

SKBF
KBS

TEKNISK
RAPPORT

79-03

**Bergmekanisk bedömning av
temperaturbelastning vid slutförvaring av
radioaktivt avfall i berg**

Ove Stephansson
Bengt Leijon

Högskolan i Luleå 1979-01-10

SKB
KBS

TECHNICAL
REPORT

79-03

**Bergmekanisk bedömning av
temperaturbelastning vid slutförvaring av
radioaktivt avfall i berg**

Ove Stephansson
Bengt Leijon

Högskolan i Luleå 1979-01-10

BERGMEKANISK BEDÖMNING AV TEMPERATURBELASTNING
VID SLUTFÖRVARING AV RADIOAKTIVT AVFALL I BERG

Ove Stephansson
Bengt Leijon

Högskolan i Luleå 1979-01-10

Denna rapport utgör redovisning av ett arbete som utförts på uppdrag av SKBF projekt KBS. Slutsatser och värderingar i rapporten är författarens och behöver inte nödvändigtvis sammanfalla med uppdragsgivarens.

I slutet av rapporten har bifogats en förteckning över av SKBF projekt KBS hittills publicerade tekniska rapporter i denna serie.

1979-01-10

BERGMEKANISK BEDÖMNING AV TEMPERATURBELASTNING VID SLUT-
FÖRVARING AV RADIOAKTIVT AVFALL I BERG

TEMPERATURE LOADING AND ROCK MECHANICS AT FINAL STORAGE OF
RADIOACTIVE WASTE

Ove Stephansson
Bengt Leijon

Avdelningen för bergmekanik
Högskolan i Luleå

951 87 LULEÅ

	INNEHÅLL	Sid
	SUMMARY	1
	SAMMANFATTNING	3
	INTRODUKTION	4
1	SPÄNNINGAR I BERGGRUNDEN	5
2	ALLMÄNNA SYNPUNKTER PÅ TERMOSPÄNNINGAR I BERG	14
3	BERÄKNADE TERMOSPÄNNINGAR FÖR SLUTFÖRVAR	17
3.1	Spänningar kring envånings slutförvar	17
3.2	Spänningar kring sfäriskt slutförvar	19
3.3	Spänningar kring slutförvar i två våningar	19
4	BERGMEKANISK BEDÖMNING AV SLUTFÖRVAR I TVÅ VÅNINGAR	24
4.1	Bedömning av avståndet mellan tunnelplanen	24
4.2	Bedömning med hänsyn till bergspänningarna	27
5	REFERENSER	33

SUMMARY

This report describes the rock mechanical effects - in the far field - from the thermal loading at a final storage of radioactive waste in crystalline rocks. The stress distribution of a two-storey storage is described in more details.

The temperature rise in a final storage of radioactive waste will create thermal stresses which may cause a failure of the rock mass, and thereby an increase of its permeability. However, the state of stress in the Earth's crust is able to neutralize the thermal stresses.

In Chapter 1 the various stresses which can appear in the upper part of the Earth's crust are summarized. The thermal stresses are added to the virgin stresses to give what we call the absolute stresses, Fig 1. Our present knowledge of the virgin stresses from rock stress measurements is reviewed, Figs 2 and 4, and the orientation of the principal stresses is presented in accordance with the classification of faults, Fig 3. We have adopted the results of Jamison and Cook [2] where a plot of half the maximum stress difference against half the sum of the maximum and minimum principal stresses show a linear regression line, corresponding to the coefficient of sliding friction, Fig 5. From the diagram it appears that the state of stress in the upper part of the Earth's crust may be determined largely by the frictional resistance to sliding between surfaces of constituent blocks in the rock mass.

In Chapter 2 we present some general viewpoints on thermal stresses in rocks, and we like to mention the results from the pilot heater test at the Stripa Mine where the measured stresses in the vicinity of a heater is about 20-80 % of the calculated stresses, which again indicates that the response of the rock mass to thermal loads is determined by frictional sliding between surfaces of constituent blocks, cf Fig 6.

The far field thermal stress calculations for flat and spherical geometry of the storage are presented in Chapter 3. The stress distribution of a two-storey storage with axi-symmetrical geometry is presented in Figs 8 and 9. The distance between the storeys is 60 m, the depth is 500 m and the time after deposition is 460 years. The maximum stresses appear along the centre line of the storage and tensile stresses of about 5 MPa are found at the surface.

The distance of 60 m between each storey is found to be enough with respect to the secondary stress field surrounding each tunnel and the maximum area of loose rocks around a tunnel after a total collapse. This is shown in Fig 11 of Chapter 4. If we superimpose the thermal stresses from the two-storey storage to the virgin stresses as found from rock stress measurements, the rock mass will fail due to tensile stresses or stress differences larger than the frictional resistance between surfaces of blocks, Fig 12. However, if we choose a state of stress which has been found for the Scandinavian platform, Fig 13, and superimpose the thermal stresses we obtain the absolute stresses, curve 2, which are in most parts below the limit of frictional resistance due to sliding as demonstrated in Fig 14. If the horizontal compressive stresses at the rock surface are equal to the tensile stress due to heating at the surface, no part of curve 2 will be above the line $\mu = 0.53$, curve 3, of Fig 14.

By this analysis we have been able to demonstrate that the thermal stresses due to heat conduction from the final storage are compensated by the state of stress in the upper part of the crust. The absolute stress, which is the superposition of thermal stress and virgin rock stress, is in all cases found to be below the limit of failure due to frictional resistance between surfaces of constituent blocks in the rock mass. Failure by sliding friction is the most conservative failure criterion for a rock mass.

SAMMANFATTNING

I föreliggande rapport behandlas de bergmekaniska effekterna av den globala, termiska belastningen kring ett slutförvar för radioaktivt avfall. Vidare ges en bergmekanisk bedömning av spänningarna hos ett slutförvar i två våningar.

Temperaturförhöjningen runt ett slutförvar i berg kan beräknas under antagande att berget utgör ett kontinuerligt, isotropt medium med volymsberoende materialparametrar. Vid undersökningar av de termiskt inducerade spänningarna och deras effekter kring förvaret är ett sådant betraktelsesätt inte korrekt eftersom vi från fältförsök vet att bergmassans reaktion på uppvärmning kännetecknas av ett diskontinuerligt beteende med deformationer längs befintliga svagheter. Deformationerna, som kan alstras av dragspänningar eller av stora deviatorspänningar, har betydelse för bergmassans permeabilitet. Spänningstillstånd som kan leda till ändrad permeabilitet återfinns bl a i zoner med höga temperaturgradienter.

Det regionala, primära spänningstillståndet är av stor betydelse för slutförvarets placering. I rapporten visas hur spänningssituationen i jordskorpan övre delar kan inordnas i gällande system för klassificering av förkastningar med hänsyn till rådande spänningstillstånd. Vidare hur spänningstillståndet i jordskorpan övre delar bestäms av friktionsmotståndet mot glidning mellan blocken.

Genom en superponering av spänningarna från temperaturbelastningen och bergspänningarna enligt en modell där horisontalspänningarna dominerar till 1000 m djup, kan vi visa att man uppnår god säkerhet mot brott i existerande sprickor. Typ och orientering hos sprickor och svaghetszoner behandlas och där finner vi att branta strukturer i kombination med horisontella bergspänningar är en gynnsam situation.

För slutförvar i två våningar har vi funnit att det vertikala avståndet mellan deponeringsnivåerna av stabilitetsskäl inte bör understiga 60 m.

INTRODUKTION

Vid KBS-gruppens projektgenomgång i Forsmark 1978-10-19 påtalades de ofullständiga kunskaperna om termospänningarnas uppträdande i global skala kring ett slutförvar för förglasat avfall/ använt bränsle. Avdelningen för bergmekanik, Högskolan i Luleå, fick därför i uppdrag att kortfattat sammanställa några synpunkter på problemet inför det fortsatta forskningsarbetet inom KBS.

Ungefär samtidigt framkom från KBS önskemål om en allmän bergmekanisk bedömning av ett slutförvar utformat i två våningar, men i övrigt konstruerat enligt de ursprungliga KBS-förslagen.

Eftersom de båda uppgifterna griper in i varandra har vi valt att behandla dem tillsammans.

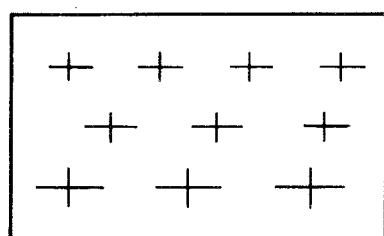
I det följande presenteras därför några allmänna aspekter på spänningar och deformationer i berg, synpunkter på termospänningar kring envåningsförvar samt slutligen något om förvar i två våningar. Vi vill dock börja med att klargöra vilka kategorier av spänningar som kan uppträda i berggrunden och vilka samband som råder mellan dessa.

1 SPÄNNINGAR I BERGGRUNDEN

De mekaniska spänningar som kan finnas i berggrunden kring ett avfallslager kan efter ursprung indelas i tre kategorier:

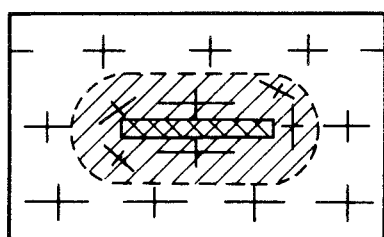
- a) Primära spänningar eller spänningar in situ: Dessa är de spänningar som råder i den helt ostörda bergmassan. De härrör från gravitativa och tektoniska belastningar. Beloppen på de vertikalt riktade primärspänningarna överensstämmer i regel med tyngdbelastningen från ovanliggande berg. Dock har andra värden, även dragbelastningar noterats. De horisontella spänningarna varierar inom vidare gränser men är i svensk berggrund för det mesta tryckspänningar och oftast större än vertikalspänningarna, åtminstone i någon riktning. Generellt gäller att primärspänningarna ökar mot djupet.
- b) Sekundära spänningar: Då ett hålrum av något slag görs i berggrunden störs det primära spänningstillståndet till storlek och riktning i området närmast öppningen. Ett sådant, av ingrepp stört spänningsfält benämns sekundärt spänningsfält. Sekundärspänningarnas storlekar och riktningar beror på det primära spänningsfältet samt på hålrummets storlek och form. De kan lokalt blir betydligt större, och ha annat tecken än primärspänningarna.
- c) Termospänningar: Då temperaturen höjs i berget uppstår termospänningar till följd av materialets strävan att utvidga sig.

De absoluta spänningarna i en punkt fås genom superponering av primärspänningar och termospänningar, eller i de fall primärspänningarna är störda av hålrum, genom superponering av sekundärspänningar och termospänningar. Sambanden åskådliggörs i figur 1.



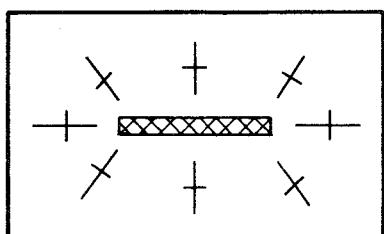
I
Primära bergspänningar
i ostörd berggrund.

$$\sigma_{p1,2}$$



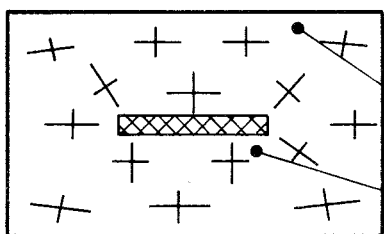
II
Sekundära bergspänningar
kring förvaret

$$\sigma_{s1,2}$$



III
Termospänningar kring
förvaret

$$\sigma_{T1,2}$$



Absoluta spänningar kring förvaret

$$\sigma_{A1,2} = \sigma_{p1,2} + \sigma_{T1,2}$$

$$\sigma_{A1,2} = \sigma_{s1,2} + \sigma_{T1,2}$$

Fig 1 Spänningar kring slutförvar, huvudspänningskorsen anger hypotetiskt spänningstillstånd.

