



Det här verket har digitaliserats vid Göteborgs universitetsbibliotek och är fritt att använda. Alla tryckta texter är OCR-tolkade till maskinläsbar text. Det betyder att du kan söka och kopiera texten från dokumentet. Vissa äldre dokument med dåligt tryck kan vara svåra att OCR-tolka korrekt vilket medför att den OCR-tolkade texten kan innehålla fel och därför bör man visuellt jämföra med verkets bilder för att avgöra vad som är riktigt.

This work has been digitized at Gothenburg University Library and is free to use. All printed texts have been OCR-processed and converted to machine readable text. This means that you can search and copy text from the document. Some early printed books are hard to OCR-process correctly and the text may contain errors, so one should always visually compare it with the images to determine what is correct.



Rapport

R11:1978

**Markvibrationers avstånds-
och laddningsberoende**

Nils Lundborg

Roger Holmberg

Per Anders Persson

Byggforskningen

TEKNISKA HOGSKOLAN I LINDA
SEKTIONEN FOR VAG- OCH
BIBLIOTEKET

R11:1978

MARKVIBRATIONERS AVSTÅNDS-
OCH LADDNINGSBEROENDE

Nils Lundborg
Roger Holmberg
Per Anders Persson

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 760223-2
från Statens råd för byggnadsforskning till Stiftelsen
Svensk Detonikforskning, Stockholm

Nyckelord:

vibrationer
vågrörelser
markvibration
sprängning
avstånd
laddningsmängd
modellförsök
fullskaleförsök

UDK 624.131.55
622.235

R11:1978

ISBN 91-540-2807-8
Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

LiberTryck Stockholm 1978 850248

INNEHÅLL

1	FÖRORD	5
2	BETECKNINGAR	6
3	GENERERING AV SPRÄNGVIBRATIONER	7
4	TEORIER FÖR UTBREDNING AV TRANSIENTA VIBRATIONER	9
5	MÄTNING AV MARKVIBRATIONER	11
6	MODELLFÖRSÖK I HOMOGENT MATERIAL	12
7	MODELLFÖRSÖK MED DÄMPNING AV SPALT	17
8	FULLSKALEFÖRSÖK	21
8.1	Brännland	22
8.1.1	Allmänt om försöken	22
8.1.2	Redovisning av mätresultat	23
8.1.3	Regressionsanalys av resultaten	29
8.1.4	Diskussion	29
8.2	Umeå - Härnösand	44
8.3	Eolshäll	53
8.3.1	Beskrivning av arbetsplats och mätställen	53
8.3.2	Mätutrustning	55
8.3.3	Mätresultat	55
8.3.4	Slutledning	58
9	STATISTISK BEHANDLING AV VIBRATIONSDATA	65
9.1	Vibrationernas avstånds- och laddnings- beroende	65
9.2	Förbättrad anpassning av vibrationsdata	67
9.3	Mätvärdenas spridning	68
9.4	Beräkning av övre konfidensgränser	68
9.5	Kriterier vid olika sprängvolym	69
9.6	Diagram för avläsning av v , Q , R och P resp N	70
10	JÄMFÖRELSE MELLAN OLIKA SAMBAND (R, Q, v)	79
11	SLUTLEDNING	84
12	REFERENSER	89

1 FÖRORD

Föreliggande arbete är en sammanställning av resultaten från ett forskningsprojekt, där vi avsåg att studera hur markvibrationer från sprängningar utbreder sig och beror av laddningsvikt och avstånd, samt hur topografi och konfigurationer såsom redan befintliga tunnlar och bergrum, pallkanter etc inverkar på markvibrationernas utbredning.

Projektet har omfattat litteraturstudier på området, statistisk behandling av befintligt material, samt försök i såväl modellskala som i fullskala vid pågående arbeten på olika håll inom Sverige.

Forskningsprojektet har bedrivits av SveDeFo:s personal i samarbete med personal från universitetet i Maryland, där modellförsöken har utförts med anslag från National Science Foundation USA. Fältförsöken i Sverige har utförts i samarbete med Västerbottens Grusförädlings AB i Brännland, Umeå och Härnösand, samt med Skånska Cementgjuteriet och Stockholms VA-verk i Eolshäll.

Författarna framför sitt tack till ovan nämnda företag och speciellt till ingenjör Berthold Johansson och hans medarbetare vid Västerbottens Grusförädling AB som aktivt deltagit vid projektets genomförande.

Författarna framför också sitt tack till Karin Rubin för utskrivning och kritisk granskning av manuskriptet.

2	BETECKNINGAR
C_P	P-vågens hastighet, m/s
C_R	R-vågens hastighet, m/s
C_S	S- och PS-vågornas hastighet, m/s
D	Dämpningsfaktor
E	Elasticitetsmodul, N/m^2
G	Skjuvmodul, N/m^2
K	K-faktor
L	Love våg
P	Primärvåg
PS	S-våg orsakad av P-vågens reflexion i en yta
Q	Samverkande laddning (motsv. kg dynamex)
R	Rayleigh våg eller avstånd, m
S	Skjuvvåg
U	Longitudinell vibration
V	Transversell vibration
W	Vertikal vibration
h	Laddningsdjup
l	Laddningslängd
n	Antal vibrationsvärden överstigande skadekriteriet
r	Reducerat avstånd, R/Q^α
s	Standardavvikelse
t	Tid
v	Vibration, allmänt (U, V eller W)
α	Exponent för Q
β	Exponent för r
λ	Lamékonstant, $\nu E / (1 + \nu)(1 - 2\nu)$, eller våglängd
ν	Poissonantal
ρ	Densitet (täthet), kg/m^3
τ	Konstant

3 GENERERING AV SPRÄNGVIBRATIONER

När en sprängladdning detonerar omvandlas sprängämnet till en gas under högt tryck, som påverkar omgivningen. Trycket ger därvid upphov till vågor av olika typ i det omgivande mediet.

Fig. 1 visar ett spänningsoptiskt foto av fyra olika vågtyper genererade av en laddning Q, i en platta av homogent material.

- a. P-vågen fortplantar sig snabbast och i ett oändligt medium med hastigheten

$$C_P = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}}$$

Den kännetecknas av att partiklarna i vågen rör sig parallellt med utbredningsriktningen. Materialet ändrar därvid täthet vid vågens passage.

- b. PS-vågen orsakas av P-vågens reflexion i överytan och rör sig med hastigheten

$$C_{PS} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

Den kännetecknas av att partiklarna rör sig vinkelrätt mot utbredningsriktningen.

- c. S-vågen är liksom PS-vågen en skjuvvåg och rör sig med samma hastighet som denna. I S- och PS-vågorna ändrar materialet form men inte täthet.
- d. R-vågen är en ytvåg, som snabbt avtar med djupet, och utbreder sig långsammast av de olika vågtyperna. Partiklarna rör sig här både longitudinellt och vertikalt (vinkelrätt mot ytan).

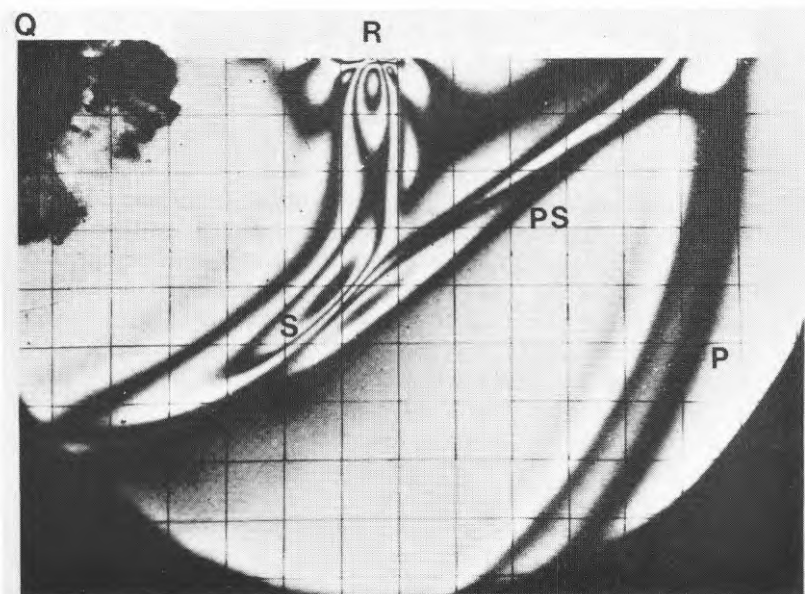


FIG. 1. Fotoelastisk representation av de olika vågtyperna från en sprängladdning.

4 TEORIER FÖR UTBREDNING AV TRANSIENTA
VIBRATIONER

Teorier för utbredning av transienta vågsystem i en halvrymd är sparsamt förekommande. Originalarbetet på detta område härrör från Lamb /12/ och har vidare utvecklats av bl a Pekeris /17, 18/ och Pekeris och Lifson /19/. Teorierna behandlar uteslutande utbredningen i elastiska material från en impulslast på olika djup under ytan.

Amplituden på P- och S-vågen avtar i markytan som $1/R^2$ med avståndet medan R-vågen avtar som $1/\sqrt{R}$ (se t ex /7, 12, 23/). Då dessutom R-vågen innehåller merparten av energin, kommer denna att dominera i de uppmätta markvibrationerna. Om laddningen är placerad på ett visst djup (h) kan dock P-vågen komma att dominera i närområdet ($R < h$). Detta kommer närmare att behandlas i nästa avsnitt.

Fig. 2 visar den vertikala rörelsen i markytan som funktion av tiden, med P-, S- och R-vågorna utmärkta och fig. 3 visar en partikels rörelse i rymden i R-vågen enligt Lamb /12/.

Pulslasten har bestått av en vertikal kraft i överytan med tidsberoendet

$$R(t) = \frac{R}{\pi} \frac{\tau}{t^2 + \tau^2}$$

där τ är konstant.

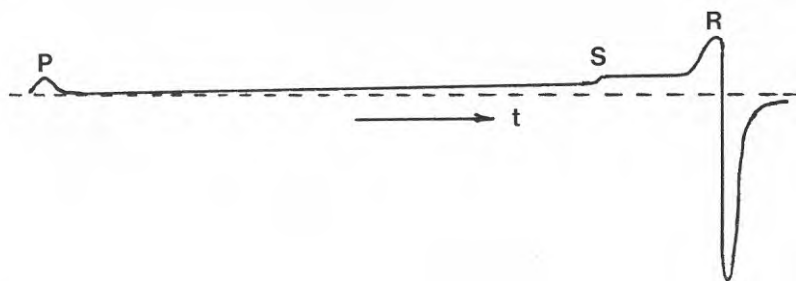


FIG. 2. Vertikala rörelsen hos en punkt i markytan som funktion av tiden enligt Lamb /12/.

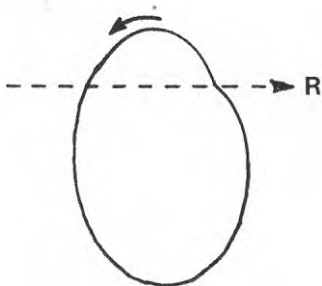


FIG. 3. Partikelrörelse i markytan enligt Lamb /12/.

5 MÄTNING AV MARKVIBRATIONER

Mätning av markvibrationer sker uteslutande i en eller flera diskreta punkter vanligtvis i markytan. En partikel i R-vågen rör sig därvid vertikalt (uppåt - nedåt) och longitudinellt (från - mot) sprängplatsen. Vanligtvis förekommer även transversell rörelse vinkelrätt mot de andra två. Dessa s k L-vågor uppkommer i skiktat material. Noggranna mätningar måste därför ske i tre vinkelräta riktningar. Vanligtvis är den vertikala och longitudinella amplituden ungefär lika, medan den transversella är minst. Vid enklare mätningar nöjer man sig därför med att mäta den vertikala. Den longitudinella kan visserligen vara något större, men det är för det mesta svårt att exakt bestämma dess riktning. För noggrann analys av mätvärdena sker registrering av vibrationsförloppet som funktion av tiden. Man kan därvid registrera amplitud, partikelhastighet eller acceleration. Mätes en av dessa kan de andra två alltid beräknas. Efter beräkningen nöjer man sig ofta med att ange toppvärdet av amplituden (μm), hastigheten (mm/s) eller accelerationen (g eller m/s^2). Vilken av dessa storheter som är mest intressant beror på skadekriteriet för den anläggning man vill skydda. Om detta är känt kan man med enklare mätutrustning direkt mäta toppvärdet av den önskade storheten.

Ibland kan det vara nödvändigt att mäta accelerationen som funktion av tiden och sedan utföra integrering en gång för att erhålla svängningshastigheten och två gånger för att få amplituden. Detta beror på att accelerometern förmår mäta i ett större frekvensområde.

Metoden med integrering har dock den nackdelen att ett litet fel i mätningen av accelerationen hela tiden adderas så att sluthastighet och -amplitud inte får rätta värden.

6 MODELLFÖRSÖK I HOMOGENT MATERIAL

Inom ramen för ett samarbete mellan SveDeFo och universitetet i Maryland har försök utförts med sprängning i homogen granit, där vågsystemet fotograferats med hjälp av laserholografi /8/.

På de senaste tio åren har nya metoder utvecklats som gjort det möjligt att förbättra registreringen av markvibrationer från sprängningar i tredimensionella medier. Dessa holografiska interferometri-metoder ger förflyttningen i tre vinkelräta riktningar vid valda tider efter sprängningen. Med hjälp av denna information kan man bättre avgöra betydelsen av inkommande vågsystem och hur de samverkar med sprickor och ojämnheter. Det är också möjligt att studera geometrins inverkan på utbredningen av vibrationerna, som t ex inverkan av en slits, pallkant eller ett bergrum, eller hur vågsystemet fortplantar sig från ett material till ett annat. Det kan därvid bli möjligt att utveckla metoder för att minska vibrationerna för enstaka byggnader.

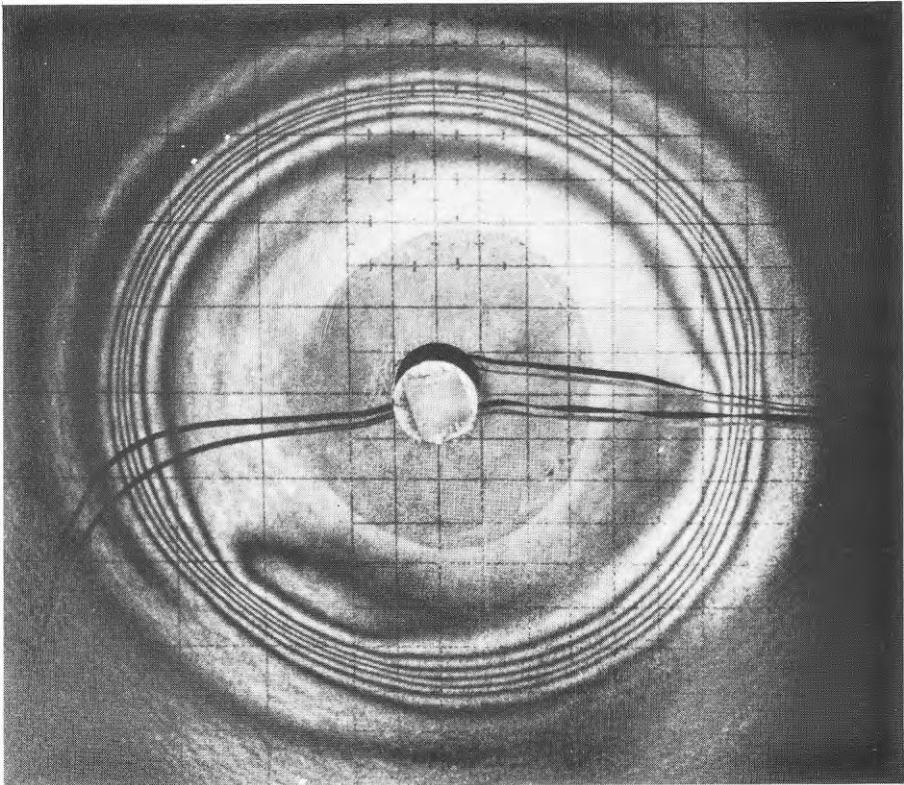


FIG. 4. Puls laserholografisk bild av vågutbredning i granit från en punktladdning i ytan /8/.

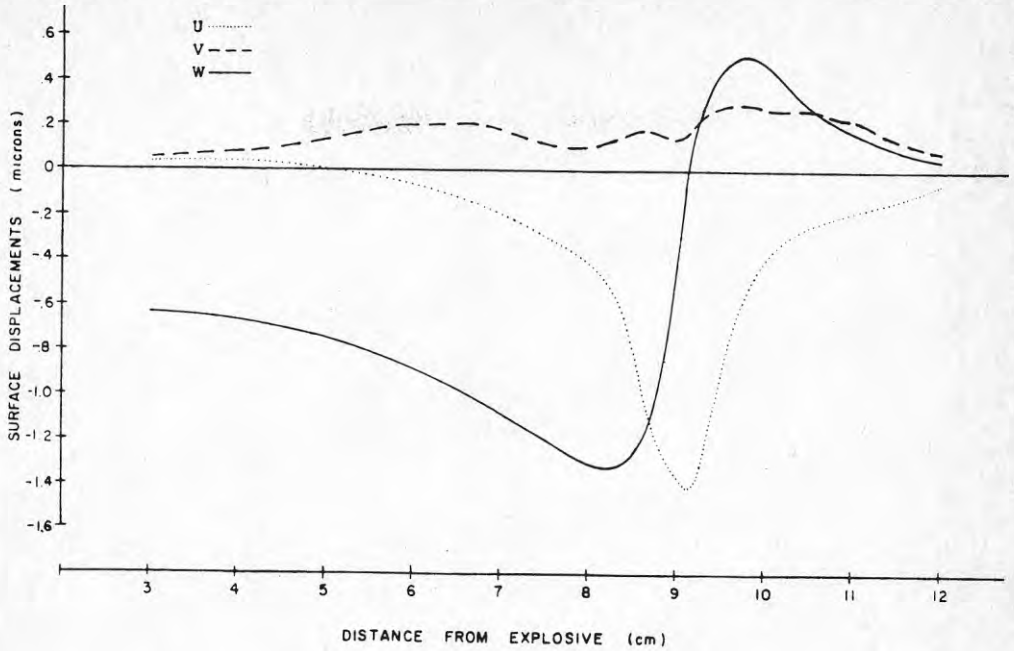


FIG. 5. Beräknad U, V och W förskjutning längs radien, 40 μ s efter detonation. Uppåt i diagrammet anger förskjutning utåt, uppåt resp åt höger sett från laddningen.

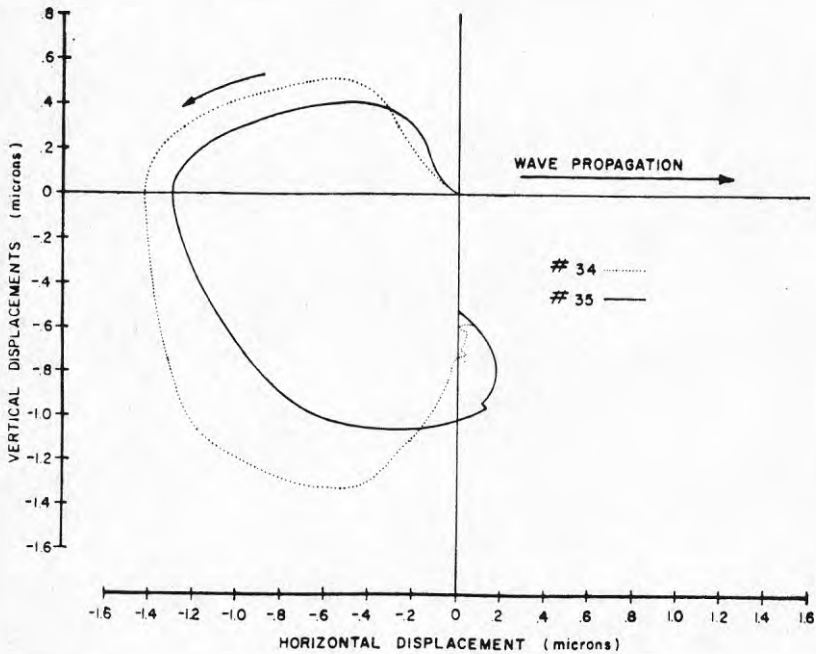


FIG 6. Partikelrörelse i U,W-planet.

Undersökningen omfattar modellförsök med spräng-inducerade vibrationer i en halvrymd av bergmaterial.

Fig. 4 visar vågutbredningen från en punktladdning i ytan, fig. 5 visar den longitudinella, vertikala och transversella förflyttningen som funktion av avståndet från laddningen och fig. 6 en ytpartikels rörelse i rummet. Partikelrörelsen enligt fig. 6 överensstämmer bra med den av Lamb beräknade enligt fig. 3. Ur fig. 5 har vi beräknat den vertikala svängningshastigheten på 9 cm avstånd från laddningen till 650 mm/s.

Fortsatta försök i Maryland /9/ har utförts där 200 mg pentyl skjutits på olika djup. Hålet borrades från undersidan av granitblocket och djupet har räknats från översidan. De olika djupen var 0; 1,9; 7,8 och 12,7 cm (se fig. 7).

Fig. 8 visar holografifoton av överytan 50, 33, 36 och 37 μs efter detonation. En störning i vågsystemet (syns bäst i fig. 8c) är orsakad av en skada i granitytan. Detta visar tydligt att topografin inverkar på vibrationernas utbredning.

I fig. 9 är överytans förskjutning beräknad för $h = 0$ och 1,9 cm vid tiden $t = 40$ resp 33 μs efter detonationen, och i fig. 10 visas förskjutningen vid $h = 7,8$ cm och tiden $t = 23, 31$ och 40 μs . Ur figuren har den vertikala svängningshastigheten beräknats på avstånden 4,5; 10,5 och 15,0 cm från laddningen till respektive 600, 250 och 150 mm/s.

För avstånd $R < h$ är P-vågen den dominerande.

För avstånd $h < R < 2,5 h$ är P- och R-vågorna av samma storleksordning och för avstånd $R > 2,5 h$ dominerar R-vågen.

S-vågen är försumbar på alla avstånd.

I det uppmätta området avtar vibrationernas vertikala amplitud som $1/R$.

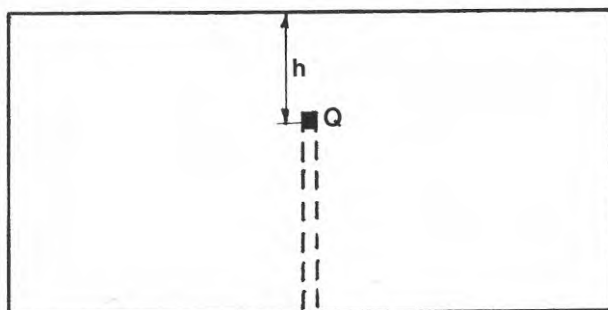


FIG. 7. Granitblock 30x30x15 cm med hål för laddning Q. h anger laddningsdjupet.

D. C. Holloway and W. L. Fourney

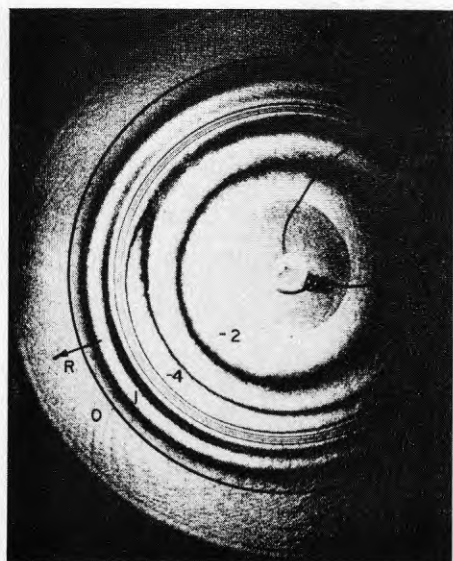
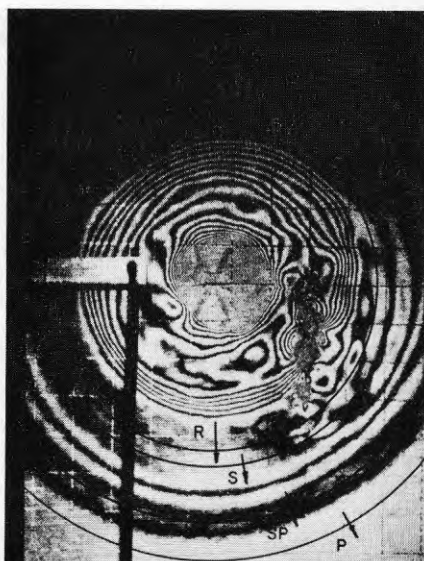
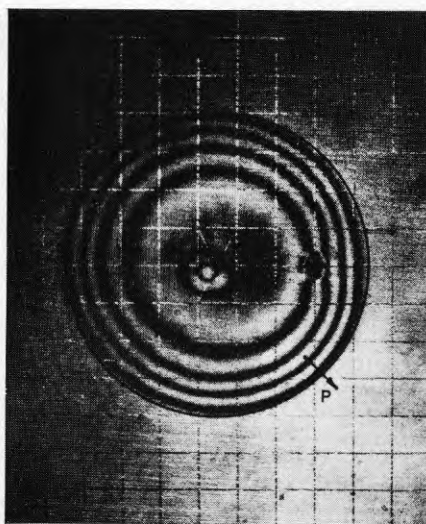
a) $h = 0 \text{ cm}$ $t = 50 \mu\text{sec}$ b) $h = 1.9 \text{ cm}$ $t = 33 \mu\text{sec}$ c) $h = 7.8 \text{ cm}$ $t = 36 \mu\text{sec}$ d) $h = 12.7 \text{ cm}$, $t = 37 \mu\text{sec}$

FIG. 8. Holografifoto av vågsystemet från en laddning på olika djup (h) under ytan, tagna vid olika tid (t) efter detonationen.

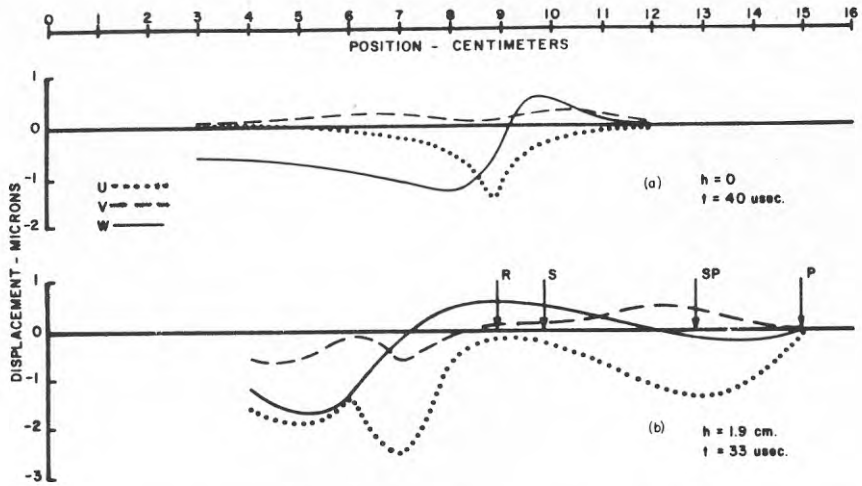


FIG. 9. Partikelförflyttning i ytan längs R-axeln vid två olika laddningsdjup.

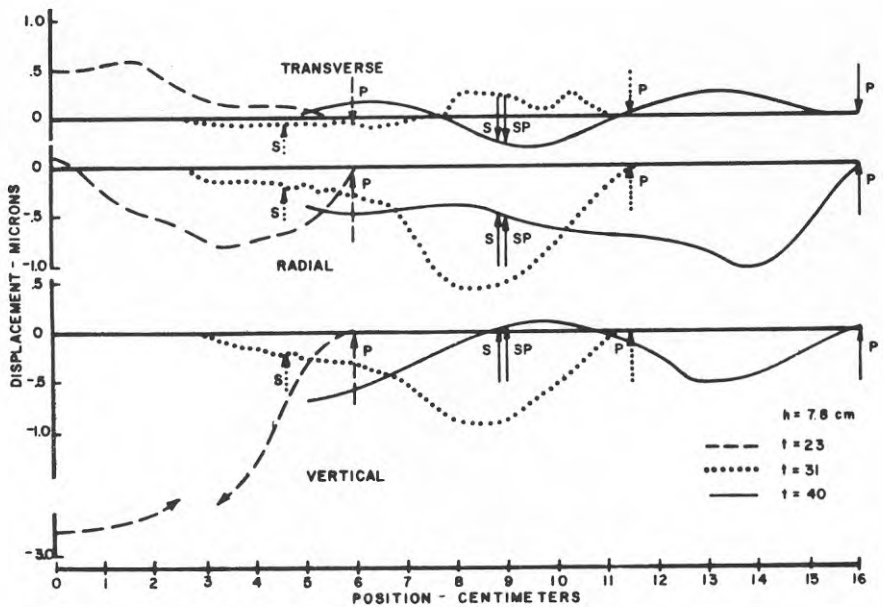


FIG. 10. Partikelförflyttning i ytan längs R-axeln vid olika tid för laddningsdjupet 78 mm.

