

MÄTNING AV LUFTSTÖTVÅGENS MAXIMALTRYCK
FRÅN NÅGRA OLIKA SPRÄNGÄMNE.

Leif Jerberyd och Algot Persson

DS 1972:17

21.11.1972

Sammanfattning:

Luftstötstågens trycktidförlopp vid detonation av TNT, PETN, hexogen, sprängdeg, Gurit och Dynamex har registrerats med en piezokeramisk givare som mäter det statiska trycket. Resultaten visar att den använda givaren är användbar för registrering av tryck som ligger under dess kalibrerade område. En jämförelse av maximaltrycken vid olika reducerat laddningsavstånd visar att PETN, sprängdeg och hexogen på små avstånd ger ett högre tryck än TNT medan de på större avstånd ger samma tryck. Dynamex och Gurit ger på stora avstånd ett maximitryck som är cirka 3/4 av det tryck som erhålles från samma mängd TNT.

Undersökningen avsåg att prova en nyanskaffad piezokeramisk givare för registrering av luftstöt vågors trycktidförlopp, samt att jämföra luftstöt vågens maximala tryck vid detonation av några olika sprängämnen.

Då en sprängladdning detonerar i luft bildas en stöt våg som utbreder sig mer eller mindre sfäriskt beroende på laddningens form. Denna stöt våg är en kompressionsvåg och dess amplitud beror av den energi som frigöres vid detonationen och den hastighet med vilken energin frigöres. Då en kompressionsvåg passerar sker en entropi- och täthetsökning och därmed en tryckökning. På grund av stötfrontens ringa tjocklek kan man anta att trycket ökar momentant. Denna tryckökning benämnes fronttryck och utgör det maximala statiska trycket vilket brukar betecknas P_+ (se fig. 1). På grund av sfärisk utbredning och förluster till omgivningen kommer trycket att avta med avståndet från laddningen. I och med att laddningen har detonerat genereras en expansionsvåg med åtföljande undertryck. Denna följer kompressionsvågen och ger upphov till en undertrycksdel (se fig. 1). När även expansionsvågen passerat återställer sig det atmosfäriska trycket efter en viss tid. Den tid som övertryck råder kallas den positiva varaktigheten och betecknas t_+ . Tiden för undertrycksfasen kallas negativa varaktigheten, t_- . Integralen av trycktidförloppet över den positiva delen benämnes positiv impulstäthet (I_+) och över negativa delen negativ impulstäthet (I_-).

Om stöt vågen träffar något föremål i sin väg kommer den att reflekteras, vilket innebär att man får ytterligare ett entropi- och täthetsprång. Storleken av detta beror på det maximala statiska trycket och avläkningsvinkeln vid reflexion. Ett maximalt värde erhålles då vågen träffar vinkelrätt mot t.ex. en plan vägg. Entropi- och täthetsprånget innebär en tryckstegring och därav följer att det maximala reflexionstrycket $\bar{P}_+$ blir större än vågens maximala statiska tryck, vid samma avstånd från laddningen. För att kunna jämföra stöt vågstryck som uppmätts från olika stora laddningar och på olika avstånd är det lämpligt att använda sig av de skallagar som gäller för en sfärisk utbredning. Varje verkligt avstånd, (R), från laddningen kan då överföras till ett karakteristiskt sådant, benämnt reducerade radien, (r), enligt följande formel

$$r = \frac{R}{Q^{1/3}}$$

där Q är laddningsvikten. Genom att representera stöt vågens specifika värden för tryck, impuls och varaktighet som funktion av reducerade radien, vilket i princip innebär en normering till laddningsvikten 1 kg, är det möjligt att

jämföra olika mätdata. Om P , j och τ är de specifika värdena för tryck, impulstäthet och varaktighet gäller för varje laddningsvikt

$$\begin{aligned} \text{tryck} & P = P \\ \text{impulstäthet} & I = j \cdot Q^{1/3} \\ \text{varaktighet} & t = \tau \cdot Q^{1/3} \end{aligned}$$

För trotyl finns de specifika värdena för såväl tryck, impulstäthet och varaktighet samlade i ref. /1/ varur diagrammen i fig. 2, 3, 4 är hämtade.

Mätutrustning.

Vid undersökningen användes en stötvågsgivare av penn-typ (fig. 5). Det tryckkänsliga elementet är placerat bakom en konisk spets och påverkas radiellt av stötttrycket. Den koniska spetsen har sådan utformning att för luftstötvågor med hastigheter upp till Mach 3 mäter givaren det statiska trycket i stötvågen. Övriga data på stötvågsgivaren framgår av nedanstående text.

Typ	: LC-13
Fabrikat	: Atlantic Research
Laddningssensivitet	: 7585 pC/bar
Kapacitans	: 1790 pF
Stigtid	: 10 μ s
Termisk sensitivitet	: 0.00963 V/ $^{\circ}$ C (obelastad)
Kännande element	: blyzirkonat-titanat

Givarens laddningskänslighet hade bestämts av fabrikanten i fyra punkter. Vid denna kalibrering placerades stötvågsgivaren i en behållare fylld med vätska under tryck. Genom att snabbt avlasta trycket genom en ventil erhöles en snabb tryckförändring och den laddning som därvid uppstår i det piezo-keramiska elementet mätes med ballistisk galvanometer. Kalibreringskurvan framgår av fig. 6. Kalibreringspunkterna ligger mellan 1 och 15 bar.