Det primära spänningstillståndet är av stor betydelse vid valet av förvaringsplats och det finns därför anledning att närmare behandla vår nuvarande kunskap om spänningstillståndet i jordskorpan. Att mäta och utvärdera bergspänningsmätningar är en komplicerad och tidskrävande process. Bergspänningsmätningar har nu pågått i mer än tjugo år och det är idag möjligt att dra flera allmänna slutsatser om spänningstillståndet i jordskorpan [1], [2] och [3]. De här framförda synpunkterna gäller oavsett om mätmetoden för bergspänningsmätning är friborrning eller hydraulisk uppspräckning. Bestämning av spänningstillståndet genom analys av fokalmekanismen vid seismisk vågutbredning behandlas ej i denna framställning.

Vi kan först konstatera att på så gott som alla platser där bergspänningsmätningar har utförts existerar ett tektoniskt spänningsfält, dvs spänningsfältet eller någon av huvudspänningarna avviker från de förväntade spänningarna p g a gravitationsbelastningen. Det existerar ett stort antal mättningsresultat som entydigt visar att de horisontella bergspänningarna är större än de vertikala spänningarna i den övre delen av jordskorpan. Forskarna Hoek och Brown [2] har gjort en sammanställning som återges i Fig 2. Den visar hur förhållandet mellan medelvärdet på de horisontella spänningarna och vertikalspänningen varierar med djupet under markytan för mätningar på olika kontinenter. Vi finner här att förhållandet är lägst, $k = 1.5$, vid markytan och avtar mot djupet. För djupet 500 m under markytan finner vi att spänningstillståndet varierar från hydrostatiskt, dvs $k = 1$, till ett överskott för horisontalspänningarna med värdet $k \approx 3$.

Forskarna Ranalli och Chandler [1] har särskiljt mätresultaten med hänsyn till tektoniska regimer, tidpunkten för deformationen samt om mätningarna utförts i sedimentära täckbergarter. Deras sammanställning visar att överskottet i horisontalspänningar är allra störst i urbergsområden och vidare att för områden med sedimentär berggrund är horisontalspänningarna mindre än vertikalspänningarna.

Mätresultat avseende in situ-spänningarna i skandinavisk berggrund har sammanställts av Bergman [3]. Han visar att horisontalspänningarna från markytan ner till 1000 m djup i jordskorpan varierar så att summan av horisontalspänningarna är $30 > (\sigma_1 + \sigma_2)_H > 0$ där det lägsta värdet varierar från noll vid markytan till ca 10 MPa på 1000 m djup. Vidare konstaterar han att de av Hast utförda spänningsmätningarna genomgående ger för stora absolutbelopp på spänningarna.

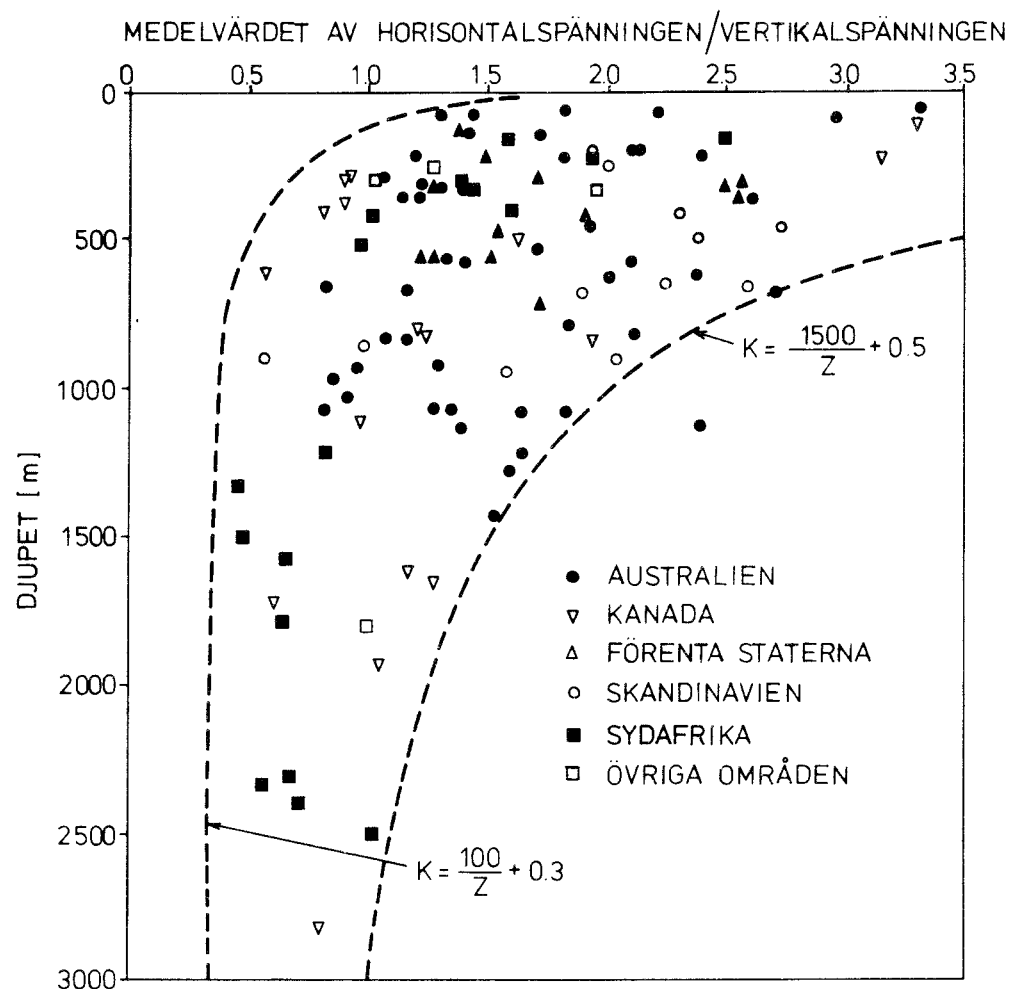


Fig 2 Förhållandet mellan medelhorisontalspänningen och vertikalspänningen som funktion av djupet i jordskorpan. Efter Hoek och Brown i [2].

Vi kan således konstatera att hittills utförda bergspänningsmätningar i urbergsterräng visar på förekomsten av större horisontaltryckspänningar än vertikala tryckspänningar till följd av bergarternas egentyngd. Överskottet i horisontalspänningar kan till stor del sättas i samband med avlastningen genom erosion och isavsmältning. Det finns dock inte utrymme här att närmare behandla mekanismen bakom överskottet av horisontalspänningarna. Vi kan också konstatera att de uppmätta tryckspänningarna för de aktuella djupen uppgår till ca 10 % av urbergarternas tryckhållfasthet. Denna slutsats gäller även i de fall det råder en extremt stor anisotropi hos horisontalspänningarna, d v s den ena horisontalspänningen är betydligt större eller mindre än den andra. Låt oss uppehålla oss ytterligare vid relationen mellan de olika spänningarna.

Forskarna Ranalli och Chandler [1], och flera andra forskare före dem, behandlade summan av de horisontella spänningarna och avsatte dessa som funktion av djupet och den tektoniska miljön eller förhållandet mellan största och minsta horisontella spänningen som funktion av djupet. Hoek och Brown i [2] och senare Jamison och Cook visade på förhållandet mellan medelvärdet på horisontella spänningen och vertikalspänningen som funktion av djupet, cf Fig 2. Jamison och Cook [2] har gått ett steg ytterligare i behandlingen av resultaten från bergspänningsmätningarna och överfört de uppmätta spänningstillstånden till den allmänt gällande nomenklaturen för sambandet mellan förkastningar och huvudspänningsaxlarnas orientering. Om huvudspänningarna $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ gäller de tillstånd för utbildning av förkastningar som visas i Fig 3, nämligen a) normalförkastning, där största huvudspänningen är riktad vertikalt, b) överskjutning, där minsta huvudspänningen är vertikalt riktad och c) sidoförkastning (strike-slip eller wrench) där den mellersta huvudspänningen är riktad vertikalt. Från resultaten av femtio mätningar hämtade från sexton olika referenser har Jamison och Cook [2] gjort en sammanställning som visas i Fig 4. Här har mätningarna grupperats i enlighet med nomenklaturen för förkastningarnas spänningstillstånd. Det finns

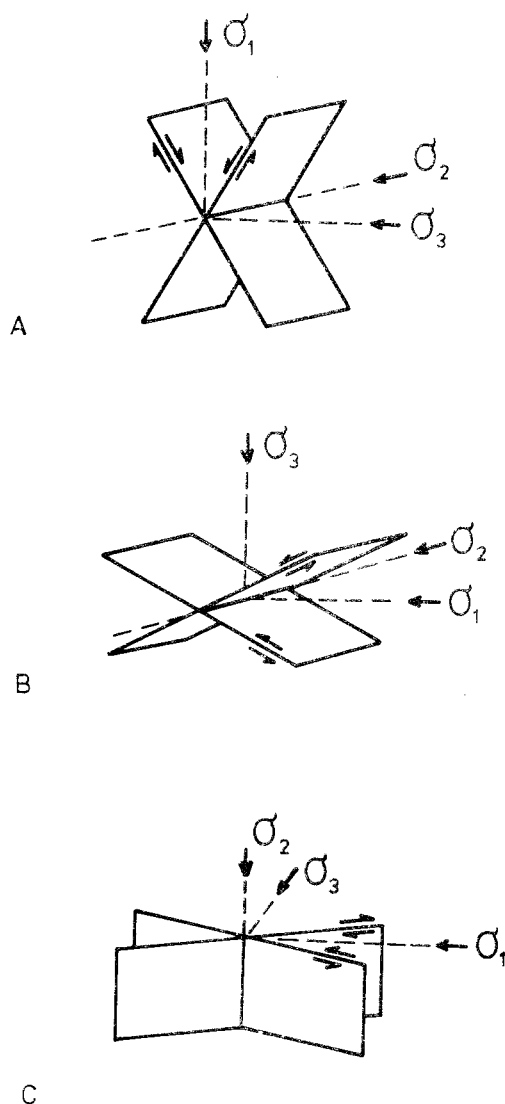


Fig 3 Sambandet mellan förkastningstyper och huvudspänningarnas orientering; A) normalförkastning där största huvudspänningen är riktad vertikalt; B) överskjutning, där största huvudspänningen är riktad horisontellt och minsta huvudspänningen vertikalt; C) sidoförkastning, där största och minsta huvudspänningen är riktad horisontellt

dock inga geologiska observationer rapporterade som styrker ett eventuellt samband mellan uppmätta spänningstillstånd och registrerade förkastningsrörelser för respektive mätplats. Som en kontrollåtgärd avsattes sambandet mellan registrerad vertikalspänning och djupet under markytan och man fann att mätpunkterna med några få

undantag föll längs regressionslinjen $\sigma_v = H \cdot \rho \cdot g$. Vidare av-sattes halva huvudspänningsdifferensen, $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$, vilket mot-svarar maximala skjuvspänningen, som funktion av halva huvud-spänningssumman, $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$, Fig 5. Liksom i fallet med diskussio-nen om förkastningarnas beroende av spänningstillståndet och Mohr-Coulombs brottkriterium bortser vi från inverkan av den mellersta huvudspänningen. Vi finner då att spänningstillståndet i jord-skorpanns övre delar till största delen bestäms av friktionsmot-ståndet mot glidning för ytorna som begränsar bergartsblocken i berggrunden. Absolutvärdena på friktionskoefficienten vid glid-friktionen varierar något mellan de olika spänningsmoderna. Sammantaget ger spänningsmätningarna som visas i Fig 5 en friktions-