7 MODELLFÖRSÖK MED DÄMPNING AV SPALT

Reinhardt och Dally /21/ och Woods /23/ har studerat inverkan av spalter mellan laddning och mätplats.

Reinhardt och Dally vid universitetet i Maryland har studerat effekten i plattor av fotoelastiskt material. Fig. 11 visar anordningen med laddning och spalt. Resultatet visar en konstant dämpning av spänningen på avståndet 4 - 8 h bakom spalten, men beror av värdet h/λ enligt fig. 12, där λ är vibrationens våglängd. Av figuren framgår att $h/\lambda < 1/16$ och $h/\lambda > 1/2$ ger en liten ändring av dämpningen, medan en ändring mellan dessa gränsvärden minskar vibrationerna från 90 till 10%. Fig. 13 visar dämpningen som funktion av avståndet från spalten för olika värden på h/λ . Det är värt att notera att dämpningsfaktorn D har ett maximum för $R/\lambda < 1$. (Observera att ett litet D motsvarar stor dämpning. $D > 1$ motsvarar en förstärkning).

Woods /23/ har utfört omfattande försök i halvskala där han har studerat dämpning av vibrationernas amplitud medelst spalter i sandig mo.

Fig. 14 visar anordningen med inte mindre än 80 mätpunkter. Vibrationerna har exiterats med en vibrator med frekvensen 200 - 350 p/s.

Författaren har delat in sina försök i två olika delar:

- I. Aktiv isolering, som enligt fig. 14 stänger in vibrationerna kring källan, och
- II. passiv isolering, som hindrar vibrationerna att nå det område som skall skyddas (fig. 16).

Vid aktiv isolering anger Woods:

- a. $h/\lambda \geq 0,6$ ger en dämpningsfaktor $D \leq 0,25$.
- b. En spalt runt om laddningen verkar upp till 10λ .
- c. D har ett maximum vid $2,2 - 6,4 \lambda$.
- d. Avståndet från spalten till D_{\max} minskar med ökande spaltdjup.
- e. Vid en spalt som inte går runt om (fig. 15) sker dämpning i ett område som är lika med spaltvinkeln minskad med 45° i varje ände.
- f. En ökning av vibrationerna $D > 1$ sker i riktning mot den öppna delen av spalten.

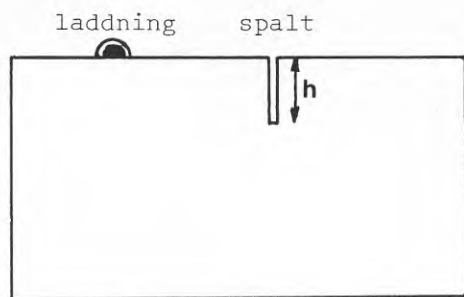


FIG. 11. Platta med laddning och spalt.

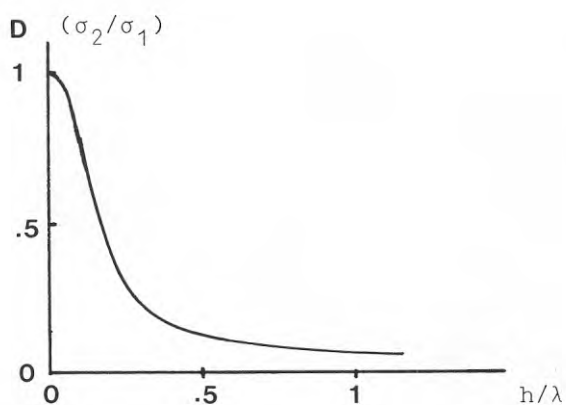


FIG. 12. Dämpningsfaktorn 4 - 8 h bakom spalten som funktion av h/λ .

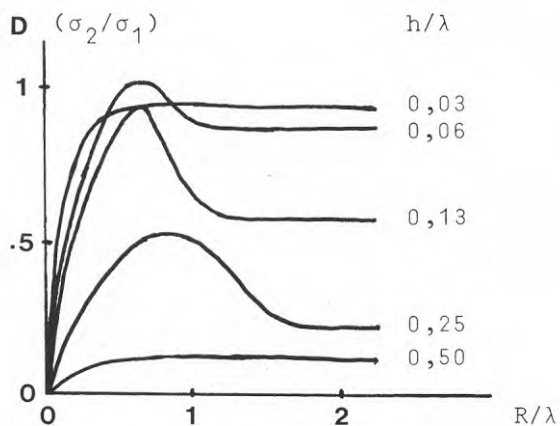


FIG. 13. Dämpningsfaktorn som funktion av avståndet från spalten för olika h/λ .

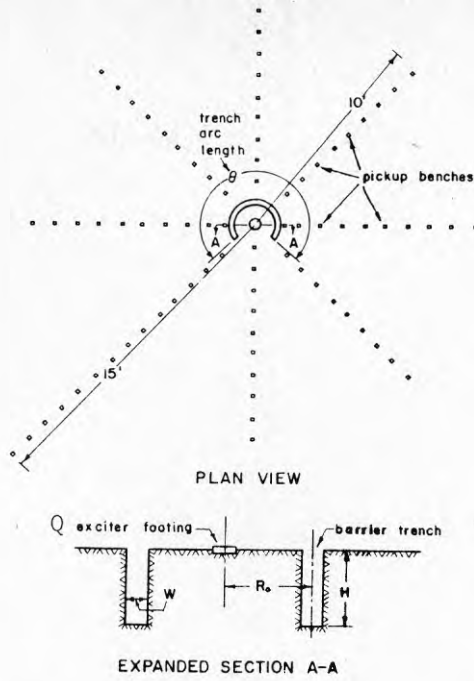


FIG. 14. Skiss av vibrator (Q), spalt och vibrationsmätare enligt Wood (aktiv dämpning).

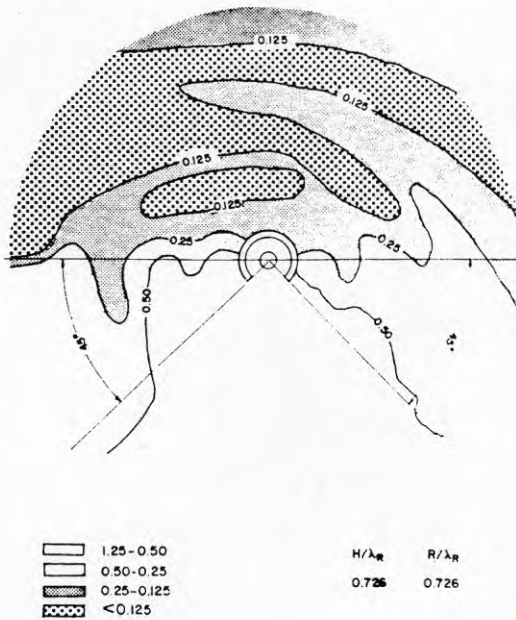


FIG. 15. Aktiv dämpning av vibrationerna i olika regioner. Siffrorna anger dämpningsfaktorn för amplituden.

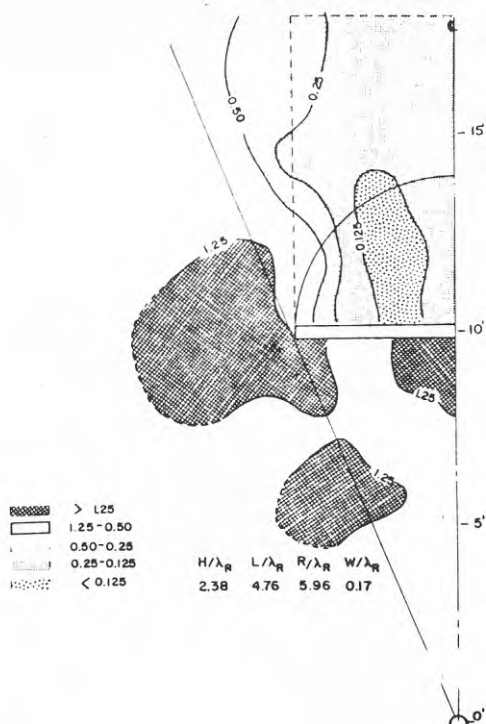


FIG. 16. Passiv dämpning medelst spalt. Siffrorna anger dämpningsfaktorn för amplituden.

Vid passiv isolering (fig. 16) uppstår ett skyddat område inom en halvcirkel bakom spalten. Detta område har dock ingen skarp gräns.

Vid passiv isolering anges:

- Vid större avstånd från laddningen fordras större spalt.
- Förstärkning av vertikala vibrationer sker framför och på sidan av spalten ($D > 1$).
- Spaltbredden (tjockleken) har liten betydelse.
- Väggbarriärer är mindre effektiva än öppna spalter.

8 FULLSKALEFÖRSÖK

Under årens lopp har ett stort antal mätvärden insamlats, där samverkande laddning, avstånd till sprängplats och svängningshastighet är kända. Svängningshastigheten är den storhet som allmänt anses bäst utgöra skadekriteriet för bebyggelse, varför man har försökt finna ett samband där svängningshastigheten (v) är en funktion av samverkande laddning (Q) och avstånd till sprängplatsen (R).

$$v = f(Q,R)$$

Detta blir emellertid en tredimensionell figur (se fig.46), som är svår att åskådliggöra i ett tvådimensionellt diagram. Det vanligaste sättet är därvid att sätta samman Q och R till en variabel

$$r = R/Q^\alpha$$

och sedan ange

$$v = f(r)$$

Detta visar sig ge ett nära linjärt samband i ett log-log diagram varför man allmänt anger

$$\log v = \log K - \beta \cdot \log r$$

eller

$$v = K/r^\beta$$

Nedan kommer vi att redogöra för tre olika försöks-serier: i Brännland /10/, i Umeå-Härnösand /15/ och i Eolshäll /13/.

8.1 Brännland

8.1.1 Allmänt om försöken

Försöken har utförts i närheten av Västerbottens Grusförädling AB:s makadamfabrik i Brännland, Umeå. Berggrunden utgörs till övervägande del av gnejs, vilken kan uppdelas i en ljus, finkornig och en mörk, grovkornig gnejs i proportion 1:1. Huvudmineralen är kvarts, fältspat och mörk glimmer. Medel-densiteten är 2700 kg/m^3 .

Vid försöken har i de flesta fall två mätpunkter varit placerade i rät linje med exciteringskällan enligt nedan.

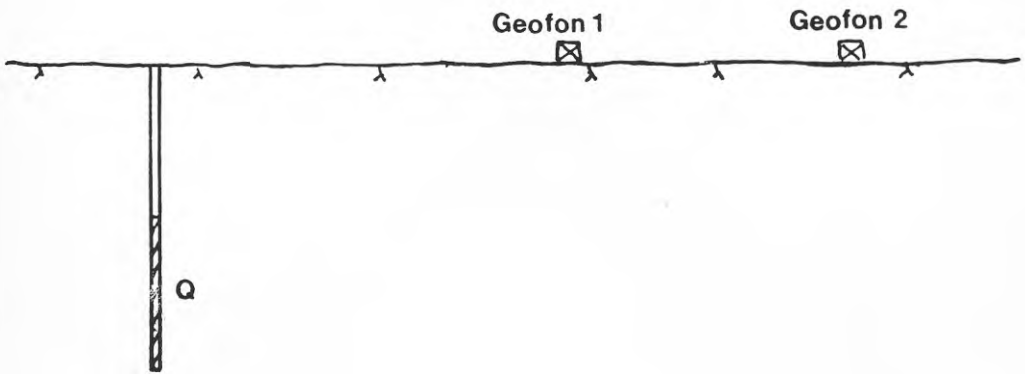


FIG. 17. Skiss av laddning och mätpunkter.

Vid några fall har dock tre mätpunkter använts.

I ungefär hälften av försöken har enbart den vertikala svängningshastigheten registrerats och i övriga försök har alla tre komponenterna registrerats.

I samtliga försök har exciteringskällan utgjorts av en cylindrisk laddning i viktsklassen 0,5 - 25 kg, placerad i ett vertikalt borrhål.

Håldiametrarna som använts har varit 25 mm, 38 mm och 76 mm.

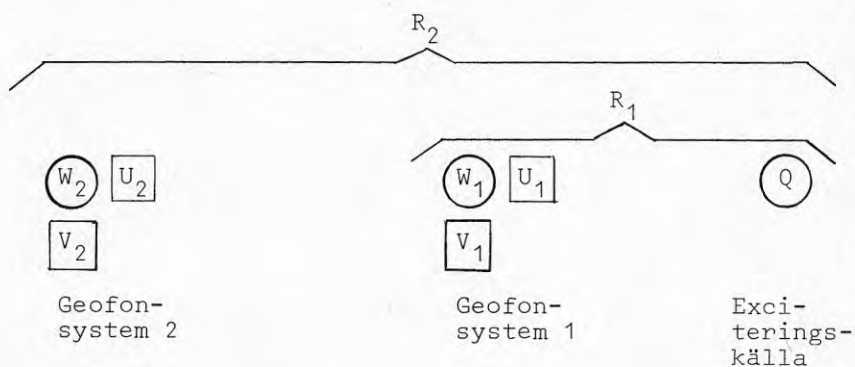
Endast tre skott har varit sådana att laddningen haft möjlighet till horisontellt utslag (pallsprängning). Resterande skott har skjutits med helt inspända hål. Alla skott utom ett har botteninitierats och både för- och avladdning har använts.

I de resultatstabeller som finns under punkt 8.1.2 har alla avvikelser noterats under kolumnen "Anmärkningar".

Instrumenteringen har bestått av en 6-kanals UV-skrivare typ SE-3006 och geofoner av typ Geospace HS1 Basic Unit.

8.1.2 Redovisning av mätresultat

I tabellerna över mätresultaten har nedanstående beteckningar generellt använts:



- R₁ betecknar avståndet geofonsystem 1 - laddning
 R₂ betecknar avståndet geofonsystem 2 - laddning
 Q betecknar laddningsvikt
 W₁ & W₂ betecknar vertikala mätpunkter
 U₁ & U₂ betecknar longitudinella mätpunkter
 V₁ & V₂ betecknar transversella mätpunkter.

TABELL 1.

Skott nr	Håldiam mm	Håldjup m	Laddning Q, kg	Svängningshastighet, mm/s						R ₁ m	R ₂ m	Anmärkning
				W ₁	U ₁	V ₁	W ₂	U ₂	V ₂			
1-1-75	38	2,43	2,68	5,8	21,0	11,9	3,6	3,9	3,3	21,8	44,9	Avladdning 0,90 m
1-2-75	38	2,43	1,88	1,9	16,1	10,0	0,9	7,2	3,9	26,0	48,0	Avladdning 1,38 m
1-3-75	38	2,43	2,40	9,3	27,4	21,1	1,7	6,9	2,7	26,0	51,7	Avladdning 1,14 m
2-1-75	38	2,43	2,83	-	77,8	61,6	1,3	4,5	3,0	20,0	46,9	Förladdning 0,90 m
2-2-75	38	2,43	2,80	29,1	122,4	85,9	8,9	18,9	11,7	15,1	39,6	Förladdning 0,90 m
2-3-75	25	1,60	0,84	6,4	31,7	16,2	0,9	1,7	1,7	25,4	52,1	Förladdning 0,49 m
2-4-75	25	1,60	0,90	7,6	36,7	8,9	0,4	3,0	0,8	22,5	51,8	Förladdning 0,40 m
2-5-75	38	2,43	2,80	6,7	21,6	6,5	1,7	7,2	3,6	42,8	66,7	Förladdning 0,90 m
2-6-75	25	1,60	0,93	7,0	17,9	7,8	1,2	5,1	2,1	34,2	58,1	Förladdning 0,45 m
2-7-75	38	2,43	2,67	44,6	45,5	25,6	1,7	10,5	8,4	29,4	53,3	Förladdning 1,00 m
2-8-75	76	4,86	7,20	8,9	18,7	14,6	3,3	5,6	5,0	56,6	106,6	Avladdning 3,31 m
2-9-75	76	4,86	7,20	16,3	23,0	19,4	4,9	7,5	3,3	59,0	109,0	Förladdning 3,36 m
2-10-75	76	4,86	7,20	9,6	14,4	13,0	3,6	7,2	1,5	68,2	118,2	Förladdning 3,30 m
2-11-75	76	4,86	9,00	14,0	20,9	16,2	4,5	7,2	5,6	62,1	112,1	Förladdning 2,95 m

Anm. Hål 1-1-75, 1-2-75 och 1-3-75 var borrade i pall med försättning 1,38 m.

Resterande försök avser helt inspända hål.

Skott 2-1-75 toppinitierades.

TABELL 2.

Skott nr	Håldiam mm	Håldjup m	Laddning Q, kg	Svängningshastighet, mm/s						R ₁ m	R ₂ m	Anmärkning
				W ₁	U ₁	V ₁	W ₂	U ₂	V ₂			
4-1-75	25	1,60	1,20	5,5	9,5	7,1	1,4	5,7	1,4	23,6	34,1	Fulladdat hål
4-2-75	25	1,60	1,15	3,2	12,7	9,1	0,6	4,4	2,7	25,8	55,9	Avladdning 0,1 m
4-3-75	25	1,60	1,10	1,9	6,5	5,7	0,9	3,0	1,7	31,6	61,7	Avladdning 0,2 m
4-4-75	25	1,60	0,95	1,7	5,8	3,9	1,3	2,7	1,5	36,3	66,8	Avladdning 0,3 m
4-5-75	25	1,60	0,93	7,1	9,4	5,3	1,0	3,0	1,8	31,5	69,8	Avladdning 0,4 m
4-6-75	25	1,60	0,80	7,3	9,2	5,8	0,9	3,0	1,4	33,0	71,3	Avladdning 0,5 m
4-7-75	25	1,60	0,85	12,5	15,0	13,0	0,9	3,9	1,8	29,2	67,5	Förladdning 0,4 m
4-8-75	25	1,60	0,80	8,4	13,0	6,8	0,9	2,7	0,8	25,6	63,9	Förladdning 0,5 m
4-9-75	25	1,60	0,70	15,7	21,9	17,5	0,7	3,6	0,8	21,6	60,8	Förladdning 0,6 m
4-10-75	25	1,60	1,03	13,1	23,0	12,2	1,4	3,2	3,0	15,5	54,7	Förladdning 0,3 m
4-11-75	25	1,60	1,13	9,5	28,8	25,1	0,9	2,0	1,4	11,9	51,1	Förladdning 0,2 m
4-12-75	25	1,60	0,73	1,0	6,5	2,8	0,4	2,4	1,4	30,1	60,2	Förladdning 0,6 m

TABELL 3.

Skott nr	Håldiam mm	Håldjup m	Laddning Q, kg	Svängningshastighet, mm/s			Avstånd, m			Anmärkning
				W ₁	W ₂	W ₃	R ₁	R ₂	R ₃	
1-1-76	38	2,43	3,13	8,1	3,2	-	19,3	46,2	-	Förladdning 0,6 m
1-2-76	38	2,43	3,46	34,5	5,6	-	17,5	43,5	-	Förladdning 0,4 m
1-3-76	38	2,43	3,75	-	5,8	-	13,5	39,0	-	Förladdning 0,2 m
1-4-76	38	2,43	3,13	6,3	3,7	-	23,8	50,7	-	Avladdning 0,6 m
1-5-76	38	2,43	3,50	12,8	5,2	-	21,8	47,6	-	Avladdning 0,4 m
1-6-76	38	2,43	3,63	18,0	9,5	-	19,9	44,4	-	Avladdning 0,2 m
2-1-76	76	4,86	14,40	9,6	3,5	0,9	35,5	82,0	154,8	Avladdning 2,0 m
2-2-76	76	4,86	14,40	22,5	7,2	0,8	26,7	44,4	160,3	Förladdning 2,0 m
2-3-76	76	4,86	18,45	-	9,4	0,6	17,1	35,0	159,1	Avladdning 1,0 m
2-4-76	76	4,86	19,80	45,0	36,0	0,9	27,7	33,0	162,4	Förladdning 1,0 m
2-5-76	76	4,86	14,40	28,5	24,8	0,8	20,8	29,0	154,1	Avladdning 2,0 m
2-6-76	76	4,86	25,20	42,0	103,7	-	30,7	21,2	-	Fulladdat hål

TABELL 4.

Skott nr	Håldiam mm	Håldjup m	Laddning Q, kg	Svängningshastighet, mm/s						R ₁ m	R ₂ m	Anmärkning
				W ₁	U ₁	V ₁	W ₂	U ₂	V ₂			
1-1-74	25	1,60	1,10	7,4	-	-	3,2	-	-	21	45	Avladdning 0,00 m
1-2-74	25	1,60	0,75	6,1	-	-	2,2	-	-	21	45	Avladdning 0,49 m
1-3-74	38	2,37	3,80	17,3	-	-	10,6	-	-	21	43	Avladdning 0,00 m
1-4-74	38	2,37	1,50	6,1	-	-	9,1	-	-	37	24	Avladdning 0,90 m
1-5-74	38	2,37	2,40	8,3	-	-	8,5	-	-	39	27	Avladdning 0,86 m
1-6-74	38	2,37	2,30	8,6	-	-	1,4	-	-	38	84	Avladdning 0,90 m
1-7-74	38	2,37	2,05	8,6	-	-	1,0	-	-	35	81	Avladdning 1,11 m
1-8-74	25	1,60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1-9-74	25	1,60	0,75	2,6	-	-	0,3	-	-	36	82	Avladdning 0,45 m
1-10-74	25	1,25	0,47	3,5	-	-	0,3	-	-	28	73	Avladdning 0,47 m
1-11-74	25	1,25	0,48	4,2	-	-	0,5	-	-	27	76	Avladdning 0,44 m
1-12-74	38	1,20	0,95	5,9	-	-	0,5	-	-	29	81	Avladdning 0,60 m
1-13-74	38	1,20	0,50	4,5	-	-	0,3	-	-	26	78	Avladdning 0,90 m

Anm. Skott 1-8-74 mättes ej på grund av laddstopp efter en patron.

TABELL 5.

Skott nr	Håldiam mm	Håldjup m	Laddning Q, kg	Svängningshastighet, mm/s						R ₁ m	R ₂ m	Anmärkning
				W ₁	U ₁	V ₁	W ₂	U ₂	V ₂			
2-1-74	76	4,83	16,2	-	-	-	11,4	-	-	22,4	48,3	Avladdning 2,29 m
2-2-74	76	4,79	10,8	-	-	-	9,9	-	-	11,8	37,9	Avladdning 3,05 m
2-3-74	76	4,80	12,6	45,6	-	-	9,0	-	-	23,8	49,3	Avladdning 2,75 m
2-4-74	76	4,80	9,0	31,4	-	-	7,0	-	-	29,8	54,0	Avladdning 3,30 m
2-5-74	76	4,80	7,2	29,8	-	-	-	-	-	24,8	48,4	Avladdning 3,52 m
2-6-74	76	4,82	7,2	33,6	-	-	17,9	-	-	14,5	38,5	Avladdning 3,66 m
2-7-74	76	4,70	9,0	22,4	-	-	6,1	-	-	39,0	63,0	Avladdning 3,06 m

8.1.3 Regressionsanalys av resultaten

Regressionsanalys har utförts på samtliga mätvärden och en kurva

$$v = K/\left(\frac{R}{Q^\alpha}\right)^\beta$$

där v = svängningshastighet, Q = laddning och R = avståndet, har anpassats till de diskreta mätvärdena, med R/Q^α som oberoende variabel.

Fig. 19-21 visar anpassningarna till de vertikala, longitudinella respektive transversella svängningshastigheterna. I fig. 22 har de tre anpassningarna plottats på samma figur med R/\sqrt{Q} som oberoende variabel.

Eftersom mätningarna utfördes på fem olika platser inom en kilometers omkrets så plottades de vertikala mätvärdena upp för de olika platserna. Ingen signifikantstest av materialet har gjorts, utan samtliga mätvärden har ingått i analysen. Fig. 23-27 innehåller anpassningar till mätvärdena från de olika skjutplatserna. Fig. 28 slutligen visar de regressionskurvor som erhöles från de olika platserna när $\alpha = 0,5$ användes. Detta gjordes för att visa hur stor skillnad det var på mätvärdena. När man presenterar regressionskurvor med varierande α är det alltid svårt att jämföra dem sinsemellan.

Det vore en förenkling om samma α genomgående användes vid presentation av mätvärden. De flesta studierna av empiriska mätvärden visar att ett α som ligger mellan $1/3$ och $0,5$ är den bästa skal-faktorn.

8.1.4 Diskussion

I varje försök har enbart ett skott skjutits varför noggrann kontroll har kunnat hållas på maximalt samverkande laddning och avstånd. Försöken har utförts på i stort sett samma plats med mycket små variationer i berggrunden. Trots dessa kontrollerade betingelser uppvisar mätvärdena en mycket större spridning än vad som förväntades innan försöken utfördes.

Mest anmärkningsvärt är dock att den longitudinella komponenten var så pass mycket större än de övriga komponenterna i samtliga försök. Något större borde den väl vara eftersom en kraftig radiell impuls erhålles vid sprängningen. Men vid jämförelse med tidigare mätningar är förhållandet mellan longitudinell och vertikal svängningshastighet stort.

I fig. 22 finns de bästa anpassningarna till de tre komponenterna plottade som funktion av R/\sqrt{Q} . Den longitudinella har som synes ungefär samma lutning som den vertikala men med ett större intercept. Den transversella har större lutning och ligger mellan den vertikala och den longitudinella.

Den maximala longitudinella svängningshastigheten var mellan 1 och 8,5 gånger större än den vertikala. I fig. 29 har kvoten mellan den longitudinella och den vertikala maxhastigheten vid varje geofonpunkt inprickats som funktion av avståndet till exciteringsstället. Då två geofonsystem användes vid försöken har en linje dragits mellan de två orterna för att illustrera om det finns någon tendens till att den longitudinella skulle minska i förhållande till den vertikala då avståndet ökade. Som synes av figurerna (diagrammen representerar uppifrån och ned försöken med $d = 25$ mm, $d = 38$ mm och $d = 76$ mm) så finns ingen tendens till att så skulle vara fallet.

Vid undersökning av UV-registreringarna finner man att den longitudinella svängningsrörelsen är den som är minst störd. Signalen är oftast lik en ren dämpad sinussvängning. (Fig. 30 visar något av denna tendens). Betraktar man registreringarna för de vertikala svängningarna finner man oftast att grundsignalen är störd.

Vid undersökning av partikelrörelserna för några registreringar ser man att den retrograda rörelsen uppvisar en betydligt större longitudinell hastighet än den vertikala. Rörelsen startar i samtliga fall från exciteringskällan och uppåt-utåt (fig. 18).

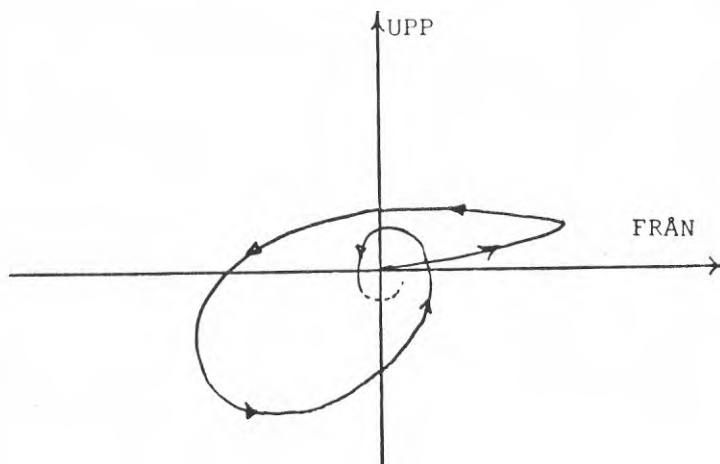


FIG. 18. Registrering av partikelrörelse i markytan.

Troligtvis beror störningarna i den vertikala svängningshastigheten på den lokala geologin. Vid inspektion av kraterbildningen efter sprängning kunde i ett flertal fall horisontella slag påvisas.

Från regressionsanalysen ser man även att standardavvikelsen är störst ($s = 0,26$) för den anpassning som gjorts på de vertikala mätvärdena. Den longitudinella uppvisar den lägsta ($s = 0,20$).