Om man av säkerhetsskäl maximerar den tillåtna laddningsmängden till 100 g kan man med hjälp av diagrammet i fig. 2 beräkna inom vilket avstånd mätningen bör genomföras för att maximala statiska trycket skall ligga inom det kalibrerade mätområdet.

Ur diagrammet fig. 2 erhåller vi för P_+ lika med 1, 2 och 10 atö reducerade radierna 2.6, 1.8 och 1.0 m/kg^{1/3} vilket för en 100 g laddning skulle motsvara 1.2, 0.8 och 0.5 m:s mätavstånd.

För en 100 g:s laddning bör mätavståndet vara mindre än 1.0 meter för att det statiska trycket skall ligga inom givarens kalibrerade område (1.7 - 15 bar).

Den uppgivna laddningskänsligheten är ett medelvärde över hela det uppgivna mätområdet. Då en mycket stor del av mätningarna gjordes på tryck som låg i områdets nedre del eller därunder får hänsyn tagas till laddningskänsligheten i detta område.

Mätuppställningen framgår av fig. 7. Sprängladdningarna, klotformade eller cylindriska, monterades i änden på en tunn träribba som stacks ned i ett stativ. Avståndet till marken var mellan 1.7 och 2.7 m beroende av givarnas placering. Avståndet till givaren var 1, 2, 5 och 10 m. Stötvågsgivaren anslöts till ett oscilloskop (Tektronix 535) via en laddningsförstärkare (Kistler 568). Givarens egenkapacitans var 1790 pF. Anslutningskabeln mellan givare och laddningsförstärkare var av low noise typ med en total kapacitet av 1370 pF. Den till laddningsförstärkaren anslutna kapacitansen var således 3160 pF. Med denna anslutningskapacitans var förstärkningskurvan rak inom -2dB upp till 150 kHz. Givarens temperaturdrift var besvärande vid mätning i solljus och då oscilloskopets likströmsförstärkning användes kunde driften på nollinjen omöjligt kontrolleras. För att få en tillförlitlig registrering av trycktidförloppet användes ytterligare en stötvågsgivare (av turmalinkristall) som startar oscilloskopets svep några tiotal mikrosekunder före stötvågens ankomst till mätgivaren (se fig. 7). En registrering av trycktidförloppet på oscilloskopet ser då ut som i fig. 8. Startgivaren kopplas liksom mätgivaren via en laddningsförstärkare till oscilloskopets triggeringång. Den placerades cirka 60 mm framför mätgivaren (LC-13) och något under denna. Avståndet mellan de tryckkännande elementens centrum är då cirka 100 mm. Av registreringarna att döma tycks någon inverkan av stötvågens reflexion mot startgivaren inte påverka det registrerade trycktidförloppet. De trycktoppar som iakttages i högra delen av fig. 8 härrör från den mot marken reflekterade stötvågen.

Fel vid bestämning av maximaltrycket.

Vid bestämning av maximaltrycket ur trycktidförloppet som registrerats på foto kommer flera felkällor att påverka resultatet

- givarens stigtid
- förstärkarfel
- mätfel i oscilloskop; parallax, olinearitet
- avläsningsfel vid utvärdering av foto

Givarens stigtid beror av stötvågens gångtid t_g över det tryckkännande elementet och tidskonstanten θ för tryckets avtagande. Om givarelementets utsträckning är $2a$ och stötvågshastigheten c så är $t_g = \frac{2a}{c}$.

För små värden på $\frac{a}{c\theta}$ kommer givaren därvid att registrera ett tryck som är $P_+ \frac{a}{c\theta}$ lägre än det verkliga max. trycket P_+ . Stigtidens inverkan på trycktidförloppet framgår av fig. 9. För att eliminera detta fel i max. tryck kan man representera P_+ logaritmiskt som funktion av tiden t och därefter extrapolera trycket till $t = \frac{t_g}{2}$. I föreliggande fall har en extrapolation gjorts i samband med utvärderingen av fotona. Felet i laddningsförstärkaren bör ej vara mer än 1%. Oscilloskopets olinearitet är ej större än 2% men härtill kommer ett parallaxfel mellan skalan och rörets yta. Det fel som göres vid avläsning på fotot beror av strålbredden och kan variera med exponeringsgraden. Totalfelet på mätningen torde vara $\pm 5\%$.

Mätresultat för TNT.

Tabell 1 visar resultaten av mätningar på 100 g TNT klot ($\rho = 1.56$) initierade centralt med sprängkapsel (n:r 8). I tabellen återfinnes maximaltrycket, P_+ , positiva varaktigheten t_+ , reducerade radien, för avstånden 1, 2, 5 och 10 m, samt laddningens höjd över marken. De på oscilloskopfotot avlästa värdena har betecknats $P_+ \text{ avläst}$ och de med hänsyn till stigtiden korrigerade värdena har betecknats $P_+ \text{ korr.}$ Den för givaren uppgivna laddningskänsligheten 7585 pC/bar är ett medelvärde över hela kalibreringsområdet. I nedre änden av detta område d.v.s. för tryck mellan 1.5 och 3.5 bar är laddningskänsligheten enligt kalibreringskurvan endast 7240 pC/bar. Då förstärkaren var inställd på medelvärdet innebär detta att de uppmätta värdena är 4% för låga. En korrigering för detta mätfel har därför utförts.