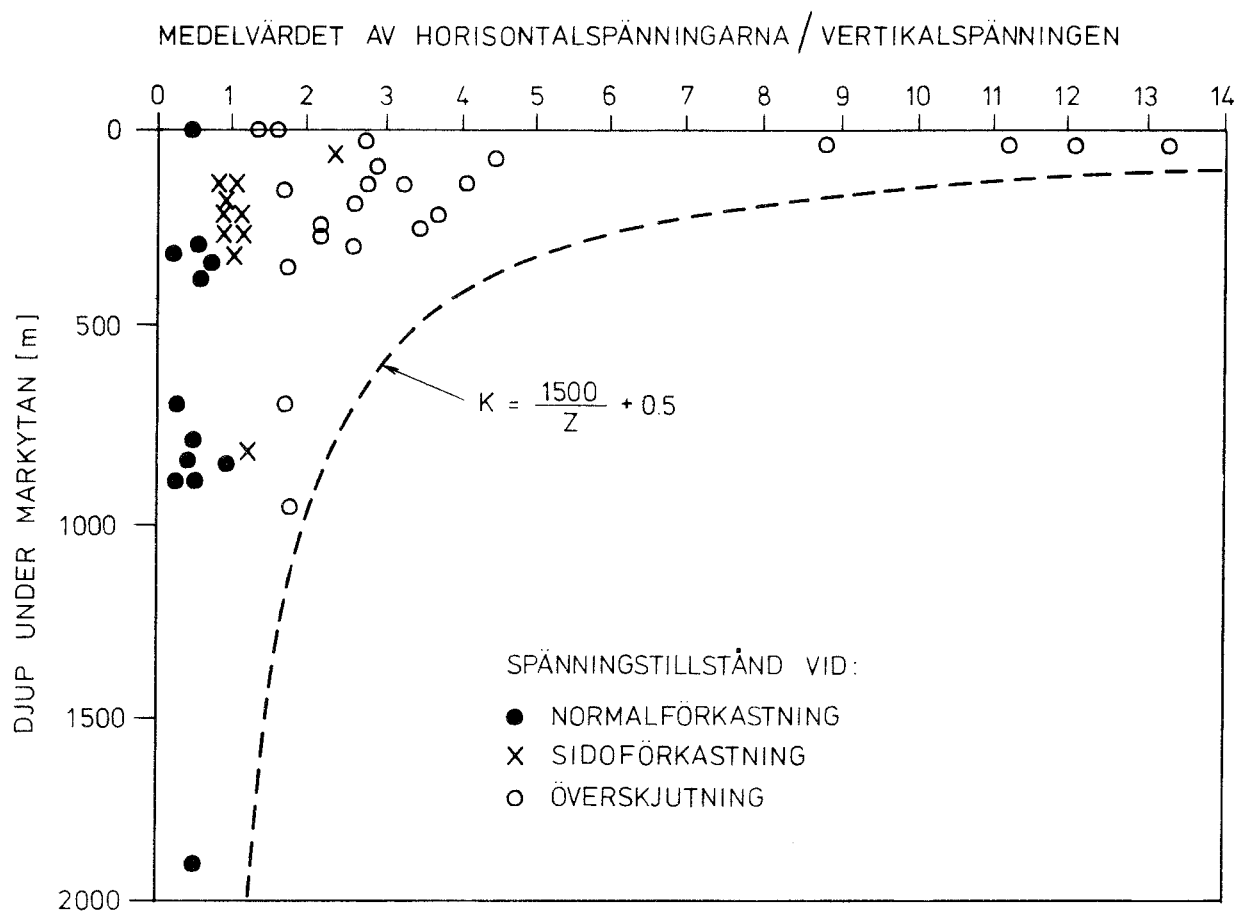


Fig 4 Sambandet mellan djupet under markytan och förhållan-det mellan horisontal- och vertikalspänningen. Mät-resultaten har grupperats i överensstämmelse med spän-ningsituationerna vid normalförkastning, sidoför-kastning och överskjutningsförkastning. Efter Jamison och Cook [2].

koefficient $\mu = 0.52$ som också kan antas gälla för svenskt urberg. Detta skall jämföras med experimentellt uppmätta värden på glidfriktion hos bergartsytor som funnits variera mellan $\mu = 0.4$ och $\mu = 0.95$.

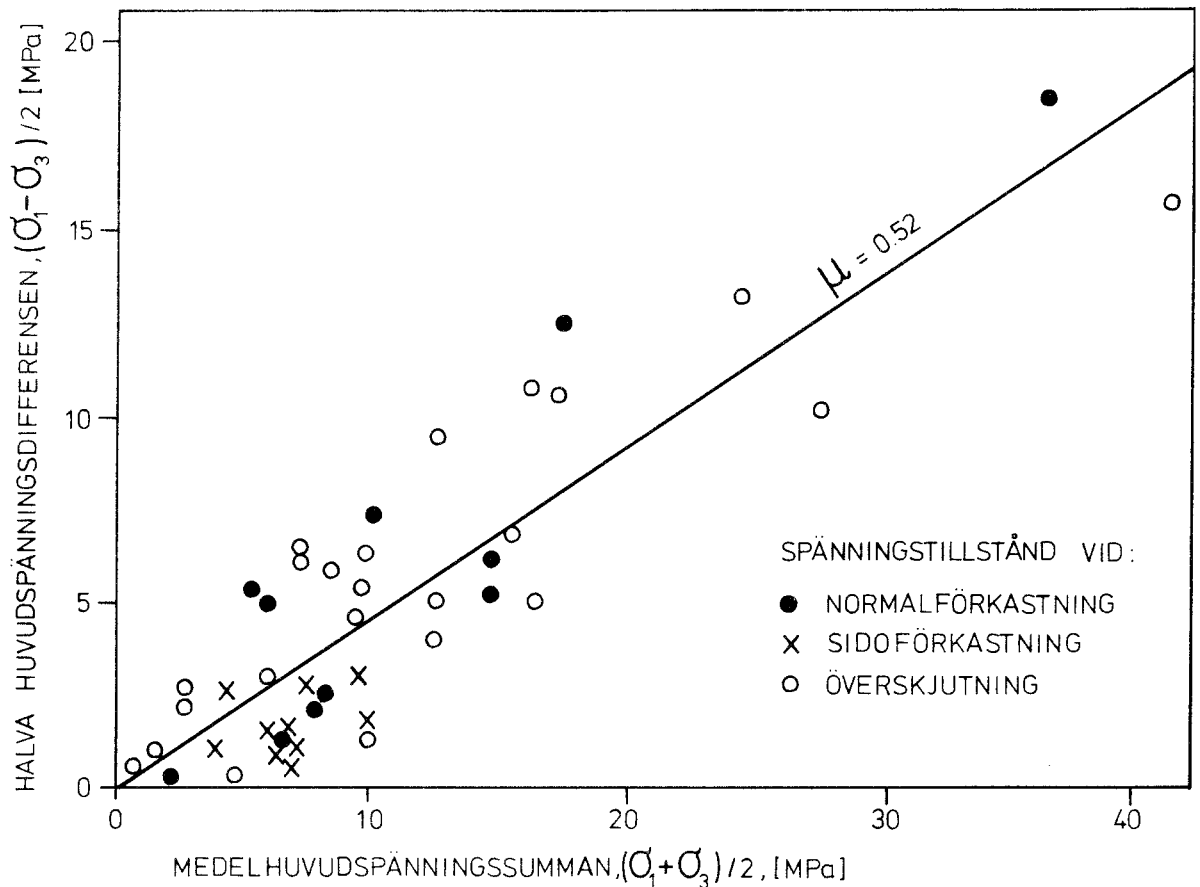


Fig 5 Sambandet mellan halva huvudspänningsdifferensen (motsvarande maximala skjuvspänningen) och halva summan av huvudspänningarna. Vinkelkoefficienten för regressionslinjen anger friktionskoefficienten vid glidfriktion. Sambandet visar att spänningstillståndet i jordskorpanns övre delar bestäms av friktionsmotståndet mot glidning mellan blocken i berggrunden. Efter Jamison och Cook [2].

Vi har kunnat visa att spänningssituationen i jordskorpanns övre delar kan inordnas i gällande system för klassificering av förkastningar i relation till huvudspänningarnas orientering. Bergspänningsmätningar med låga värden på förhållandet σ_H/σ_V motsvaras av ett spänningstillstånd som gäller för normalförkastningar. Sambandet mellan huvudspänningsdifferensen och huvudspänningssum-

man för största respektive minsta huvudspänningen visar att spänningstillståndet i jordskorpanns övre delar bestäms av friktionsmotståndet mot glidning mellan blocken i berggrunden där friktionskoefficienten har bestämts till i genomsnitt $\mu = 0.52$. Inverkan av termospänningarna kommer att adderas till det primära spänningstillståndet. Under förutsättning att termospänningarna ligger inom intervallet 5 MPa i dragspänning och 25 MPa i tryckspänning, som de teoretiska beräkningarna visar, så kommer det inte att förändra deformationsmekanismen. Ett brott i berggrunden till följd av för stora spänningar kan ske bara om friktionsmotståndet mot glidning hos existerande sprickor överskrids. Något brott i bergartsblocken, som begränsas av sprickytorna, är högst osannolikt för de temperaturbelastningar som uppstår i berggrunden kring förvaret. Vi skall återkomma till detta sedan vi beskrivit termospänningarna kring ett förvar i två våningar.

2 ALLMANNA SYNPUNKTER PÅ TERMOSPÄNNINGAR I BERG

Här presenteras några uppgifter beträffande bergets reaktion vid in situ-uppvärmning

- De materialparametrar som är av betydelse för värmedistributionen kring en värmekälla i berg är väldefinierade och uppvisar måttliga variationer. Därmed kan också temperaturökningarna vid kända källstyrkor beräknas med god noggrannhet. Det råder en god överensstämmelse mellan resultat från värmeförsök där man simulerat avfallslagring och resultaten från lagring av andra varma produkter i berg, [10]. Värmetransporten är relativt okänslig för strukturanisotropier och synes till övervägande delen ske genom konduktion. Inverkan av grundvattenkonvektion är liten. Inget tyder på att säkerheten i beräkningarna skulle vara sämre i den skala som motsvarar slutförvaret än i försöksskala.
- De spänningar och deformationer som induceras kring en värmekälla i berg överensstämmer inte på långt när med de belopp som erhålls ur elasticitetsteoretiska beräkningar. Stripaförsökens pilotvärmeförsök, [6], liksom de amerikanska undersökningarna tills idag visar ett ex spänningsbelopp som är 20-80 % av de teoretiska. Vidare är spänningsfördelningarna oregelbundna och överensstämmer inte alltid med de uppmätta deformationerna.
- Materialparametrarna som bestämmer sambanden mellan spänningar och deformationer uppvisar kraftiga volymsberoenden och kan inte bestämmas entydigt. Detta gäller även i det fall spänningarna är alstrade genom värme.
- Bergmassans reaktion på uppvärmning domineras av rörelser i sprickor och andra, redan existerande svaghetsplan. Mellanliggande bergpartier uppför sig mera

"statiskt". Detta är sannolikt orsaken till de små spänningar som uppmätts i värmeförsöken. Bergets strävan att utvidga sig kan vid uppvärmning tillgodoses genom rörelser i sprickor.

