

Deformationer i sprickigt berg

Ove Stephansson

Högskolan i Luleå 1977-09-28

DEFORMATIONER I SPRICKIGT BERG

Ove Stephansson
Högskolan i Luleå 1977-09-28

Denna rapport utgör redovisning av ett arbete som utförts på uppdrag av 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 KBS hittills publicerade tekniska rapporter i denna serie.

1977-09-28

DEFORMATIONER I SPRICKIGT BERG

Deformation of a jointed rock mass

Ove Stephansson
Avd för bergmekanik
Högskolan i Luleå
951 87 LULEÅ

SAMMANFATTNING

Ren skjuvning är en vanligt förekommande tektonik i naturen. Spänningsfördelning, deformationer och brottbild vid enkel skjuvning av ett bergblock behandlas teoretiskt. Om bergmaterialet ansluter sig till Coloumb-Naviers brottvillkor bildas en grupp drag-sprickor och två grupper skjuvsprickor. Denna sprickbild har använts i det matematiska modellarbetet.

Två olika matematiska modeller har tillämpats för analys av den spruckna bergmassan; diskreta blockmetoden (DBM) och finita elementmetoden (FEM). I blockmetoden delas strukturen in i ett antal diskreta block med krafter som verkar i alla kontakter mellan hörn och kanter. Kontaktkrafterna tillsammans med tyngdkraft och yttre anbringade krafter försätter blocken i rörelse. Blockens positioner och rådande kontaktkrafter vid olika tidsteg studeras interaktivt på bildskärm. De grundläggande ekvationerna för metoden behandlas och tre olika blockstrukturer analyseras. I varje blockstruktur kan följas blockens rörelse och motsvarande ändring av krafterna i kontaktpunkterna vid tilltagande deformation.

Tre olika modeller har testats med DBM; ett block i skjuvbox samt ett oregelbundet och ett regelbundet uppsprucket bergblock. Resultaten visar entydigt att förskjutningarna blir mjukare när blockens antal ökas för en och samma modell.

Finita elementmetoden, som är en datoranpassad beräkningsmetod liksom blockmetoden, innehåller speciella sprickelement för att beskriva deformationerna hos en sprucken bergmassa. FEM-modeller med två korsande sprickgrupper och varierande sprickavstånd har studerats vid enkel skjuvning. I modeller med stort sprickavstånd har de fasta blocken ett fåtal kontaktpunkter med höga spänningskoncentrationer i de fast blocken och i sprickorna. Modeller med litet sprickavstånd har en mjukare och mer följsam deformation; krafterna fördelas jämnare och spänningarna blir lägre både i fasta blocken och i sprickorna. Motsvarande resultat gäller om modellerna tilldelas tryckspänningar längs de fria

ränderna. Deformationsbilden är i stort sett densamma för en och samma modell som analyserats med DBM eller FEM.

För problemet med lokalisering av lager för radioaktivt avfall bör strävan vara att finna en lagomt uppsprucken (ca 1 spricka per m^2) bergplint omgiven av första ordningens stora strukturer. Detta tillåter en mjuk och följsam deformation vid tektoniska påkänningar. Sprickfrekvensen bör inte vara större för då minskar stabiliteten hos bergrummen och risken för grundvattenströmmar ökar.

SUMMARY

Simple shear is a common tectonics in nature. Stress distribution, deformations and failure of a rock mass in direct shear loading is examined. If the strength of the rock mass is in the form of the Coulomb-Navier criterion one set of tensile fractures and two sets of shear fractures arise. The sets of joints predicted by the theory have been used in the mathematical modelling.

Two computer models have been applied to the analysis of the jointed rock mass; the Discrete Block Method (DBM) and the Finite Element Method (FEM). DBM simulates the motion of a set of discrete blocks each one having the possibility of unlimited translation and rotation. Shear forces arise due to friction, damping forces are introduced to dissipate kinetic energy and contact forces and displacements are determined.

Three blocky rock models have been tested. One model simulates the deformation in a shear box. The two others simulates a regular and unregular jointed rock mass subjected to direct shear. Displacements and total deformation is more flexible as the number of blocks increases for one and the same model.

Finite element analysis of a jointed rock mass is presented. The rigid blocks are assumed to be of linear elastic material and the joints are simulated by means of joint elements. Square blocks of dimension 4 x 4 km are cut by two set of joints and the block is sheared an angle of 0.5° . In models with a large joint spacing the rigid blocks reach contact in few points under high stresses. Models with small joint spacing show a more gentle and flexible mode of deformation and the stresses are much lower. Models loaded along the edges behave similar.

Results of the DBM and FEM analysis in this study indicate that a suitable rock mass for repository of radioactive waste should be moderately jointed (about 1 joint/m²) and surrounded by shear zones of the first order. This allows for a gentle and flexible deformation under tectonic stresses and prevent the development of large cross-cutting failures in the repository area.

	INNEHÅLL	Sid
	SAMMANFATTNING	
	SUMMARY	
	FÖRORD	1
1	GEOLOGISK MODELL FÖR LOKALISERING AV AVFALLSLAGER I BERG	2
2	SPÄNNINGAR OCH BROTT VID ENKEL SKJUVNING AV BERGBLOCK	6
3	DISKRETA BLOCKMETODEN, DBM	14
3.1	Några antaganden om blockens rörelse	14
3.2	Programbeskrivning	15
3.3	Grundläggande ekvationer	17
3.4	Resultat	24
3.4.1	Skjuvbox	25
3.4.2	Bergmassa med godtycklig sprickorientering	31
3.4.3	Bergmassa med regelbunden sprickorientering och sprickfrekvens	36
3.5	Sammanfattning av resultaten	37
4	ANALYS AV BLOCKIGT BERG MED FINITA ELEMENTMETODEN	41
4.1	Beräkningsmodell	41
4.2	Materialmodeller	41
4.3	Beräkningsgången	46
4.4	Resultatredovisningen	46
4.5	En jämförande analys för modellerna 1:A och 4:A	48
4.6	Analys av sprickdeformationen i modell 5:A, sprickavstånd 0.2 km	53

	Sid	
4.7	Inverkan av initialspänningar	53
4.8	Slutsatser från FEM-analysen	54
5	REFERENSER	56
	BILAGOR	

FÖRORD

Detta projekt föreslogs första gången av Dr O Brotzen, LKAB, i samband med den av KBS arrangerade debattdagen 1977-02-04.

Sprickor i berggrunden diskuterades senare inom Geogruppen vid KBS och författaren lämnade en projektplan 1977-03-03.

Jag vill här rikta ett tack till bergsingenjör G Bäckblom, Luleå för arbetet att implementera P Cundalls diskreta blockmetod på högskolans NORD 10 - dator, utföra beräkningarna för modellerna som beskrivs i denna rapport och författa avsnittet om diskreta blockmetoden.

Finita elementanalyserna har utförts av civ ing Per Jonasson under ledning av tekn lic T Groth vid institutionen för bergteknik, KTH, Stockholm. Jag vill tacka för ett gott arbetsresultat under ett pressat tidsschema.

Gunilla Törnqvist har renskrivit rapporten, Monica Lövgren rensritat illustrationerna och Roland Lindfors utfört reproduktionsarbetet. Till alla vill jag rikta ett varmt tack.

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

1 GEOLOGISK MODELL FÖR LOKALISERING AV AVFALLSLAGER I BERG

Vid prospektering efter lämplig berggrund för lokalisering av lager för radioaktivt avfall har strävan varit att finna en sprickfattig, tät berggrund för att därmed begränsa strömningen av kontaminerat grundvatten kring avfallslagret. Denna strävan är korrekt med hänsyn till grundvattenströmningen, men innan den kan accepteras måste vi närmare utreda den sprickfattiga berggrundens egenskaper med hänsyn till de tektoniska krafterna.

Vi väljer att studera det fall att en av svaghetszonerna som omger bergplinten deformeras enligt ren skjuvning. En skjuvdeformation i horisontalplanet samt i vertikalplanet illustreras i Fig 1.2. Valet av deformationsmekanism är till viss del bestämt av de tvådimensionella beräkningsmetoder som vi förfogar över, d v s finita elementmetoden (FEM) och diskreta blockmetoden (DBM). En ren skjuvning är dock en vanligt förekommande tektonik i naturen. Den har vidare den fördelen att en av huvudspänningarna är en dragspänning. Dragspänningarna ger upphov till tensionsspalter (tension gashes) som är vanligt förekommande på bägge sidor om skjuvzoner.

Genom att införa tredimensionella beräkningsmetoder med möjlighet att beskriva olika brottvillkor i modellen finns det möjlighet att simulera alla de principiella förkastningsmekanismerna (normal-, slip-dip och wrench) för olika förhållande på belastningarna σ_1 , σ_2 och σ_3 och därur studera den uppkomna sprickbilden. Vi har i stället valt att tilldela modellerna givna sprickgeometrier och studerat inverkan av ändrad sprickfrekvens, orientering och sprickegenskaper.

En analys lämnas av spänningstillståndet och brottbilden vid enkel skjuvning av ett bergblock. Under antagande att bergmassan ansluter sig till Coulomb-Naviers brottkriterium så

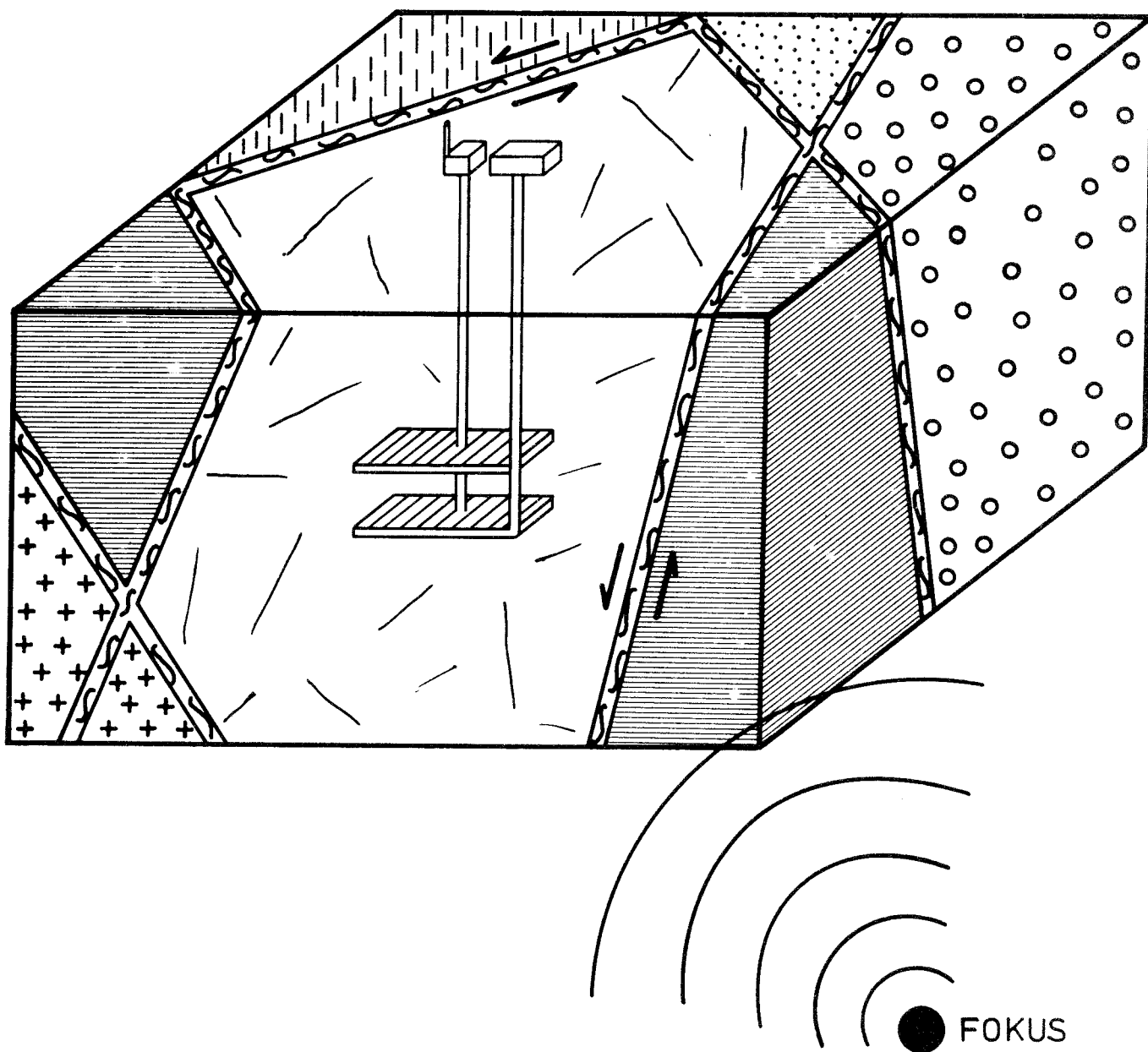
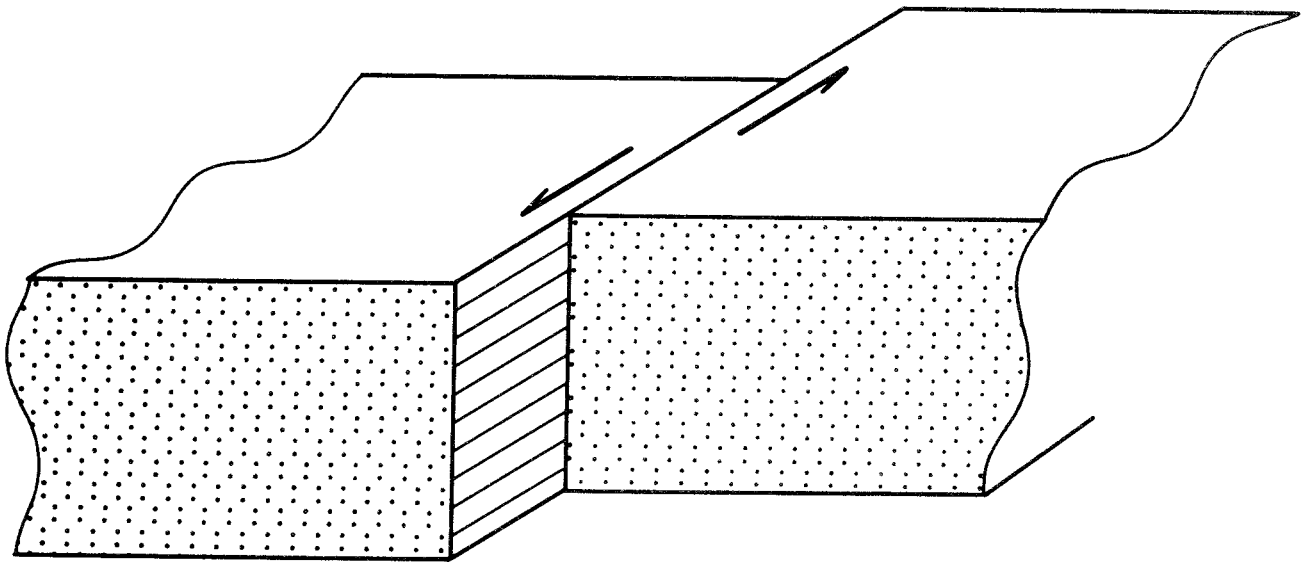
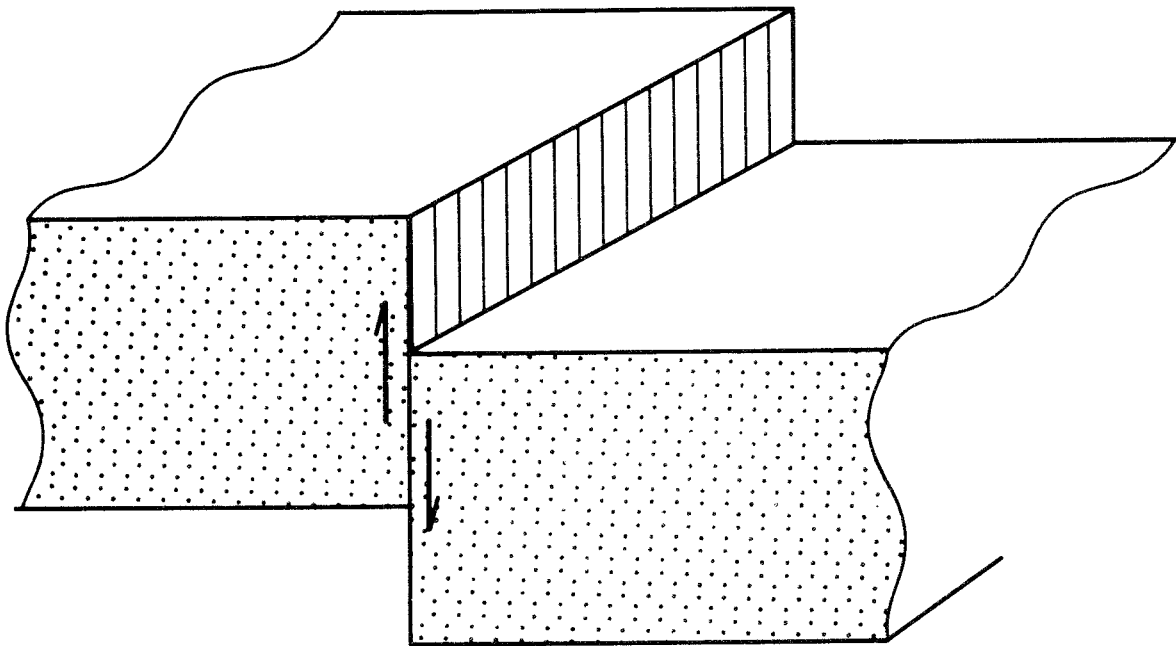


Fig 1.1 Hypotetisk modell av avfallslager i berggrundsblock omgivet av svaghetszoner av första ordningen



A



B

Fig 1.2 Ren skjuvning av berggrundsblock; (A) i horisontalled; (B) i vertikalled

alstras tre olika sprickgrupper vid skjuvningen; en grupp drag-sprickor och två grupper skjuvsprickor. Denna situation studeras med hjälp av diskreta blockmetoden (DBM). I en grupp modeller har vi valt att studera endast ena halvan av en skjuvzon. Skjuvkrafterna har påförts modellen genom att tilldela materialet, som gränsar mot skjuvzonen, en given kraft eller förskjutning i en riktning parallellt med skjuvzonen. Denna analys har utförts med FEM och DBM för olika avstånd mellan sprickorna. Slutligen analyseras en oregelbundet uppsprucken modell med DBM.

2 SPÄNNINGAR OCH BROTT VID ENKEL SKJUVNING AV BERGBLOCK

Spänningsfördelningen, deformationerna samt brottbilden vid enkel skjuvning av bergmaterial med och utan sprickor har behandlats av Lajtai (1969), Jaeger (1971), Kutter (1971) och Goodman (1976). Den följande framställningen av spänningstillståndet i ett skjuvat bergblock och de bildade sprickorna grundar sig på arbeten av Lajtai (1969).

Spänningstillståndet i ett bergblock som tagits från en skjuvzon med homogent, massformigt berg visas i Fig 2.1 A. Spänningarna som uppträder på ett plan som bildar vinkeln θ med horisontalplanet kan delas upp i en normalkomponent (σ) och en skjuvkomponent (τ). Vid jämvikt hos det kolformade elementet, Fig 2.1 B, får spänningarna formen

$$\sigma = \frac{\sigma_a}{2} + \frac{\sigma_a}{2} \cos 2\theta - \tau_a \sin 2\theta \quad (2.1)$$

$$\tau = \frac{\sigma_a}{2} \sin 2\theta - \tau_a \cos 2\theta \quad (2.2)$$

Den största och minsta huvudspänningen är bestämd av

$$\frac{d\sigma}{d\theta} = 0 = -\sigma_a \sin 2\theta_{1,3} - 2\tau_a \cos 2\theta_{1,3}$$

från vilket följer

$$\tan 2\theta_{1,3} = -\frac{2\tau_a}{\sigma_a} \quad (2.3)$$

Huvudspänningarna kommer att vara riktade med ca 45° vinkel mot horisontalplanet vid skjuvningen. Eftersom det inte heller förekommer någon normalspänning på plan som är parallella med belastningsriktningen för σ_a blir en av huvudspänningarna en dragspänning. Detta framgår också ur FEM-analysen av Kutter (1971).

Under antagandet att skjuvhållfastheten hos bergmaterialet är en funktion av normalspänningen kan vi välja ett linjärt sam-

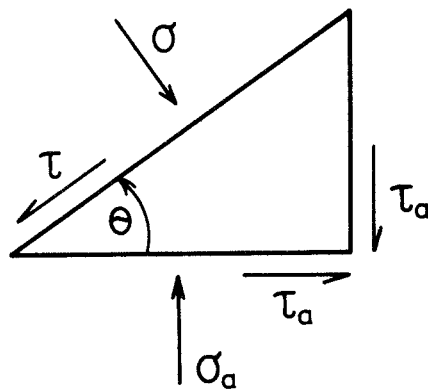
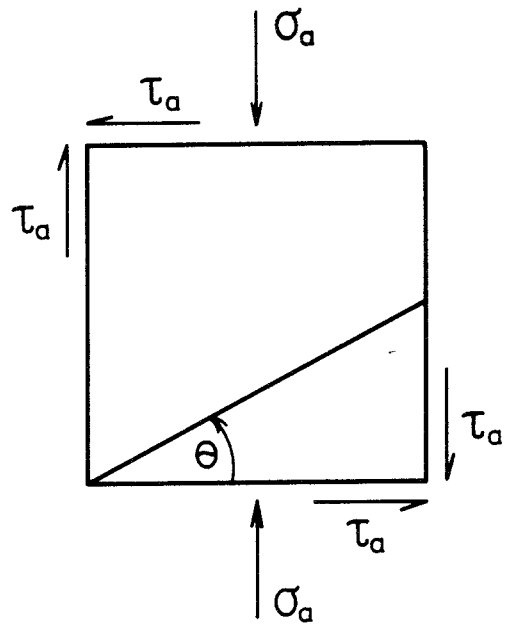


Fig 2.1 Spänningstillståndet hos ett kilformat element från ett bergblock

band enligt Coulomb-Naviers brottvillkor. Brott inträffar i bergmaterialet om

$$|\tau_m| \geq S_0 + \sigma \tan \varphi_i \quad (2.4)$$

där $|\tau_m|$ är absoluta beloppet på skjuvspänningarna, S_0 kohesionen, σ normalspänningen och φ_i inre friktionsvinkeln.

Enligt Coulomb-Naviers brottvillkor så bildar planen för minsta skjuvmotståndet vinkeln $\pm(45^\circ - \frac{\varphi_i}{2})$ med riktningen för största huvudspänningen. Vid ren skjuvning skall skjuvbrotten bilda vinklarna

$$\alpha_1 = \theta_3 - (45^\circ - \varphi_i/2)$$

och/eller

$$\alpha_2 = \theta_3 + (45^\circ - \varphi_i/2)$$

Under antagandet att bergartens draghållfasthet, T_s , underskrider värdet på minsta huvudspänningen, σ_3 , bildas dragbrott vinkelrätt mot σ_3 med vinkeln θ_3 mot horisontalplanet. Teoretiskt finner vi således att för ett bergblock som skjuvas längs ett skjuvplan (skjuvzon) under inverkan av en normalspänning σ_a och skjuvspänningen τ_a bildas tre olika sprickor,

1. dragsprickor i riktning θ_3
2. skjuvsprickor i riktning α_1
3. skjuvsprickor i riktning α_2

Detta illustreras i Fig 2.2 för ett bergblock som skjuvas längs en skjuvzon 4. Alla tre sprickriktningarna är emellertid bestämda av spänningstillståndet så att

$$\theta_a = f(\tau_a, \sigma_a)$$

och

$$\alpha_{1,2} = f(\tau_a, \sigma_a)$$

En samtidig utveckling av alla tre sprickgrupperna är teoretiskt möjligt men mindre sannolikt. Skjuvförsök i laboratorium visar att dragsprickorna är de som först utvecklas och ofta helt dominerar sprickbilden. När väl dragsprickorna har utvecklats så störs det ursprungliga spänningstillståndet och drag- eller skjuvsprickor med avvikande riktning kan bildas.

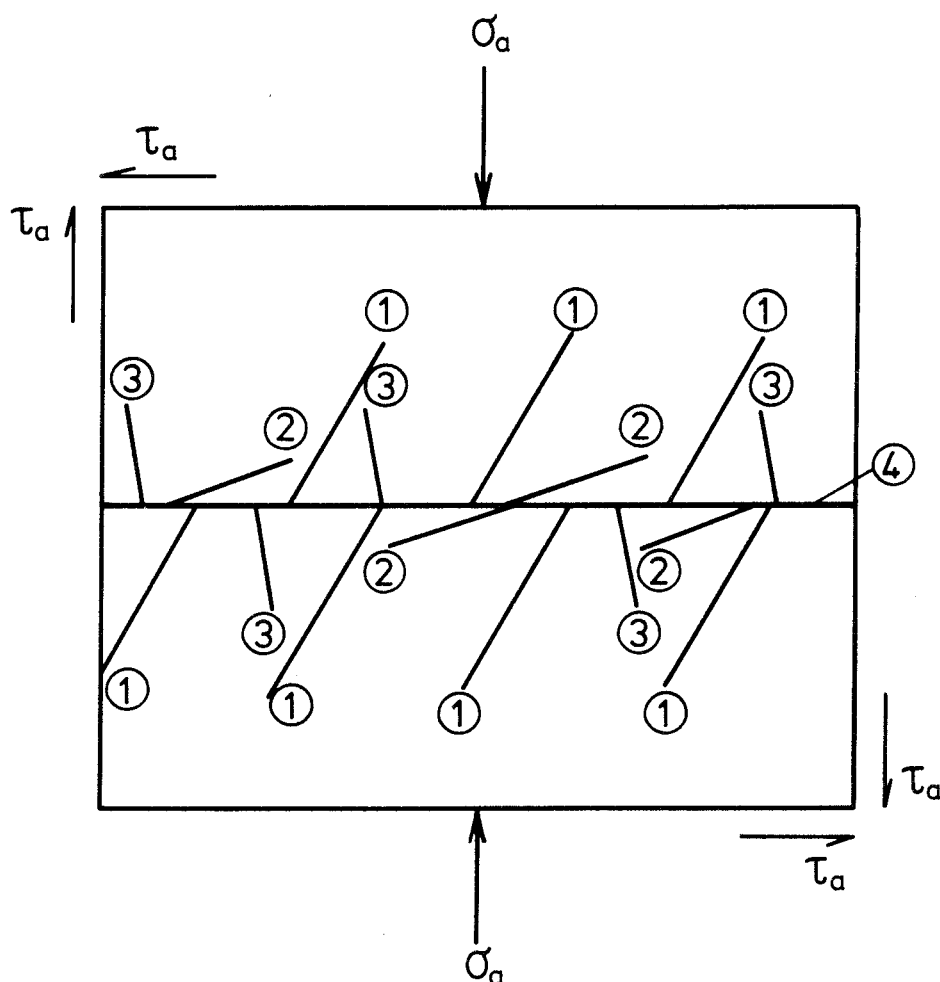


Fig 2.2 Utvecklingen av tre sprickgrupper vid enkel skjuvning. Sprickgrupp 1 är dragsprickor, 2 och 3 skjuvsprickor

Det totala motståndet mot skjuvning hos en bergmassa som består av bergblock omgivna av sprickor kan ses som summan av kohesionen, inre friktionen hos de fasta bergblocken samt friktionen längs sprickorna. Vi skall återkomma till det längre fram. Det enklaste fallet existerar när inget av friktionsmotstånden i bergblocken eller sprickorna mobiliseras för att bilda den första sprickan. Kohesionen är den lägsta hållfastheten hos bergmassan som har betydelse vid analysen av skjuvzoner. Vi antar därför att brott inträffar i bergmassan när den minsta huvudspänningen överskrider draghållfastheten, T_s , för de ingående bergblocken. Tillämpar vi Mohrs cirklar för spänningsanalysen kan vi uttrycka brottvillkoret på den allmänna formen

$$\tau_a = f(T_s, \sigma_a) \quad (2.5)$$

Huvudspänningarna uppträder i plan som är definierade av ekvation (2.3). Av detta samband kan vi bestämma

$$\sin 2\theta_{1,3} = \frac{-2\tau_a}{(\sigma_a^2 + 4\tau_a^2)^{1/2}} \quad (2.6)$$

och

$$\cos 2\theta_{1,3} = \frac{\sigma_a}{(\sigma_a^2 + 4\tau_a^2)^{1/2}} \quad (2.7)$$

som insatt i ekvation (2.1) och med substitutionen av T_s för σ ger sambandet

$$\tau_a = [T_s(T_s - \sigma_a)]^{1/2} \quad (2.8)$$

Detta samband definierar parabeln för enkel skjuvning i $\tau_a - \sigma_a$ -planet som visas i Fig 2.3. Av detta följer att bägge intercepten $\tau_a = 0$ och $\sigma_a = 0$ är numeriskt lika med T_s

$$\tau_0 = T_s$$

$$\sigma_0 = T_s$$

Enligt ekvation (2.8) ökar skjuvhållfastheten vid ökad normalspänning men betydligt långsammare än fallet med Coloumb-Naviers brottvillkor. Detta förhållande samt en jämförelse med Griffith brottvillkor samt situationen vid ren skjuvning visas i Fig 2.3. Det paraboliska brottvillkoret, ekvation (2.8) återger förhållandet vid brott i ren skjuvning där den minsta huvudspänningen är en dragspänning och lika stor som bergblockens draghållfasthet.

Det är också fullt möjligt att förutsäga den vinkel som dragsprickan kommer att bilda med riktningen på skjuvzonen. Eftersom dragsprickan bildas vinkelrätt mot den minsta huvudspänningen är riktningen bestämd av sambandet

$$\tan 2\theta_{1,3} = -\frac{2\tau_a}{\sigma_a} \quad (2.3)$$

Insatt ekvation (8) i ekvation (3) fås

$$\tan 2\theta_{1,3} = \frac{-2[\tau_s(\tau_s - \sigma_a)]^{1/2}}{\sigma_a}$$

Av detta framgår att dragsprickans riktning roterar vid ändring av σ_a , från 0° till 90° då σ_a ökar från $\sigma_a = \tau_s$ till $\sigma_a \rightarrow \infty$, Fig 2.4.

Brottvillkoret för enkel skjuvning har tillämpats vid generering av sprickorna i bergmassan. Därefter har vi tillämpat FEM och DBM för att analysera krafter och förskjutningar i den uppspruckna bergmassan. Med DBM har vi studerat krafter och förskjutningar vid skjuvning av en sprucken bergmassa där sprickorna alstrats för fallet

$$\begin{aligned} \sigma_a &= 0 \\ \tau_a &> 0 \\ \varphi_i &= 50^\circ \end{aligned}$$

vilket ger sprickriktningarna $\theta_3 = 45^\circ$, $\alpha_1 = 25^\circ$ och $\alpha_2 = 70^\circ$ räknat från skjuvzonens plan.

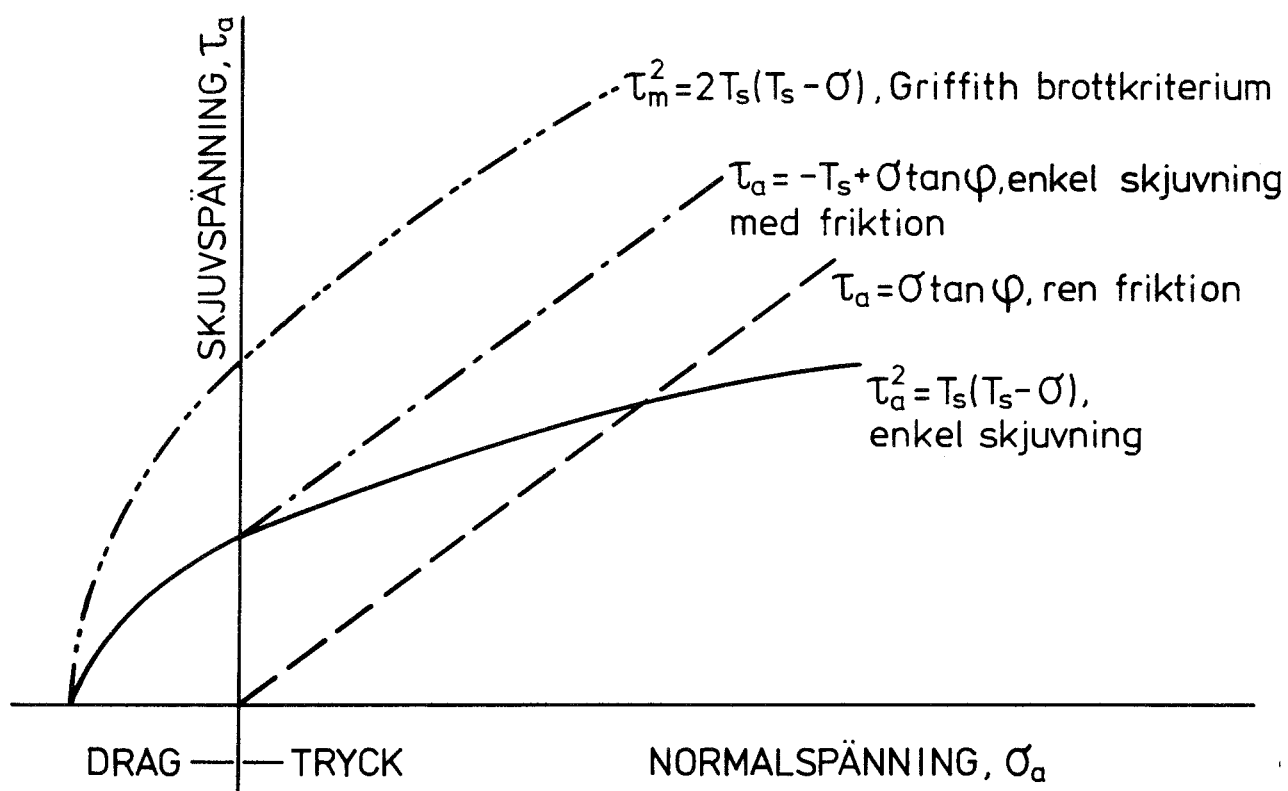


Fig 2.3 Olika brottvillkor för bergmaterial. Parabeln för enkel skjuvning behandlas ingående i denna framställning

Med FEM och DBM har vi vidare studerat bergmassan på en sida om skjuvzonen för sprickvinkeln, $\theta_3 = 45^\circ$ och normalspänningen $\sigma_a \approx 0$, och under antagandet att skjuvzonen utsatts för en fram- och återgående skjuvrörelse.

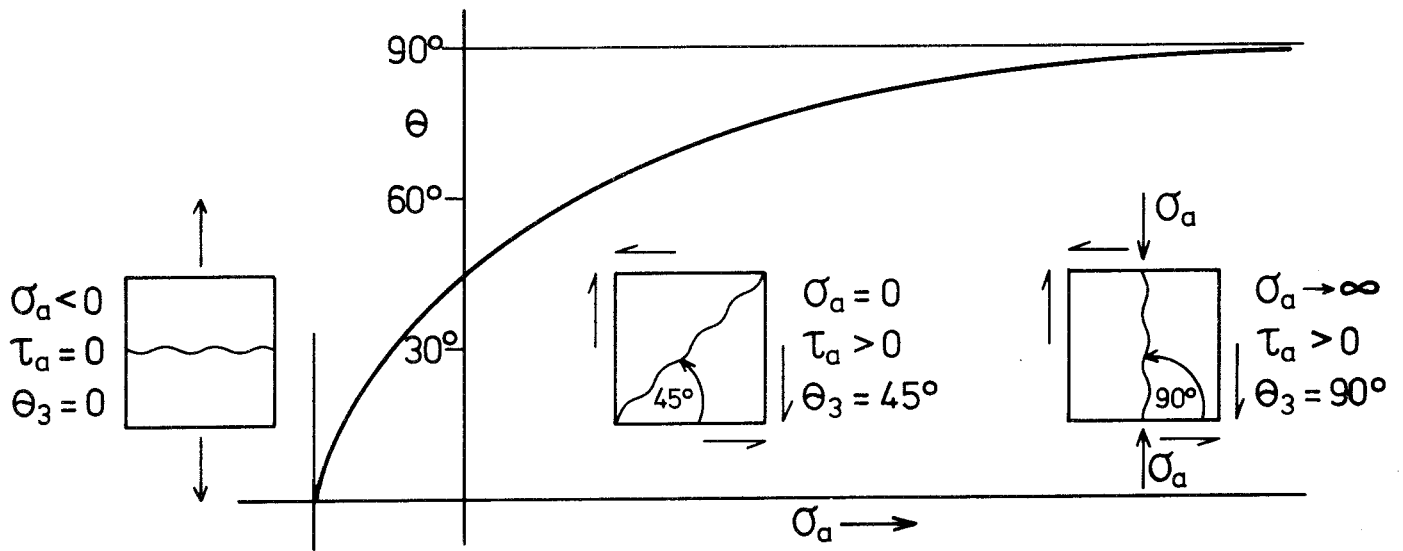


Fig 2.4 Brott villkoret vid enkel skjuvning. Dragsprickans orientering vid olika normalspänning illustreras

3 DISKRETA BLOCKMETODEN

Diskreta blockmetoden (DBM) är en explicit finit differensmetod anpassad för att studera stora rörelser i blockigt berg. DBM utvecklades i början av 70-talet av Peter Cundall (1971) och har sedan dess varit föremål för fortsatt utveckling.

Användningsområdena är många. Nuvarande programversion vid Avd för Bergmekanik, Högskolan i Luleå, kan tillämpas på bl a släntstabilitet och tunnelförstärkning, men har potentiell användning även för berg- och mineraltekniska problem, Bäckblom (1977).

