningsfördelning är att betrakta som en dygnsmedelspänning vid tidpunkten 10 år efter start av anläggningen.

De största värmegradienterna och sålunda även den största påkänningen uppträder vid första anvärmning av berget. Man kan därför förmoda att högre påkänningar uppträder i anvärmningsskedet än i det redovisade fallet.

Till medelspänningarna skall superponeras ett mot dygns-temperaturvariationer svarande spänningstillstånd. I skikt 3, där den största spänningen förekommer, överstiger maximitemperaturen 135°C medeltemperaturen 113°C med $\Delta T = 22^\circ\text{C}$ och minimitemperaturen understiger medeltemperaturen med $\Delta T = 28^\circ\text{C}$.

Spänningsändringarna erhålles för detta fall till

$$\max \Delta \sigma = -2,94 \text{ N/mm}^2$$

$$\min \Delta \sigma = +2,74 \text{ "}$$

Ringspänningen på insidan uppgår således högst till

$$\sigma_{\max} = -12,5 - 2,9 = -15,4 \text{ N/mm}^2$$

och lägst till

$$\sigma_{\min} = -12,5 + 2,9 = -9,6 \text{ N/mm}^2$$

Vid 200/100°-fallet blir motsvarande korrektions-
termer två gånger så stora.

Vid 200/100°-fallet varierar ringspänningen på in-
sidan mellan

$$\sigma_{\max} = -18,0 - 5,8 = -23,8 \text{ N/mm}^2$$

och

$$\sigma_{\min} = -18,0 + 5,8 = -12,2 \text{ N/mm}^2$$

Med antagandet av att ingen krypning förekommer visar
värdena att det ej uppstår dragspänningar på grund av
dygnsvariationer. Under sådana förhållanden är det
också troligt att icke ens vid avkylning till omgiv-
ningens temperatur nämnvärda dragspänningar uppstår
på innerytan. Som framgår av det följande kan man
normalt ej bortse från krypningstendenser hos berget.

5.2.2 Instabilitetseffekter på grund av värmespänningar

Det är i allmänhet mycket svårt att avgöra huruvida
en viss påkänning i en bergmassa kan leda till ett
brott. Den i många avseenden idealiserade spännings-
fördelningen för homogent, isotropt material som

diskuterats under pkt 5.2.1 kan inte direkt överföras till förhållandena i det verkliga berget.

När det gäller att bedöma den påkänning som en viss uppvärmning av berget ger upphov till, måste man ta hänsyn till de stora osäkerheter som råder beträffande olika bergmaterialkonstanter. Detta innebär t ex att de beräknade spänningarna i exemplet, pkt 5.2.1, kan vara gissningsvis 0,5 - 3 gånger beräknat värde, dvs variera mellan $5-50 \text{ N/mm}^2$ ($50-500 \text{ kp/cm}^2$), beroende på deformationsmodul, tvärtöjning och temperaturutvidgning hos berget. Sannolikt blir värmespänningarna av sådan storlek att man - till skillnad från annan berganläggningsverksamhet i ytliga berget - måste beakta risken för olika bergtrycksfenomen, bl a utsättes väggarna för tämligen ogynnsamma spänningsförhållanden. Man kan då sannolikt under vissa speciella förutsättningar få se k "smällbergs"-effekter. De avgörande faktorerna i detta sammanhang - utöver lagringstemperaturen o dyl - är bergrummets geometri, bergets spricksystem (struktur) och hållfasthet, främst förmågan att uthärda tryck- och skjuvpåkänningar. Härtill kommer att värmespänningar superponeras till de spänningar, som redan råder i berget. Spänningar orsakade av enbart bergmassans egenvikt är i detta sammanhang små, däremot kan effekter av ev tektoniska spänningar ge upphov till avsevärda spänningskoncentrationer.

I ett stort sett homogent berg och med rundad rumsgeometri och släta ytor sker brott - liksom vid smällberg - genom att tryckpåkänningarna överskrider bergets tryckhållfasthet. För mycket sprickfattiga partier belägna nära bergrummets yta torde bergartens enaxiella tryckhållfasthet σ_c , ge viss vägledning för bedömning av brottrisken, jfr 5.2.3. Då de flesta urbergarter har $\sigma_c > 1000 \text{ kp/cm}^2$, är sannolikheten för brott under dessa förhållanden låg. Nu råder, så gott som aldrig dessa idealiserade förhållanden. I oregelbundenheter i bergytan kommer troligen att upp-

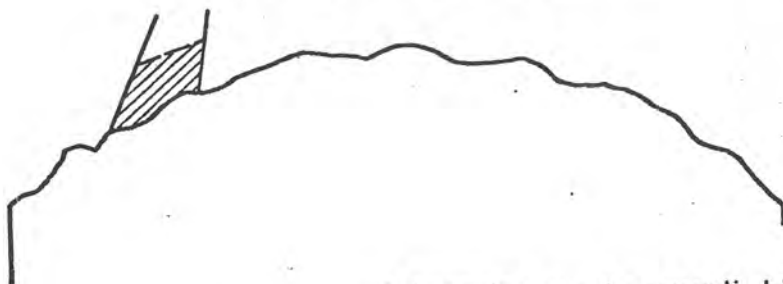
byggas spänningar, som skalar av ytan till lämplig rundad form. Denna typ av instabilitet är sannolikt av med tiden avstannande karaktär. Förekomst av sprickor och slag medför mer svårlösta problem. De tryckspänningar som verkar i berget kring rummet är ju alltid förknippade med en maximal skjuvspänning i 45° riktning mot själva kanten. Har bergrummet ett kraftigt fallande fogsystem mot bergytan, uppstår skjuvningar och glidningar i fogarna. I detta fall måste bergförstärkningar hålla bergytan intakt. En viss uppsprickning av ytberget kan å andra sidan eventuellt vara av godo, då detta torde leda till att de höga spänningarna i berget närmast rummet reduceras.

Sammanfattningsvis kan man konstatera att det är synnerligen komplicerat att utröna omfattningen av eventuella instabilitetseffekter. Erfarenheter från lagring av varm olja vid 60 à 70°C tyder på att man kan få vissa avskalnings-effekter. Observationer i oljelager med varm olja (5) antyder att uppbomningen kan variera mellan 10 och 70 %. Däremot har man mycket litet experimentellt verifierat underlag när det gäller de temperaturspänningar som bygges upp i berget. Teoretiskt sett förefaller dessa att vara relativt höga just i bergets ytskikt kring rummet, men då inga som helst fältförsök utförts i syfte att studera dessa frågor, är ej dessa farhågor på något sätt bekräftade. Jämför man en förhöjning av bergtrycket på i storleksordningen 25 N/mm^2 (250 kp/cm^2) med det inducerade tryck som uppkommer på grund av bergets egenvikt kring ett bergrum, är förhållandena jämförbara med dem som råder på 250-350 m djup. Även om erfarenheterna på dessa djup är mestadels begränsade till mindre rum i gruvor och i viss mån kraftverkshallar, har problemen här på grund av bergtryck ej varit avskräckande.

Utförandet kommer dock att ställa stora krav på att anläggningen gives en spänningsmässigt riktig form samt utspränges med släta ytor på ett skonsamt sätt.



Avlossning av bergparti ofta en relativt tunn bergskiva (0.1-0.3m) begränsad av tre naturliga sprickplan, varav ett kan vara en kloyta.



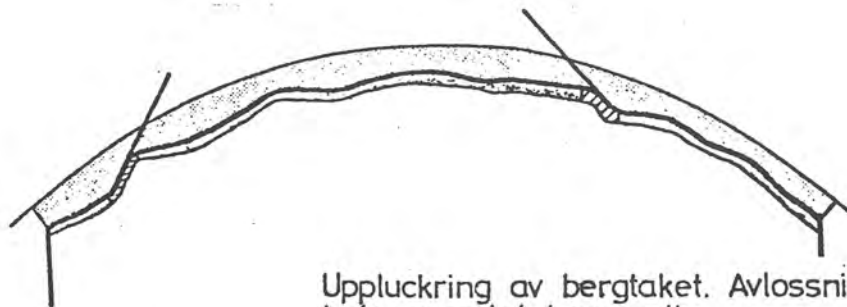
Avlossning av bergparti, block eller skiva (0.1-1.0m) begränsad av två naturliga sprickplan och en nära horisontell brottyta



Uppluckring av bergtaket. Avlossning av bergparti vanligen skiva begränsad av två naturliga sprickplan och en brottyta. Avlossningen har skett vid takets hjässa. Ojämn bergkontur.



Avlossning av bergparti begränsat av en brottyta. Nedhängande parti har lossnat.



Uppluckring av bergtaket. Avlossning av nedhängande betongsprutat bergparti.

Fig 15 Olika typer av nedfall och skador i tak observerade i bergoljelager med varm olja, efter (5)

Inverkan av varierande belastning och spänningsrelaxation

På grund av den varierande temperaturen på lagringsvattnet kommer de yttersta metrarna närmast rummet att uppvärmas och avkylas, jfr figur 6 och 7. Om berget till helt övervägande del beter sig idealiskt, innebär dessa pulserande belastningar endast varierande tryckpåkänningar på berget. Tyvärr kan man ej räkna med detta gynnsamma fall i praktiken annat än undantagsvis. För en sprickig bergmassa är utmattning och kvarstående deformationer högst påtagliga, men svårberäknade faktorer.

Krypning i bergmassan, eller rättare dess omvändning "spänningsrelaxation" (minskning av spänning vid konstant töjning) är förmodligen ej försumbar.

Tidigare konstaterande, att dragspänningar ej uppträder vid nedkylning av bergväggarna på grund av avkylt lagringsvatten, gäller sålunda endast under förutsättning att krypningstendenserna hos bergmassan är så små att de kan försummas.

Med kännedom om materialets krypegenskaper (i första hand krypkonstanten k) är det dock möjligt att härleda ett samband (Nortons lag) mellan spänning och tid, se även Linde 1967.

I figur 16 visas hur spänningen avtar med tiden på grund av relaxation. De angivna k -värdesgränserna anses representativa för svenskt granitiskt bergarts-material vid rumstemperatur. Man kan på goda grunder förmoda att krypning ökar med stigande temperatur, varför de verkliga spänningsändringarna sker snabbare än vad som angivits i figur 16.

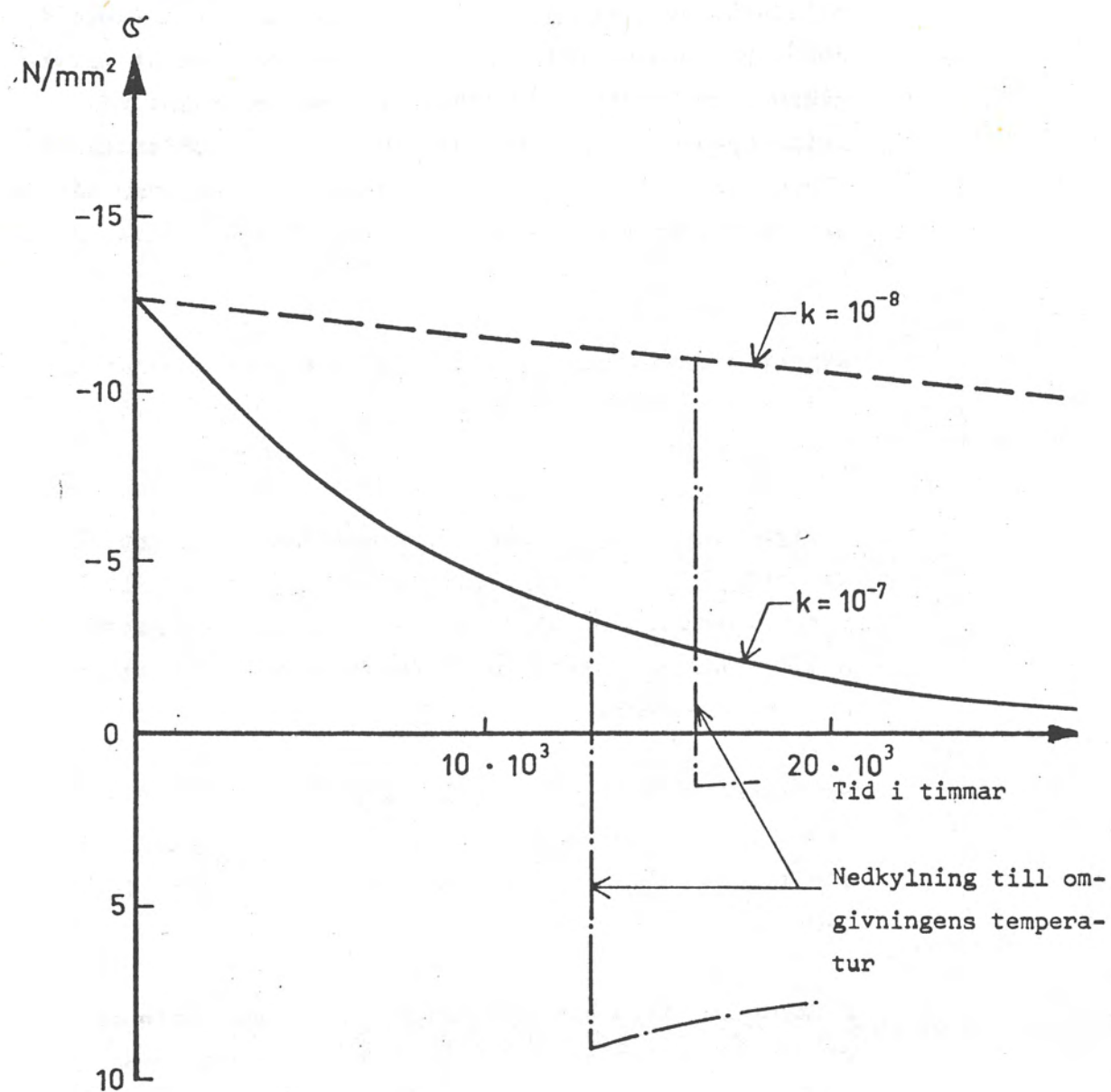


Fig 16 Ändring av ringspänning på grund av relaxation

En ytterligare bidragande orsak härtill är att sprickor och slag kommer att ge bergmassan en större benägenhet att utmattas och kvarstående deformeras. Dessa omständigheter medför dessutom att en viss omfördelning av spänningarna inträder.

För det högre k -värdet minskar spänningen till hälften av utgångsvärdet på ca 6 000 timmar, dvs mindre än ett år. Vid en snabb nedkylning till omgivningens temperatur uppstår då dragspänningar som kan medföra sprickbildning i berget. Även med den lägre krypkonstanten erhålles smärre dragspänningar efter avlastning.