Som framgår av tabellen avviker det avlästa värdet från det extrapolerade fullt mätbart vid både 1 och 2 meters mätavstånd. De korrigerade värdena är c:a 5% större än de avlästa på 1 meters mätavstånd. Spridningen mellan mätningarna på 2 meters avstånd är ganska stor vilket kan bero på något fel i kontaktdonen eller möjligen ofullständig detonation. (Tillgången på TNT-klot var begränsad, varför endast två klot skjutits vid varje mätavstånd).

I fig. 10 har P_+ avsatts som funktion av reducerade avståndet (r) för TNT-kloten om 100 g. Den heldragna linjen är uppritad på basis av data givna av S. Granström /1/. Om vi bortser från det ena av försöken på 2 meters avstånd ($r = 4.3$) ligger alla våra experimentella värden på eller helt nära denna kurva. Möjligen kan man skönja en tendens till något för låga värden vid tryck under 100 mbar, vilket i så fall beror på lägre

laddningskänslighet än den använda 7240 pC/bar som anges för nedre delen av kalibreringsområdet. Extrapolerar man kalibreringskurvan mot noll så är laddningskänsligheten något lägre än den som använts. Men med hänsyn till övriga fel är det omöjligt att avgöra om en sådan extrapolation är riktig.

Fig. 11 visar trycktidförloppets specifika positiva varaktighet τ_+ som funktion av reducerade avståndet för TNT. Heldragen kurva: data enligt Granström /1/, punkterna: de nu erhållna värdena. Här iakttages en ökad avvikelse för ökande tid vilket tyder på ett mätfel. Då såväl oscilloskop som förstärkare varit DC-kopplade kan signalens nivå ej ha sjunkit. Felet måste då bero på svepets olinearitet, parallax skala - skärm och svårigheten att uppmäta skärningspunkten stråle - nollinje.

Mätresultat för sprängdeg, pentyl, hexogen, Gurit och Dynamex.

Tabell 2 visar resultaten med klotformiga laddningar av sprängdeg (86 % PETN 14 % olja) med vikten 10, 50 och 100 g. För 10 och 50 g:s laddningar var mätavståndet 1 m och för 100 g:s laddningar var mätavståndet 1, 2, 5 och 10 m. De extrapolerade värdena på P_+ vid 1 m skiljer sig med upp till 5.5% från de avlästa. Av tabellen framgår att reproducerbarheten i mätningarna är god. I diagrammet fig. 12 har P_+ avsatts som funktion av r för såväl sprängdeg som TNT.

Tabellerna 3, 4, 5, 6 och 7 visar P_+ och t_+ för sprängämnenä Dynamex, pressad pentyl (90% PETN/10% vax), Gurit och hexogen (96% hexogen/4% vax). Gurit och Dynamex som är nitroglycerinsprängämnen har vid denna laddningsutformning (något så när sfärisk) och vikt sannolikt detonerat med låg hastighet. Pentyl- och hexogenladdningarna bestod av cylindriska presskroppar (ϕ 35 mm) med 89 respektive 83 g:s vikt och tätheten 1.53 respektive 1.60. I diagrammen fig. 13 och 14 har P_+ avsatts som funktion av r för Dynamex, PETN, Gurit och hexogen. För att kunna jämföra P_+ för de övriga med TNT har i diagrammet som heldragen kurva inritats P_+ för TNT.

Man gör då den iakttagelsen att sprängdeg, hexogen och pentyl ger högre maximaltryck än TNT för reducerade radier mindre än 10 medan Gurit och Dynamex båda ger ett lägre maximaltryck på alla avstånd. Trycket för hexogen och pentyl avtar enligt fig. 13 och 14 mest nära laddningen. Vid större avstånd ger TNT, hexogen, sprängdeg och pentyl samma maximaltryck.

Om vi beräknar förhållandet

$$M = \frac{P_+}{P_+(TNT)}$$

för de olika sprängämnen och avsätter M som funktion av reducerade radien kan man avläsa förhållandet i maximaltryck för olika avstånd se fig. 15 a, b och c. Det kan noteras att Gurit och Dynamex ger ungefärligen $3/4$ av det maximaltryck man kan beräkna för TNT. Sprängdeg ger ett tryck som för reducerade radier större än 20 är upp till 10% större än TNT.

Om för P_+ gäller att

$$P_+ = K \left(\frac{Q^{1/3}}{R} \right)^\alpha$$

där K och α är konstanter, R avståndet, Q laddningsvikten, så kan man genom att mäta P_+ för olika laddningsvikter på samma avstånd bestämma K och α .