Bland programmets fördelar kan nämnas:

- hög interaktivitet mellan dator och användare = stora styrningsmöjligheter
- klarar godtyckliga, plana bergstrukturer
- icke-linjära sprickegenskaper kan lätt implementeras
- randvillkor kan lätt definieras och ändras under exekvering
- förskjutningar och krafter kan följas på bildskärm under exekvering

3.1 Några antaganden om blockens rörelse

De algoritmer som styr bergblockens interaktion, translation och rotation grundar sig på följande antaganden:

För måttliga spänningar antas att blockdeformationer till övervägande del sker vid ytan och att blocken i övrigt kan betraktas som stela.

För måttliga spänningar gäller att två bergblock skilda av en spricka är i kontakt endast i ett fåtal punkter, kontaktpunkter (eng asperities).

Det sista antagandet innebär att krafter och förskjutningar endast tillåts verka i kontaktpunkterna.

I DBM behandlas varje hörn som en kontaktpunkt och situationen blir som visas i Fig 3.1, där varje +-tecken anger hörnen hos blocken.

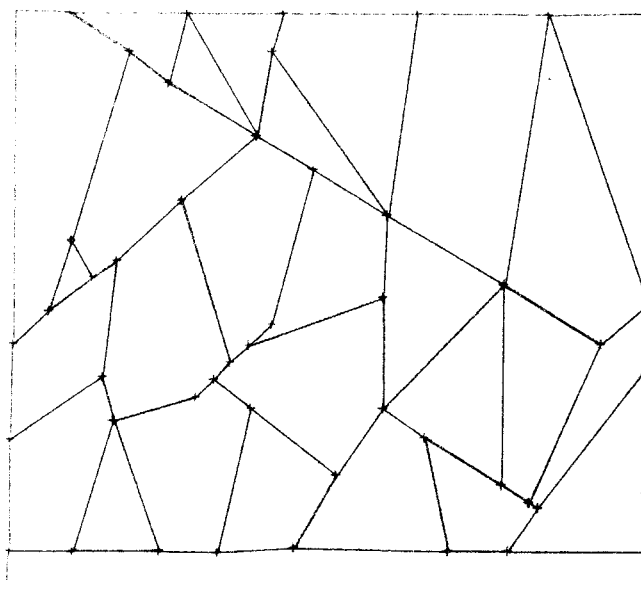


Fig 3.1 Blockstruktur
Systemets kontaktpunkter är försedda med ett +-tecken

Ansatsen att diskretisera kontaktkrafterna till ett fåtal punkter är fysikaliskt lika rimlig som att sprida ut krafterna längs en plan randyta och därmed erhålla en spänningsfördelning.

3.2 Programbeskrivning

Programmet söker fram alla kontakter mellan hörn och kanter i strukturen och beräknar kontaktkrafterna. Dessa fås som produkten av hörnens inträngning genom kanten och blockets styvhetsfaktor. Eftersom en bergmassa i rörelse förlorar energi (kinetisk energi övergår till värme) finns dämpnings-

krafter i kontaktpunkterna för att ackumulera kinetisk energi. Alla kontaktkrafter för ett block adderas tillsammans med tyngdkraft och yttre anbringade krafter.

Kraftsumman dividerad med blockets massa multipliceras med ett tidsinkrement (integrering av Newton's andra lag) och blockets translations- och rotationshastighet erhålles. Dessa integreras med samma tidsinkrement och förskjutning och rotation för blocket erhålles. Samtliga block går igenom denna beräkningscykel och efter tidsinkrementet har - om inte jämvikt uppnåtts - blocken intagit nya positioner. Då bildas naturligtvis nya kontaktkrafter och cykeln upprepas enligt det schema som visas i Fig 3.2.

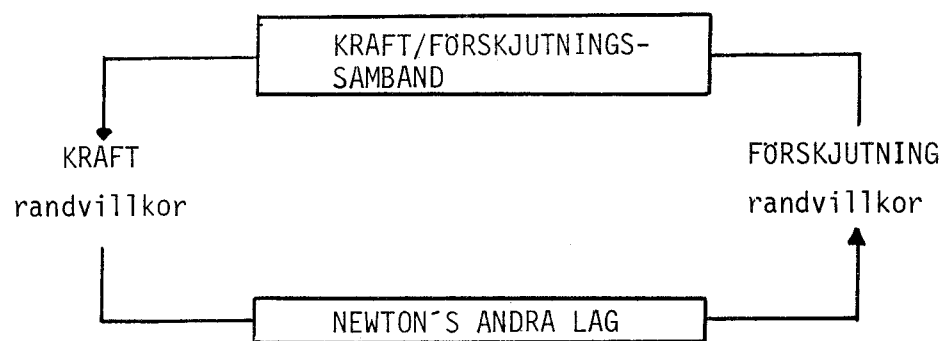


Fig 3.2 Beräkningscykel vid DBM

Som tidigare nämnts har programmet hög interaktivitet. En grafisk bildskärm försedd med ett rörligt elektriskt hårkors ger användaren möjlighet att via tangentbordet rita upp en önskad blockstruktur. När strukturen är klar och eventuella felaktiga linjer har ändrats kan användaren fortsätta i programmets nästa fas. Den fasen tolkar slutna områden som diskreta block och tilldelar dessa area, tyngdpunkt och tröghetsmoment.

Överflödiga block kan suddas ut. Programmet övergår sedan till den dynamiska beräkningen. Med jämna tidsintervall har använ-

daren möjlighet att "frysa" förloppet och få bilder av aktuella blockpositioner samt få krafter uppritade på skärmen. Låsstenar kan tas bort - suddas ett block; nya randvillkor kan definieras - fixera eller frigör block, lägg på eller ta bort yttre krafter; friktionsvinkeln för sprickorna kan ändras och dess inverkan på stabiliteten kan studeras.

3.3 Grundläggande ekvationer

De inkrementella förskjutningarna och rotationerna erhålls från ekvationerna (3.1) och (3.2). Teckenförklaring framgår av Fig 3.3 och Fig 3.4 och alla krafter och förskjutningar redovisas positivt definierade.

$$\Delta u_y^c = \Delta u_y^i - \Delta u_y^j + \Delta \theta^i (x^c - x^i) - \Delta \theta^j (x^c - x^j) \quad (3.1)$$

$$\Delta u_x^c = \Delta u_x^i - \Delta u_x^j - \Delta \theta^i (y^c - y^i) + \Delta \theta^j (y^c - y^j) \quad (3.2)$$

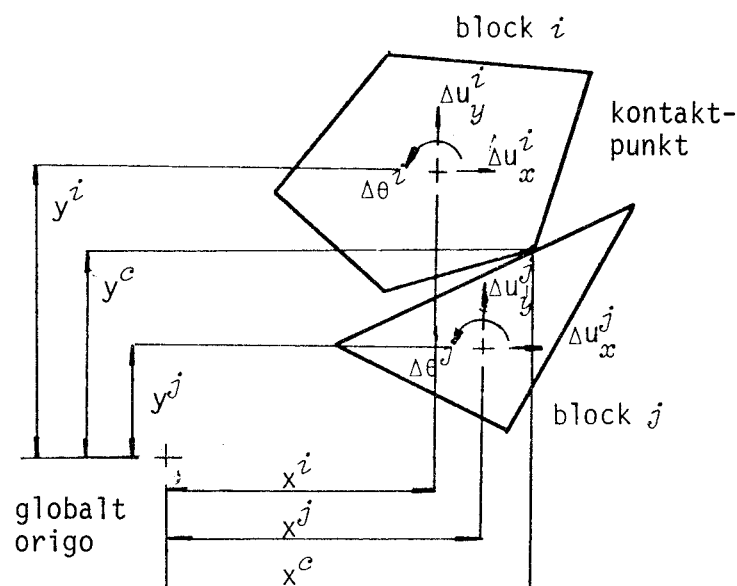


Fig 3.3 Inkrementella förskjutningar och rotationer

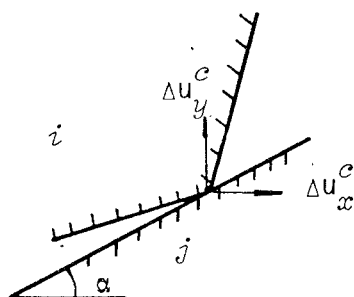


Fig 3.4 Relativa, inkrementella förskjutningar i x- och y-riktningen

Relativa, inkrementella normal- och skjuvförskjutningar av block i relativt block j ges av sambanden (3.3) och (3.4), se Fig 3.5.

$$\Delta u_s^c = \Delta u_x^c \cos \alpha + \Delta u_y^c \sin \alpha \quad (3.3)$$

$$\Delta u_n^c = \Delta u_y^c \cos \alpha - \Delta u_x^c \sin \alpha \quad (3.4)$$

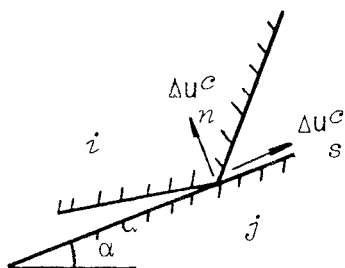


Fig 3.5 Relativa, inkrementella normal- och skjuvförskjutningar

Normal- och skjuvkrafter för kontakten ges av ekvationerna (3.5) - (3.8), se Fig 3.6.

$$F_n^c \leftarrow F_n^c - \Delta u_n^c \cdot k_n \quad (3.5)$$

$$F_s^c \leftarrow F_s^c + \Delta u_s^c \cdot k_s \quad (3.6)$$

$$D_n^c = - \Delta u_n^c \cdot K_n \quad (3.7)$$

$$D_s^c = \Delta u_s^c \cdot K_s \quad (3.8)$$

där

k_n = normalstyvheten

k_s = skjuvstyvheten

K_n = dämpningskonstant i normalriktningen

K_s = dämpningskonstant i skjuvriktningen

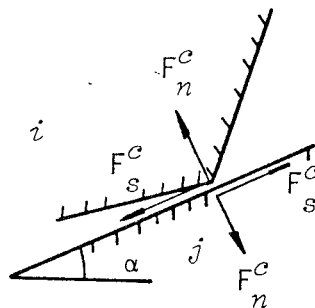


Fig 3.6 Normal och skjuvkrafter för kontakten

Notera följande:

- i) symbolen \leftarrow betyder "ersätts med"
- ii) dämpningskrafterna D , verkar på samma sätt som krafterna, F
- iii) för ovanstående ekvationer gäller följande

Om $F_n^c < 0$ så gäller

$$\left. \begin{array}{l} F_c^n = 0, D_n^c = 0 \\ F_s^c = , D_s^c = 0 \end{array} \right\} \text{(ingen draghållfasthet i kontakten)}$$

Om $|F_s^c| > \mu \cdot F_n^c$ så gäller

$$F_s^c \leftarrow \mu \cdot F_n^c \cdot \text{sign} [F_s^c] \quad (\text{friktionslagen})$$

$$D_s^c = 0 \quad (\text{ingen dämpning vid glidning})$$

Dessa krafter överförs till globala x- och y-riktningar av sambanden (3.9) - (3.12), se Fig 3.7.

$$F_y^{cj} = (F_s^c + D_s^c) \sin\alpha - (F_n^c + D_n^c) \cos\alpha \quad (3.9)$$

$$F_x^{cj} = (F_s^c + D_s^c) \cos\alpha - (F_n^c + D_n^c) \sin\alpha \quad (3.10)$$

$$F_y^{ci} = - F_y^{cj} \quad (3.11)$$

$$F_x^{ci} = - F_x^{cj} \quad (3.12)$$

Genom att nu addera samtliga bidrag från block i :s kontakter, samt addera tyngdkraft och yttre krafter erhålls sambanden (3.13) - (3.15), se Fig 3.8.

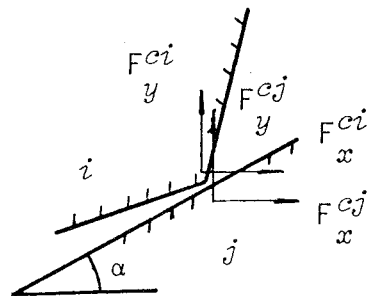


Fig 3.7 Normal- och skjuvkrafter i globala riktningar

$$F_{x\text{sum}}^i = \sum_c F_x^{ci} + F_{x\text{load}}^i \quad (3.13)$$

$$F_{y\text{sum}}^i = \sum_c F_y^{ci} + F_{y\text{load}}^i + F_{y\text{grav}}^i \quad (3.14)$$

$$M_{\text{sum}}^i = \sum_c \{F_y^{ci}(x^c - x^i) - F_x^{ci}(y^c - y^i)\} \quad (3.15)$$

där

\sum_c = summering över alla kontaktpunkter för block i

$F_{x\text{load}}^i$ = pålagd kraft i x-led

$F_{y\text{load}}^i$ = pålagd kraft i y-led

$F_{y\text{grav}}^i$ = tyngdkraft

Motsvarande ekvationer gäller naturligtvis även för block j

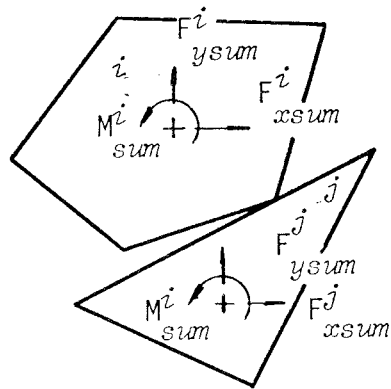


Fig 3.8 Kraft- och momentsummor verkande på block i och block j

Newtons andra lag kan nu tillämpas och hastigheter och förskjutningar erhålls med numerisk integration, ekvationerna (3.16) - (3.24) och Fig 3.9.

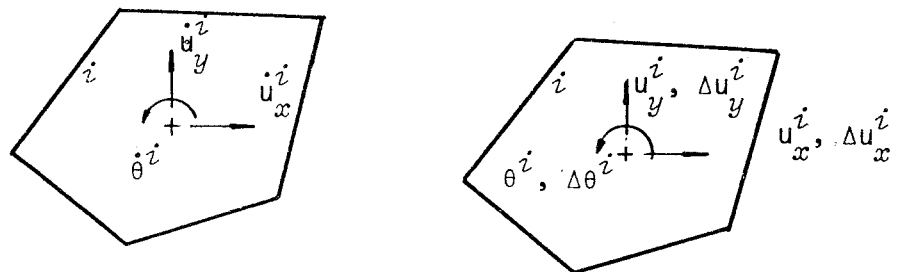


Fig 3.9 Hastigheter och förskjutningar för block i

$$\dot{u}_j^i \leftarrow \dot{u}_y^i + \frac{F_{y\text{sum}}^i}{m^i} \cdot \Delta t \quad (3.16)$$

$$\dot{u}_x^i \leftarrow \dot{u}_x^i + \frac{F_{x\text{sum}}^i}{m^i} \cdot \Delta t \quad (3.17)$$

$$\dot{\theta}^i \leftarrow \dot{\theta}^i + \frac{M_{\text{sum}}^i}{I^i} \cdot \Delta t \quad (3.18)$$

$$\Delta u_y^i = \dot{u}_y^i \cdot \Delta t \quad (3.19)$$

$$\Delta u_x^i = \dot{u}_x^i \cdot \Delta t \quad (3.20)$$

$$\Delta \theta^i = \dot{\theta}^i \cdot \Delta t \quad (3.21)$$

$$u_y^i \leftarrow u_y^i + \Delta u_y^i \quad (3.22)$$

$$u_x^i \leftarrow u_x^i + \Delta u_x^i \quad (3.23)$$

$$\theta^i \leftarrow \theta^i + \Delta \theta^i \quad (3.24)$$

där

Δt = tidsinkrement

m^i = massa, block i

I^i = tröghetsmoment, block i

Liknande ekvationer gäller för block j .

Vi har nu gått runt i beräkningscykeln, Fig 3.2 och har erhållit de inkrementella förskjutningarna som krävs för ekvationerna (3.1) och (3.2).

Kopplingen mellan de globala och lokala koordinatsystemen bestäms av sambanden (3.25) och (3.26), Fig (3.10).

$$X_G = X_C + X_L \cdot \cos\theta - Y_L \cdot \sin\theta \quad (3.25)$$

$$Y_G = Y_C + X_L \cdot \sin\theta + Y_L \cdot \cos\theta \quad (3.26)$$

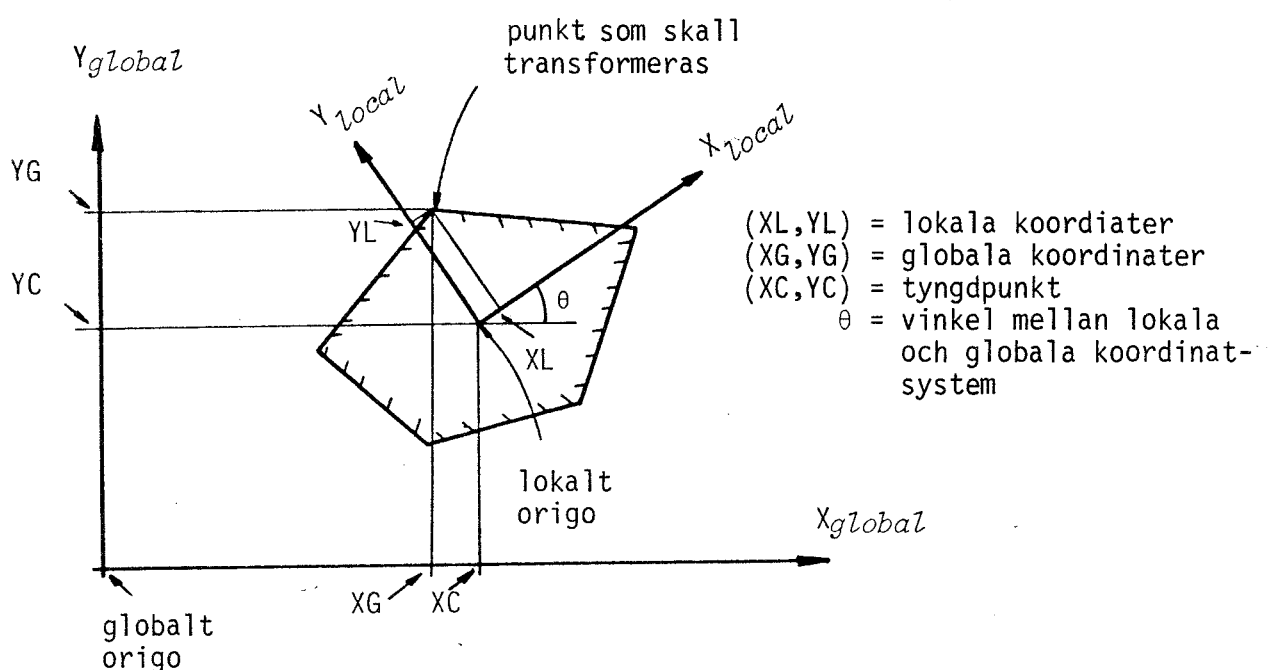


Fig 3.10 Globala och lokala koordinatsystem

3.4 Resultat

Resultaten från tre testexempel redovisas. Det första exemplet är en "skjuvbox". En från början relativt homogen bergmassa uppdelas i allt fler sprickgrupper; krafter och deformationer studeras.

Det andra exemplet illustrerar hur deformationerna sker i en bergstruktur med godtycklig sprickorientering.

Det sista exemplet visar en struktur med regelbunden sprickfrekvens och sprickorientering.

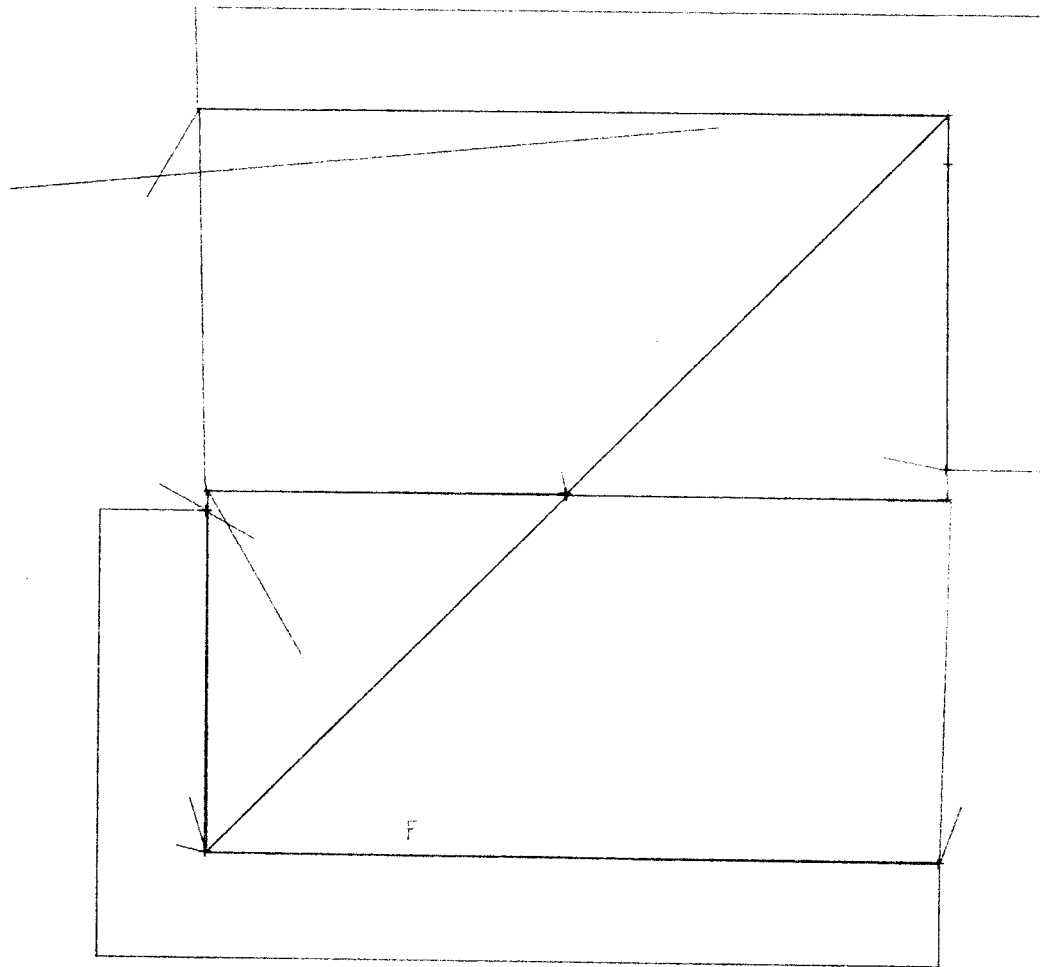
3.4.1 Skjuvbox

För exemplet med skjuvbox, Fig 3.11 t o m Fig 3.15 gäller:

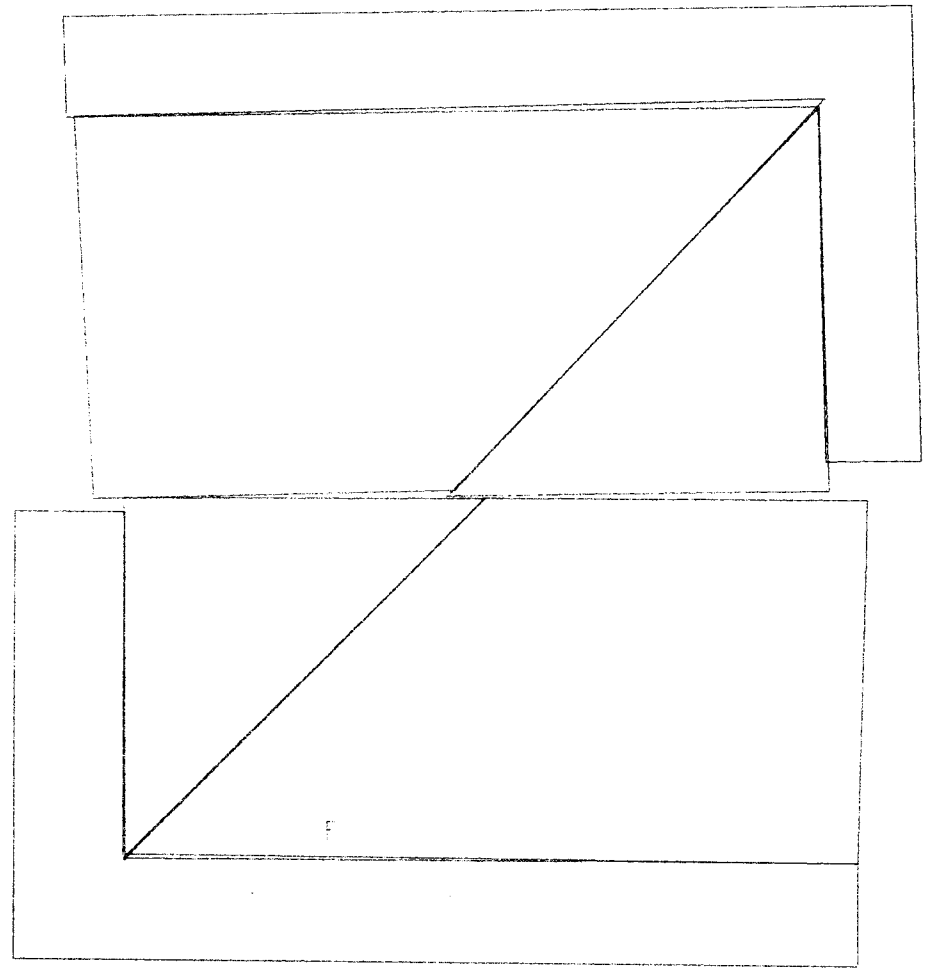
- översta blocket tilldelas en till största delen horisontellt riktad kraft. Kraften angriper i tyngdpunkten och är riktad mot vänster.
- understa blocket fixeras. (Notera F-tecknet vid tyngdpunkten)
- kontaktkrafterna är riktigt skalade i förhållande till pålagd last
- samtliga sprickor har friktionsvinkeln 30°

I det första exemplet, Fig 3.11, introduceras två sprickor, en horisontell och en riktad 45° mot horisontalplanet. I Fig 3.11A visas krafter och deformationer efter 110 tidssteg. Av Fig 3.11B, där deformationerna är tio gånger förstörade, framgår hur det förskjutna blocket strävar efter att rotera blocken som vilar på den horisontella sprickan. Tyvärr är några kontaktkrafter parallella med sprickorna och kan därför inte studeras. Kraftkoncentrationerna utbildas vid det låsta blockets övre högra hörn och vid den horisontella sprickans vänstra del. De övre blocken drar med sig de undre p g a friktionen och törnar emot det låsta blockets rand. Små krafter uppträder mot det låsta blockets hörn som ett resultat av den pålagda vertikala kraften. I Fig 3.12 introduceras ytterligare sprickor, fortfarande ställda 45° mot horisontalplanet.

Enligt Fig 3.12B uppvisar strukturen samma beteende som i föregående exempel. De övre blocken roterar samtidigt som de "gnuggas" mot varandra och mot den horisontella sprickan. Kraftkoncentrationer uppstår vid den horisontella sprickans vänstra del, men även runt kanten av det pådrivande blocket. Krafterna i strukturens övre högra del är märkbart större än i dess vänstra del.

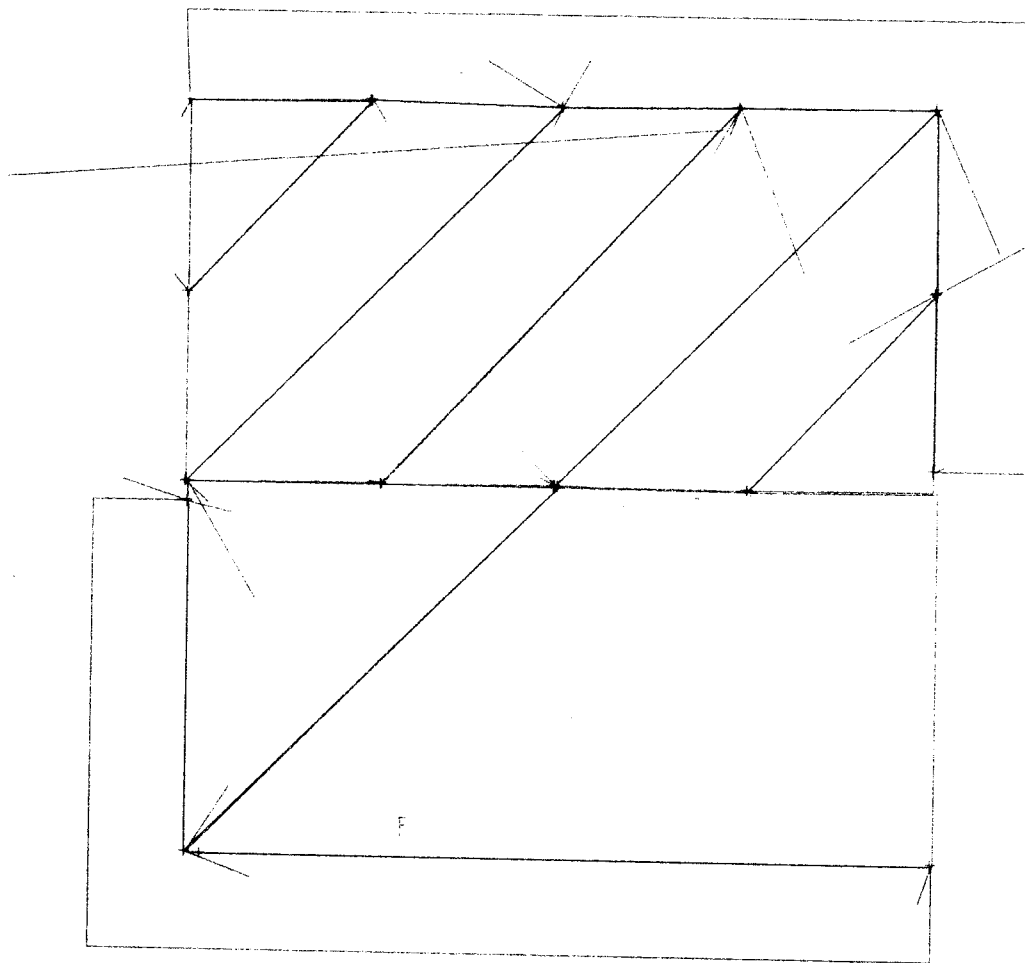


A

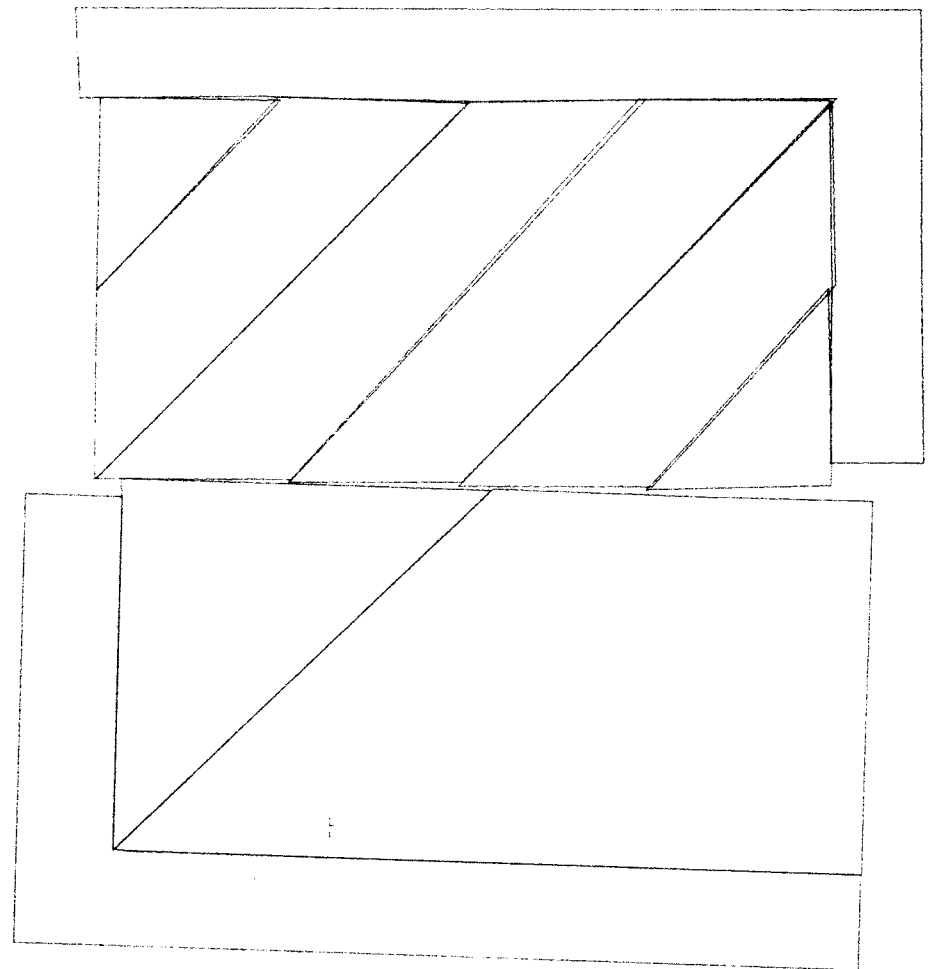


B

Fig 3.11 Skjuvbox med två sprickor
 A: Krafter och förskjutningar
 B: Förskjutningar tio gånger förstorade

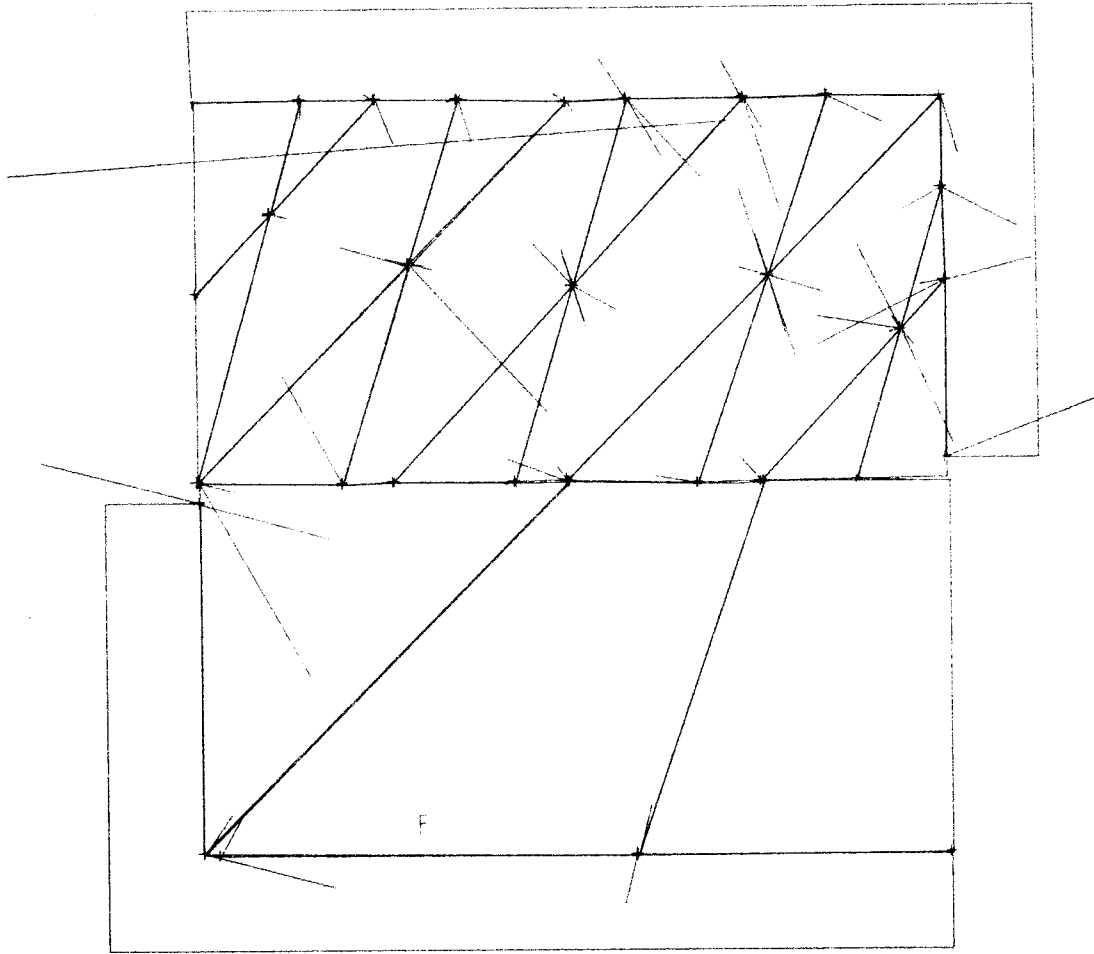


A

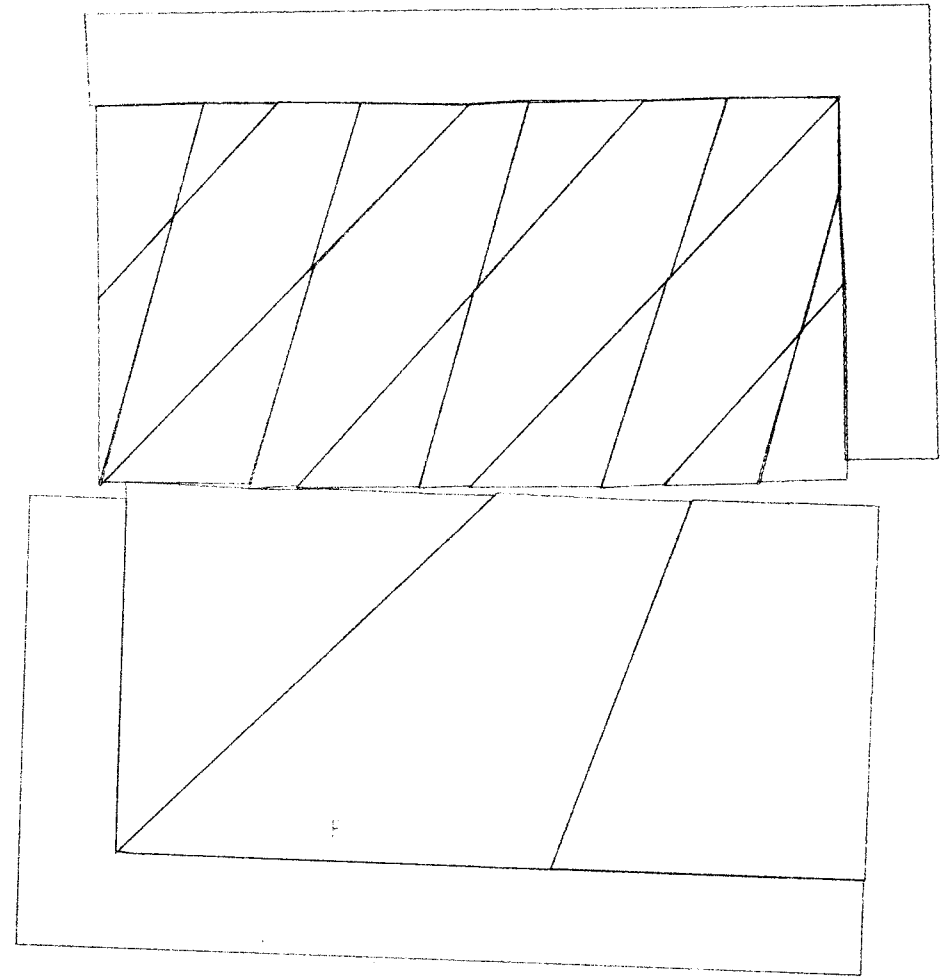


B

Fig 3.12 Skjuvbox med två sprickgrupper
 A: Krafter och förskjutningar
 B: Förskjutningar tio gånger förstörade