Med högre krypkonstantvärden kan efter ca två år även dygnsvariationerna medföra dragspänningar (utmattning).

Ovanstående är en illustration av betydelsen av fenomen som krypning och relaxation. Exemplet belyser betydelsen av noggranna kunskaper beträffande krypkonstanterna (k och n). Om konstanten n i Nortons lag är större än 1, accentueras krypfenomenen med ökande spänning. Detta är viktigt just i detta fall med tanke på en spänningsnivå som är ca 10 gånger högre än de normalt i kallt tillstånd rådande spänningarna i berget.

Befaras effekter av nämnt slag ställs krav på förstärkande åtgärder, som kan hålla bergmanteln intakt.

5.2.3 Bergets hållfasthets- och deformationsegenskaper

Hetvattenlagren förutsättes utförda i hårda bergarter och i berg av god kvalitet. De bergarter som då blir aktuella, såsom granit och gnejs, har hög tryckhållfasthet. Mindre provstycken av homogen god granit kan uppvisa hållfasthetsvärden upp till 300 N/mm^2 ($\sim 3\,000 \text{ kp/cm}^2$). Ofta är hållfastheten lägre. Likaså har berget som helhet lägre hållfasthet än små provstycken, beroende på förekomst av sprickor

och slag, förvittrings- och krosszoner, förskiffringar m m. Då hållfastheten dessutom är beroende av svaghetsplanens orientering i förhållande till belastningskrafterna måste man bedöma bergmassans förmåga att utvärda påkänningar från fall till fall med ledningar av undersökningar. För mycket grova bedömningar kan man erfarenhetsmässigt gissa på att bergets tryckhållfasthet - i partier som ej genomsättes av markanta svaghetsplan - kan ligga på 10-50 % av aktuella bergartens styrka. På grund av att praktiskt taget allt berg är mer eller mindre sprickigt kan man icke räkna med att berget har någon nämnvärd draghållfasthet.

När bergpåkänningarna orsakas av - som i hetvattenlagerfallet - att man förhindrar att en uppvärmd bergmassa dimensionsändras, spelar som tidigare påpekats bergets deformationsmodul och temperaturutvidgningskoefficient en utomordentligt stor roll för de påkänningar som uppträder, då spänningarna är ungefärligt proportionella mot dessa faktorer. Vid bedömning av bergets deformationsegenskaper bör man skilja mellan elasticitetsmodulen hos homogena, små bergartsprov och deformationsmoduler hos berget som helhet, vari ofta medräknas plastisk deformation. E-modulen för homogena, små bergartsproppar är tämligen regelbunden och väl känd för olika bergarter.

Värden från deformationsmätningar i granitiska bergarter i stor skala, där avsevärda bergpartier utsatts för provning, visar att man ofta får betydligt lägre värden på deformationsmodulen, ända ned till 0,15 å 0,3 E_b av de värden som erhållits för små provstycken. I gott berg kan man troligen dock få värden upp till 0,5 å 0,6 av bergartsvärdena. De lägsta värdena avser starkt uppsprucket berg och lågt tryck. Kunskaperna härvidlag är dock begränsade, bl a beroende på att deformationsmodulen varierar kraftigt från plats till plats, beroende på spricksituation m m.

En ytterligare komplikation - som man måste beakta vid hetvattenlagring i ytligt (< 200 m) berg är att kraft/deformationskurvan är bilinjär eller konkav. Vid uppvärmning, innan bergsprickorna slutits, torde bergmassan kännetecknas av en låg deformationsmodul. När bergblocken på grund av temperaturen utvidgats, så att huvuddelen av sprickorna slutit sig, kan man förvänta en kraftig ökning av deformationsmodulen. En ökning av temperaturen över detta värde medför att spänningarna ökar betydligt. Mycket talar för att deformationsmodulen vid högre tryck närmar sig bergartens elasticitetsmodul, dvs $30 - 50\,000\text{ N/mm}^2$. Läget av denna maxkrökning eller knickpunkt är dock helt individuellt för varje bergmassa och beror av sprickornas utseende, frekvens, tjocklek, orientering m m.

5.2.4 Mineralers och bergarters termiska längdutvidgning

Mineralers och bergarters termiska längdutvidgning är faktorer som i samma grad som deformationsmodulen kommer att bestämma spänningstillståndet. Effekten härav märks dels i makroskala för den totala spänningsbild som kommer att råda kring det uppvärmda rummet, dels i mikroskala genom att rörelser kan ske mellan enskilda mineralkorn på grund av deras olika längdutvidgningskoefficienter. Detta senare kan i sin tur innebära risk för viss "grusvittring", se bl a(2). Det kan vara besvärligt att mäta längdutvidgningskoefficienter för bergarter, då expansionskoefficienterna mätta på ett bergartsprov i ett laboratorium, är mycket olika vid upphettning och avkylning. Detta beror i sin tur på att utvidgningen är olika för närliggande korn på grund av skillnad i sammansättning och orientering. Upphettning av en bergart ger till resultat, att de mineralkorn, som har den största termiska utvidgningen, tenderar att bestämma hela provets förändring i längd, varvid inre sprickor och porer bildas. Sålunda är det värde som uppmätes, snarare ökningen i porositet än den egentliga reversibla termiska expansionen.

I figur 17 redovisas termisk längdutvidgning för vanliga bergarter.

Mikrosprickbildning

Den termiska mikrosprickbildningen orsakas av anisotropi i kristallernas volymexpansion, varvid ett nätverk bildas, där de interkristallina mikrodiskontinuiteterna dominerar. Detta nätverk bildas vid en för varje bergart specifik temperatur - den s k termiska mikrosprickbildningens tröskel.

Bergarter, som uppbygges av mineral med mycket olika termiska expansionsegenskaper, t ex graniter, eller som uppvisar stor anisotropi i termisk expansion, t ex kalkstenar har en stor benägenhet att spricka upp i ett nätverk av små mikrosprickor. Vanligen krävs dock temperaturer större än 100°C för att effekterna skall bli märkbara.

Erfarenheter från begränsade försök med kalksten och granit visar sålunda att kalksten har en i stort reversibel expansion vid temperaturer $< 100^{\circ}$, vid uppvärmning till 150°C fås en märkbar kvarstående expansion och vid upphettning till 250° är den kvarstående deformationen i storleksordningen 1 %. Denna residuella expansion är att hänföra till mikrosprickbildning.

Uppvärms granitprover mindre än $80 - 100^{\circ}\text{C}$ torde ingen sprickbildning ske. Överskrides 100°C ökar den irreversibla mikrosprickbildningen med bestående svällning som följd, Perami 1971.

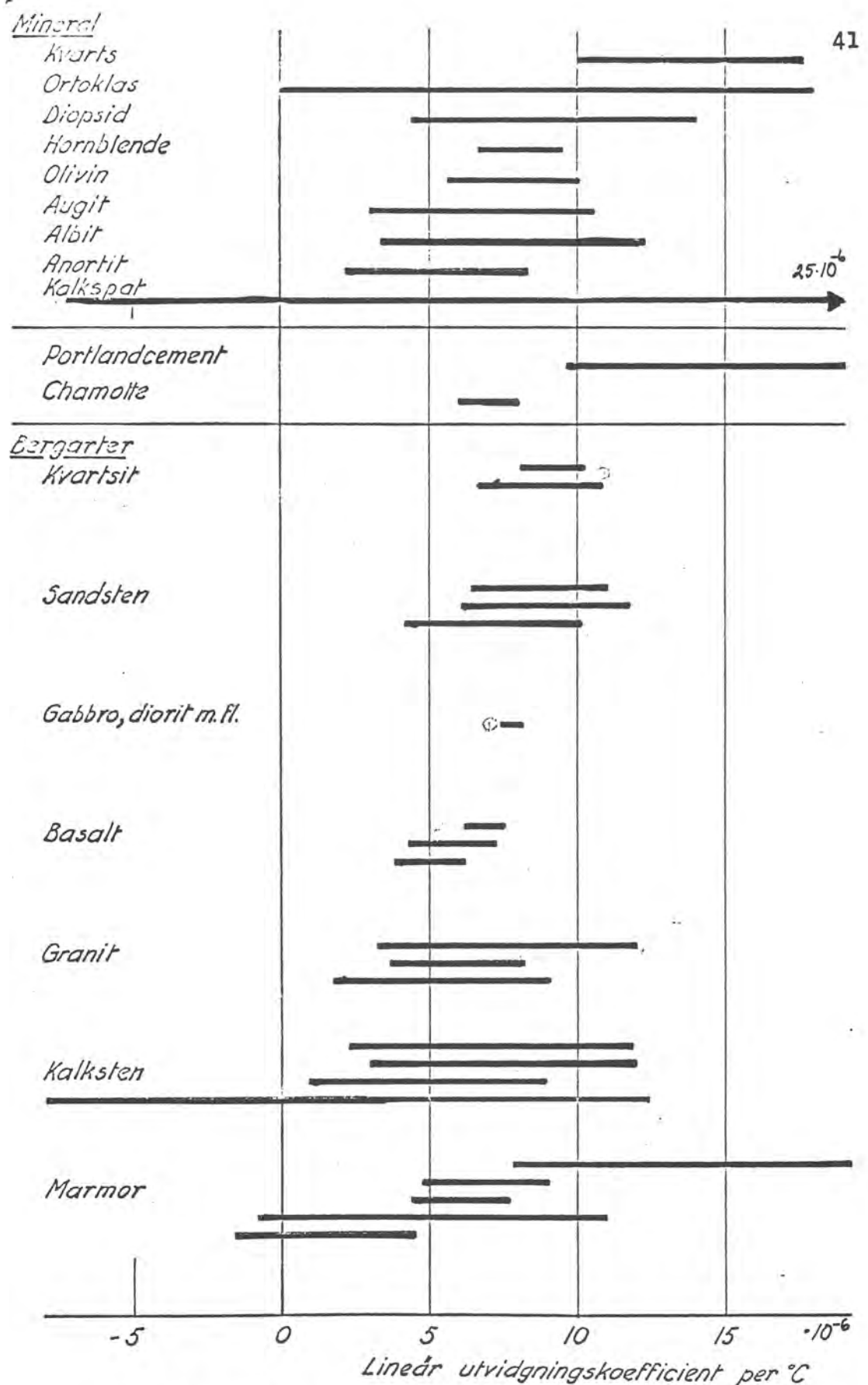


Fig 17 Exempel på termisk utvidgning. Hos mineral anges variationen för de olika kristallografiska riktningarna, i övrigt variationsbredden i det undersökta materialet. Varje streck markerar en undersökning. Enligt sammanställningar i Birch et al 1942, Bonnell och Harper 1951, Mitchell 1953, Nekrassow 1961.

Finkorniga bergarter synes ha mindre tendens till bestående mikrosprickbildning än grovkorniga. Likaså torde yt- och gångbergarter - t ex ophiter, som är mineralogiskt heterogena och saknar kvarts - ej påverkas i detta avseende för temperatur ända upp till 400°C.

Detta förklarades av att de mineral, som uppbygger denna typ av berggrund, uppvisar mycket stora likheter beträffande termiska egenskaper.

5.3 Förändringar av kemisk natur hos berg och lagringsvatten

Vid hetvattenlagring ändras radikalt det naturliga jämviktstillstånd som rått, genom att temperatur och tryck ökas. Härigenom kan bergartsmineralen i berget närmast rummet kemiskt påverkas. Genom utlösning av olika mineral kan lagringsvattnet få en något förändrad kemisk sammansättning. För de flesta bergartsbildande mineral, med undantag för karbonatföreningar, ökar lösligheten med ökat tryck och ökad temperatur. En dylik utlösning av mineralprodukter från bergytan i lagringsvattnet åtföljes av en begränsad nedbrytning av bergets yttersta skikt. Den förändrade kemiska sammansättningen hos lagringsvattnet har betydelse, då kvalitetskraven på vattnet är stora.

Allmänt sett torde en förhöjning av tryck och temperatur påskynda de flesta kemiska reaktioner. Vidare medför ökad temperatur en förskjutning av jämvikterna, vilket medför att inte enbart den kemiska sammansättningen ändras, utan även av nybildningars fysikaliska struktur, t ex torde vissa gelbildningar vid rumstemperatur bli grövre och kunna uppvisa kristallin struktur.

Gissningsvis är dock utlösningseffekterna ovan av godartad natur, men vissa yttringar t ex utfällning av karbonater och av silikater i rörsystem och värme-

växlare bedöms allvarligt kunna störa driftsäkerheten. Problemen kan vara svåra att tekniskt lösa genom "behandling" av lagringsvattnet. Förhållanden som motverkar karbonaters löslighet gynnar silikatutlösning och vice versa.

Lerzoner i berg kräver också särskild uppmärksamhet. Innehåller dessa svällbenägna aktiva leror kan dessa - - utöver tidigare nämnd svällning och skärhållfasthetsreduktion - även påverkas på "kemisk" väg om tryck och temperatur ökas, jfr pkt 5.4.

5.3.1 Mineralers och bergarters löslighet

I litteraturen redovisade löslighetsdata för olika mineral minskar kraftigt med ökat antal ingående komponenter. För bergarter, som ju uppbygges av flera mineral, förekommer få litteraturdata under aktuella betingelser. Vissa begränsade autoklaveringsförsök med bergarter har därför genomförts, då bl a det ej är otänkbart att ett mineral kan ha katalytisk effekt på ett annat minerals löslighet. Försöken är redovisade under 5.3.2. En avgörande faktor för lösligheten är vattnets beskaffenhet. De försök som gjorts har i allmänhet företagits med destillerat vatten och pulvriserade prover. Löslighetsdata redovisade i litteraturen ger sålunda oftast ^{endast}/en uppfattning om storleksordningen, då de experimentella förhållandena ofta varit specifika.

Vid utförandet av hetvattenanläggning i ett oinklätt bergrum torde det vara nödvändigt att utföra autoklaveringsförsök med aktuella bergarter och vattenkvalitet. En detaljerad redovisning av tillgängligt litteraturmateriäl inom området återfinns i särskild utredning nr 2, "H Bernadsson: Bergarters hållfasthet och löslighet vid hetvattenlagring i bergrum", jfr förteckning pkt 8.

För svensk berggrund intresserar i första hand lösligheten hos bergarter med stort kvarts- och kalkinnehåll.

När det gäller silikatmineraler ökar dessas löslighet -
 - ev när ett visst tröskelvärde ($\sim 100^{\circ}\text{C}$) passerats -
 - i stort linjärt med ökad temperatur och tryck enligt
 figur 18.