I fig. 17 har $\log P_+$ avsatts som funktion av $\log \frac{Q^{1/3}}{R}$ i ett dubbel-logaritmiskt diagram med $R = 1$ för laddningar av sprängdeg 10, 50 och 100 g. Ur diagrammet kan α bestämmas till 1.88 och K får värdet 7450. Dessa konstanter gäller emellertid endast för $R = 1$ m, vilket man lätt kan konstatera genom att pröva för $R = 2$ m och 5 m och $Q = 100$ g, vilket ger för högt respektive för lågt värde på P_+ .

Jämförelse av positiv statisk impuls i stötvågen.

Ur några av de registrerade trycktidförloppen har vi beräknat den positiva statiska impulsen ($\int_0^+ P_+ dt$) på 1 m:s laddningsavstånd för TNT, Gurit och Dynamex. För TNT ($Q = 100$ g, $r = 2.15$) erhöles $I_+ = 0.365$ bar ms = 0.372 at ms. Specifika impulstätheten j_+ blir då $0.79 \frac{\text{at ms}}{\text{kg}^{1/3}}$. Ur diagrammet fig. 3 får vi för $r = 2.15$ enligt den streckade kurvan för j_+ ett värde $j_+ = 0.95 \frac{\text{at ms}}{\text{kg}^{1/3}}$ vilket således är högre än värdet ur mätningarna. Enligt data från Kirkwood /3/ (1945) i samma figur erhålles $j_+ = 0.79 \frac{\text{at ms}}{\text{kg}^{1/3}}$.

För Gurit erhöles $I_+ = 0.239$ och för Dynamex $I_+ = 0.232$ bar ms. Statiska impulsen för dessa båda sprängämnen, vilka båda detonerat med låg hastighet skulle således vara lika (inom mätfelet) och c:a 65% av impulsen för TNT. Dynamex och TNT torde ha i stort sett samma explosionsenergi 4.3 MJ/kg respektive 4.1 MJ/kg. Härav kan man dra slutsatsen att vid den låga detonationshastigheten kommer den del av sprängämnet som reagerar bakom detonationszonen att bidra mindre till luftstötvågen än om den omsättes helt i reaktionszonen.

Trycktidförloppets tidskonstant.

Bakom stötvågsfronten avtar trycket exponentiellt enligt följande samband

$$P = P_+ \cdot e^{-\frac{t}{\theta}}$$

där t är tiden och θ tidskonstanten.

För $t > \theta$ avtar trycket långsammare. Tidskonstanten kan bestämmas genom att trycket P avsättes som funktion av tiden t i ett diagram med logaritmisk tryckskala. θ erhålles ur detta diagram enklast genom att beräkna $P_{t=\theta} = P_+ \cdot e^{-1}$ och avläsa θ på tidsaxeln. I fig. 16 har trycktidförloppet vid 1 m:s mätavstånd för samtliga nu provade sprängämnen plottats och tidskonstanten avlästs. Om vi extrapolerar P till $t = 0$ så överensstämmer dessa värden på P_+ ganska väl med den extrapolation som gjorts vid utmätningen av fotona.

Stötvågens hastighet.

Med hjälp av det kända avståndet mellan triggergivaren och mätgivaren kan vi beräkna värdet på stötvågens fortplantningshastighet på de olika mätavstånden. Diagrammet fig. 18 visar stötvågens hastighet som funktion av avståndet för TNT, i den nu använda försöksuppställningen. Först vid 5 m:s väg från laddningen har fortplantningshastigheten gått ned till ljudhastigheten. För 100 g:s laddning motsvarar detta ett reducerat avstånd $21.5 \text{ m/kg}^{1/3}$. Om vi studerar diagrammet i fig. 12 och 13 för de olika sprängämnena så sammanfaller kurvorna för alla sprängämnena utom för Dynamex och Gurit för $r > 20$. Kurvorna för de båda senare sprängämnena är emellertid parallella med de övriga. Inte vid någon mätning har våghastigheten överskridit Mach 3 som anges som gräns för givarens förmåga att återge det statiska trycket.

Slutsatser.

Mätresultaten visar att den provade givaren kan användas med god noggrannhet även för tryck under 1.7 bar, vilket är den lägsta givna kalibreringspunkten. Mellan 0.1 och 1.7 bar kan samma laddningskänslighet användas som för området 1.7 - 3.5 bar. För lägre tryck tycks laddningskänsligheten avta snabbare än vad den extrapolerade kurvan anger. Dock är felet vid 30 mbar fortfarande inte större än c:a 5%. Med hänsyn till givarens response bör den inte användas nära små laddningar. Laddningskänslighetens variation inom det kalibrerade området bör beaktas och det uppmätta trycket måste korrigeras om den på förstärkaren inställda laddningskänsligheten avviker från den som är aktuell för det mätta trycket.

Bättre mätnoggrannhet kan uppnås med hjälp av följande åtgärder

- a) användning av tidsmarkeringssignal för ökad noggrannhet i tidsbestämning

- b) skala projicerad på oscilloskopskärm eller skärm med skala på glaset för undvikande av parallaxfel
- c) större skärmdiameter för minskat avläsningsfel
- d) analog integrering av trycktidförloppet för bättre impulsbestämning

Analog inspelning på databandspelare, avspelning, digitalisering och databehandling är ett annat alternativ.