A



B

Fig 3.13 Skjuvbox med tre sprickgrupper
 A: Krafter och förskjutningar
 B: Förskjutningar tio gånger förstorade

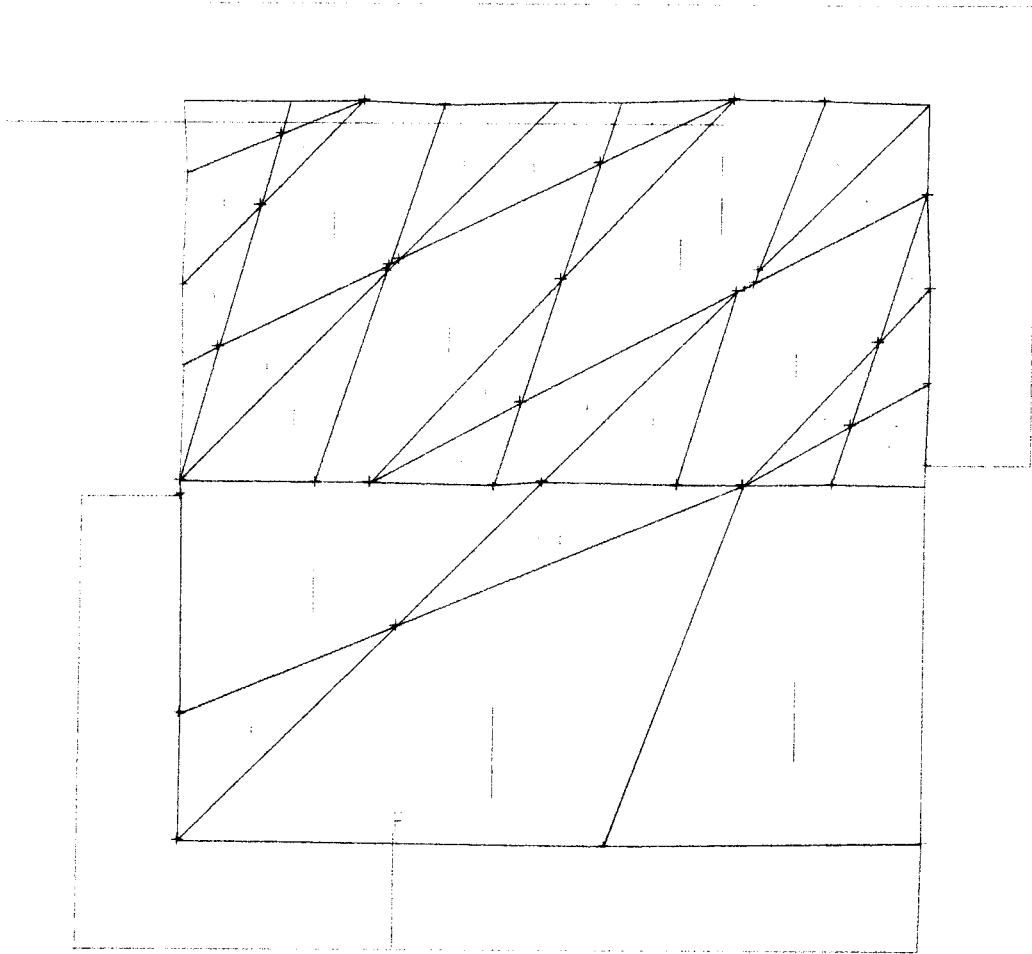
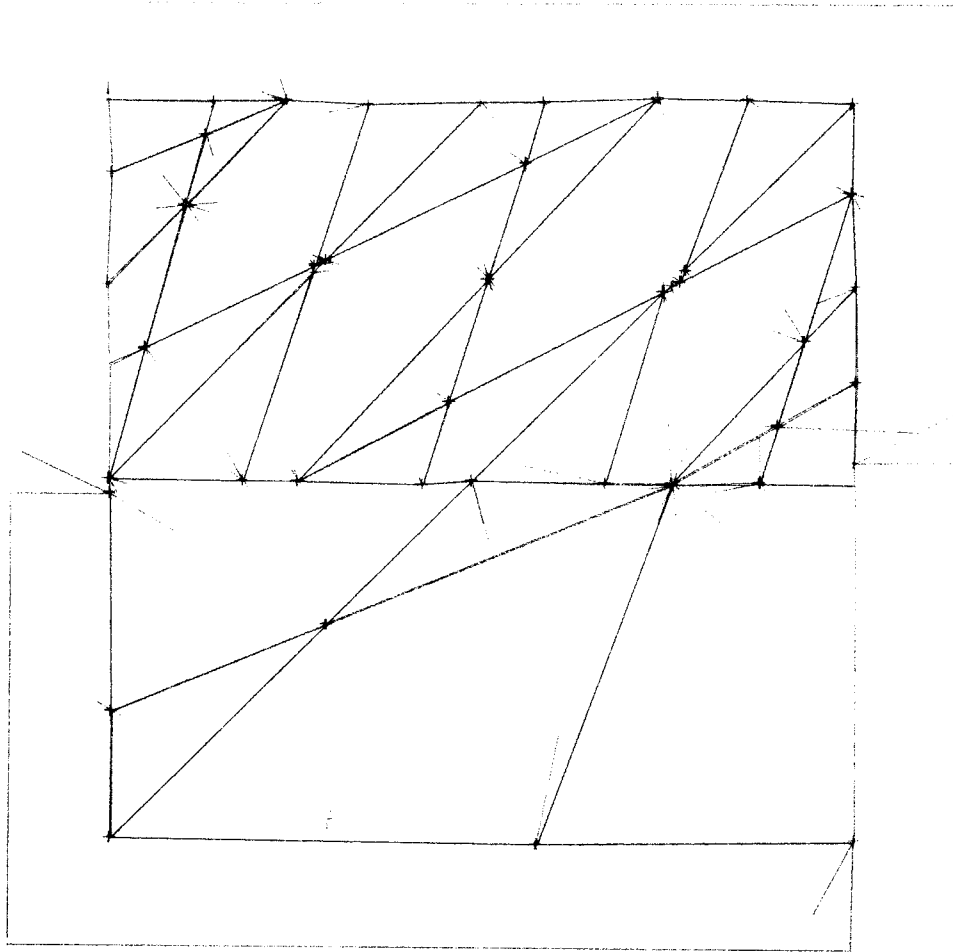
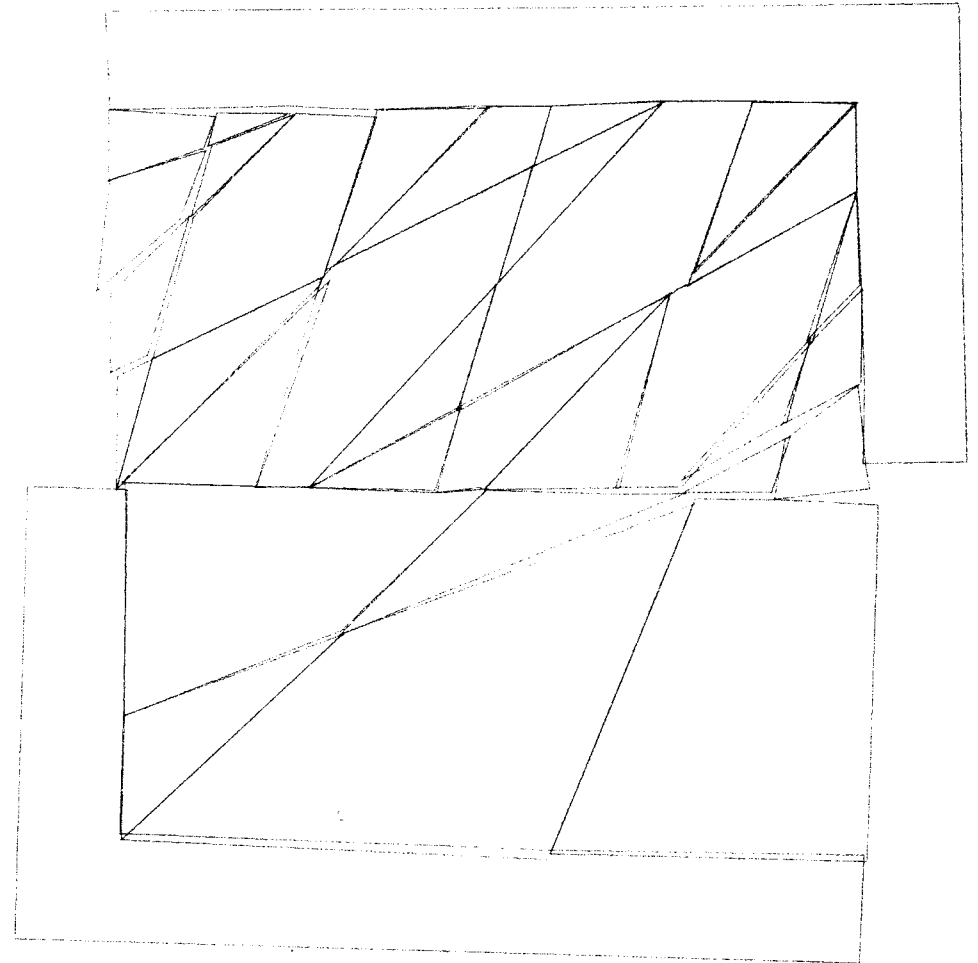


Fig 3.14 Skjuvbox med påförda laster



A



B

Fig 3.15 Skjuvbox med fyra sprickgrupper
 A: Krafter och förskjutningar
 B: Förskjutningar tio gånger förstörade

Ytterligare en sprickgrupp införs, vars vinkel bildar 70° med horisontalplanet, Fig 3.13. I Fig 3.13B visas att deformationerna är mer sammanhållna. De övre blocken bildar ett paket som skjuts iväg. Krafterna längs den horisontella sprickan är mindre än de krafter som alstras vid spetsarna ovanför. Fortfarande är den vänstra delen mer obelastad p g a lägre konsolidering.

Det sista exemplet har studerats med tyngdkraften verkande. Krafternas storlek framgår av Fig 3.14.

En tydlig koncentration av krafterna kan iakttagas vid den horisontella sprickans högra del, Fig 3.15A. Orsaken är att en blockspets skjuter in under en annan blockspets och vill rotera det undre blocket. Notera även inträngningen i det fixerade blocket. I det övre vänstra blocket märks gravitationens inverkan väl. Blocken är på väg att glida utåt-nedåt och en öppning bildas mellan det översta blocket och blocken omedelbart nedanför, Fig 3.15B.

3.4.2 Bergmassa med godtycklig sprickorientering

För modellerna som visas i Fig 3.16 - 3.18 gäller:

- block försedda med ett L i tyngdpunkten är utsatta för en horisontell kraft riktad åt höger. Kraftvektorns längd visas i en separat kraftskala för varje modell
- kontaktkrafterna är rätt skalade i förhållande till pålagd last
- låsta block markeras med ett F i tyngdpunkten
- samtliga sprickor har friktionsvinkeln 30°

Den första strukturen innehåller endast nio block, Fig 3.16.

Block 1 och block 2 trycker mot låsstenen, block 6. Block 3 kilar sig in mellan block 1 och block 4. På grund av friktionen och begränsade rörelsemöjligheter (block 8), tvingas block 4 att ro-

tera kring övre hörnet på block 7, som även det tvingas till rotationen. Låsstenen, block 6, försöker naturligtvis att rotera men hindras av det femte blocket. Enda möjligheten till förflyttning finns genom att glida längs block 8. Block 2 befinner sig i samma låsta läge. Rörelsen är i stort sett en glidning längs randen av block 6. De största krafterna finns där den största inspänningen råder, d v s vid block 6 och block 8. Krafterna i strukturens vänstra, nedre del är måttliga.

I modellen enligt Fig 3.17 har ytterligare sprickor förts in i modellen. Antalet block är nu femton. Blocken 4, 5, 6, 7 och 8 bildar en packe som trycker mot block 15. Packen tenderar att rotera kring övre hörnet på block 15. Notera öppningen mellan packen och de undre, undre blocken i Fig 3.17A. Blocken ovanför packen visar samma mönster som i det föregående exemplet. Blocken under packen tar upp en liten del av den påförda lasten och har goda rörelsemöjligheter i alla riktningar. Den låga konsolideringen märks speciellt väl på blocken 9 - 12.

Notera att krafterna fortfarande är koncentrerade kring blocken i den högra delen, medan krafterna längs den stora sprickan i underkanten av blocken 1 - 3 är relativt måttliga.

Med ytterligare sprickor inlagda erhålles en struktur enligt Fig 3.18. Antalet block är nu tjugoåtta.

Samma tendens som tidigare kan spåras. Packen mellan övre vänstra hörnet och det låsta blocket finns kvar. Kraftkoncentrationen finns kring låsstenen som tidigare. Nedre vänstra delen av strukturen är fortfarande relativt spänningsfri.

Notera att krafterna i de tre olika strukturerna är desamma trots att större energi tillförts i det sista exemplet jämfört med det första. Detta är en naturlig följd, eftersom krafterna kan spridas ut på flera kontakter och stora kraftkoncentrationer kan undvikas.

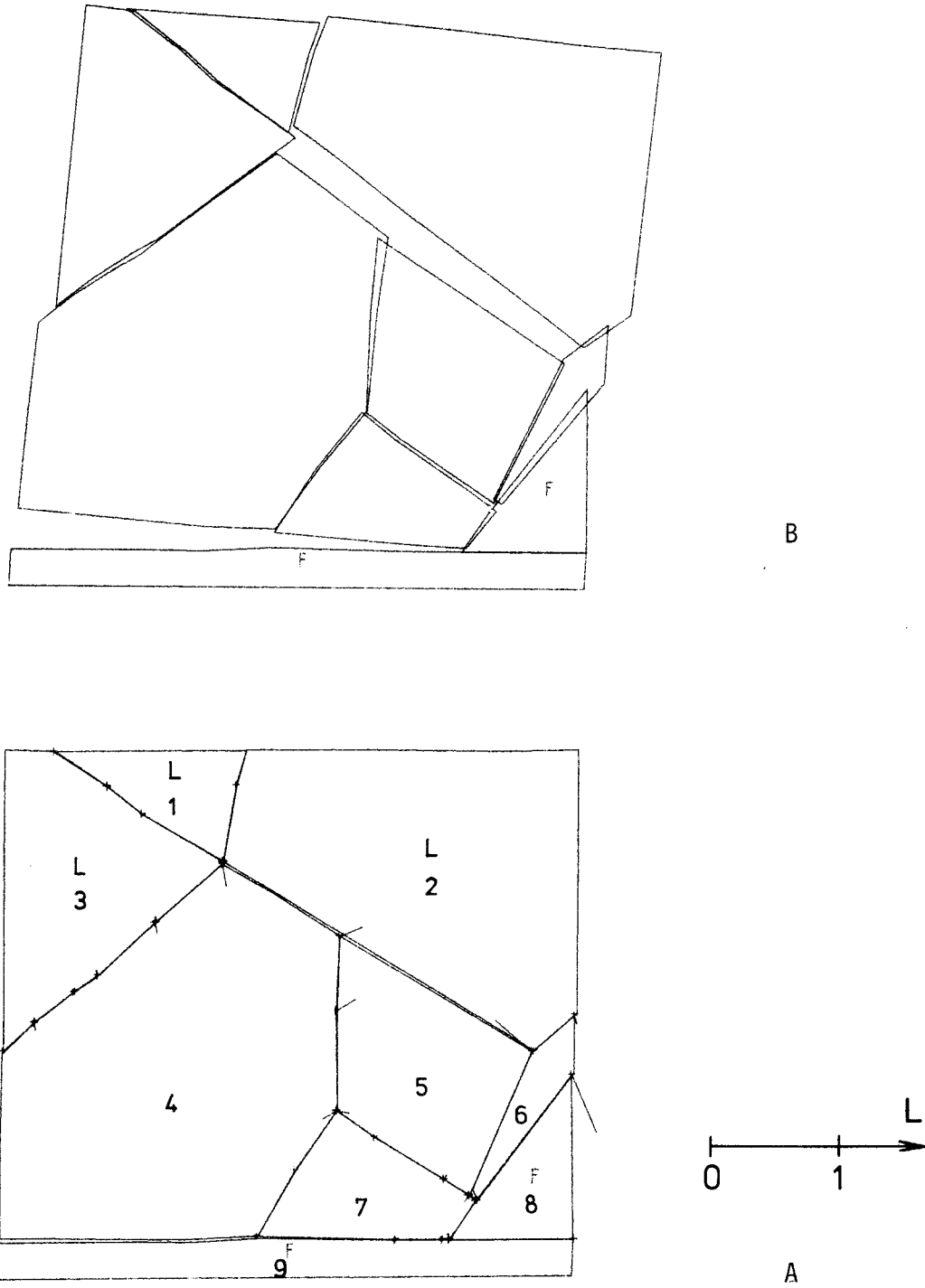
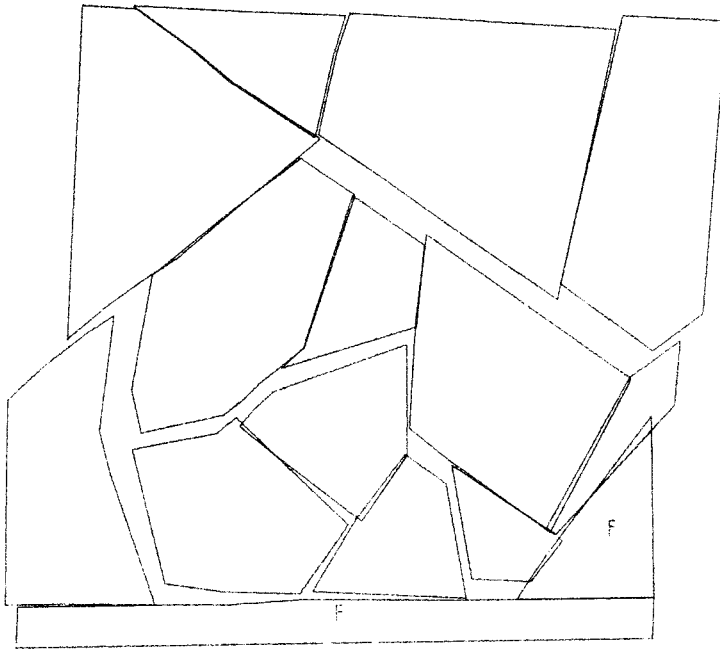
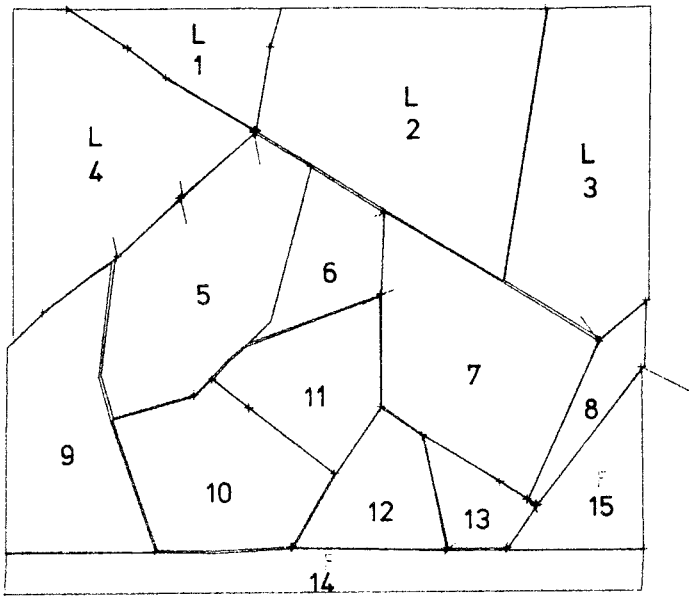


Fig 3.16 Bergmassa med godtycklig sprickorientering
 A: Krafter och förskjutningar
 B: Förskjutningar tio gånger förstörade

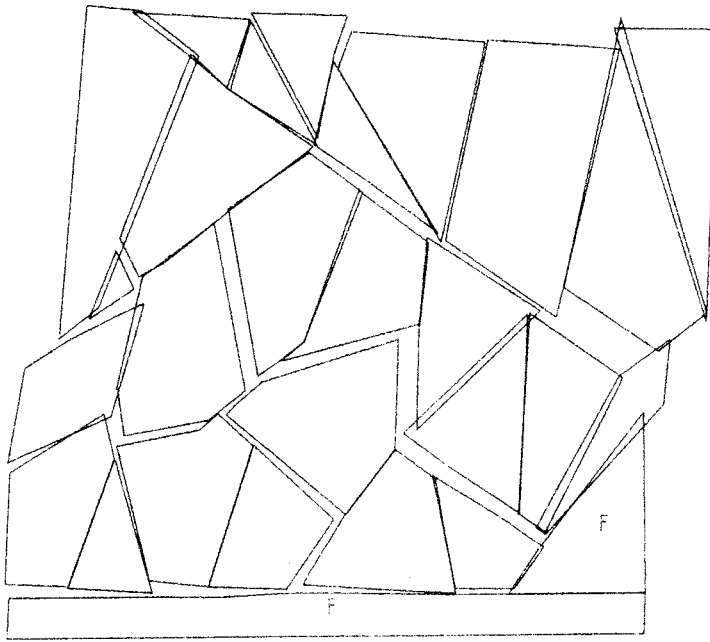


B

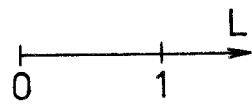
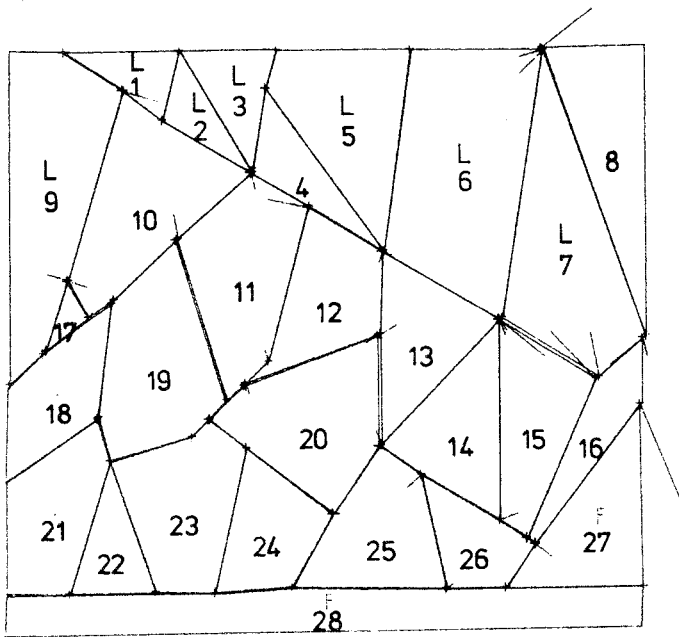


A

Fig 3.17 Bergmassa med godtycklig sprickorientering
 A: Krafter och förskjutningar
 B: Förskjutningar tio gånger förstörade



B



A

Fig 3.18 Bergmassa med godtycklig sprickorientering
 A: Krafter och förskjutningar
 B: Förskjutningar tio gånger förstorade

3.4.3 Bergmassa med regelbunden sprickorientering och sprickfrekvens

Problemet är i princip detsamma som i föregående exempel. Skillnaden är en större regelbundenhet hos sprickorna. Det första exemplet består av tolv block, Fig 3.19. Underkanten är låst för vertikala rörelser; block försedda med L har en horisontell kraft enligt kraftskalan.

Samtidigt som blocken 1 och 2 rör sig horisontellt, är de tvungade att röra sig uppåt p g a motstånden i block 4 respektive 5.

Block 5 trycker fast block 7 mot det låsta blocket 12. Block 7 tvingas därmed till rotation kring övre hörnet på block 12. Stora krafter uppstår mellan block 7 och block 12 liksom mellan block 1 och block 5. Stor kraft uppträder även i kontakten mellan nedre delen av block 5 och block 7. Denna är tyvärr riktad längs en spricka vilket gör den svår att upptäcka. Notera hur krafterna vrider sig, i strukturens övre vänstra hörn är de nästan vertikala, i det nedre högra hörnet närmast horisontella. Notera också de låga spänningarna i den nedre vänstra delen i modellen.

En bergmassa med många block ger resultatet som i stort överensstämmer med tidigare exemplet, Fig 3.19. Krafterna är koncentrerade till blocken i den övre högra halvan av modellen. Block 17 vill rotera kring block 24 och blir på det sättet ett stöd för block 10. Krafterna visar tendens att svänga från vertikal riktning till nästan horisontell riktning.

Samma tendenser kan registreras i en ännu mer uppsprucken bergmassa, Fig 3,20. Blocken har nu likheter med svagt böjda balkar.

För dessa tre exempel gäller naturligtvis samma förhållande som för strukturen i avsnittet 3.4.2. Krafterna introduceras på fler block. Blocken har mindre massor och får därmed större accelerationer.

Större kinetisk energi introduceras i strukturen, men kraftvektorerna är ungefär oförändrade.

3.5 Sammanfattning av resultaten med diskreta blockmetoden

DBM är en ny metod för analys av sprucken bergmassa. Metoden är ny och ännu inte testad mot modellförsök och verkliga förlopp i naturen. Resultaten bör därför inte ligga till grund för alltför långtgående slutsatser om förvaring av kärnavfall i nuvarande läge. Metoden har dock en framtid som vi bedömer som intressant. De jämförelser som kunnat ske mellan FEM och DBM visar på goda överensstämmelser vad avser deformationerna. Resultaten visar entydigt att förskjutningarna blir mjukare när bergmassan blir blockigare.

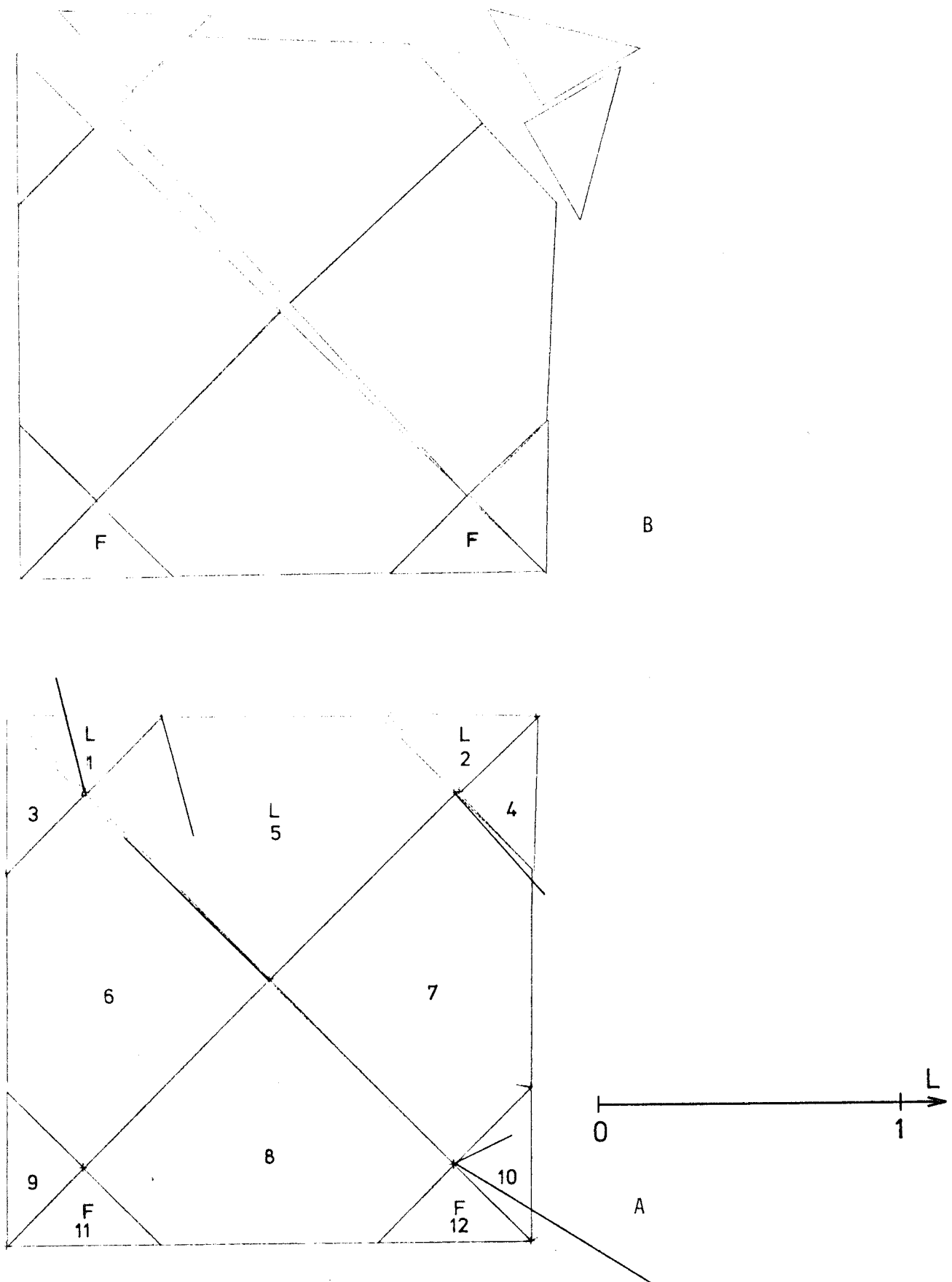
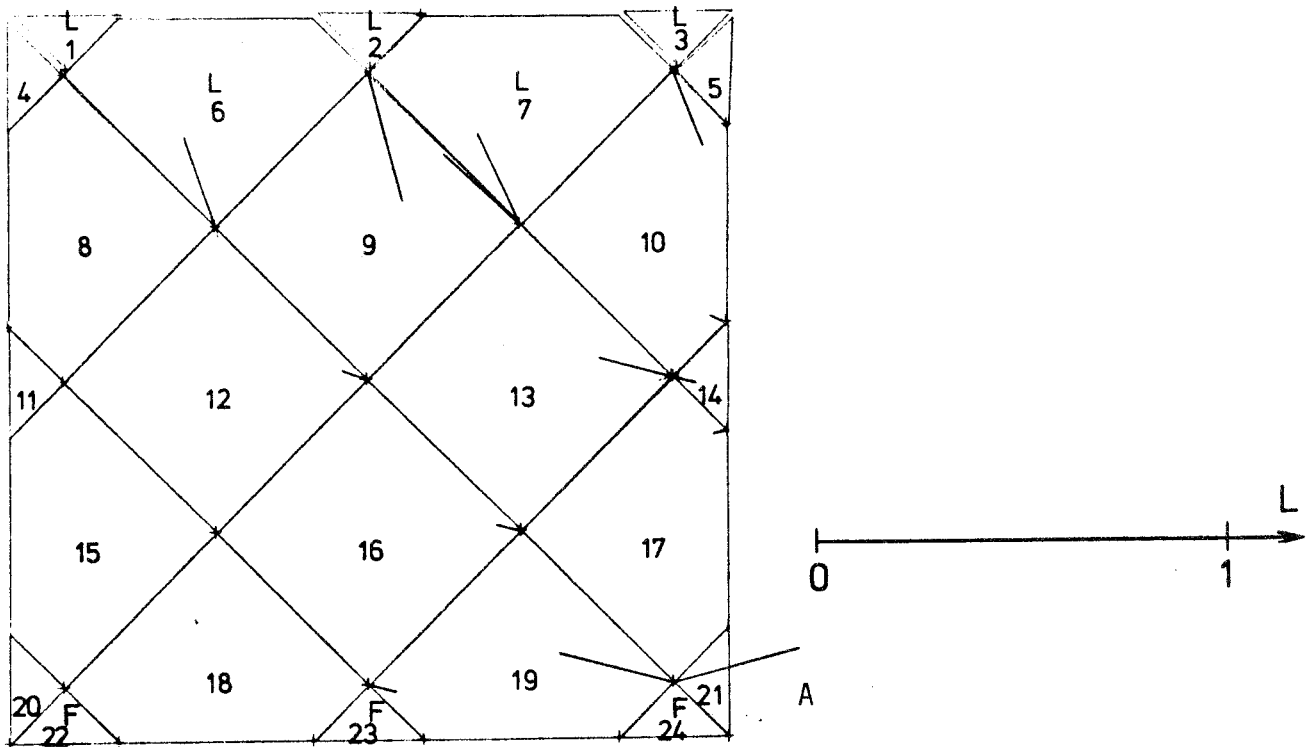
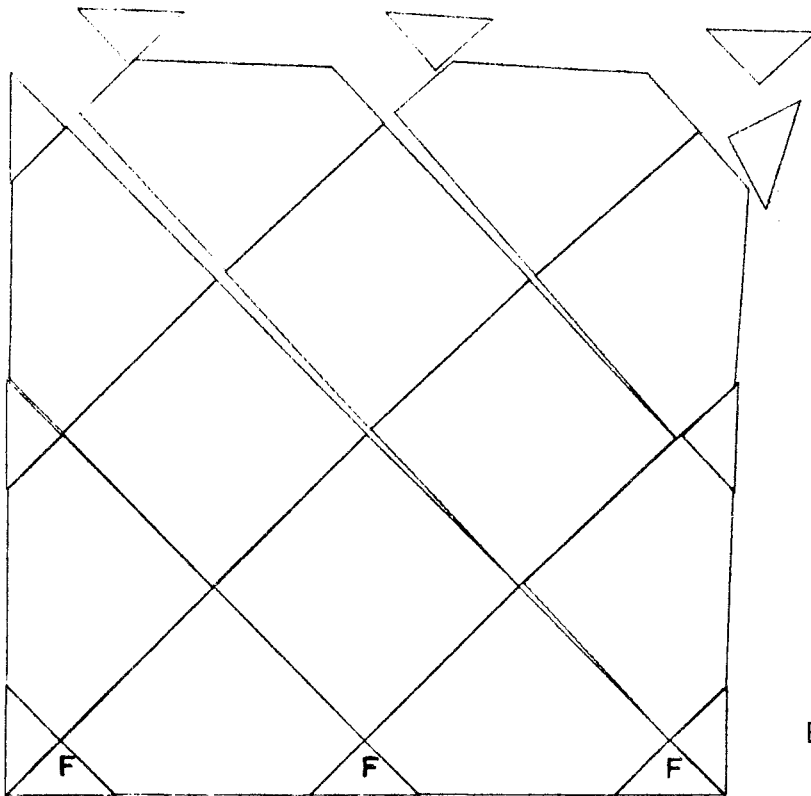
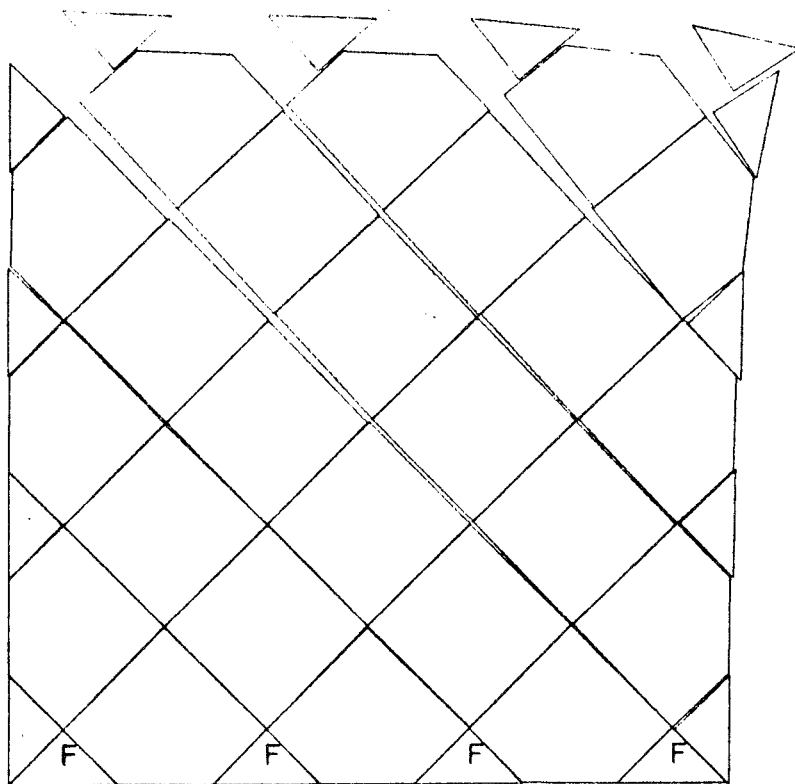


Fig 3.19 Bergmassa med regelbunden sprickorientering och sprickfrekvens
 A: Krafter och förskjutningar
 B: Förskjutningar tio gånger förstorade



3.20 Bergmassa med regelbunden sprickorientering
och sprickfrekvens
A: Krafter och förskjutningar
B: Förskjutningar tio gånger förstorade



B

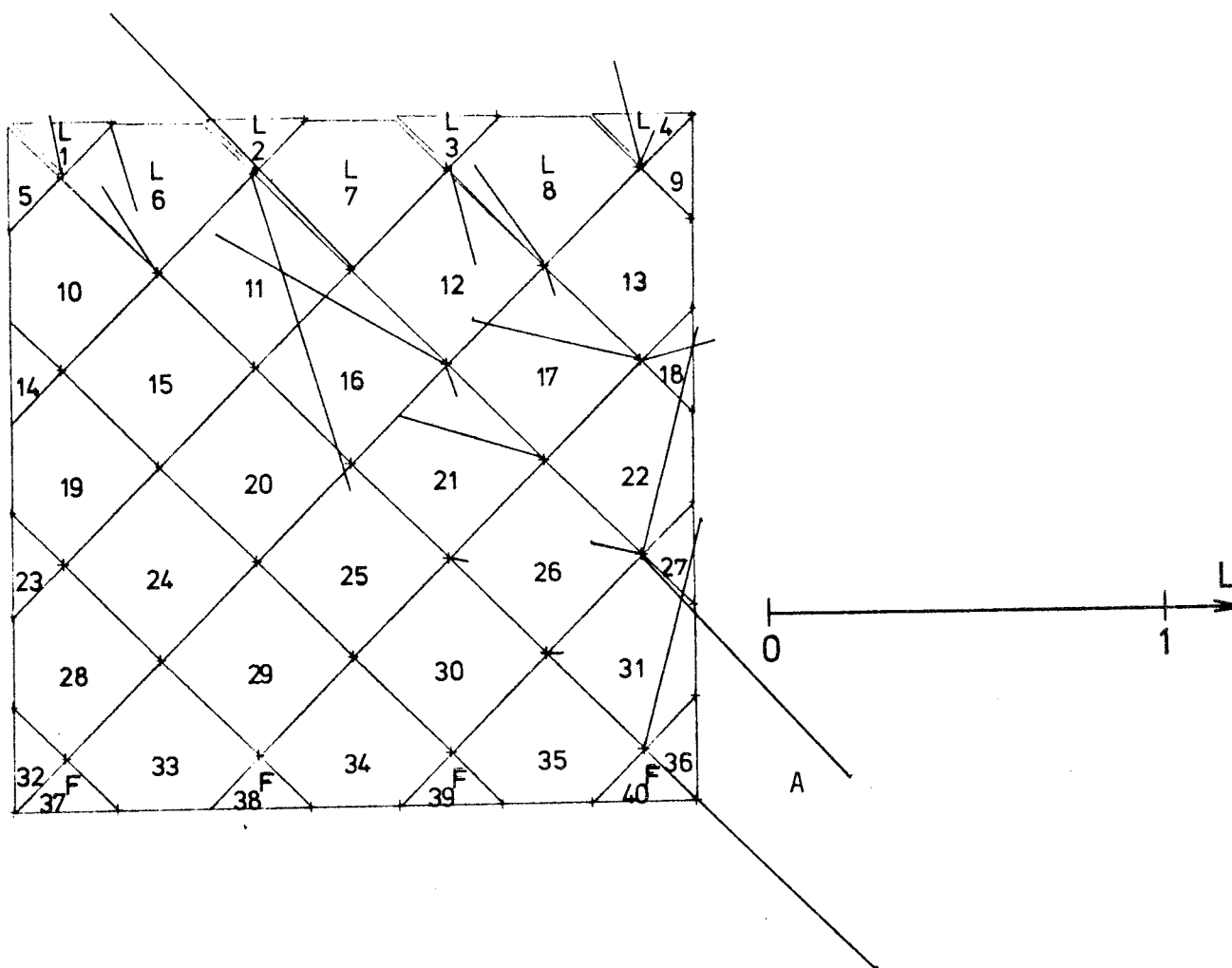


Fig 3.21 Bergmassa med regelbunden sprickorientering och sprickfrekvens
 A: Krafter och förskjutningar
 B: Förskjutningar tio gånger förstörade

4 ANALYS AV BLOCKIGT BERG MED FINITA ELEMENTMETODEN

Finita elementmetoden är en datoranpassad beräkningsmetod för ingenjörspöblem, speciellt för spänningsanalys av stora strukturer. Den är speciellt lämpad för ickelinjära bergproblem där heterogeniteter och diskontinuiteter, som exempelvis sprickor, gör det i det närmaste omöjligt att åstadkomma slutna lösningar. Mycket tidigt i elementmetodens utveckling tillämpades den på bergtekniska problem. Förutom olika materialegenskaper har man utvecklat speciella sprickelement för att beskriva deformationerna hos en sprucken bergmassa. Den kod som använts för analysen av det blockiga berget har arbetsnamnet ITBEFEM och har utvecklats av Groth (1977). Koden är en hybrid av koden BEFEM, Groth (1976) och koden JETTY, Goodman (1976) och finns idag upplagd på Stockholms Datacentral, QZ.

