

FÖRSIKTIG SPRÄNGNING UR BERGMEKANISK SYNPUNKT

av

N. Lundborg

Provföreläsning för professuren i bergmekanik
10.9.73.

Uttrycket "försiktig sprängning" avser att sprängningen skall utföras så att skador ej uppstår i omgivande berg, bebyggelse eller känsliga anläggningar. Detta har ibland också kallats skonsam sprängning eller kontrollerad sprängning. "Ur bergmekanisk synpunkt" menas därvid att man skall studera sprängningens åverkan på kvarstående berg och utföra den så, att bergets hållfasthetsegenskaper och därmed stabilitet ej nämnvärt försämras. Berget ingår ju ofta som konstruktionsmaterial i permanenta eller tillfälliga anläggningar i form av bergrum, tunnlar och gruvor, där hållfasthet och stabilitet är av avgörande betydelse.

När vi studerar sprängningars inverkan på kvarstående berg kan det vara lämpligt att indela denna i närverkan som orsakas av från borrhålen utgående sprickor och gastrycket i dessa, samt i fjärrverkan, som orsakas av vibrationer, luftstöt vågor, vattenstöt vågor och stenkast.

Sprängningar kan emellertid som ovan nämnts orsaka skador inte bara i omgivande berg utan också på t.ex. bebyggelse och känsliga anläggningar i omgivningen. Vi kan därvid anta att sprängningar som åstadkommer skador på de senare även påverkar omgivande berg i negativ riktning, även om dessa kan vara svårare att upptäcka. Vi har därför all anledning att även ur bergmekanisk synpunkt studera sådana skador. Låt mig därför först säga några ord allmänt om försiktig- kontra oförsiktig sprängning.

Fig. 1 visar ett sprängförlopp där en sprängämnespatron detonerar i luft. Detonationshastigheten är 5-6 km/s och trycket mot omgivningen flera 10-tals kbar. Detta borde egentligen tyda på att försiktig och sprängning är två oförenliga begrepp. Allt är dock som bekant relativt och på 50-talet började man i Sverige, USA och Kanada experimentera med försiktig sprängning.

1. Vid oförsiktig sprängning kan skador uppstå i omgivningen på grund av markvibrationer. Fig. 2 visar ex. på vad detta kan leda till. Inte alltid blir resultatet som på figuren, men även mindre åverkan räknas som skada. För att förhindra sådant måste man använda mindre laddningsmängder

i taget. Lösningen på detta kom i och med införandet av intervall- och kortintervallmetoderna, där den momentana laddningsmängden kunde minskas. Vid kortintervallsprängning erhöles även s.k. statistisk interferens där vibrationerna från de olika intervallen motverkar varandra. Här tjänstgör även de lossbrutna bergmassorna, medan de hänger i luften som fördämning för bakomvarande rader och hindrar på så sätt stenkast.

3. I fig. 3 ser vi ex. på skador från en luftstötståg från en kraftig sprängning. Vi ser dels tryckets variation i tiden och dels dess verkan på hus och terräng.

4. En ytterligare form av s.k. skador är irritation hos kringboende på grund av markvibrationer och buller. Fig. 4 visar en sammanställning av olika kriterier för olika slag av skador och irritation.

En mera påtaglig art av skador erhålles från kringflygande stenar och splitter.

5. Med hjälp av teoretiska beräkningar och verifikation från experiment har vi kunnat fastställa max. kastlängd som funktion av stenstorleken vid sprängning med olika borrhålsdiameter (fig. 5).

6. Man blir onekligen överraskad när man ser kastlängder på över 1 km av stenar med 1 m diameter, och man frågar sig om detta kan vara riktigt? Ja.- Ex finns tyvärr på att siffrorna är riktigt. Fig. 6 ger ett ex. på detta. Oftast finns ingen människa eller hus där stenen slår ner och olyckstillbudet glöms bort. Vårt arbete vid Stiftelsen går nu ut på att finna metoder att reducera eller helt förhindra kast vid sprängning.

Vad förut sagts om skador från luftstötståg gäller också vattenstötståg vid undervattensskjutning.

Detta var några allmänna ord om vilka risker vi har att räkna med vid sprängningsarbete. Rent sprängtekniskt kan dessutom följande inträffa:

1. Vi får mycket överberg, som i och för sig inte är skadligt, men som kostar pengar och inte är särskilt vackert. Ex på detta är vägsärningar. Dessa står ofta kvar som monument över det utförda arbetet långt efter de ekonomiska och tekniska problemen glömts bort.

7. Fig. 7 är en välbekant bild på en snygg förspräckning från Niagaraprojektet
8. och fig. 8 visar en slätsprängning, också mycket bra. En slät yta är dock ej alltid detsamma som oskadat berg.

2. Överberget måste ersättas med betong som medför ytterligare kostnader. Ex. på detta utgör tunnlar i kraftverk et.c. där vätska skall flyta och motståndet nedbringas med hjälp av släta ytor.

9. Fig. 9 visar slätsprängning i Stornorrforsens kraftverk.
3. Berget försvagas och måste förstärkas i den mån det ingår i en bergkonstruktion t.ex. i bergrum, tunnlar och gruvor.
4. Risk för stenfall, ras eller total kollaps med åtföljande olyckor.
5. Risk för stenkast, rekylskador och skador från luft- och vattenstöt-vågor.
10. Fig. 10 visar resultat från ett examensarbete i Kiruna. Vi ser här antalet stenfall och mindre ras som funktion av vibrationernas svängningshastighet. Av figuren framgår att hastigheten måste vara så låg som 7 mm/s för att undvika stenfall. Detta är en mycket låg siffra och ungefär en tiondel av vad man brukar tolerera för normal bebyggelse.
11. 6. Hållfastheten i bärande konstruktioner (pelare) försvagas på grund av kraftiga upprepade vibrationer. Ett ex.arbete pågår f.n. i Laisvall för att studera dessa effekter. Bureau of Mines har nyligen publicerat ett
12. 11. arbete där skador i närzonen av ett borrhål studerats. Fig. 11 och 12
12. 12. visar arrangemanget, och vi ser att åverkan är kraftigast nära borrhålet och ut till 50-60 ggr håldiametern, men även nära pelarnas ytor. Det framgår dock inte av rapporten om de senare skadorna uppkommit av laddningen i borrhålet eller vid utsprängning av pelarna.

Hur skall då försiktig sprängning utföras?

Låt oss först ta en titt på det fasta berget. I de flesta bergmaterial ingår ett antal olika spricksystem av olika finmaskighet.

13. I fig. 13 har vi valt ut tre av dessa. Ni kanske känner igen en del av följande bilder från P.A. Perssons föredrag på bergmekanikdagen. Nu vet man sedan länge, vilket även stöds av den linjära brottmekaniken, att ett
14. 14. grövre spricksystem fordrar mindre spänning för att utlösas. Fig. 14 anger därvid gränserna för brott i de olika spricksystemen runt ett borrhål. Områdena är därvid i ett utfyllt hål proportionella mot håldiametern.
15. 15. Om vi nu väljer tre olika håldiametrar enligt fig. 15 kan vi studera styckefallet och de däremot proportionella spricklängderna i det kvarstående berget.

Vi ser att för den minsta diametern erhålles endast styckefall av minsta storleken, för den mellersta av de två minsta storlekarna, och för den största av alla tre storlekarna.

16. 16. Fig. 16 visar siktkurvorna för de tre fallen. Detta tyder på att när-effekterna kan minskas om man använder små hål eller rättare små laddningar i konturhålraden. Detta har man utnyttjat i metoderna slätsprängning och

förspräckning. En åtgärd som ytterligare minskar skadorna är att hålen ej utfylls med sprängämne.

Låt oss nu se vad som händer runt en detonerande laddning i ett borrhål.

17. Fig. 17 visar hur spricksystemet utbildas kring ett borrhål. Vad som här först förvånar oss är två saker: Sprickorna börjar inte vid stötvågsfronten, och de börjar inte vid borrhålsranden. Dessa effekter skall senare förklaras.
18. Fig. 18 visar spricksystemet sett från hålets längdaxel. Vi ser här tre olika system: Ett inre som flutit under högt tryck, ett utanför med skjuvbrott och ett yttre med dragbrott (radiella sprickor). Vid minskad laddningskoncentration vandrar spricksystemet inåt och sist kvarstår endast de radiella sprickorna.
19. Fig. 19 visar spricksystemet kring ett borrhål i granit. Här ser vi också utlösning av tidigare spricksystem.
20. Fig. 20 visar en datorberäkning av hur trycket i stötvågen minskar från en laddning som helt fyller ut hålet, till trycket från samma laddning i ett hål med 1.5 ggr så stor radie. Vi ser hur stötvågen nästan försvinner och detta minskar naturligtvis fjärrverkan. Vid flera hål i rad kan man därvid avpassa laddningarna så att man i stort endast får en enda spricka från hål till hål.
21. Fig. 21 visar ex på detta i plexiglas. Ej fullt laddade hål ger därvid ej som man kunde vänta sämre sprängningsresultat utan ökar i stället brytförmågan.
22. Fig. 22 ger ex på detta. Vi ser här max. försättningen från en 11 mm laddning i olika borrhål. Fig. visar därvid att bästa brytförmåga erhålles för håldiametern lika med dubbla laddningsdiametern.

Man hör ibland den åsikten att förspräckning och slätsprängningsraden skall sprängas momentant så att stötvågorna samverkar. I verkligheten torde dock det statiska gastrycket i hålen vara av dominerande betydelse och samverkar under en längre tid.

Langefors har sålunda visat (IVA 1965) att skadorna vid förspräckning och slätsprängning minskar från 2 till 0.4 m om man har en spridning på några ms.

I modellskala har vi provat nya metoder att rikta sprickor vid sprängning. Anders Ladegaard-Pedersen har utfört försök i plexiglas med en anordning enligt fig. 23 som givit goda resultat. Metoden har dock inte provats i fält.
- 23.

Förspräckning skiljer sig från slätsprängning i så mån att konturhålen sprängs först. På detta sätt hindras dragvågor att fortplanta sig in i det kvarstående berget. Då berg är betydligt känsligare för drag än tryck är således ur denna synpunkt förspräckning att föredra. Å andra sidan fordrar förspräckning något kraftigare laddning och kan således i sig själv orsaka större skador än slätsprängning. Slätsprängning är också att föredra vid trasigt berg med vågräta slag.