Av det sagda framgår att vi inte strikt kan betrakta bergmassan som ett homogent, elastiskt medium, [11]. Detta gäller ävande de sprickfattiga formationer som kan bli aktuella för ett slutförvar.

Resultaten som vi beskrivit grundar sig på försök i betydligt mindre skala än ett slutförvar. Vi vet dock från andra delar av bergmekaniken, främst genom studier av stora gruvor, att vad som gäller i liten skala, åtminstone kvalitativt återfinns också i stor skala. Det är därför rimligt att anta att även de globala rörelserna kring ett slutförvar kommer att ske i existerande svagheter och att de inducerade termospänningarna blir måttliga på samma sätt som gäller för bergmassan kring en enskild, mindre värmare. De svagheter som bestämmer deformationsförloppet i en bergmassa med dimensioner som rymmer ett slutförvar blir naturligtvis av högre ordning, dvs deras längd, uthållighet, bredd och fyllnad är större än för sprickgrupperna kring en enskild värmare.

Förenklat kan man särskilja tre typer av rörelser i svaghetsplanen hos en bergassa:

- 1) Kompression till följd av tryckbelastning normalt svagheten.
- 2) Dilatation till följd av dragbelastning eller minskade tryckbelastningar normalt svagheten.
- 3) Skjuvning; förutsättningar för skjuvning skapas då deviatorspänningarna, dvs skillnaderna mellan spänningarna i olika riktningar, blir stora. De tre brottmoderna som diskuterats i samband med primärspänningar i avsnitt 1 ger alla upphov till skjuvning.

En eller flera av rörelserna kan samverka vid deformationen av ett svaghetsplan. Det är rörelser av typ 2) och 3) som är av störst betydelse vid slutförvaring eftersom dessa kan öka permeabiliteten hos bergmassan.

En kompetent bergvolym kan ta stora tryckpåkänningar utan andra effekter än en kompression. Däremot kan motståndet mot dragbelastningar vara mycket ringa för bergvolymen där sprickor och svagheter finns. Vid spänningsanalys av en stor bergvolym för ett slutförvar bör uppmärksamhet riktas på zoner där dragspänningar kan uppträda i någon riktning och på zoner med stora deviatorspänningar, dvs stora differenser mellan huvudspänningarna.

3 BERÄKNADE TERMOSPÄNNINGAR FÖR SLUTFÖRVAR

3.1 Spänningar kring envånings slutförvar

Omedelbart efter deponeringen av avfallet kommer värmetransporten att ske individuellt ut från varje behållare. Så småningom börjar temperaturfälten kring de enskilda behållarna att samverka, och en temperaturutjämnning sker i våningsplanet. Därefter kan förvaret betraktas som en värmealstrande skiva med vertikal värmeavgivning. Dragspänningar, alternativt deviatorspänningar, kan förväntas i zoner med stora temperaturgradienter eller i den "kalla" regionen omedelbart utanför en temperaturgradient (se Fig 6). Ju större temperaturgradienten är desto större blir risken för spänningskoncentrationer. Vidare kan horisontella dragspänningar förväntas nära markytan eftersom en vertikal upplyftning kommer att ske på grund av uppvärmningen mot den fria ytan.

Den makroskopiska temperaturfördelningen runt ett slutförvar för förglasat avfall, alternativt använt bränsle har studerats av Blomquist [5], Ratigan [6] och Tarandi [7]. Förutsättningar och beräkningsmetodik skiljer sig men resultaten visar ändå god överensstämmelse. I alla analyserna har man funnit att maximala temperaturen i berget blir 45-60°C och uppnås ca 50 år efter deponeringen. De största temperaturgradienterna uppträder inom 150 år från deponeringstillfället. Temperaturförhöjningen når upp till markytan inom en tidsrymd av 500-1000 år.

Globala spänningstillståndet kring envåningsförvar har bestämts av Ratigan [8] och Tarandi [12]. Båda har antagit att bergmassan uppför sig elastiskt och att materialparametrarna är volyms- och temperaturoberoende. Ratigan har i sin modell dessutom applicerat Mohr-Coulombs brottvillkor. I Fig 7 återges några av deras resultat. De horisontella och vertikala termospänningarna för en lodrät linje genom förvarets centrum har där adderats till ett antaget primärt spänningstillstånd: $\sigma_v = \rho \cdot g \cdot h$ (tyngden av ovanliggande berg) och $\sigma_h = \sigma_v$. De största termospänningarna är horisontella tryckspänningar kring förvaret. Resultaten skil-

jer sig förvånansvärt mycket vad beträffar magnituden hos dessa tryckspänningar, även om hänsyn tas till skillnader i beräkningsförutsättningarna. Vidare visar Tarandis beräkningar på små, horisontella dragspänningar mot markytan. Avsaknaden av dessa i Ratigans resultat förklaras av det använda brottvillkoret.

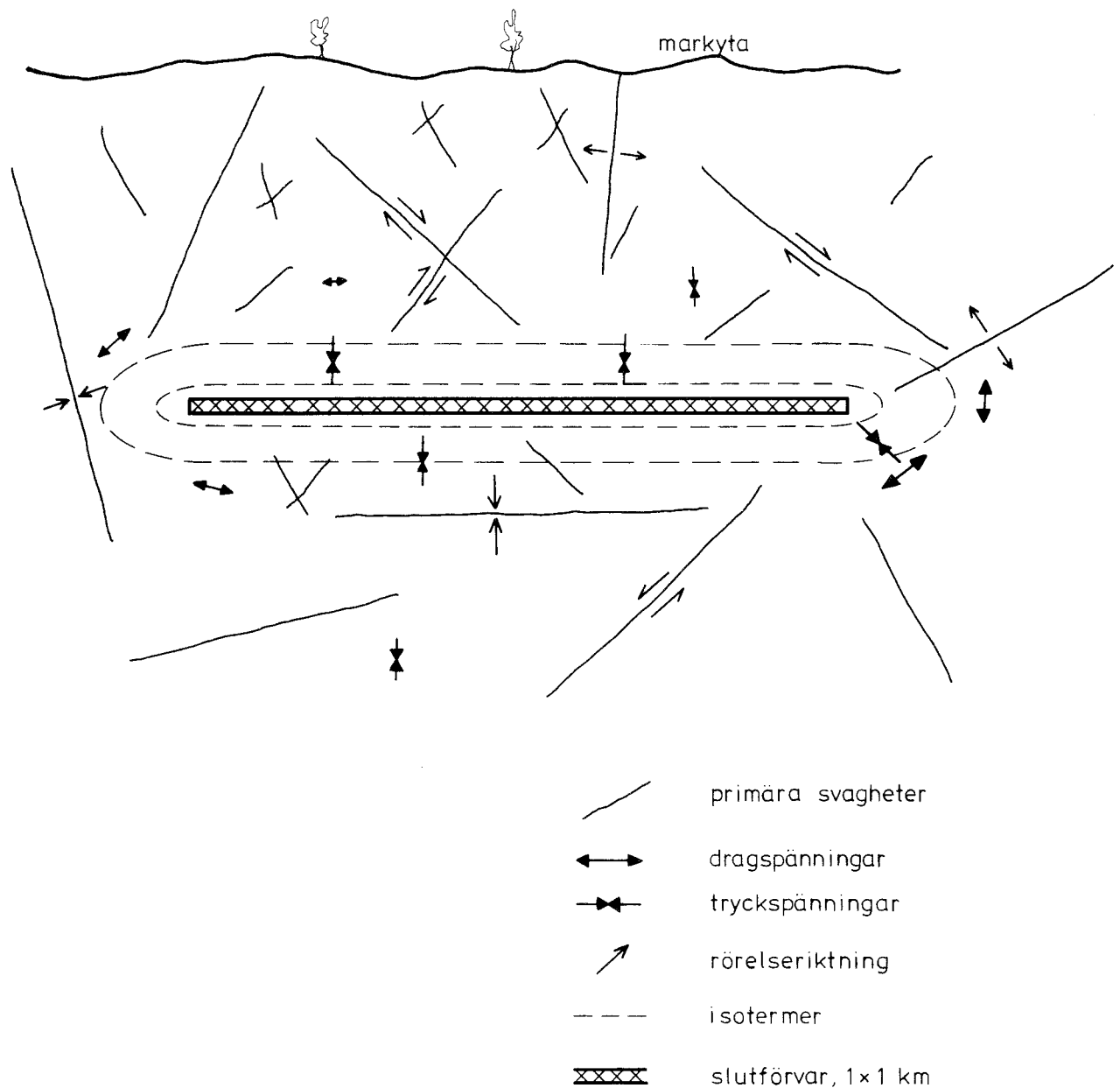


Fig 6 Tänkbara spänningar och rörelser kring envånings slutförvar.

3.2 Spänningar kring sfäriskt slutförvar

I Fig 7 anges också resultat från en analys utförd av Hodgkinson [9] vid Harwell Theoretical Physics Division. Hodgkinson har med elasticitetsteoretiska antaganden om berggrunden, analytiskt beräknat temperatur- och spänningsfördelningar för ett slutförvar av sfärisk form. Vid beräkningarna har antagits en radie hos förvaret på 250 m, alternativt 125 m, och ett djup till centrumpunkten på 500 m, alternativt 1000 m. Det bör nämnas att effekttätheten räknat på förvarets begränsningsyta är 5 å 6 gånger större än i det svenska konceptet.

Kurvorna som återges i Fig 7 visar horisontella och vertikala spänningar kring en sfär med radie 250 m, djup 500 m. En minskning av förvarets radie och med samma djup ger avsevärt större tryckspänningar kring förvaret och oförändrade horisontella dragspänningar vid markytan. En ökning av djupet till förvaret minskar de horisontella dragspänningarna och förflyttar den dragbelastade zonen djupare ner mot förvaret.

3.3 Spänningar kring slutförvar i två våningar

Spänningarna kring ett slutförvar i två våningar har studerats av Tarandi [12], med hjälp av finita elementprogrammet STARDYNE. Vid beräkningarna användes en rotationssymmetrisk modell där ca 2 km av berggrunden kring förvaret har medtagits. Avståndet mellan tunnelplanen har varit 60 m respektive 100 m. Berggrunden har antagits uppföra sig elastiskt och materialegenskaperna har valts så att de överensstämmer med normala värden för granitiska bergarter, dvs elasticitetsmodulen $E = 40 \text{ GPa}$, och Poisson's tal 0.21. Beräkningarna visar att det är måttliga skillnader i termospänningar vid avståndet 60 m respektive 100 m mellan tunnelplanen varför vi valt att här analysera situationen för fallet med 60 m avstånd mellan tunnelplanen.