4.1 Beräkningsmodell

I FEM-analysen betraktar vi endast den del av bergmassan som gränsar mot skjuvzonen. Vi bortser från skjuvzonen och antar att deformationen i den spruckna bergmassan är bestämd av enkel skjuvning motsvarande en vinkel γ . För en bergmassa med kantlängden 4 km och förskjutningen 40 m motsvaras detta av skjuvningsvinkeln 0.573° , Fig 4.1. Skjuvningen antas ske utan normalspänning på någon av de fria ytorna med undantag av en analys där samtliga fasta element tilldelats en initialspänning i forma av en tryckspänning längs modellens fria ytor.

I bergmassan finns två sprickgrupper som korsar varandra under rät vinkel, och bildar 45° vinkel med kantlinjerna. Sprickavståndet A är 2, 1.2, 0.8, 0.4 och 0.2 km. En av bergmassans kantlinjer är fixerad, Fig 4.2. I analysen har modellen stegvis tilldelats den slutliga förskjutningen $U_x = 40$ m.

4.2 Materialmodeller

De fasta blocken i modellen består av elastiskt, isotropt material med elasticitetsmodulen 50 GPa och Poisson's tal $\nu = 0.2$.

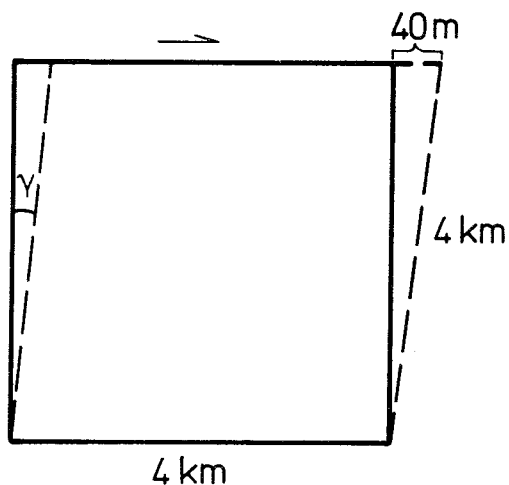


Fig 4.1 Enkel skjuvdeformation av bergblock

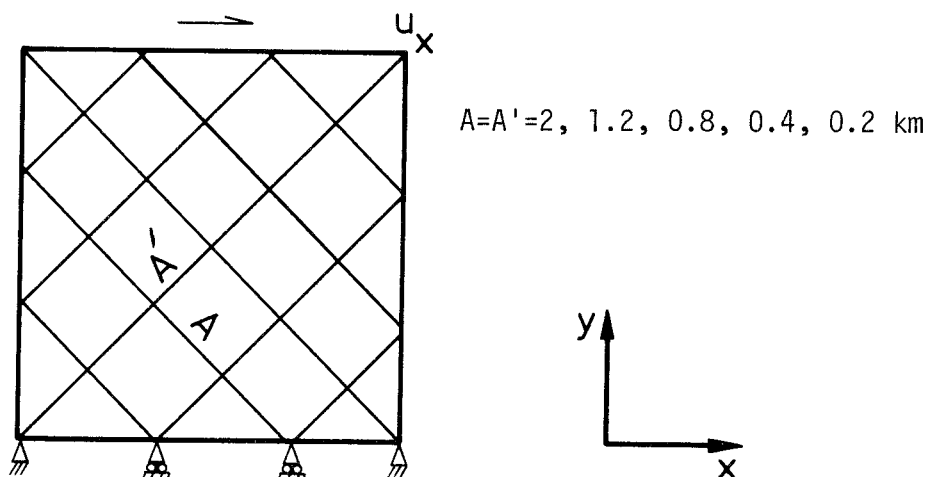


Fig 4.2 Orientering och frekvens hos sprickgruppen A och A' vid enkel skjuvning i FEM-analysen

För sprickorna har utvecklats speciella sprickelement som har egenskapen att öppna sig vid dragning, förskjuta sig vid skjuvning och överföra krafter vid kompression. De olika deformationsmoderna hos sprickelementet visas i Fig 4.3. Sprickans egentliga deformationsegenskaper är sammansatt av tre komponenter, 1) vågigheten, 2) glidfriktionen och 3) sprickväggens hållfasthet. Vid låga normalspänningar är endast vågigheten (dilatansen) och glidfriktionen av betydelse, Fig 4.4 A. När normalspänningen

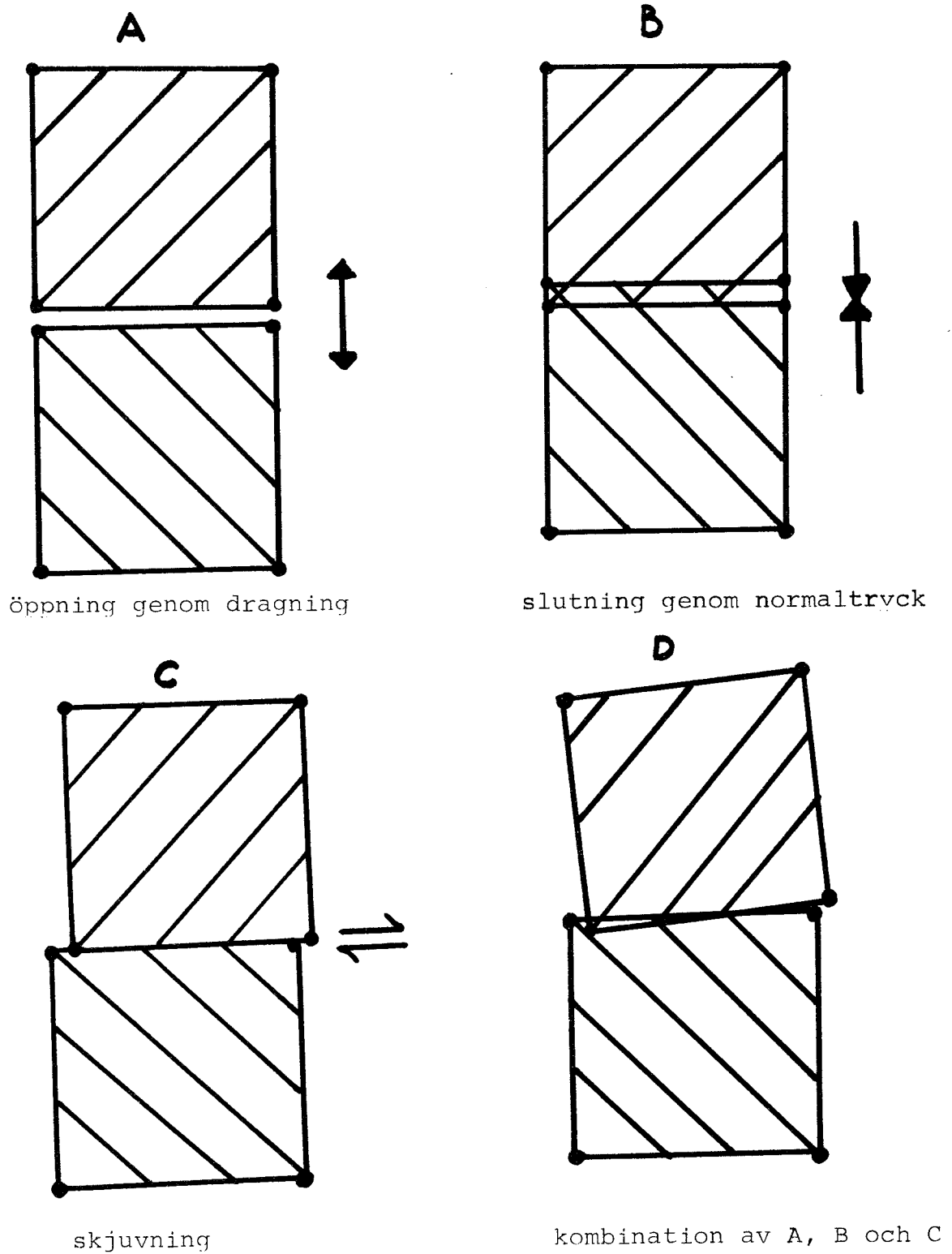


Fig 4.3 Deformationsmoderna för sprickelementen i FEM-analysen

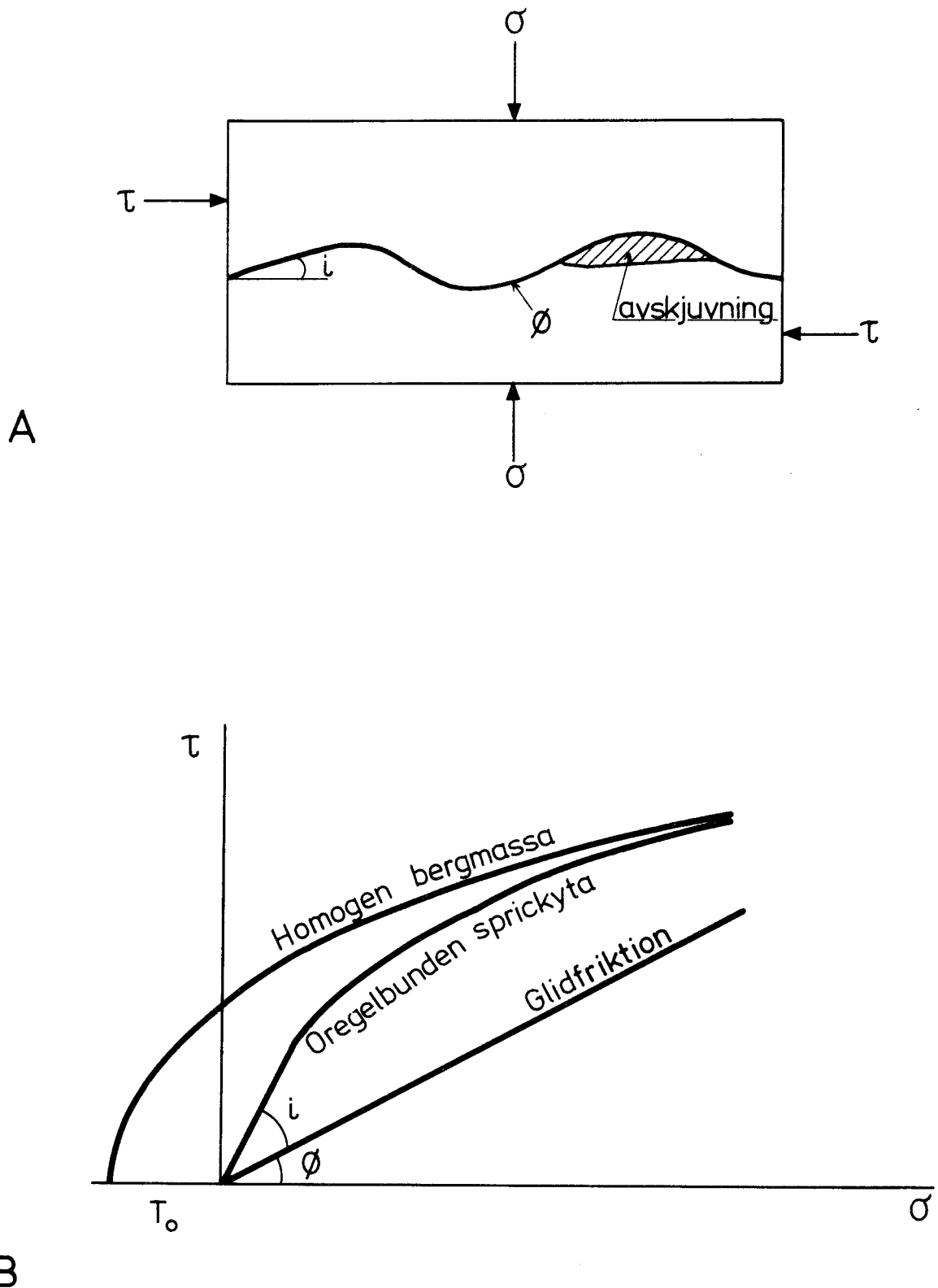


Fig 4.4 Deformationsegenskaperna hos spricka
 A: Deformationen av spricka
 B: Antagen brottenvelop för oregelbunden sprickyta och homogen bergmassa enligt Ladanyi och Archambault, 1970

2D-ELEMENT PROPERTIES

MATERIAL NUMBER	=	1
YOUNGS MODULUS - PARALLEL TO ANISOTROPY	=	0.5000E+07
YOUNGS MODULUS - NORMAL TO ANISOTROPY	=	0.5000E+07
SHEAR MODULUS - GSN	=	0.2083E+07
POISSONS RATIO - SN	=	0.2000
POISSONS RATIO - ST	=	0.2000
ORIENTATION OF LAYERS (ANGLE S-X)	=	0.0
MASS DENSITY	=	0.0

JOINT ELEMENT PROPERTIES

JOINT TYPE NUMBER	=	2
WALL ROCK COMPRESSIVE STRENGTH, JCS	=	-0.1000E+03
RATIO OF TENSILE TO COMPRESSIVE STRENGTH	=	0.1000
INITIAL TENSILE STRENGTH FOR JOINT	=	10.0000
FRICTION ANGLE OF SMOOTH JOINT	=	30.0000
RESIDUAL FRICTION ANGLE	=	25.0000
DILATATION ANGLE (ARCHAMBAULT)	=	10.0000
JOINT ROUGHNESS COEFF. -JRC- (BARTON)	=	10.0000
AVER. AMPLITUDE OF ASPERITIES	=	0.0500
REFERENCE STRESS (SEATING LOAD)	=	-20.0000
MAXIMUM NORMAL CLOSURE	=	-0.00170
SPEC. NORMAL LOAD	=	10.0000
DISP. FROM SEATING LOAD TO SPEC. LOAD	=	0.00450
SHEAR STIFFNESS - INITIAL VALUE-	=	0.2000E+03
SHEAR STIFFNESS - MIN- VALUE-	=	0.1000E+02
CRITICAL JOINT LENGTH (BARTON)	=	10.0000
RATIO OF RESID. TO PEAK SHEAR STRENGTH	=	0.6000
MASS DENSITY	=	2.5000
NORMAL STIFFNESS - CALC. MIN-VALUE -	=	0.3656E+03

Tabell 4.1 Materialegenskaper för fasta bergblock
och sprickor

ökar kan någon av vågtopparna skjuvas av. Brottenvelopen för den oregelbundna sprickan får den form som visas i Fig 4.4 B, Ladanyi o Archambault (1970). De parametervärden som använts för att karaktärisera sprickornas egenskaper framgår av Tabell 4.1. Det konstitutiva sambandet som beskriver normalrörelsen hos en spricka beskrivs av en hyperbel. Tangenten till kurvan ger sprickans styvhet.

4.3 Beräkningsgången

Blockmodellen med dess fasta element och sprickelement genereras i datorna för givna dimensioner och sprickavstånd. Speciella krafter eller förskjutningar i modellen specificeras. Förskjutningarna i dessa modeller påföres i 9 steg och för varje steg utförs 10 jämviktsiterationer. Det är viktigt att påpeka att det ej är helt säkert att fullständig jämvikt råder i strukturen efter varje förskjutningssteg. Beräkningsgången i ITBEFEM illustreras av flödesdiagrammet i Fig 4.5.

4.4 Resultatredovisningen

Förskjutningen av knutpunkterna och spänningarna i de fasta elementen och sprickelementen finns lagrade på skivminne för varje iteration i var och en av laststegen. Resultatlistor har tryckts ut för den tionde iterationen i varje laststeg och dessa innehåller data om knutpunkternas förskjutning samt spänningarna i de fasta elementen och sprickelementen. För sprickelementen anges även om drag- eller skjuvhållfastheten har överstridits.

Resultatet från körningarna av varje modell efter sista laststeget och tionde iterationen återges i grafisk form i bilagam. För var och en av modellerna redovisas,

modellgeometri och elementindelning

slutdeformation

huvudspänningar i fasta elementen

sprickspänningar längs diagonalerna 45° , 135°

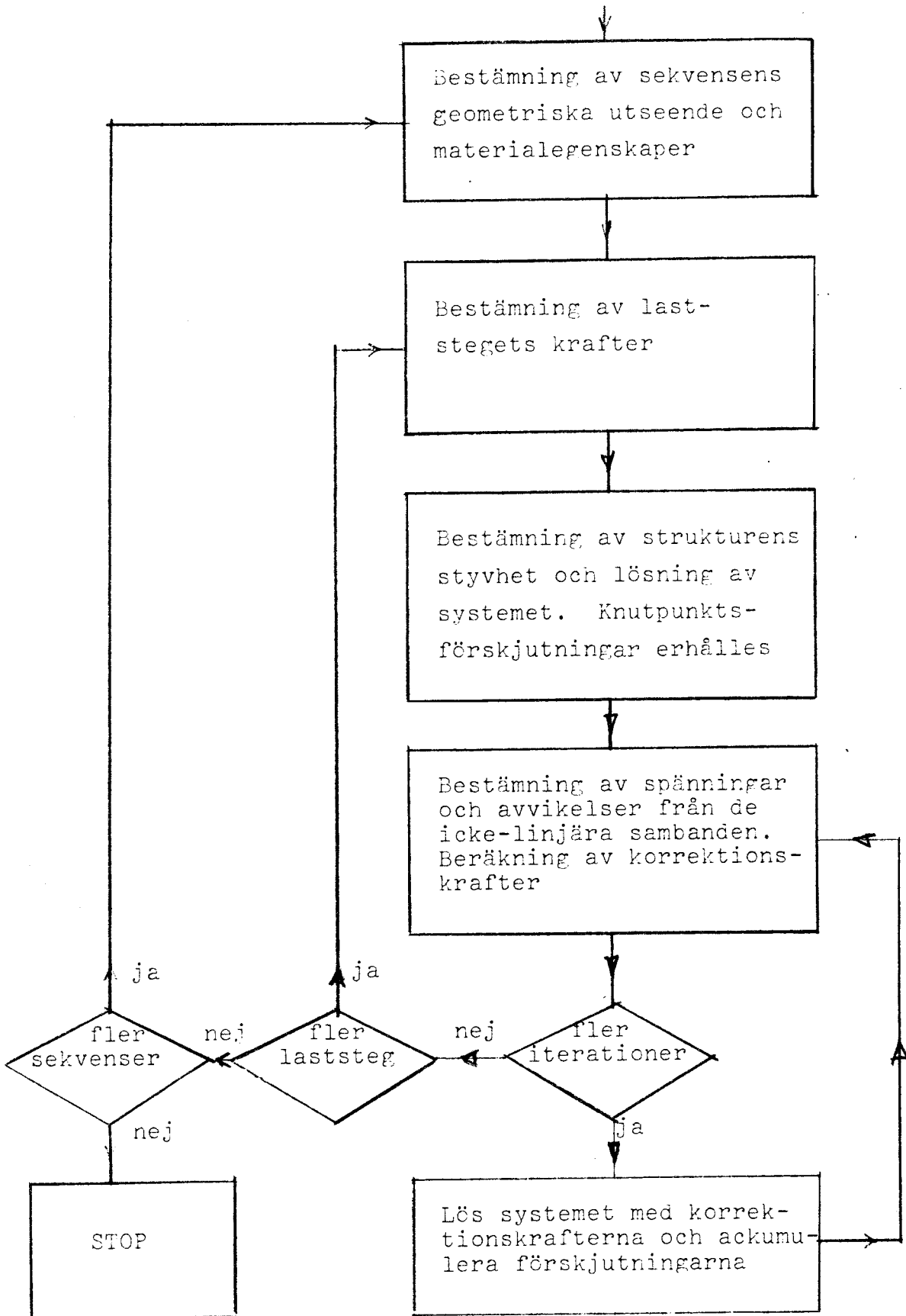


Fig 4.5 Beräkningsgången i ITBEFEM, efter Groth, 1977

4.5 En jämförande analys för modellerna 1:A och 4:A

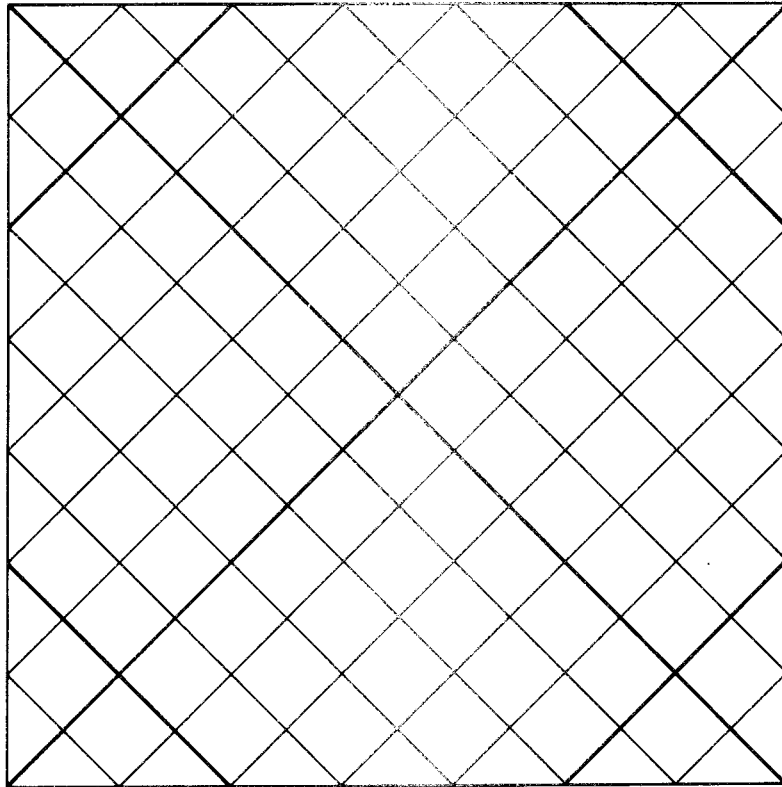
FEM-analysen har tillämpats för att bestämma blockstorlekens betydelse för spänningarna i en sprucken bergmassa. För att lättats illustrera detta har vi valt att studera modeller med samma elementindelning hos de fasta blocken, med sprickavståndet 2.0 km respektive 0.4 km.

Modell nr	Sprickavstånd km	Antal		
		Elastiska element	Knutpunkter	Sprick-element
1:A	2.0	112	168	44
4:A	0.4	112	420	196

Modellernas geometri och sprickelementens antal visas i Fig 4.6. Vid en förskjutning av den övre begränsningsytan 40 m, motsvarande vinkeln $\gamma = 0.573^{\circ}$, sker en blockrörelse i Modell 1:A så att sprickorna öppnas och de endkilda blocken hålls samman i ett fåtal kontaktpunkter och uppvisar betydande förskjutningar. Blocken i den övre högra delen av modellen strävar att röra sig snett ner mot höger. Bredden är 12 m på den öppna sprickan som bildas i centrum av modellen. Notera att skalfaktorn för modellens geometri är 2500:1 och skalfaktorn för deformationerna 2200:1. Modell 4:A med sprickavståndet 0.4 km uppvisar på det hela taget en mjukare och mer följsam deformation, Fig 4.7. Genom att varje block omges av sprickor kan det lättare translatera och rotera. Bredden är i detta fall endast 7 dm på den öppna sprickan i modellens centrum.

I Fig 4.8 redovisas huvudspänningarna hos de fasta blocken i modellerna 1:A och 4:A. Den storblockiga modellen kännetecknas av stora spänningskoncentrationer i kontaktpunkterna mellan blocken och i nära anslutning till de öppna sprickorna. Dragspänningarna uppgår till nära 4 MPa i centrum av modellen. Jäm-

MODELL 1:A



MODELL 4:A

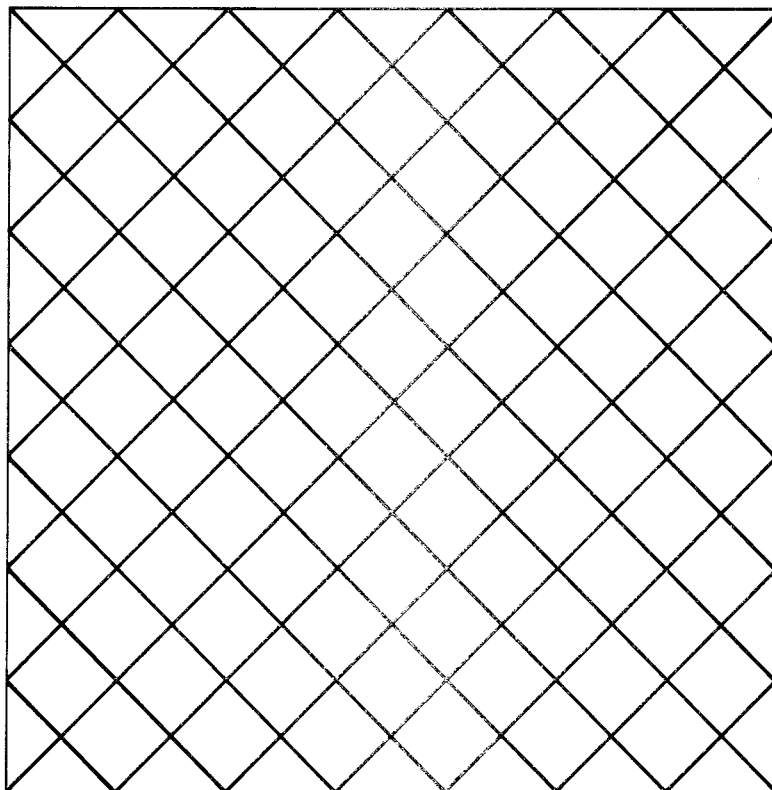
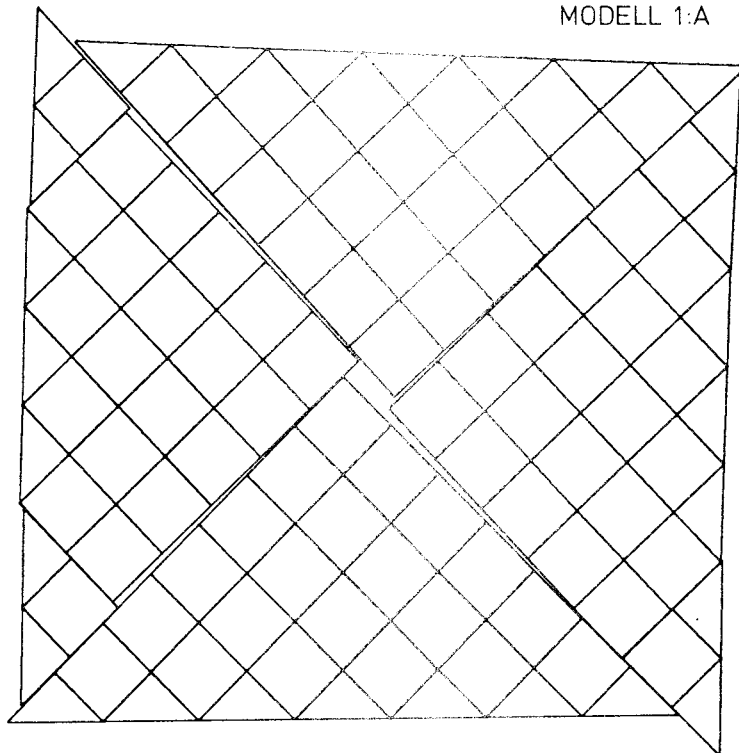


Fig 4.6 Modellgeometri samt sprickornas (grova linjerna) antal och orientering för modell 1:A och 4:A

MODELL 1:A



MODELL 4:A

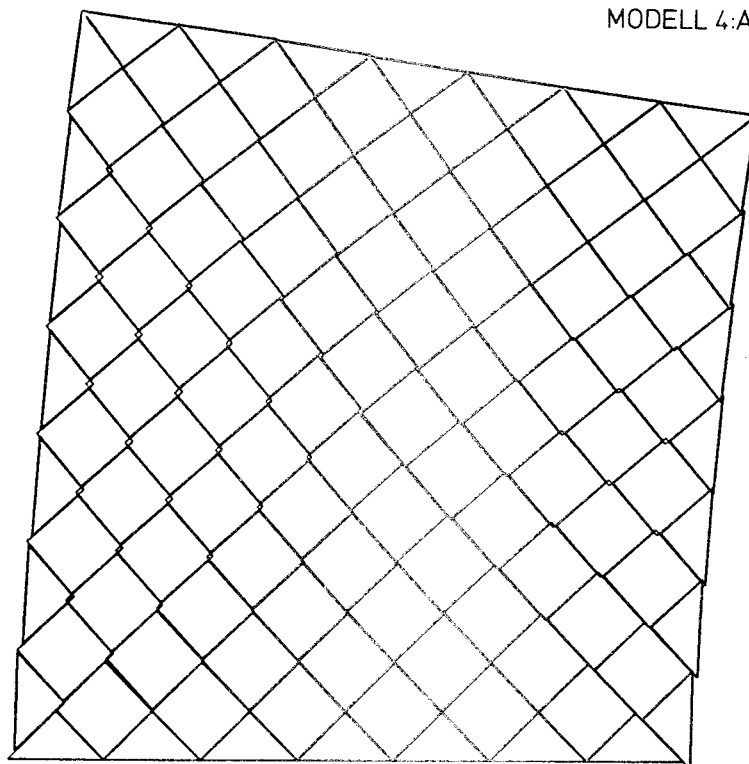
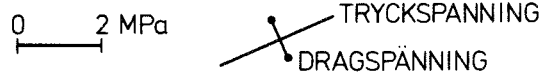
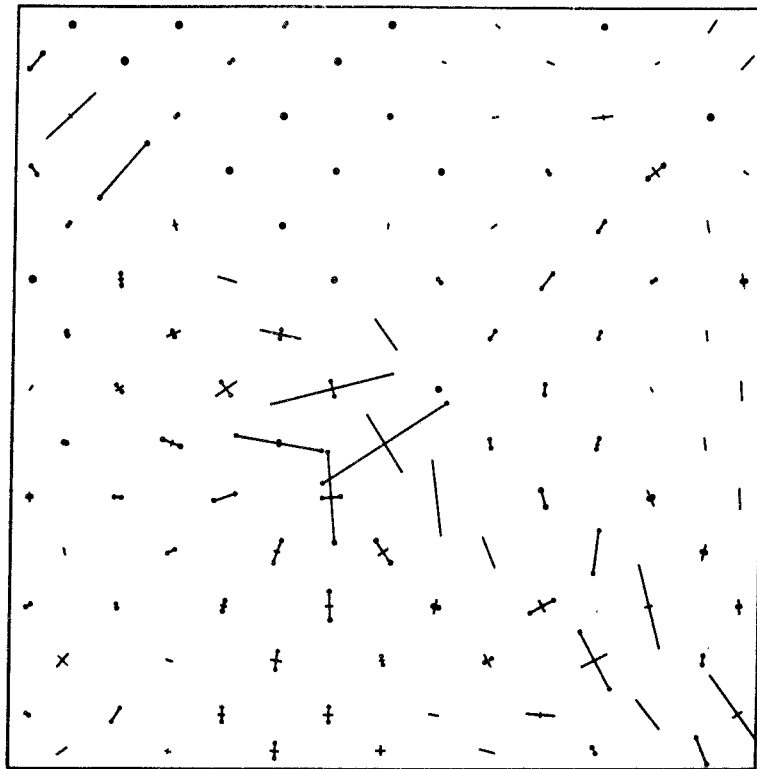


Fig 4.7 Deformationerna i modell 1:A och 4:A vid en förskjutning av den övre begränsningsytan. Modell 4:A med det mindre sprickavståndet har en mjukare och mer följsam deformationsstil