Vid sprängning intill känsliga strukturer händer det ibland att man först skjuter ett antal pilotskott och mäter svängningshastigheterna. Om man herefter gör en regressionsanalys på mätvärdena för att via extrapolering kunna bestämma maximal laddningsmängd vid de kommande salvorna bör man tänka på den lokala geologin och mäta i alla riktningar. Risker är annars stor för att en underskattning av maximala svängningshastigheten görs.

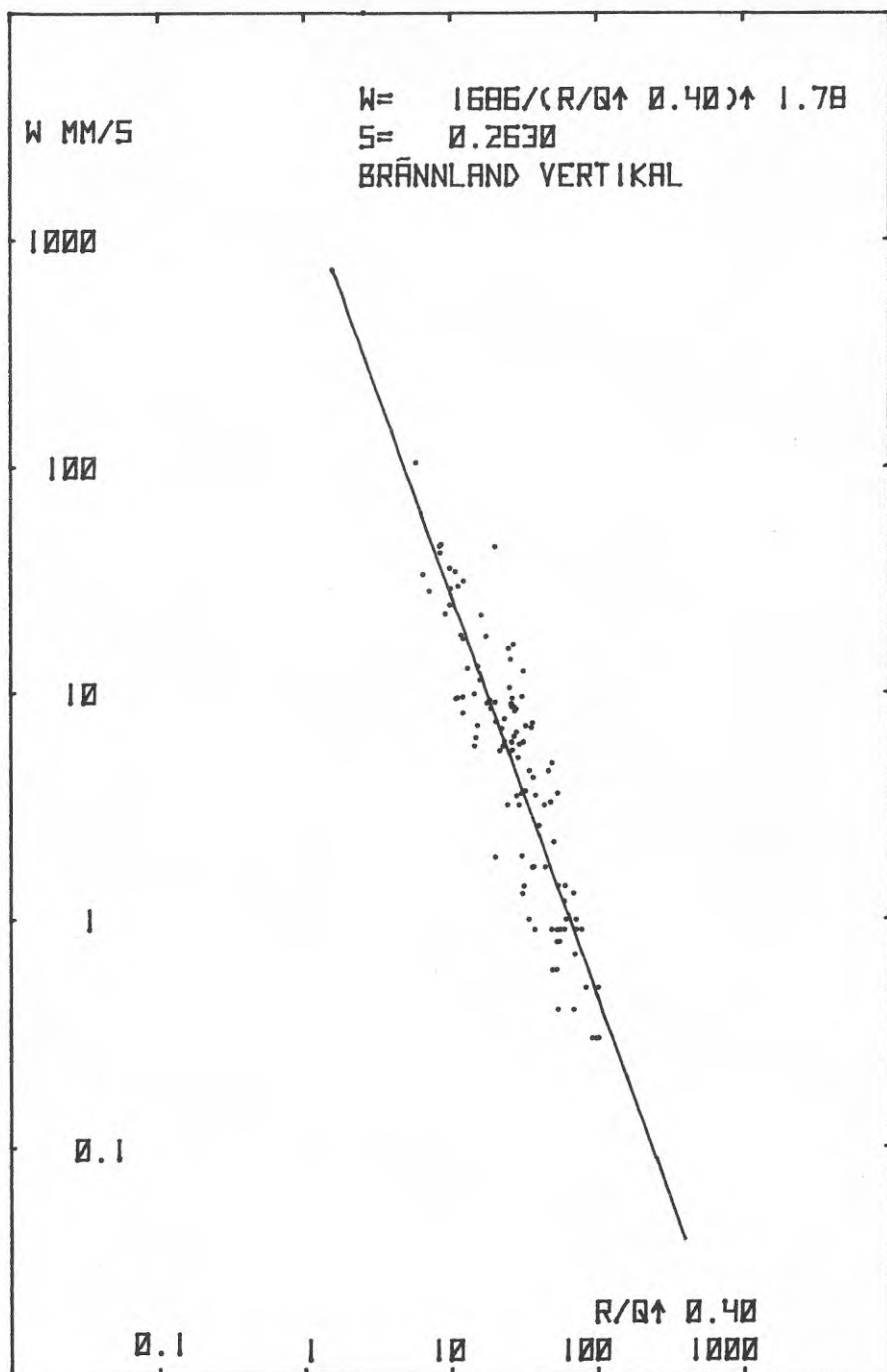


FIG. 19. Den vertikala svängningshastigheten som funktion av R/Q^α .

$\alpha = 0,4$ gav bästa anpassningen.

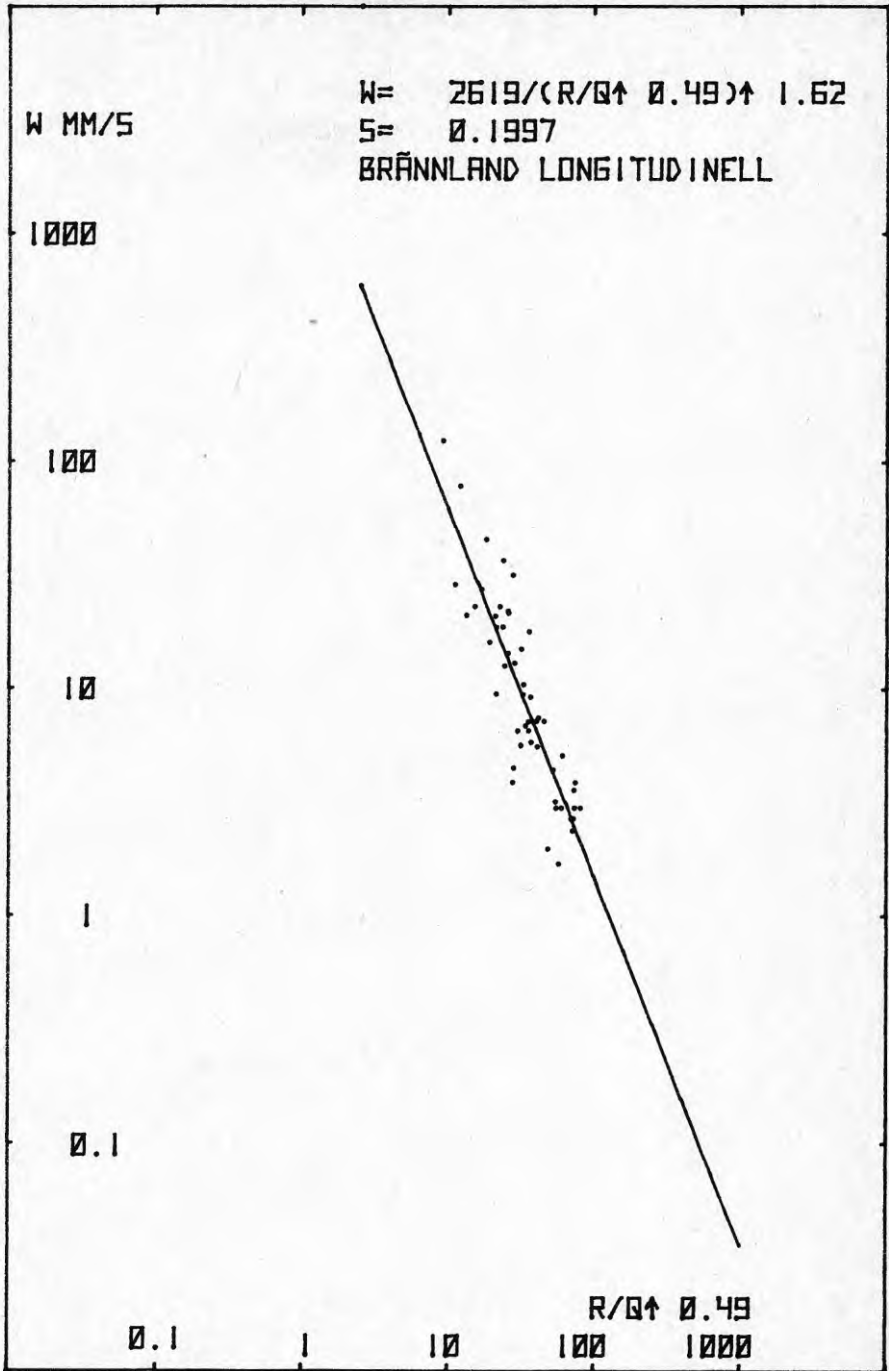


FIG. 20. Den longitudinella svängningshastigheten som funktion av R/Q^α .

$\alpha = 0,49$ gav bästa anpassningen.

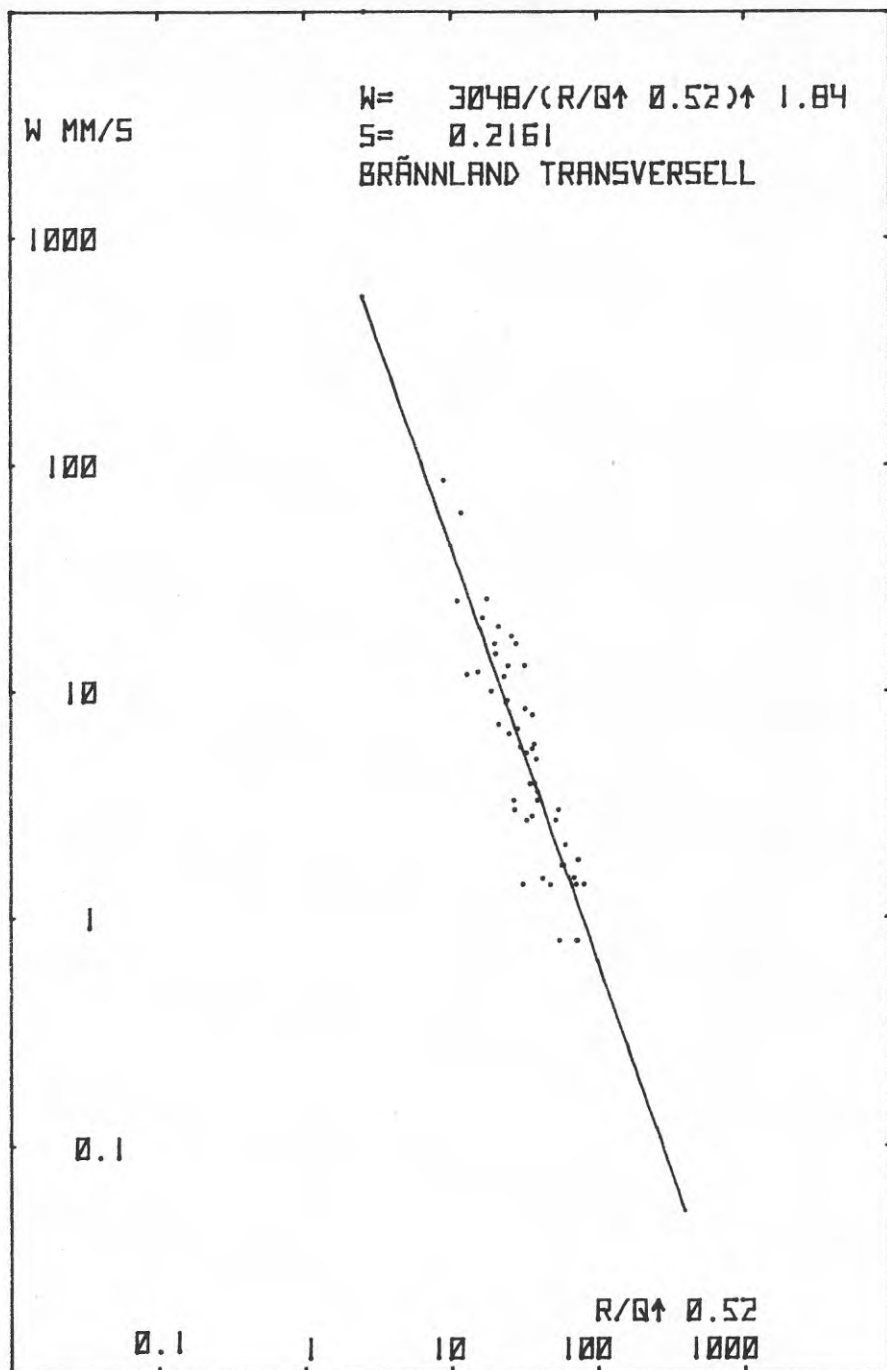


FIG. 21. Den transversella svängningshastigheten som funktion av R/Q^{α} .

$\alpha = 0,52$ gav bästa anpassningen.

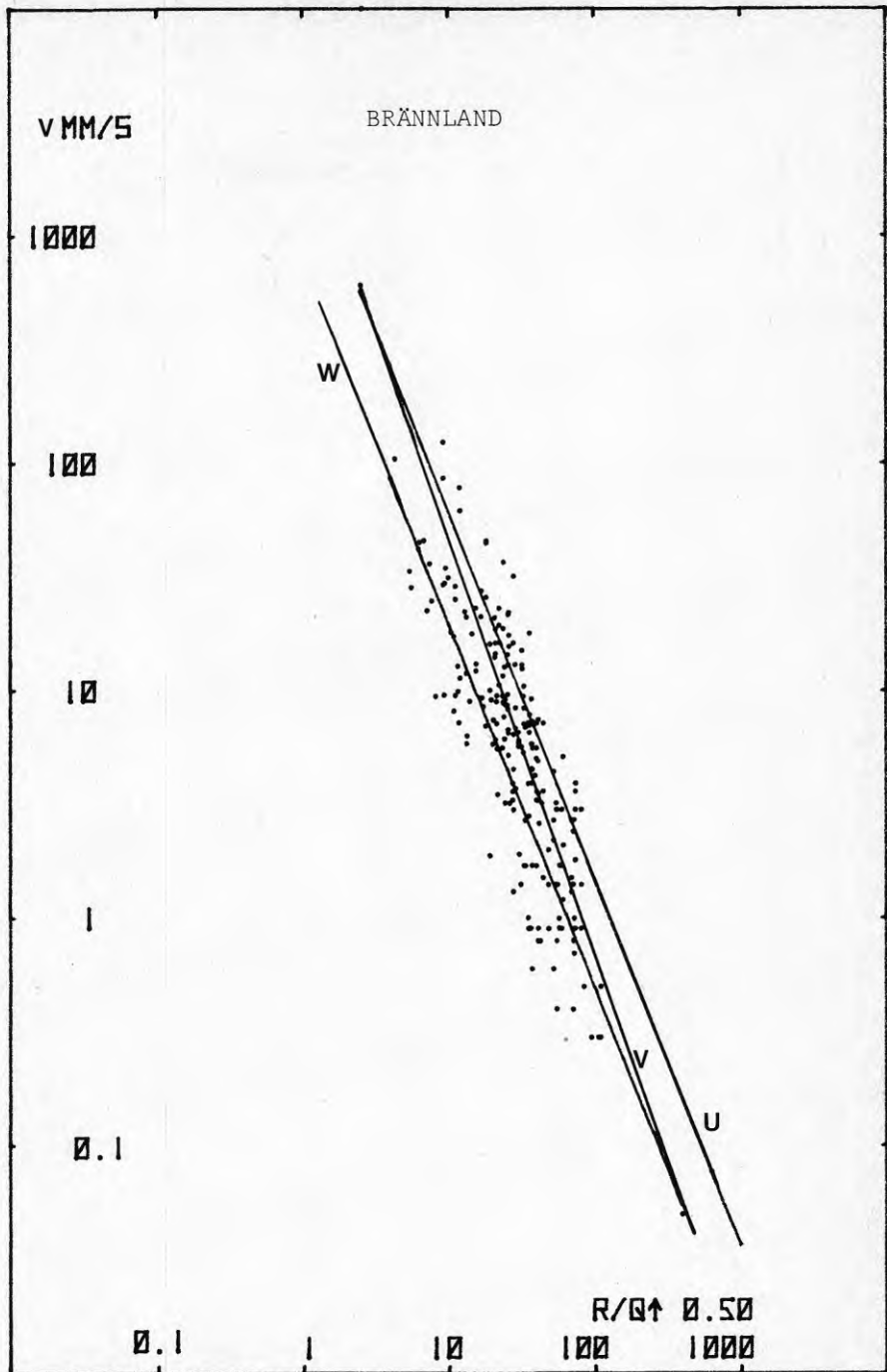


FIG. 22. Svängningshastigheterna i de tre riktningarna som funktion av R/\sqrt{Q} .

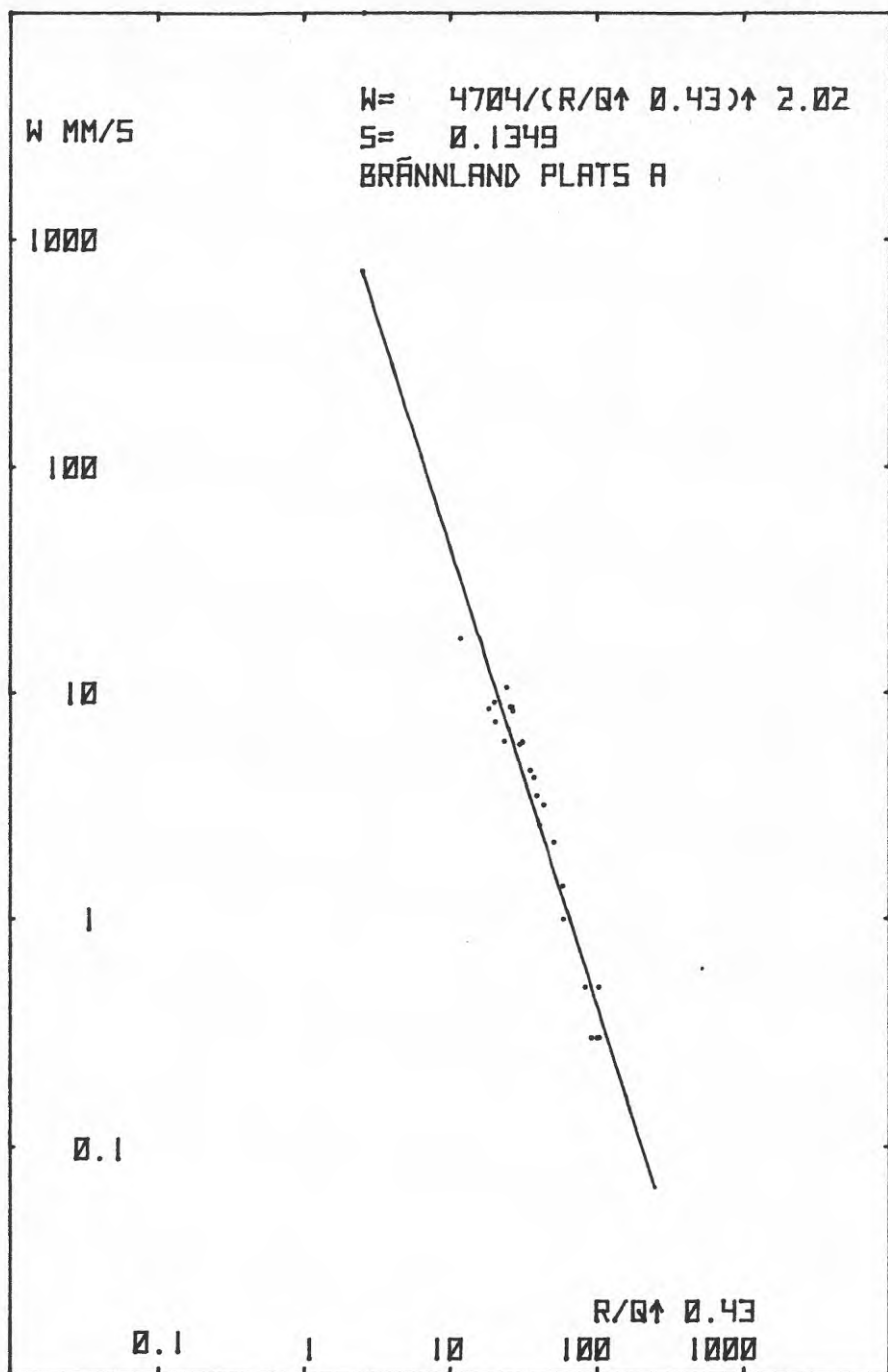


FIG. 23. Regressionsanalys av mätdata från plats A.

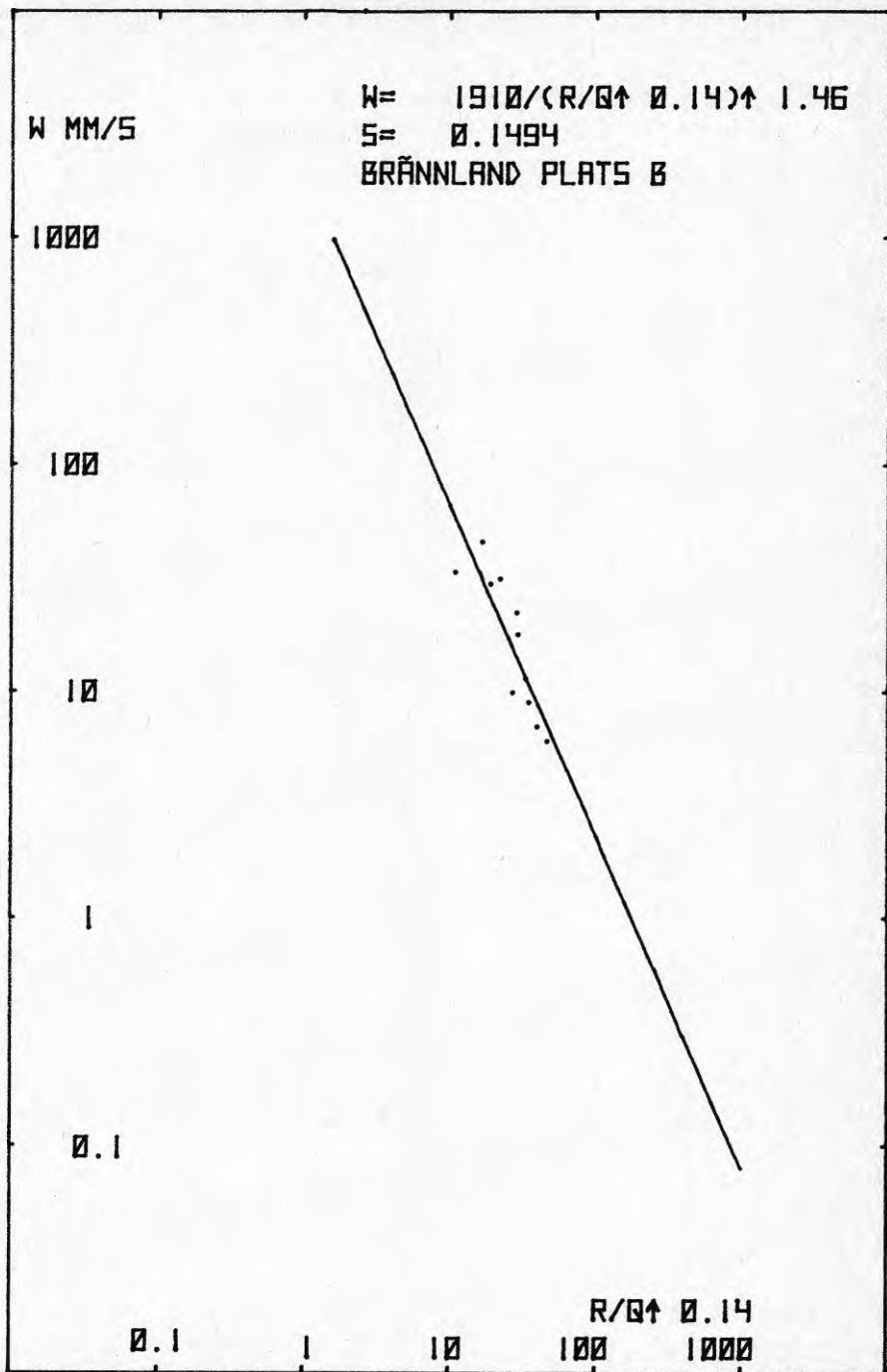


FIG. 24. Regressionsanalys av mätdata från plats B.

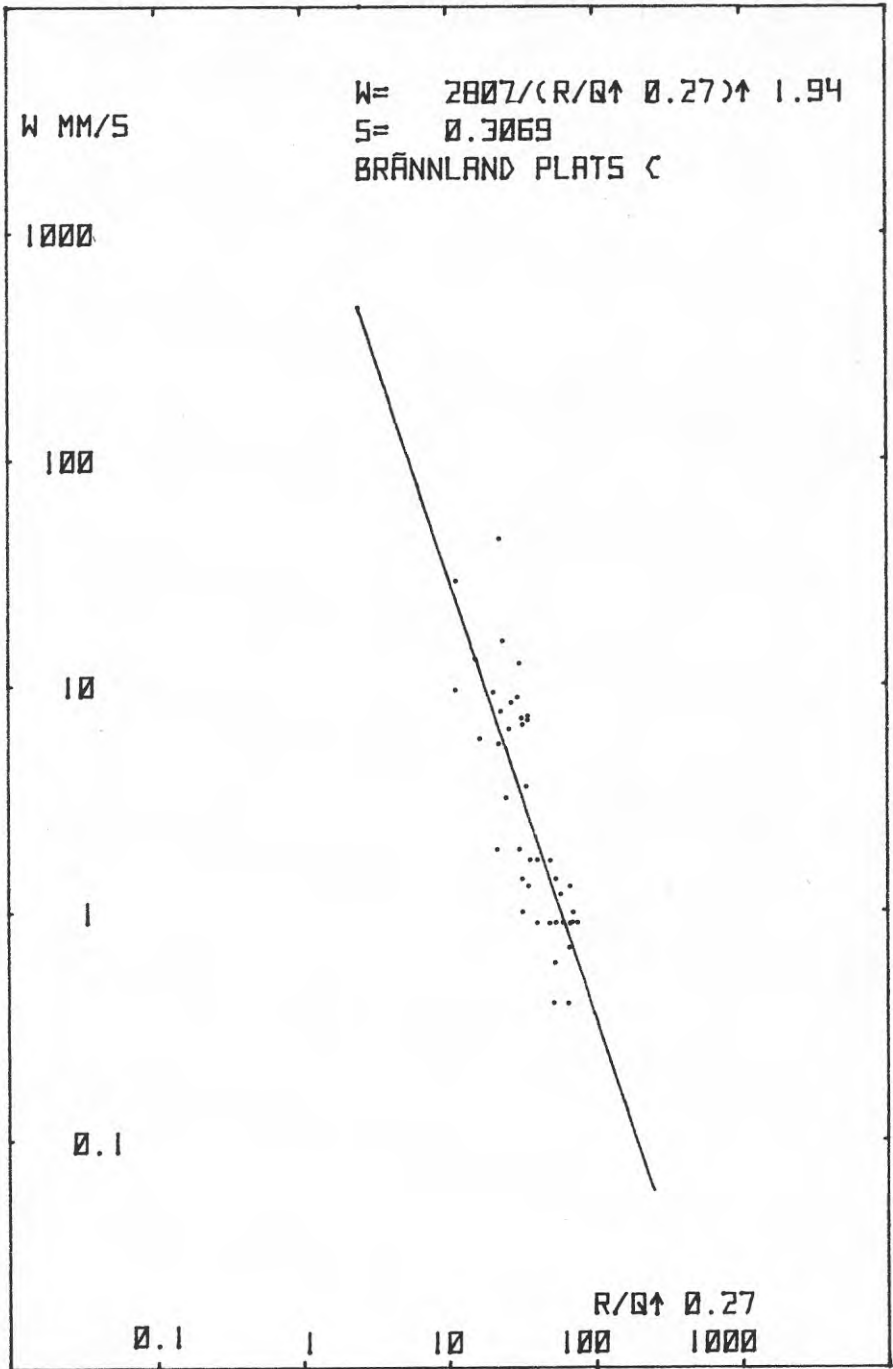


FIG. 25. Regressionsanalys av mätdata från plats C.