Beräkningarna tillgår så att temperaturen i strukturen bestäms med FEM-beräkningar och med samma rutnät som i spänningsanaly-

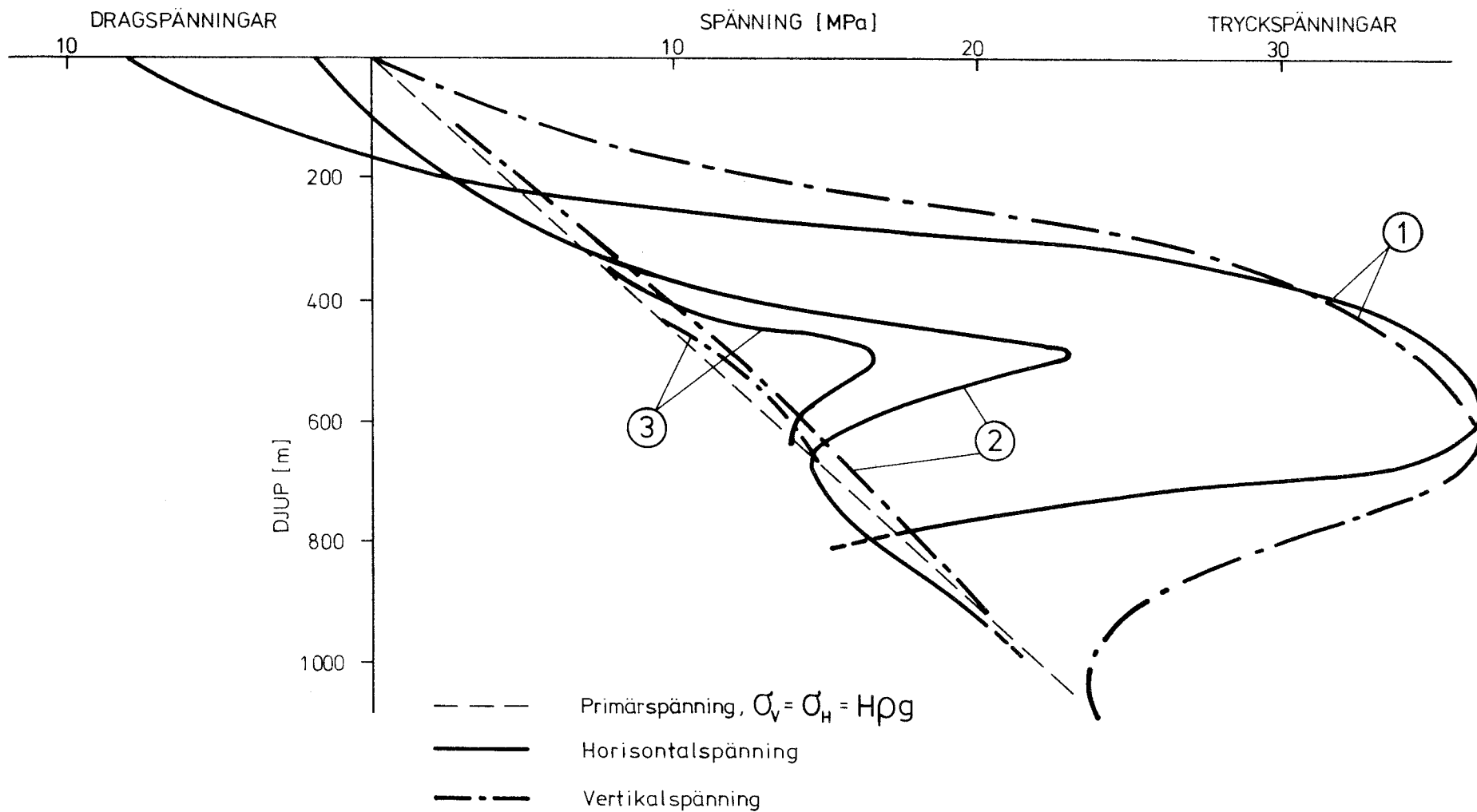


Fig 7 Horisontella och vertikala absolutspänningar vid centrumlinjen för envånings, plant förvar och sfäriskt förvar.
 Kurva 1: Sfäriskt förvar, radie 250 m, djup till centrum 500 m, 100 år efter deponering, E-modul = 40 GPa. Efter Hodgkinson [9].
 Kurva 2: Plant förvar, djup 500 m, 140 år efter deponering, E-modul = 40 GPa. Efter Tarandi [12].
 Kurva 3: Pland förvar, djup 500 m, 100 år efter deponering, E-modul = 25 GPa. Efter Ratigan [8].

sen. Temperaturspänningarna beräknas sedan vid bestämda tidpunkter då temperaturlastningen är som störst. Det bör poängteras att modellen är konstruerad för beräkning av de globala termospänningarna och inte medger analys av det lokala spänningstillståndet kring förvaringsplanen. Det är inte heller möjligt att beräkna spänningarna i området mellan förvaringsplanen.

I Fig 8 visas temperaturspänningarna vid centrumlinjen av förvaret 460 år efter deponeringen i fallet med 60 m avstånd mellan tunnelplanen och djupet 500 m till övre tunnelplanet. På grund av rotationssymmetrin finner vi att radialspänningen, σ_r , är lika stor som tangentialspänningen, σ_θ , och att de övergår från dragspänningar av storleksordningen 5 MPa vid markytan till tryckspänningar mitt för förvaret, vilka är av storleksordningen 20 MPa. Vertikalspänningen, σ_z , ökar med djupet till i höjd med förvaret, $\sigma_z \approx 7$ MPa, och avtar sedan med djupet.

I Fig 9 visas temperaturspänningarna 530 m under markytan för samma förvar och vid samma tid efter deponeringen. Spänningarna längs centrumlinjen av förvaret överensstämmer med de spänningar som visas i Fig 8. Med ökat avstånd från centrumlinjen avtar spänningarna och nära yttre kanten av förvaret övergår axialspänningen, σ_z , och tangentialspänningen, σ_θ , från tryckspänning till dragspänning.

De i Fig 8 och 9 visade temperaturspänningarna skall superponeras till de primära bergspänningarna, eller de sekundära bergspänningarna närmast förvaret, för att ge den totala spänningsskildern. Vi kan också uttrycka det så att de genom temperaturbelastningen alstrade termospänningarna kräver bestämd storlek och orientering hos de primära bergspänningarna för att inte äventyra stabiliteten hos bergmassan runt förvaret. Med kännedom om temperaturspänningarnas storlek och riktning kring förvaret kan vi formulera de krav på primära spänningstillståndet som måste uppfyllas för att förhindra en uppsprickning av berggrunden.

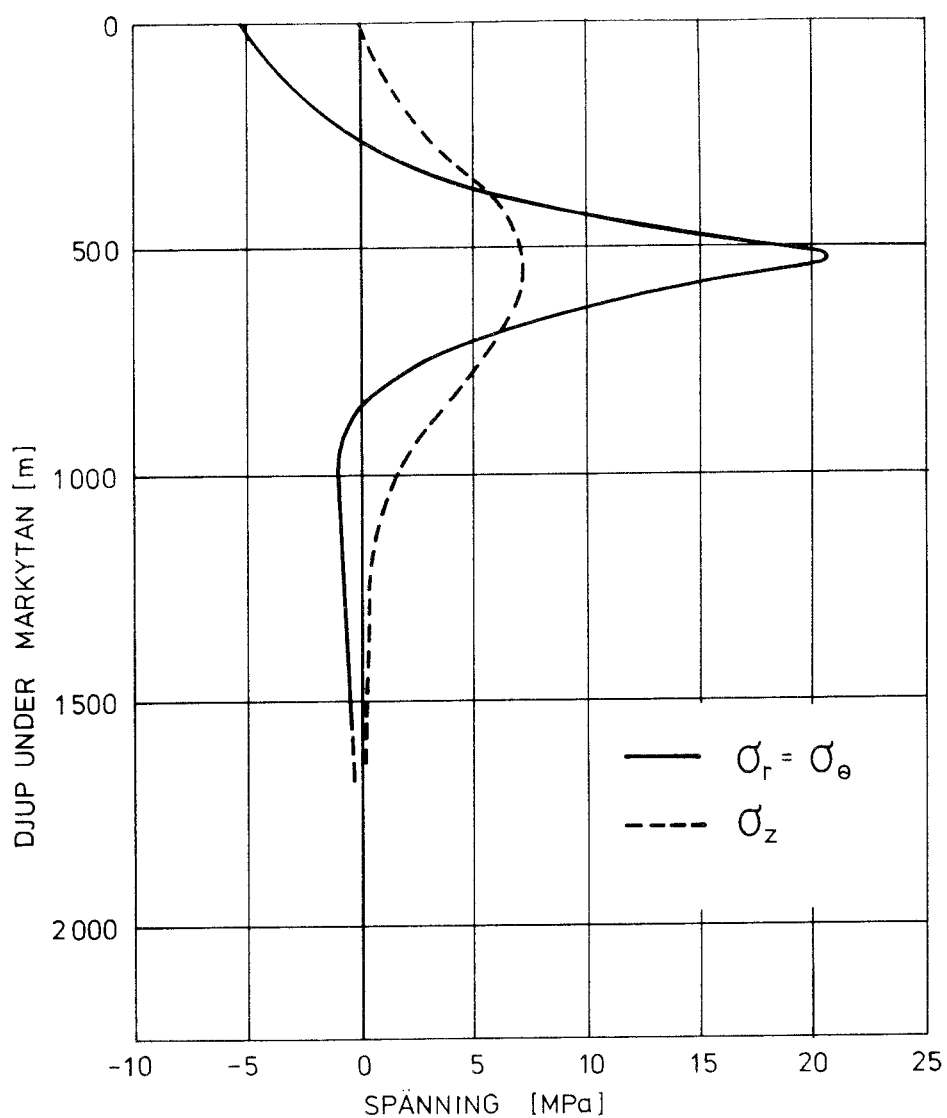


Fig 8 Temperaturspänningar vid centrumlinjen, 460 år efter deponeringen för förvar i två våningar med 60 m avstånd mellan tunnelplanen och djupet 500 m till övre tunnelplanet.

σ_r = radialsänning längs centrumlinjen
 σ_θ = tangentialspänning längs centrumlinjen
 σ_z = axialspänning längs centrumlinjen
 Efter Tarandi [12].

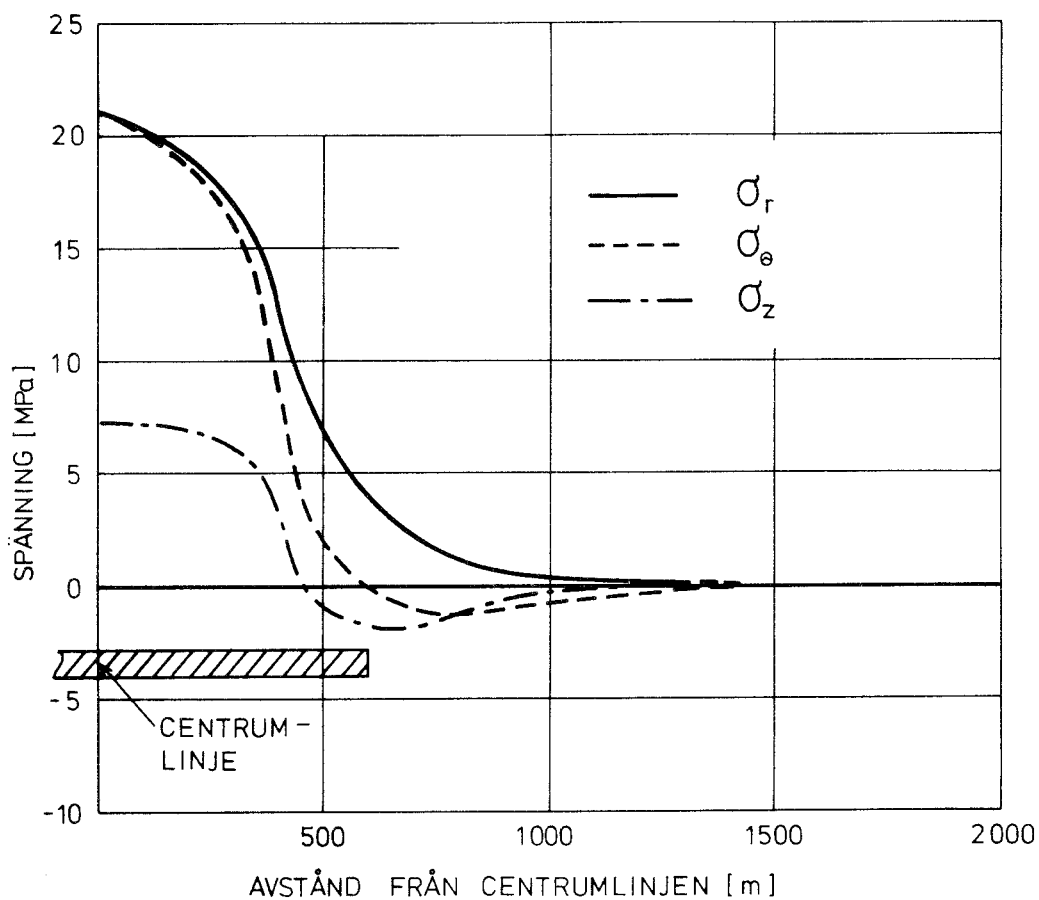


Fig 9 Temperaturspänningar 530 m under markytan och 460 år efter deponering för förvar i två våningar med 60 m avstånd mellan tunnelplanen och djupet 500 m till övre tunnelplanet. Samma beteckningar som i Fig 8. Efter Tarandi [12].