MODELL 4:A

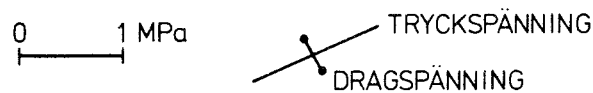
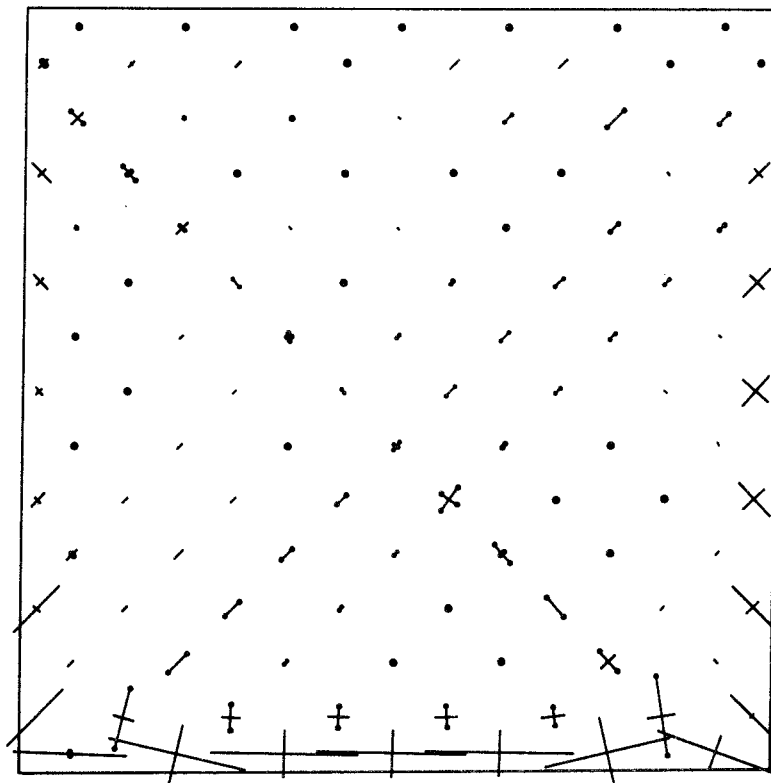


Fig 4.8 Huvudspänningarnas storlek och riktning hos de fasta blocken i modell 1:A och 4:A. Notera de höga spänningarna i de centrala delarna av modell 1:A

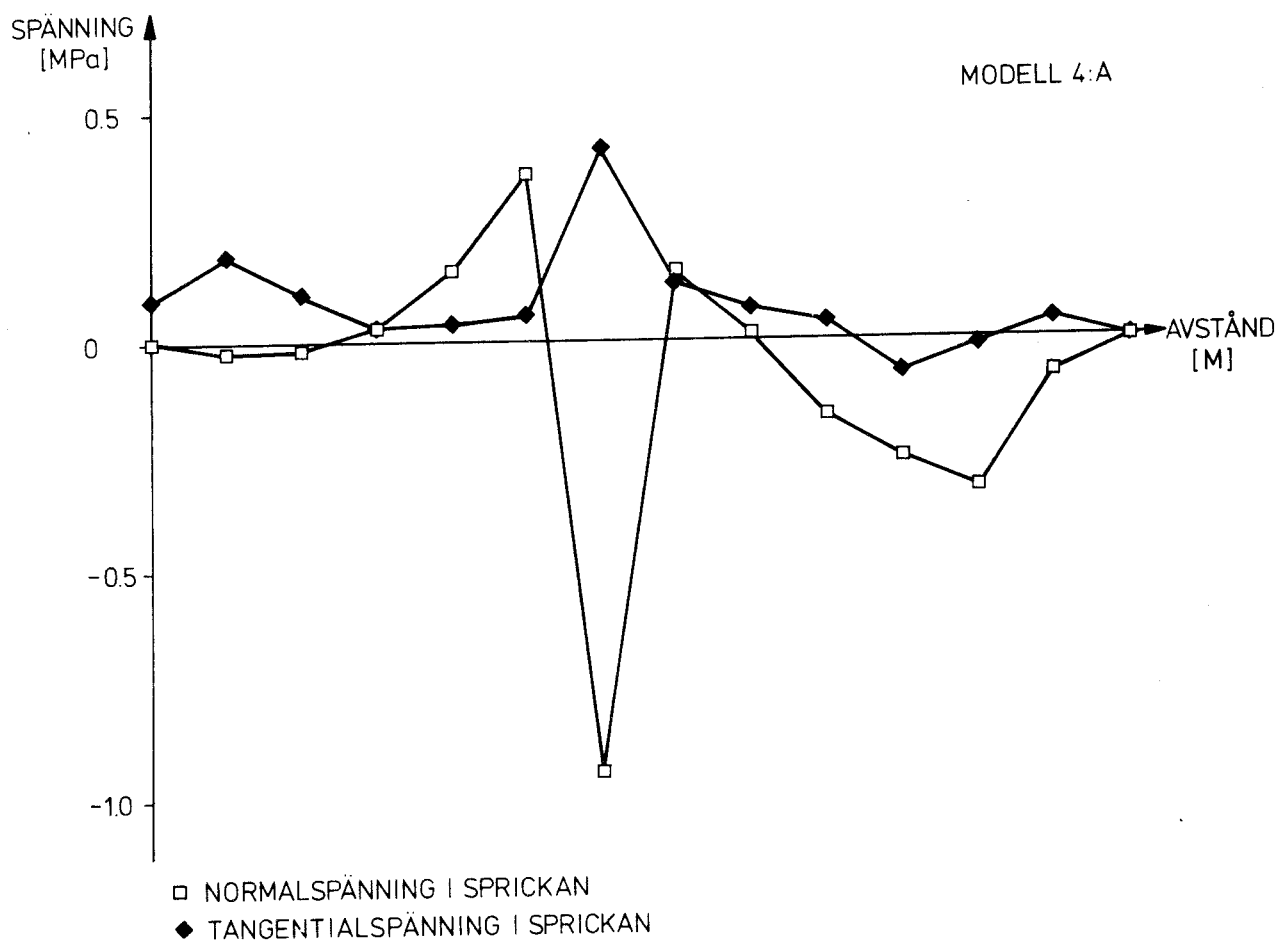
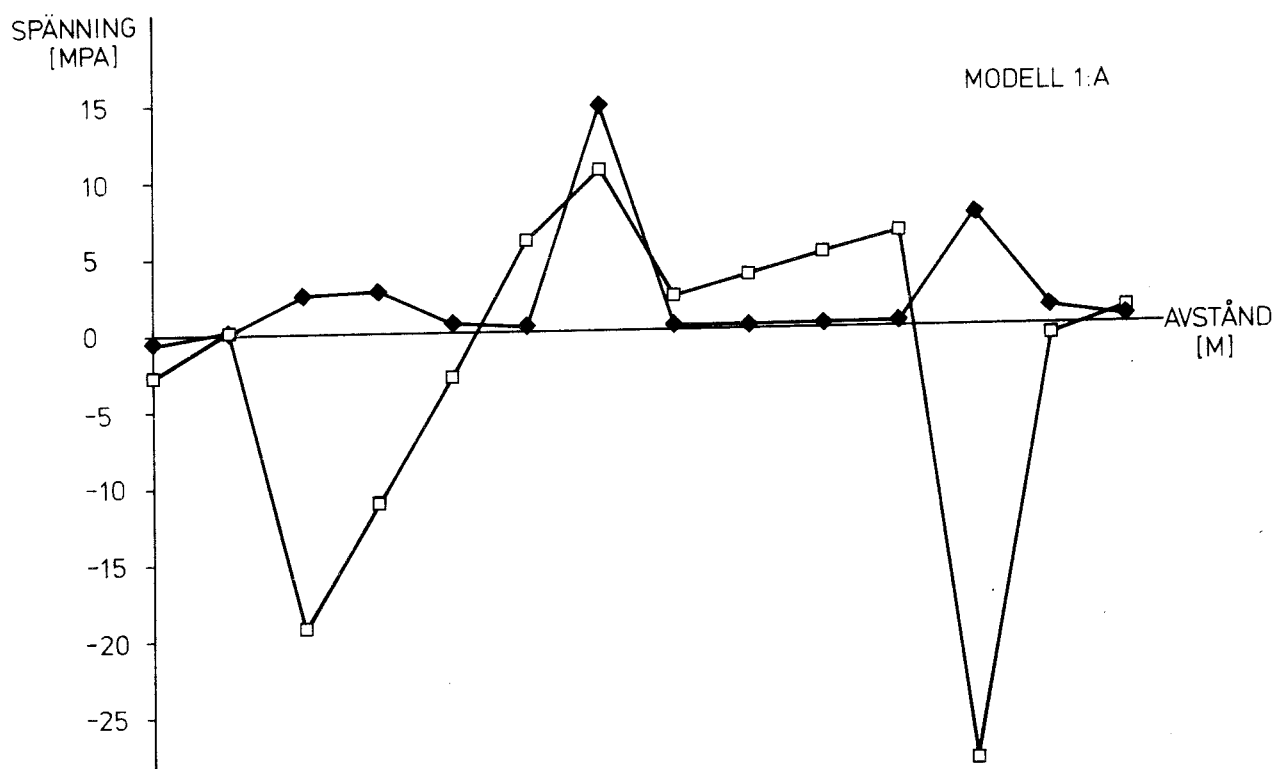


Fig 4.9 Spänningarna i sprickelementen längs diagonalen från nedre vänstra hörnet till övre högra hörnet i modellerna 1:A, 4:A. Spänningarna är lägre i den finblockiga modellen

för vi situationen med den finblockiga modellen finner vi att spänningarna är låga i hela modellen med undantag för de låsta blocken längs modellens nedre rand. Spänningarna i centrum av modellen är här mindre än 0.5 MPa.

Slutligen har vi valt att analysera sprickspänningen för sprickelementen längs diagonalen från nedre vänstra hörnet till övre högra hörnet i modellerna, Fig 4.9. För den storblockiga modellen uppträder höga normalspänningar (tryck) i anslutning till de små hörnblocken. I centrum dominerar dragspänningar (positiva) normalt mot sprickorna eftersom dessa strävar att öppna sig. Med undantag av sprickelementet i centrum av den finblockiga modellen finner vi att spänningarna här är betydligt lägre.

4.6 Analys av sprickdeformationen i modell 5:A, sprickavstånd 0.2 km

Denna modell har ett stort antal knutpunkter, 1629 st, fasta element, 420 st, och sprickelement, 808 st, och därför mycket kostsam att bearbeta i datorn. Trenden i deformationsstil, spänningsfördelning samt spänningarnas absoluta belopp kvarstår här vid minskat sprickavstånd. Deformationsbilden är mjuk och följsam. Spänningarna i de fasta blocken når maximala värdet 0.3 MPa d v s en faktor 10 lägre än motsvarande spänningar hos en storblockig struktur med sprickavståndet 2 km. Detta visar bl a att resultatet från körningarna kan skalas linjärt till önskat sprickavstånd med bibehållen sprickriktning. Det samma gäller sprickspänningarna. För en fullständig analys hänvisas till bilagan.

4.7 Inverkan av initialspänningar

Modellerna med sprickavståndet 2 km och 0.4 km har analyserats för en förskjutning av den övre ytan vid samtidig verkan av initialspänningen 10 MPa (tryckspänning) längs de fria ränderna hos modellen. Initialspänningen har till uppgift att simulera de naturliga, horisontella bergspänningarna. Analysen har sin tillämpning för problemet enkel skjuvning i horisontalpla-

net enligt Fig 1.2 A under samtidig inverkan av horisontella bergspänningar.

Initialspänningarna leder till att sprickorna sluts i större utsträckning. Förskjutningarna i modell 1:B, med sprickavståndet 2.0 km, skapar en rektangulär öppning i centrum av modellen, och de stora blocken beskriver en renodlad translation, jfr modell 1:B, i bilagan. Deformationsbilden för modell 4:B med sprickavståndet 0.4 km har inte förändrats nämnvärt genom införandet av initialspänningarna. Bergartsblocken uppvisar både translation och rotation.

Bortsett från situationen längs ränderna kan vi konstatera att modellen med den tätare uppsprickningen uppvisar i genomsnitt lägre spänningar i blocken och sprickorna och en mer homogen spänningsbild än den grövre uppspruckna. I modellen med tät uppsprickning finner vi också att huvudspänningstrajektorierna sammanfaller med sprickriktningen och att dragspänningarna är sparsamt förekommande.

4.8 Slutsatser av FEM-analysen

FEM-analysen omfattar 5 olika modelltyper 40 x 40 km med sprickavstånd från 2.0 km till 0.2 km. Modellerna har tilldelats en enkel skjuvning, 40 m. De fasta blocken i modellen består av elastiskt material. Sprickorna har simulerats med speciella sprickelement som har egenskaperna, styvhet, kohesion och skjuvhållfasthet. I modeller med stort sprickavstånd har de fasta blocken kontakt endast i få punkter. Detta leder till spänningskoncentrationer i kontaktpunkterna och höga spänningar i sprickorna. Modeller med litet sprickavstånd uppvisar en mjukare och mer följsam deformation. Genom de många frihetsgraderna och kontaktpunkterna i modellen fördelas krafterna jämnare och spänningarna minskar i både de fasta blocken och i sprickorna. Motsvarande slutresultat fås i det fall modellerna tilldelas en initialspänning i form av tryckkrafter längs de fria ränderna. Tryckkrafterna simulerar i det fallet rådande bergspänningar.

Analysen har gett som resultat att spänningar och deformationer får ett gynnsammare uppträdande i en bergmassa om sprickornas antal ökar. Detta synsätt kan tillämpas för alla skalor av geologiska strukturer. För problemet med lokalisering av lager för radioaktivt avfall kan vi dra slutsatsen att man bör sträva efter att finna en lagomt uppsprucken bergplint omgiven av första ordningens strukturer. Med lagomt uppsprucken avses här en sprickfrekvens på ca 1 spricka per m². Detta tillåter en mjuk och följsam deformation vid tektonisk påkänning. Sprickfrekvensen bör inte vara större för då minskar stabiliteten hos bergrummen samtidigt som risken för grundvattenströmmar ökar.

Följsamheten vid tektonisk påkänning och bergets täthet är till mycket stor del bestämd av sprickfyllnaden. En tunn sprickfyllnad av skiktsilikat (klorit, biotit) gynnar deformationsegenskaperna hos bergmassan, leder till måttliga bergspänningar, mildrar uppkomsten av värmespänningar och tätar bergmassan mot vatten. Flera av dessa positiva effekter vid förekomsten av tunn sprickfyllnad har vi kunnat observera i försöksstationen i Stripa Gruva.



5 REFERENSER

- Bäckblom, G. 1977. Discrete-block method. An implementation to the NORD 10 computer. Examensarbete 77:096E. Högskolan i Luleå
- Cundall, P.A. 1971. A computer model for simulating progressive large-scale movements in blocky rock system. Symp. Int. Soc. Rock Mechanics, Nancy
- Goodman, R.E. 1976. Methods of Geological Engineering. West Publishing Company. 471 s
- Groth, T. 1976. Bedömning av stora berggrups stabilitet med finita elementmetoden. BeFo. Bergmekanikdag 1976. s 126-141
- Groth, T. 1977. Arbetsrapport avseende projekt BeFo 21. Stiftelsen bergteknisk forskning, Stockholm, 11 s
- Jaeger, J.C. 1970. The behaviour of closely jointed rock. Proceedings 11th Symposium Rock Mechanics, Berkley, 57-68
- Jaeger, J.C. 1971. Friction of rocks and stability of rock slopes. Géotechnique vol 21, No 2, 97-134
- Kutter, H.K. 1971. Stress distribution in direct shear test samples. Symposium Soc Internat Mécanique des Roches, Nancy
- Ladanyi, B. and Archambault, G. 1970. Simulation of shear behavior of a jointed rock mass. Proc 11th Symp on Rock Mechanics, AIME. 105-125
- Lajtai, E.Z. 1969. Shear strength of weakness planes in rock. Int J Rock Mechanics Min Sci. Vol 6, 499-515

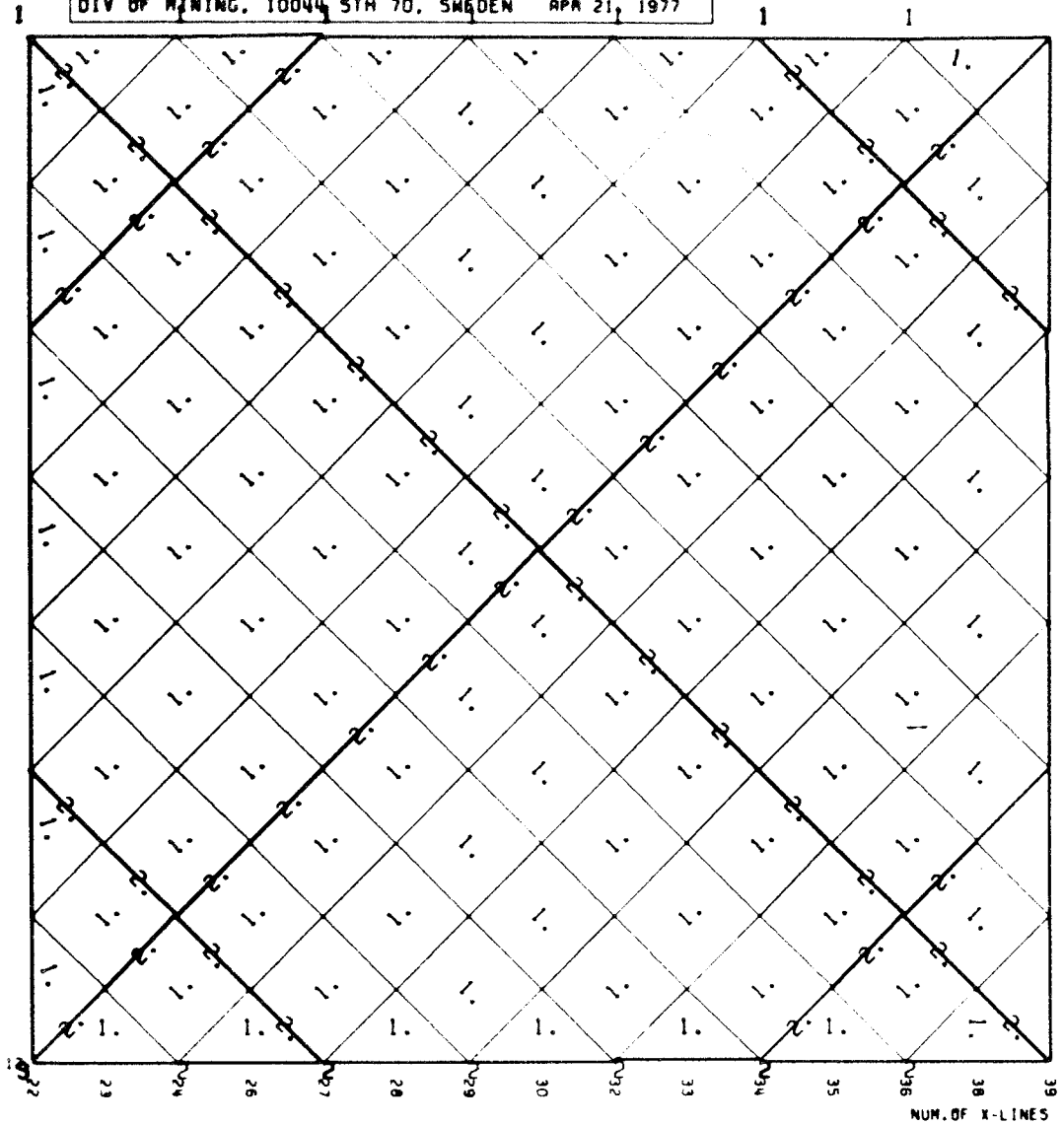
Röshoff, K. och Lagerlund, E. 1977. Tektonisk analys av Södra Sverige. Vättern-Norra Skåne. KBS-rapport. Stockholm

Yamahara, H.; Hisatomi, Y.; Morie, T.. 1977. A study of the earthquake safety of rock cavern. Proceedings Rock Store 77. Vol 2, p 159-164

Tabell 4.2 Resultatbeskrivning av sprickmodeller som analyserats med FEM

Modell	Sprick- avstånd	Initial- spänningar	Sidangivelse i bilagan					Anm
			Modellgeo- metri och material	Slutdefor- mation	Huvudspän- ningar i fasta element	Sprickspän- ningar längs diagonal 45°	Sprickspän- ningar längs diagonal 135°	
nr	km	MPa						
1:A	2.0	-	1	2	3	4	5	
1:B	2.0	10	1	26	27	28	29	
2:A	1.2	-	6	7	8	9	10	
3:A	0.8	-	11	12	13	14	15	
4:A	0.4	-	16	17	18	19	20	
4:B	0.4	10	16	30	31	32	33	
5:A	0.2	-	21	22	23	24	25	

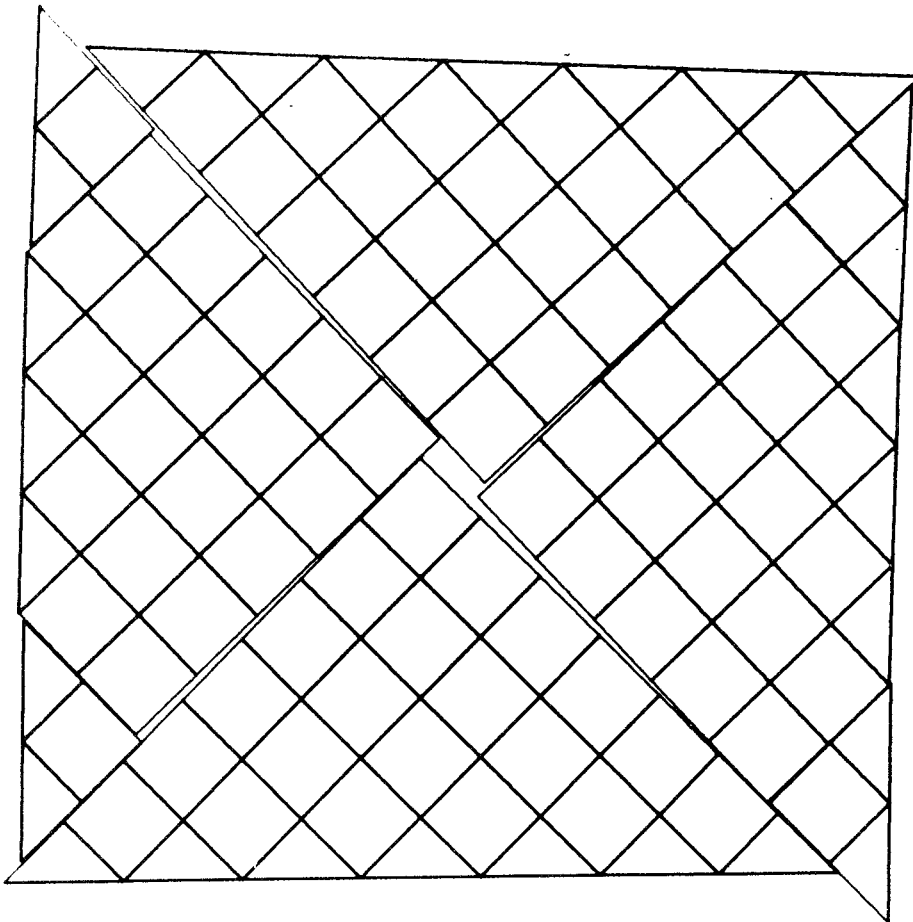
THE ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
DIV OF MINING, 10044 STM 70, SWEDEN APR 21, 1977



IDENT. NUMBERS OF MATERIALS, Y-LINES AND X-LINES

OBJECT: SPRICKBILDNING I BERGGRUNDEN MODELL 1:A SPRICKAVSTÅND 2.0 KM

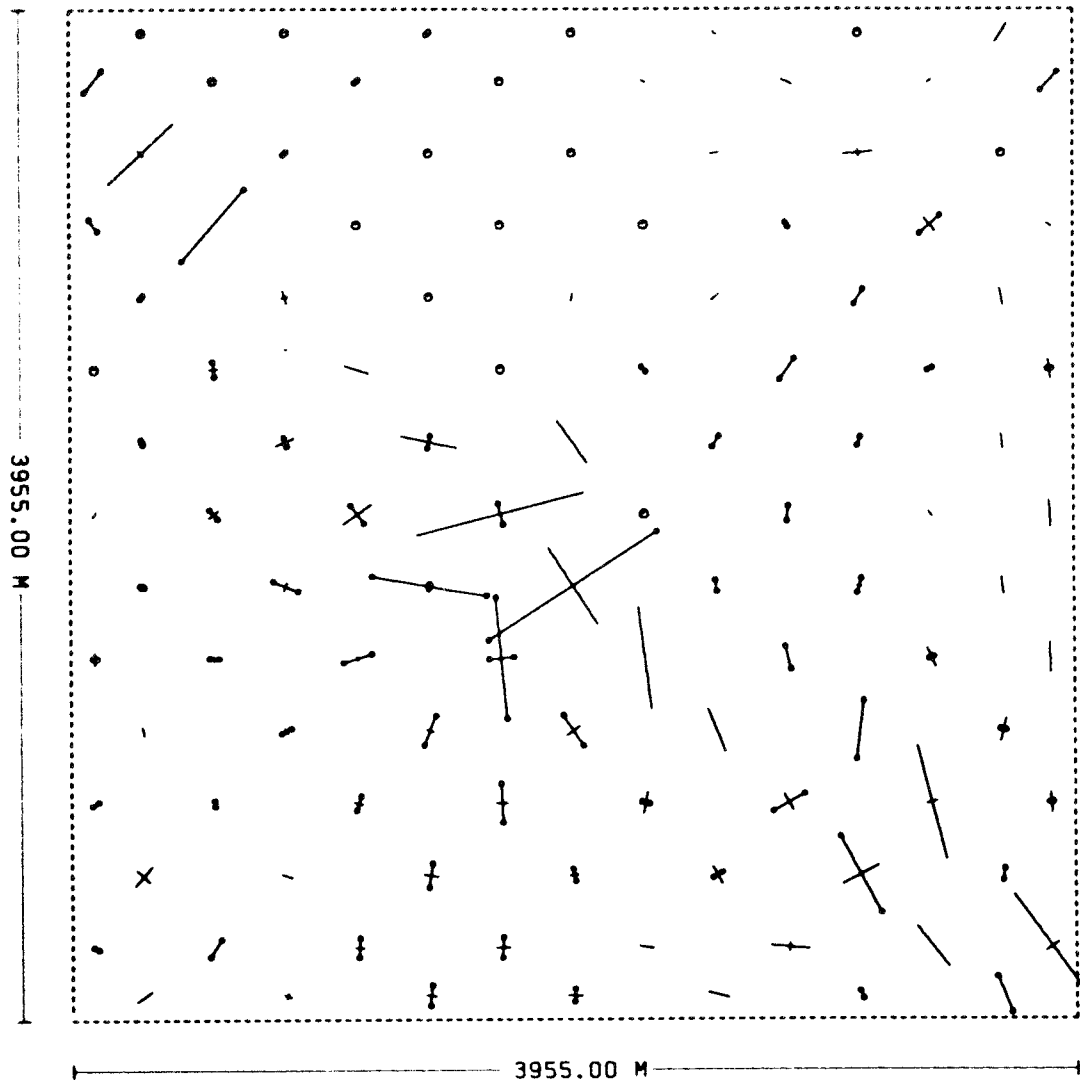
ROCK MECHANICS - RIT - AUG 25, 1977
FEM: 666-NBSPJ01A PLOT: 666-NBSPJ01A



DEFORMED STRUCTURE BETWEEN THE MESHLINES (21.4) AND (39.21)

OBJECT: SPRICKBILDNING I BERGGRUNDEN MODELL 1:A SPRICKAVSTAND 2.0 KM

SEQUENCE NO. 1 -- LOADSTEP NO. 9 -- ITER. NO. 10 -- PART NO. 1
PROTOTYPE : MODEL = 21972.2 : 1. PROT.DEF : MOD.DEF = 2261.6 : 1. MAX.MOVMENT = 45231.28 MM (FOR PLOTTED ELEMENTS)

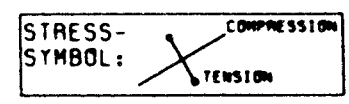


ROCK MECHANICS - RIT - AUG 25, 1977
 FEM: 666-NBSPJ01A PLOT: 666-NBSPJ01A

STRESSES IN THE STRUCTURE

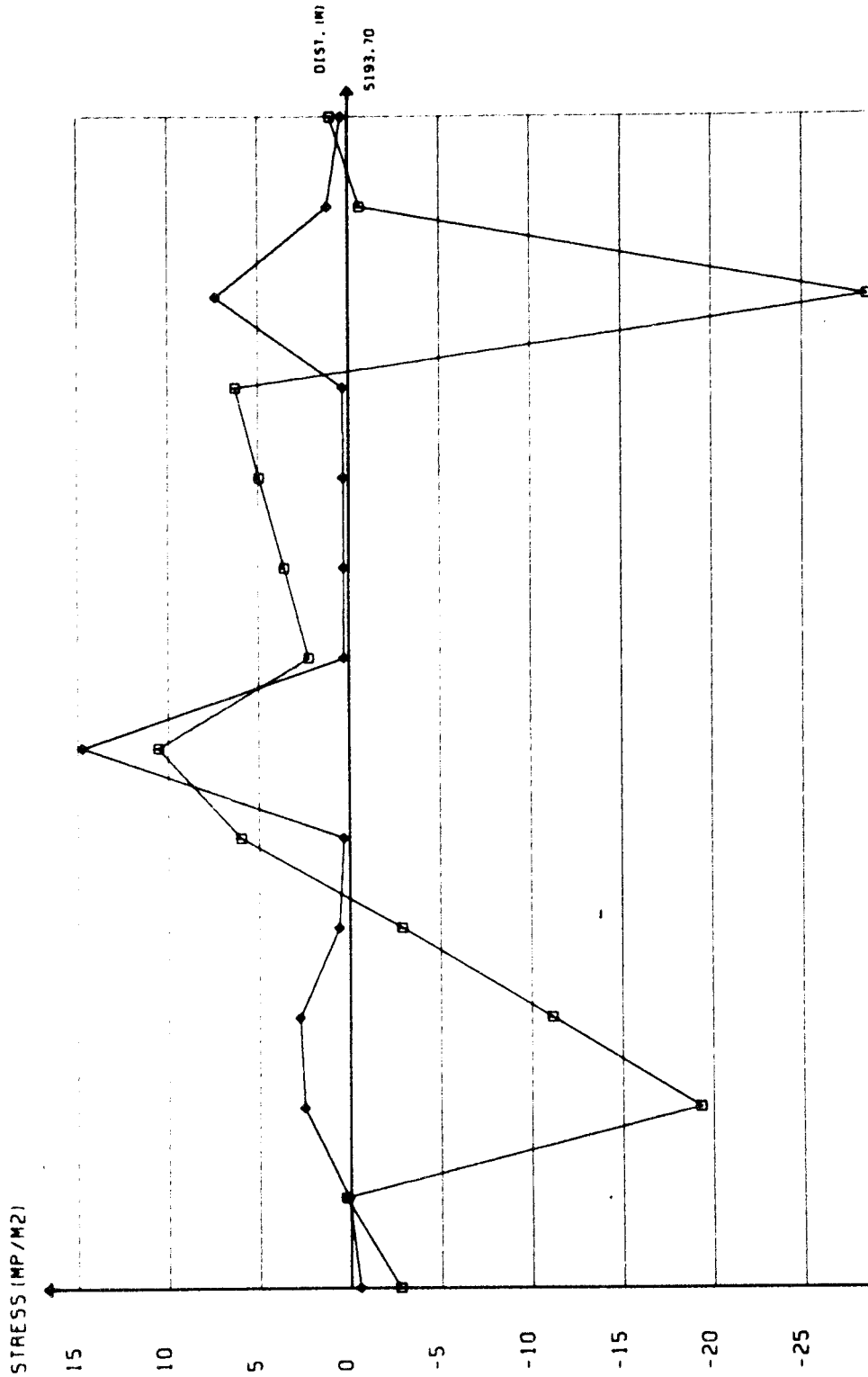
SPRICKBILDNING I BERGGRUNDEN MODELL 1:A SPRICKAVSTÅND 2.0 KM
 SEQUENCE NO. 1 -- LOADSTEP NO. 9 -- ITER. NO. 10 -- PART NO. 1
 STRESSSCALE 0 \longleftrightarrow 2.0 MPa

PRIN. STRESS RANGE
 -3.0 — 3.5 MPa
 (POS. STRESSES ARE TENSILE)



SPRICKBILDNING I BERGGRUNDEN MODELL 1:1A SPRICKAVSTÅND 2.0 KM

SPRICKSPÄNNING LÅNGS DIAGONAL 45 SEKVENS 1 LASTSTEG 9 ITER 10



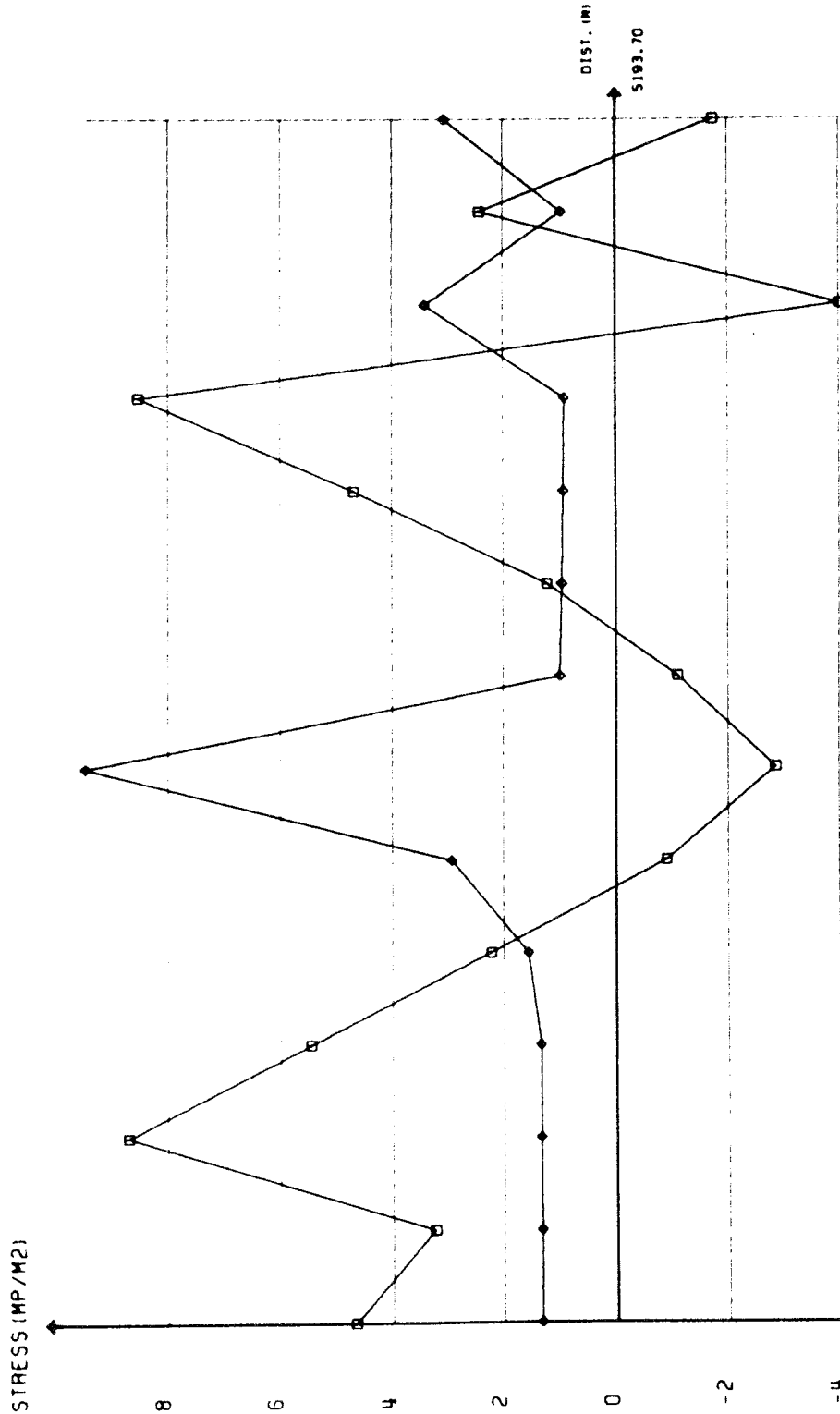
FEM-EXEKVERING:
666-NBSPJ01A
25 AUG 1977