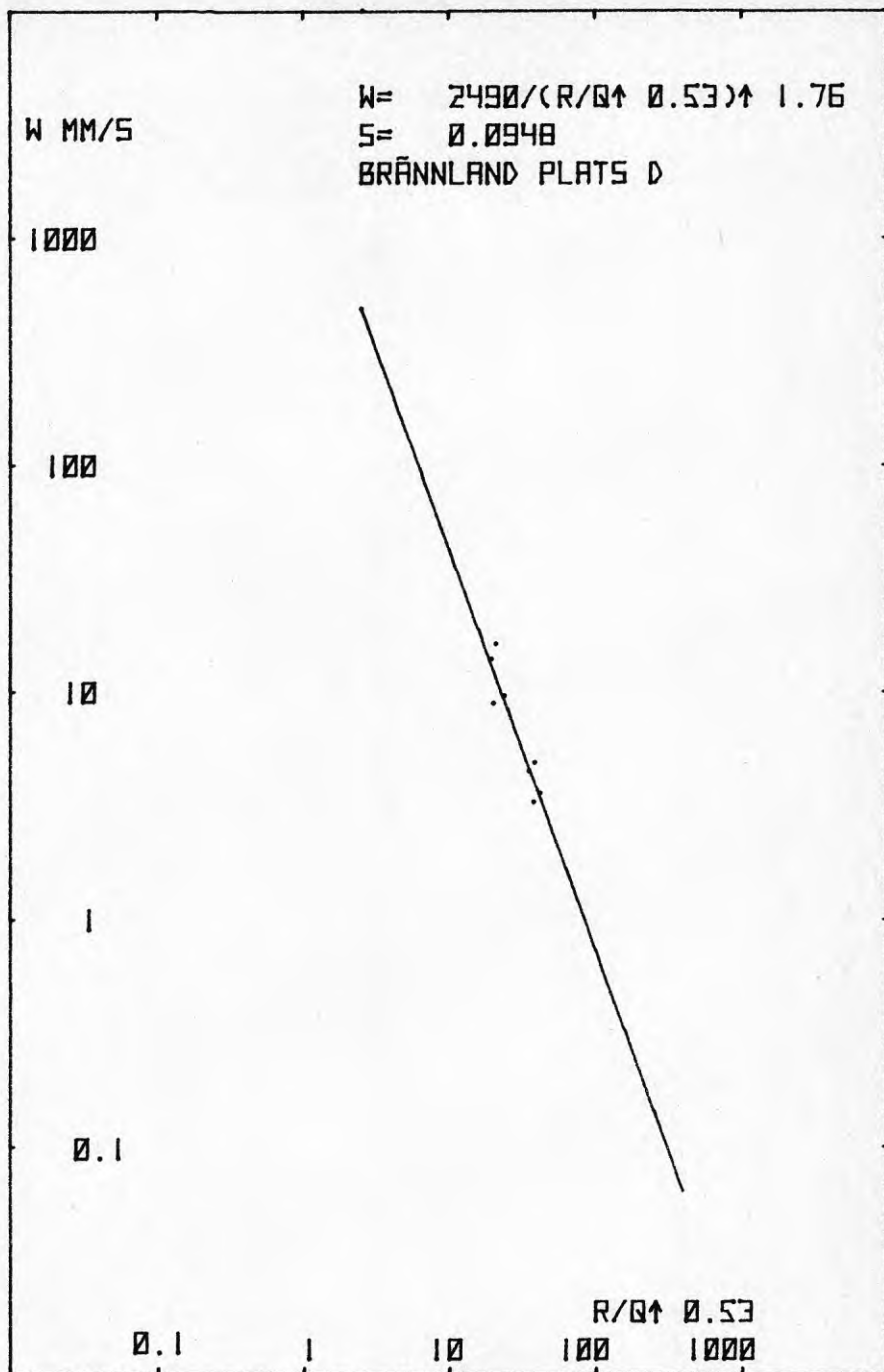


FIG. 26. Regressionsanalys av mätdata från plats D.

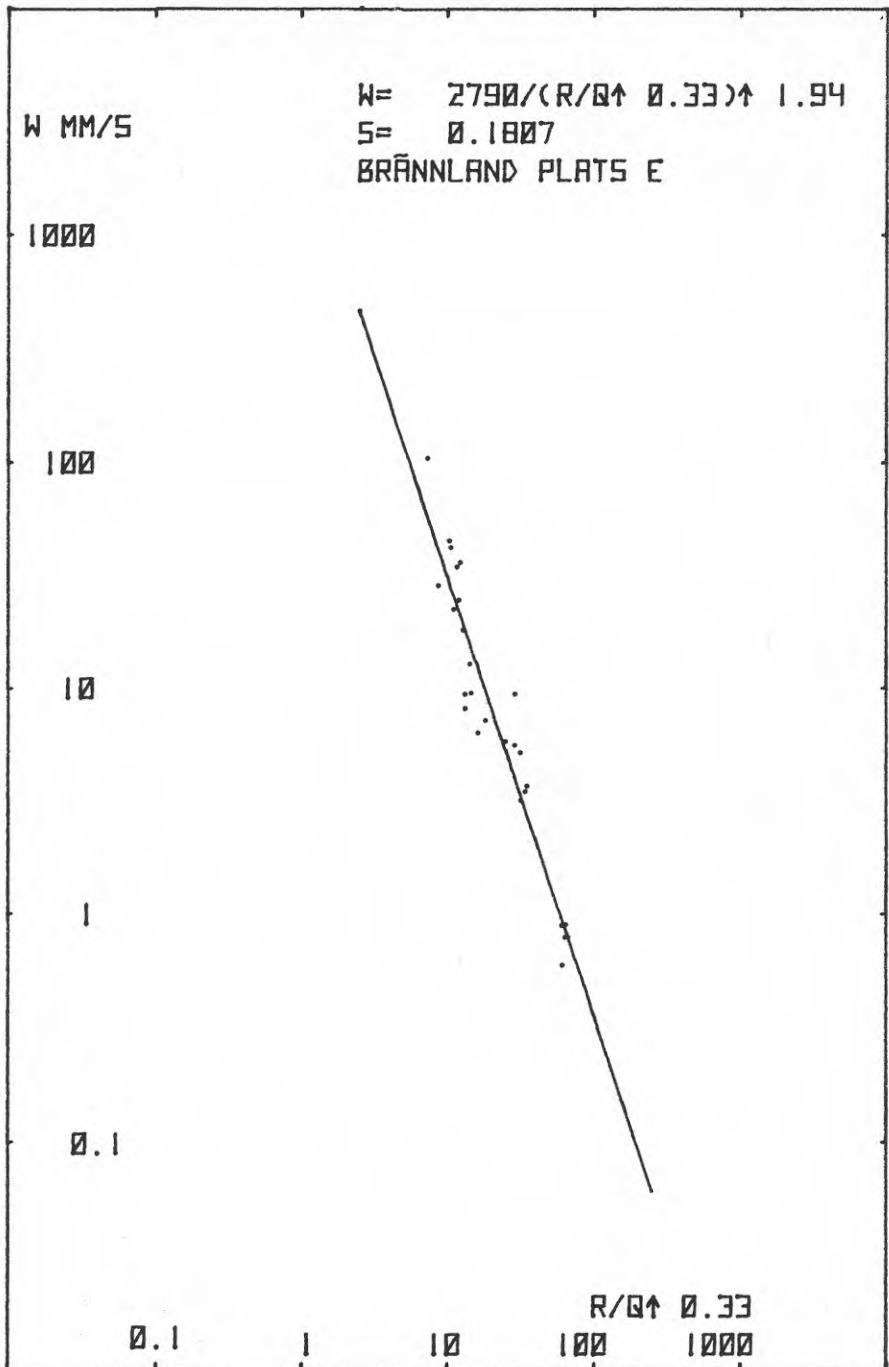


FIG. 27. Regressionsanalys av mätdata från plats E.

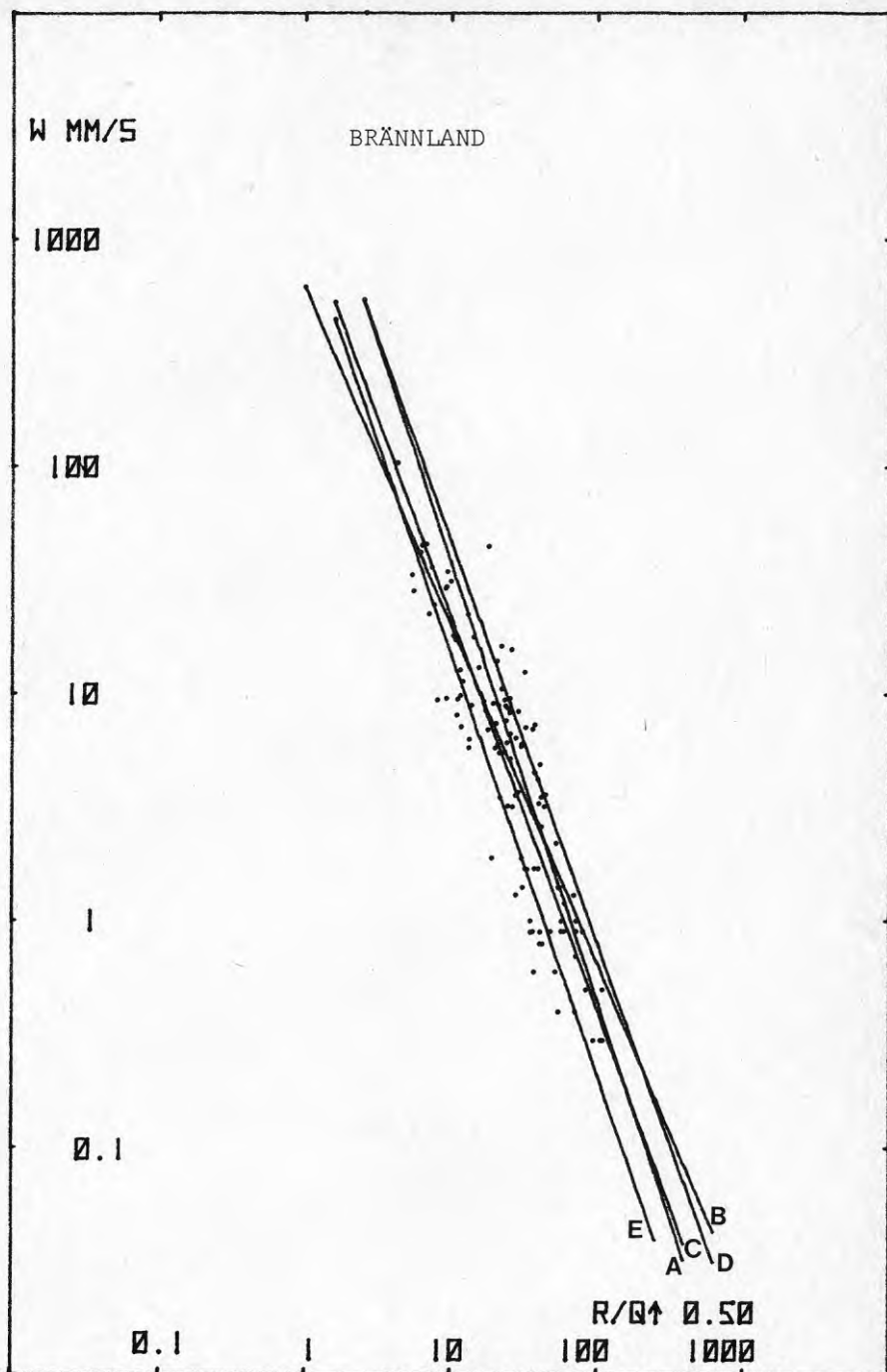


FIG. 28. Vertikal svängningshastighet som funktion av R/\sqrt{Q} .

Minsta kvadratanpassningarna är gjorda för fem olika mätplatser A - E (inom en radie av 1 km).

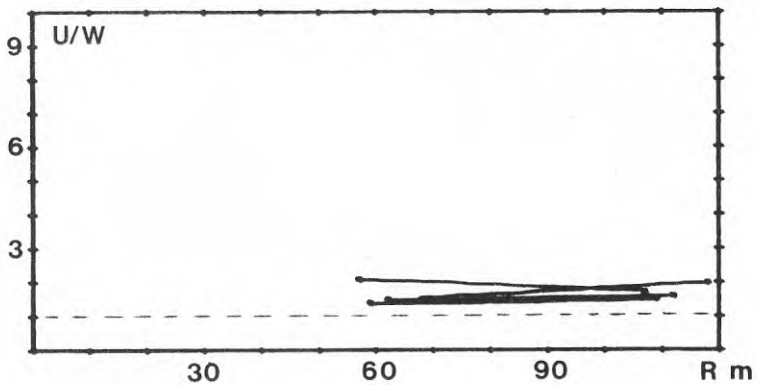
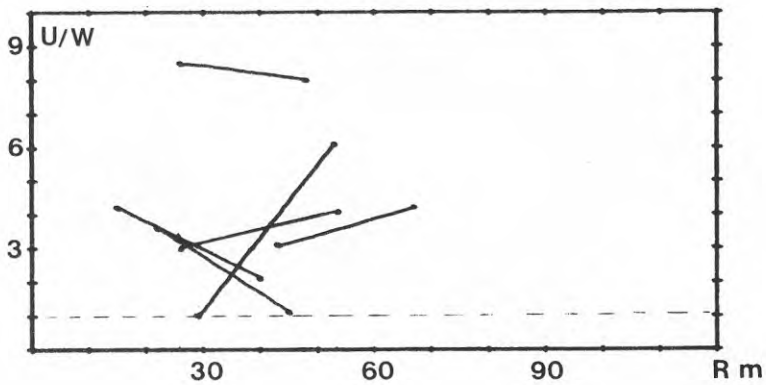
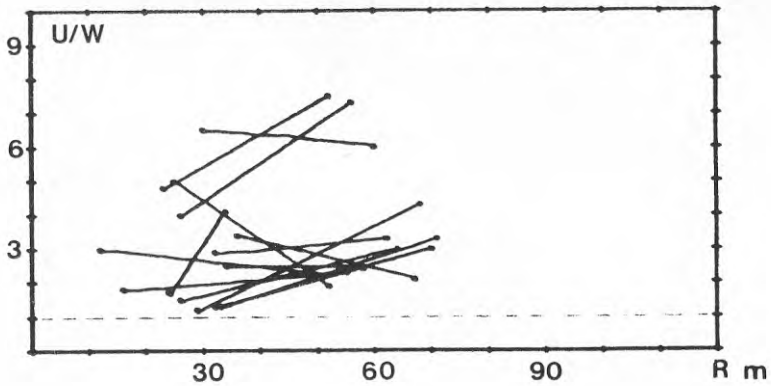


FIG. 29. Den longitudinella svängningshastigheten visade sig vara mellan 1 och 8,5 gånger större än den vertikala. Diagrammen ovan visar kvoten mellan longitudinell och vertikal svängningshastighet. Varje linje sammanbinder mätvärdena från de två mätpunkter som använts vid varje skott.

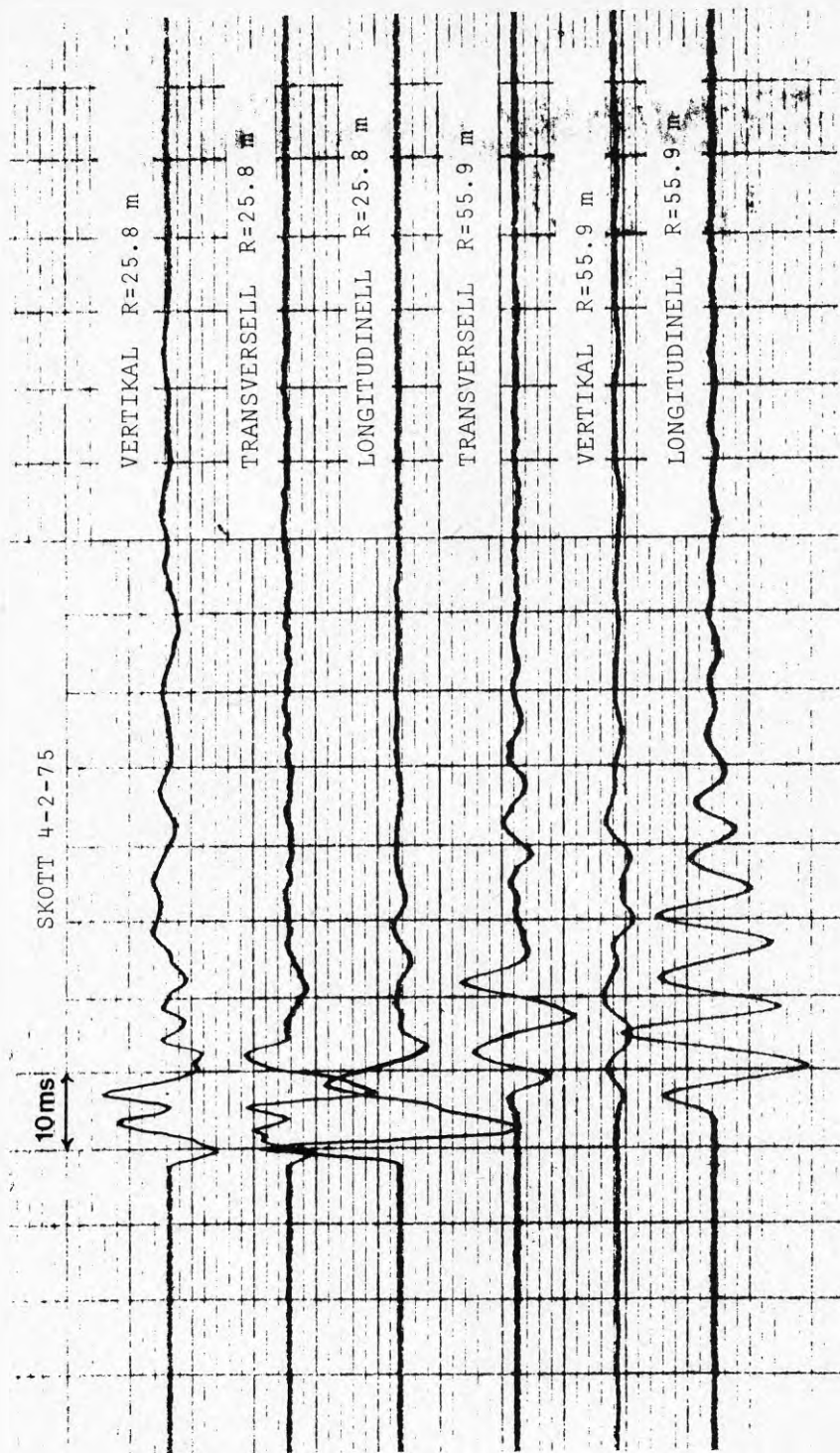


FIG. 30. Exempel på UV-registrering av skott 4-2-75. Den transversella och den longitudinella signalen för $R = 25,8$ har dämpfaktorn 2 gentemot de övriga signalerna. Lägga märke till att den longitudinella signalen är den som mest liknar en sinusdämpad svängning.

8.2 Umeå-Härnösand

Det har ibland förekommit uppgifter att markvibrationerna bakom en pallsalva kan vara upp till tio gånger större än framför salvan. För att undersöka om så är fallet mättes vibrationerna vid två pallsalvor vid Västerbottens Grusförädlings AB i Umeå och Härnösand.

Mätpunkternas placering framgår av figur 31, som också visar topografi och salvläge. I varje mätpunkt mättes den vertikala och longitudinella svängningshastigheten med hjälp av geofoner och registrerades med UV-skrivare.

Vid flera hål i samma intervall har sprängämnesmängden reducerats med en faktor 1/2 för intervall nr 1 - 10 och med 1/3 för högre intervallnummer.

Resultatet har angetts som samverkande laddning i tabell 7.

De olika intervallen har tyvärr inte kunnat åtskiljas i registreringen (se fig. 32). Detta beror på att detonationstiden för ett hål utgör ungefär halva intervalltiden och då flera hål ligger på samma intervall gör detta tillsammans med intervallspridningen att signalerna överlappar varandra, varför intervallen flyter ihop. Vi har därför använt största samverkande laddning i resp salva och avläst största svängningshastighet i resp mätpunkt. Resultatet anges i tabell 8 och 9. Som reducerat avstånd har valts R/\sqrt{Q} . Figur 33 - 35 visar bästa anpassning till en rät linje medelst minsta kvadratmetoden i ett log-log diagram. Detta ger

$$v = \frac{3192}{\left(\frac{R}{\sqrt{Q}}\right)^{2,21}} \quad \text{framför}$$

$$v = \frac{6082}{\left(\frac{R}{\sqrt{Q}}\right)^{2,39}} \quad \text{bakom}$$

$$\text{och} \quad v = \frac{6002}{\left(\frac{R}{\sqrt{Q}}\right)^{2,44}} \quad \text{för samtliga mätvärden.}$$

Av figur 33-35 framgår att kurvorna skiljer sig betydligt från varandra.

Figur 36 visar svängningshastigheten som funktion av R/\sqrt{Q} bakom resp framför salvan, samt förhållandet

mellan dessa värden. Av figuren framgår att förhållandet v_b/v_f ligger mellan 2 och 1 för normala värden på R/\sqrt{Q} resp v .

Mätvärdena är dock för få för att visa om någon signifikant skillnad eller ej i svängningshastighet framför och bakom salvan skall kunna påvisas.

TABELL 6. Pallhöjd, håldiameter och laddning per hål.

	Umeå	Härnösand
Pallhöjd	27 m	25 m
Håldiameter	76 mm	76 mm
Sprängämne DxB	92 kg/hål	87 kg/hål

TABELL 7. Samverkande laddning i olika intervall.

KI nr	Umeå		Härnösand	
	Antal	Samv. laddn.	Antal	Samv. laddn.
0	1	92	-	-
1	2	92	2	87
1,5	3	138	3	130
2	3	138	4	174
2,5	3	138	4	174
3	3	138	4	174
3,5	3	138	4	174
4	3	138	4	174
4,5	4	184	4	174
5	4	184	5	218
5,5	4	184	4	174
6	4	184	5	218
6,5	4	184	5	218
7	4	184	5	218
7,5	4	184	5	218
8	5	230	5	218
8,5	4	184	5	218
9	5	230	3	130
9,5	4	184	2	87
10	4	184	2	87
11	4	184	2	87
12	4	184	1	87
13	2	61	1	87

TABELL 8. Max. svängningshastighet (mm/s) och samverkande laddning (kg) på olika avstånd (m).

R, m	Framför		Bakom		Plats	Samv. laddn.
	W	U	W	U		
51	-	-	365	278	H	218
56	-	-	-	265	U	230
104	41	23	-	-	H	218
134	37	-	-	-	U	230
171	26	18	-	-	U	230
183	-	-	11	15	H	218
186	13	13	-	-	H	218
206	-	-	15,5	-	U	230
260	4	5	-	-	U	230

W = Vertikal

U = Longitudinell

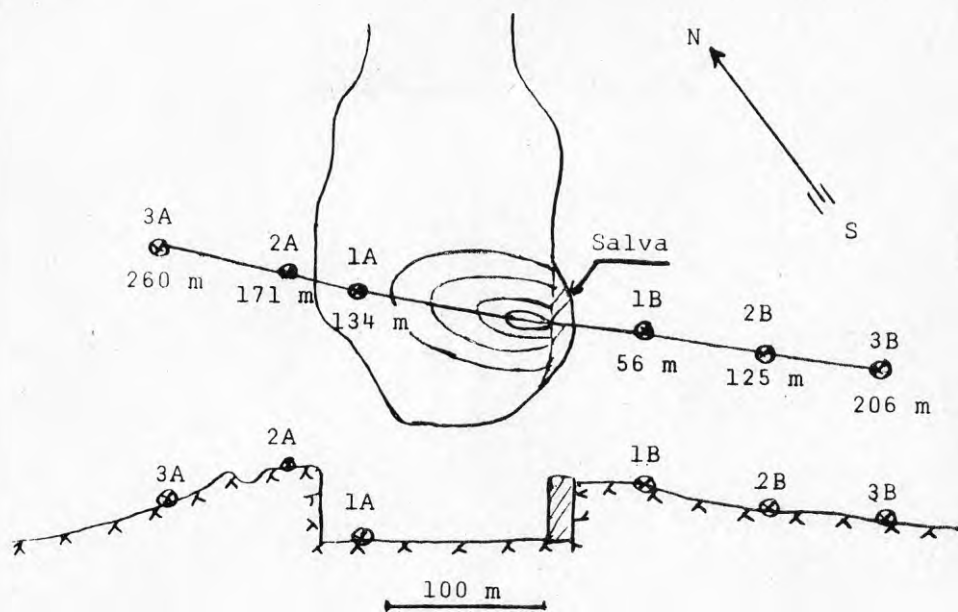
H = Härnösand

U = Umeå

TABELL 9. Log v vid olika värden på $\log \frac{R}{\sqrt{Q}}$.

$\log \frac{R}{\sqrt{Q}}$	log v				Plats
	Framför		Bakom		
	W	U	W	U	
0,54	-	-	2,56	2,44	H
0,57	-	-	-	2,42	U
0,85	1,61	1,36	-	-	H
0,95	1,57	-	-	-	U
1,05	1,41	1,26	-	-	U
1,09	-	-	1,04	1,18	H
1,10	1,11	1,11	-	-	H
1,13	-	-	1,19	-	U
1,23	0,60	0,70	-	-	U

Umeå 77-06-01



Härnösand 77-06-02

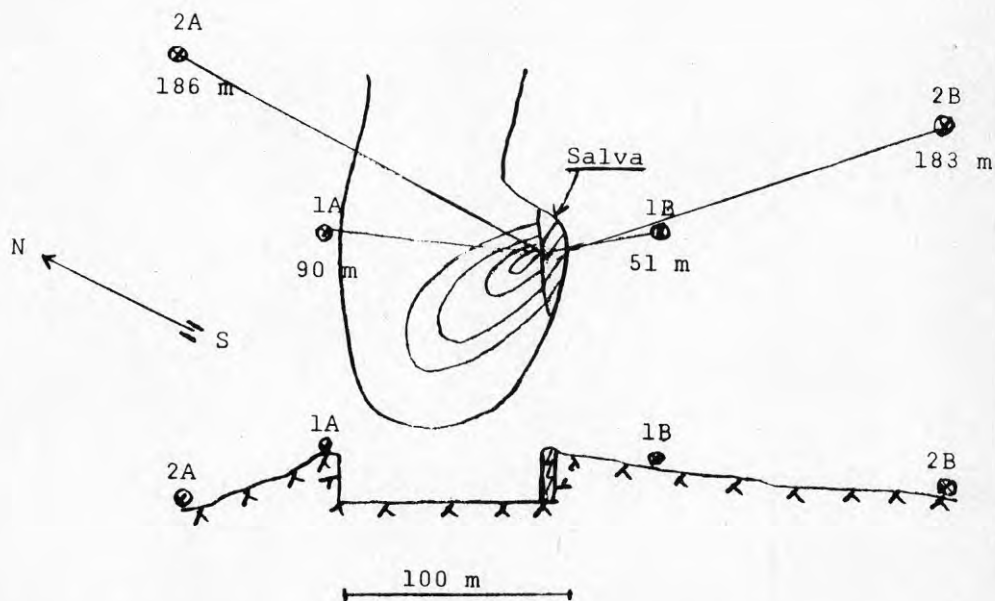
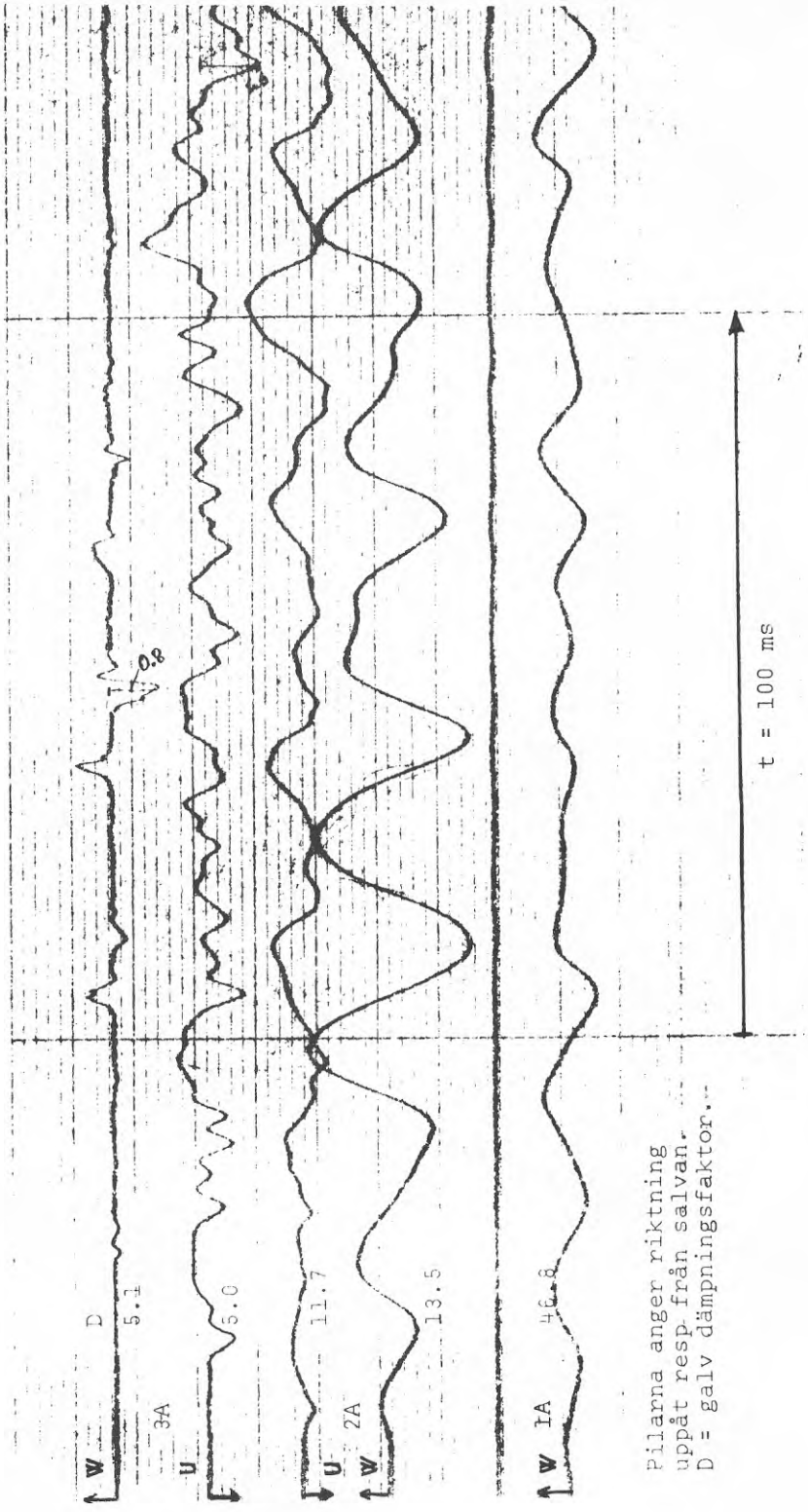


FIG. 31. Skiss över sprängplatserna i Umeå och Härnösand.