4 BERGMEKANISK BEDÖMNING AV SLUTFÖRVAR I TVÅ VÅNINGAR

4.1 Bedömning av avståndet mellan tunnelplanen

Ett tvåvåningsförvar skulle med samma kapselavstånd som KBS-förslagets envåningsförvar få kantmått 700 x 700 m. Med ett vertikalt avstånd mellan lagringsplanen på 30-100 m har anläggningen fortfarande formen av en skiva, vilket framgår av en skalriktig återgivning i Fig 10. De synpunkter som lämnats i det föregående för envåningsförvar kan tillämpas på tvåvåningsförvar. Men det finns också skillnader mellan en- och tvåvåningsförvar som är av betydelse.

Vi kan först konstatera att den totala yta som finns tillgänglig runt tvåvåningsförvaret för att leda bort värme reduceras till drygt hälften jämfört med envåningsfallet. Detta innebär högre temperaturer och större temperaturgradienter kring förvaret. De temperaturberäkningar som presenterats av Tarandi [12] visar dock mycket måttliga temperaturökningar.

Termospänningarnas utbredning lokalt kring tunnelplanen blir mer komplicerad än i envåningsfallet. Någon fullständig temperaturutjämnning i horisontal led hinner inte ske förrän temperaturfälten från förvaringsplanen börjar samverka i vertikal led. Vi kan därför inte urskilja ett lokalt och ett globalt skede för temperaturutbredningen som i fallet med envåningsförvar. Bilden kompliceras ytterligare av att deponeringen kan komma att ske vid olika tidpunkter på de två nivåerna. Den kritiska zonen för termospänningarna blir därför området mellan nivåerna. Där kan man tänka sig ett skede då temperaturgradienten från den övre våningen och temperaturgradienten från den undre våningen möts och under samverkan ger spänningskoncentrationer i det mellanliggande området.

Minsta vertikala avstånd med hänsyn till sekundärspänningar: Som nämndes inledningsvis kommer det primära spänningsfältet att inducera sekundärspänningar kring orter och deponeringshål vid brytningen. Sekundärspänningarna sträcker sig vid normala ortformer

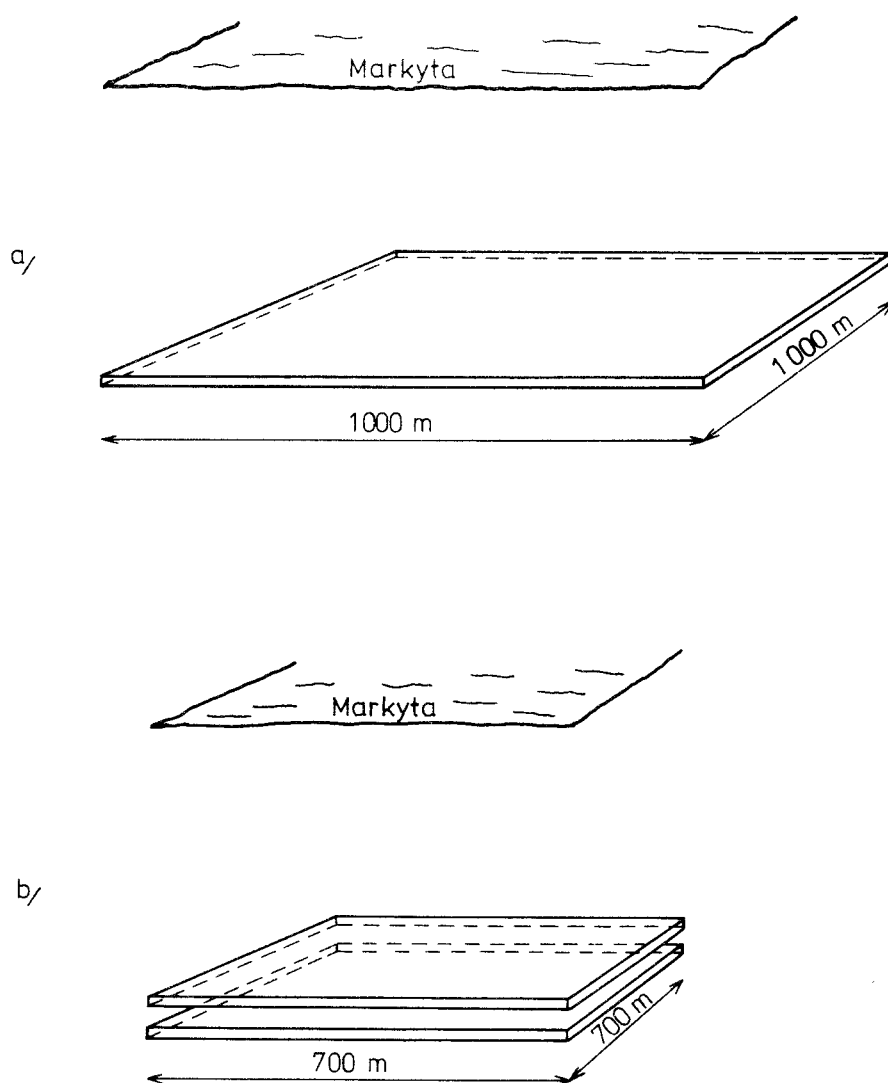


Fig 10 Jämförelse mellan en- och tvåvåningsförvar.
 a) Envåningsförvar på ca 500 m djup enligt KBS-konceptet
 b) Tvåvåningsförvar på ca 500 m djup, våningsavstånd 60 m

3 ä 4 radier ut från ortväggen. Betraktar vi ett tvärsnitt av ort och deponeringshål enligt KBS' förslag för använt bränsle och ersätter deponeringshålet med en kontinuerlig slits i sulan får vi en "radie" för öppningen som blir 6 m, Fig 11A. Sekundärspänningarna kan alltså antas verka cirka $6 \times 4 = 24$ m ut från öppningen. Förvaringsvinivåerna bör inte förläggas så nära varandra att sekundära spänningsfälten från orter och deponeringshål samverkar. Minsta avståndet mellan våningarna blir då $2 \times 24 + 11.7 \approx 60$ m.

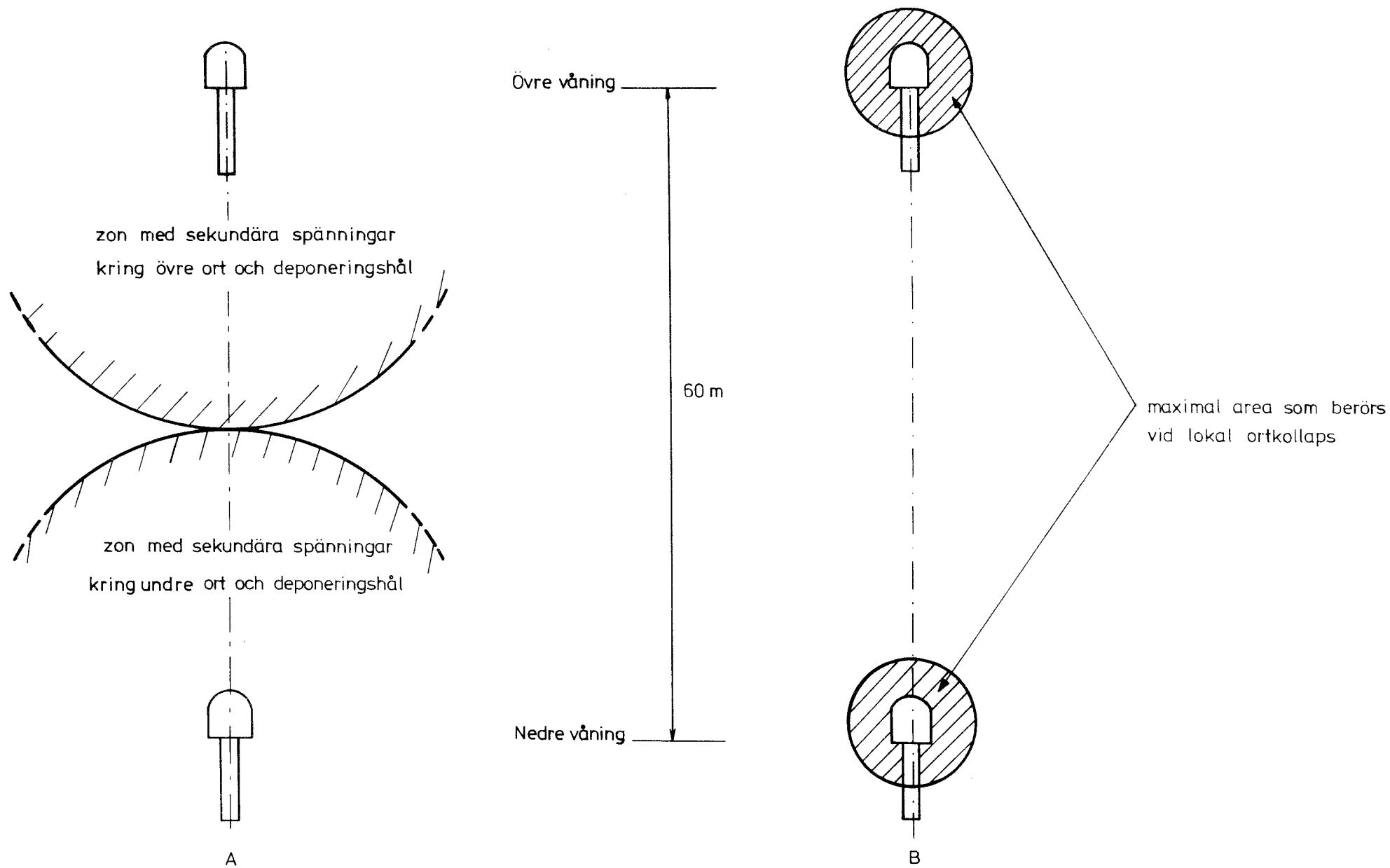


Fig 11 Minsta vertikala avstånd mellan förvaringsnivåerna.
 A) Med hänsyn till sekundära spänningar
 B) Med hänsyn till lokal kollaps av orter

Minsta vertikala avstånd med hänsyn till lokal kollaps: Det ogynnsammaste fallet av lokal instabilitet som kan uppstå är total kollaps och fyllning av förvaringsorten med löst berg (stabiliserande verkan av bentonitfyllning beaktas inte). Avståndet i vertikalled mellan förvaringsnivåerna bör vara så stort att en betryggande skiva opåverkat berg återstår efter en eventuell kollaps av orterna på båda våningarna.