Jämförelsen mellan det maximala statiska trycket för de olika sprängämnena visar att de två sprängämnena som detonerat med låg hastighet ger ett tryck som uppgår till $3/4$ av trycket för samma laddning TNT. För ett reduceratavstånd mellan 10 och $50 \left(\frac{\text{m}}{\text{kg}^{1/3}} \right)$ ger Hexogen, pentyl och sprängdeg nära nog samma tryck som TNT. Detonationer av stora laddningar Dynamex och Gurit bör bli föremål för fortsatta mätningar.

Litteraturreferenser.

1. Granström, S.A. Loading Characteristics of Air Blasts from Detonating Charges.-
Kungl. Tekniska Högskolans handlingar N:r 100 (1956).
2. Arons, A.B., and Design and Use of Piezoelectric Gauges
Cole, R.H. for Measurement of Large Transient Pressures.-
The Review of Scientific Instruments Vol. 21 N:r 1 January 1950.
3. Kirkwood, G.G., and Theory of propagation of Shock Waves from
Brinkley, S.R. Explosive Sources in Air and Water.-
OSRD Report 4814, 1945.

Tabell 1. Resultat av mätningar på 100 g TNT.

Vikt g	R m	r $\text{m/kg}^{1/3}$	h m	t_+ μs	P_+ korr. mb	P_+ avläst mb
100	1.0	2.15	2.0	770	1560	1480
100	1.0	2.15	2.0	820	1500	1410
100	2.0	4.31	2.0	1260	365	354
100	2.0	4.31	2.0	1240	286	281
100	5.0	10.77	2.0	1810	99	96
100	5.0	10.77	2.0	1810	99	96
100	10.0	21.54	2.7	2190	41	40
100	10.0	21.54	2.7	2190	41	40

Tabell 2. Resultat av mätningar på klotformade sprängdegsladdningar av olika mängd.

Vikt g	R m	r m/kg ^{1/3}	h m	t ₊ μs	P ₊ korr. mb	P ₊ avläst mb
100	1.0	2.15	2.0	800	1660	1560
100	1.0	2.15	2.0	760	1620	1540
100	2.0	4.31	2.0	1100	411	406
100	2.0	4.31	2.0	1220	312	302
100	2.0	4.31	2.0	1220	386	365
100	2.0	4.31	2.0	1310	405	385
100	5.0	10.77	2.0	1800	102	100
100	5.0	10.77	2.0	2000	73	72
100	5.0	10.77	2.0	1800	107	104
100	5.0	10.77	2.0	1750	107	104
100	10.0	21.54	2.0	-	35	35
100	10.0	21.54	2.0	2200	34	34
100	10.0	21.54	2.0	-	42	41
100	10.0	21.54	2.7	2250	42	41
50	1.0	2.72	2.0	750	1040	1000
50	1.0	2.72	2.0	730	1040	1000
10	1.0	4.64	2.0	620	405	395
10	1.0	4.64	2.0	620	405	395

Tabell 3. Resultat av mätningar på Dynamex (klot).

Vikt g	R m	r $\text{m/kg}^{1/3}$	h m	t_+ μs	P_+ korr. mb	P_+ avläst mb
100	1.0	2.15	2.0	710	864	833
100	1.0	2.15	2.0	670	911	875
100	2.0	4.31	2.0	1100	255	240
100	2.0	4.31	2.0	1100	245	230
100	5.0	10.77	2.0	1490	69	68
100	5.0	10.77	2.0	1490	67	66
100	10.0	21.54	2.7	1740	29	28
100	10.0	21.54	2.7	1740	29	27

Tabell 4. Resultat av mätningar på PETN cylindrar.

Vikt g	R m	r $\text{m/kg}^{1/3}$	h m	t_+ μs	P_+ korr. mb	P_+ avläst mb
89.7	1.0	2.23	2.0	960	1800	1700
89.0	1.0	2.24	2.0	920	1800	1700
89.2	2.0	4.48	2.0	1330	340	323
88.9	2.0	4.48	2.0	1370	350	333
89.0	5.0	11.20	2.0	1930	93	89
89.2	5.0	11.20	2.0	1930	90	85
89.3	10.0	22.37	2.7	2300	37	35
88.6	10.0	22.43	2.7	2300	40	38

Tabell 5. Resultat av mätningar på Gurit (klotformad laddning).

Vikt g	R m	r m/kg ^{1/3}	h m	t ₊ μs	P ₊ korr. mb	P ₊ avläst mb
100	1.0	2.15	2.0	750	906	875
100	1.0	2.15	2.0	800	887	833
100	2.0	4.31	2.0	1220	235	230
100	2.0	4.31	2.0	1220	255	240
100	5.0	10.77	2.0	1520	69	67
100	5.0	10.77	2.0	1500	70	67
100	10.0	21.54	2.7	1740	28	27
100	10.0	21.54	2.7	1740	28	26

Tabell 6. Resultat av mätningar på Hexogencylindrar.