Pilarna anger riktning
uppåt resp från salvan.
D = galv dämpningsfaktor.

FIG. 32. Registrering av vibrationerna framför salvan i Umeå, mätpunkt 1A, 2A och 3A (se fig. 1).

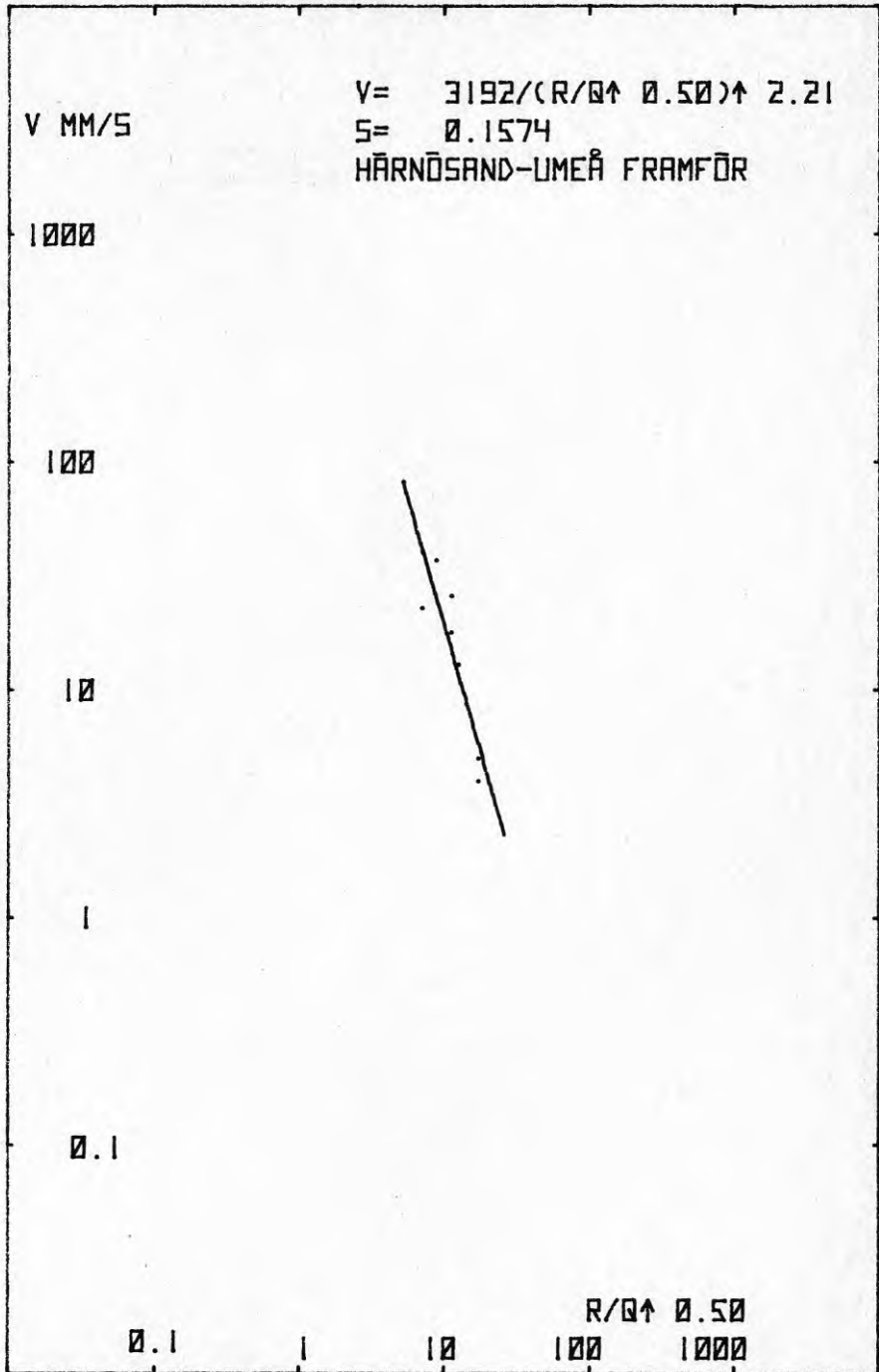


FIG. 33. Markvibrationer framför salvorna.

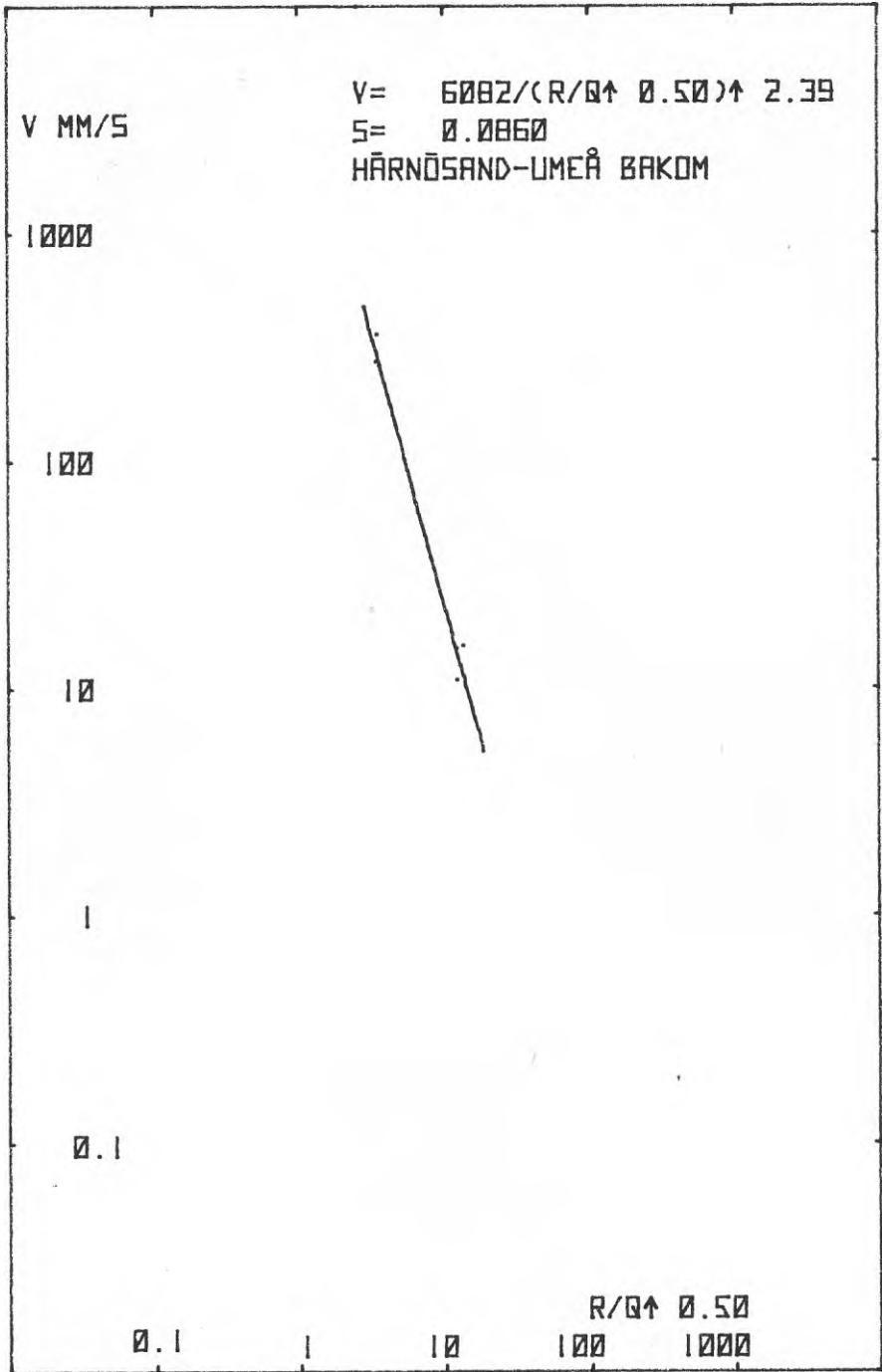


FIG. 34. Markvibrationer bakom salvorna.

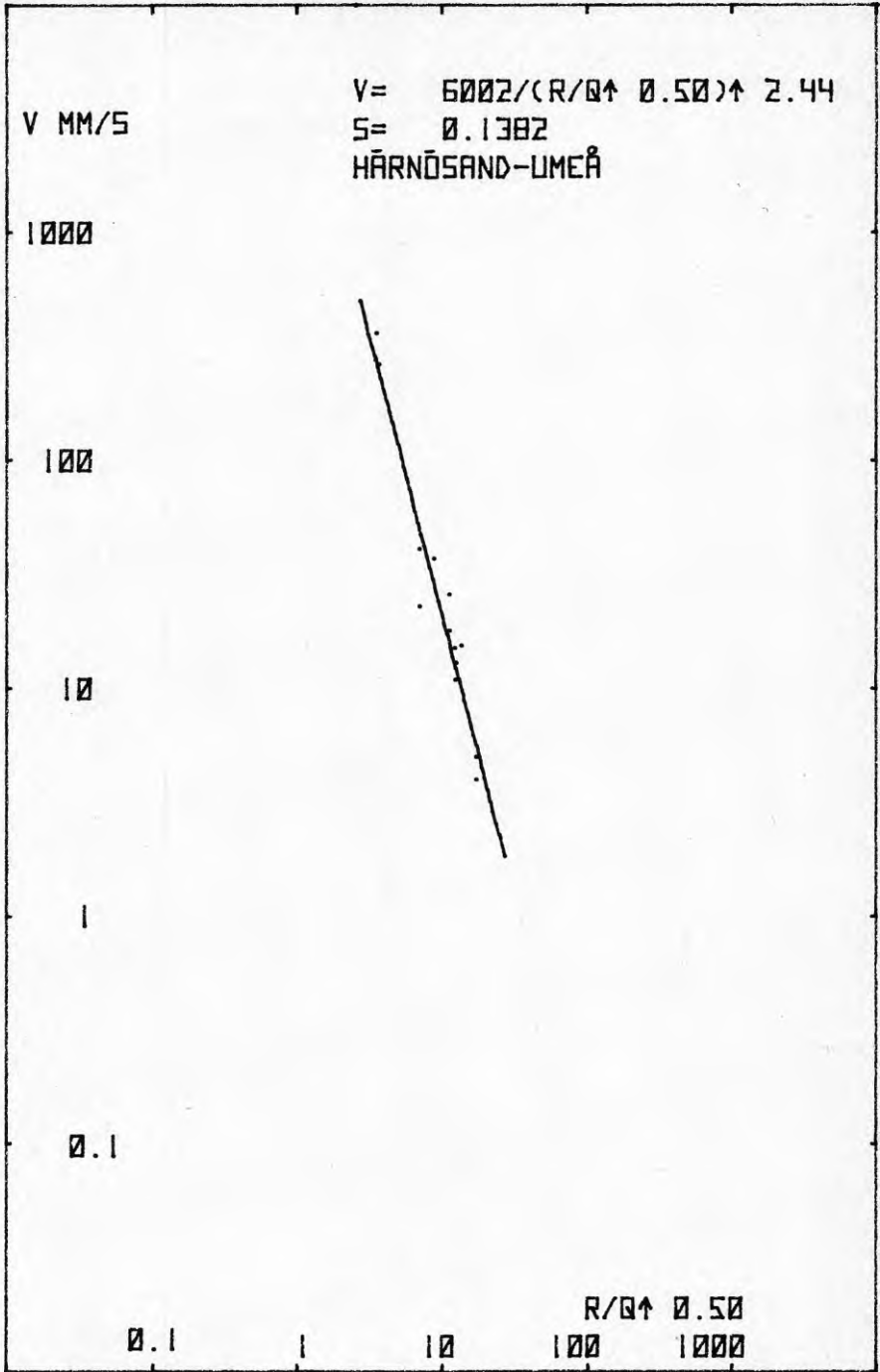


FIG. 35. Markvibrationer från samtliga mätpunkter.

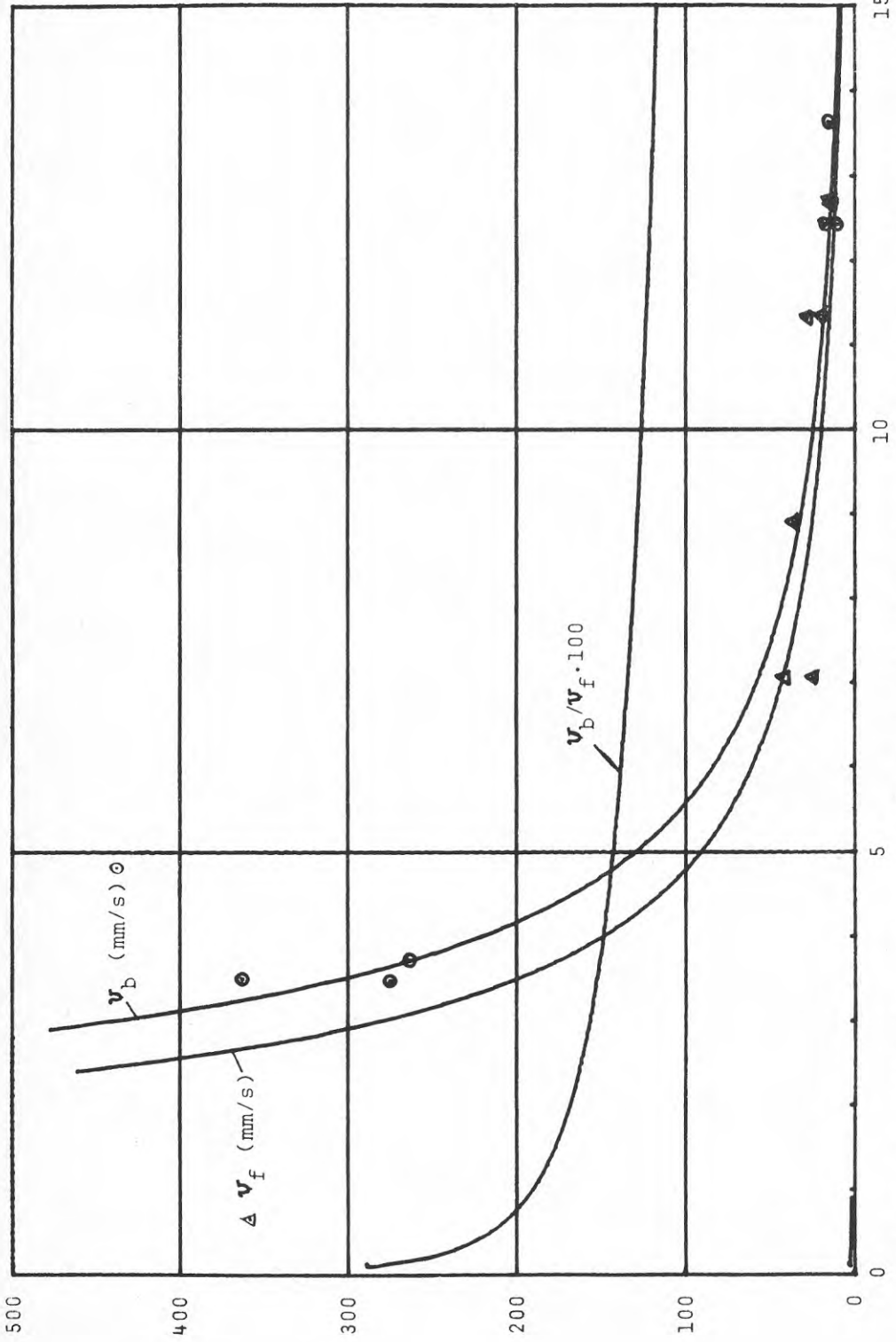


FIG. 36. Markvibrationer bakom (v_b) och framför (v_f) salvorna samt v_b/v_f som funktion av R/\sqrt{Q} .

8.3 Eolshäll

8.3.1 Beskrivning av arbetsplats och mätställen

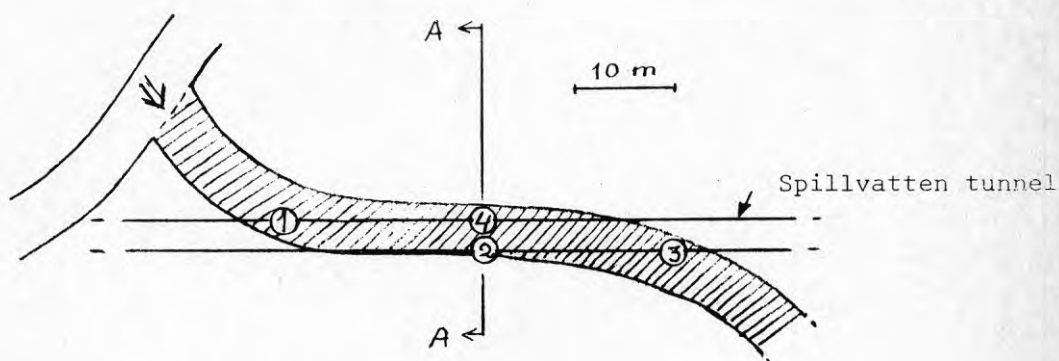


FIG. 37. Planskiss av arbetsplats.

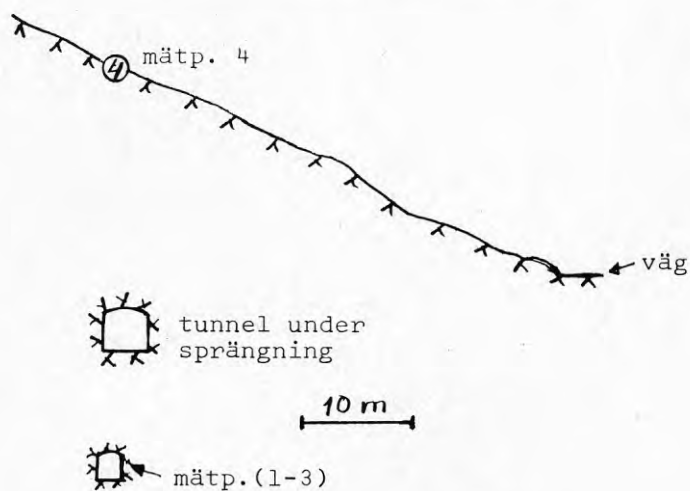


FIG. 38. Sektion A-A av arbetsplats.

Fig. 37 och 38 visar arbetsplatsen. Det pågående sprängningsarbetet (sektionerad tunnel) utfördes med början från vänster. Av de fyra mätpunkterna är tre placerade i de vertikala väggarna i spillvattentunneln och en i markytan ovanför.

Mätpunkternas exakta lägen är angivna i tabell 10.

TABELL 10. Mätpunkternas koordinater.

Mätplats, nr	Koordinater, m		
	x	y	z
1	195,0	34,0	2,8
2	193,0	55,0	2,8
3	192,0	74,0	2,9
4	193,0	56,0	40,4

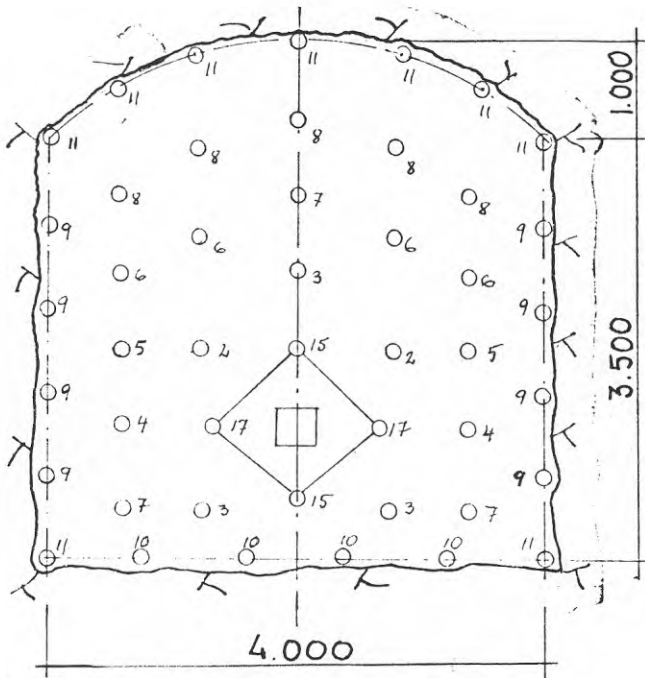


FIG. 39. Borrplan för tunneln.

Sprängningarna utfördes med borrplan enligt fig. 39. Indriften var 2,4 - 3,2 m. Grovhålskilen sprängdes med kortintervall och övriga salvan med halvsekunders intervall. Laddning per hål var 1 - 2 kg.

Vid sprängningarna användes följande sprängämnen:

Kilhål: Nabit
 Stross: DxB
 Botten: DxB
 Tak: DxB + Gurit
 Väggar: DxB + Gurit

8.3.2 Mätutrustning

Vibrationerna mättes med geofoner och registrerades med UV-skrivare. I varje punkt mättes tre komponenter av partikelhastigheten: vertikalt, longitudinellt (längs spillvattenstunneln) och transversellt (vinkelrätt spillvattentunneln).

De geofoner och galvanometrar som användes registrerar utan dämpning upp till 400 Hz och är vid 500 Hz nere i 70%. De uppmätta frekvenserna ligger alla under 400 Hz.

Fig. 40 visar en del av en registrering, där hela registreringen upptar en tid av ca 8 sekunder. För kontroll av frekvensen mättes vid ett tillfälle även med accelerometrar. De uppmätta frekvenserna överensstämmer väl med de av geofonerna registrerade. Registreringen med accelerometrarna finns lagrade på tape och kommer senare att digitaliseras och integreras för jämförelse med de av geofonerna uppmätta svängningshastigheterna.

8.3.3 Mätresultat

Vid varje sprängningstillfälle (~ 1 gång/dag) anges salvkoordinaten (läget av tunnelfrontens centrum före sprängning). UV-skrivaren startades på nedräkning från tändplatsen via telefonförbindelse. Pappershastigheten på UV-skrivaren kunde därvid hållas på högsta hastigheten 1250 mm/s. Några mätningar utfördes dock med lägre hastighet. Vibrationshastigheterna kunde i stort sett särskiljas och uppmätas för varje hål. Deras toppvärden har lagrats på tape och sedan behandlats på följande sätt:

För varje salva har tre tabeller utskrivits. En för vertikal, en för longitudinell och en för transversell svängningshastighet. I varje tabell är angivet:

- a. Salvans koordinater och datum.
- b. Varje toppvärde i de olika mätpunkterna i mm/s.
- c. Medelvärdet av vibrationerna (MV) i mm/s.

- d. Avståndet mellan salva och mätpunkt (R) i m.
- e. Standardavvikelsen i v (SV).
- f. Logaritmen för medelvärde (LOGMV).
- g. Medelvärdet för LOGV (MLOGV).
- h. Logaritmen för avståndet (LOGR).
- i. Standardavvikelsen för LOGV (SLOGV).

Tabellen i File 23 på sid. 56 visar ett exempel på beräkning av ovanstående storheter.

Vid inprickning av de uppmätta värdena framgår det att v är bättre normalfördelad än log v. Vi har därför valt att plotta LOGMV som funktion av LOGR. Det framgår dock av tabellen att LOGMV och MLOGV skiljer sig obetydligt från varandra.

Fig. 41 - 43 visar de plottade mätvärdena samt den linjära anpassningen enligt minsta kvadratmetoden. Av fig. 41 framgår tydligt att W_4 , som är vertikala svängningshastigheten i bergytan, är betydligt högre än värdena uppmätta i tunneln (2,7 - 4,6 gånger). Värdena överstiger alla +3s, som motsvarar övre konfidensgränsen 99,9%. Dessa värden är därför separat anpassade och är ej medtagna i anpassningen av de övriga värdena. För större avstånd torde linjerna bli parallella eller komma att sammanfalla. För de longitudinella och transversella mätvärdena finns inte någon så utpräglad avvikelse att någon åtskillnad har ansetts motiverad.

Nitro Consult har på uppdrag av VA-verket kontinuerligt uppmätt de vertikala vibrationernas storlek med vibracorder på olika platser i omgivningen. Deras tre mätpunkter i spillvattenstunneln var anbringade nära Stiftelsens mätpunkter.

Tabell 11 och fig. 44 visar de maximalt uppmätta vertikala vibrationshastigheterna i de tre mätpunkterna i spillvattenstunneln, uppmätta av Stiftelsen (S) respektive Nitro Consult AB (NC).

Av figuren framgår att värdena följs åt och att avvikelsen inte är större än den inbördes spridningen.

VIBRATIONSDATA EOLSHALL 1976

FILE 23

MAX. VERTIKAL SVANGNINGSHAST. (X,Y,Z=SALVKKOORD.)

I	X	Y	Z	DAT.
1	182.00	87.00	14.40	15.11
I	V1	V2	V3	V4
2	0.58	1.03	14.30	3.03
3	0.58	0.62	9.35	1.65
4	0.58	0.82	9.35	1.65
5	0.58	0.82	13.20	1.65
6	0.58	0.82	12.65	3.30
7	0.29	0.82	6.05	2.20
8	0.58	1.23	12.65	2.48
9	0.58	0.82	7.15	4.40
10	1.45	2.46	16.50	8.90
11	0.87	2.05	18.15	8.90
12	1.16	1.03	6.60	4.95
13	1.45	3.28	28.60	15.95
14	0.87	0.62	8.25	5.50
15	1.74	4.51	19.80	19.25
16	1.45	3.69	22.00	14.85
17	0.58	0.82	11.55	4.13
18	1.16	3.28	18.15	13.20
19	1.16	3.28	15.95	4.40
20	1.45	1.85	9.35	8.80
21	0.87	1.64	8.80	11.00
22	1.16	3.28	13.20	4.40
23	0.58	0.82	3.85	2.75
24	1.45	0.82	3.85	15.40
25	0.87	1.03	3.85	9.90
26	0.87	1.44	7.15	7.15
27	0.58	0.82	4.95	3.85
28	0.87	1.23	10.45	10.45
29	1.45	2.05	12.10	12.10
30	1.45	2.46	15.95	7.70
31	1.16	2.46	19.80	6.60
32	1.16	2.05	14.85	9.35
33	0.87	4.10	15.95	4.40
34	0.58	0.41	3.58	2.48
35	1.16	3.28	10.45	9.35
36	1.16	3.28	13.75	2.75
37	0.58	1.64	11.00	2.20
38	0.58	1.23	8.80	5.50
39	1.16	3.28	15.40	3.30
MV	0.95	1.87	12.03	6.83
R	55.79	35.77	28.03	41.93
SV	0.37	1.15	5.61	4.62
LOGMV	-0.02	0.27	1.08	0.83
MLOGV	-0.05	0.19	1.03	0.73
LOGR	1.75	1.55	1.30	1.62
SLOGV	0.18	0.28	0.23	0.31

TABELL 11. Vibrationernas maximala värden i varje salva mätta av Stiftelsen (S) respektive Nitro Consult AB (NC).