24. Fig. 24 visar hålavståndet som funktion av håldiametern vid förspräckning och slätsprängning. I båda metoderna får vi komma ihåg att även andra rader än kanthålsraden kan orsaka brott, som sträcker sig in i kvarstående berg.

Detta kan orsakas av närverkan från närmaste rad, men naturligtvis framförallt av fjärrverkan från kil och inspända hål. Langefors ger ex på skador i form av stenfall på upp till 250 m avstånd (IVA 1965).

Berghållfasthetens betydelse.

Att berghållfastheten inverkar sprängtekniskt och bergmekaniskt är naturligtvis självklart. Berghållfastheten har emellertid en del egenskaper som inte är så allmänt kända men som kan vara av betydelse i sammanhanget.

- De flesta för att inte säga alla bergmaterial har en med trycket ökande
25. hållfasthet. Fig. 25 visar hållfastheten för sandsten vid olika värden på
26. ena huvudspänningen och fig. 26 visar hållfastheten i deviatorplanet vid olika medelspänningar.

Detta kan vi utnyttja dels vid sprängning där vi bör ha en låg huvudspänning (ej spränga inspönt) dels i stabilitetshänseende där vi på konstlad väg (buln.) höjer minsta huvudspänningen.

Dessa kurvor är ganska svåra att bestämma exp. Vid Universitetet i München, fick jag för första gången i våras se en polyaxial press och jag vet att en liknande finns i Japan.

- Med hjälp av en vid Stiftelsen utarbetad statistisk metod kan man dock
27. lätt beräkna kurvorna vi såg förut och fig. 27 visar att överensstämmelsen är god mellan experimentella och beräknade värden.

28. I fig. 28 anges relationen $\sigma_1; \sigma_3$ vid brott. Vi ser här att drag-, tryck- resp. inspönt tryckbrott förhåller sig som 1:10:100 eller 1:100:10000 energi-mässigt, vilket tyder på att bästa sättet att bryta berg är medelst dragspänningar (inspönt undvikes).

Kurvan ger också förklaringen till de tre sprickzonerna vi såg runt borrhålet. Närmast hålet erhålles höga tryck, som ger omedelbar flytning av materialet (område 3). Längre ut, brister materialet ej genast utan först när punkten $\sigma_1; \sigma_3$ vandrar mot det statiska tillståndet och överskrider brottkurvan (område 2) erhålles skjuvbrott.

Längst ut är trycket ännu mindre i fronten och dragbrott erhålles i område 1.

Härav framgår också att de olika zonerna försvinner i tur och ordning vid minskande laddningskoncentration.

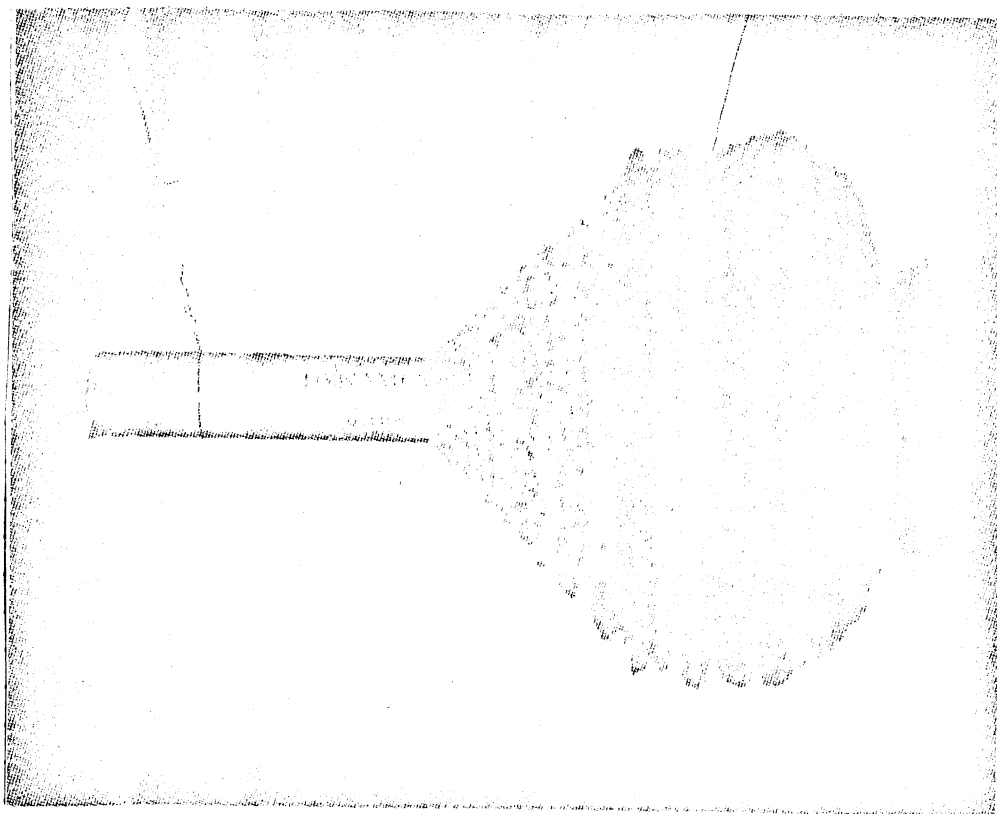
Ett par andra effekter när det gäller hållfastheten man måste komma ihåg är dess volyms- och tidsberoende.

29. Fig. 29 visar hållfastheten som funktion av volymen enligt olika författare, och fig. 30 hållfasthetens tidsberoende för granit vid olika temperaturer.

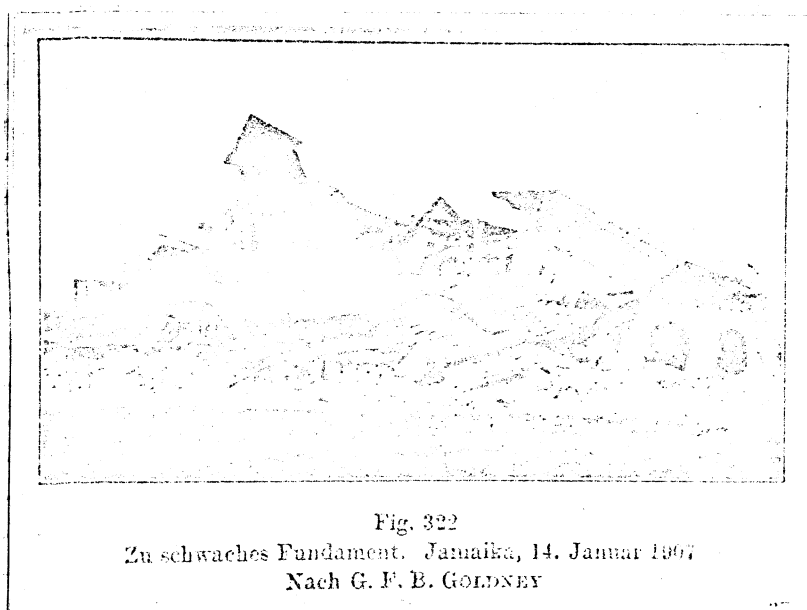
Av dessa figurer framgår det klart att det fordras stora krafter att bryta berg i små bitar på kort tid (sprängning) och att hållfastheten blir låg för stora volymer och lång belastningstid (stabilitet hos bergrum). Detta är vårt dilemma och åt den saken kan tyvärr inte mycket göras.

Så till sist några enkla råd till försiktiga sprängare:

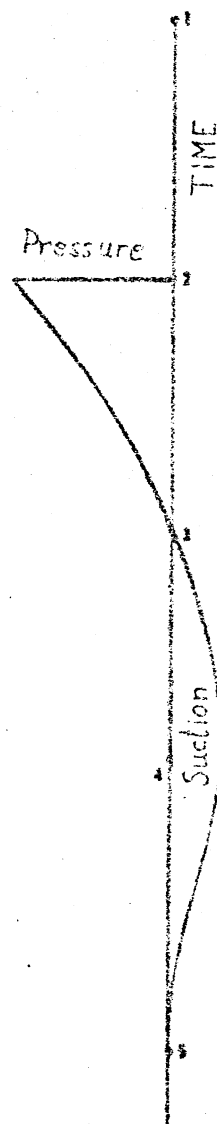
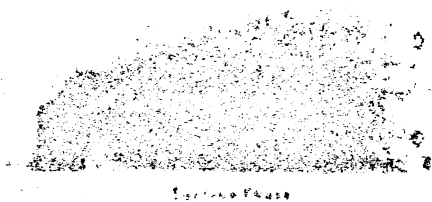
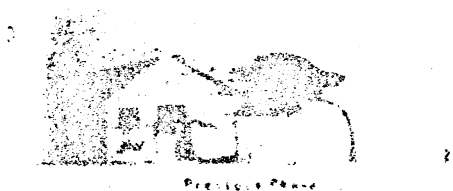
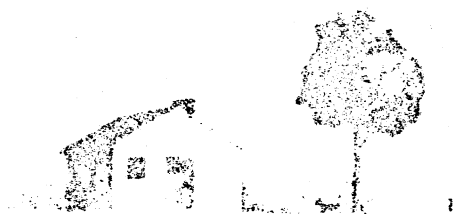
1. Använd små laddningar i kontur- och närmaste hål.
2. Undvik att få inspända hål (använd lämplig intervallföljd).
3. Använd sprängämne med lågt detonationstryck (låg laddningskonc.).