Detta kan innebära en viss risk för utfällning av fastare silikatföreningar i de delar av systemet, där temperatur och tryck sjunker. För kalciter minskar lösligheten snabbt vid stigande temperatur, i vissa fall ner till en tiondel av lösligheten vid rumstemperatur. Förekomst av upplöst koldioxid (CO_2) i vattnet, som ökar vattnets surhetsgrad - en i naturen ofta förekommande process - ökar upplösningen av karbonater högst väsentligt. Man måste därför räkna med utfällning av kalk (pannstensbildning) i de delar av systemen där temperaturen höjs.

Utlösning av fältspatmineral ökar med temperaturen. De utlösta kvantiteterna synes dock kvantitativt obetydliga i jämförelse med kvarts och karbonater, då man tämligen snabbt når mättnad.

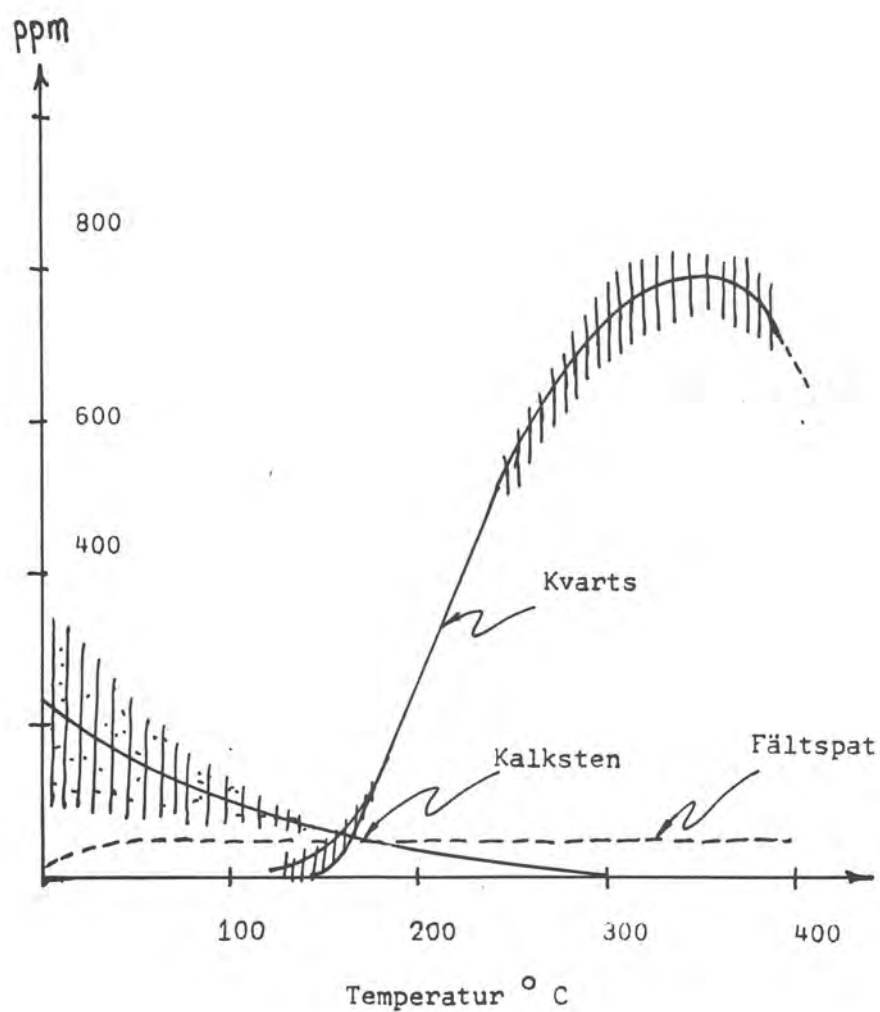


Fig 18 Exempel på ökning i löslighet för kvarts och fältspat vid ökad temperatur och tryck

5.3.2 Autoklaveringsförsök

Då litteraturen i allmänhet ej ger upplysning om bergarters löslighet under tillräckligt realistiska förhållanden har en kompletterande pilotstudie utförts vid geologiska institutionen vid CTH.

I tefloninklädda dekomposeringsbomber (fabrikat Perkin-Elmer) uppmättes mängder utlösta produkter hos bergartsprover efter autoklivering under förhöjt tryck och temperatur. I bomberna placerades ca 45 g i skivor uppsågade bergarter med en yta av ca 155 cm^2 , och 75 ml vattenlösning tillsattes. Bomberna placerades i värmskåp 6 à 7 dygn vid 150°C , därefter analyserades lösningarna på sitt joninnehåll. Med hjälp av atomabsorptionsspektrofotometer (Perkin-Elmer 303) analyserades provlösningarna på följande element: Na, K, Fe, Ca, Mg och Mn. SiO_2 och Al_2O_3 förbehandlades enligt standardmetoder och halterna bestämdes med hjälp av spektrofotometer (Hitachi/model 101).

Preparering av dekomposeringsbomberna skedde enligt följande:

Prov 1: 51,9 g bohusgranit med en yta av 157 cm^2
och 75 ml jonbytt dest-vatten.

Prov 2: 44,8 granodiorit med en yta av 151 cm^2
och 75 ml jonbytt dest-vatten.

Prov 3: 43 g bohusgranit med en yta av 156 cm^2
och 75 ml jonbytt dest-vatten, där NaOH
tillsattes så att pH = 10,2 erhöles.

Prov 4: 41 g bohusgranit med en yta av 154 cm^2 ,
75 ml jonbytt dest-vatten, där H_2SO_4
tillsattes så att pH = 2,7 erhöles.

Prov 5: 38,73273 g bohusgranit med en yta av 164 cm^2 och 75 ml jonbytt dest-vatten, som innehöll upplöst NaCl (Cl = 53 ppm). Efter försöket vägde provet 38,70866 g. Viktsförlust 0,02407 g.

Prov 6: 46,36277 g bohusgranit med en yta av 168 cm^2 och 75 ml vattenledningsvatten, placerades i bomben. Efter försöket vägde provet 46,33204 g. Viktsförlust 0,03073 g.

Försöken med prov 1-4 pågick under 7 dygn, medan försöken med prov 5-6 pågick under 6 dygn.

Vid granskning av prov 4 upptäcktes en gulbrun fällning. Materialet har ej undersökts med röntgendiff-fraktometri, men det förefaller icke osannolikt, att det är fråga om någon form av aluminiumhydroxid. Likartade fällningar förekommer hos prov 5 och 6.

I fig 19 och 20 har en sammanställning gjorts, som redovisar totala mängden av utlöst material med avseende på joner resp oxider i en 1 000 m lång, cirkulär tunnel med $r = 2 \text{ m}$, med utgångspunkt från erhållna mätvärden i relation till ytan.

Som framgår av analysresultaten har ganska stora mängder utlösts, mest natrium- och kiselföreningar. En större serie experiment borde därför vara av mycket stort värde.

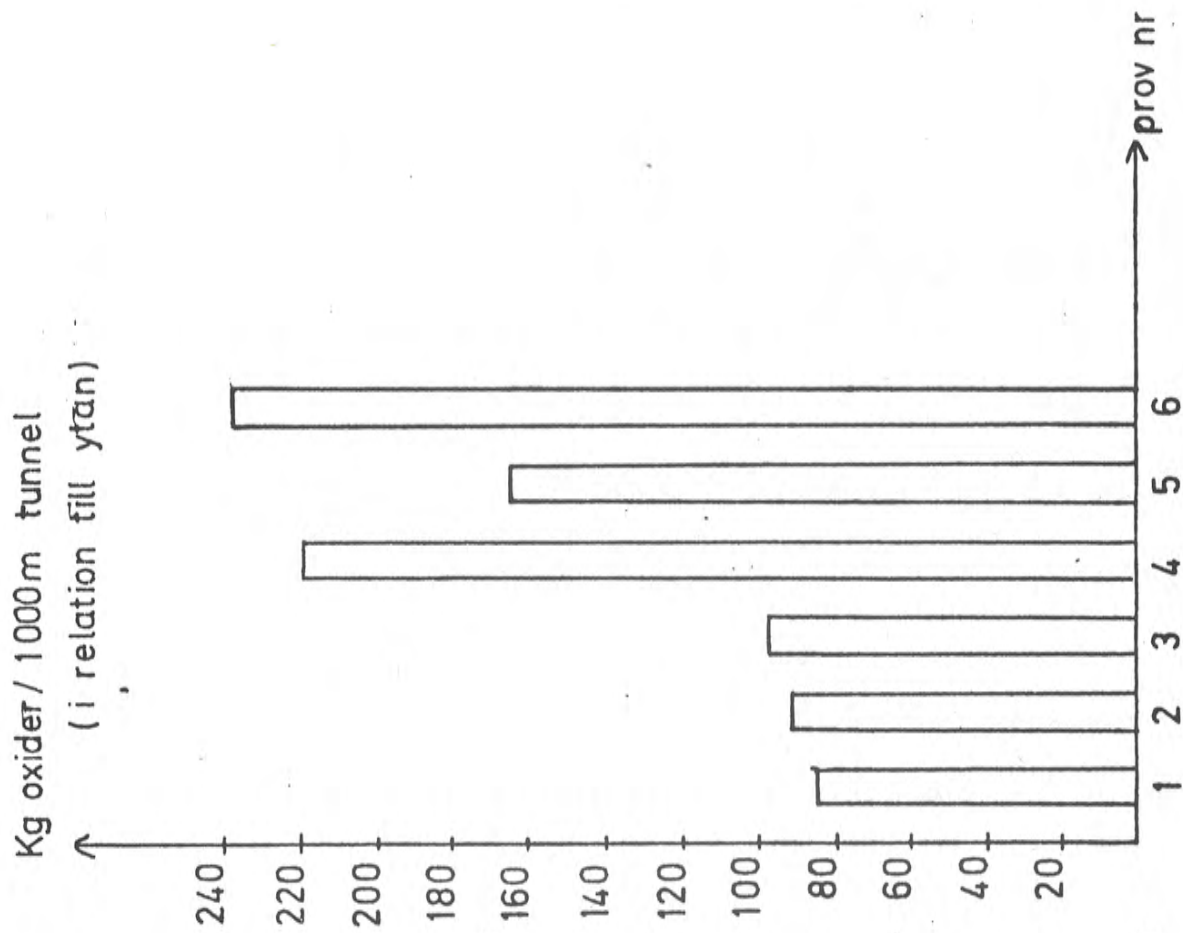


Fig 19 Utlösta produkter vid autoklavering
Jonmaterial

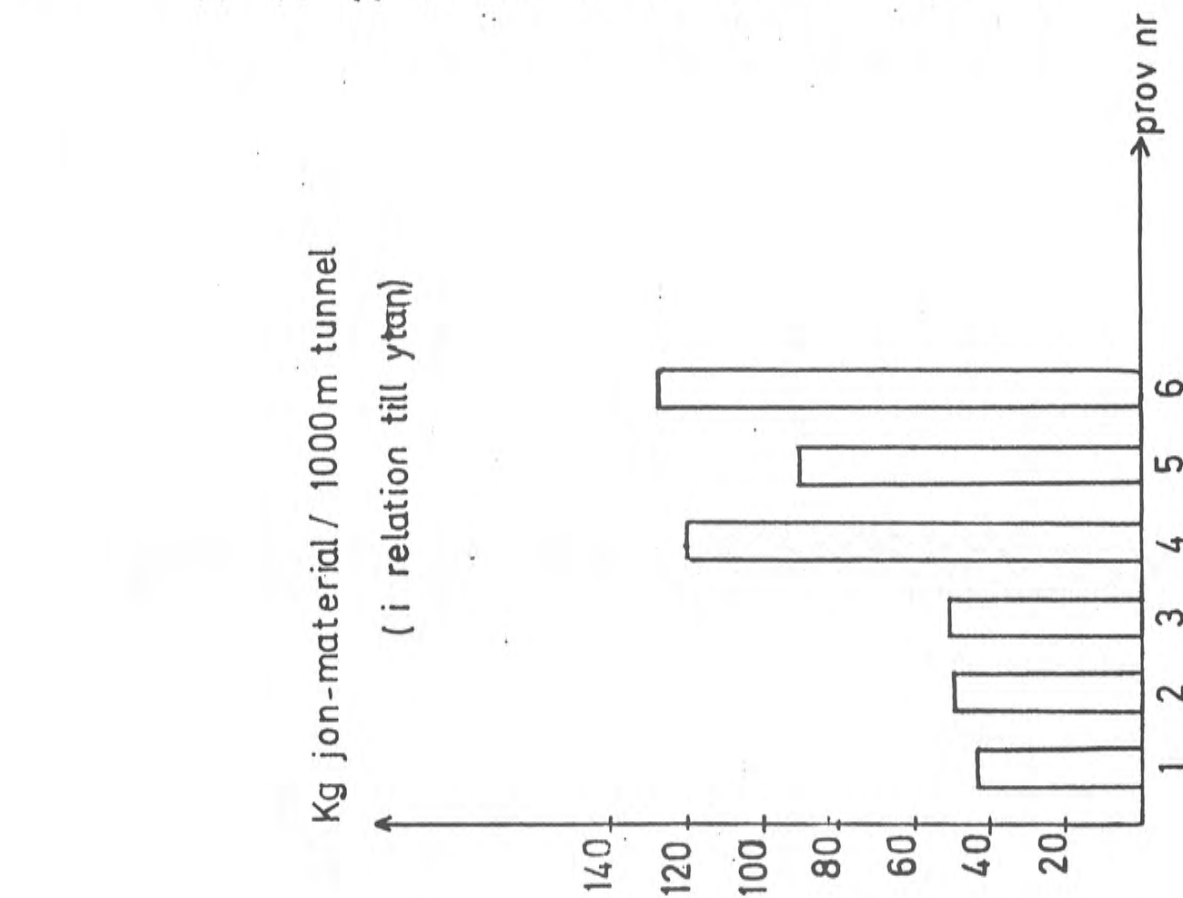


Fig 20 Utlösta produkter vid autoklavering
Oxidmaterial

5.4 Inverkan av hetvatten på lerzoner i berg

Sprickor och zoner som innehåller lera förekommer i flertalet berganläggningar i Sverige. Orsaken till att dylika zoner bör uppmärksammas vid bergrumsarbeten är lerförekomsternas betydelse för ras.