Datum	W ₁		W ₂		W ₃	
	NC	S	NC	S	NC	S
28.10	14	8,59	< 3	2,24	< 3	1,54
29.10	20	21,76	< 3	3,36	< 3	3,30
01.11	25	24,20	4	6,72	3	3,30
02.11	22	17,60	5	6,72	4	4,40
03.11	12	16,03	12	14,00	5	6,05
04.11	7	13,74	14	16,80	7	10,45
05.11	7	8,02	19	21,28	7	9,00
08.11	5	8,02	31	34,72	-	13,00
10.11	*	3,44	17	21,28	92	70,00
11.11	*	2,29	6	8,96	58	46,00
12.11	*	2,29	4	5,60	48	35,00
15.11	*	1,74	5	4,10	40	28,60

(* ej mätta)

8.3.4 Slutledning

Vid det utförda sprängningsarbetet har i stort samma borrhål och sprängplan använts. Laddningsvikten per hål har varierat obetydligt och legat mellan 1 och 2 kg. Det har därför inte varit möjligt att studera relationen vibration = f(laddningsvikt).

Genom att laddningen per borrhål varit i det närmaste konstant och då ett stort antal värden (30 - 40) erhållits för varje salva utgör medelvärdet av vibrationerna ett bra mått på förväntat värde vid sprängning av en laddning på 1,5 kg.

Fig. 45 visar plottning av samtliga värden med undantag av de vertikala i bergytan. Q har antagits vara konstant lika med 1,5 kg och exponenten för Q har antagits vara 0,5. Exponenten för Q har vid anpassning av andra vibrationsdata visat sig ligga i närheten av 0,5.

Vid planeringen av försöken avsåg vi att studera om någon skillnad i vibrationsvärdena framför resp

bakom tunnelfronten skulle föreligga. Någon sådan skillnad kunde emellertid ej iakttas.

På korta avstånd från salvan blir den vertikala vibrationshastigheten vid bergets överyta flera gånger större än någon av svängningshastigheterna i tunneln på samma avstånd under salvan.

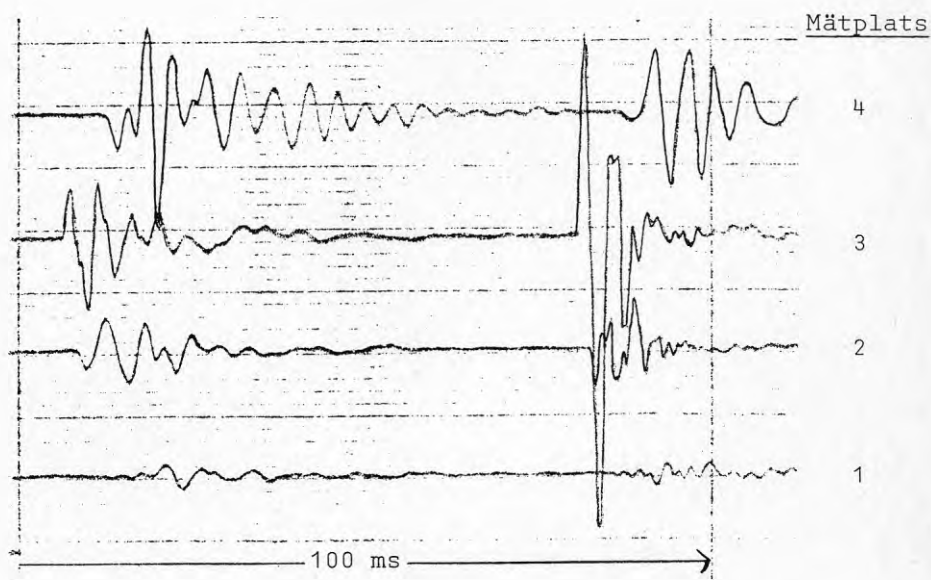


FIG. 40. Exempel på registrering av vibration.

VERTIKALT

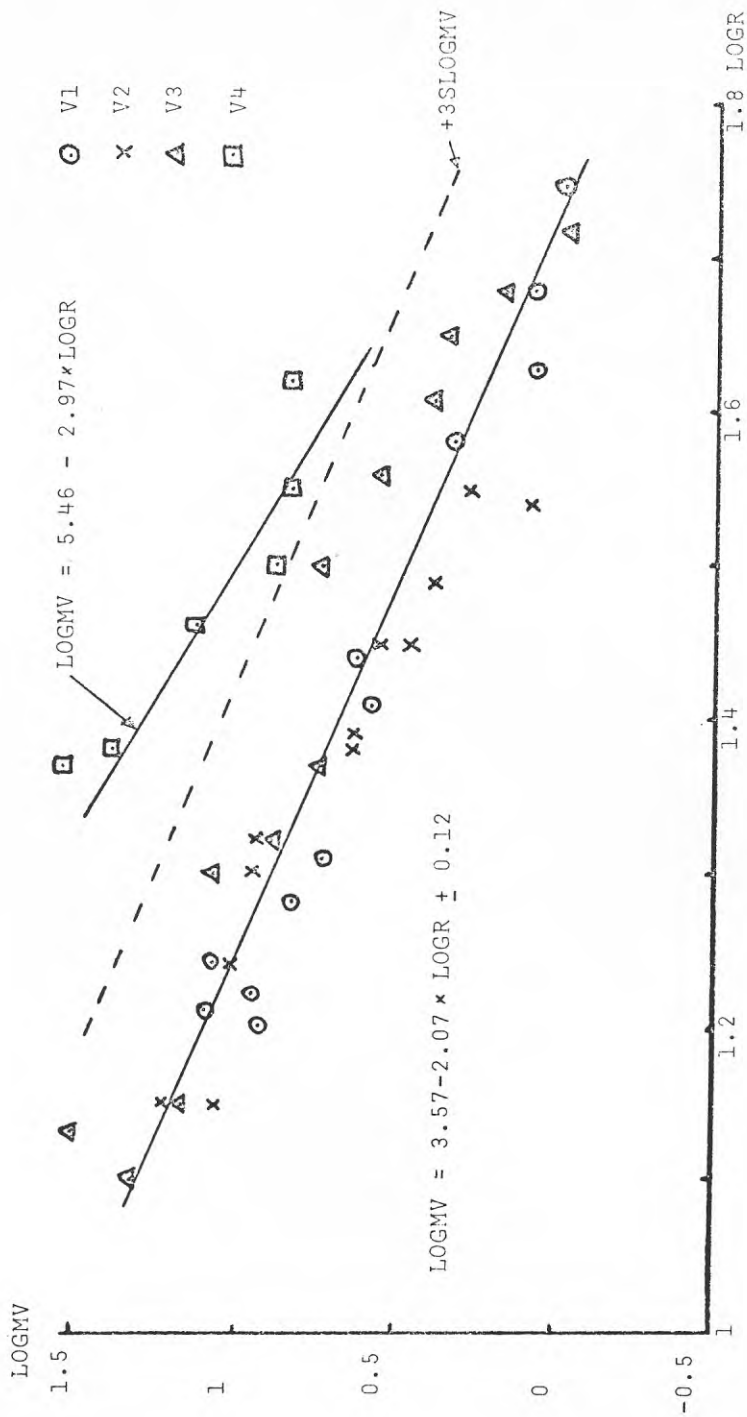


FIG. 41. Vertikal vibration som funktion av avståndet vid 1-2 kg laddning.

LONGITUDINELLT

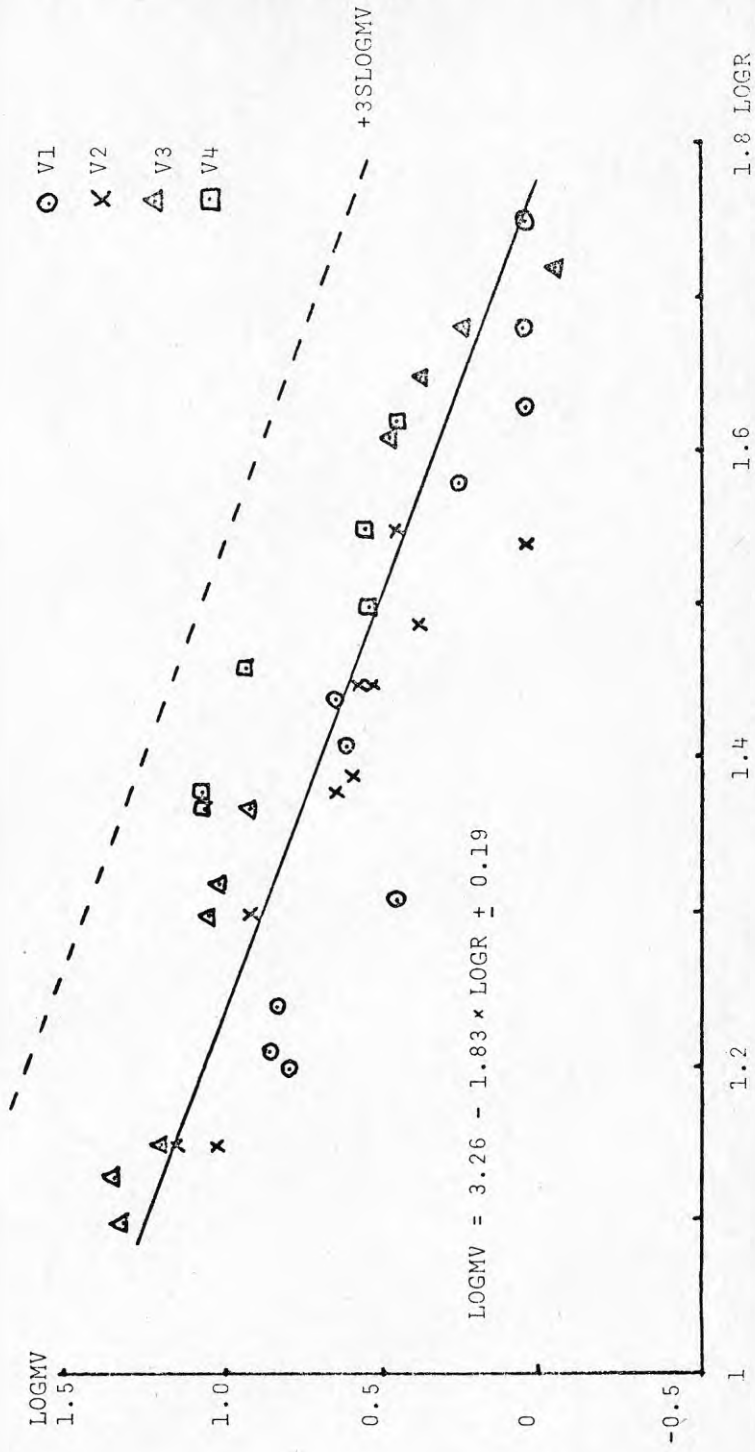


FIG. 42. Longitudinell vibration som funktion av avståndet vid 1-2 kg laddning.

TRANSVERSELLT

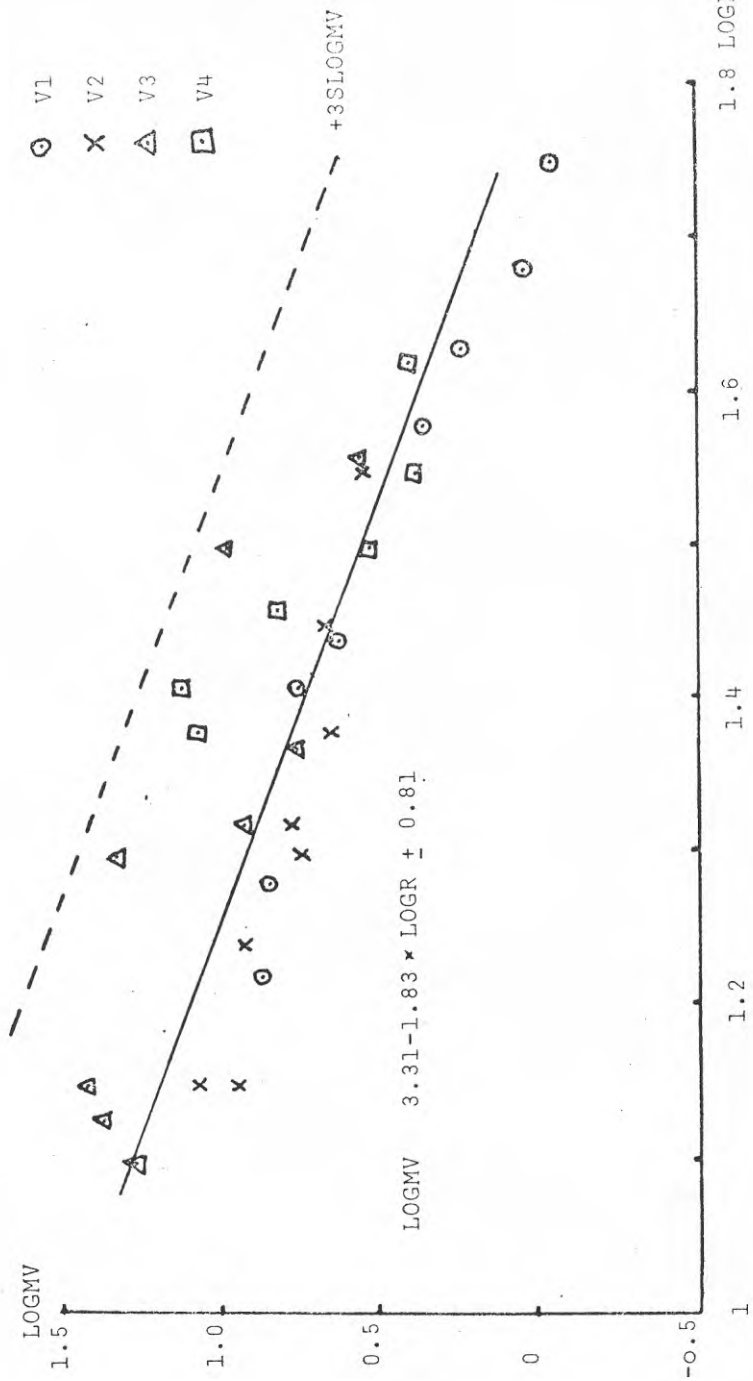


FIG. 43. Transversell vibration som funktion av avståndet vid 1-2 kg laddning.

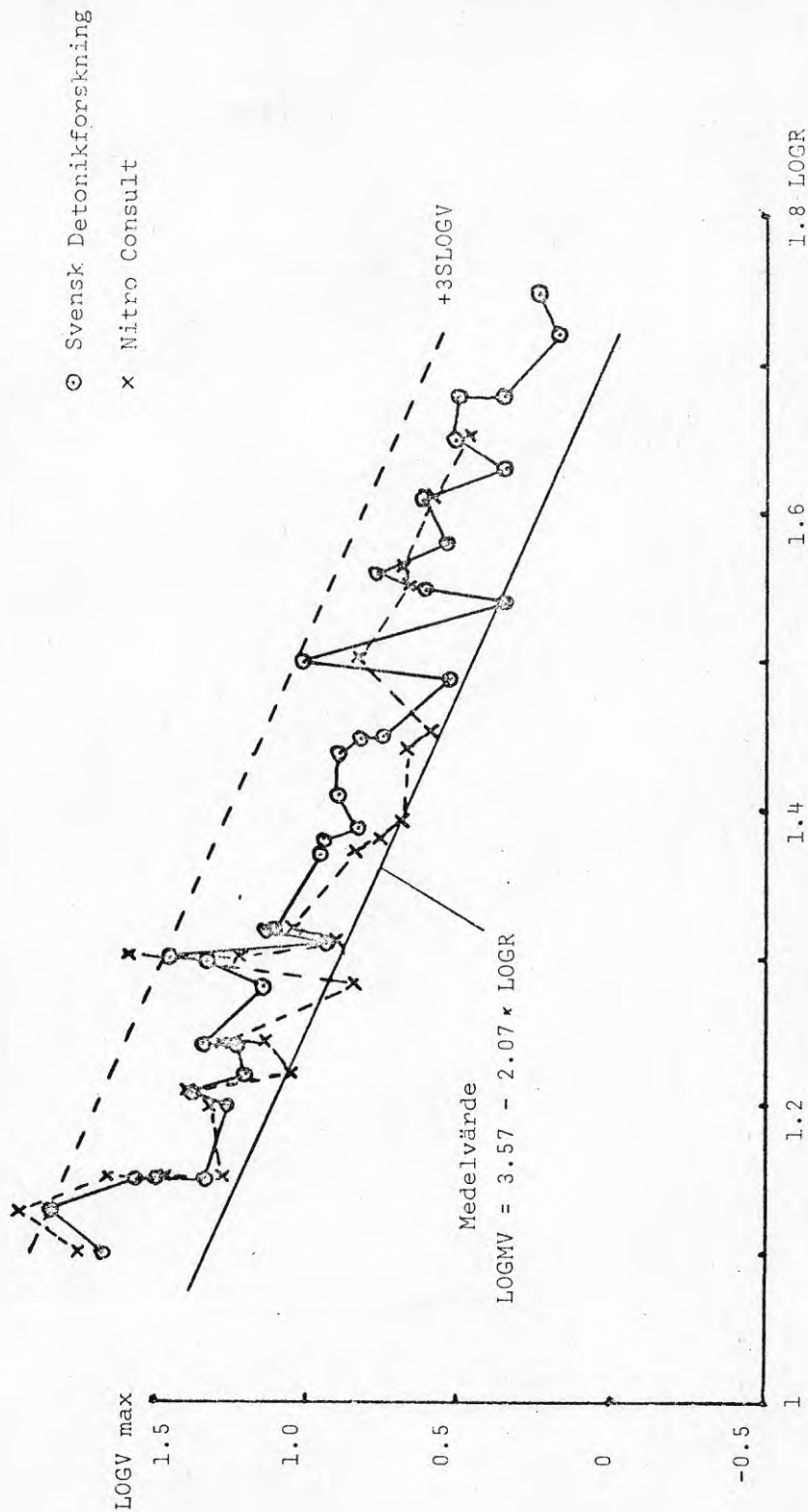


FIG. 44. Maximal vertikal vibration i varje salva uppmätt av Stiftelsen Svensk Detonikforskning respektive Nitro Consult.

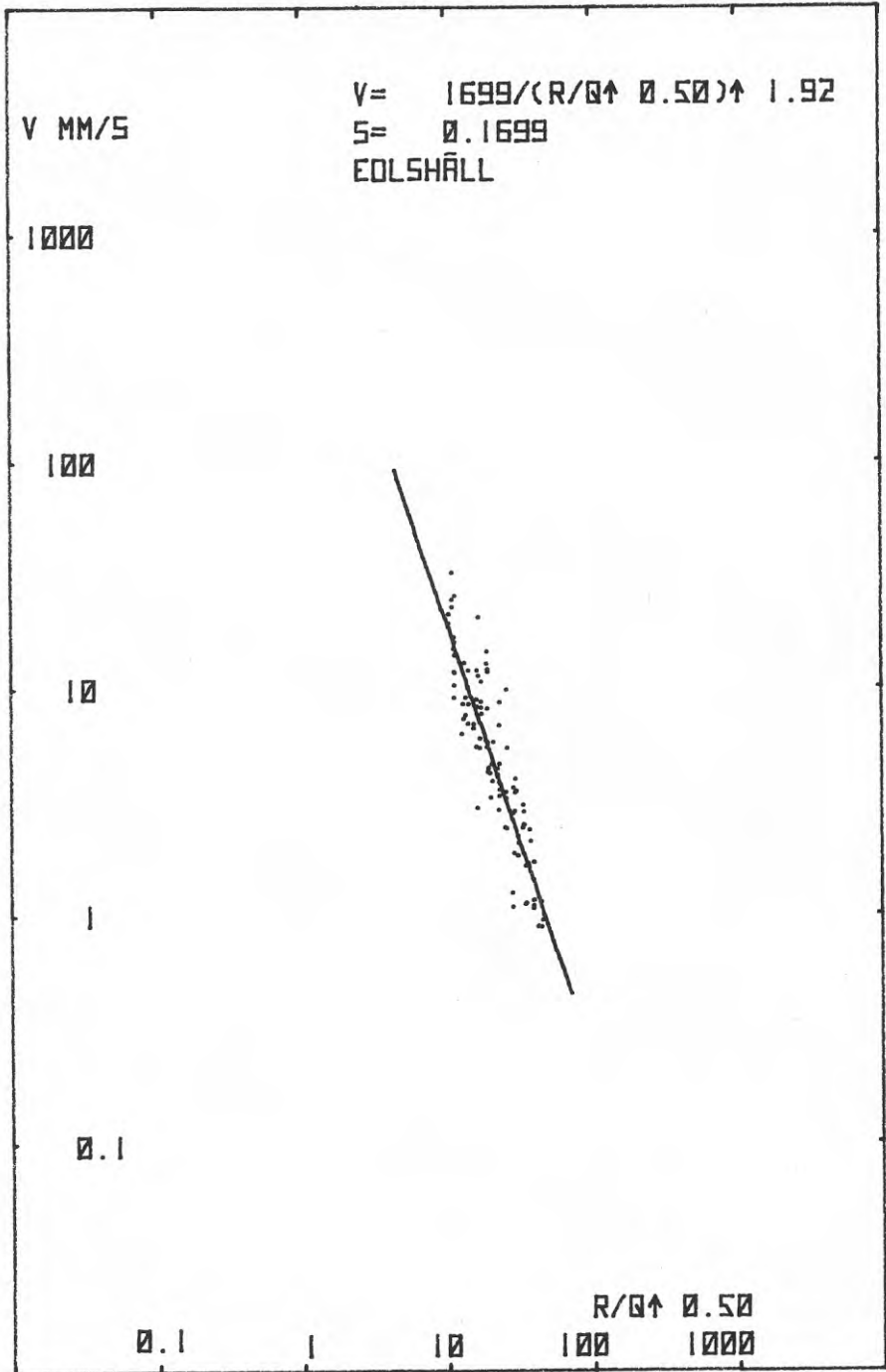


FIG. 45. Anpassning av samtliga vibrationsvärden i Eolshäll med undantag av de vertikala i bergytan, som skilde sig markant från de övriga.

9.1 Vibrationernas avstånds- och laddningsberoende

När en sprängsalva avfyras detonerar en viss laddningsmängd Q samtidigt. Q benämnes vanligen samverkande laddning. Sprängladdningen ger upphov till markvibrationer med en viss svängningshastighet v på ett visst avstånd R från salvan. Q räknas i kg, R i meter och v i mm/s. När som i detta fall en variabel, v , är beroende av två andra, R och Q , är det vanligt att vid anpassning av en kurva först hålla den ena, t ex Q , konstant och bestämma $v = f(R)$. När detta är utfört för ett antal olika Q -värden kan man sedan finna sambandet $v = f(R, Q)$. Vi kan emellertid, som senare skall visas, direkt bestämma $v = f(R, Q)$.

För att få en överblick av sambandet har vi plottat vibrationerna i ett tredimensionellt diagram (fig. 46). Log Q är här indelad i intervall där alla värden i intervallet plottats som medelvärdet av intervallet. På så sätt fås $v = f(R)$ för ett antal olika Q -värden. Av fig. 46 framgår att v varierar kraftigare med R än med Q . Vi kan också se att de plottade värdena ganska väl följer ett plan i rummet, enligt de heldragna linjerna.

Ett plan kan beskrivas med ekvationen

$$\log v = a + b \log Q + c \log R \quad (1)$$

Anpassning med hjälp av minsta kvadratmetoden medför att

$$s^2(N - 3) = \sum_{i=1}^N (\log v_i - a - b \log Q_i - c \log R_i)^2 = \min. \quad (2)$$

där s är standardavvikelsen och N antalet mätvärden.

Sätter vi

$$\begin{aligned} \sum \log R &= A, & \sum \log Q &= B, \\ \sum \log v &= C, & \sum (\log R)^2 &= D, \\ \sum (\log Q)^2 &= E, & \sum (\log v)^2 &= I, \\ \sum (\log v \log Q) &= G, & \sum (\log R \log Q) &= H, \\ \sum (\log R \log v) &= F \end{aligned} \quad (3)$$

kan (2) skrivas

$$s^2(N - 3) = I + Na^2 + Eb^2 + Dc^2 - 2Ca - 2Gb - 2Fc + 2Bab + 2Aac + 2Hbc \quad (4)$$

Derivering av (4) med avseende på a, b och c där dessa uttryck sättes lika med noll ger

$$\begin{aligned} Na + Bb + Ac &= C \\ Ba + Eb + Hc &= G \\ Aa + Hb + Dc &= F \end{aligned} \quad (5)$$

Lösning av (5) ger värden på a, b och c. Standardavvikelsen s fås sedan ur (4), varvid (1) ger

$$\log v = a + b \log Q + c \log R \pm s \quad (6)$$

Från Bureau of Mines rapport /16/ har 1363 värden på vertikal svängningshastighet inmatats på datatape.

Beräkning av konstanterna i (3) samt lösning av (5) har utförts med dator. Därvid kan bästa anpassning erhållas som ger

$$\begin{aligned} \log v &= 2,86 + 0,66 \log Q - 1,54 \log R \quad (7) \\ \text{med } s &= 0,2892. \end{aligned}$$

Vid grafisk presentation kan R/Q^n räknas som en oberoende variabel. Ekvation (6) kan då skrivas

$$\begin{aligned} \log v &= 2,86 - 1,54 \log \frac{R}{Q^{0,43}} \quad (8) \\ \text{med } s &= 0,29, \end{aligned}$$

där $n = -b/c$.

Fig. 47 visar de uppmätta värdena samt den anpassade linjen enligt (8).

9.2 Förbättrad anpassning av vibrationsdata

I föregående avsnitt har ett plan (fig. 46) anpassats till de uppmätta värdena. Detta betyder att avstånds- respektive laddningsberoendena är oberoende av varandra. Av fig. 46 framgår att detta stämmer ganska väl.

Vi kan dock förbättra anpassningen ytterligare genom att tillåta planet att skevas enligt de streckade linjerna i fig. 46. Ekvationen blir därvid

$$\log v = a + b \log Q + c \log R + d \log Q \log R. \quad (9)$$

Enligt (2) - (5) fås därvid

$$\begin{aligned} s^2(N - 4) &= \Sigma (\log v - a - b \log Q - \\ & c \log R - d \log Q \log R)^2 = \\ & I + Na^2 + Eb^2 + Dc^2 + Ld^2 - 2Ca - \\ & 2Gb - 2Fc - 2Md + 2Bab + 2Aac + \\ & 2Had + 2Hbc + 2Jbd + 2Kcd \end{aligned} \quad (10)$$

där förutom enligt ekvation 3

$$\begin{aligned} \Sigma (\log^2 Q \log R) &= J, \\ \Sigma (\log^2 R \log Q) &= K, \\ \Sigma (\log Q \log R)^2 &= L, \\ \Sigma (\log Q \log R \log V) &= M. \end{aligned} \quad (11)$$

Ekvation 5 får därvid formen

$$\begin{aligned} Na + Bb + Ac + Hd &= C \\ Ba + Eb + Hc + Jd &= G \\ Aa + Hb + Dc + Kd &= F \\ Ha + Jb + Kc + Ld &= M. \end{aligned} \quad (12)$$

Bästa anpassning blir

$$\begin{aligned} \log v &= 4,08 + 0,14 \log Q - 2,06 \log R + \\ & 0,22 \log Q \log R \\ & \text{med } s = 0,2867. \end{aligned} \quad (13)$$

Av standardavvikelsen framgår att (13) är något bättre än (7). Den lilla avvikelser i s kan dock betyda att anpassningen är betydligt bättre i planets hörn.

En tvådimensionell plottning blir här mera invecklad.

Vi får

$$\log v = 4,08 - 2,06 \log(R/Q^{0,068+0,107 \log R}) \quad (14)$$

Fig. 48 visar detta samband. Vid jämförelse med fig. 47 ser man att spridningen är märkbart mindre i fig. 48.

9.3 Mätvärdenas spridning

Standardavvikelsen i (7) och (13) gäller för normalfördelade mätvärden. Det är därför av intresse att undersöka om $\log v$ är normalfördelad. I fig. 49 har procentuella andelen mätvärden under olika spridningsnivåer avsatts.

Figuren visar att $\log v$ är i det närmaste normalfördelad. För höga värden (över 95%) ligger kurvan något under normalfördelningen, vilket ger en extra säkerhet vid dessa nivåer.