1

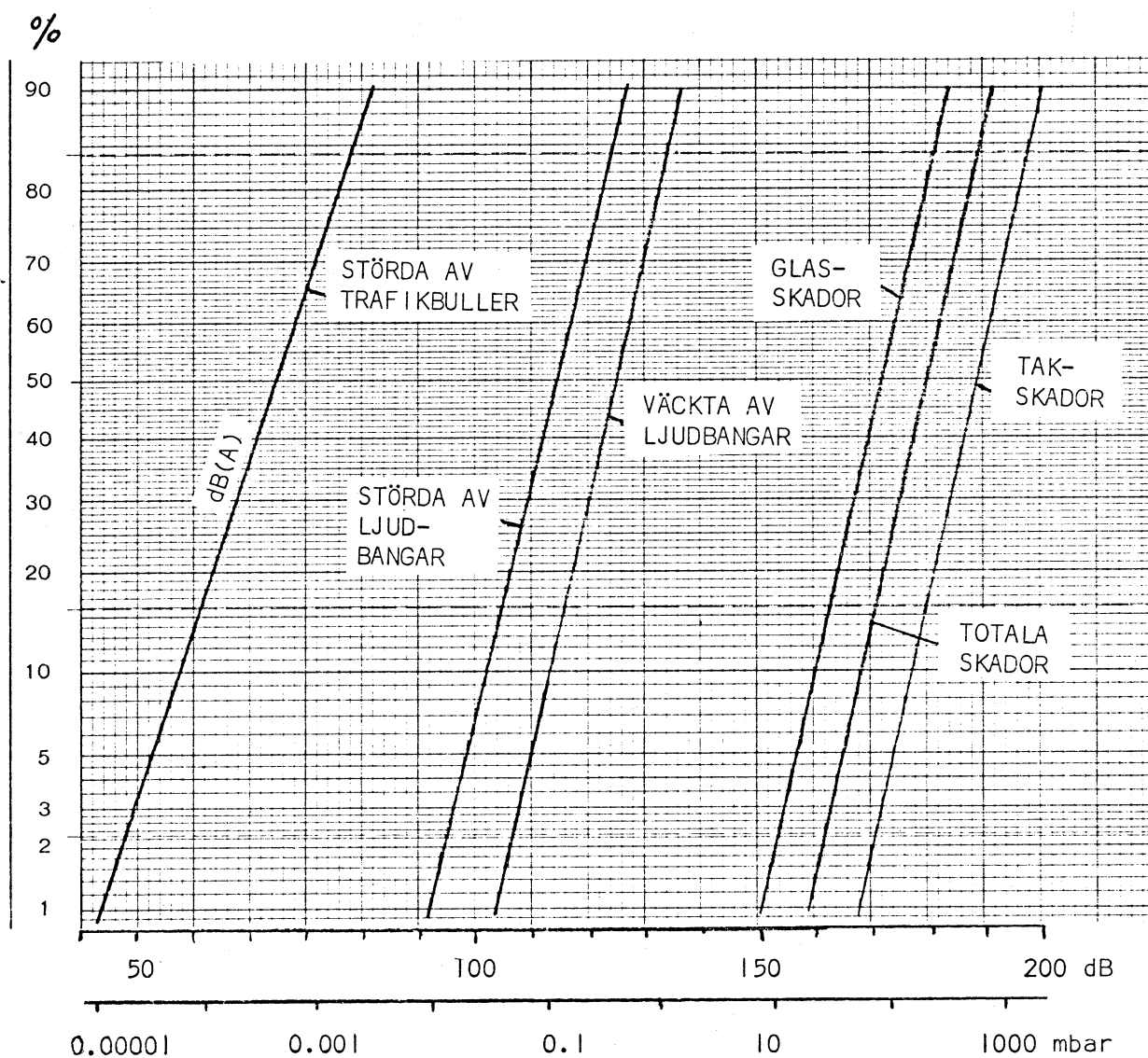


2



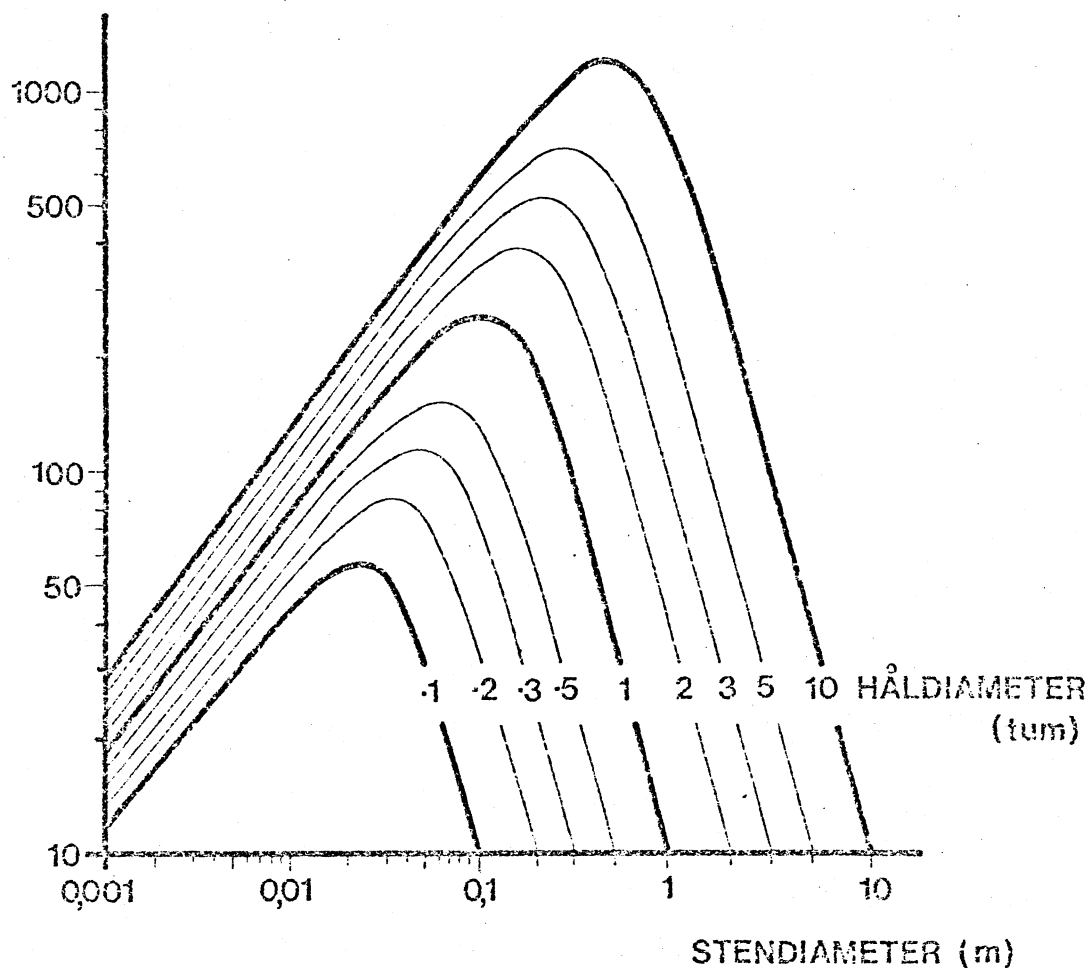
Störnings- och skadefrekvens vid olika max. tryck i mbar.

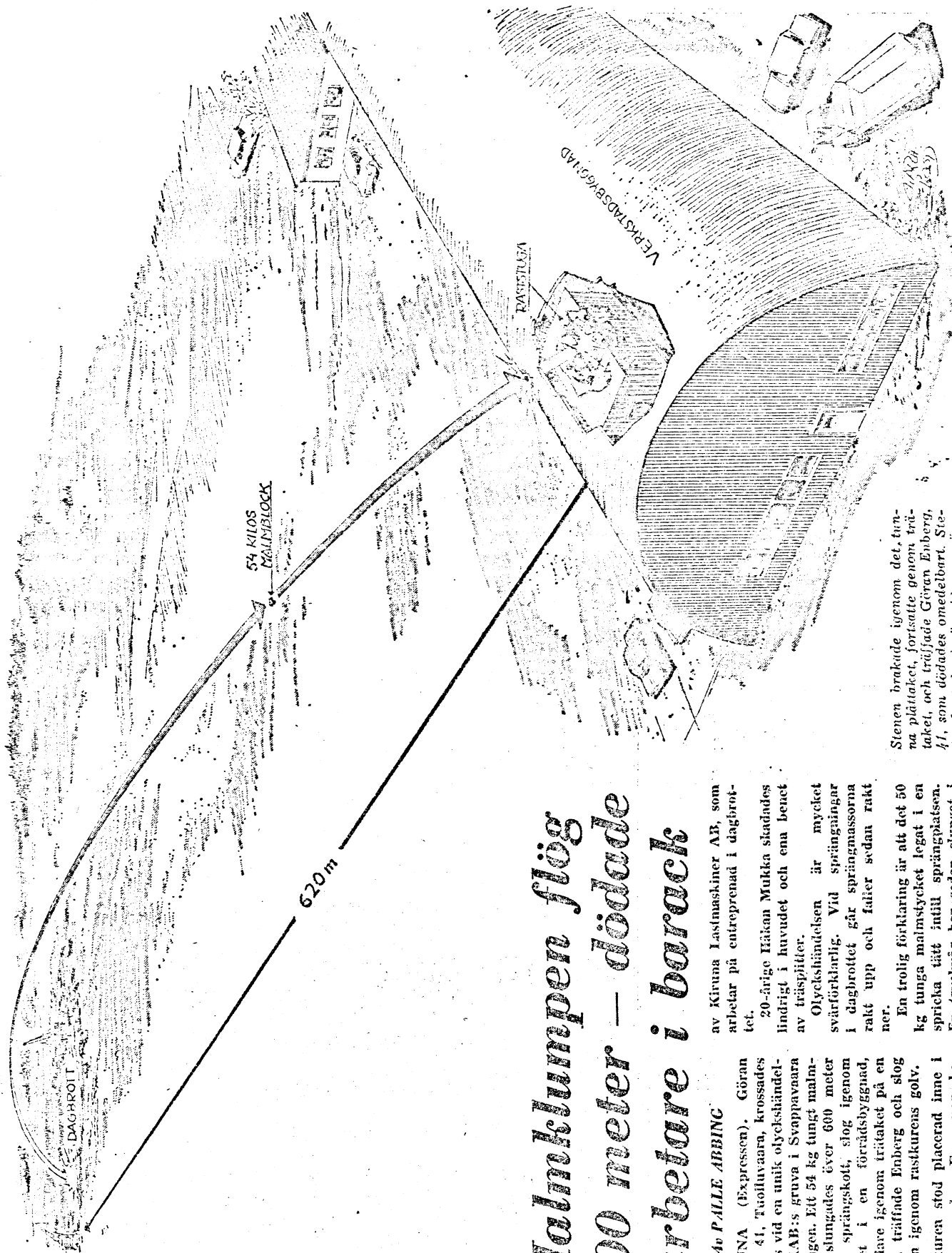
Störningsart	Procenttal			
	1 %	10 %	50 %	90 %
Irritation trafik, dB(A)	0.00001	0.00006	0.0003	0.002
Irritation, bangar	0.01	0.03	0.1	0.5
Väckning, bangar	0.04	0.1	0.4	1.5
Fönsterskador, stötvåg	8	20	80	250
Takskador, stötvåg	50	150	500	2000



STÖRNING- OCH SKADEFREKVEN- S VID OLIKA BULLERNIVÅ.