Vid en kollaps rasar sönderbrutet berg in i orten tills denna är helt fylld. Därefter inställer sig en ny jämvikt och raset upphör. Eftersom berg sväller vid sönderbrytning blir den maximala volym som kan involveras i raset begränsad. För den aktuella tvärsnittsarean av ort och deponeringshål, ca 26.5 m^2 , och med en svällningsfaktor på 1.3 blir den maximala rasvolymen per längdmeter $26.5/0.3 + 26.5 \approx 115 \text{ m}^2$. I Fig 11B har en cirkulär sektion runt deponeringsorten ritats in som motsvarar denna area. Även om rasgränsen får en något annan utbredning än den som visas i figuren så finner vi att avståndet 60 m mellan våningsplanen är betryggande vid en eventuell kollaps. Vi kan dock inte finna några bergmekaniska nackdelar med ett större avstånd mellan våningarna.

Förslaget om att avståndet mellan våningsplanen inte bör understiga 60 m gäller oavsett graden av strukturella, mekaniska och termiska anisotropier i berggrunden.

4.2 Bedömning med hänsyn till bergspänningarna

Temperaturspänningarna vid centrumlinjen hos avfallsförvaret har beräknats för polära koordinater. Genom den rotationssymmetriska geometrin som valts kan vi betrakta de beräknade spänningarna som huvudspänningar. Vi kan nu tillämpa teorin för Mohrs spänningscirkel och avsätta de beräknade spänningarna för olika djup under markytan i ett diagram som visas i Fig 12. Enligt beräkningarna är de radiella och tangentiella spänningarna på markytan dragspänningar (definieras negativa i denna framställning). Vid ökat

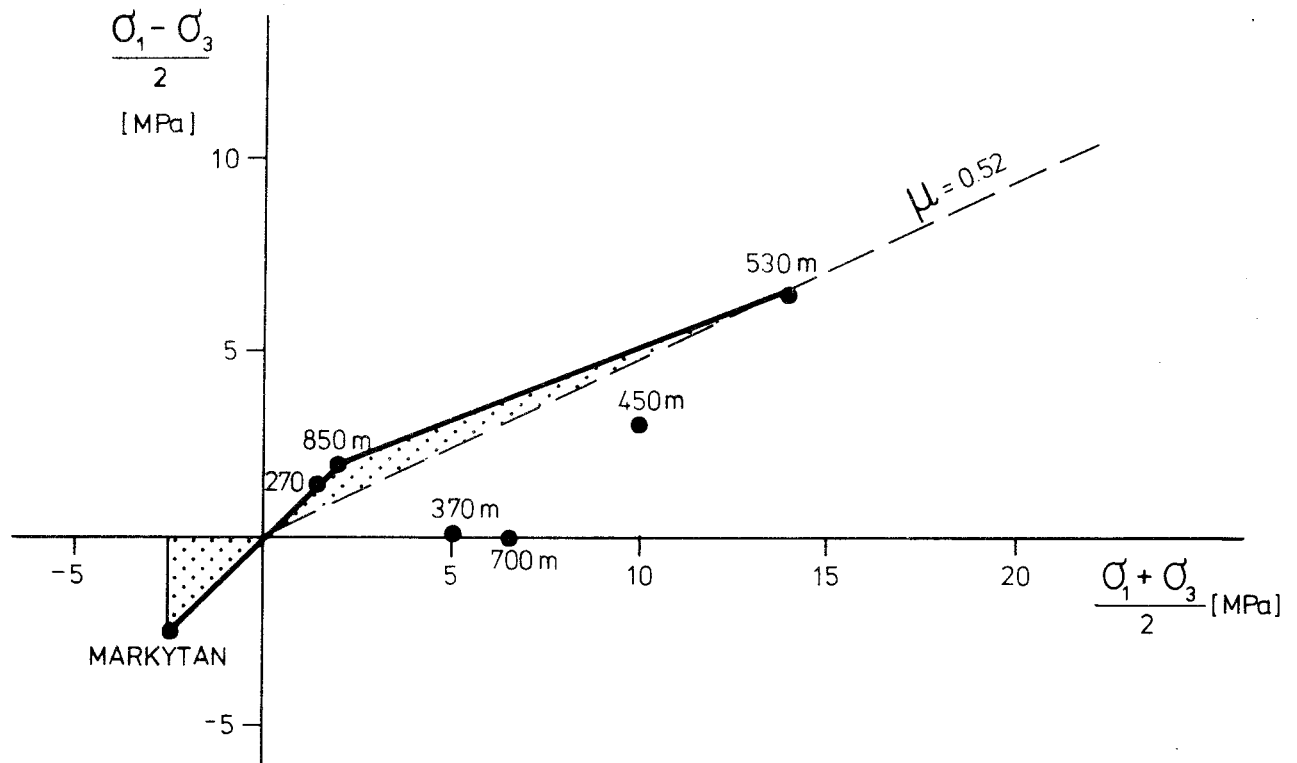


Fig 12 Temperaturspänningar vid centrumlinjen hos förvar i två våningar enligt beräkningarna redovisade i Fig 8. Spänningarna anges för några godtyckligt valda djup under markytan. Spänningstillståndet i jordskorpans övre delar enligt resultaten i Fig 5 redovisas. De prickade områdena anger de spänningstillstånd för vilka brott inträffar i berggrunden genom glidfriktion i existerande sprickor.

djup dominerar tryckspänningarna. Sammanställningen av spänningstillståndet i jordskorpans övre delar visade att detta är bestämt av friktionsmotståndet mot glidning mellan bergartsblocken. Denna brottgränslinje med friktionskoefficienten $\mu = 0.52$ har lagts in i diagrammet. Om förvaret skulle placeras i en spänningfri berggrund skulle termospänningarna leda till brott i de avsnitt av berggrunden som motsvaras av ett spänningstillstånd som faller inom de prickade områdena i diagrammet, Fig 12.

För att inte värmespänningarna skall orsaka brott i berggrunden krävs således att vi kan kompensera termospänningarna med de na-

turligt förekommande bergspänningarna. Bland annat bör berggrunden ha ett spänningstillstånd som kompenserar dragspänningarna från värmebelastningen nära markytan eftersom berggrunden praktiskt saknar draghållfasthet. Rent allmänt bör vi sträva efter att finna en berggrund med dominerande horisontalspänning nära markytan, dvs med en orientering av huvudspänningarna i överensstämmelse med någon av förkastningstyperna överskjutning eller sidoförkastning enligt Fig 3.

Bergman [3] har gjort en sammanställning av resultaten från bergspänningsmätningar i skandinavisk berggrund. På grund av plastiska deformationer i berggrunden, som kan sättas i samband med isavsmältning och erosion, kan man visa att horisontalspänningarna kommer att dominera i de övre delarna av jordskorpan. En modell för bergspänningarnas variation med djupet i skandinavisk berggrund visas i Fig 13, där vertikalspänningarna orsakas av tyngden av ovanliggande bergarter och horisontalspänningarna beror av bergmassans krypegenskaper och belastningens varaktighet. Ett spänningstillstånd av den typ som visas i Fig 13 har nyligen mätts upp i Näslidengruvan, Skelleftefältet, Carlsson [13]. I vår modell antar vi vidare att de bägge horisontalspänningarna är lika stora, vilket innebär att spänningstillståndet till djupet 1000 m motsvaras av förkastningstypen överskjutning och för djup större än 1000 m av typen normalförkastning, jmf Fig 3.

Avsätter vi bergspänningarnas variation med djupet, Fig 13, i Mohr's spänningsdiagram får vi ett samband enligt kurva 1 i Fig 14, där maximala skjuvspänningen = huvudspänningsdifferensen, $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$, avtar från markytan till värdet noll på 1000 m djup (hydrostatiskt spänningstillstånd $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$) för att vid större djup ånyo öka.

Kurva 2 i Fig 14 visar de absoluta spänningarna kring förvaret, som erhållits genom en superponering av bergspänningarna enligt modellen i Fig 13 och temperaturspänningarna enligt beräkningsresultaten i Fig 8. Vi finner här att maximala skjuvspänningarna inte oväntat når sitt högsta belopp i området mellan de två våningsplanen på djupet 530 m.

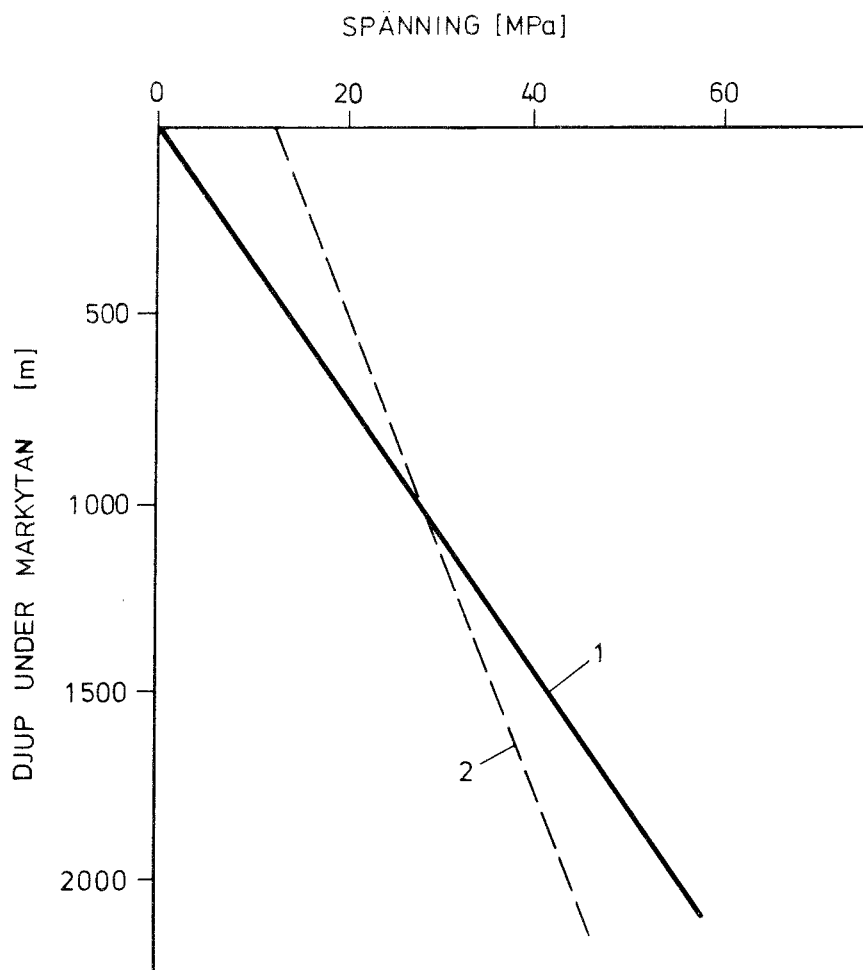


Fig 13 Modell för bergspänningarnas variation med djupet i skandinavisk berggrund. Kurva 1 är vertikalspänningens variation med djupet $\sigma_v = H \cdot \rho \cdot g$. Kurva 2 visar medelvärdet av horisontalspänningarnas variation för relationstalet mellan horisontal- och vertikalspänningen $K_k = 0.6$. Efter Bergman [3].