9.4 Beräkning av övre konfidensgränser

Enligt (7) eller (13) kan vi nu skriva

$$\log v = \overline{\log v} + \alpha \quad (15)$$

där $\overline{\log v}$ är medelvärdet och α anger antalet standardavvikelser. Om vi försummar felen i de beräknade konstanterna a , b , c och d , som ofta är små, innebär konfidensgränserna en parallellförflyttning vertikalt av planet i fig. 46. α i (15) kan approximeras med formeln

$$\alpha = \sqrt{-1,6 \ln [1 - (\frac{P}{50} - 1)^2]} \quad (16)$$

Ekvation (7) ger därvid

$$\log v = 2,86 + 0,66 \log Q - 1,54 \log R + 0,29 \sqrt{-1,6 \ln [1 - (1 - \frac{P}{50})^2]} \quad (17)$$

eller

$$v = K \left(\frac{R}{Q^{0,43}} \right)^{1,54} \quad (18)$$

där

$$K = 10^{2,86 + 0,29\alpha} \quad (19)$$

För olika övre konfidensgränser erhålles värden på K enligt tabell 12.

TABELL 12. K-värden i ekvation 18 för olika övre konfidensgränser.

P%	K
50	730
90	1 700
99	3 300
99,9	5 275
99,99	7 690

Linjer för olika konfidensgränser är angivna i fig. 50.

9.5 Kriterier vid olika sprängvolym

Ekvation 18 anger övre konfidensgränsen för olika sannolikhet (K-värden). En fråga som ofta ställs är hur upprepade sprängningar påverkar skadekriteriet. Låt oss här anta att n st värden tillåts överskrida den fastställda gränsen. Övre konfidensgränsen blir då

$$P = \left(1 - \frac{n}{N}\right) \cdot 100\% \quad (20)$$

där N är antalet sprängningar (samverkande laddningar). n/N måste därvid vara mindre än säg 0,5.

Om t ex $n = 10$ får vi

$$N = 10 / (1 - P/100) \quad (21)$$

För små n/N ger (16)

$$\alpha = \sqrt{1,6 \ln \frac{N}{4n}} \quad (22)$$

Fig. 51 visar lägsta reducerade avstånd ($R/Q^{0,43}$) som funktion av antalet exponeringar då 10 värden tillåts överskrida den fastställda vibrationsgränsen. Antalet exponeringar måste därvid överskrida säg 20, ty för litet N , t ex $N < 10$, skulle annars samtliga vibrationsvärden godtyckligt kunna överskrida gränsen. Ett alternativ är här att sätta $R/Q^{0,43}$ konstant för N -värden under en viss gräns N_0 (t ex 20), där värdet bestäms av värdet för $N = N_0$.

I fig. 50 anges de övre konfidensgränserna för W

som funktion av $R/Q^{0,43}$.

9.6 Diagram för avläsning av v, Q, R och P
respektive N.

Från (13), som är vår bästa anpassning av Bureau of Mines värden, har vi plottat relationen mellan v, Q, R och P eller N i ett diagram (fig. 52 och 53), som är samma relation ritad i två olika versioner. Det är här möjligt att välja tre oberoende variabler och avläsa den fjärde. Två exempel illustrerar detta. Följ de streckade linjerna!

Ex. 1. $R = 300$, $Q = 100$ och $P = 99$ ger $v = 10$.

Ex. 2. $v = 10$, $N = 1000$ och $R = 300$ ger $Q = 100$.

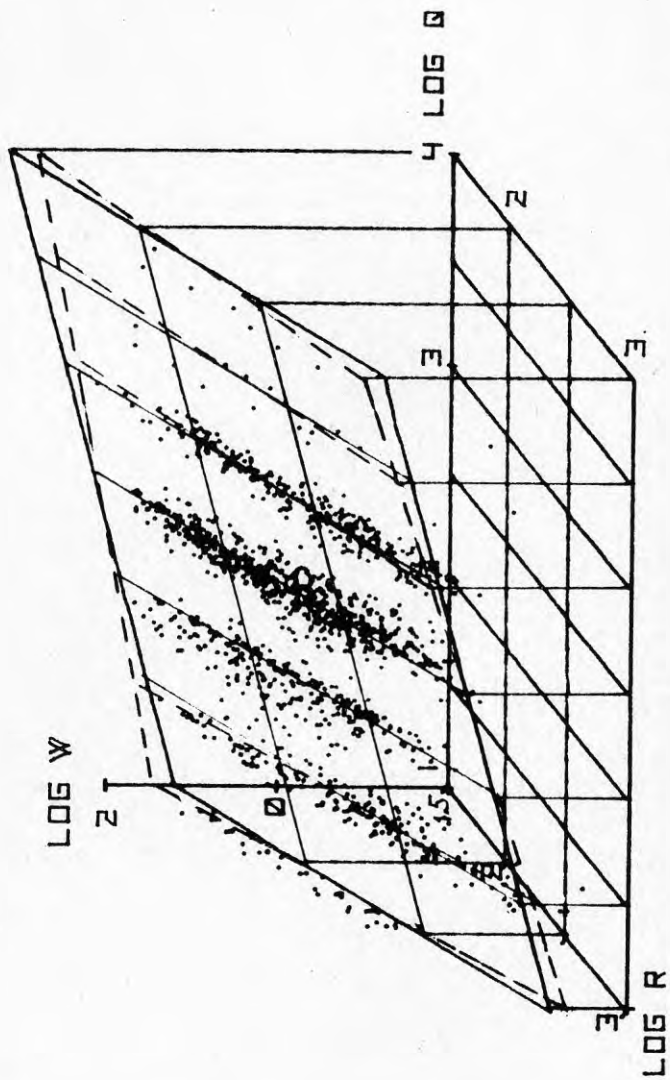


FIG. 46. Rymdmodell av vibrationshastigheten som funktion av laddning och avstånd.

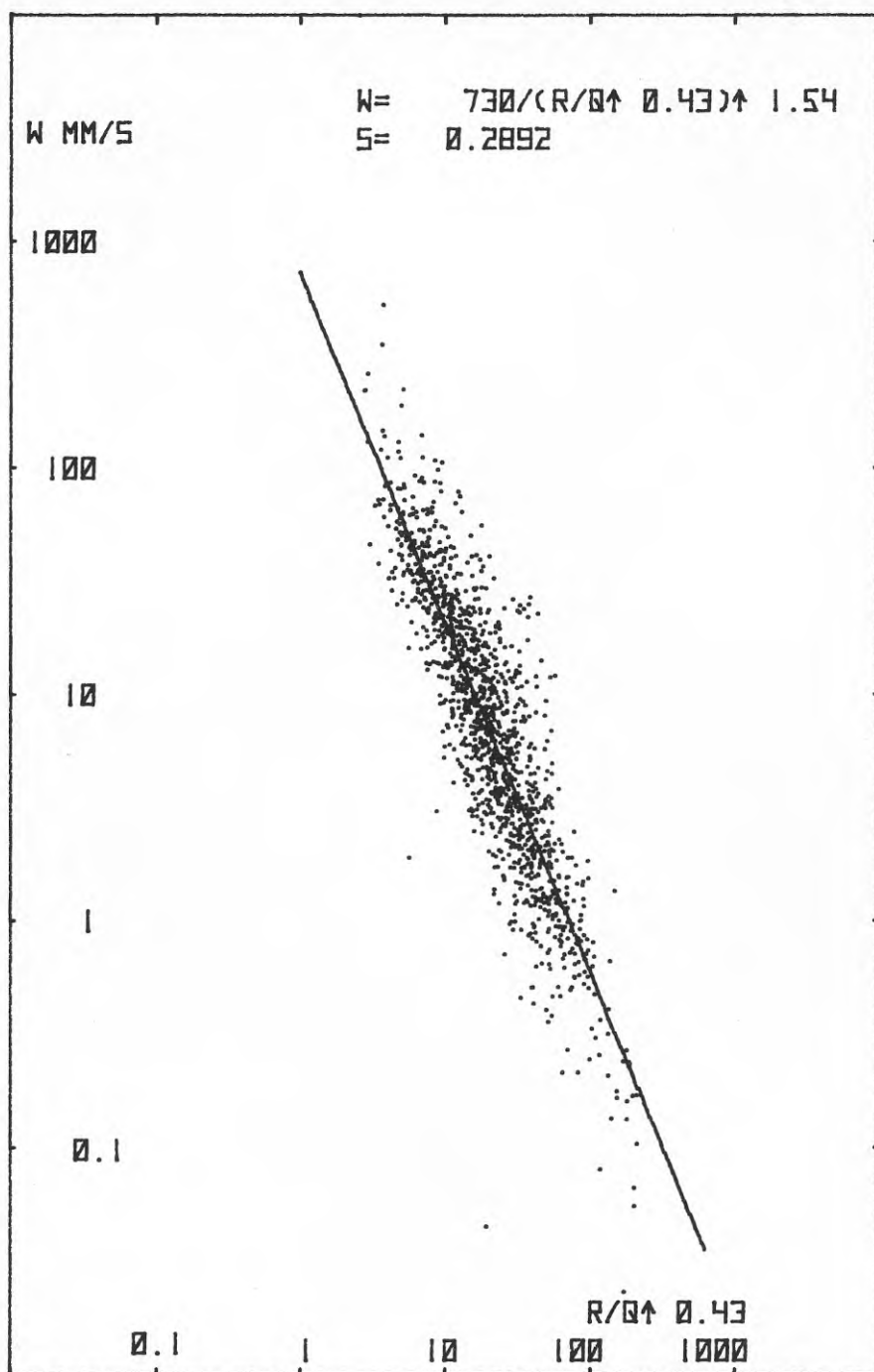


FIG. 47. Vertikal svängningshastighet som funktion av $R/Q^{0,43}$.



FIG. 48. Vertikal svängningshastighet som funktion av $R/Q^{(0,068 + 0,107 \cdot \log R)}$.

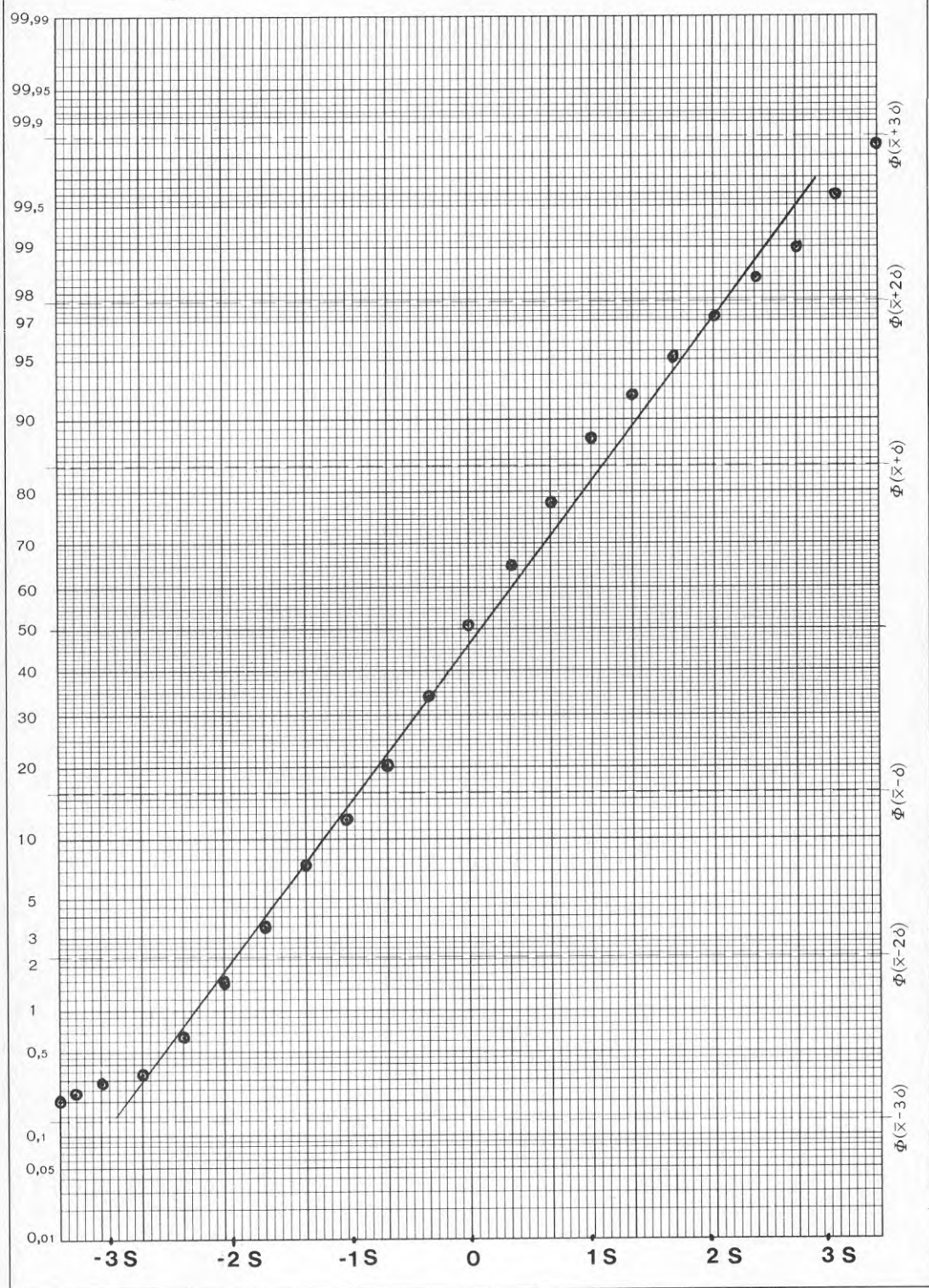


FIG. 49. Plottning av vibrationsvärdena i ett normalfördelningsdiagram.

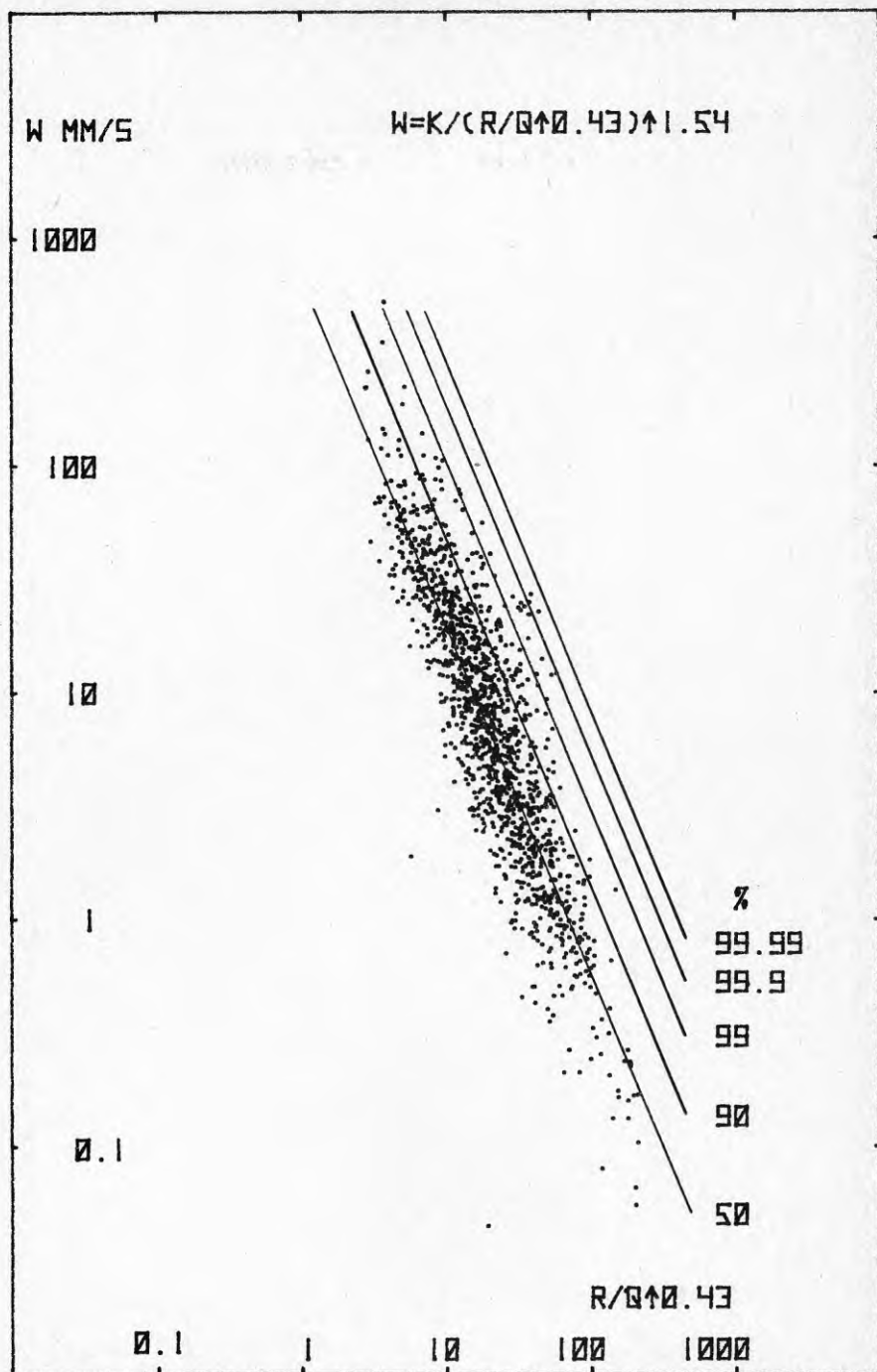


FIG. 50. Vertikal svängningshastighet som funktion av $R/Q^{0,43}$ vid olika konfidensintervall.

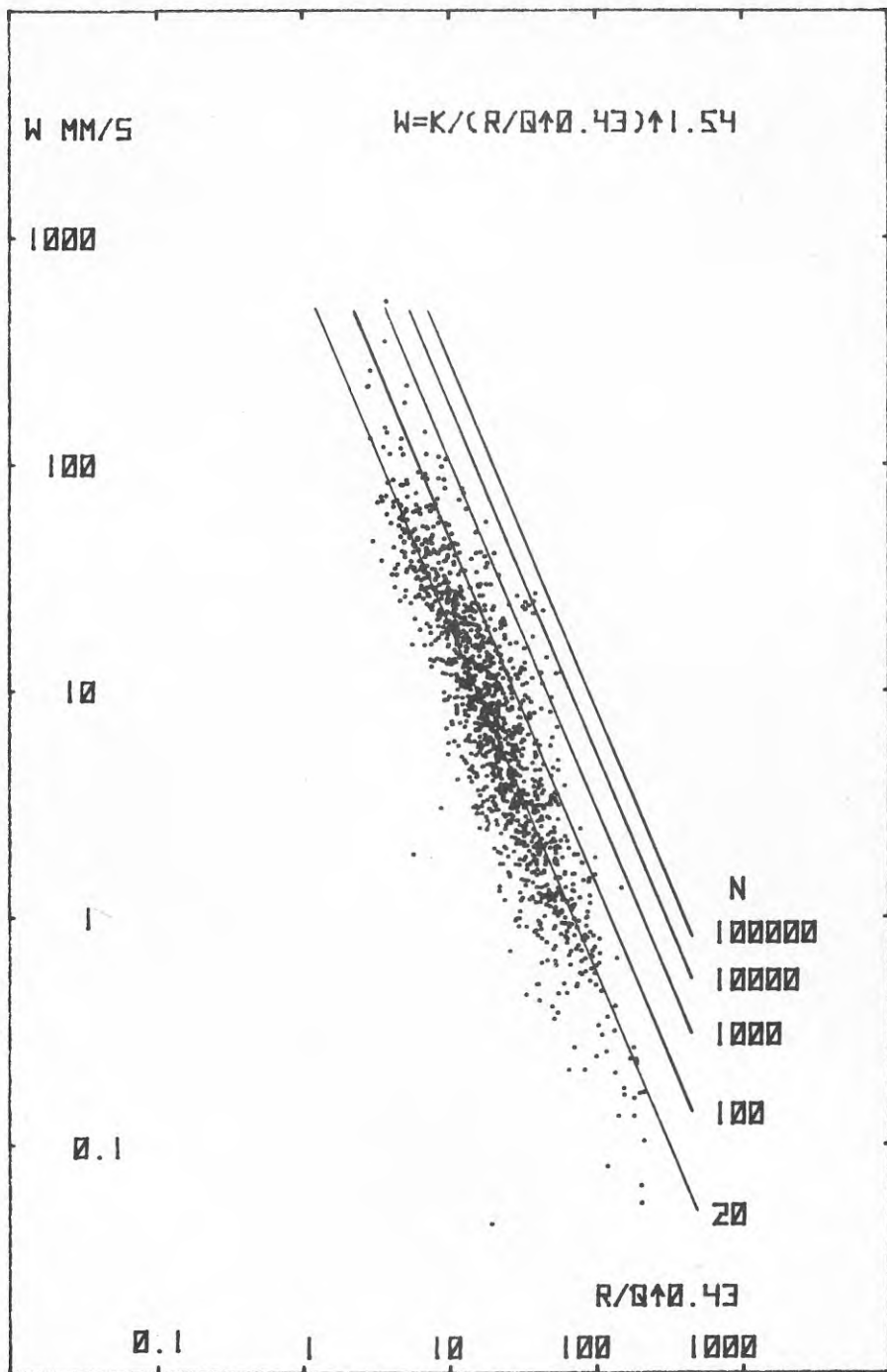


FIG. 51. Vertikal svängningshastighet som funktion av $R/Q^{0.43}$ vid olika antal exponeringar.

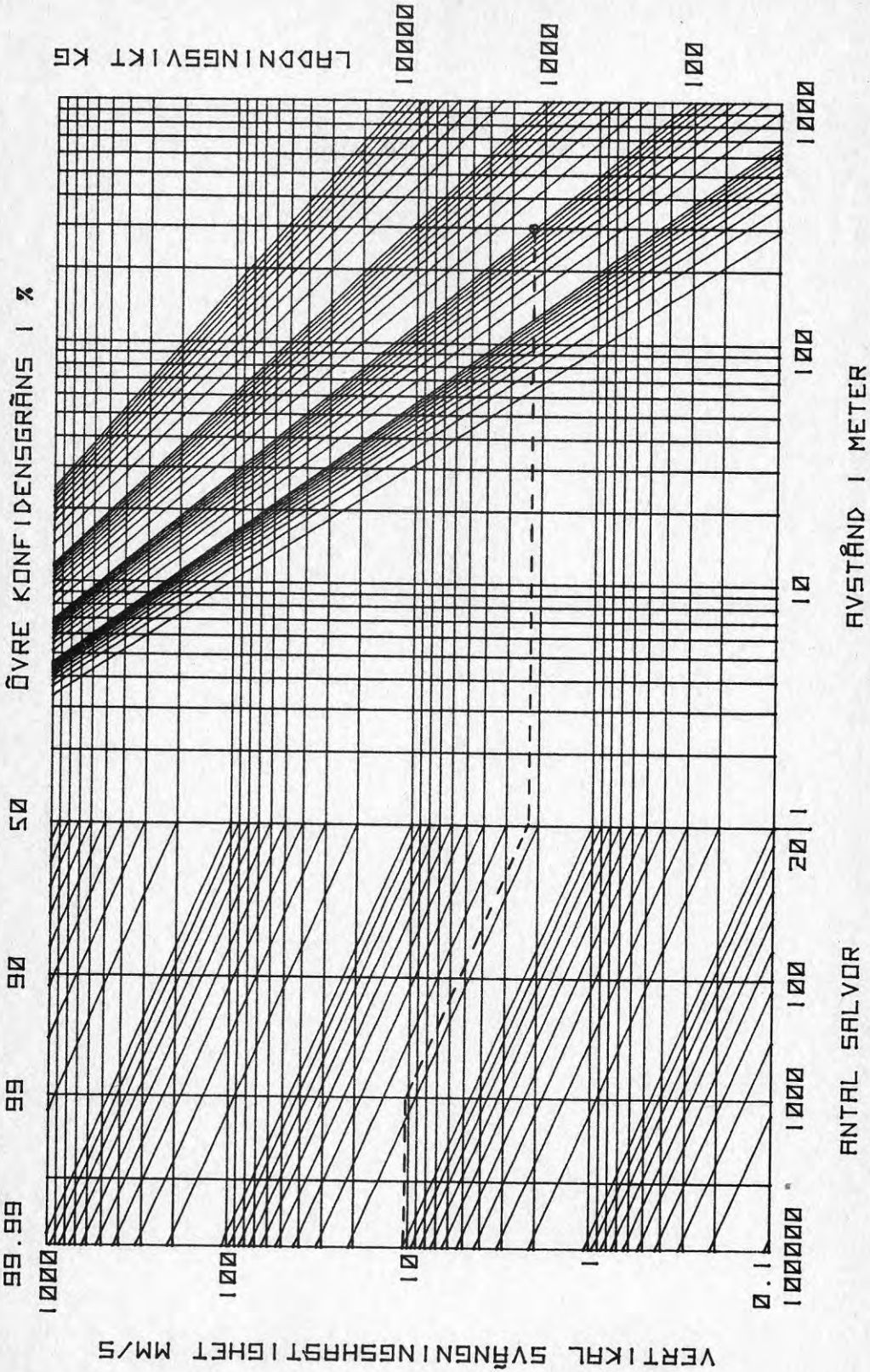


FIG. 52. Diagram för avläsning av relationen mellan R, Q, W, P och N.

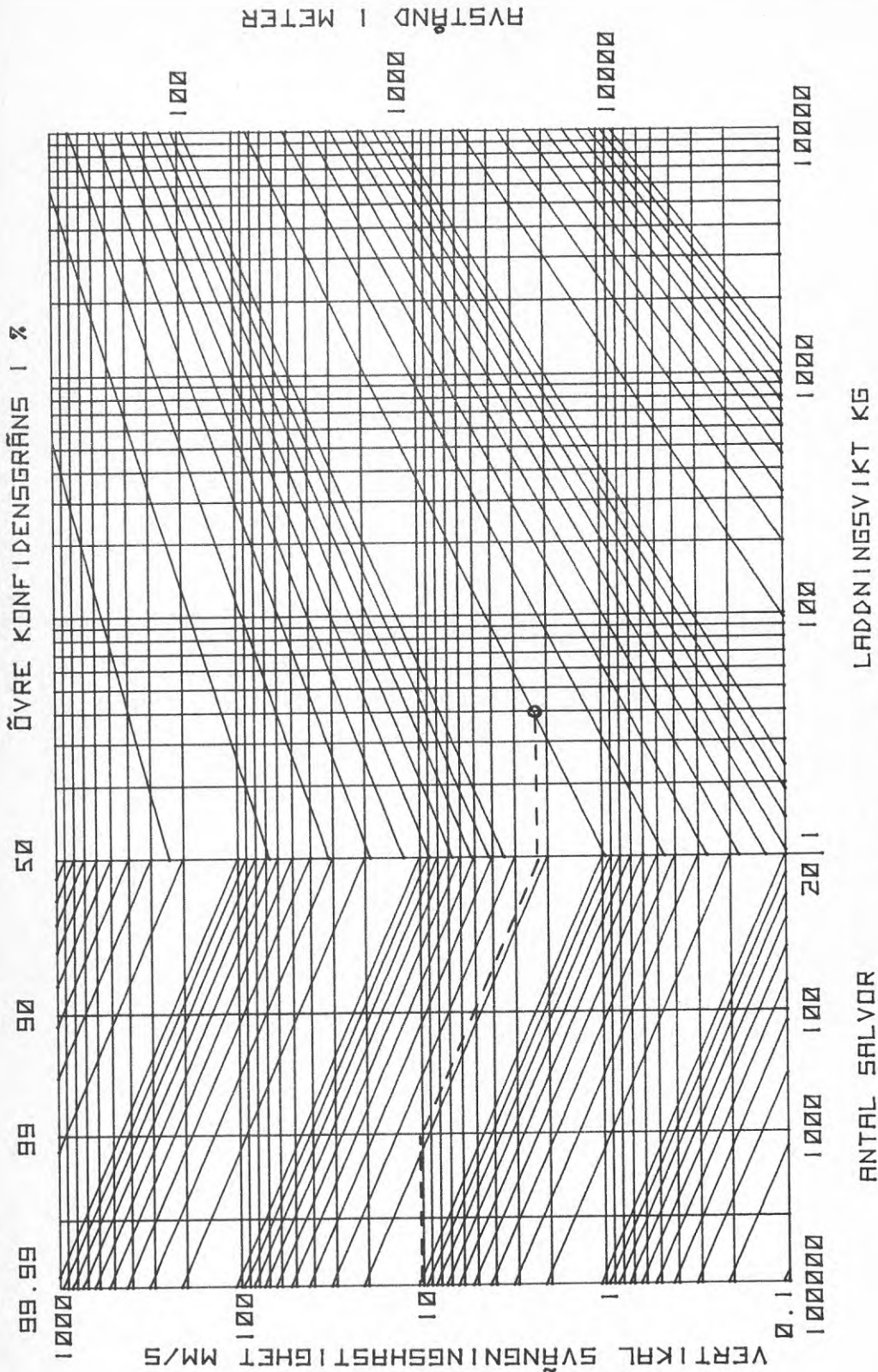


FIG. 53. Diagram för avläsning av relationen mellan R, Q, W, P och N.