Bergrörelser i kombination med hetvatten har ogynnsam inverkan på svaghetszoner i berget, särskilt när dessa är rika på lera eller andra sprickfyllnader. Det är sannolikt att lerzonerna vid temperaturrörelser i bergmassan blir mer eller mindre omrörda och förlorar en del av sin skjuvhållfasthet, varigenom risken för stora ras ökar.

Särskilt stora och ofta fortskridande ras har inträffat i de fall leran varit svällande. Vissa lermineral av framför allt montmorillonit-smectit-typen har nämligen den egenskapen att de kan bygga in vattenmolekyler i kristallgittret och därigenom öka sin volym. Svällning inträffar således när leran är i kontakt med vatten och när möjligheter till volymsutvidgning på grund av förändringar i omgivande berg uppstår. Förekomster av dylika s k svällande leror har påträffats vid anläggningar i väst-Sverige och i fjällkedjan.

Vid varmvattenlagring i berg kan man tänka sig frågan huruvida varmvattnet medför förändringar på lera uppdelad i två delar:

- Inverkan av hetvatten på lerans mineralogiska sammansättning.
- Inverkan av hetvatten på lerans hållfasthetsegenskaper.

Hetvattens inverkan på lerans mineralogiska sammansättning

Frågeställningen är således om leran, när den utsätts för högt tryck, hög temperatur och vatten med varierande sammansättning, kan ändra sin mineralogiska karaktär på så sätt att

- . aktiv lera blir ännu aktivare,
- . inaktiv lera blir aktiv.

Frågan om hur omvandlingen av bergartsbildande mineral till lermineral går till i naturen har varit föremål för tämligen omfattande forskning. Denna process innefattar både kemiska och fysikaliska aspekter. Även biologiska faktorer har betydelse.

Lermineraler kan bildas både vid normala temperaturer genom vittring av bergartsbildande mineral och under hydrotermala förhållanden vid förhöjd temperatur och tryck (mer än 100°C och 1 atö).

Man kan peka på att bildning av kaolin favoriseras av sur miljö, medan montmorillonit bildas företrädesvis i basisk miljö.

Kunskapen om i berget förekommande leriga svaghetszoners regionala fördelning, bildningssätt och mineralogiska sammansättning är ännu tämligen knapp. Lermaterialet i svaghetszonerna har huvudsakligen bildats på två sätt. I samband med tektoniska rörelser, som t ex förkastningar, överskjutningar etc blir berget i sådana rörelsezoner hårt uppkrossat och söndermalt. Dessa uppkrossade zoner kan vara mer eller mindre leromvandlade och innehålla svällande lera. Det andra sättet är olika nedbrytnings- och vittringsprocesser.

Tillfälliga litteratur- och erfarenhetsuppgifter visar att frågan, huruvida aktiv lera kan bli ännu aktivare

och inaktiv lera aktiv under inverkan av hetvatten, är vanskelig att besvara idag. Tydligt är att lermineral under vissa specifika förhållanden kan undergå mineralogiska omvandlingar. Att sådana förhållanden, dvs något slags hydrotermalsyntes som ger nämnda mineralogiska förändringar av lermineralen, skulle uppkomma i hetvattentunnlar är dock föga troligt.

5.4.1 Autoklaveringsförsök med aktiv lera

Inledande laboratorieundersökningar har utförts på två lerprover, tagna ur svaghetszoner i en kraftverkstunnel vid Olden, Jämtland.

Lerorna undersöktes med avseende på svällningsegenskaper i ödometer med torrt material $< 20 \mu$, vilket konsoliderat under 2 000 kPa (20 kp/cm^2) belastning. Efter avlastningen bestämdes svälltrycket som erforderlig last för att volymsutvidgning vid vattentillsats skulle förhindras. Samma fraktion undersöktes med hjälp av röntgendiffraktionsteknik för bestämning av lerornas mineralsammansättning. Sedan autoklaverades proverna i en speciellt tillverkad behållare, placerad i en värmeugn. I autoklaven förvarades lerprover och destillerat vatten i skilda glas. Försöken utfördes vid 145°C under 21 dygn.

Efter autoklaveringen gjordes en ny bestämning av lerornas svällningsegenskaper och mineralogiska sammansättning.

Resultaten framgår av följande tabell

VBB nr	Ej autoklaverat		Autoklaverat	
	Mineralogisk sammansätt- ning enligt röntgen	Sväll- tryck kp/cm ²	Mineralogisk sammansätt- ning enligt röntgen	Sväll- tryck kp/cm ²
4715	klorit- vermiculit	1,5	klorit- vermiculit	2,4
4716	montmorillonit- vermiculit	5,9	montmorillonit- vermiculit	3,8

Dessa inledande försök är för fåtaliga att medge några avancerade slutsatser. Variationerna i de uppmätta svälltrycken före och efter autoklaveringen ligger troligen inom felmarginalen för försöksmetodiken. Röntgenundersökningarna visar inga tecken på mineralogiska förändringar av lerorna till följd av autoklaveringen. Man kan kanske sammanfattningsvis säga att resultaten av dessa två inledande autoklaveringsförsök ligger i linje med det tidigare antagandet, att det är föga troligt att leror i hetvattentunnlar skall undergå nämnvärd mineralogisk förändring.

5.4.2 Hetvattens inverkan på lerans hållfasthet

Temperaturens inverkan på lerors mekaniska egenskaper är likaså knapphändigt studerad. Utförda undersökningar har framför allt koncentrerats till temperaturintervallet mellan 0 och 40°C (mellan jord- och något över rumstemperatur).

Genom att vattnets viskositet (inre seghet) avtar med ökande temperatur, kan man förvänta sig att plasticitetsgräns och flytgräns sjunker, möjligen åtföljt av en mindre sänkning även av plasticitetsindex. Försök av Laguros (1969) antyder en sådan sänkning i ett mindre temperaturintervall kring rumstemperatur, figur 21.

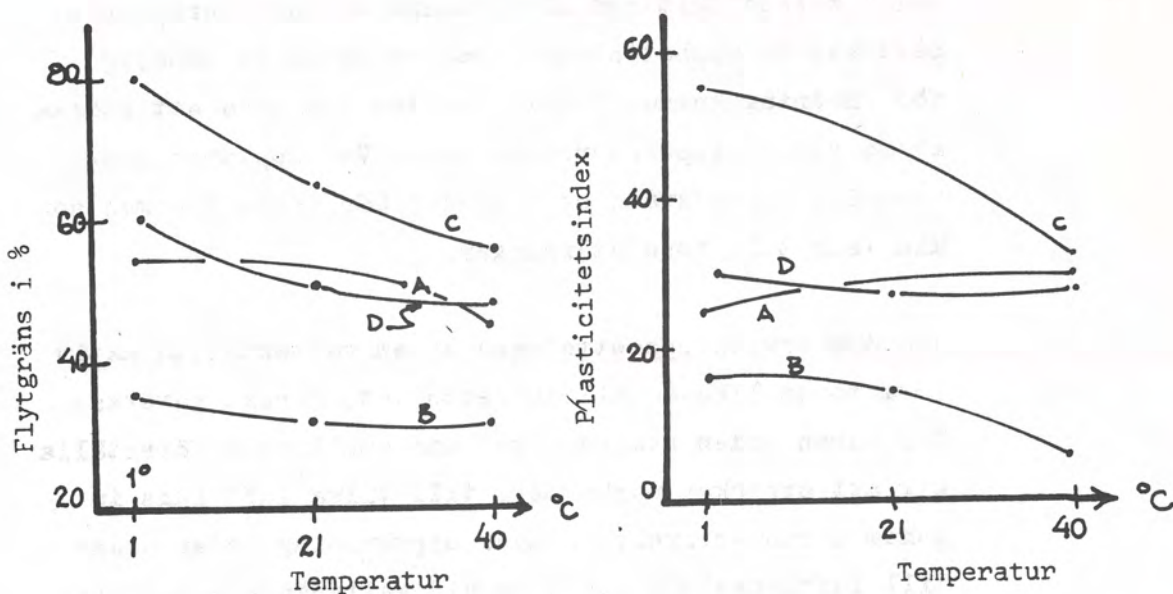


Fig 21 Temperaturen inverkan på flytgräns och plasticitetsindex (Laguros, 1969) hos fyra olika leror, A-D.

Kapillärkrafterna i porvattnet sjunker också, varigenom lerans förmåga att binda porvatten avtar, dvs den naturliga vattenhalten sjunker. Samtidigt växer repulsionskrafterna mellan partiklarna, vilket motverkar porvattnets större rörlighet, så att någon hållfasthetsförändring inte nödvändigtvis inträder. Däremot kan man nog för de flesta leror räkna med ökad sensitivitet (känslighet för omrörning) vid upphettning.

För vanliga, ur svällningssynpunkt inaktiva leror (av illit-karaktär) kan man sammanfattningsvis inte förutse någon större ändring av skjuvhållfastheten vid upphettning, men däremot troligen ökad sensitivitet, vilken innebär större känslighet för yttre temperaturrörelser.

För ur svällningssynpunkt aktiva leror (av montmorillonittyp) är förhållandena något annorlunda. Det i kristallgittren hårt bundna vattnet torde inte påverkas av upphettningen, men om leran är känslig för omröring kommer den liksom den inaktiva att störas av de yttre temperaturrörelserna. Vid upprepad upphettning och avsvälning inträder här andra fenomen som kan leda till inre störningar.

Vid den första upphettningen av en vattenmättad aktiv lera torde likaså hållfastheten inte direkt påverkas. När leran sedan svalnar, kan man emellertid föreställa sig att sprickor uppkommer, till vilka luft sugas in genom porundertryck. Förnyad uppvärmning leder sedan till luftinneslutningar, varvid vattenångans porövertryck ger upphov till störningar, minskar den inre friktionen och sänker hållfastheten.

Det är välbekant att överkonsoliderade leror, dit sprickfyllningar i bergslag hör, under inverkan av långsam skjuvning visar en hållfasthetstopp efter måttliga deformationer, men att sedan hållfastheten sjunker mot ett konstant slutvärde (residualhållfastheten), när deformationerna blir större. Denna hållfasthetsminskning är förbunden med en nedbrytning av strukturen och en ökning av portrycken. Det synes rimligt att vattenupptagning vid svällning samt porgasanhopning vid upprepad uppvärmning och avkylning har en liknande effekt som en normal höjning av portrycken och därmed leder till hållfasthetsnedsättning.

Intill dess att man genom försök kunnat påvisa effekter i motsatt riktning, är det därför befogat att i samband med hetvattenlagring i berg räkna med en successiv hållfasthetsnedsättning i utsatta lerzoner, tills materialets residualhållfasthet uppnås. Hållfasthetsnedsättningen bör vara mer utpräglad i aktiv än i inaktiv lera.

5.5 Effekter av hetvattenlagring på grundvatten och omgivande berg

Ett hetvattenlager kommer att uppvärma sin omgivning. Vid ytligt belägna anläggningar kan detta bli lokalt märkbart. En 150°C varm tunnel på 20 m djup värmer t ex under vissa förhållanden upp marken ca 20° på 5 m djup rakt ovan tunneln. Allmänt sett bedöms för anläggningar med god tryckbalansering av yttre grundvattentryck och inre ång- och vattentryck dock uppvärmningseffekten tolerabel genom sin relativt begränsade omfattning. I enstaka fall kan man tänka sig besvärande störningar. Om anläggningen placeras på en sådan nivå och trycket i lagringsbehållaren överstiger grundvattentrycket sker utläckning av varmt vatten i omgivningen. Understiger trycket i lagringsrummet grundvattentrycket kommer en viss dränering av omgivningen att ske. När bergmassan uppvärms, måste även det vatten som befinner sig i sprickor och slag uppvärmas. På grund av olika temperaturer kan man tänka sig strömning i detta vatten, vissa s k skorstenseffekter. Föreligger en viss tryckgradient i grundvattenströmningen in mot kammaren, kommer sannolikt en del av uppvärmt vatten att ta denna väg.

I det följande har de skilda problemen analyserats och diskuteras mer i detalj.

5.5.1 Förläggningsdjup

Genom att i stort balansera trycken i lagringsrummet och grundvattnet kan hetvattenackumuleringen sannolikt ske med minsta möjliga påverkan på omgivningen. Utbytet mellan varmt ackumulatorvatten och yttre grundvatten reduceras till ett minimum. För att motverka att ånga tränger ut i berget och egenkonvektion av vatten i bergsprickor, bör grundvattentrycket balansera ackumulatortrycket med en liten marginal, i storleksordningen 1 m vp i nivå med rummets tak.

Bergrummets förläggningsdjup måste sålunda väljas med hänsyn till önskad vattentemperatur och grundvattentytans läge. Temperaturen och sålunda även förläggningsdjupet måste även anpassas till vissa val av tekniska lösningar, t ex pumpuppställningen. I fig 22 visas som exempel hur trycken i grundvattnet och ackumulatorn kommer att förhålla sig vid en maximal arbetstemperatur på 135°C .

Ökningen i grundvattnets temperatur intill ackumulatorn är så lokal att det ej har någon betydelse för tryckförhållandena. Det bör emellertid observeras att grundvattentrycket kommer att ligga i storleksordningen 0,5 bar över det tryck som råder i ackumulatorvattnet. För att begränsa inläckningen är det därför nödvändigt att kontrollera förekomsten av grundvatten intill bergrummet för att effektivt kunna injektera sprickor och grundvattenförande bergpartier. Inläckningen av grundvatten kan efter idrifttagningen lätt kontrolleras genom att mäta upp t ex dränagepumparnas drifttid. Vattentemperaturen i ackumulatorn varierar mellan 135° och 85°C för laddat respektive oladdat tillstånd. Sänkes temperaturen till 85°C även i vattenytan kommer grundvattnet att hålla ett betydande övertryck relativt bergrummet, vilket bör förhindras genom att se till att vattenytan ej kyles ned.

Då förhållanden vid inläckning och därav följande ev dränering och grundvattensänkning är betydligt gynnsammare än vid t ex ett oljelager, torde dessa problem väl gå att bemästra.