Kurva 3 i Fig 14 visar de spänningstillstånd för vilka brott sker i berggrunden genom glidfriktion enligt den sammanställning som presenterades i Fig 5. Alla punkter som faller på övre sidan om linjen $\mu = 0.52$ innebär spänningstillstånd som leder till brott i berggrunden. Kurvan för de absoluta spänningarna kring förvaret, kurva 2, kan fås att helt falla under linjen $\mu = 0.52$ om de horisontella tryckspänningarna vid markytan till sitt belopp kan fås lika stora som de radiella och tangentiella dragspänningarna från temperaturbelastningen vid markytan, dvs $\sigma_1 = \sigma_2 = 5$ MPa. I den

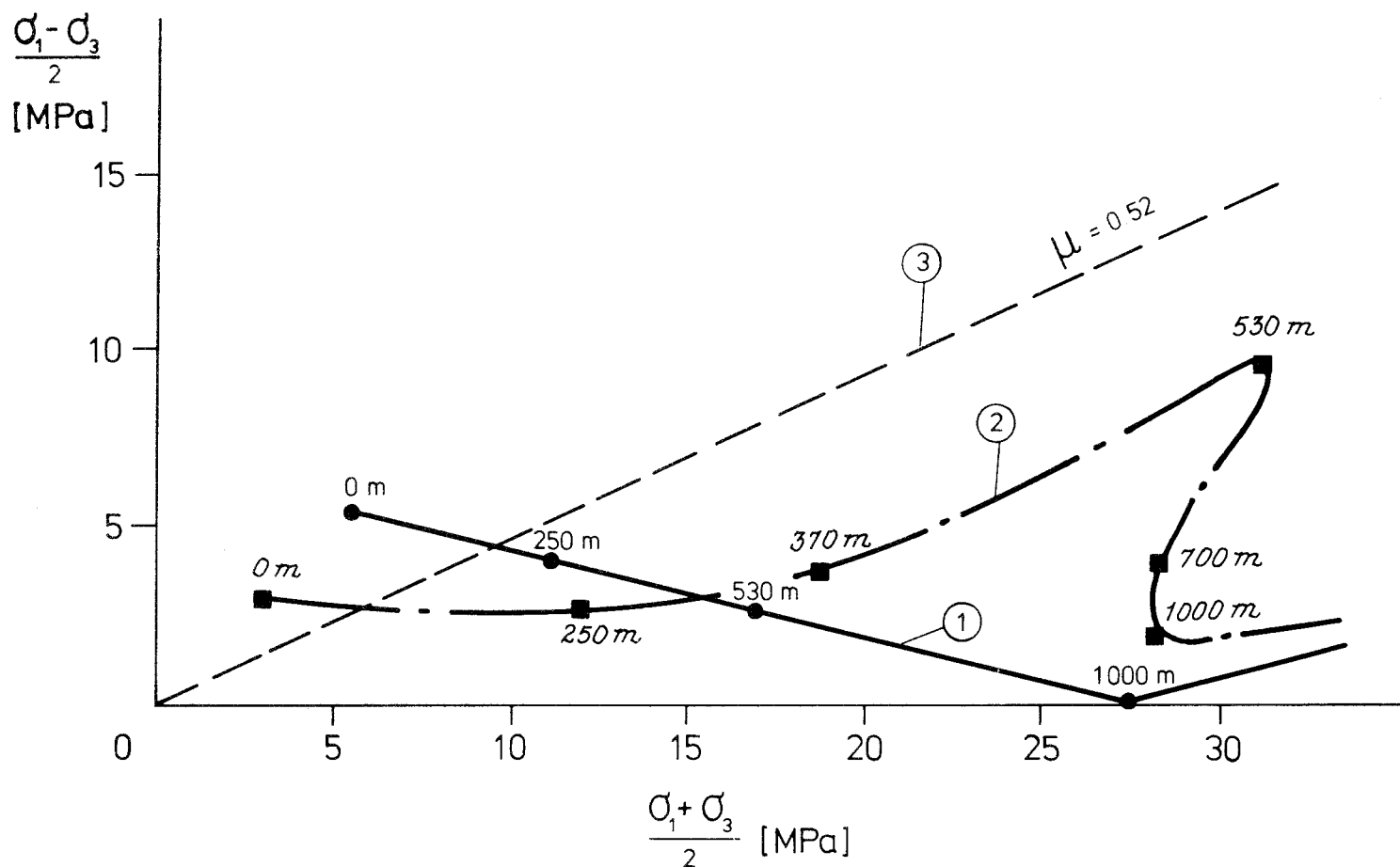


Fig 14 Bergspänningar och absoluta spänningar i berggrunden hos ett förvar i två våningar. Kurva 1 visar bergspänningarnas variation med djupet enligt modellen i Fig 13. Kurva 2 visar absoluta spänningarna kring förvaret genom en superponering av bergspänningarna enligt Fig 13 och temperaturspänningarna enligt Fig 8. Kurva 3 visar de spänningstillstånd för vilka brott inträffar i berggrunden genom glidfriktion, enligt sammanställningen i Fig 5. Diagrammet visar att de absoluta spänningarna ligger på betryggande avstånd från brottlinjen med undantag av bergspänningarna närmast markytan.

antagna modellen för bergspänningarnas variation med djupet i skandinavisk berggrund är $\sigma_1 = \sigma_2 = 11$ MPa, och i alla fall av de bergspänningsmätningar som utförts i Skandinavien är $(\sigma_1 + \sigma_2) \geq 10$ MPa enligt Bergman [2]. Denna analys visar att vi med betryggande säkerhet kan kompensera spänningarna från temperaturbelastningen med de naturliga bergspänningarna i svensk, granitisk berggrund.

Denna analys gäller för temperaturbelastningen längs förvarets centrumlinje. Det är också här som spänningarna når de största värdena. I Fig 9 visas temperaturspänningarna 530 m under markytan. De radiella och axiella dragspänningarna nära kanten av förvaret kompenseras med lätthet av bergspänningarna på det aktuella djupet.

Sprickornas och svaghetszonernas typ och orientering är ytterligare faktorer som bör beaktas vid en bergmekanisk bedömning av slutförvarets placering. Bergspänningsmätningarna runt om i världen visar att friktionsmotståndet mot glidning mellan blocken i berggrunden bestämmer spänningstillståndet. En berggrund där sprickorna har ett högt friktionsmotstånd tillåter därför större temperaturbelastning än en berggrund med lågt friktionsmotstånd mot glidning. Sprickornas orientering i relation till rådande spänningstillstånd har också en stor betydelse för den lastupptagande förmågan, [13], [14]. Om brott i berggrunden sker genom glidfriktion krävs att sprickorna har en bestämd orientering, i relation till spänningarna, jmf förkastningstyperna i Fig 3. Exempelvis i de fall sprickorna är orienterade vinkelrätt mot den största huvudspänningen så kan det inte ske någon förskjutning eller något brott längs sprickan med mindre än att ett nytt brott sker i de fasta bergblocken som omger sprickan.

Skall vi dra nytta av sprickornas och svaghetszonernas orientering vid lokalisering av förvaret bör vi välja en berggrund där dessa strukturer är brantstående. Tillsammans med ett överskott för de horisontella bergspänningarna förhindrar de brantstående strukturerna att brott och glidning kan ske i sprickorna. Vårt svenska urberg kännetecknas i de flesta fall av brantstående strukturer, främst skiffrihet och stänglighet, vilket således kan uppfattas som gynnsamt med hänsyn till värmebelastningarna vid lokaliseringen av avfallsförvaret.

5 REFERENSER

- [1] Ranalli, G and Chandler, T.E.
The Stress Field in the Upper Crust as Determined from
In Situ Measurements.
Geologische Rundschau, Band 64, 653-674.
- [2] Jamison, D.B. and Cook, N.
An analysis of the measured values for the state of
stress in the Earth's crust.
Technical Projekt Report No 7, 1978.
Swedish-American Cooperative Program on Radioactive
Waste Storage in mined Caverns in Crystalline Rock,
12 p.
- [3] Bergman, S.G.A.
Spänningsmätningar i Skandinavisk berggrund - förut-
sättningar, resultat och tolkningar.
KBS, Teknisk rapport nr 64, 1978.
- [4] Swan, G.
The mechanical properties of the Stripa Granite.
Technical Project Report No 3.
Swedish-American Cooperative Program on Radioactive
Waste Storage in mined Caverns in Crystalline Rock.
- [5] Blomqvist, R.
Beräkning av temperaturer i ett envånings slutförvar
i berg för förglasat radioaktivt avfall.
Rapport nr 3.
KBS, Teknisk rapport nr 45, 1977.
- [6] Ratigan, J.L.
Groundwater movements around a repository.
KBS, Teknisk rapport nr 54:02, 1977.

- [7] Tarandi, T.
Temperaturberäkningar för slutförvar för använt bränsle.
KBS, Teknisk rapport nr 46, 1977.
- [8] Ratigan, J.L.
Groundwater movements around a repository,
rock mechanics analyses.
KBS, Teknisk rapport nr 54:04, 1977.
- [9] Hodgkinson, D.P.
Deep rock disposal of high level radioactive waste -
Initial assessment of the thermal stress field.
AERE Harwell, 1978.
- [10] Carlsson, H.
A pilot heater test in the Stripa Granite.
Technical project Report No 4.
Swedish-American Cooperative Program on Radioactive
Waste Storage in Mined Caverns in Crystalline Rock.
- [11] Carlsson, H.
Bergspänningsmätningar i Näslidengruvan.
Rapport från Näslidenprojektet.
Avd för bergmekanik, Högskolan i Luleå, 1978.
- [12] Tarandi, T.
Temperatur- och spänningsberäkning för slutförvar.
KBS, Teknisk rapport nr 79-04, februari 1979.
- [13] Stephansson, O.
Deformationer i sprickigt berg.
KBS, Teknisk rapport nr 29, 1977.
- [14] Stephansson, O., Mäki, K., Groth, T. och Jonasson, P.
Finit elementanalys av bentonitfyllt bergförvar.
KBS, Teknisk rapport nr 104, 1978.

FÖRTECKNING ÖVER SKBF PROJEKT KBS TEKNISKA RAPPORTER

- 79-01 Clay particle redistribution and piping phenomena in bentonite/
quartz buffer material due to high hydraulic gradients
Roland Pusch
University of Luleå 1979-01-10
- 79-02 Försöksområdet vid Finnsjön
Beskrivning till berggrunds- och jordartskartor
Karl-Erik Almén
Lennart Ekman
Andrzej Olkiewicz
Sveriges Geologiska Undersökning november 1978
- 79-03 Bergmekanisk bedömning av temperaturbelastning vid slutförvaring
av radioaktivt avfall i berg
Ove Stephansson
Bengt Leijon
Högskolan i Luleå 1979-01-10
- 79-04 Temperatur- och spänningsberäkning för slutförvar
Taivo Tarandi
VBB Vattenbyggnadsbyrån, Stockholm februari 1979
- 79-05 Kompletterande berggrundsundersökningar inom Finnsjö- och
Karlshamnsområdena
Andrzej Olkiewicz
Sören Scherman
Karl-Axel Kornfält
Sveriges Geologiska Undersökning 1979-02-02
- 79-06 Kompletterande permeabilitetsmätningar i Karlshamnsområdet
Gunnar Gidlund
Kenth Hansson
Ulf Thoregren
Sveriges Geologiska Undersökning februari 1979
- 79-07 Kemi hos berggrundvatten i Blekinge
Gunnar Jacks
Institutionen för Kulturteknik, KTH, februari 1979
- 79-08 Beräkningar av grundvattenrörelser inom Sternöområdet i Blekinge
John Stokes
Institutionen för Kulturteknik, KTH, februari 1979
Preliminär utgåva