10 JÄMFÖRELSE MELLAN OLIKA SAMBAND

Såväl egna försök som mätningar av andra författare har givit olika samband

$$v = f(Q,R) \quad (23)$$

För Bureau of Mines 1363 värden /16/ har vi erhållit

$$\log v = 4,08 + 0,14 \log Q - 2,06 \log R + 0,22 \log Q \log R \pm 0,2867 \quad (24)$$

$$\log v = 2,86 + 0,66 \log Q - 1,54 \log R \pm 0,2892 \quad (25)$$

och $\log v = 2,51 + 0,73 \log Q - 1,45 \log R \pm 0,2927. \quad (26)$

I Brännland erhöles för 113 mätvärden

$$\log v = 3,31 + 0,57 \log Q - 1,83 \log R + 0,086 \log Q \log R \pm 0,2618 \quad (27)$$

$$\log v = 3,23 + 0,71 \log Q - 1,78 \log R \pm 0,2630 \quad (28)$$

och $\log v = 2,89 + 0,80 \log Q - 1,60 \log R \pm 0,2700. \quad (29)$

I (24) - (26) resp (27) - (29) står, som synes av standardavvikelsen, en noggrannare anpassning över en mindre noggrann. (26) och (29) har anpassats med R/\sqrt{Q} som oberoende variabel (se (32) och (33)).

I Umeå-Härnösand erhöles

$$v = 6000 / \left(\frac{R}{\sqrt{Q}} \right)^{2,21} \quad (30)$$

och i Eolshäll

$$v = 1700 / \left(\frac{R}{\sqrt{Q}} \right)^{1,92} \quad (31)$$

I (30) och (31) har Q varierat så litet att exponenten för Q inte kunde bestämmas utan sattes till 0,5. Användes samma exponent för Bureau of Mines värden fås enligt (26)

$$v = 323 / \left(\frac{R}{\sqrt{Q}} \right)^{1,45} \quad (32)$$

och enligt (29) för värdena i Brännland

$$v = 783 / \left(\frac{R}{\sqrt{Q}} \right)^{1,60} \quad (33)$$

En jämförelse av (30) - (33) är lätt att göra medan en jämförelse mellan t ex (24), (25) eller (26) inte är direkt möjlig utan att man vet vilka värden på Q och R som använts. Det är därför fördelaktigt om man kunde enas om en standardexponent för Q. I olika litteratur förekommer emellertid olika värden såsom 1/3, 1/2 och 2/3. För att få en uppfattning om vilken exponent som är bäst har vi anpassat Bureau of Mines värden med olika exponenter α varvid standardavvikelsen s avsatts som funktion av α i figur 54. Bästa anpassning är som synes för $\alpha = 0,43$.

Mätningar i Sverige och Italien visar i stort samma tendens med bästa anpassning för $0,4 < \alpha < 0,5$. R/\sqrt{Q} synes därför vara ett bra värde för de i litteraturen förekommande uttrycken på reducerade avståndet som en oberoende variabel. Ur dimensionsanalytisk synvinkel vid cylindrisk utbredning har detta också ett visst stöd.

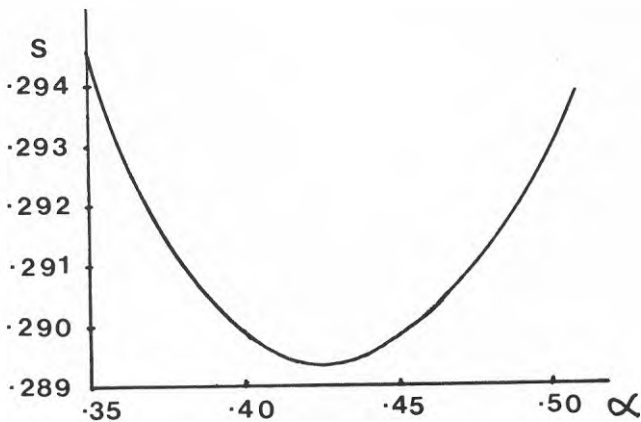


FIG. 54. Standardavvikelsen som funktion av laddningens exponent α .

Det är något förvånande att spridningen i Brännlandsvärdena (27) - (29) är av samma storleksordning som för Bureau of Mines värden (24) - (26). Försöken i Brännland har ju utförts på samma plats och under noggranna försöksbetingelser med skjutning i ett hål, medan Bureau of Mines värden härrör från ett stort antal olika platser och med flera samverkande laddningar i olika hål.

TABELL 13. En sammanställning av mätresultaten från olika platser med reducerade avståndet R/\sqrt{Q} som oberoende variabel.

Plats	v, mm/s	R, m	Q, kg
Bureau of Mines	$325/\left(\frac{R}{\sqrt{Q}}\right)^{1,45}$	30-300	10-8000
Eolshäll	$1700/\left(\frac{R}{\sqrt{Q}}\right)^{1,92}$	10-50	1-2
Umeå-Härnösand	$6000/\left(\frac{R}{\sqrt{Q}}\right)^{2,21}$	50-250	200
Brännland	$780/\left(\frac{R}{\sqrt{Q}}\right)^{1,60}$	20-150	0,5-25
Maryland	$2210/\left(\frac{R}{\sqrt{Q}}\right)^{1,13}$	0,004-0,15	0,0002

Fig. 55 visar de olika sambanden, där de grova linjerna anger sambanden inom det uppmätta området. I figuren är också bästa samband för Bureau of Mines-värdena enligt ekvation 24 inritat för olika värden på Q från 1 till 1000 kg. Vi ser här att övriga mätvärden istort ligger inom dessa yttre gränsvärden på Q.

För ett konstant R/\sqrt{Q} ökar i regel l med Q, där l är laddningens utsträckning. Hela laddningslängden i ett hål kommer då inte att samverka, vilket kan tyda på att större laddningar skulle ge lägre vibration för samma R/\sqrt{Q} . Aitikvärdena (850 kg) /20/ tyder på detta. Umeå-Härnösands-värdena har givit högre värden för mindre laddning (200 kg) och Eolshälls små laddningar (1 - 2 kg) har givit ännu högre värden i ytan. Brännlands-försöken (0,5 - 25 kg) har dock givit låga värden.

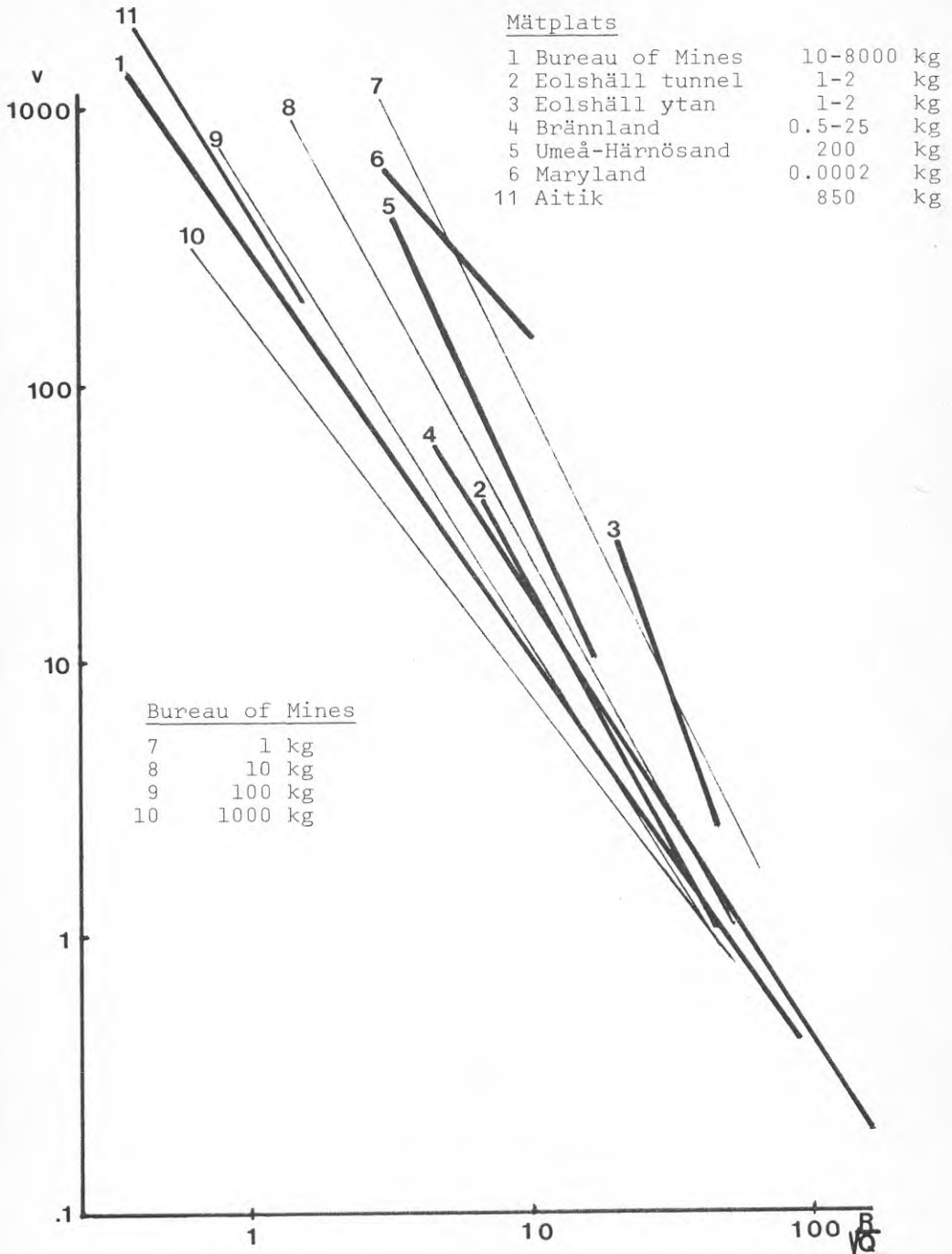


FIG. 55. Olika samband mellan svängingshastigheten v mm/s och reducerad radie R/\sqrt{Q} . Bureau of Mines värden för 1, 10, 100 och 1000 kg är inritade enligt ekv. 24.

Modellförsöken i Maryland med sina extremt små laddningar ligger också högt. Man kan inte vänta sig att vibrationsvärden från dessa extremt små laddningar och avstånd skall passa in i bilden, men det är ändå förvånande att dessa värden ligger så pass bra i figuren.

11 SLUTLEDNING

- a. Modelförsöken i Maryland visar betydelsen av laddningsdjupet. På nära håll där

$$R/h < 1/\sqrt{C_P/C_R} - 1$$

reflekteras S-vågen som både S- och P-våg, varvid ingen R-våg uppkommer. I detta område $R/h < 1$ dominerar P-vågen. För $1 < R/h < 2,5$ är P- och R-vågen av samma storleksordning och för $R/h > 2,5$ är R-vågen dominerande. I mellanområdet avtar vibrationsamplituden med det horisontella avståndet som $1/R$. S-vågen är försumbar på alla avstånd.

- b. På stora avstånd där R/h är stort avtar Rayleigh-vågens amplitud i ett elastiskt material teoretiskt som $1/\sqrt{R}$. Vid de uppmätta vibrationerna från sprängningar i berg avtar svängningshastigheten betydligt snabbare, som $1/R^{1,5} - 1/R^{2,2}$
- Detta beror sannolikt på dämpning genom energiförluster i bergmaterialet.
- c. Mätningarna i Eolshäll visar att vibrationerna i en fri överyta är större än nere i berget, på nära håll upp till 5 gånger större.
- d. Vibrationerna framför resp bakom en salvfront (tunnel eller päll) har däremot visat sig vara av samma storleksordning.
- e. Försök med dämpning genom spalter visar att detta kan vara en lämplig metod där vibrationerna kan reduceras ned till storleksordningen 10%.

Analysen av en mängd vibrationsdata har resulterat i en mera åskådlig bild av sambandet mellan svängningshastighet, avstånd och laddningsvikt i form av ett tredimensionellt diagram (rymdmodell) se figur 56.

Bästa anpassning till uppmätta vibrationsvärden i fullskala utgör ett skjuvat plan enligt fig. 56. Detta samband kan även avläsas i fig. 57, som också ger oss möjlighet att avläsa sambandets beroende av olika konfidensgränser, resp antal beräknade salvor. Detta har fördelen att ange v som funktion av Q och R var för sig. Sambandet blir dock komplicerat och då spridningen ändå är stor kan det vara fördelaktigt att använda det enklare sambandet

$$v = K/\left(\frac{R}{\sqrt{Q}}\right)^\beta \quad (34)$$

Fig. 55 visar anpassning till detta samband från olika försöksplatser. där linjerna motsvarar 50%-värdet.

Sambanden skiljer sig som synes avsevärt från varandra, vilket kan bero på olika egenskaper hos berggrunden på de olika platserna. Kurvorna (2) och (3) tyder dock på att placeringen av mätpunkterna har betydelse eftersom mätning i en fri överyta har gett upp till 5 gånger högre värden än mätningarna i en tunnel på samma avstånd. Spridningen i mätvärdena är stor även på samma plats och med väl definierade laddningar i ett hål. Förklaringen till den stora spridningen kan dels sökas i lokala oregelbundenheter som sprickor och slag i berggrunden, dels i laddningslängdens inverkan.

Vi ser t ex i fig. 55 att bästa anpassningen av Bureau of Mines värden för laddningsvikten 1 - 1000 kg väl täcker det område inom vilket de övriga sambanden ligger.

Fig. 58 visar den förenklade anpassningen enligt (34) av Bureau of Mines värden med inlagda konfidensgränser i % och beräknat antal salvor (N) som skall sprängas på respektive plats. Diagrammet ger oss en möjlighet att bestämma R/\sqrt{Q} på en plats där man beräknar skjuta N antal salvor för ett bestämt skadekriterium v . ($n = 10$, sid. 68, får dock endast anses som ett exempel.)

De parallella linjerna representerar olika K -värden. Vilket K -värde som skall användas får därvid avgöras från plats till plats beroende på det samband som gäller för platsen, sprängningarnas omfattning, sprängämnestyp samt skadekriteriet för kringliggande anläggningar.

Relationerna i fig. 57 och 58 (ekv. 24 och 26 eller 32) ger oss en uppfattning om vad man kan vänta sig för vertikal vibrationshastighet även på andra platser än vid Bureau of Mines försöksplatser. För en noggrannare bestämning av sambandet måste man dock utföra mätningar på varje ny plats, och då spridningen ändå är stor kan det bli nödvändigt att kontinuerligt mäta vibrationerna i känsliga anläggningar under hela sprängningsarbetets gång.

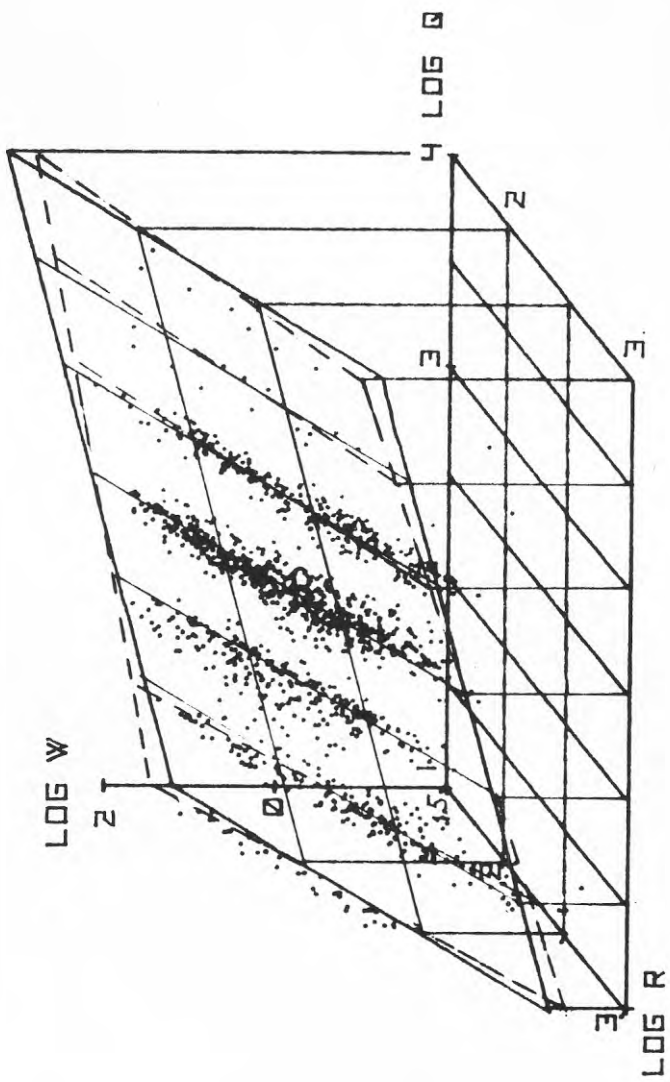


FIG. 56. Rymdmodell av vibrationshastighet som funktion av laddningsvikt och avstånd.

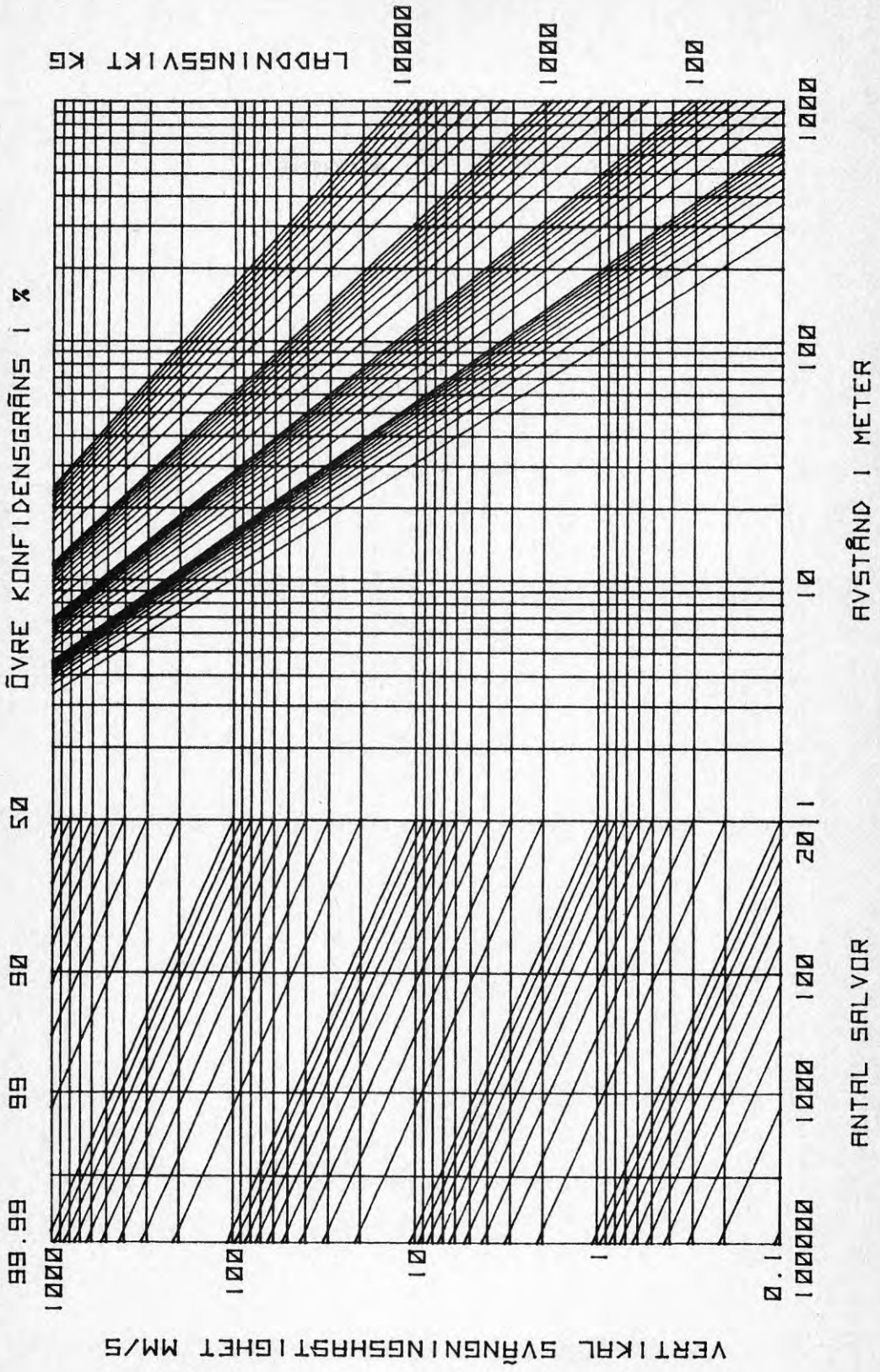


FIG. 57. Diagram för avläsning av relationen mellan R, Q, W, P och N.

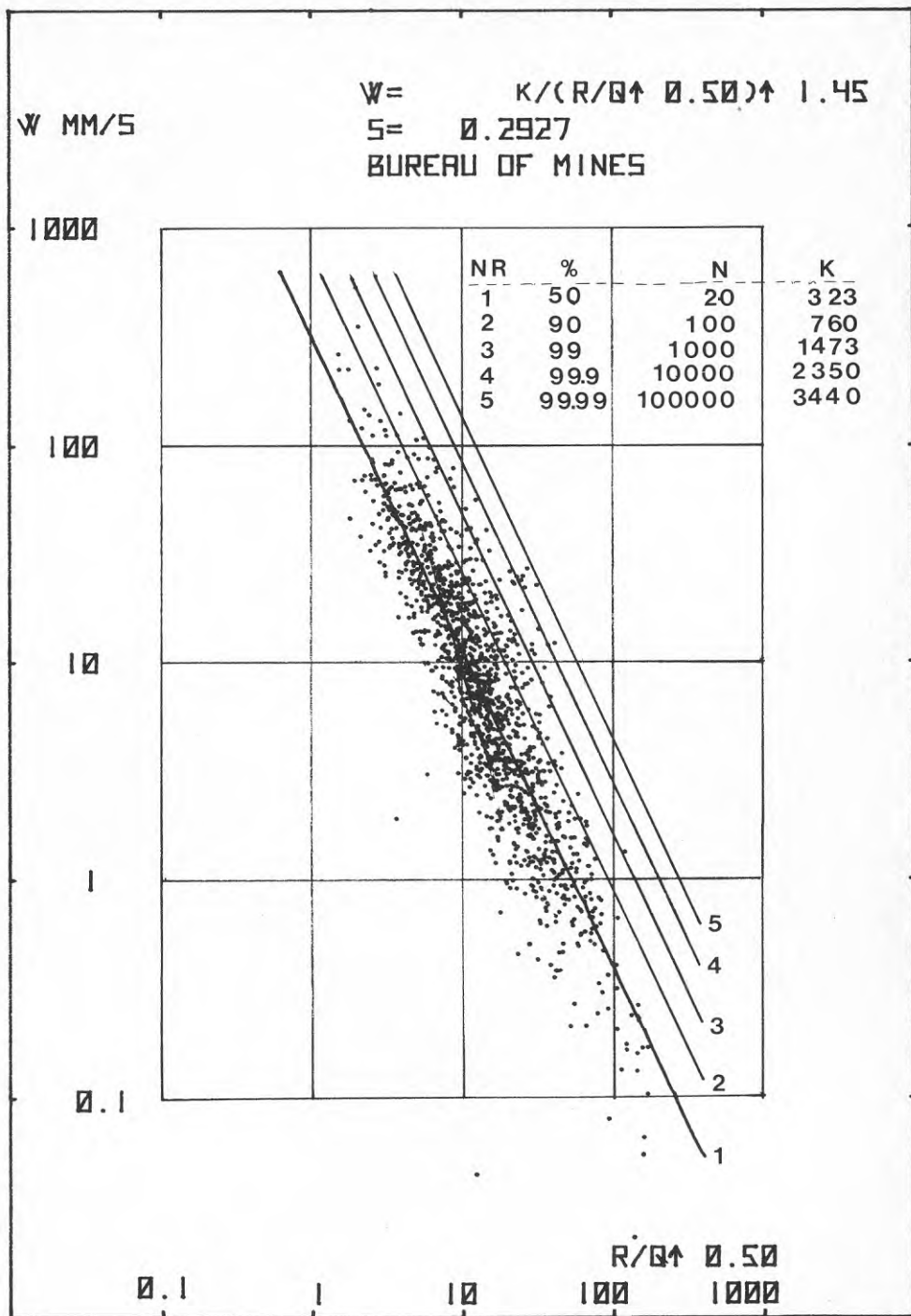


FIG. 58. W som funktion av $R/Q^{0.5}$ för Bureau of Mines värden vid olika konfidensintervall respektive antal salvor.

12 REFERENSER

1. Achenbach, J D, 1975, Wave Propagation in Elastic Solids. (North-Holland/Am Elsevier).
2. Bollinger, B A, 1971, Blast Vibration Analysis. (S. Illinois Un. Press, Feffer & Simons, Inc.) London, Amsterdam.
3. Dally, J W & Thau, S A, 1967, Observations of Stress Wave Propagation in a Half-Plane with Boundary Loading. Int. J. Solids Struct. 3.
4. Dally & Lewis, 1968, A Photoelastic Analysis of Propagation of Rayleigh Waves Past a Step Change in Elevation. Bul. Seism. Soc. of Am. 58.
5. Dally, Application of Photoelasticity to Elastodynamics. Särtryck, ref. saknas.
6. Goodier, J N, Jahsman, W E & Ripperger, E A, 1959, An Experimental Surface-Wave Method for Recording Force-Time Curves in Elastic Impacts. J. Appl. Mech. March.
7. Graff, K G, 1975, Wave Motion in Elastic Solids. Oxford Engineering Science Series.
8. Holloway, D C & Patacca, A M, 1975, Application of Holography to a Study of Wave Propagation in Rock. Report, Mech. Eng. Dept. in Maryland.
9. Holloway, D C & Fournay, W L, 1977, An Investigation of Ground Motions from Blasting Through the Use of Holographic Interferometry. 18th US Symposium in Keystone, Colorado.
10. Holmberg, R, 1977, Sammanställning av ett antal markvibrationsmätningar. (SveDeFo) Rapport DS 1977:9.
11. Hultgren, S, 1977, Underground Explosions. (FortF) Rapport nr 117:8, dnr 5848F.
12. Lamb, H, 1904, On the Propagation of Tremours over the Surface of an Elastic Solid. (Phil. Trans. R. Soc.) A203.
13. Lundborg, N, 1977, Mätning av markvibrationer i Eolshäll. (SveDeFo) Rapport DS 1977:1.

14. Lundborg, N, 1977, Relation between Vibration, Distance and Charge Weight in Rock Blasting. (SveDeFo) Rapport DS 1977:3.
15. Lundborg N & Holmberg, R, 1977, Jämförelse mellan markvibrationer framför och bakom en pallsalva. (SveDeFo) Rapport DS 1977:14.
16. Nichols, H R, Johnson, C F & Duvall, W I, 1971, Blasting Vibrations and Their Effects on Structures. (Bureau of Mines) Bulletin 656.
17. Pekeris, C L, 1955, The Seismic Surface Pulse. Geophysics 41.
18. Pekeris, C L, 1956, The Seismic Buried Pulse. Geophysics Proc. Nat. Acad. Sci.
19. Pekeris, C L & Lifson, H, 1957, Motion of the Surface of a Uniform Elastic Half-Space Produced by a Buried Pulse. J. Acoust. Soc. Am. 29.
20. Persson, P A, Holmberg, R & Persson, G, 1977, Skonsam sprängning av slänter i dagbrott. BeFo Bergmekanikdag 1977. (SveDeFo) rapport 1977:4.
21. Reinhardt, H W & Dally, J W, okt 1970, Some Characteristics of Rayleigh Wave Interaction with Surface Flaws. Materials Evaluation.
22. Thau, S A & Dally J W, 1969, Subsurface Characteristics of the Rayleigh Wave. Int. J. Engng. Sci. 7.
23. Woods, R D, 1968, Screening of Surface Waves in Soils. J. Soil Mech. and Fond. Div. (Am. Soc. Civil Eng.) Proc., juli 1968.

**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 760223-2 från
Statens råd för byggnadsforskning till Stiftelsen Svensk
Detonikforskning, Stockholm**

R11: 1978

ISBN 91-540-2807-8

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

**Art.nr: 6600711
Abonnemangsbrupp:
V. Anläggningsteknik**

**Distribution:
Svensk Byggtjänst, Box 1403
111 84 Stockholm**

Cirka pris: 29 kr exkl moms