KASTLÄNGD (m)





Malmklumpen flög 600 meter – dödade arbetare i barack

Av PALLE ARBING

KIRUNA (Expressen). Göran Enberg, 41, Tuolluvaara, krossades till döds vid en unik olyckshändelse i LKAB:s gruva i Svappavaara på lördagen. Ett 54 kg tungt malmstycke slungades över 600 meter vid en sprängskott, slog igenom plåtaket i en förrädsbyggnad, slog vidare igenom trätaget på en raslur, träffade Enberg och slog slutligen igenom raskurens golv.

Raskuren stod placerad inne i förrädsbyggnaden. Fem man befann sig i rummet, när malmstycket slog in. Samtliga var anställda

av Kiruna Lastmaskiner AB, som arbetar på entreprenad i dagbrottet.

20-årige Mikael Mukka skadades lindrigt i huvudet och ena benet av träspjällar.

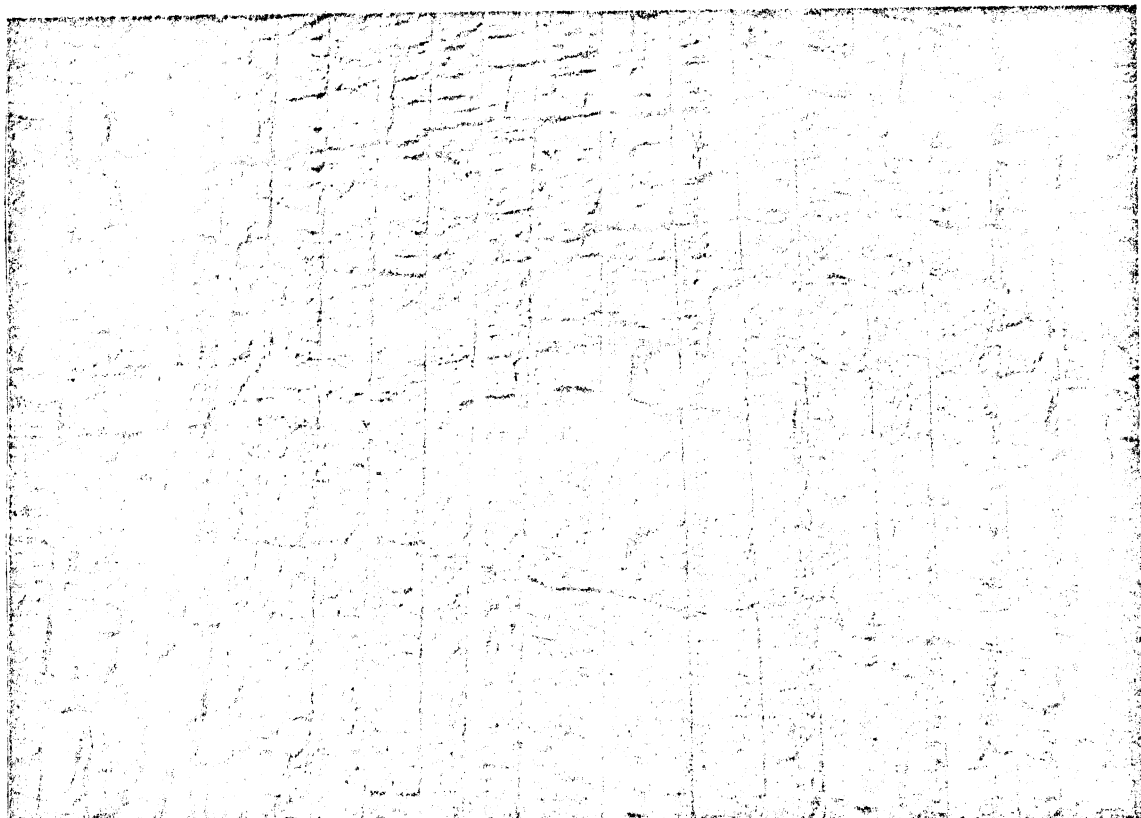
Olyckshändelsen är mycket svårförklarlig. Vid sprängningar i dagbrottet går sprängmassorna rakt upp och faller sedan rakt ner.

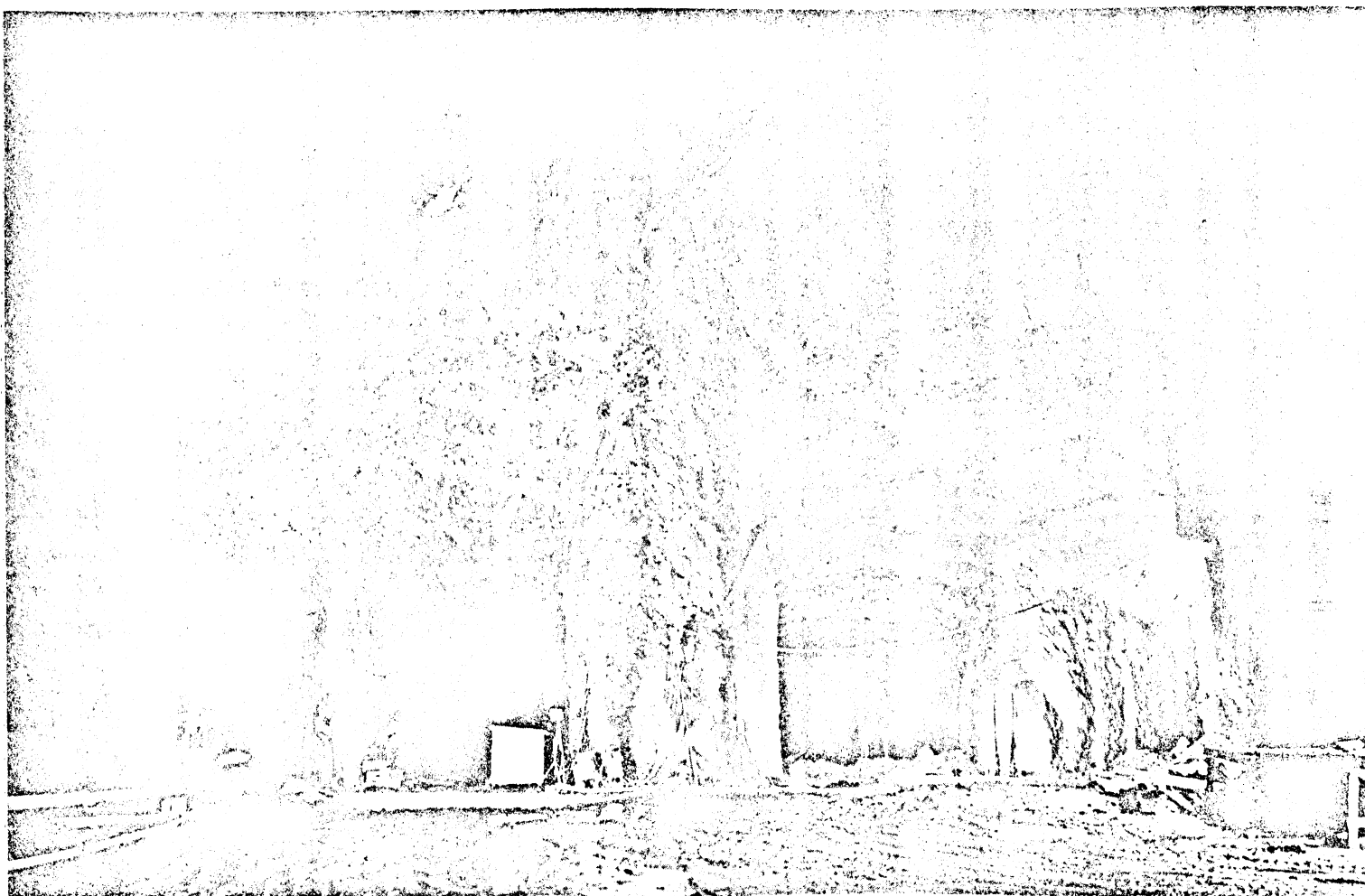
En trolig förklaring är att det 50 kg tunga malmstycket legat i en spricka tätt intill sprängplatsen. En tryckvåg har sedan slungat i väg malmstycket och gett det den olyckliga riktningen.

Stenen brakade igenom det tunna plåtaket, fortsatte genom trätaget, och träffade Göran Enberg, 41, som dödades omedelbart. Stenen kastades i väg vid en sprängning och flög 600 meter efter explosionen.

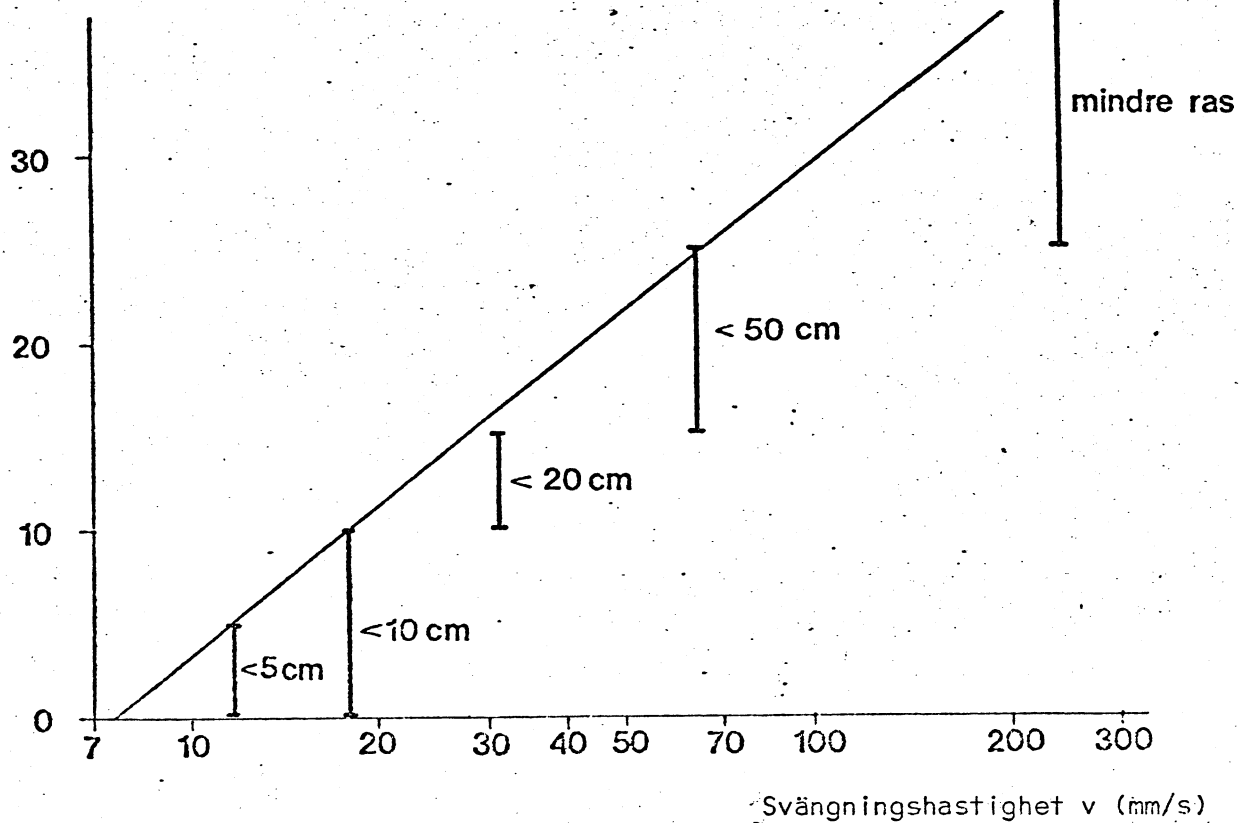


FIG. 10:13. This nicely cut conduit wall from the Niagara Project is the result of the presplitting technique described by Paine, Holmes and Clark. There will be a minimum amount of scaling, and less concrete (Courtesy Hercules Powder Company).