X - XSTRESS □ - NORMALSTRESS IN JOINT
Y - YSTRESS ◇ - TANG.STRESS IN JOINT
* - X1STRESS



SPRICKBILDNING I BERGGRUNDEN MODELL 1:A SPRICKAVSTÅND 2.0 KM

SPRICKSPÄNNING LÅNGS DIAGONAL 135 SEKVENS 1 LASTSTEG 9 ITER 10

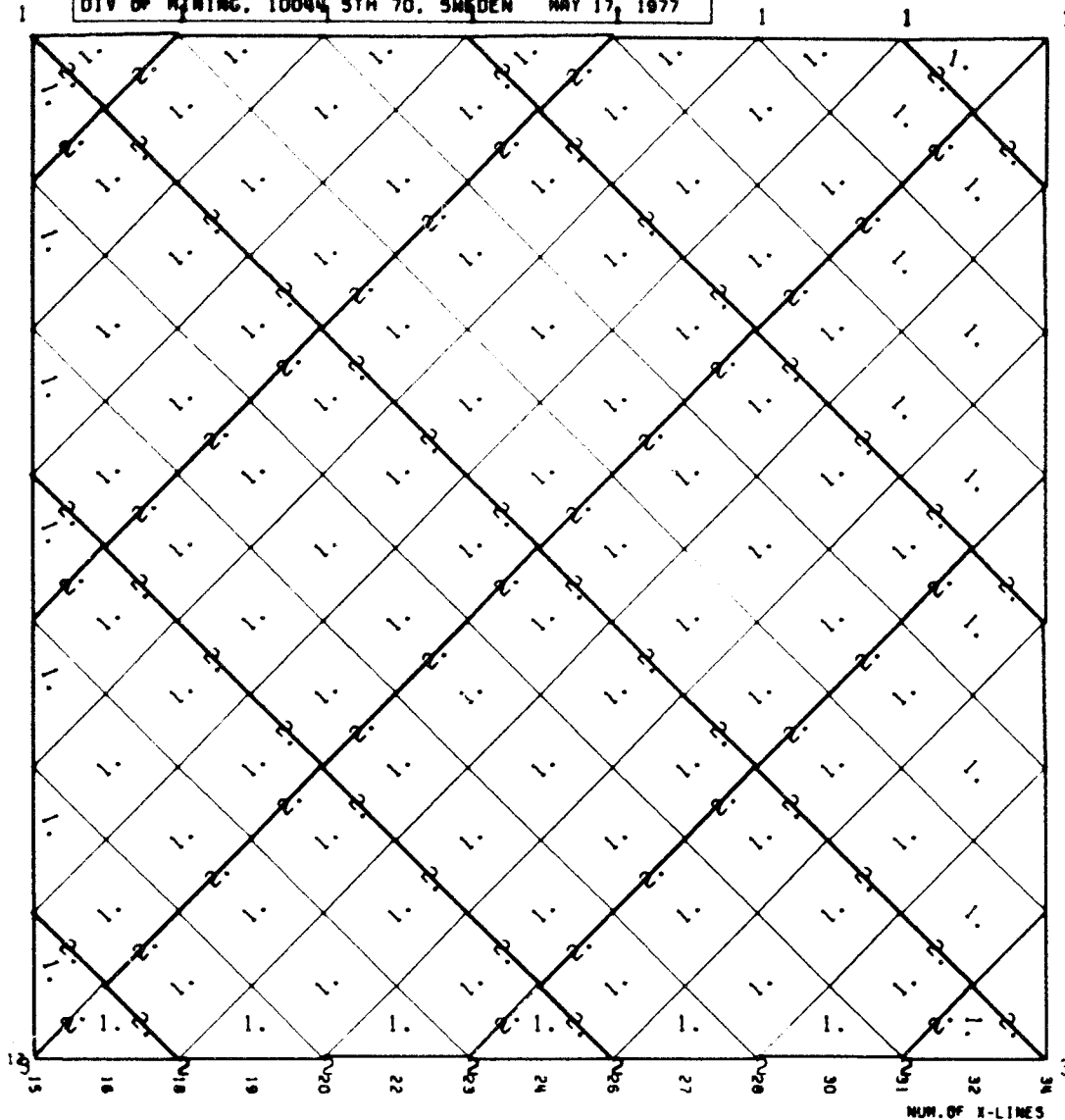


FEM-EXEKVERING:
666-NBSPJ01A
25 AUG 1977

X - XSTRESS □ - NORMALSTRESS IN JOINT
Y - YSTRESS ◇ - TANG.STRESS IN JOINT
* - XSTRESS



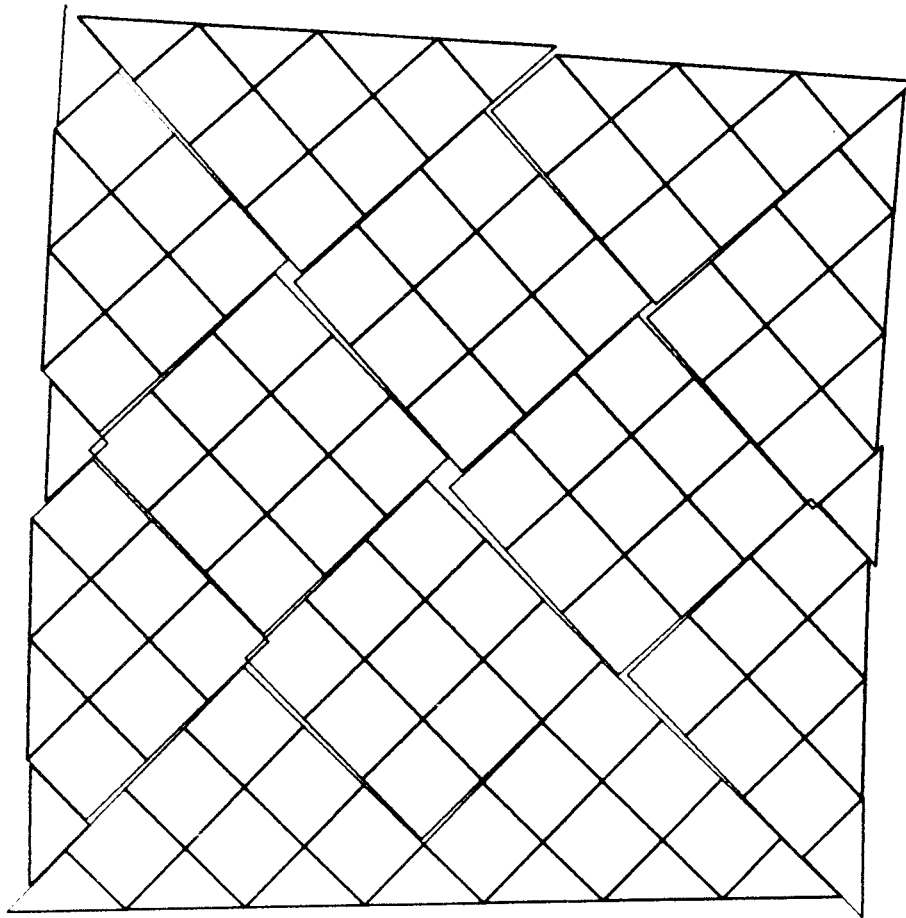
THE ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
DIV OF MINING, 10044 STH 70, SWEDEN MAY 17, 1977



IDENT. NUMBERS OF MATERIALS, Y-LINES AND X-LINES

OBJECT: SPRICKBILDNING I BERGGRUNDEN MODELL 2:A SPRICKAVSTAND 1.2 KM

ROCK MECHANICS - RIT - JUN 27. 1977
FEM: 217-NBSPJ02A PLOT: 570-NBSPJ00P

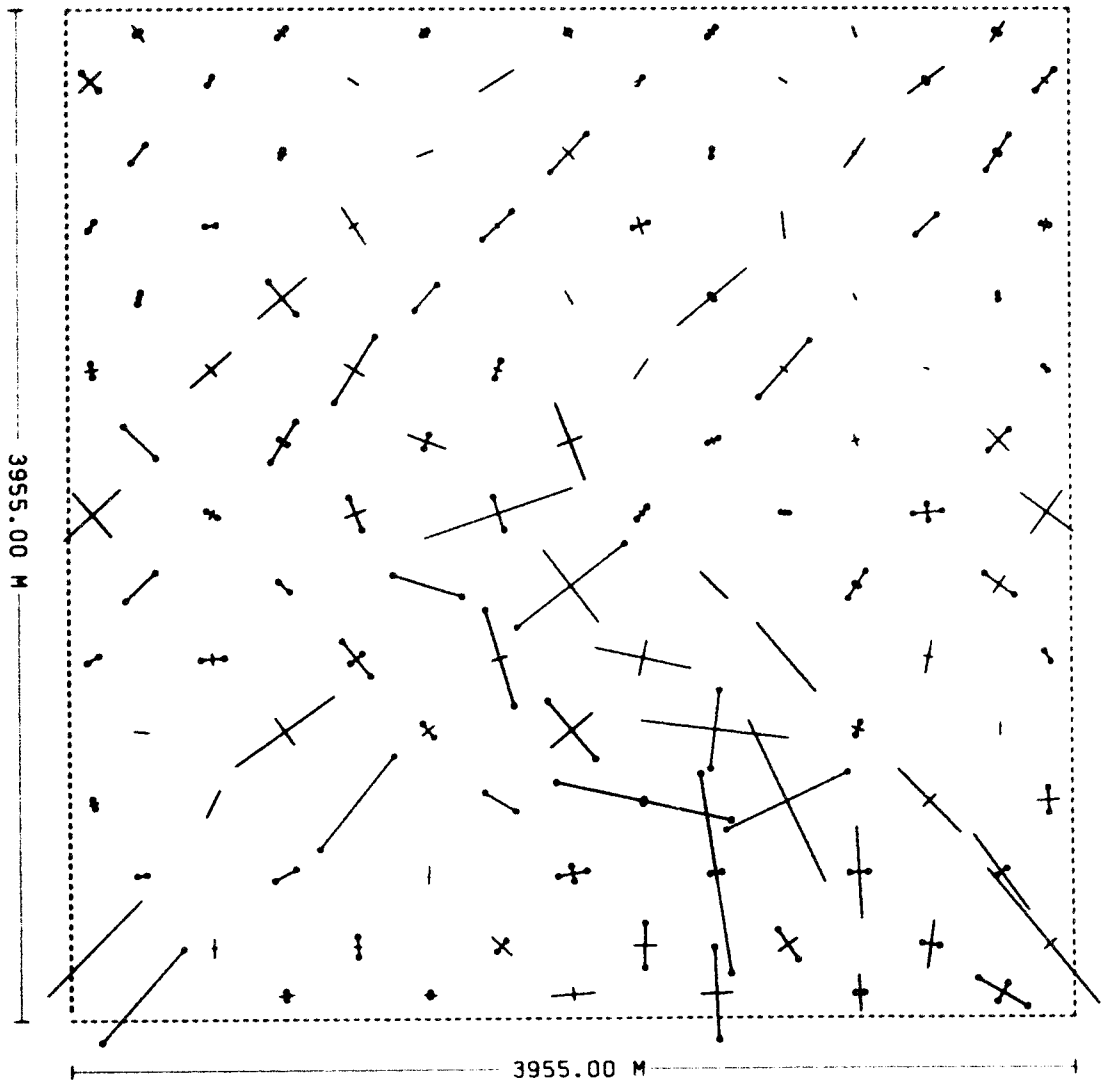


DEFORMED STRUCTURE BETWEEN THE MESHLINES (15,3) AND (34,22)

OBJECT: SPRICKBILDNING I BERGGRUNDEN MODELL 2:A SPRICKAVSTAND 1.2 KM

SEQUENCE NO. 1 -- LOADSTEP NO. 9 -- ITER. NO. 10 -- PART NO. 1

PROTOTYPE : MODEL = 21972.2 : 1. PROT.DEF : MOD.DEF = 2410.0 : 1. MAX.MOVMENT = 48199.84 MM (FOR PLOTTED ELEMENTS)



ROCK MECHANICS - R11 - JUN 27, 1977
 FEM: 217-NBSPJ02R PLOT: 266-NBSPJ051

STRESSES IN THE STRUCTURE

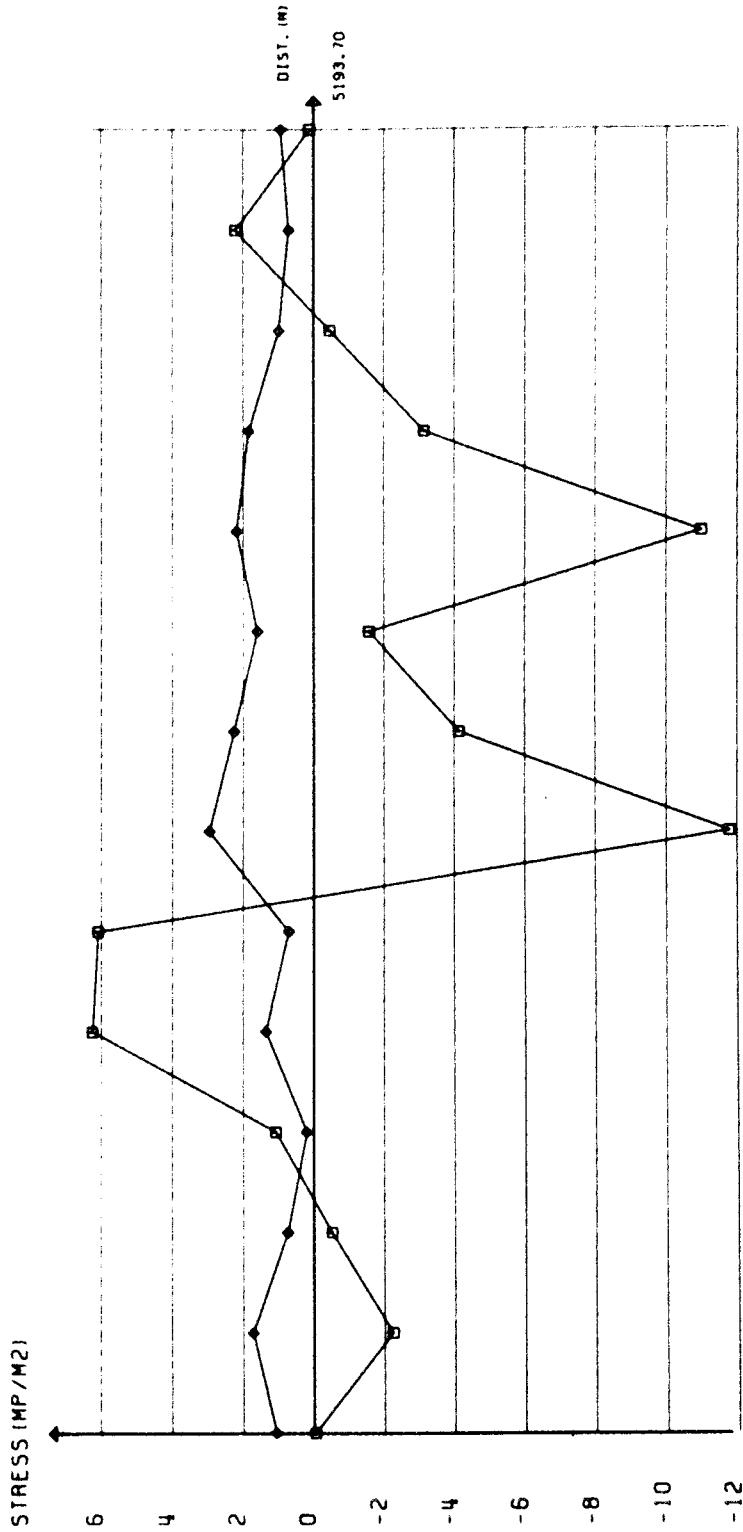
SPRICKBILNING I BERGGRUNDEN MODELL 2:A SPRICKAVSTAND 1.2 KM
 SEQUENCE NO. 1 -- LOADSTEP NO. 9 -- ITER. NO. 10 -- PART NO.1
 STRESSSCALE 0 \longleftarrow \longrightarrow 1.0 MPA

PRIN. STRESS RANGE
 -1.5 — 1.8 MPA
 (POS. STRESSES ARE TENSILE)



SPRICKBILDNING I BERGGRUNDEN MODELL 2:A SPRICKAVSTÅND 1.2 KM

SPRICKSPÄNNING LÅNGS DIAGONAL 45 SEKVENS I LASTSTEG 9 ITER 10



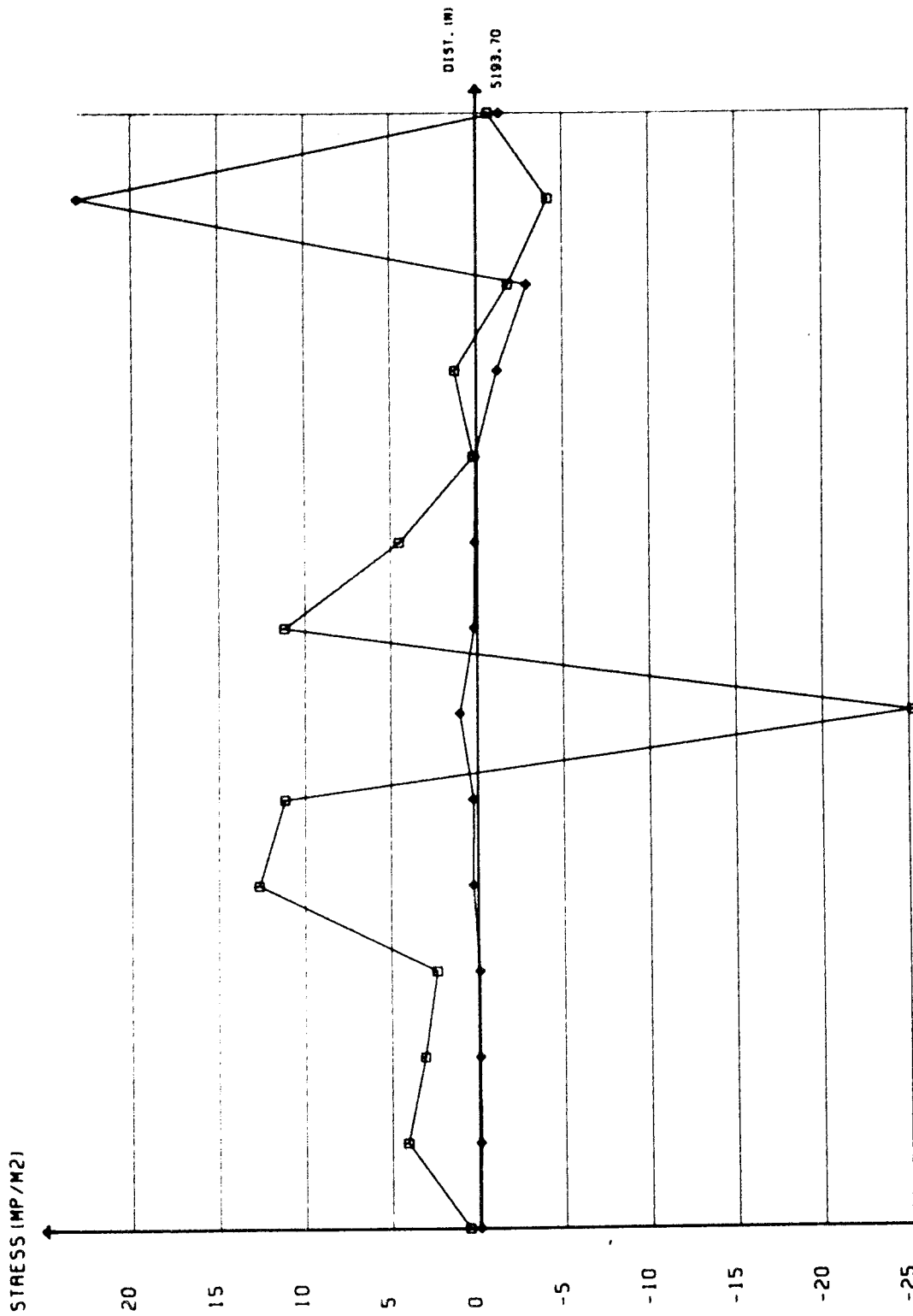
FEM-EXEKVERING:
217-NBSPJ02A
27 JUN 1977

- X - XSTRESS
- Y - YSTRESS
- * - XYSTRESS
- - NORMALSTRESS IN JOINT
- ◇ - TANG.STRESS IN JOINT



SPRICKBILDNING I BERGGRUNDEN MODELL 21A SPRICKAVSTÅND 1.2 KM

SPRICKSPÄNNING LÅNGS DIAGONAL 135 SEKVENS 1 LASTSTEG 9 ITER 10

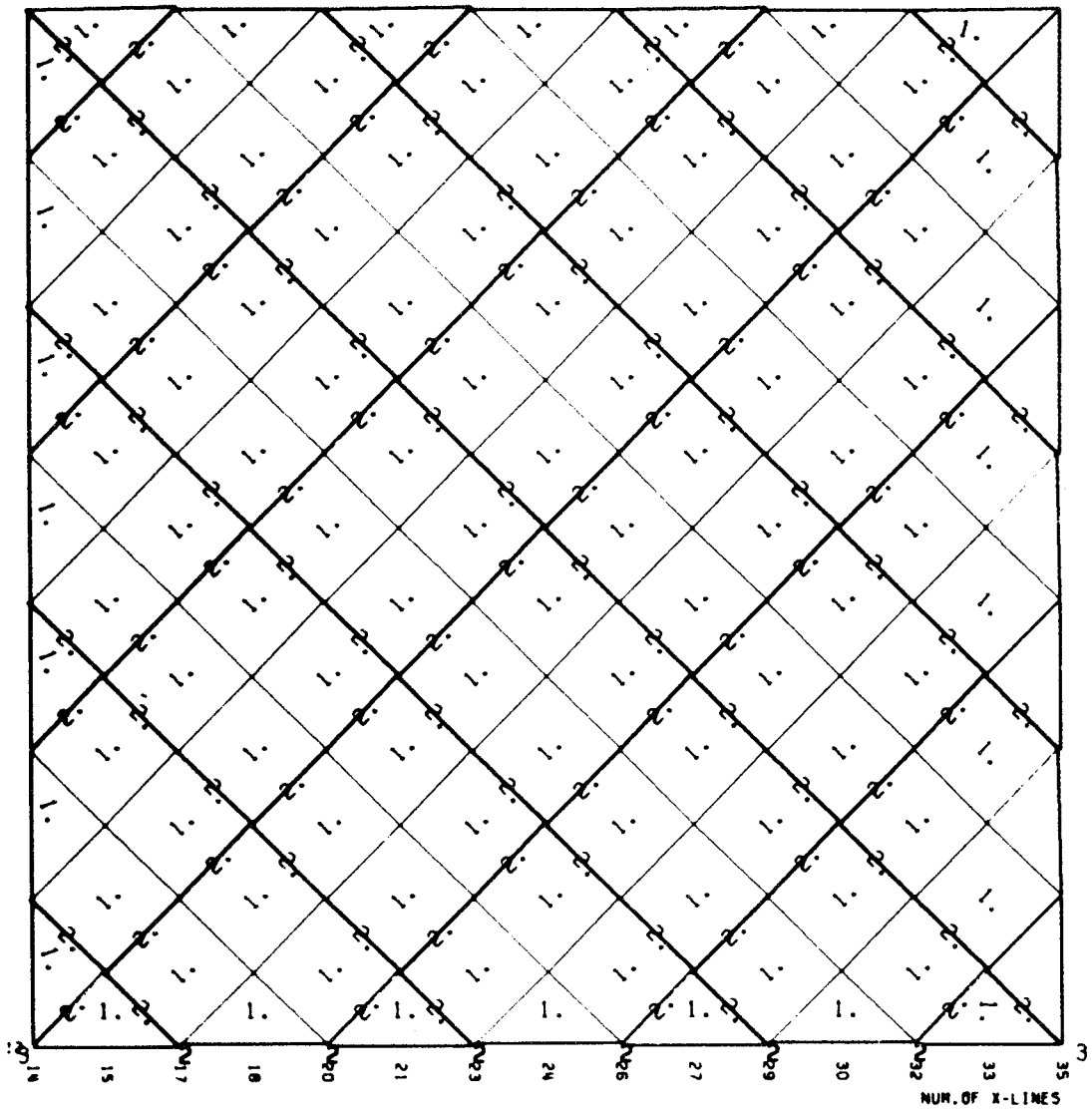


FEM-EXEKVERING:
217-NBSPJ02A
27 JUN 1977

- X - XSTRESS
- Y - YSTRESS
- * - XYSTRESS
- - NORMALSTRESS IN JOINT
- ◇ - TANG.STRESS IN JOINT



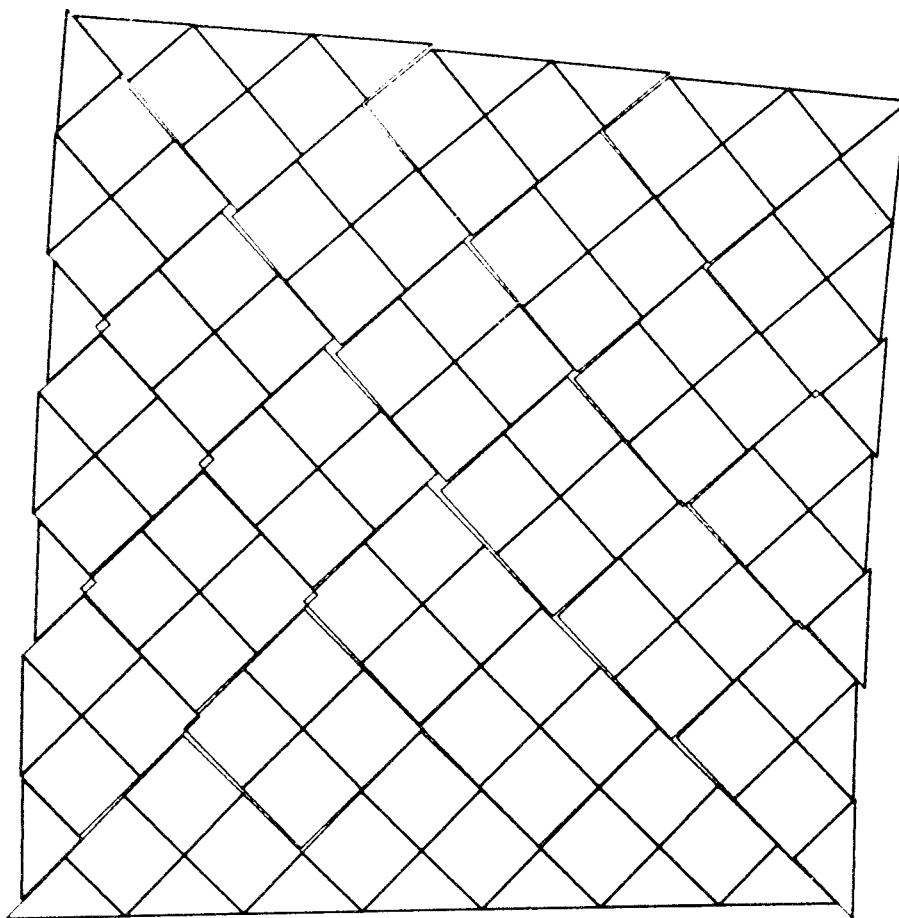
THE ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
DIV OF MINING, 10044 STH 70, SWEDEN MAY 27, 1977



IDENT. NUMBERS OF MATERIALS, Y-LINES AND X-LINES

OBJECT: SPRICKBILDNING I BERGGRUNDEN MODELL 3:A SPRICKAVSTAND 0.8 KM

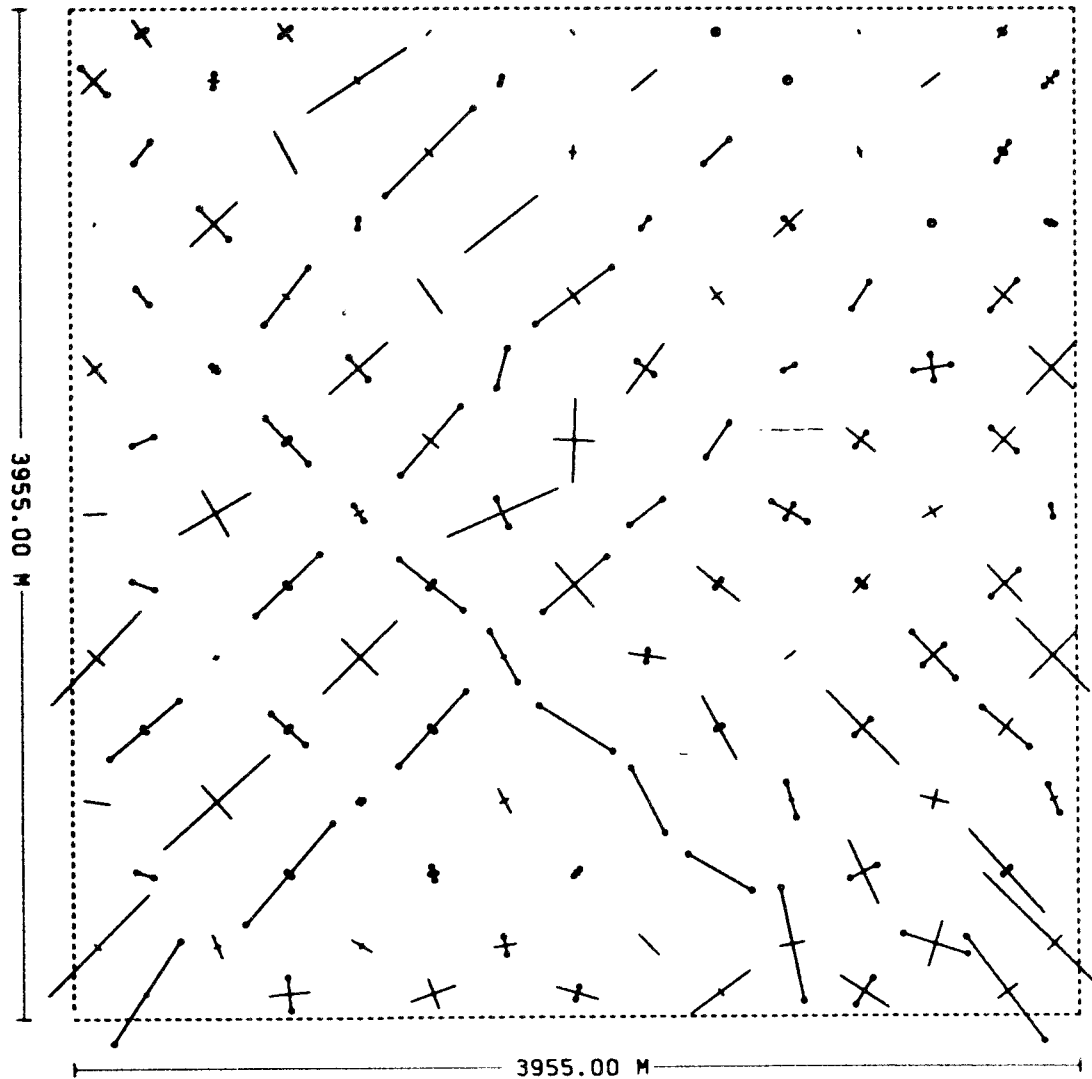
ROCK MECHANICS - RIT - JUN 4, 1977
FEM: 0338-NBSPJ03A PLOT: 570-NBSPJ00P



DEFORMED STRUCTURE BETWEEN THE MESHLINES (14.2) AND (35.22)

OBJECT: SPRICKBILDNING I BERGGRUNDEN MODELL 3:A SPRICKAVSTAND 0.8 KM

SEQUENCE NO. 1 -- LOADSTEP NO. 9 -- ITER. NO. 10 -- PART NO. 1
PROTOTYPE : MODEL = 21972.2 : 1. PROT.DEF : MOD.DEF = 2500.0 : 1. MAX.MOVMENT = 51358.25 MM (FOR PLOTTED ELEMENTS)

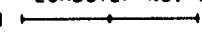


ROCK MECHANICS - RIT - JUN 4, 1977
 FEM10338-NBSPJ03R PLOT: 808-NBSPJ051

STRESSES IN THE STRUCTURE

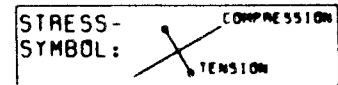
SPRICKBILDNING I BERGGRUNDEN MODELL 3:A SPRICKAVSTÅND 0.8 KM

SEQUENCE NO. 1 -- LOADSTEP NO. 9 -- ITER. NO. 10 -- PART NO. 1

STRESSSCALE 0  1.0 MPA

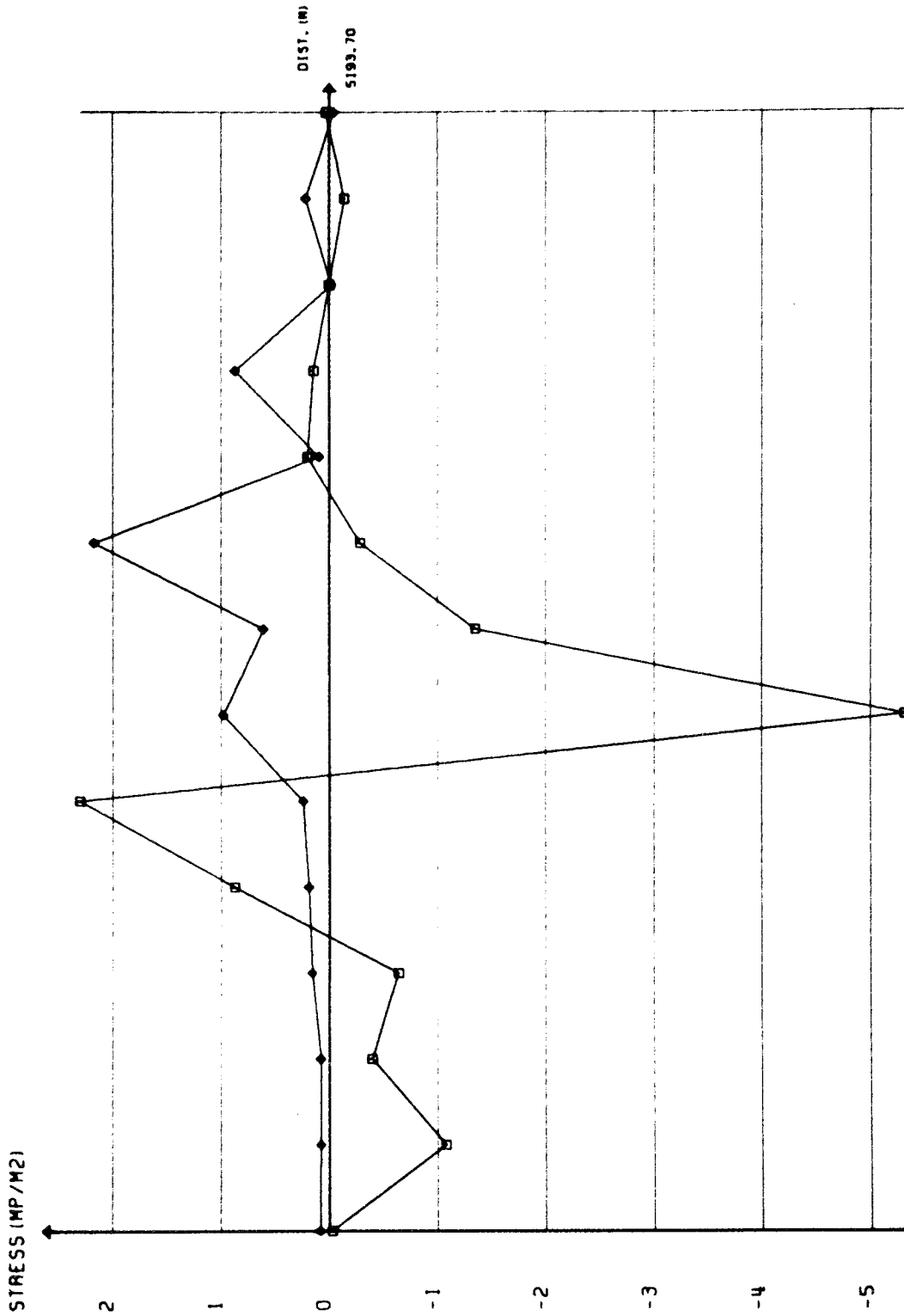
PRIN. STRESS RANGE

-1.1 — 0.8 MPA
 (POS. STRESSES ARE TENSILE)



SPRICKBILÖNING I BERGGRUNDEN MODELL 3:A SPRICKAVSTÅND 0.8 KM

SPRICKSPÄNNING LÅNGS DIAGONAL 45; SEKVENS I LASTSTEG 9 ITER 10



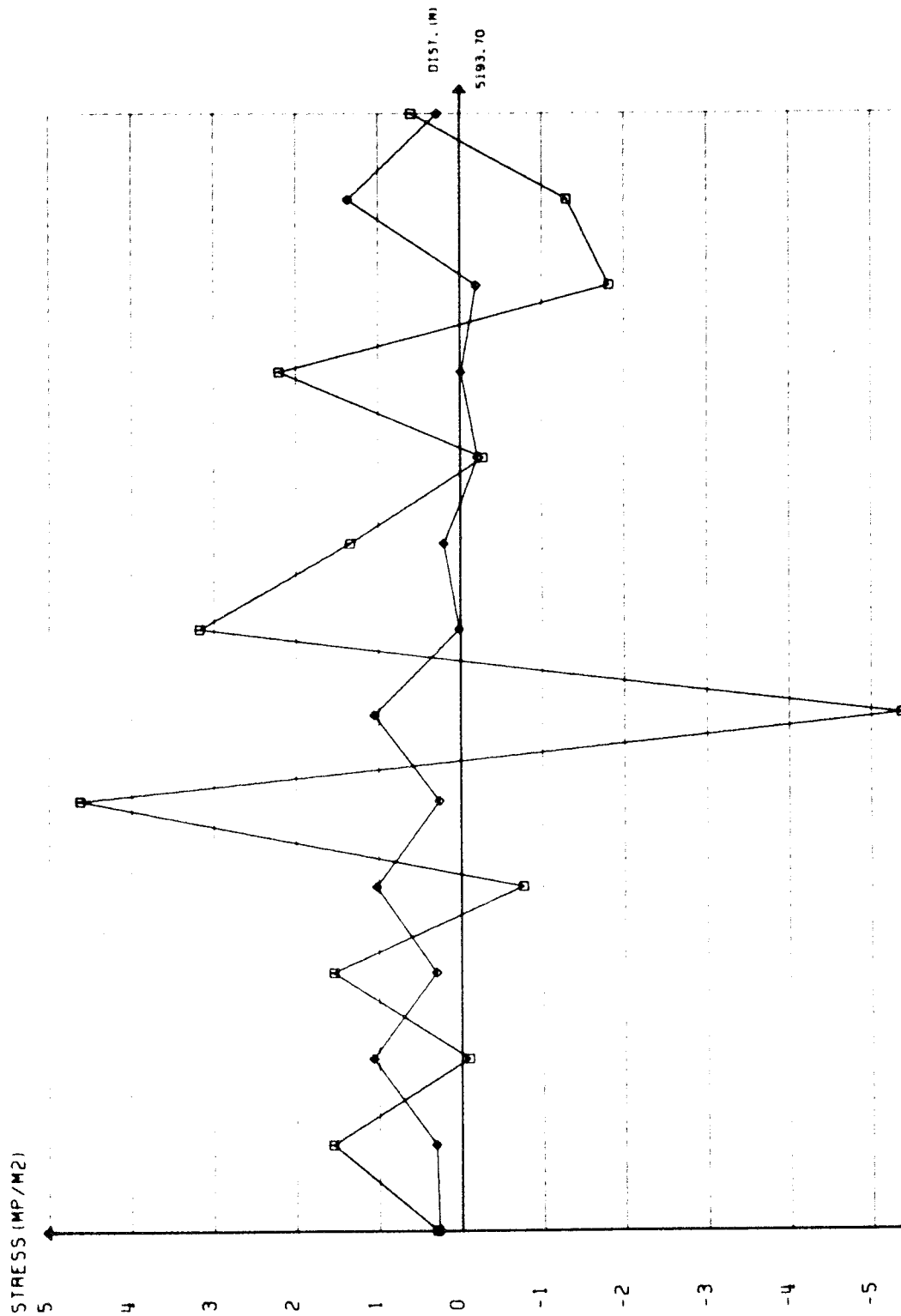
FEM-EXEKVERING:
0338-NBSPJ03A
4 JUN 1977