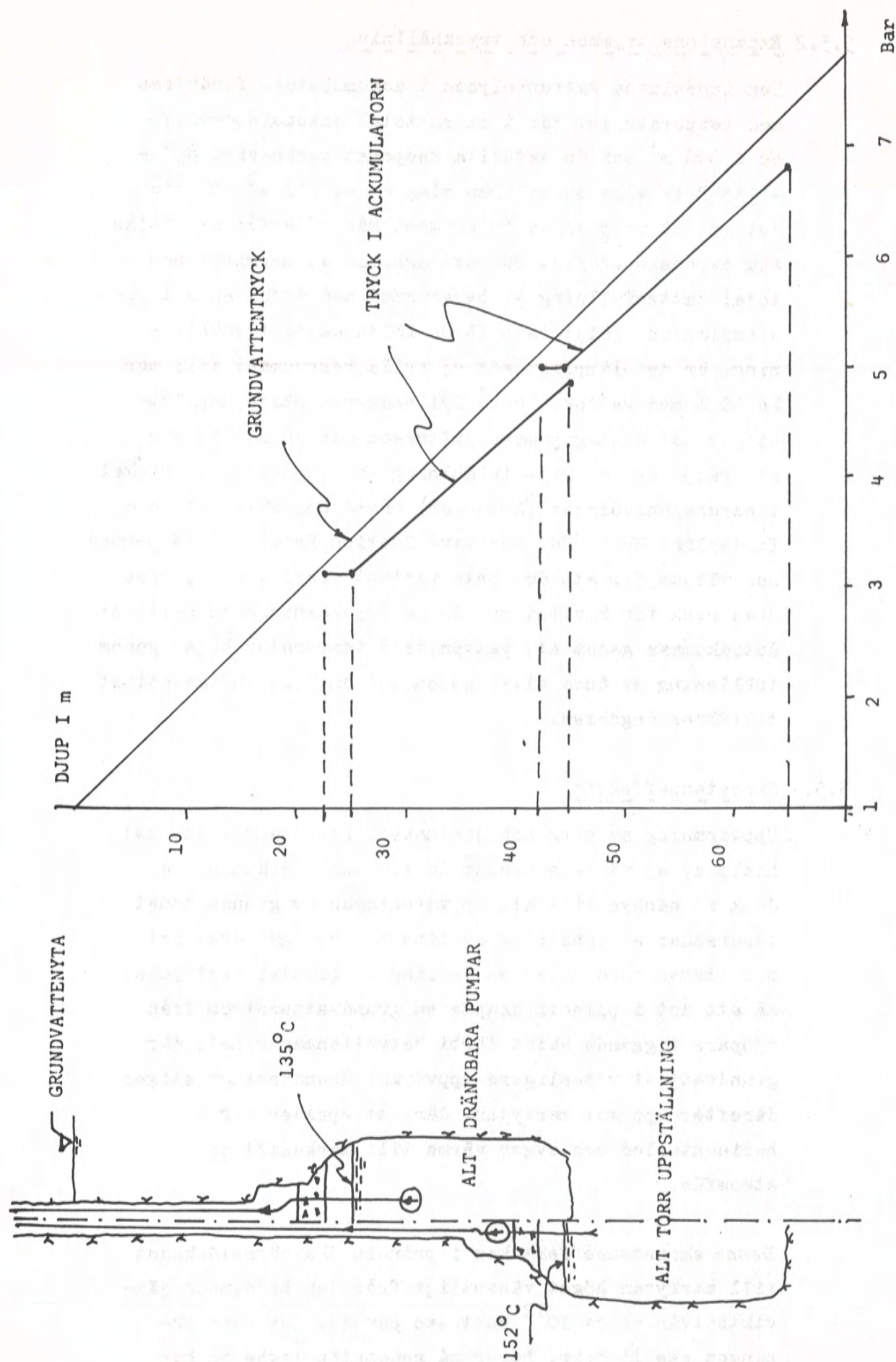


Fig 22 Förlägningsdjup och tryckförhållanden vid alternativa pumpuppställningar

5.5.2 Expansionsutrymmen och tryckhållning

Den inneslutna vattenvolymen i ackumulatorn förändras med temperaturen. För t ex en total ackumulatorvolym om $4\,000\text{ m}^3$ och de aktuella temperaturgränserna $85^\circ - 135^\circ\text{C}$ erhålls en volymändring av ca 160 m^3 . En viss del av det utsprängda bergrummet måste därför utnyttjas som expansionsvolym. För att erhålla en marginal mot total vattenfyllning av bergrummet med åtföljande tryckstegring som följd samt få en följsammare tryckhållning, är det lämpligt att ej fylla bergrummet till mer än 90 % med vatten. Denna fyllnadsgrad måste upprätthållas med dränagepumpar, eftersom man ju alltid har att räkna med en viss inläckning av grundvatten. Trycket i expansionsvolymen (ångdomen) måste anpassas till erforderligt NPSH (Net Positive Suction Head) för de pumpar som väljes för att det heta vattnet skall kunna pumpas utan risk för kavitation. Denna tryckökning kan antingen åstadkommas genom att vattenytans temperatur höjes genom inblåsning av ånga eller genom att en viss luftkvantitet tillföres ångdomen.

5.5.3 Skorstenseffekten

Uppvärmning av berg och jordmassor har framräknats med hjälp av en värmeledningsmodell. Denna beräkning tar dock ej hänsyn till att uppvärmningen av grundvattnet förorsakar en minskning av tätheten hos grundvattnet och därmed förorsakar en ändring av grundvattentrycket så att det i princip skapas en grundvattenström från djupare liggande skikt förbi hetvattenmagasinet, där grundvattnet ytterligare uppvärms. Grundvattnet stiger därefter upp mot markytan, där det sprider sig i horisontalled och avger värme till markskikt och atmosfär.

Denna skorstenseffekt kan i princip öka värmeläckaget till markytan högst väsentligt från den beräknade jämviktsnivån av ca 10^{12} Watt sec per år. Hur stor ökningen reellt blir, beror på genomsläppligheten hos

berget och sprickornas orientering. Alternativt kan denna skorstenseffekt endast vara märkbar inom de övre markskikten som utgöres av porösare material. Detta får då samma effekt som om den övre begränsningen av värmeledningsmodellen låg på en lägre nivå, vilket skulle kunna öka värmeläckaget uppåt något.

5.5.4 Ångbildning i porvattnet

Det måste förutsättas att hetvattenmagasinet förläggs på ett sådant djup med hänsyn till grundvattennivån, att ångtrycket även med hänsyn till de av eventuell skorstenseffekt modifierade temperaturfördelningarna ej överstiger grundvattentrycket i någon punkt.

5.5.5 Ändringar av markstruktur m m

Uppvärmningen av grundvattnet kan ändra grundvattnets elektrolytbalans, vilket kan resultera i avsättningen av salter. För närmare utvärdering fordras information om grundvattnets innehåll av diverse salter. Det förefaller osannolikt att denna effekt är av sådan omfattning att den kan ändra markstrukturen.

5.5.6 Lokala ändringar i växtlighet m m

Den framräknade värmeförlusten 10^{12} Watt sec per år över en yta av ca 20 000 m² motsvarar ett värmeflöde av 15 kWh/år · m² eller 4 cal/d · cm². För exempelvis uppvärmningen av en fri vattenyta skulle detta ej resultera i en märkbar temperaturhöjning och värmeläckaget synes ej kunna influera på växtlighet, avdunstning m m.

5.5.7 Utpressning av porvatten ur berg

Den av hetvattenmagasinet förorsakade uppvärmningen av omgivande bergmassor resulterar i en utvidgning av berget och därmed en utpressning av grundvatten i sprickorna. Om de i berget överlagrade massorna är täta kan i princip risk för skred föreligga.

5.7 Bergförstärkning och tätning

Lagring av hetvatten i oinklädda bergrum leder uppenbart till större stabilitetsproblem, än vad som är normalt i stora bergrum och det är uppenbart att man måste räkna med en viss uppsprickning av berget. Man bör här skilja mellan sådan tämligen godartad uppsprickning som i stort jämnar till och skalar av bergytan och sådan uppsprickning som successivt åter sig in i berget. Denna senare typ måste förhindras i görligaste mån. Jfr avsnitt 5.2.2. Genom lämpligt utformade bergförstärkningar kan man säkerligen i många fall avsevärt förbättra bergets förmåga att utvärda värmepåkänningar.

I det följande berörs endast förstärkningsåtgärder som är aktuella vid oinklädda bergrum. Inklädnad av hela rummet med betong och/eller stålplåt, vilket kan vara aktuellt i vissa fall och tillämpningar, behandlas ej här.

Förhållandet att man måste räkna med flera lösa block i taket än normalt i berganläggningar, gör att man måste ägna frågor som rör installationernas skydd och möjligheter till säker inspektion stor uppmärksamhet.

5.7.1 Bultförstärkningar

Bultförstärkningar torde vara väl ägnade att förhindra nedfall av block och reducera uppsprickning på grund av värmeinducerade påkänningar.

Erfarenheterna från bultförstärkning av rum och tunnlar utsatta för högt bergtryck - i princip en belastningssituation analog med uppvärmning av berget - visar på goda resultat.

I hetvattenlagret krävs dock särskilda förankringsbrickor för att berget närmast rummet skall säkras på betryggande sätt, då de rörelser som uppträder mellan bultstål och betong på grund av olika värmelednings-

förmåga kommer att bryta ned ingjutningsbruket närmast bergytan, se figur 23.

För att bibehålla en tryckt, bärande bergmantel kring rummet förefaller systematisk bultning, ev med förspända stag eller dylikt ej osannolik.

För att förhindra nedfall mellan bulten krävs dessutom särskilda åtgärder. Här är sannolikt starka armeringsnät eller bergband att föredra framför sprutbetong, åtminstone om denna inte armeras och armeringen upphänges på bultarna. Förutom att risken att lossna från underlaget föreligger kommer även själva betongen att murkna (jfr sprutbetongförstärkningar, pkt 5.7.2).

5.7.2 Sprutbetongförstärkningar

Användning av oarmerad sprutbetong för kvalificerad bergförstärkning i varmvattenlager bedöms av flera skäl mindre lämpligt, ehuru man direkt saknar bevis härför.

Förutom en ökad risk att sprutbetongen skall lossna från underlaget vid rörelser i berget eller att uppsprickning och krakelering kommer att öka, måste man även räkna med att det varma vattnet kan bryta ned betongmaterialet, jfr pkt "Betongens varmvattenresistens".

Graden av förstörelse är svår att avgöra utan experimentella studier. I många fall torde armerad sprutbetong fäst vid bult kunna fungera tillfredsställande.

5.7.3 Betongförstärkningar

Gjutna betongkonstruktioner kan komma till användning för olika typer av proppar och tätväggar, för förstärkningsbågar, fundament och i pluggar i berget.

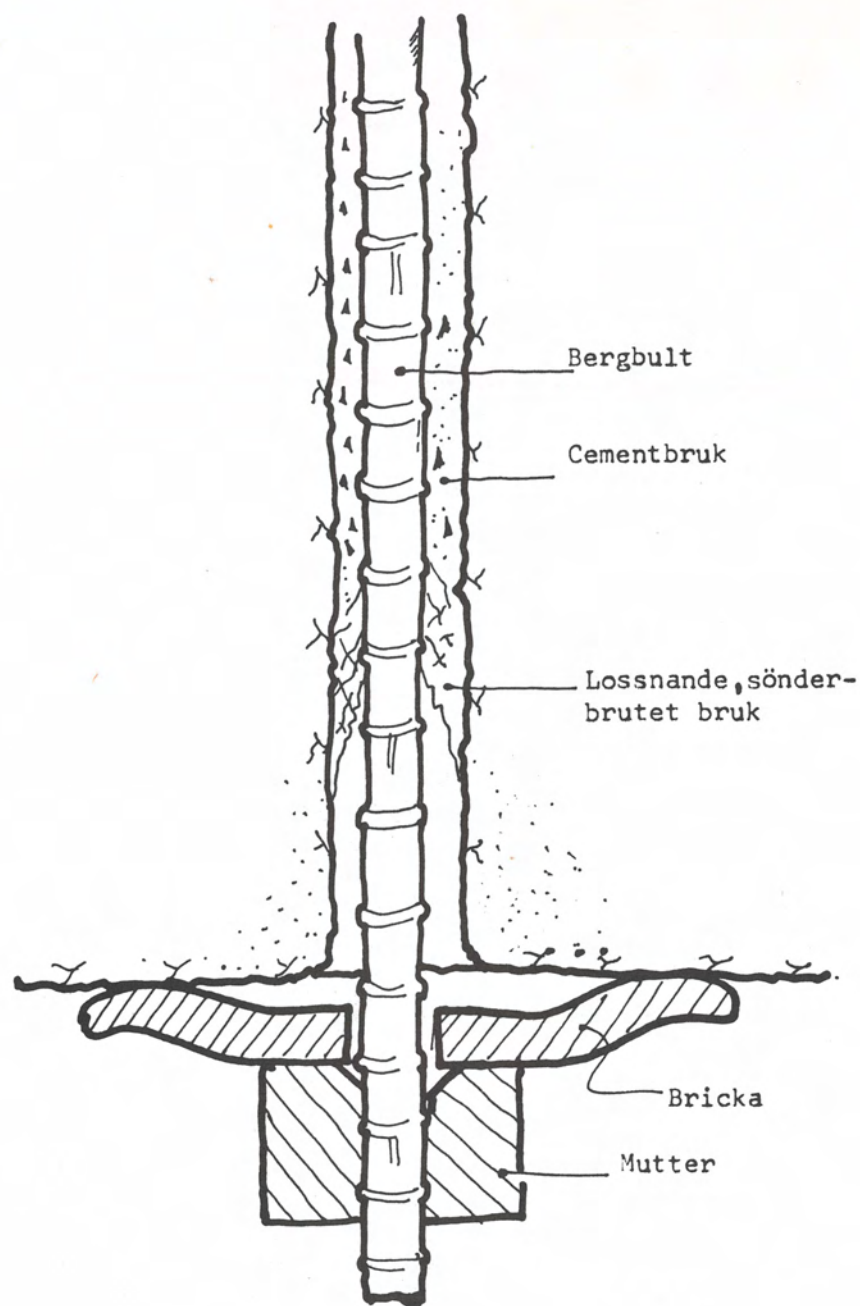


Fig 23 Nedbrytning av ingjutningsbetong kring bergbult på grund av skild värmeledningsförmåga hos bult och berg.

Man måste i dessa fall räkna med att betongen kan ogynnsamt påverkas om den kommer till användning i en varmvattenackumulator. I första hand reduceras betongens styrka. Det viktigaste förhållandet, som påverkar betongens hållfasthet vid upphettning av hårdnande betong till temperaturer mindre än 200 & 250°C är sannolikt betongens vattenhalt och dess ändringar.