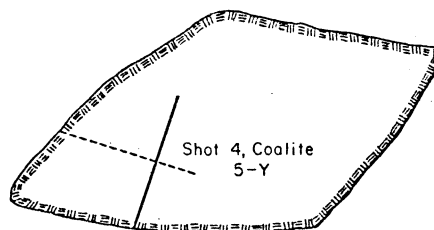
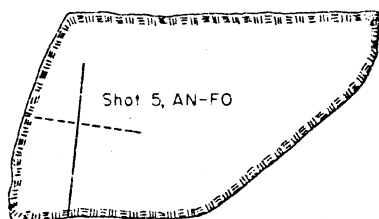




Antal stenfall

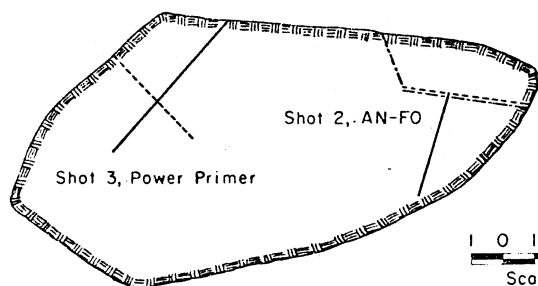


Antal stenfall och storlek i en ort vid olika svängningshastighet



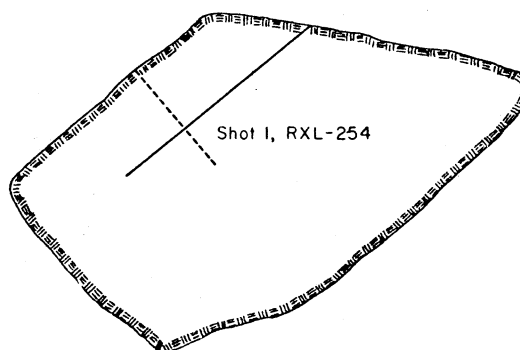
LEGEND

- Recovery hole
- - - Shot hole
- - - Postshot rock
- ▨ Surfaces

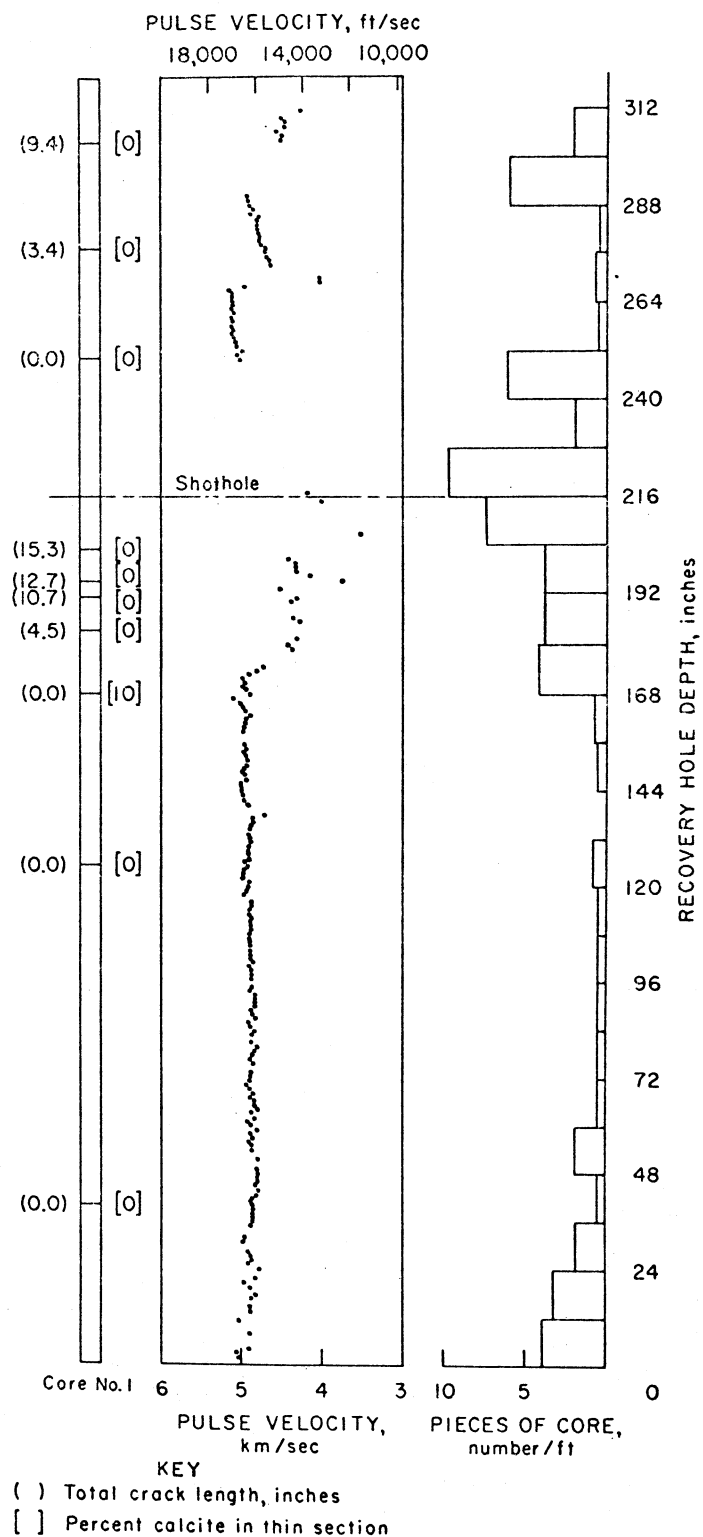


1 0 1 2 3 4 5
Scale, meters

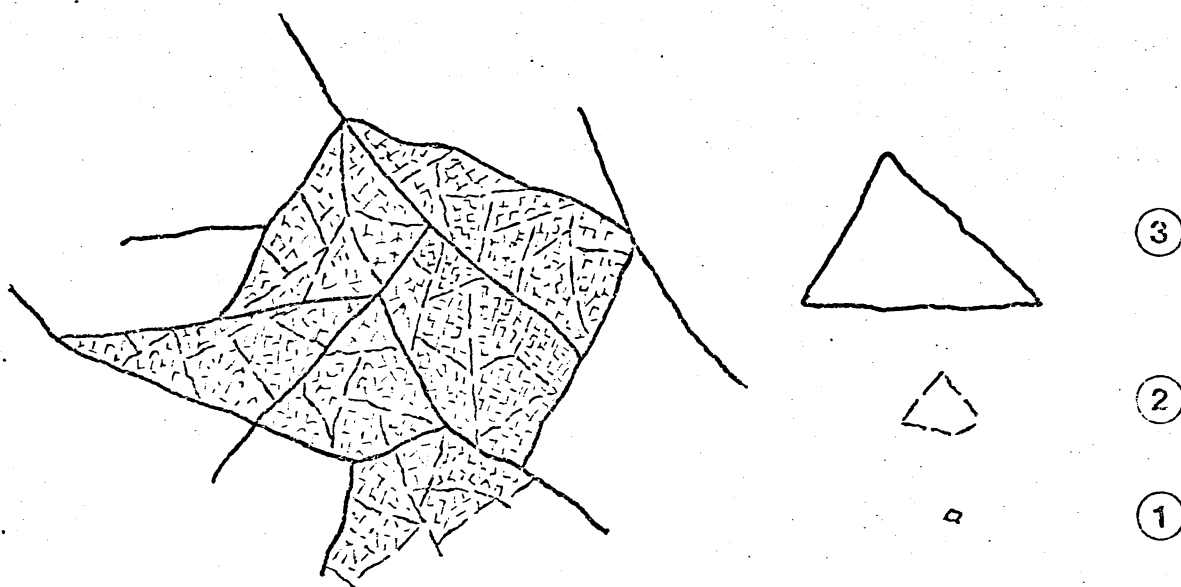
6 0 6 12
Scale, feet



Plan view of shot and recovery holes in White Pine mine pillars.



• Recovery core analysis, shot 1,
RXL-254.