X - XSTRESS □ - NORMALSTRESS IN JOINT
Y - YSTRESS ◇ - TANG. STRESS IN JOINT
* - XSTRESS



SPRICKBILDNING I BERGGRUNDEN MODELL 3:A SPRICKAVSTÅND 0.8 KM

SPRICKSPÄNNING LÅNGS DIAGONAL 135 SEKVEN 1 LASTSTEG 9 ITER 10

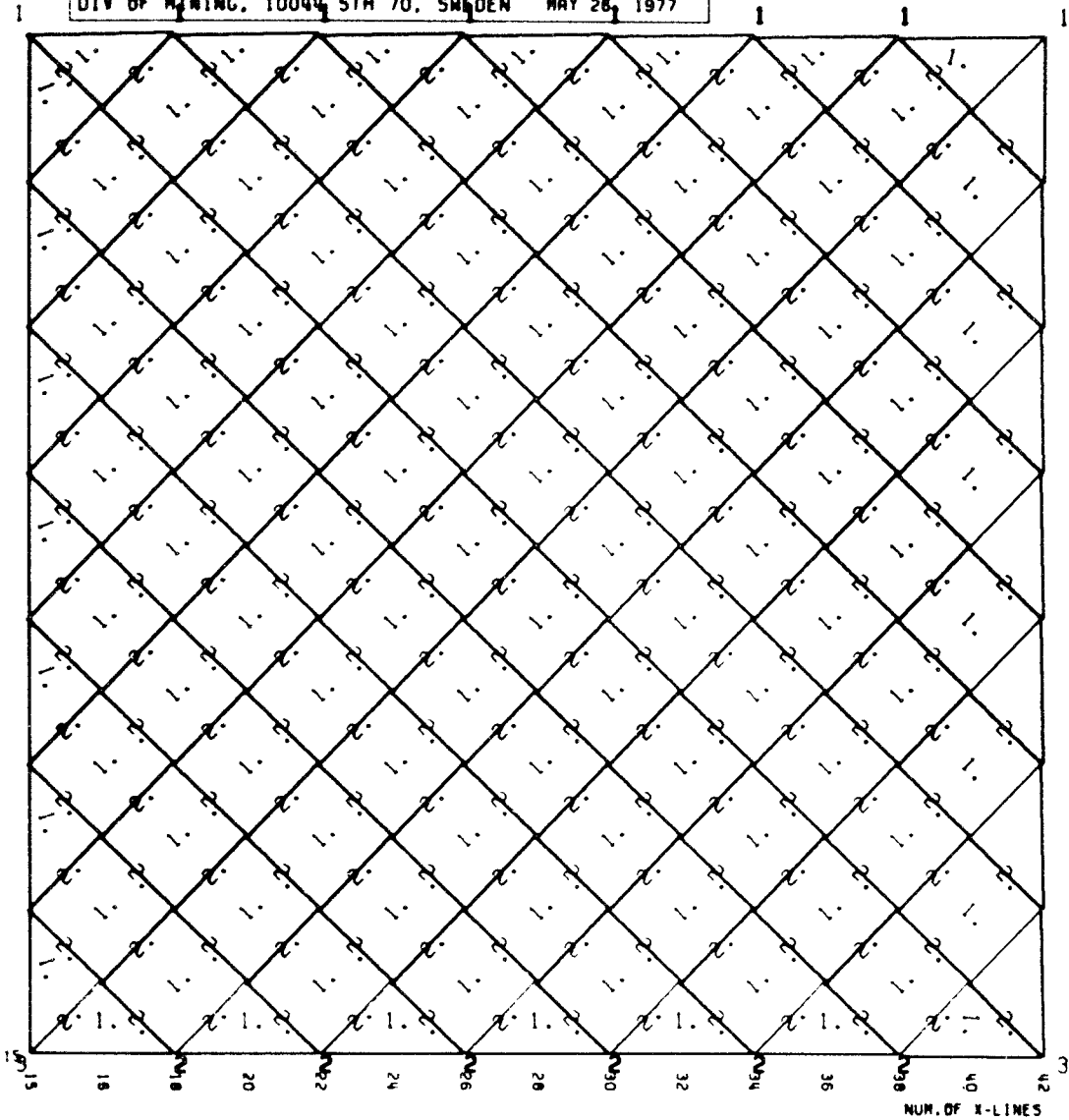


FEM-EXEKVERING:
0338-NBSPJ03A
4 JUN 1977

X - xSTRESS □ - NORMALSTRESS IN JOINT
Y - ySTRESS ◇ - TANG.STRESS IN JOINT
* - xYSTRESS



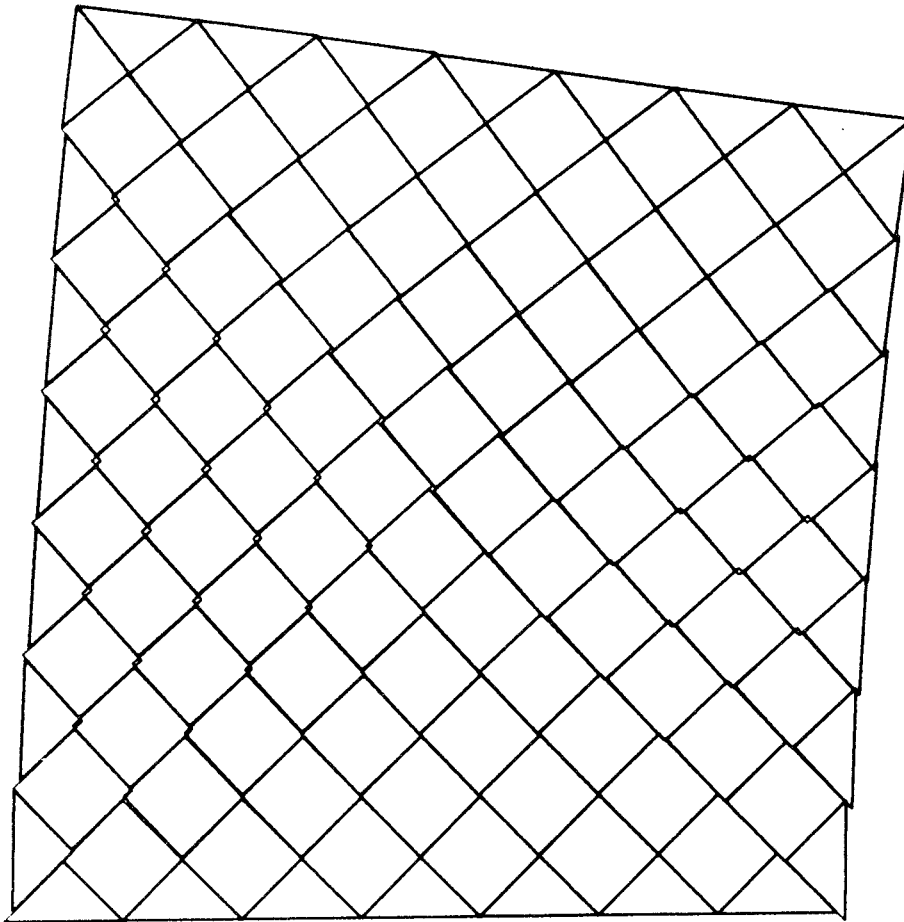
THE ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
DIV OF MINING, 10044 STM 70, SWEDEN MAY 26, 1977



IDENT. NUMBERS OF MATERIALS, Y-LINES AND X-LINES

OBJECT: SPRICKBILDNING I BERGGRUNDEN MODELL 4:A SPRICKAVSTAND 0.4 KM

ROCK MECHANICS - RIT - JUN 10, 1977
FEN: 0589-NBSPJ04A PLOT: 570-NBSPJ00P

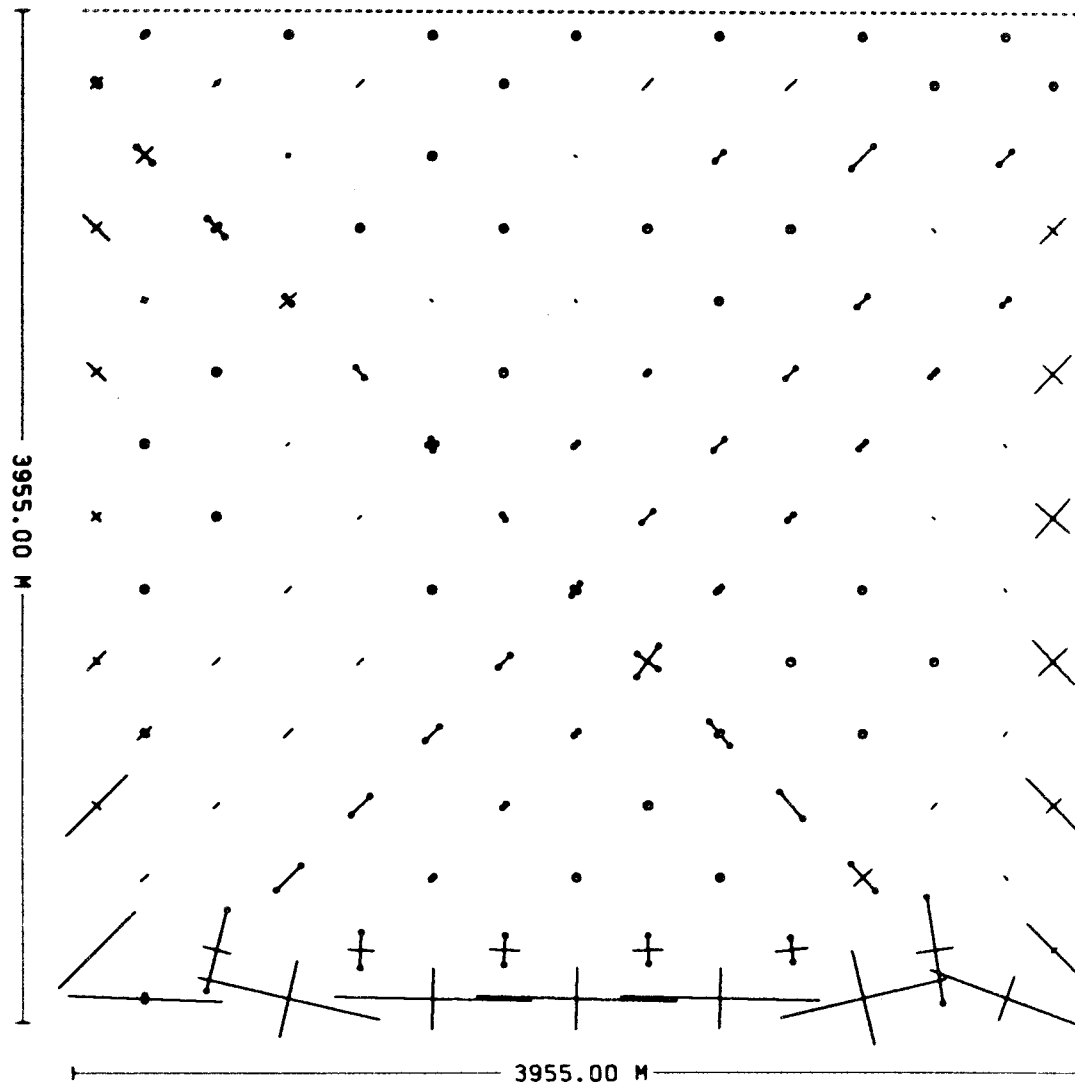


DEFORMED STRUCTURE BETWEEN THE MESH LINES (15.1) AND (41.28)

OBJECT: SPRICKBILONING I BERGGRUNDEN MODELL 4:A SPRICKAVSTAND 0.4 KM

SEQUENCE NO. 1 -- LOADSTEP NO. 9 -- ITER. NO. 10 -- PART NO. 1

PROTOTYPE ; MODEL = 21972.2 ; 1. PROT.DEF ; MOD.DEF = 2500.0 ; 1. MAX.MOVMENT = 56180.36 MM (FOR PLOTTED ELEMENTS)



ROCK MECHANICS - MIT - JUN 10, 1977
 FEM:0509-NBSPJ04A PLOT: 808-NBSPJ05T

STRESSES IN THE STRUCTURE

SPRICKBILDNING I BERGGRUNDEN MODELL 4:A SPRICKAVSTÅND 0.4 KM

SEQUENCE NO. 1 -- LOADSTEP NO. 9 -- ITER. NO. 10 -- PART NO. 1

STRESSSCALE 0 \longleftrightarrow 1.0 MPA

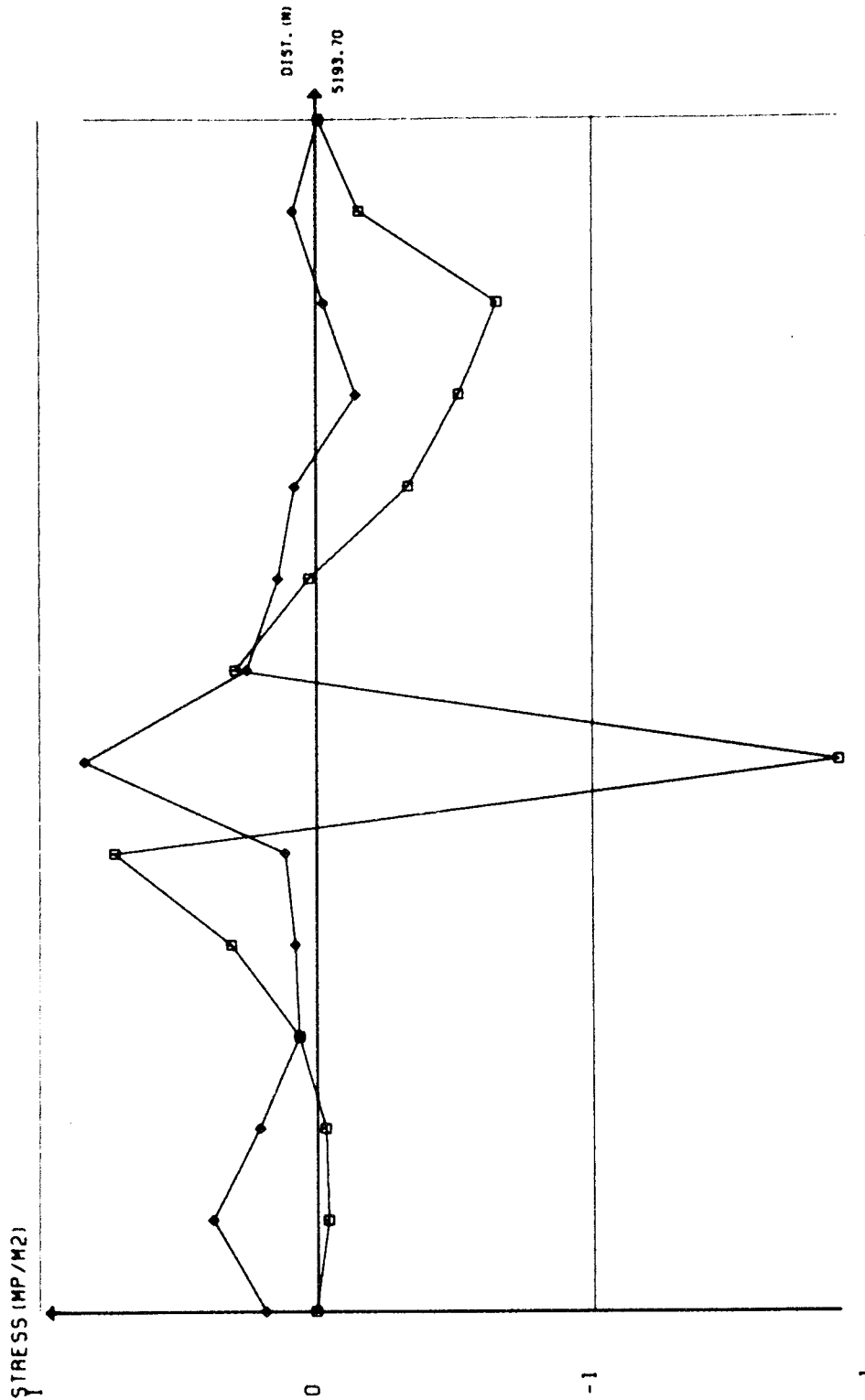
PRIN. STRESS RANGE

-1.4 — 0.7 MPA
 (POS. STRESSES ARE TENSILE)



SPRICKBILDNING I BERGGRUNDEN MODELL 4.1A SPRICKAVSTÅND 0.4 KM

SPRICKSPÄNNING LÅNGS DIAGONAL 45 SEKVENS 1 LASTSTEG 9 ITER 10



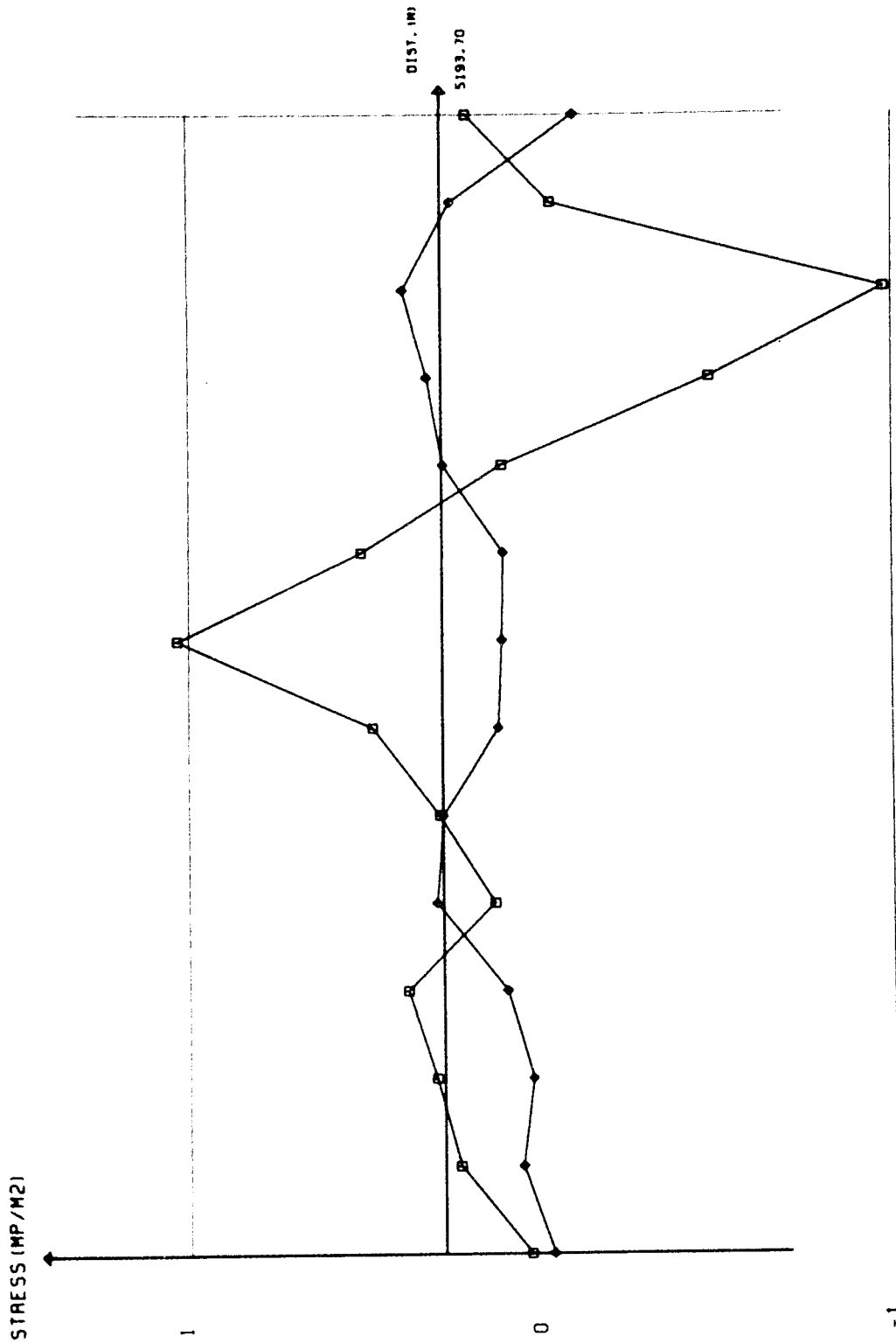
FEM-EXEKVERING:
0589-NBSPJ04A
10 JUN 1977

- X - XSTRESS
- Y - YSTRESS
- * - XYSTRESS
- - NORMALSTRESS IN JOINT
- ◇ - TANG.STRESS IN JOINT



SPRICKBILDNING I BERGGRUNDEN MODELL 41A SPRICKAVSTÅND 0.4 KM

SPRICKSPÄNNING LÅNGS DIAGONAL 135 SEKVEN 1 LASTSTEG 9 ITER 10

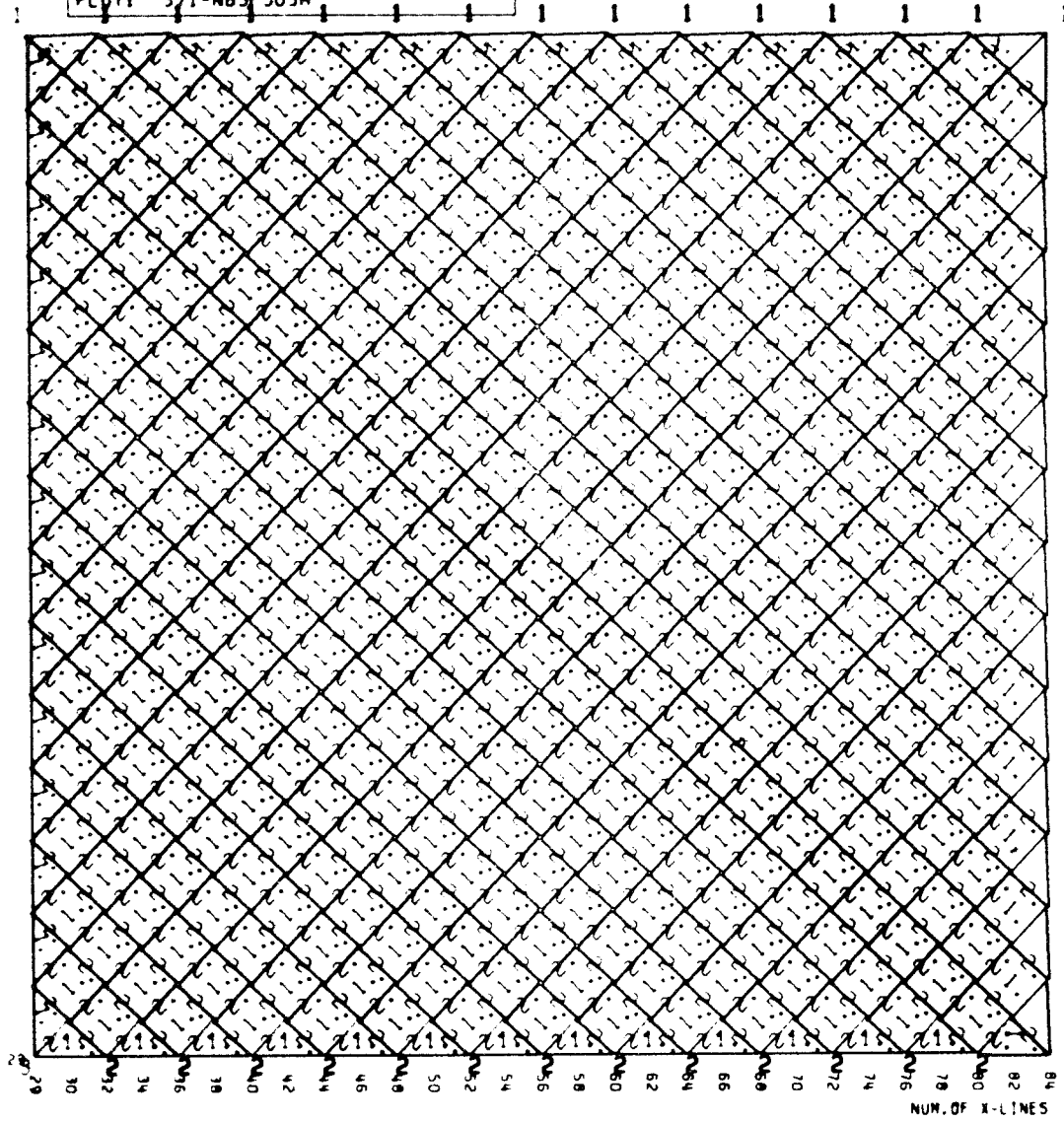


FEM-EXEKVERING:
0589-NBSPJ04A
10 JUN 1977

- X - XSTRESS
- Y - YSTRESS
- * - XYSTRESS
- - NORMALSTRESS IN JOINT
- ◇ - TANG.STRESS IN JOINT



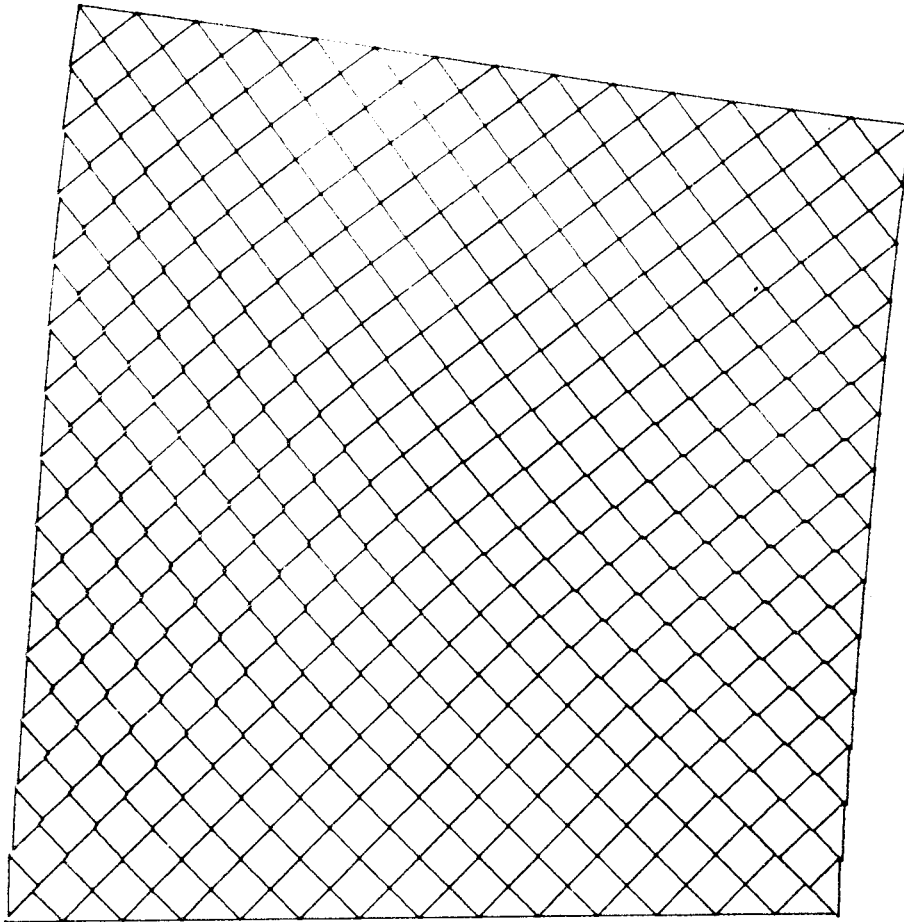
ROCK MECHANICS - MIT - AUG 26, 1977
PLOT: 571-NBSPJOSA



IDENT. NUMBERS OF MATERIALS, Y-LINES AND X-LINES

OBJECT: SPRICKBILDNING I BERGGRUNDEN MODELL 5:A SPRICKAVSTAND 0.2 KM

ROCK MECHANICS - RIT - SEP 16. 1977
FEM: 093 NBSPJ05A PLOT: 104-NBSPJPPP

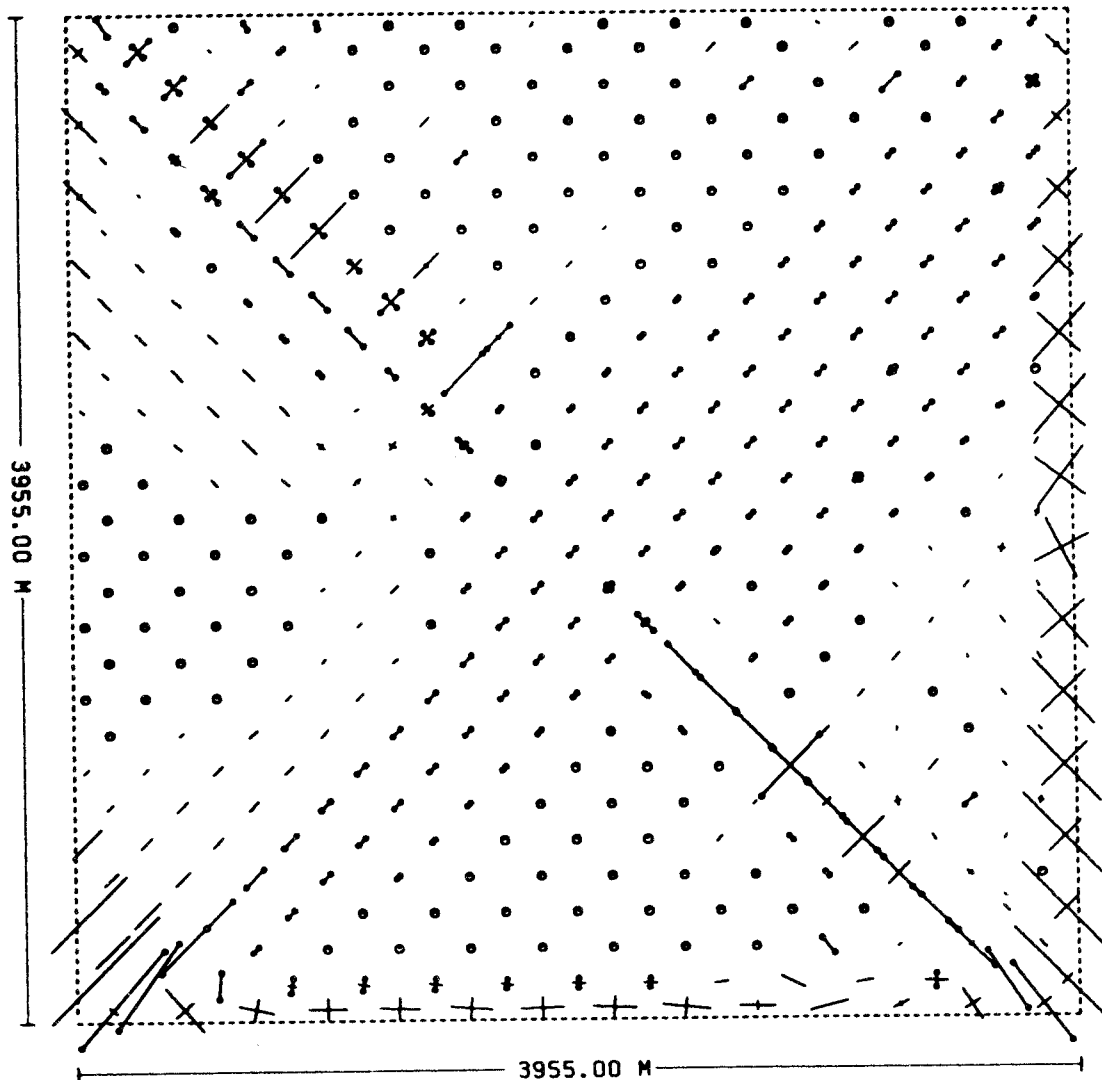


DEFORMED STRUCTURE BETWEEN THE MESHLINES (29,1) AND (84,56)

OBJECT: SPRICKBILDNING I BERGGRUNDEN MODELL 5:A SPRICKAVSTÅND 0.2 KM

SEQUENCE NO. 1 -- LOADSTEP NO. 9 -- ITER. NO. 10 -- PART NO. 1

PROTOTYPE : MODEL = 21972.2 : 1. PROT.DEF : MOD.DEF = 2500.0 : 1. MAX.MOVMENT = 57294.28 MM (FOR PLOTTED ELEMENTS)



ROCK MECHANICS - R11 - SEP 16, 1977
 FEM: 093-NBSPJ05A PLOT: 202-NBSPJPPP

STRESSES IN THE STRUCTURE

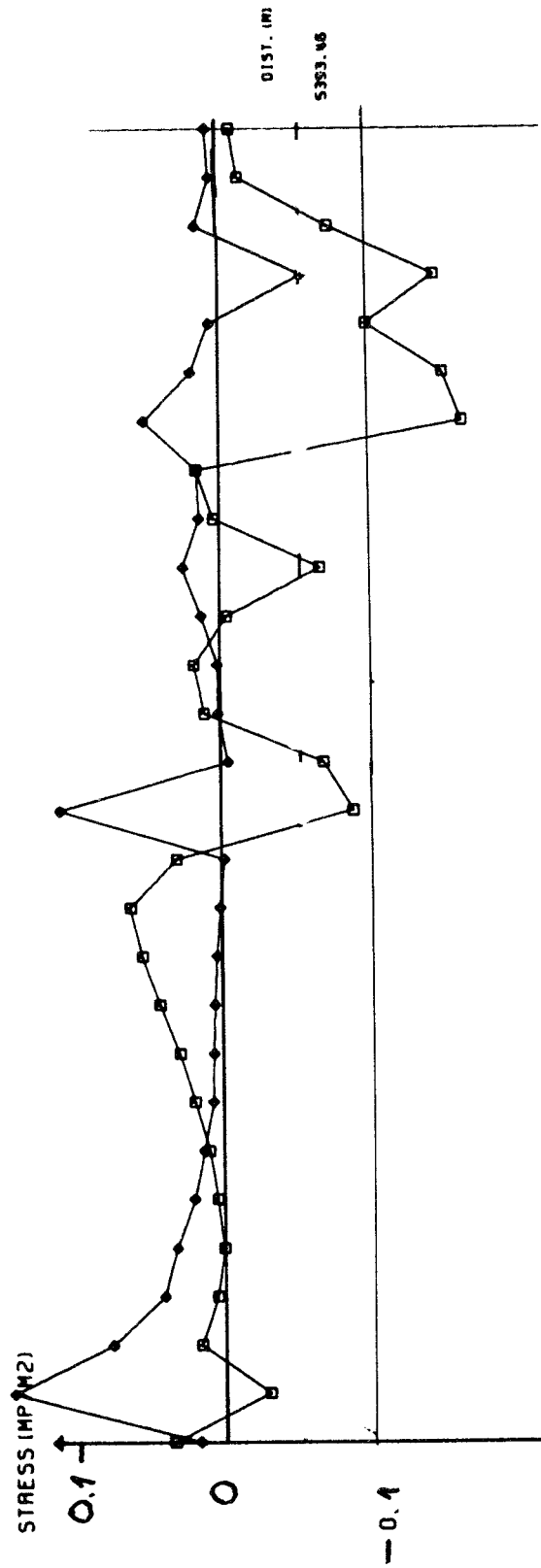
SPRICKBILDNING I BERGGRUNDEN MODELL 5:A SPRICKAVSTAND 0.2 KM
 SEQUENCE NO. 1 -- LOADSTEP NO. 9 -- ITER. NO. 10 -- PART NO. 1
 STRESSSCALE 0 \longleftrightarrow 0.2 MPa

PRIN. STRESS RANGE
 -0.4 — 0.3 MPa
 (POS. STRESSES ARE TENSILE)