Erfarenheter från försök där vattnet kan avdunsta tyder på en tryckhållfasthetsökning vid upphettning, figur 24. Hållfastheterna är bestämda vid provningstemperatur eller vid rumstemperatur efter långsam avkylning. Residualhållfastheten, dvs hållfasthet efter minst 7 dygns lagring efter avkylning, är ofta väsentligt lägre. Fenomenet beror möjligen på själva vattenavgången (torr betong är starkare än vattenmättad) och förekommer företrädesvis i små provkroppar utan nämnvärda värmespänningar. Dessutom synes ökningen vara tillfällig och övergå efter någon månads värmebehandling till en hållfasthetsnedsättning. I en del fall har man genast erhållit en hållfasthetsminskning.

Resultaten antyder att man vid korttidsförsök antingen kan erhålla en hållfasthetsökning på grund av uttorkning eller en hållfasthetsminskning genom sprickbildning. Vid långtidsförsök får man en hållfasthetsminskning på grund av cementets omkristallisation. Draghållfastheten synes alltid minska vid uppvärmning.

Upphettning av hårdnad betong, när vattnet ej kan avdunsta har vid publicerade försök resulterat i en påtaglig hållfasthetsminskning även vid mycket måttliga temperaturhöjningar. Detta antagligen på grund av en snabb omkristallisation av cementmineral, troligen med ett överskott av kalciumhydroxid och försämrade cements egenskaper som följd.

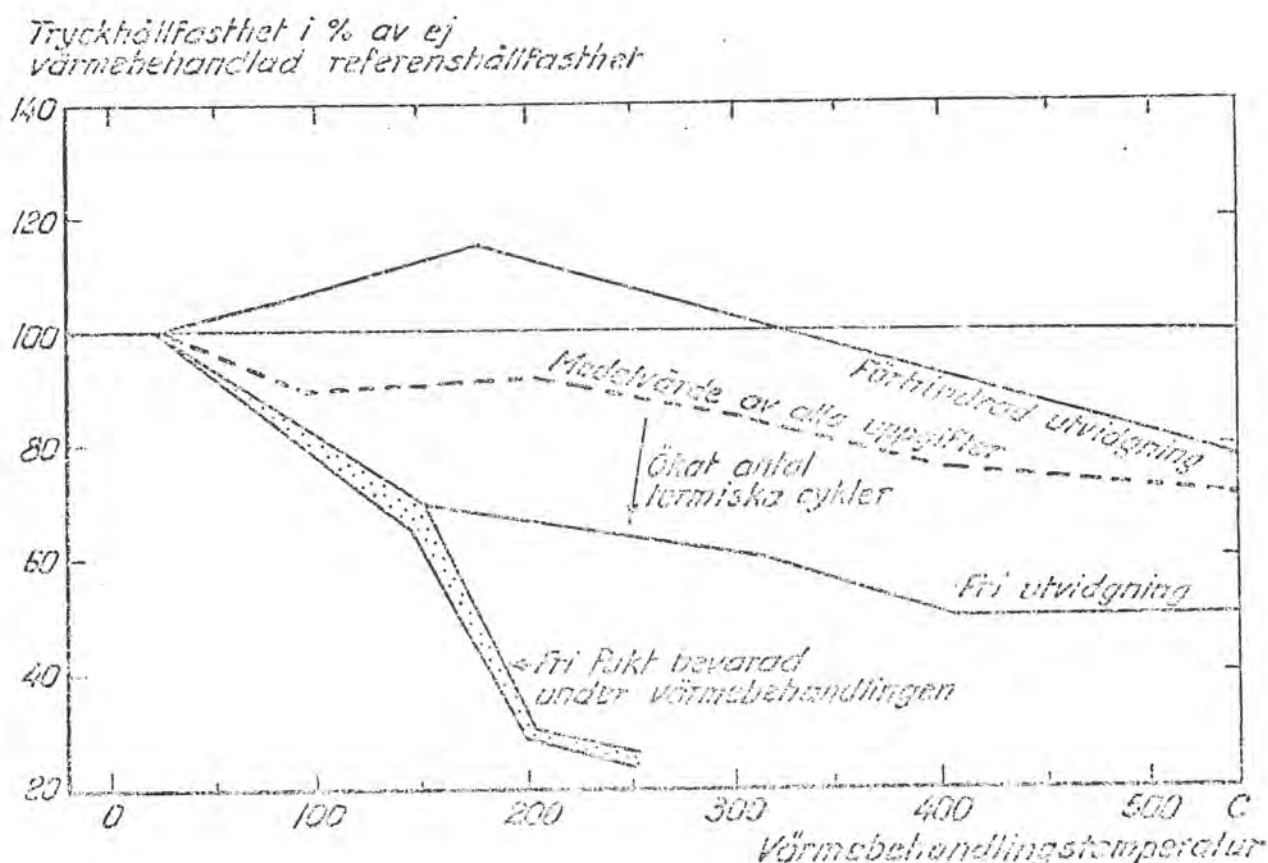


Fig 24 Extremvärden av värmebehandlingens inverkan på betongens tryckhållfasthet enligt ett antal olika forskare. Från LANKARD m fl 1971

Vid förstärkning av bergrum har betongen små möjligheter att torka ut fullständigt under byggnadstiden. Vid idrifttagandet då uppvärmning sker, vandrar fukten mot berget och kan inte komma vidare. Man bör således för hetvattenlager räkna med att det "fuktiga" fallet enligt ovan inträffar oavsett om man täcker betongen med ett vattentätt membran av något slag eller inte.

Det är ej osannolikt, att betongförstärkningar med portlandcement redan efter en ganska kort tids värmebehandling vid ca 150 - 200°C fått en reducerad tryckhållfasthet ändrad till 10 & 20 % av utgångshållfastheten.

Då det saknas underlag för att följa långtidsutvecklingen av dessa försök och då det torde finnas vissa möjligheter att förbättra förhållanden genom olika tillsatser i betongen har begränsade autoklaveringsförsök utförts i laboratorium.

5.7.4 Autoklaveringsförsök med betong

Syftet med undersökningen har varit att

- 1) utvärdera om det föreligger några mera påtagliga skillnader mellan olika cementsorter i hållfasthetsutvecklingen vid lagring i hett vatten, i första hand i temperaturområdet 90 - 165°C, och
- 2) undersöka möjligheter att förbättra hållfasthetsegenskaper vid ovanstående betingelser genom tillsatser av olika slag, eller val av ballastmaterial.

Provningsen har omfattat betong med följande cementsorter:

Limhamn Std
Hälslekis Std
Degerhamn Std
Gullhögen LH
Köping Vulkan (slaggcement)

Ballastmaterialet har varit Stockholmsgrus med en maximal stenstorlek av 16 mm. Cementhalten har varit 300 kg/m³, vattencementtalet har varierat mellan 0,58 och 0,63 och konsistensen mellan skakbordsvärden 44,5 och 46,5 (omkring sättmått 5). Provkroppar har varit kuber med 7 cm kantlängd. Endast tryckhållfasthet har provats. Provningsen har skett vid rumstemperatur, efter det att kuberna svalnat i 24 timmar, varav 23 timmar i (från början varmt) vatten och den sista timmen i luft. Varje provningsen har utförts på 3 prov-

kroppar och anges som medelvärde av dessa.

All värmebehandling har skett genom lagring i hett vatten, 93 resp 134°. Lagring vid 165° pågår. Efter en del förförsök valdes 4 veckor till värmebehandlingstid; underlaget är dock alltför begränsat för att för närvarande säkert kunna avgöra vilken längd på behandlingstiden är lämpligast. Värmelagringen har skett i en betongålder av 4 - 6 månader. Jämförelseproverna har tryckts i en ålder av 5 månader efter en kontinuerlig vattenlagring i rumstemperatur.

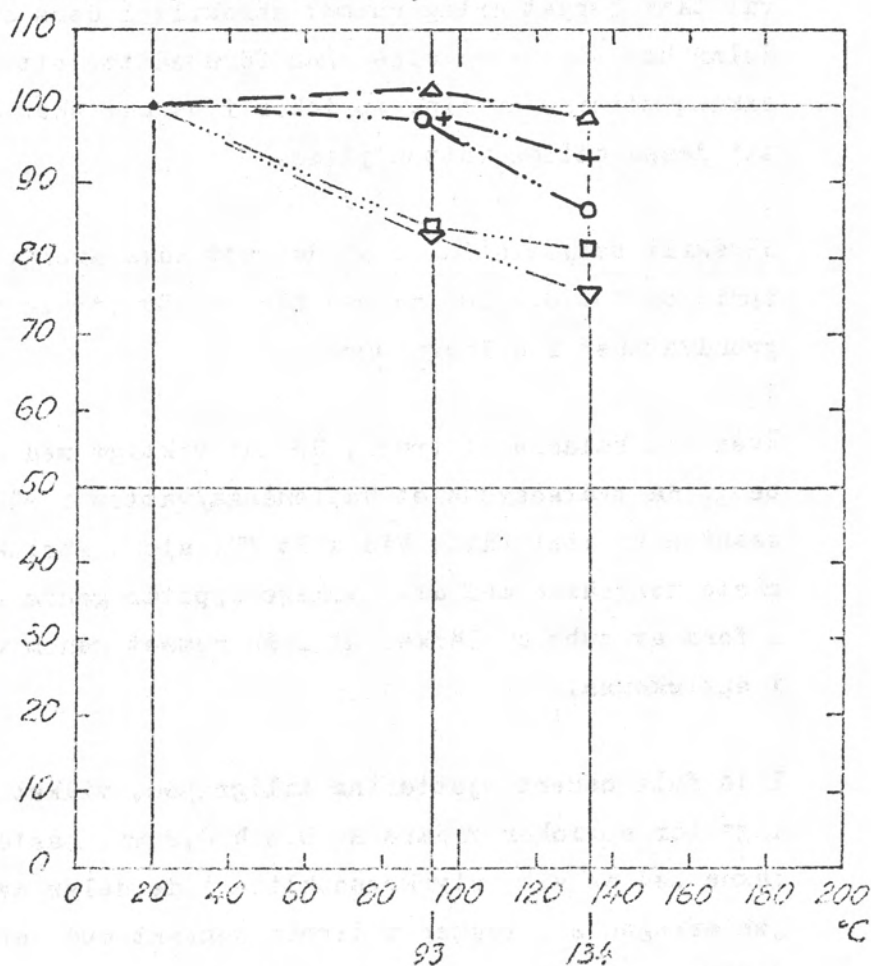
Hittills framkomna resultat av den pågående undersökningen framgår av figur 25. De kan sammanfattas till följande punkter:

- 1) Det förekommer påtagliga olikheter mellan cementsorterna i avseende på värmeresistens.
- 2) Köping Vulkan, som innehåller masugnsslagg, har klarat sig bäst. Detta bekräftar åsikten att inblandning av finkorniga kalkbindande ämnen kan vara en framkomlig väg att förbättra värmeresistensen.
- 3) Det förefaller inte uteslutet, att man genom fortsatt utveckling kan komma fram till en för långvarig vattenlagring vid 100 à 130°C någorlunda resistent betong.

5.7.5 Tätning

Varmvattenlagring i oinklädda bergrum ställer tämligen höga krav på bergmassans täthet, såväl när det gäller inläckning som utläckning av vatten och vattenånga. Genom olika injekteringsåtgärder kan man öka bergmassans täthet. Samtidigt reducerar man rörelsemöjligheterna mellan block i bergmanteln och ökar bergmaterialets deformationsmodul. En negativ konsekvens

Relativ tryckhållfasthet, %



△ Köping Vulfen

+ Limhamn Stå

○ Gullbögen LH

□ Degerhamn Stå

▽ Hållands Stå

Fig 25 Relativ tryckhållfasthet hos betong tillverkad med olika cementsorter efter fyra veckors lagring i hett vatten

härav är att man måste räkna med större tryckpåkänningar vid uppvärmning av det injekterade berget.

Detta kan vara problematiskt, då möjligheterna att väl täta berget kring rummet särskilt i dess övre delar har stor betydelse. Man förutsätter att huvudsaklig tätning av fina sprickor i berget sker genom att dessa hålles vattenfyllda.

Särskilt betydelsefullt är det att täta även fina sprickor ($< 0,2$ mm) om man får ett övertryck vs grundvattnet i anläggningen.

Även vid balanserat tryck, är det viktigt med ett tätt berg, då tvåfasssystemet vattenånga/vatten i många avseenden är instabilt. Vid allt för stora sprickor måste man räkna med att läckage uppstår genom att ånga i form av bubblor läcker ut från rummet genom vattnet i sprickorna.

I de fall cementinjektering tillgripes, vilket är troligt för sprickor vidare än 0,3 à 0,2 mm, måste man räkna med en viss styrkereduktion i de delar av injekteringen som kommer i direkt kontakt med det heta vattnet. Då detta ej kommer att cirkulera i berget kommer troligen endast cement i sprickmynningar att uppluckras, vilket väl bör kunna fördras.

5.7.6 Tätning med plast och plastbe lag

För skydd och tätning i form av beslag på gjutna eller sprutade betongkonstruktioner eller vid tätning av fina sprickor kan man tänka sig använda olika plaster. Endast ett fåtal plastsorter är tänkbara. Upp till 125°C är det idag möjligt att använda plaster, som man tror är åldringsbeständiga. När det gäller högre temperaturer är "plast lining", plastbetong och injektering med plast en öppen fråga.

6. PÅGÅENDE OCH FORTSATTA UNDERSÖKNINGAR

Bakgrund

Ursprungligen baserade sig forskningsprojektet på att man tämligen direkt skulle utföra ett storskaligt fältförsök (byggande av litet bergrum med 100 - 300 m³ volym). Tämligen snart fann man ett fältförsök med en så liten rumsvolym tveksamt, då vissa negativa effekter av hetvattenlagringen, såsom tryckbrott i berget m m ej skulle komma till tydligt uttryck. Vissa andra väsentliga faktorer, såsom förstärkningsåtgärder, ev löslighet och vittring, värmespridning och läckage torde dock gå utmärkt att studera i en dylik försöksanläggning.

Då kostnaderna för en stor försöksanläggning i fält är avsevärda, har olika andra vägar prövats i syfte att förhoppningsvis ge tillräckligt underlag för direkt byggande av en mindre hetvattenackumulator, som sedan kan studeras genom uppföljande mätningar i fält.

De problem som man i första hand via experiment vill studera är:

- . temperaturspridning kring ett hålrum i sprickigt hårt berg. Jämförelse med teoretiska beräkningar
- . stabilitetseffekter på grund av temperaturspänningar. Storleksordning av deformationer
- . inverkan av varmt vatten på betong
- . vittring och mikrosprickbildning i bergyta -
- omfattning av utlösning av bergartsmaterial
- . studium av lerzoners förändringar
- . tättningsmetoder, främst belag av olika slag och i första hand utförda med plast.