En modell för sprickigt berg

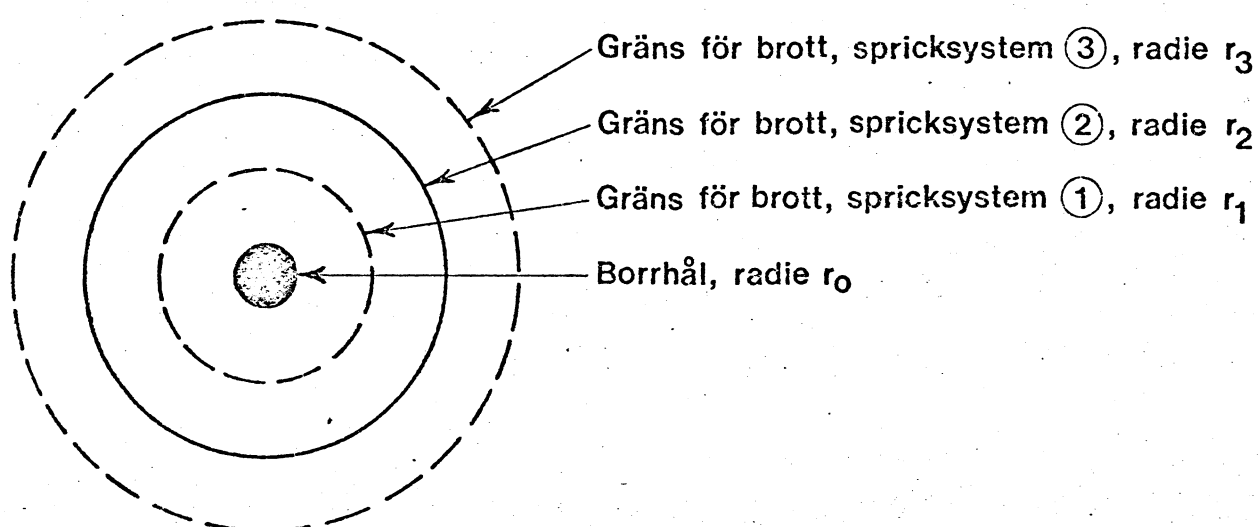
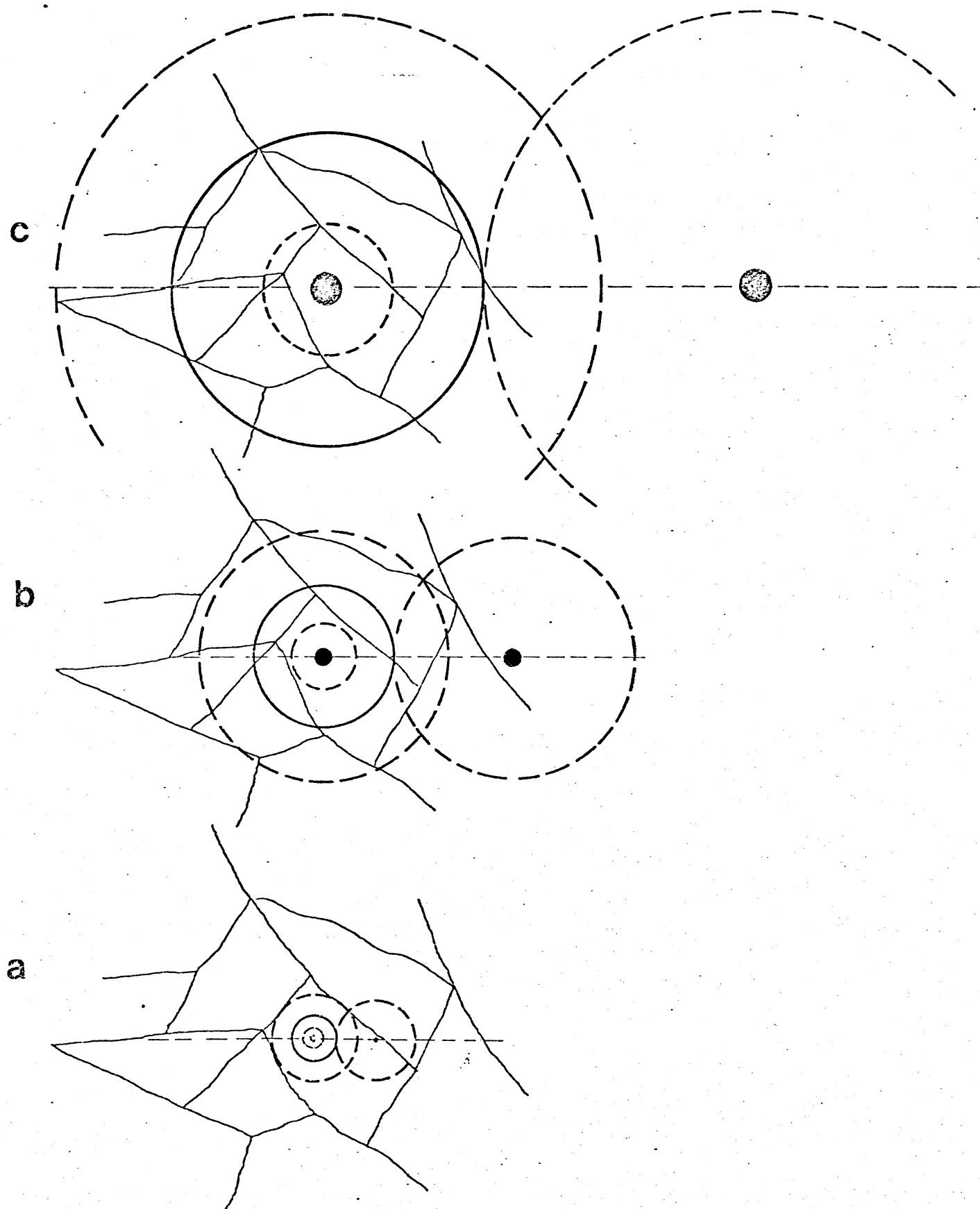
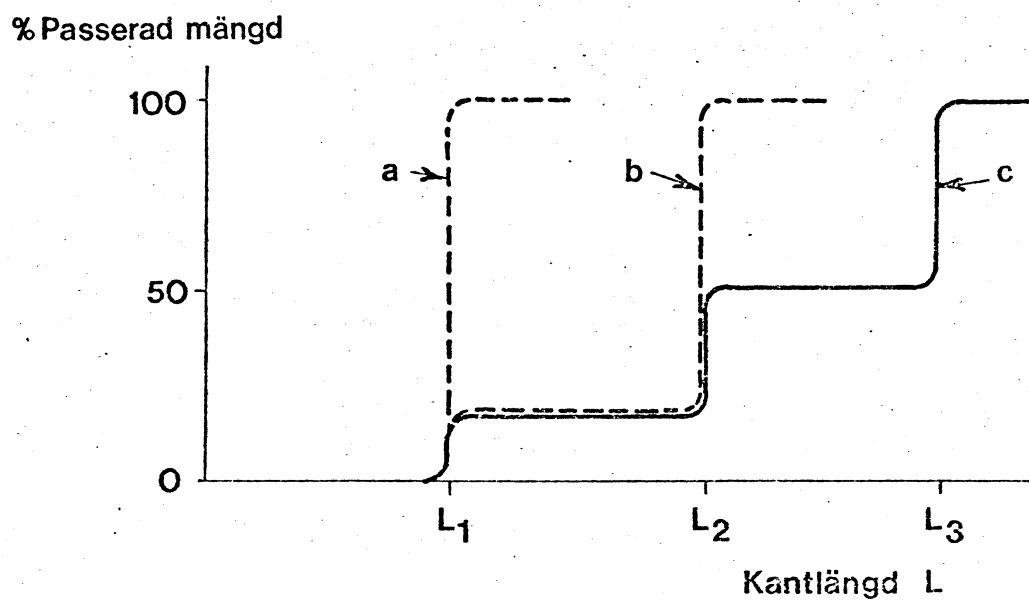


Fig. 2. Modellens antagande om inom vilka radiella avstånd från borrhålet de olika spricksystemen påverkas till brott.



Sönderbrytning av sprickigt berg vid olika laddningsdiameter



Schematiska siktkurvor för styckefall från bergmaterialet i fig. 3 med olika håldiameter $a < b < c$.

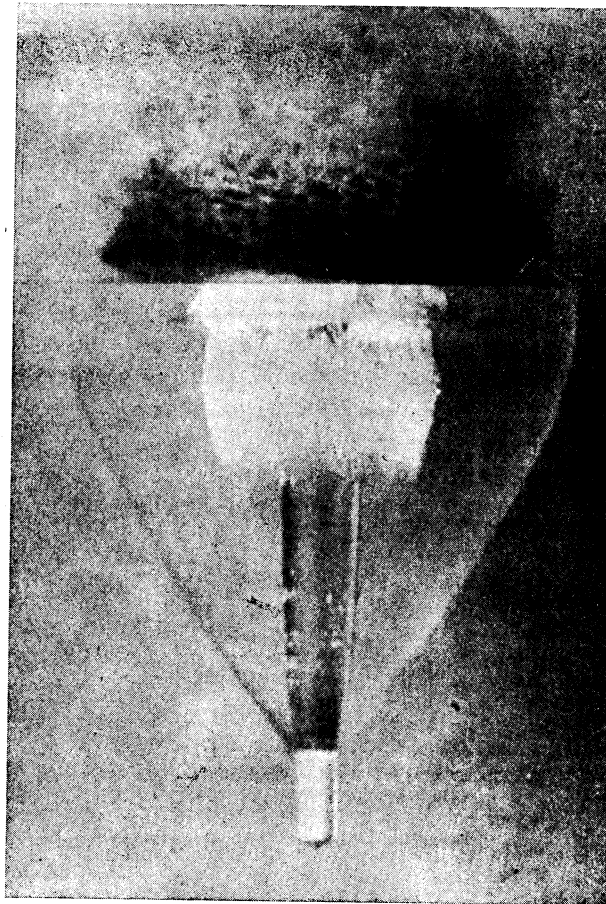


Fig. 23 — Detonating PETN charge in a 5.2 mm borehole in plexiglass.

17

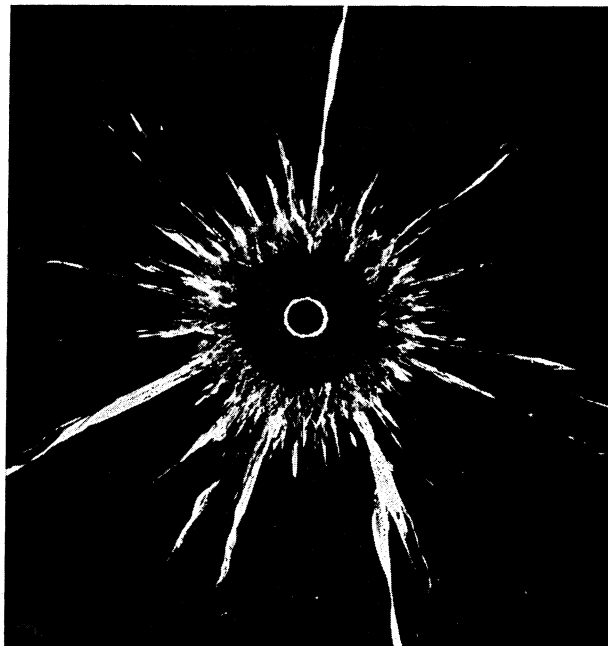


Fig. 24 — Crack pattern in plexiglass around a detonated PETN charge in a 3 mm hole.

18



Sprickmönster i granit omkring ett borrhål
 efter detonation
 Borrhålet var placerat i övre högra kanten.