SPRICKBILDNING I BERGGRUNDEN MOCELL 5.1A SPRICKAVSTÅND 0.2 KM

SPRICKSPÄNNING LÅNGS DIAGONAL 45 SEKvens 1 LASTSTEG 9 ITER 10



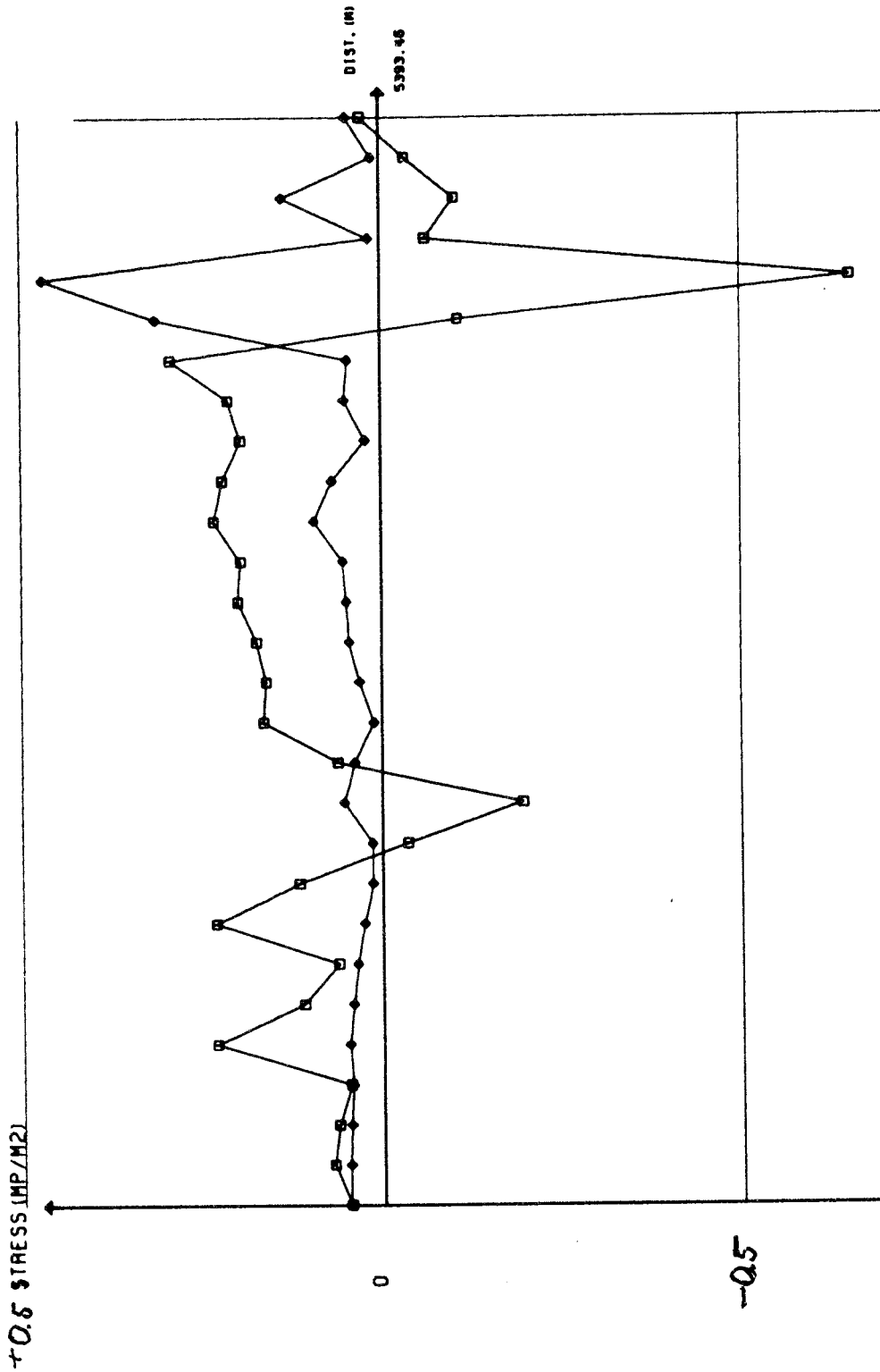
FEM-EXEKVERING:
093-NBSPJ05A
16 SEP 1977

x - xSTRESS □ - NORMALSTRESS IN JOINT
y - ySTRESS ◇ - TANG.STRESS IN JOINT
* - xSTRESS



SPRICKBILDNING I BERGGRUNDEN MODELL S: A SPRICKAVSTÅND 0.2 KM

SPRICKSPÄNNING LÅNGS DIAGONAL 135 SEKVEN 1 LASTSTEG 9 ITER 10

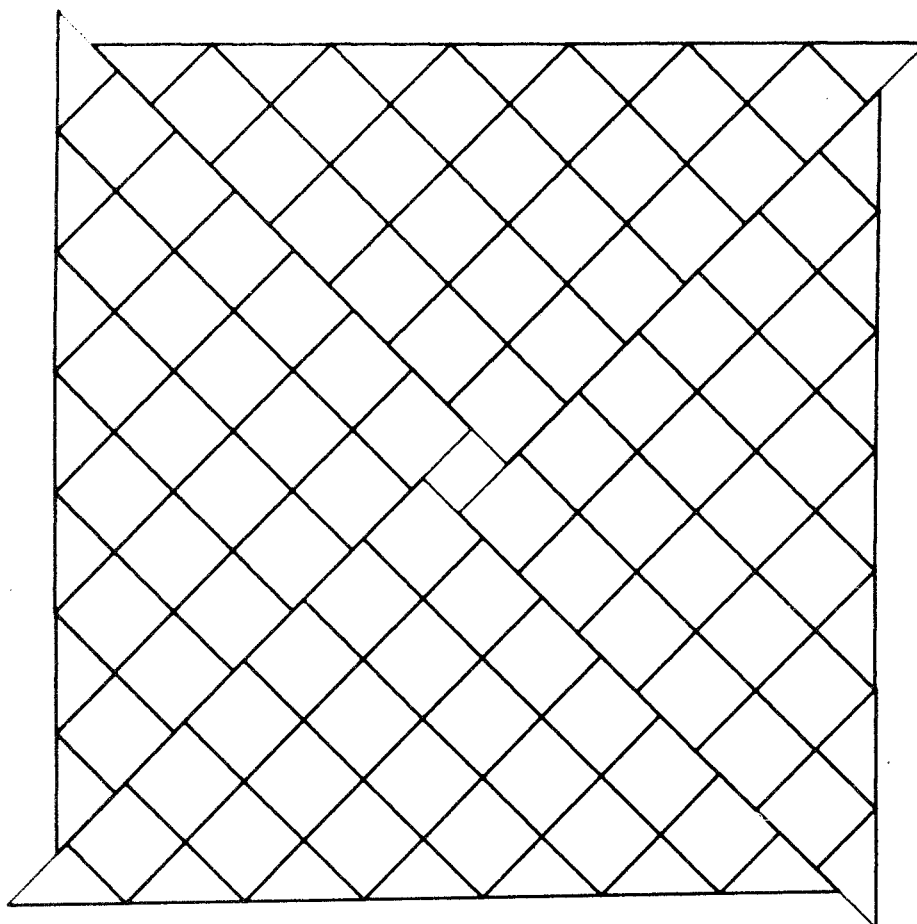


FEM-EXEKVERING:
093-NBSPJ05A
16 SEP 1977

- X - XSTRESS
- Y - YSTRESS
- * - XYSTRESS
- - NORMALSTRESS IN JOINT
- ◇ - TANG. STRESS IN JOINT



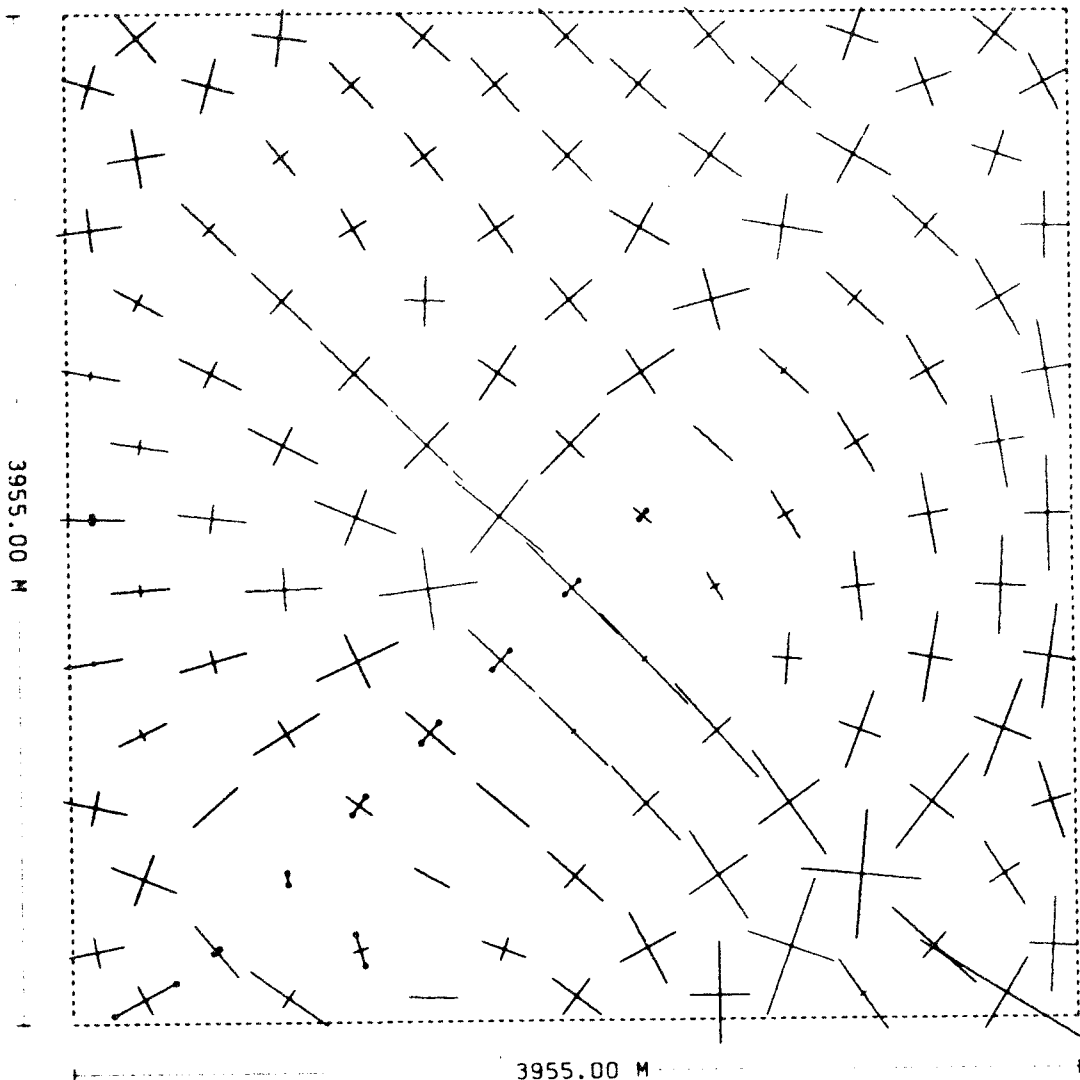
ROCK MECHANICS - RIT - SEP 20, 1977
FEN: 344-NBSPJ01B PLOT: 344-NBSPJ01B



DEFORMED STRUCTURE BETWEEN THE MESH LINES (21.4) AND (39.21)

OBJECT: SPAICKBILONING I BERGGRUNDEN MODELL 1:8 SPAICKAVSTAND 2.0 KM

SEQUENCE NO. 1 -- LOADSTEP NO. 9 -- ITER. NO. 10 -- PART NO. 1
PROTOTYPE : MODEL = 21972.2 : 1. PROT.DEF : MOD.DEF = 2038.9 : 1. MAX.MOVMENT = 40778.92 MM (FOR PLOTTED ELEMENTS)



ROCK MECHANICS - R11 - SEP 20, 1977
 FEM: 344-NBSPJ01B PLOT: 459-NBSPJ01B

STRESSES IN THE STRUCTURE

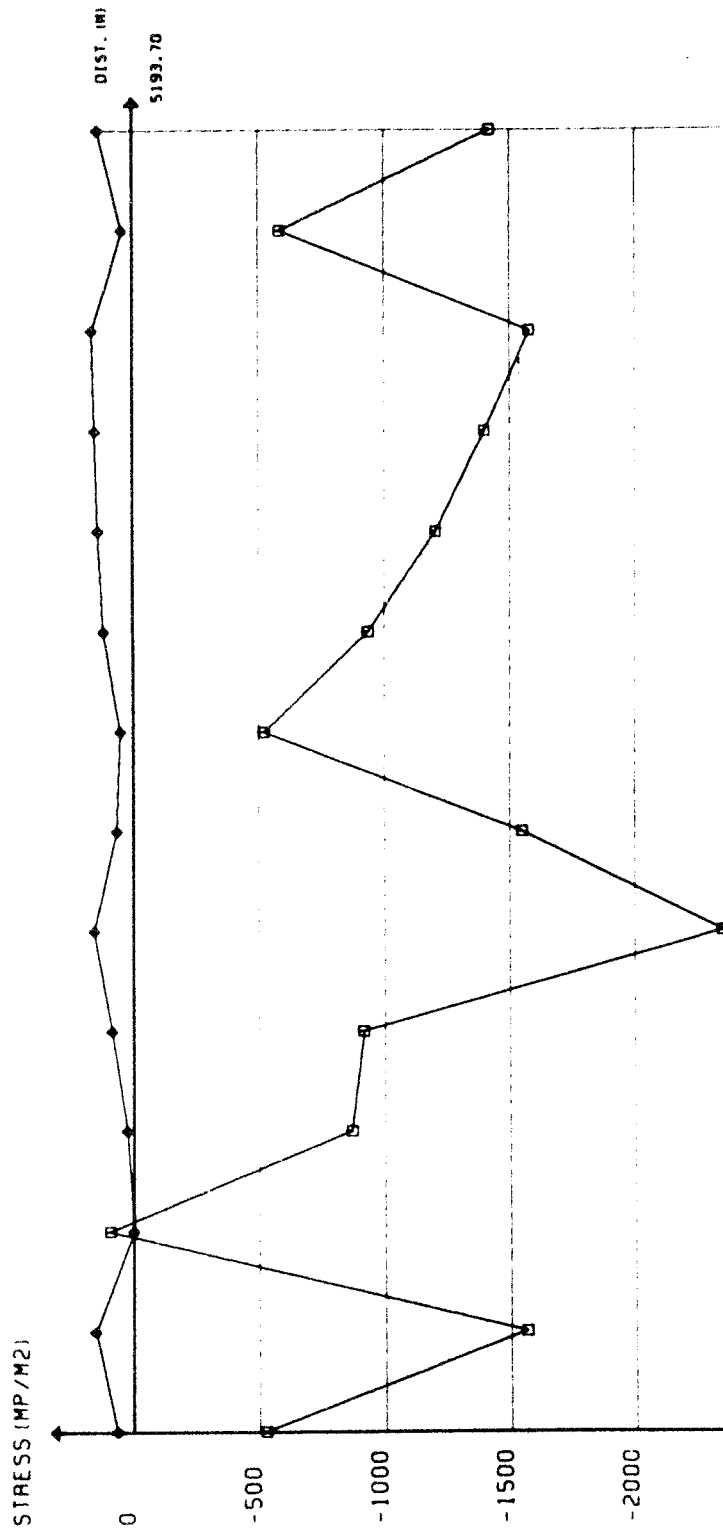
SPRICKBILDNING I BERGGRUNDEN MODELL 1:B SPRICKAVSTAND 2,0 KM
 SEQUENCE NO. 1 -- LOADSTEP NO. 9 -- ITER. NO. 10 -- PART NO.1
 STRESSSCALE 0 \longleftrightarrow 20.0 MPA

MIN. STRESS RANGE
 -36.0 — 12.6 MPA
 (POS. STRESSES ARE TENSILE)



SPRICKBILDNING I BERGGRUNDEN MODELL 1:8 SPRICKAVSTÅND 2.0 KM

SPRICKSPÄNNING LÅNGS DIAGONAL 45 SEKVEN 1 LASTSTEG 9 ITER 10



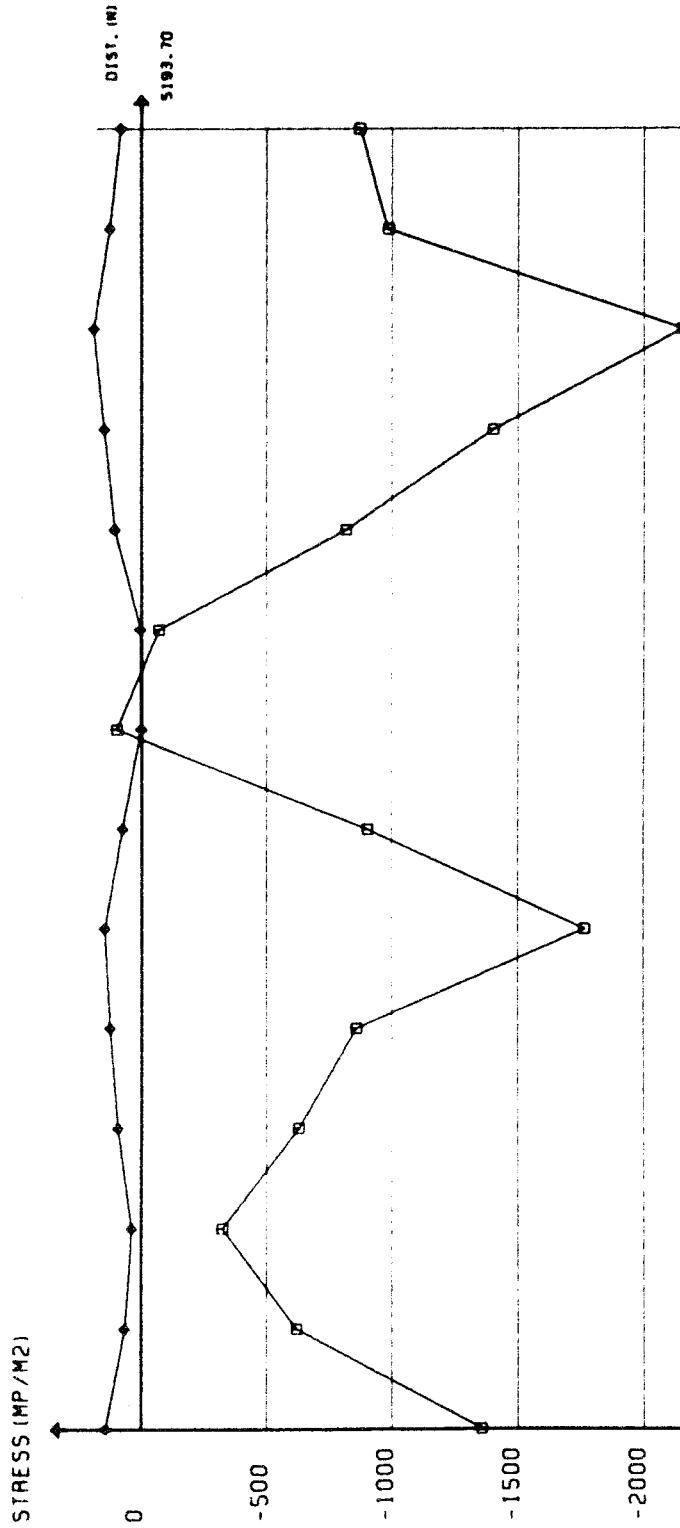
FEM-EXEKVERING:
344-NBSPJ01B
20 SEP 1977

- X - XSTRESS
- Y - YSTRESS
- * - XYSTRESS
- - NORMALSTRESS IN JOINT
- ◇ - TANG. STRESS IN JOINT



SPRICKBILDNING I BERGGRUNDEN MODELL 1.8 SPRICKAVSTÅND 2.0 KM

SPRICKSPÄNNING LÅNGS DIAGONAL 135 SEKVEN 1 LASTSTEG 9 ITER 10

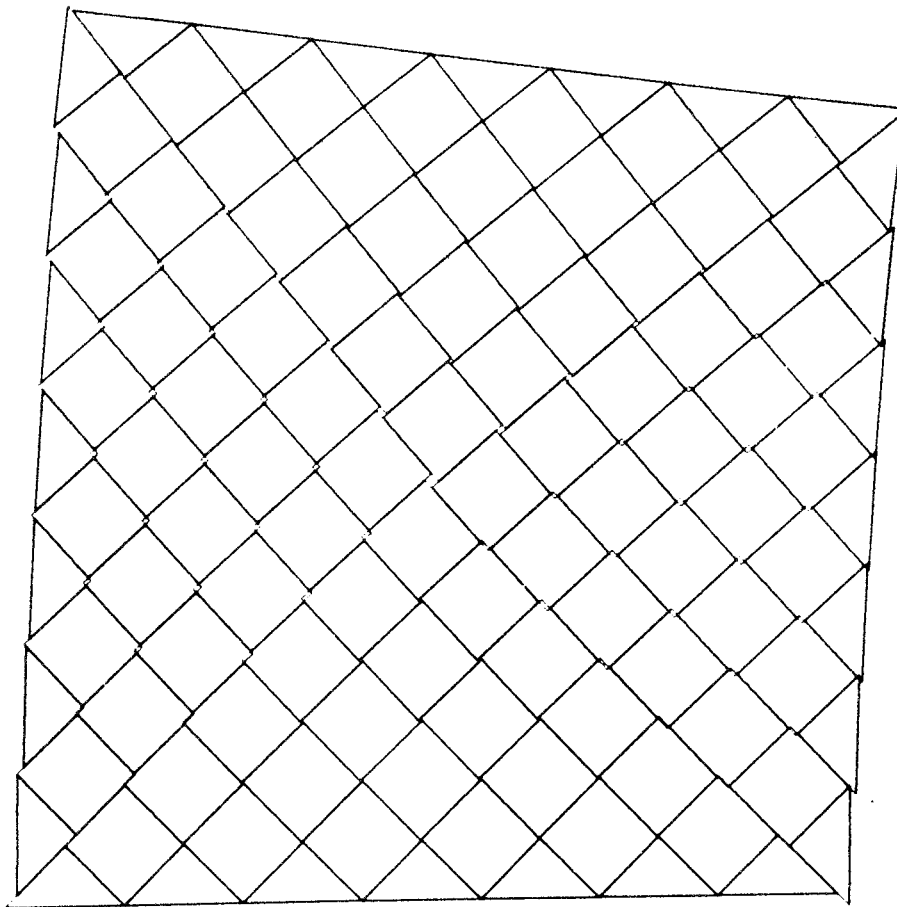


FEM-EXEKVERING:
344-NBSPJ01B
20 SEP 1977

- X - XSTRESS
- Y - YSTRESS
- * - XYSTRESS
- - NORMAL STRESS IN JOINT
- ◇ - TANG. STRESS IN JOINT



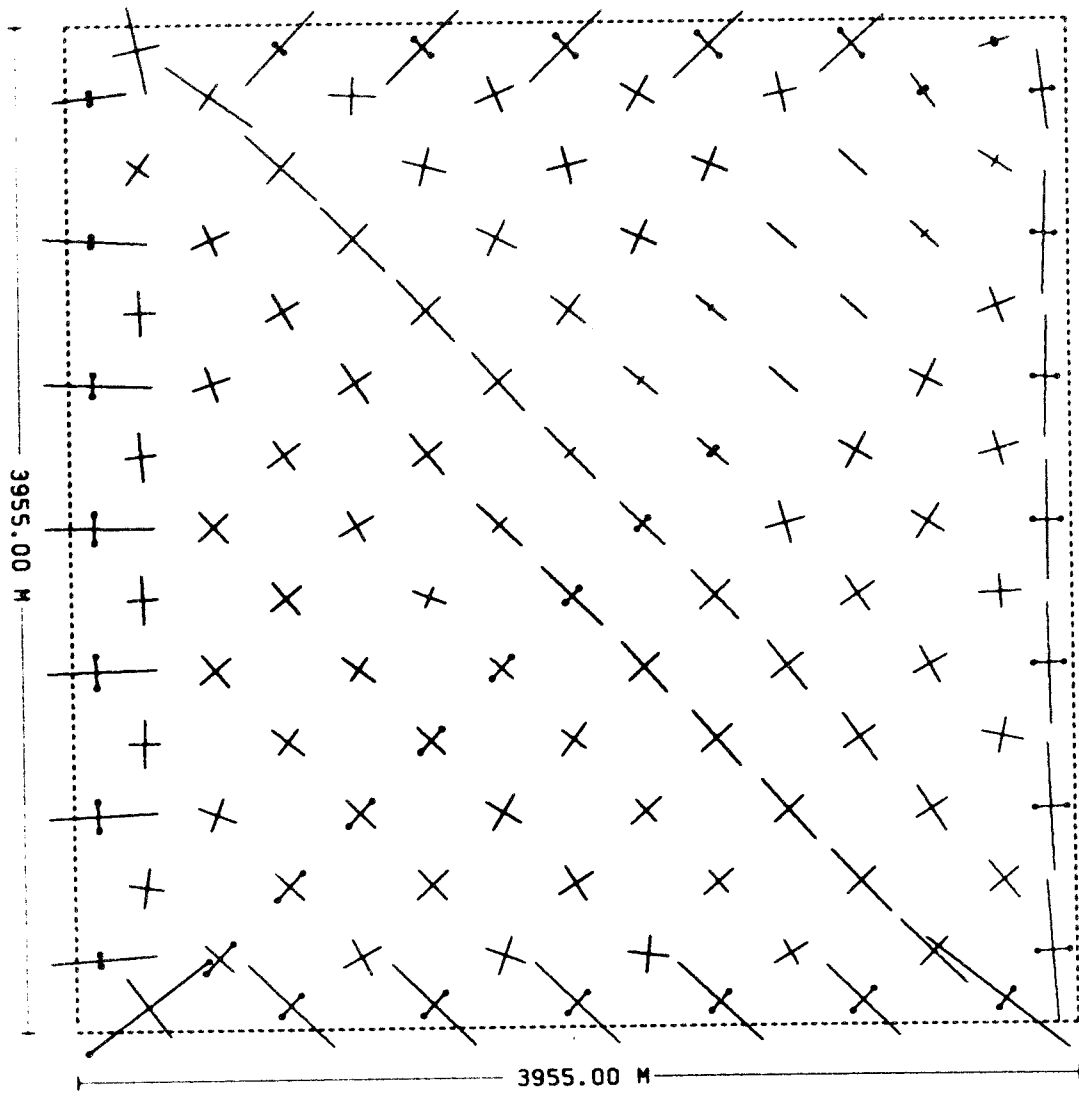
ROCK MECHANICS - RIT - SEP 20. 1977
FEM: 532-NBSPJ04B PLOT: 434-NBSPJ04B



DEFORMED STRUCTURE BETWEEN THE MESHLINES (15.1) AND (41.28)

OBJECT: SPRICKBILDNING I BERGGRUNDEN MODELL 4:8 SPRICKAVSTÅND 0.4 KM

SEQUENCE NO. 1 -- LOADSTEP NO. 9 -- ITER. NO. 10 -- PART NO. 1
PROTOTYPE ; MODEL = 21972.2 : 1. PROT.DEF ; MOD.DEF = 2500.0 : 1. MAX.MOVMENT = 50026.57 MM (FOR PLOTTED ELEMENTS)



ROCK MECHANICS - RIT - SEP 20, 1977
 FEM: 532-NBSPJ048 PLOT: 920-NBSPJ048

STRESSES IN THE STRUCTURE

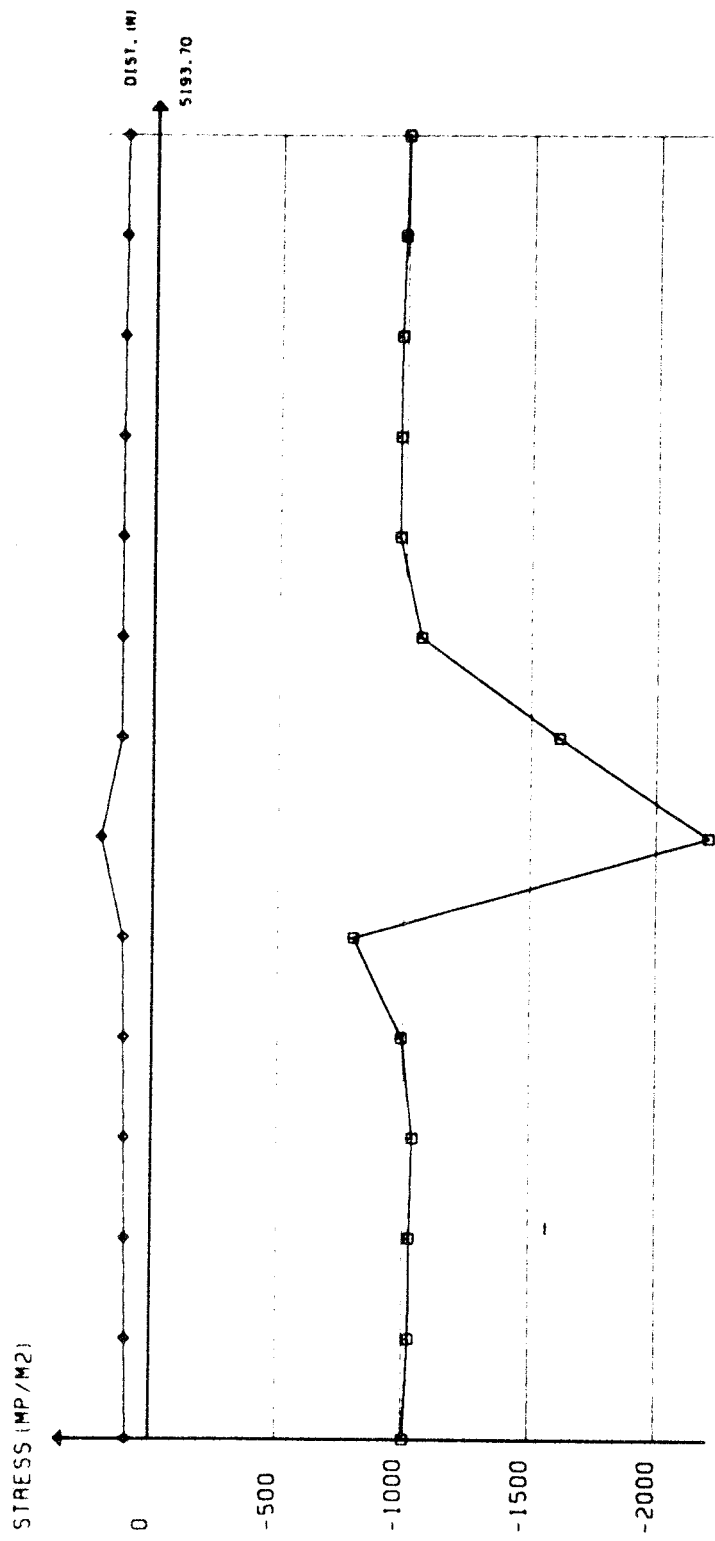
SPRICKBILDNING I BERGGRUNDEN MODELL 4:8 SPRICKAVSTÅND 0.4 KM
 SEQUENCE NO. 1 -- LOADSTEP NO. 9 -- ITER. NO. 10 -- PART NO. 1
 STRESSCALE 0 → 50.0 MPA

PRIN. STRESS RANGE
 -52.0 -- 39.4 MPA
 (POS. STRESSES ARE TENSILE)



SPRICKBILDNING I BERGGRUNDEN MODELL 4:8 SPRICKAVSTÅND 0.4 KM

SPRICKSPÄNNING LÅNGS DIAGONAL 45 SEKVENS I LASTSTEG 9 ITER 10



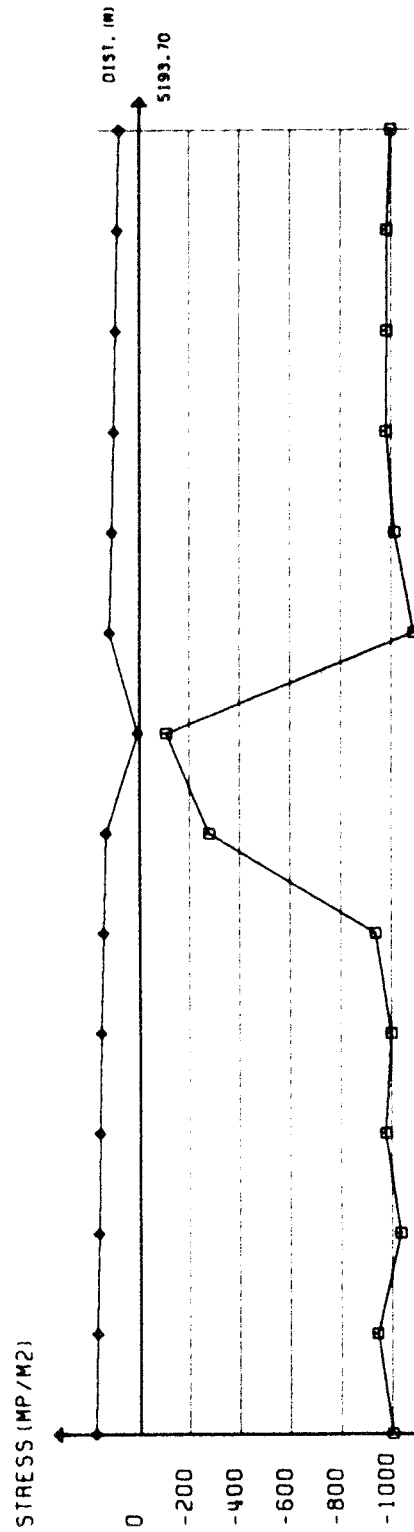
FEM-EXEKVERING:
532-NBSPJ04B
20 SEP 1977

- X - XSTRESS
- Y - YSTRESS
- * - XYSTRESS
- - NORMAL STRESS IN JOINT
- ◇ - TANG. STRESS IN JOINT



SPRICKBILDNING I BERGGRUNDEN MODELL 4.8 SPRICKAVSTÅND 0.4 KM

SPRICKSPÄNNING LÅNGS DIAGONAL 135 SEKVEN 1 LASTSTEG 3 ITER 10



FEM-EXEKVERING:
532-NBSPJ048
20 SEP 1977

- X - XSTRESS
- Y - YSTRESS
- * - XYSTRESS
- - NORMALSTRESS IN JOINT
- ◇ - TANG. STRESS IN JOINT



Förteckning över tekniska rapporter

01. Källstyrkor i utbränt bränsle och högaktivt avfall från en PWR beräknade med ORIGEN
Nils Kjellbert
AB Atomenergi 77-04-05
02. PM angående värmeledningstal hos jordmaterial
Sven Knutsson och Roland Pusch
Högskolan i Luleå 77-04-15
03. Deponering av högaktivt avfall i borrhål med buffertsubstans
A Jacobsson och R Pusch
Högskolan i Luleå 77-05-27
04. Deponering av högaktivt avfall i tunnlar med buffertsubstans
A Jacobsson, R Pusch
Högskolan i Luleå 77-06-01
05. Orienterande temperaturberäkningar för slutförvaring i berg av radioaktivt avfall
Roland Blomqvist
AB Atomenergi 77-03-17
06. Groundwater movements around a repository,
Phase 1, State of the art and detailed study plan
Ulf Lindblom
Hagconsult AB 77-02-28
07. Resteffekt för KBS del 1
Litteraturgenomgång Del 2 Beräkningar
K Ekberg, N Kjellbert, G Olsson
AB Atomenergi 77-04-19

08. Utlakning av franskt, engelskt och kanadensiskt glas med högaktivt avfall
Göran Blomqvist
AB Atomenergi 77-05-20
09. Diffusion of soluble materials in a fluid filling a porous medium
Hans Häggblom
AB Atomenergi 77-03-24
10. Translation and development of the BNWL-Geosphere Model
Bertil Grundfelt
Kemakta Konsult AB 77-02-05
11. Utredning rörande titans lämplighet som korrosionshärdig kapsling för kärnbränsleavfall
Sture Henriksson
AB Atomenergi 77-04-18
12. Bedömning av egenskaper och funktion hos betong i samband med slutlig förvaring av kärnbränsleavfall i berg
Sven G. Bergström
Göran Fagerlund
Lars Rombén
Cement och Betonginstitutet 77-06-22
13. Utlakning av använt kärnbränsle (bestrålad uranoxid) vid direktdeponering
Ragnar Gelin
AB Atomenergi 77-06-08
14. Influence of cementation on the deformation properties of bentonite/quartz buffer substance
R. Pusch
Högskolan i Luleå 77-06-20

15. Orienterande temperaturberäkningar för
slutförvaring i berg av radioaktivt avfall
Rapport 2
Roland Blomquist
AB Atomenergi 77-05-17
16. Översikt av utländska riskanalyser samt
planer och projekt rörande slutförvaring
Åke Hultgren
AB Atomenergi augusti 1977
17. The gravity field in Fennoscandia and
postglacial crustal movements
Arne Bjerhammar
Stockholm augusti 1977
18. Rörelser och instabilitet i den svenska
berggrunden
Nils-Axel Mörner
Stockholms universitet augusti 1977
19. Studier av neotektonisk aktivitet i mellersta
och norra Sverige, flygbildsgenomgång och
geofysisk tolkning av recenta förkastningar
Robert Lagerbäck
Herbert Henkel
SGU september 1977
20. Tektonisk analys av södra Sverige
Vättern - Norra Skåne
Kennert Röshoff
Erik Lagerlund
Luleå och Lund september 1977
21. Earthquakes of Sweden 1891-1957
1963-1972
Ota Kulhànek
Rutger Wahlström
Uppsala universitet september

22. The influence of rock movement on the stress/strain situation in tunnels or bore holes with radioactive consisters embedded in a bentonite/quartz buffer mass.
Roland Pusch
Högskolan i Luleå 1977-08-22
23. Water uptake in a bentonite buffer mass.
A model study.
Roland Pusch
Högskolan i Luleå 1977-08-22
24. Beräkning av utlakning av vissa fissionsprodukter och aktinider från en cylinder av franskt glas.
Göran Blomqvist
AB Atomenergi 1977-07-27
25. Blekinge kustgnejs, Geologi och hydrogeologi.
I Larsson KTH
T Lundgren SGI
Ulf Wiklander SGU
Stockholm, augusti 1977
26. Bedömning av risken för fördröjt brott i titan.
Kjell Pettersson
AB Atomenergi 1977-08-25
27. A short review of the formation, stability and cementing properties of natural zeolites.
Arvid Jacobsson
Högskolan i Luleå 1977-10-03
28. Värmeledningsförsök på buffertsubstans av bentonit/pitesilt.
Sven Knutsson
Högskolan i Luleå 1977-09-20

29. Deformationer i sprickigt berg
Ove Stephansson
Högskolan i Luleå 1977-09-28

30. Retardation of escaping nuclides from a
final depository
Ivars Neretnieks
Kungliga Tekniska Högskolan Stockholm 1977-09-14

31. Bedömning av korrosionsbeständigheten hos
material avsedda för kapsling av kärnbränsle-
avfall. Lägesrapport 1977-09-27 samt komplet-
terande yttranden.
Korrosionsinstitutet och dess referensgrupp