För oinklädda rum spelar stabilitetsfrågorna en avgörande roll för frågan huruvida man kan åstadkomma driftsäkra varmvattenlager i berg. Den svårbedömda huvudfrågan är här i vilken grad teorierna återspeglar de verkliga förhållandena.

Tre pilotförsök utföres därför f n (. nov -74) i syfte att belysa ovannämnda frågeställningar samt utveckla lämplig mätmetodik.

Fältförsök 1

Mätning av temperaturfördelning och rörelser i takparti i ett oljelager. Detaljer i denna undersökning framgår av utredning nr 6 enl avsnitt 8.

Fältförsök 2

Jämförande studier av beräknade och uppmätta värme- och spänningsförhållanden under väldefinierade förhållanden i ett fältförsök med ett mindre hålrum i berg. Registrering av utlösta produkter och förändringar i bergytan. Utprovning av lämpliga mät- och registreringsmetoder för fältförsök i stor skala och i verkliga varmvattenackumulatorer. Beträffande detaljer hänvisas till utredning nr 7 angiven i kap 8.

Fältförsök 3 (4) - ingår i etapp I

Studium av resistens mot varmvatten hos olika sorters betong. Betong har betydelse på flera olika sätt när det gäller varmvattenackumulatorer dels för vissa konstruktioner i nakna rum, men är även tänkbart som inklädnad i rum och för ovanjordsbehållare. Studien omfattar autoklaveringsförsök. Detaljer återfinnes i utredning 4 under avsnitt 8.

7. Sammanfattning för Byggforskningen

Bergtekniska konsekvenser av att lagra varmt vatten i oinklädda bergrum har inventerats och analyserats.

Lagring av uppvärmt vatten i oinklädda bergrum bedöms vara tekniskt och ekonomiskt attraktivt men föga studerat för att tillgodogöra sig överskottsenergi vid kraftproduktion.

Dylik lagring innebär dock bergtekniska problem och svårigheter då varmvattenlagringen kommer att inverka på bergrummets stabilitet, på mineral- och bergarters löslighet och lagringsvattnets kvalitet samt på förstärknings- och tätningsåtgärder. De bergtekniska konsekvenserna av lagringen inom nämnda områden har översiktligt inventerats och analyserats bl a med hjälp av begränsade laboratorieprov och datorberäkningar.

Undersökningen antyder att man ofta kan förvänta tämligen gynnsamma värmeisoleringsförhållanden åtföljda av svårbedömda bergstabilitetsproblem på grund av temperaturspänningar. Bergarternas ökade löslighet kan medföra smärre driftsstörningar på grund av avsättning i rörsystem o dyl. Likaså kan det varma vattnet ev reducera hållfastheten hos betongkonstruktioner. Inverkan på omgivningen torde i de flesta fall kunna tolereras.

Bakgrund

Behovet av energi varierar under dygnet (veckan, månaden o s v) på annat sätt än produktionen. Skillnaden i producerad och förbrukad energi kan lagras i form av värme i en hetvattenackumulator. Dylika energilagringmetoder behöver man t ex vid värmeverk, kraftvärmeverk (olja- eller kärnenergi), där man ju inte ekonomiskt kan variera produktion efter belastningsvariationerna. Idag sker sådan utjämning eller ackumulering ofta i värmeisolerade stålbehållare ovan jord. I och med att erforderliga ackumulatorvolymer ökar upp till 10-40.000 m³ är denna lösning ej längre tilltalande. Tanken har då uppkommit att förlägga ackumulatorerna i berg. Energiackumulering i form av hetvatten lagrat i oinklädda bergrum är idag en föga känd teknik, som dock bedöms vara ekonomiskt/tekniskt attraktiv, då bergackumulatorer förefaller kunna erbjuda tämligen väl isolerade och priskonkurrerande stora lagringsvolymer. Bergackumulatören uppvärms resp

avkyles beroende på om värmebehovet utifrån underskrider resp överskrider verkets kapacitet. Principen framgår av figur 1. Uppvärmningen av vattnet kan antingen ske med värmeenergi (från en panna eller turbin) eller med elenergi.

Arbetstemperaturen hos lagringsvattnet kan för olika tänkbara ackumulatoranvändningar komma att ligga mellan $80 - 160^{\circ}\text{C}$ och med ca 50° variationsområde, vilket innebär att det inre ång- och vattentrycket kan variera mellan $0 - 0,6\text{ MPa}$. På längre sikt kan temperaturer upp till 220°C vara intressanta.

Lagring av varmt vatten under tryck i bergrum berör en rad mycket komplicerade och i flera fall litet kända bergtekniska problemområden. Att hetvattenlagring medför problem är man klar över. Historiskt sett är ju tillförsel av värme till berget det sätt på vilket man genom tillmakning brutit sönder berget i forna tider. Å andra sidan tyder erfarenheter av lågtemperaturlagring och överslagsberäkningar på att lagring bör kunna ske upp till vissa gränser - beroende helt på de lokalt rådande bergtekniska förhållandena - med begränsade skador i ytligaste berget närmast rummet.

Då de bergtekniska konsekvenserna av hetvattenlagring ej tidigare systematiskt utretts krävs omfattande utrednings- och försöksarbete innan man kan konstruera en hetvattenackumulator i berg. Relevanta erfarenheter i litteraturen från analoga problemområden är mycket sparsamt förekommande och några mer omfattande direkta uppgifter rörande olika bergtekniska effekter när varma media förvarats i stora bergrum har ej påträffats.

Avsikt

Forskningsprojektets syfte är att ge orienterande bergtekniskt underlag för utformning och konstruktion av en hetvattenackumulator i berg.

Utredningsarbetet kan naturligt indelas i tre etapper, nämligen:

- Etapp I - Inventering och analys av bergtekniska problem och svårigheter, som kan uppstå vid lagring av varmvatten i berg

Etapp II - Försök i laboratorium och fält för att belysa vissa nyckelfrågor

Etapp III - Fältförsök i stor skala alternativt omfattande mätningar i en mindre hetvattenackumulator.

Föreliggande rapport behandlar Etapp I. På grund av att projektet aktualiserar så många olika typer av bergtekniska problem med ett komplicerat mönster av kopplingar och samband med varandra, har det varit nödvändigt att ge Etapp I en översiktlig och omfattande utformning. Syftet har varit att belysa omfattningen av de svårigheter man kan stöta på samt att söka påvisa vilka problem som intar väsentliga "nyckelpositioner" i problemkomplexet.

Genomförandet

Arbetet har omfattat sammanställning av litteraturuppgifter och praktiska erfarenheter samt problemanalys och laboratorieprovningar. Flera av nedannämnda huvudområden har bearbetats i form av särskilda expertutredningar.

De bergtekniska problem, som bedömts vara av vikt vid lagring av varmt vatten med varierande temperatur i bergrum, kan sammanfattas i följande huvudrubriker:

- Värmetekniska förhållanden i berg
- Fysikaliska-mekaniska effekter med åtföljande instabilitet i berget på grund av varmt vatten, övertryck samt hög och varierad temperatur
- Förändringar av kemisk natur hos berget kring lagringsrummet och lagringsvattnet
- Effekter av hetvattenlagring på bergmassan och grundvatten i bergrummets omgivning
- Möjligheter att förstärka berget resp förhindra "kemiska" effekter vid hetvattenlagring

Temperatur- och spänningsförhållandena i berget kring hetvattenackumulatören har studerats och utvärderats medelst smärre datorberäkningar. Stabilitetsproblem på grund av temperatur har även studerats genom en dokumentär fältuppföljning av ras i ett oljelager fyllt med varm olja.

I ett senare försöksskede kommer ovan nämnda teoretiskt beräknade värden att jämföras med i fält uppmätta temperaturer och spänningsändringar dels från försök vid ett oljelager, dels från försök med ett varmvattenfyllt grovt borrhål.

Förändringar av kemisk natur hos berget och lagringsvattnet på grund av varmvatten har utvärderats utifrån dels en omfattande genomgång av litteratur, dels smärre laboratorieförsök. Granitstycken resp lerprov av svällande lera har autoklaverats under olika kemiska betingelser. Likaså har laboratorieprov i autoklav företagits med betongprover av olika sammansättning för studium av betongens styckereduktion vid varmvattenexponering.

Resultat

Resultaten har utvärderats och redovisats med utgångspunkt från en mindre hetvattenackumulator i berg enl figur 1 och de bergtekniska konsekvenserna av en dylik lagring.

Av värmeberäkningarna framgår att det kan krävas upp till 10 år att nå stationära värmeförhållanden. Huvuddelen av uppvärmningen sker dock under det första året se figur 2. Efter uppvärmningsperioden torde värmeförlusterna kunna vara ca 5 - 10 % av tillförd värme.

Temperaturfördelningen i berget kommer att bestämma spänningsförhållandena i berget kring rummet, då termospänningarna dominerar spänningsbilden. Den tänkta uppvärmningen till ca 100 - 150° C medför sannolikt avsevärda temperaturpåkänningar, figur 3, och i ogynnsamma fall måste man räkna med risk för avskalning av ytberget och olika smällbergsfenomen.

Det bör observeras att spänningskurvan i figur 3 innehåller stora osäkerheter beroende på bristande erfarenheter beträffande ingångsparametrarnas representativitet för så stora bergmassor som är aktuella.

Den varierande temperaturen hos lagringsvattnet medför särskilt svårbedömda bergproblem. Man måste troligen, även i hårt svenskt berg, beakta olika relaxationseffekter, vilka kan leda till dragpåkänningar vid en ev avkylning, varvid sprickor i berget öppnar sig och block kan rasa ned.

Vid hetvattenlagring ändras också radikalt det naturliga kemiska jämviktstillstånd som tidigare rått, genom att temperatur och

tryck ökas. Härigenom kan bergartsmineralen i berget närmast rummet och lagringsvattnet kemiskt påverkas. För de flesta bergartsbildande mineral, med undantag för karbonatföreningar, ökar lösligheten med ökat tryck och ökad temperatur. Den förändrade kemiska sammansättningen hos lagringsvattnet har betydelse då kvalitetskraven på vattnet är stora.

Gissningsvis är dock utlösningseffekterna av godartad natur, men vissa yttringar t ex utfällning av karbonater och ev silikater i rörsystem och värmeväxlar bedöms allvarligt kunna störa driftssäkerheten.

För lerzoner i berget torde den pulserade mekaniska påkänningen kunna leda till stabilitetsproblem. Däremot torde gissningsvis varmvattnet inom aktuella temperaturområden ej direkt aktivera svällande leror.

Bergförstärkningsåtgärderna i ett hetvattenlager kräver speciell omtanke både när det gäller belastningsbedömningar och utformning av förstärkning. Man måste sålunda t ex räkna med att ingjutningsbetong kring bultar kan brytas ned och att hållfastheten hos betong avsevärt kan reduceras.

Vid temperaturer på lagringsvattnet över 100°C är det viktigt - trots att man förutsätter balans mellan yttre grundvattentryck och inre gastryck - med ett tätt berg, då systemet vattenånga/vatten i många fall kan vara instabilt, bl a genom att ångbubblor kan läcka ut från rummet genom vattenfyllda bergsprickor.

Inverkan på omgivande bergmassor och grundvatten i form av in- och utläckning, strömning- och ångbildning i grundvattnet och förändring i markstrukturen ovan lagret m m bedöms ej påverka omgivningen i större omfattning än vad som normalt kan accepteras.