19

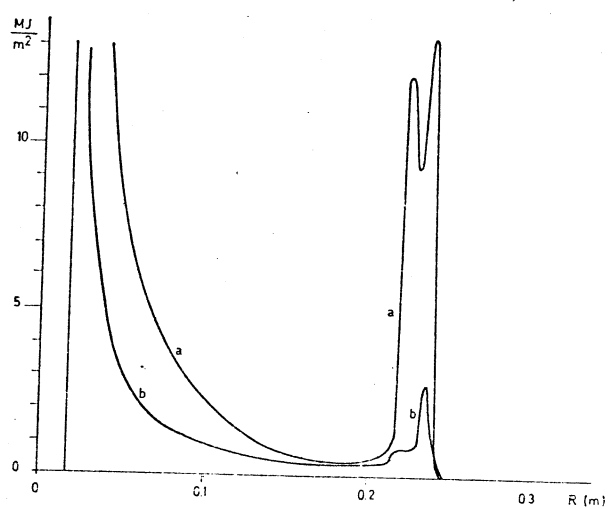


Fig. 12 — Radial energy distribution from an extended 20 mm
 NG charge in granite in a) 20 mm borehole, b) 30 mm borehole.

20

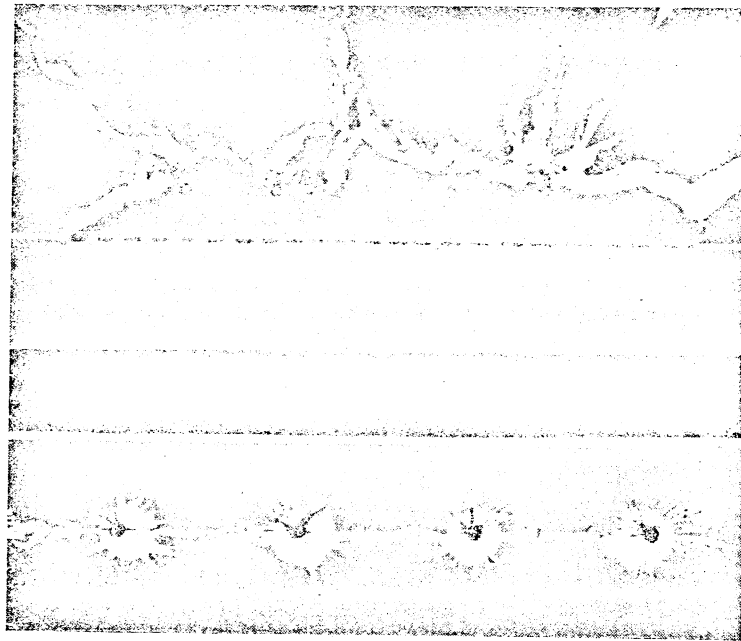
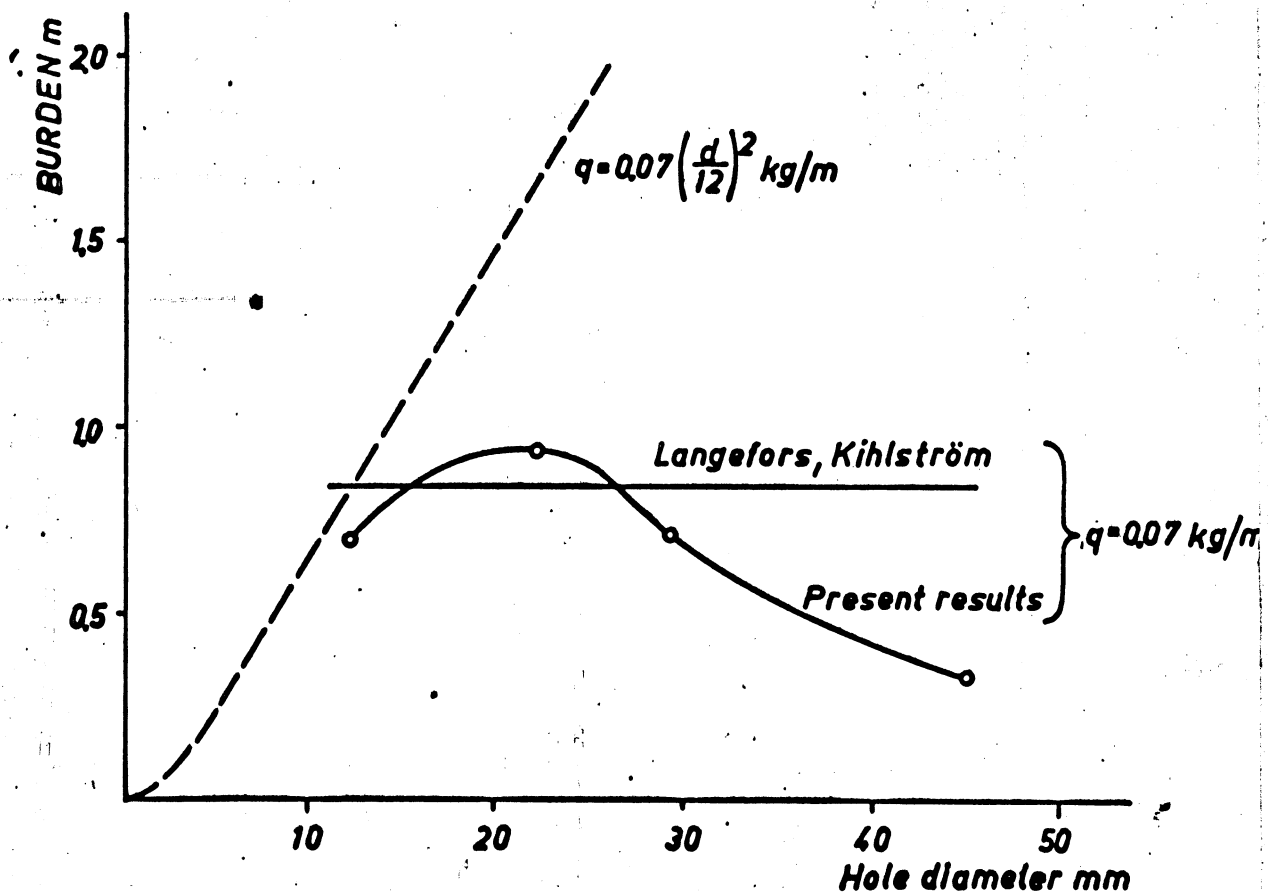


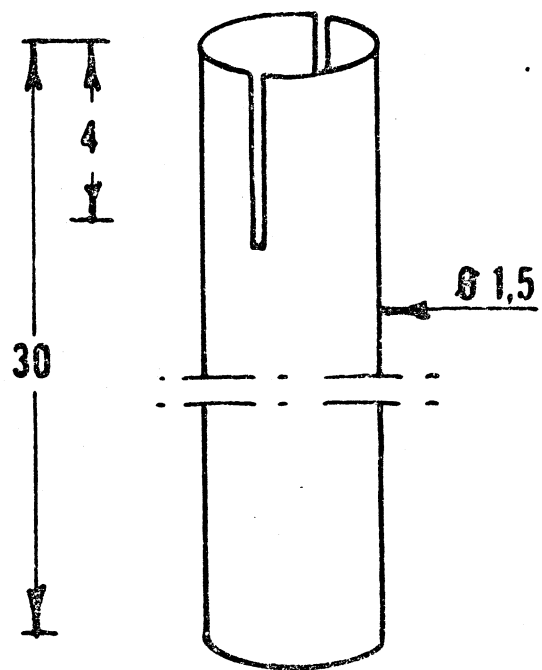
Fig. 4. Modellförsök i Plexiglas med olika förhållande mellan hålavstånd E och försättning V ; upptill $E/V = 2$, nedtill $E/V = 0,5$. I sistnämnda fall har dessutom endast vart tredje hål laddats.

21

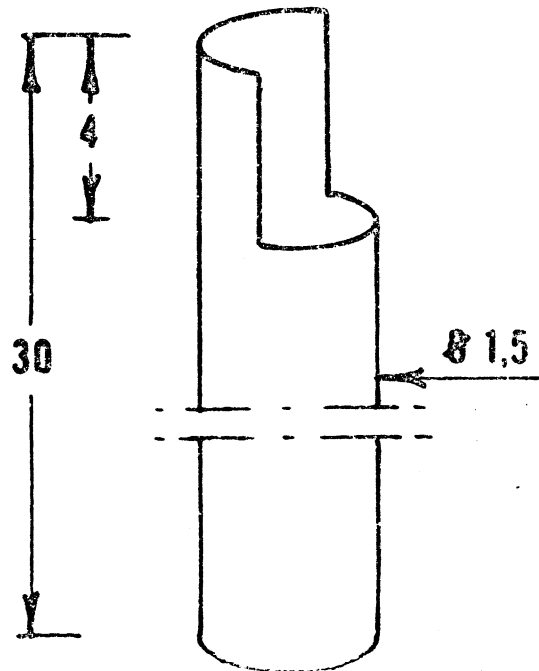
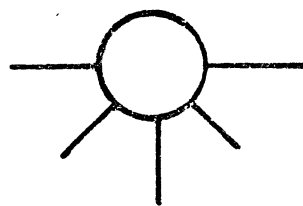