Vikt g	R m	r m/kg ^{1/3}	h m	t ₊ μs	P ₊ korr. mb	P ₊ avläst mb
82.5	1.0	2.30	2.0	930	1920	1810
83.2	1.0	2.29	2.0	930	1880	1730
83.5	2.0	4.58	2.0	1340	271	260
82.8	2.0	4.59	2.0	1380	307	292
83.3	5.0	11.45	2.0	1970	93	91
82.2	5.0	11.47	2.0	1970	90	87
83.5	10.0	22.88	2.7	2240	36	34
83.1	10.0	22.92	2.7	2240	36	34

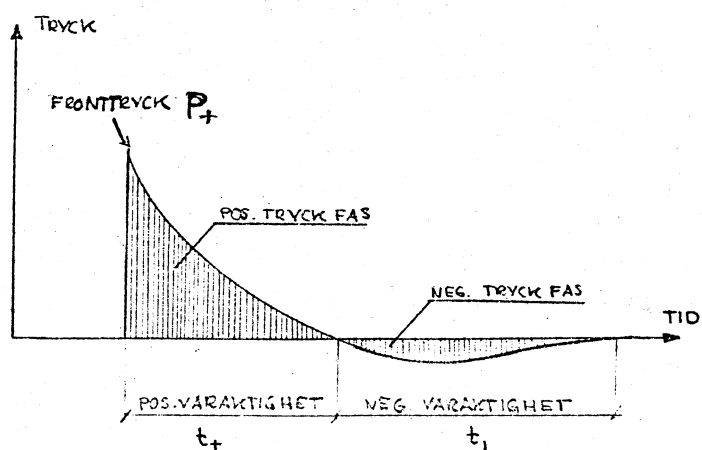


Fig. 1. Luftstöt vågens trycktidförlopp vid ostörd utbredning.

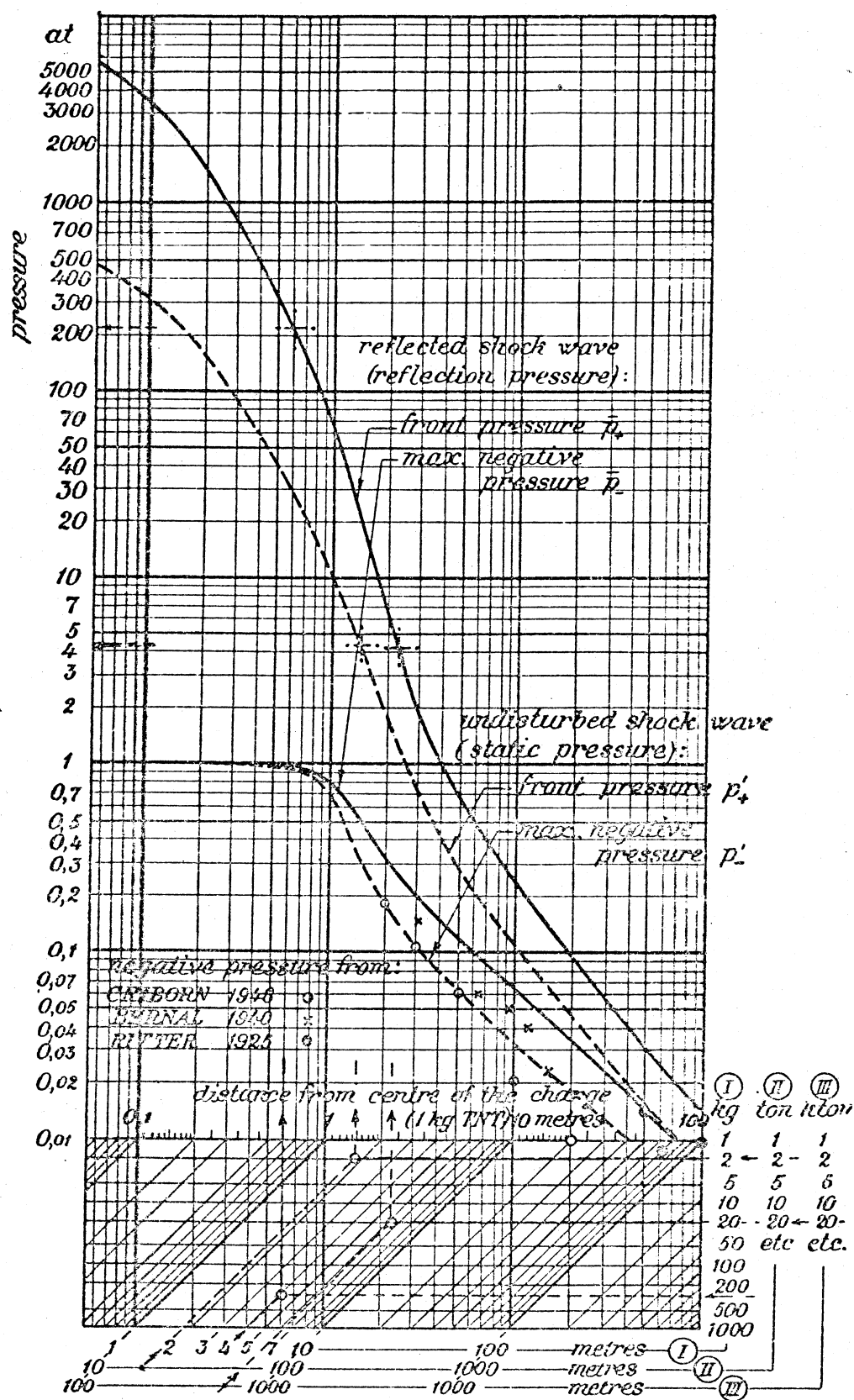


Fig. 2. Fronttryck och maximalt negativt tryck som funktion av laddningsvikt och avstånd TNT $\rho = 1.52$ enligt S. Granström /1/.