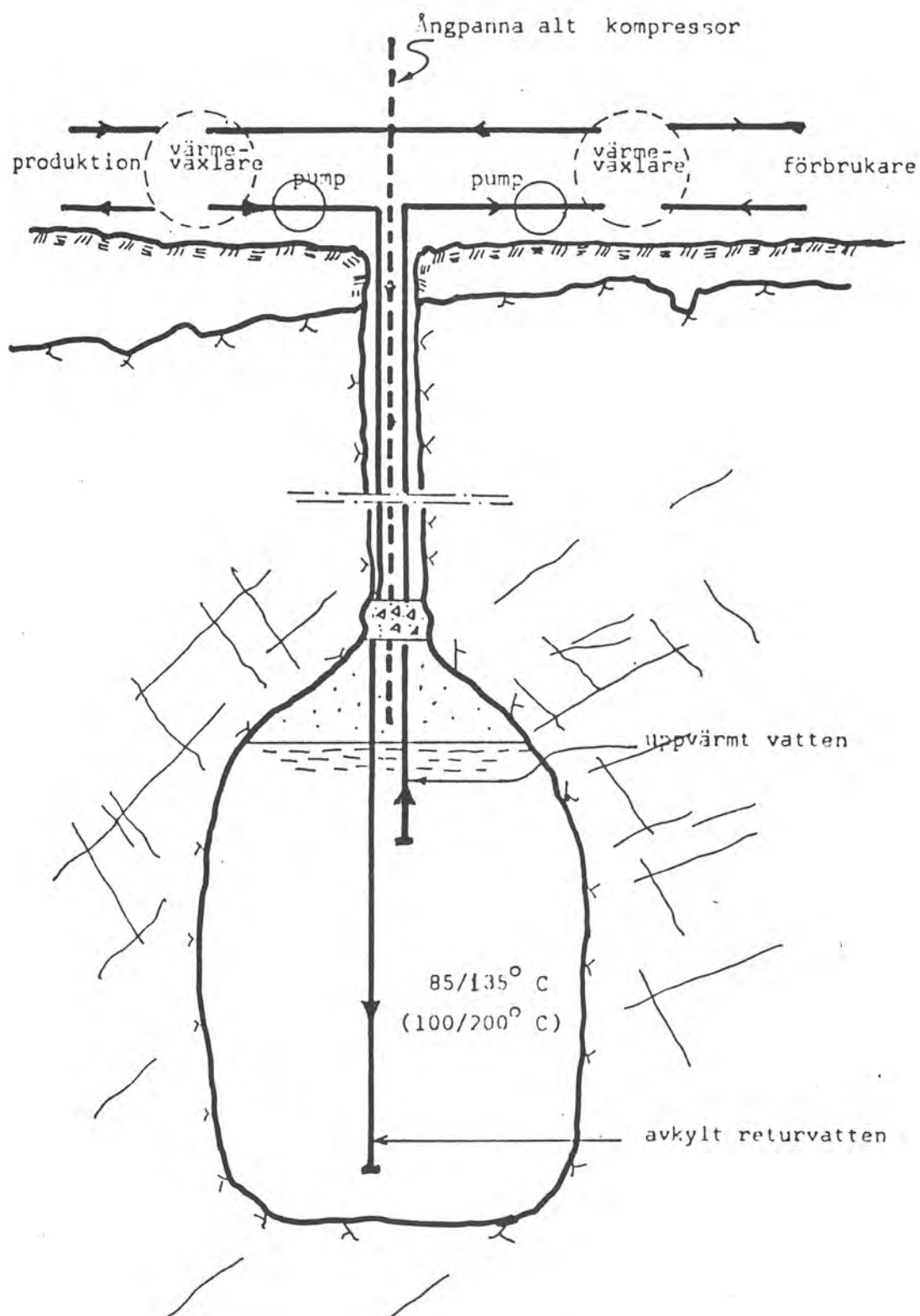


Fig 1 Princip för hetvattenackumulator
Cavern in rock for storage of hot water

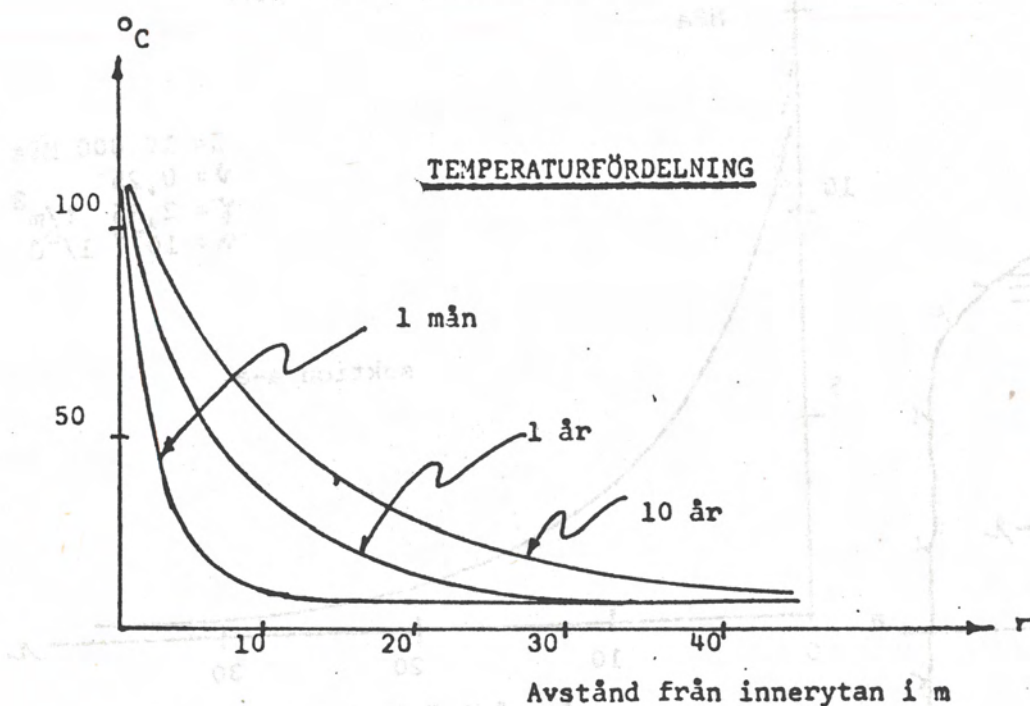


Fig 2 Temperaturfördelning i berget efter olika långa uppvärmningstider

Distribution of temperature in the rock mass as a function of heatingtime

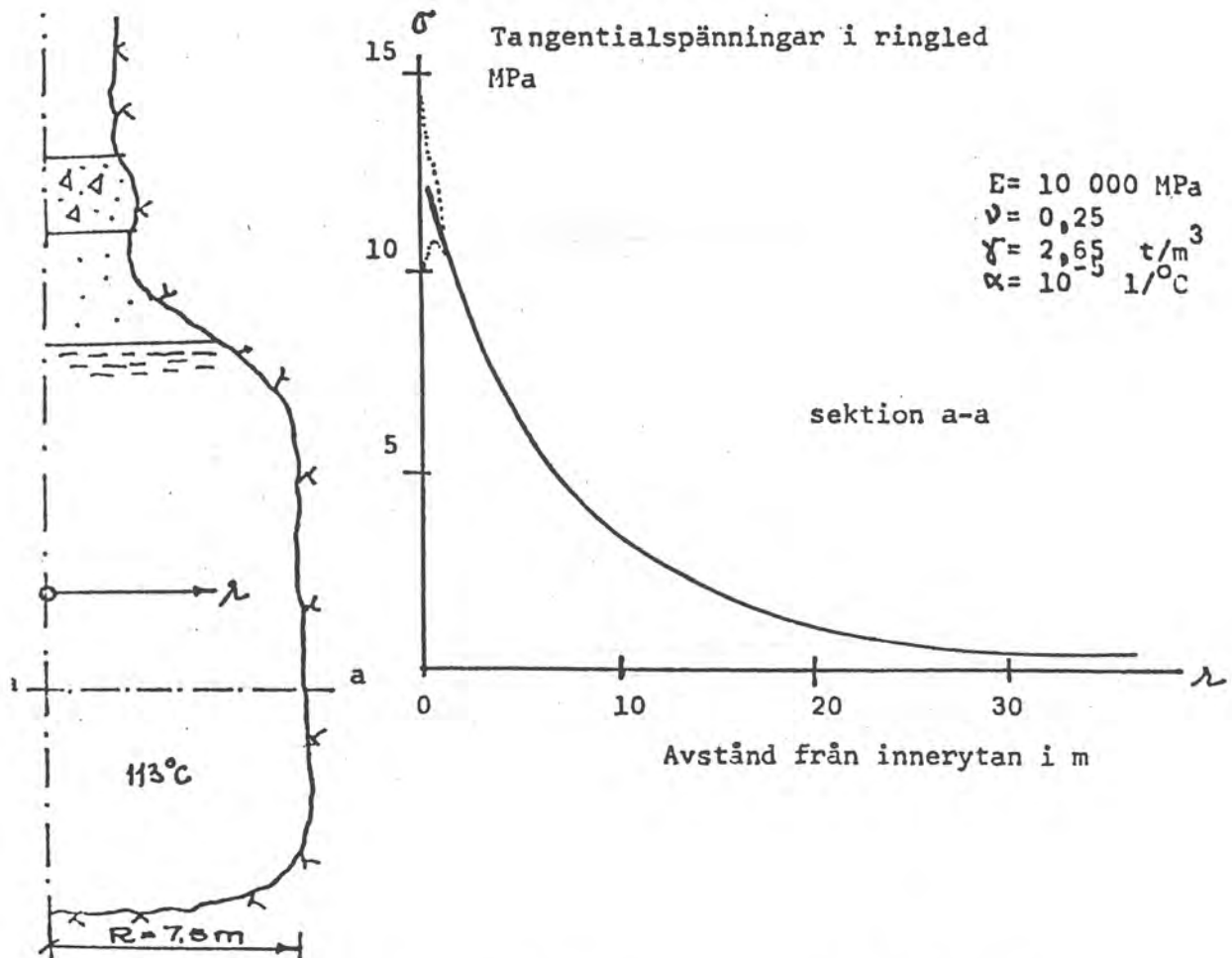


Fig 3 . Tangentialspänningar i ringled i berget kring varmvattenackumulatorn orsakade av bergets uppvärmning.

Tangential stresses in the rock mass around a circular opening filled with hot water.

8. UTFÖRDA UTREDNINGAR OCH LITTERATURFÖRTECKNING

Nedan redovisade utredningar finns tillgängliga hos Stiftelsen bergteknisk forskning - BeFo.

I litteraturförteckningen har endast medtagits sådana referenser, som direkt anknyter till rapporttexten.

UTREDNINGAR

1. VBB, "Temperaturfördelning, ångdom, pumpar, för-läggningsdjup samt spänningsberäkning m m för hetvattenackumulator i berg".
Stencilrapport 1973.04.25.
2. CTH/institutionen för geologi (H Bernhardsson)
"Litteraturundersökning av bergarternas hållfasthet och löslighet vid lagring av hetvatten i berggrum".
Stencilrapport 1973, april.
3. Statens Vattenfallsverk (J Martna) "Inverkan av hetvattenlagring på betongens tryckhållfasthet".
Stencilrapport 1973.12.21.
4. VBB (H Fagerström, O Ziemilis) "Inverkan av hetvatten på lerzoner i berg".
Stencilrapport 1974.01.29.
5. Hagoconsult AB, "Dokumentation av bergras i Fittja".
Stencilrapport 1974.02.05.
6. BeFo (T Hansson, S Bjurström) "Program för mätning av temperatur och spänningar vid Marvikens oljelager".
Stencil 1973, maj.

7. VBB (R Lindskog/A Göransson) "Program för förförsök betr varmvattentransport i berg-tunnlar".
Stencil 1973.07.25.

LITTERATUR

Allmän

8. Skånska Cementgjuteriet AB:
"Västerås Kraftvärmeverk, värmelager i berg"
Utredning för 100 m³ provanläggning 1970.12.18.
9. Skånska Cementgjuteriet AB:
"Bergrum för lagring av vatten med hög temperatur"
Utredning för forskningsprojekt 1970.12.30.
10. Statens Vattenfallsverk:
"Utveckling av värmeackumulatorer"
Nulägesrapport; 1970
11. VBB/Statens Vattenfallsverk:
"Värmeackumulator i berg"
Utredningsförslag till 4 000 m³ värmeackumulator
i Järfälla, 1971.
12. AB Atomenergi:
"Värmelagringskraftverket. Kostnadskalkyl över
plåtbehållaren och hjälpsystemen i bergrummet
samt kommentar till reglersystem".
Margen 1972.02.17.
13. AB Atomenergi:
"Thermal Energy storage in rock Chambers - a
complement to nuclear power"
Margen

14. Stockholms Elverk/B Oknemark:

Program för fullskaleprov med lagring och
transport av varmvatten i öppna bergtunnlar
1972.07.20

15. T Lindbo, Statens Vattenfallsverk

"Lagring av värme i bergackumulackumulator utnyttjar
kärnkraftverks överskott"
Byggnadsindustrin nr 5 1970

16. BeFo:

"Bibliography on influens of temperature on
Rock Stability in underground openings"
Litteratursammanställning utförd av Rock
Mechanics Information Service, Imperial
College LONDON; 1972

Mekaniska effekter av hetvattenlagring i berg

Brace, W F, Paulding, Jr. B W och Scholz, C, 1966,
Dilatancy in the Fracture of Crystalline Rocks.
Journ. of Geophys. Res. Vol. 71, Nr 16, 1966,
3939 - 3953

Godstein, L och Post, B, 1969, Thermal Expansion
Coefficients of Ruby Mica Journ. of Appl. Phys.
USA, Vol. 40, nr 7, 1969, 3056-3057

Linde A H, "Krypegenskaper hos malm och bergarter"
IVA-rapp., bergmekanikkommittén, 1967

Perami, R, 1971, Formation des microfissures dans
les roches sous l'effet de variations homogènes de
température. Symposium Soc. Internat. Mécanique
des Roches, Nancy 1971

Scholz, C H, 1968, Experimental Study of the Fracturing Process in Brittle Rock
Journ. of Geophys. Res. Vol 73, Nr 4, 1968,
1447-1454

Scholz, C H, 1968, Microfracturing and the Inelastic Deformation of Rock in Compression
Journ. of Geophys. Res. Vol 73, Nr 4, 1968,
1417-1446

Förändringar av kemisk natur hos berg och lagringsvatten

Birch, F, Schaller, J F och Spicer, H C, 1942,
Handbook of Physical Constants Geological Society
of America Special Papers, Nr 36, 1942

Clark, Jr. S P, 1966, Handbook of Physical Constants,
Geological Society of America, Memoir 97, 1966

Ellis, A J, 1959, The Solubility of Calcite in Carbon Dioxide Solutions Am. Journ. of Science. 1959, Vol. 257, 354-365

Galinker, I S, och Gavrish, M L, 1960, Solubility of Hydroxides of Alkaline-Earth Metals at High Temperatures. Russian J. of Phys. Chemistry, Vol. 34, nr 11, sid 1230-

Hömig, H E, 1959, Physikochemische Grundlagen der Speisewasserchemie, Vereinigung der Grosskesselbesitzer e.V.

KTH/institutionen för mineralberedning "Mineralbildande substansers löslighet inom temperaturområdet 100-300°C", stencilerad rapport, 25 ref.

Miller, J P, 1952, A Portion of the System Calcium Carbonate-Carbon Dioxide-Water, With Geological Implications. *Am. Journ. of Science*, 1952, Vol. 250, 161-203.

Shima, M, 1959, On the Weathering of Rocks and Rock-forming Minerals *Sci. Papers Inst. Phys. Chem. Res. Jap*, 1959, Vol. 53, nr 1502-1511, sid 74-81

Inverkan av hetvatten på lerzoner i berg

Brekke, T.L. och Olsen Selmer, R., 1965. Stability problems in underground constructions caused by montmorillonite-carrying joints and faults. *Eng. Geol.* vol. 1, No. 1.

Fenner, C.N., 1916. Bore Hole investigations in Yellowstone Park. *J. Geology*, vol. 44 (p. 225-315).

Grim, R.E., 1953. Clay mineralogy, McGraw-Hill, New York.

Laguros, J.G., (1969): "Effect of temperature on some engineering properties of clay soils". Highway Research Board. Special report No. 103.

Rokoengen, Kåre, (1973): "Svelleegenskaper hos leirsoner i fjell". Geologisk Institut, Norges Tekniske Høgskole, Trondheim.

Effekter av hetvattenlagring på grundvatten och omgivande berg

Barton N, "A model study of air-transport from undergrounds openings situated below ground water level". *Konf. Bergmekanikk*, Oslo, 1972.

Di Biagio E och Myrvoll F, "Insitu tests for predicting the air and water permeability of rock masses adjacent to underground openings".
Konf. Bergmekanikk, Oslo, 1972.

Bergförstärkning och tätning

Lankard, D R, Birkimer, D L, Fondriest, F F and Snyder, M J: Effects of moisture content on the structural properties of portland cement concrete exposed to temperatures up to 500 F. - Temperature and concrete, American Concrete Institute, Special Publication No 25, pp. 59-102. Detroit.
(Med 25 litteratur-referencer)

Statens Vattenfallsverk/J Martna:

Synpunkter på portlandcementbetongens hållfasthet vid uppvärmning till maximalt 250°C.
1972.10.06.

Statens Vattenfallsverk/J Martna:

"Heat resistance of concrete subject to lasting temperatures of 300 - 350°C"
Litteratursummering fram till 1964.