22

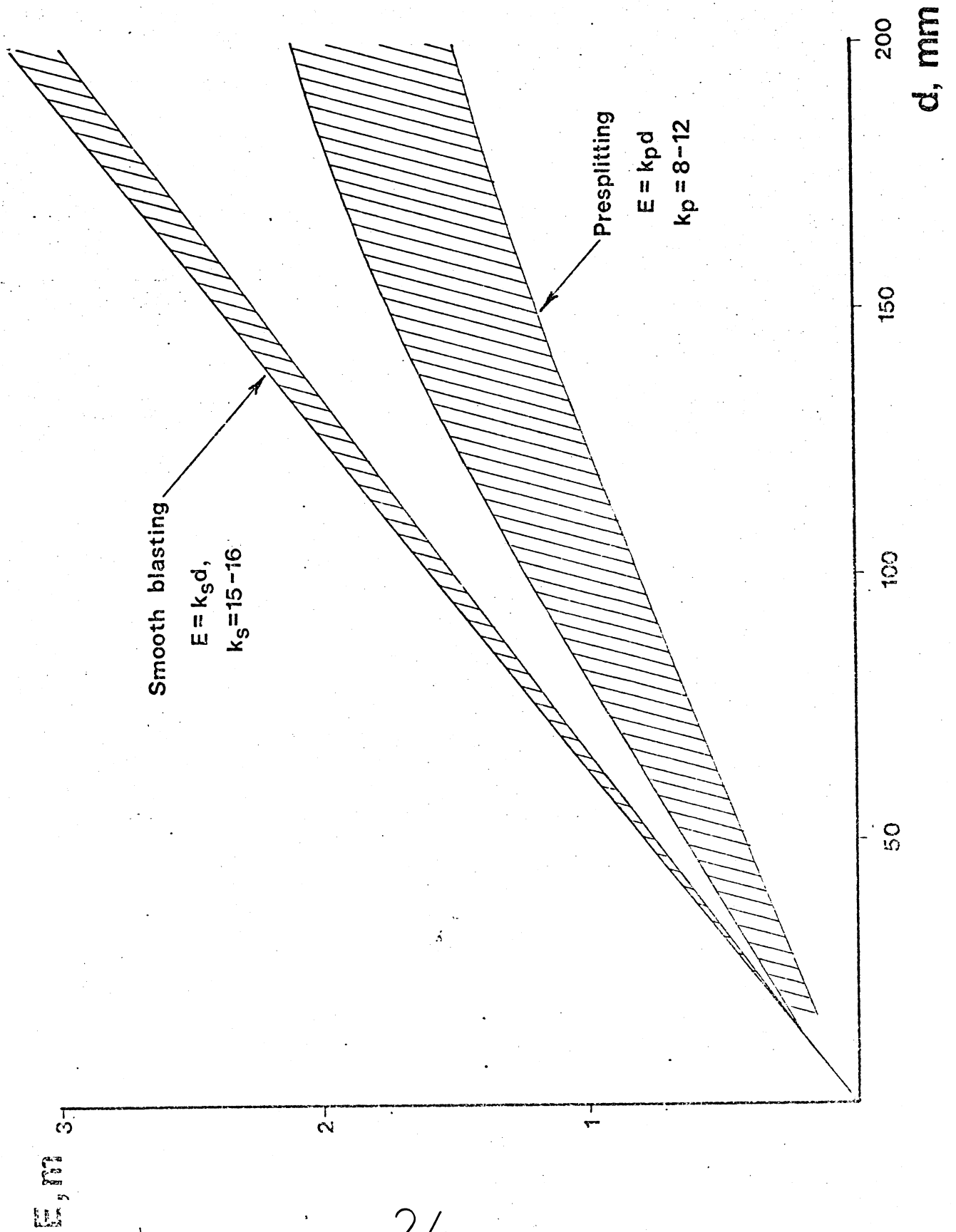
(a)

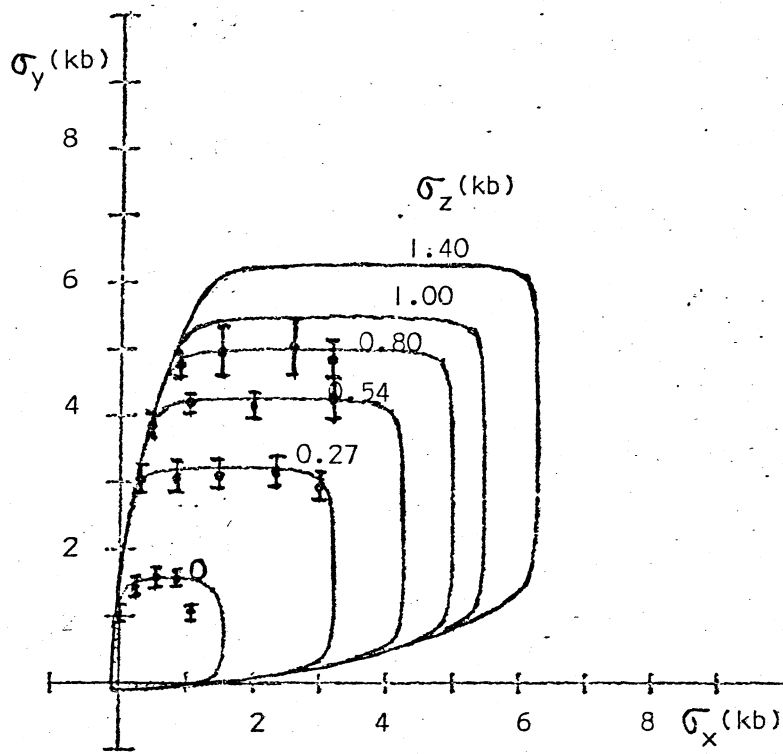


(b)

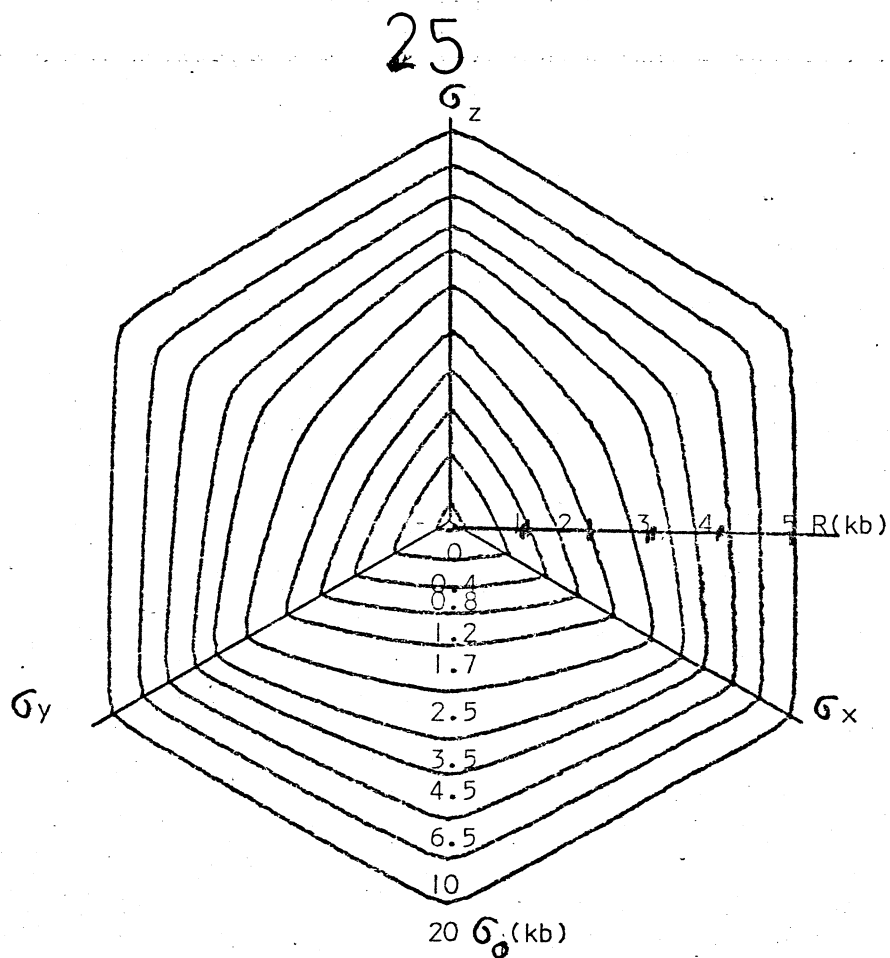


Samband mellan hålavstånd och håldiameter vid
slätsprängning och förspräckning.





Comparison between calculated strength and experimental values from Akai and Mori /2/ on sandstone.



Calculated strength criteria of limestone in the polyaxial stress space at different mean stresses σ_0 . The R-Scale shows the radius s of the yield surface, and the σ -axes the direction of the principal stresses.

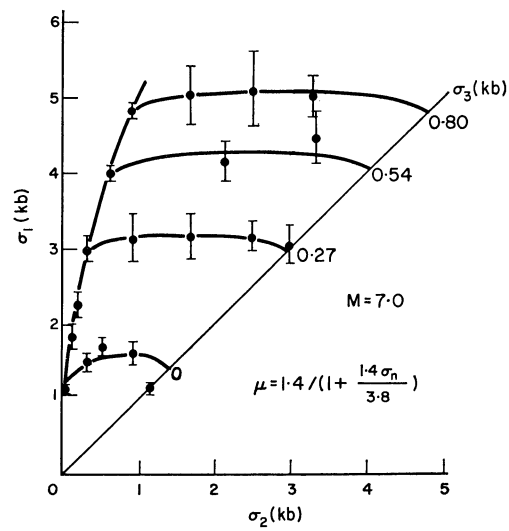
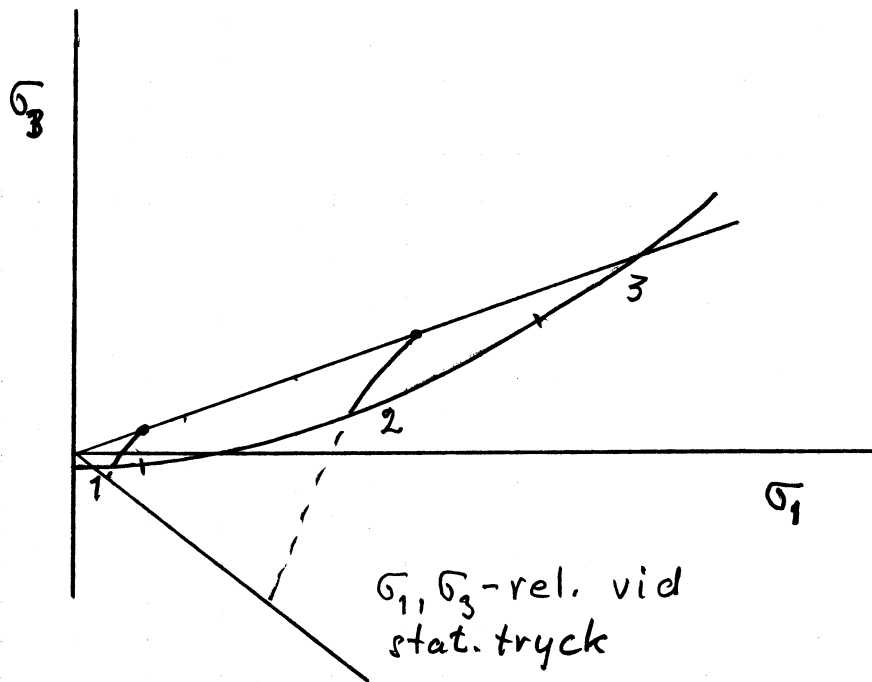


FIG. 7. Comparison between calculated strength and experimental values from AKAI and MORI [2] on sandstone.

27



28