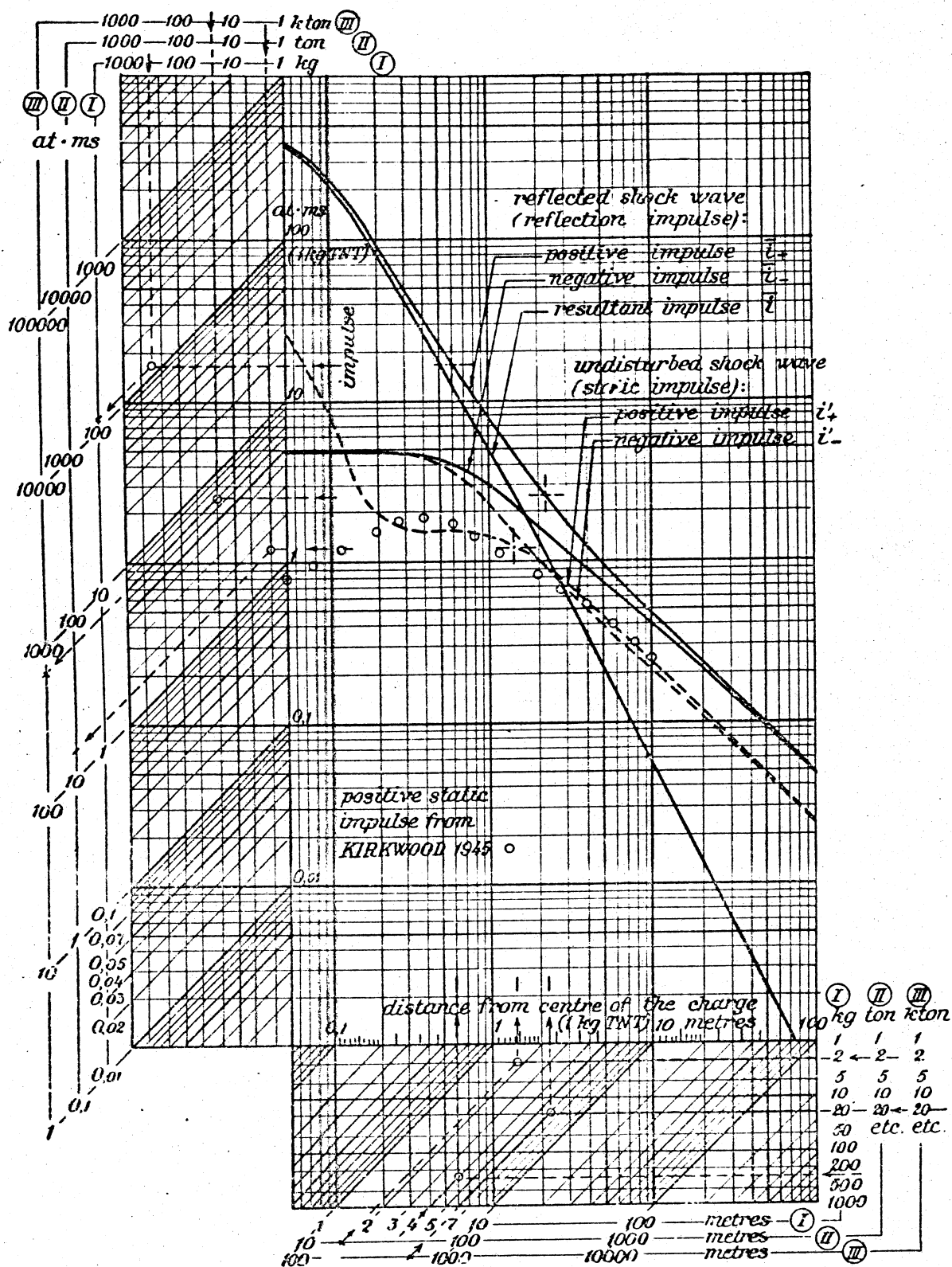


Fig. 3. Positiv och negativ impuls som funktion av laddningsvikt och avstånd TNT $\rho = 1.52$ enligt S. Granström /1/.

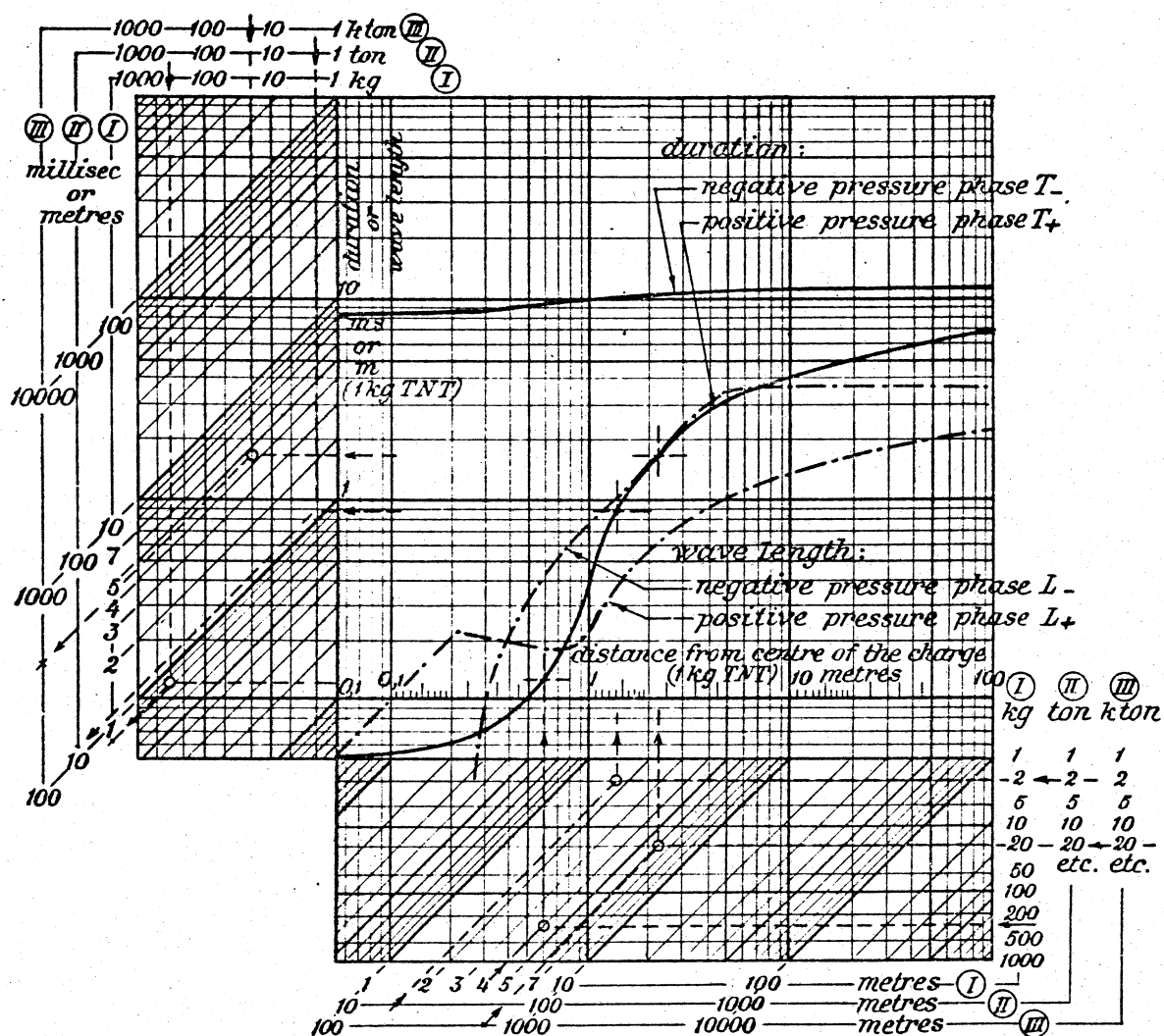


Fig. 4. Varaktighet och våglängd som funktion av laddningsvikt och avstånd, TNT, $\rho = 1.52$ enligt S. Granström [1].

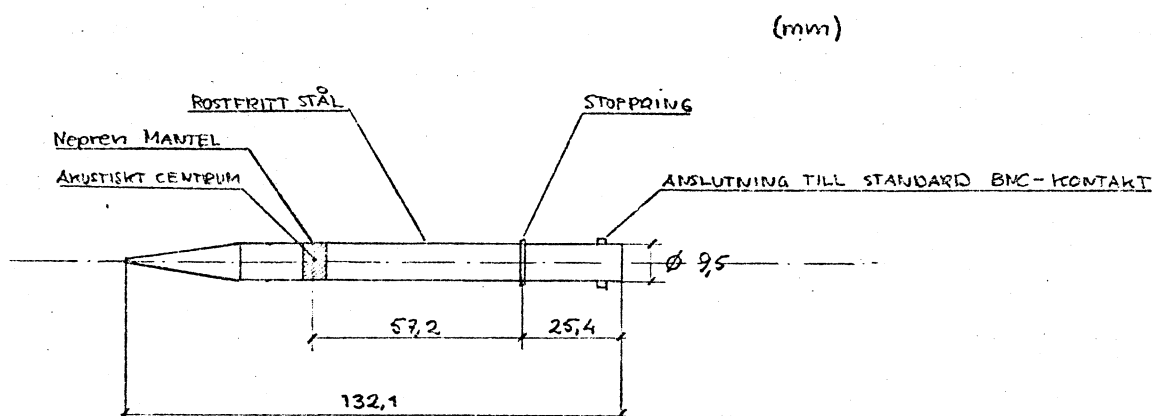


Fig. 5. Stötvågsmätaren LC-13 (Atlantic Research).

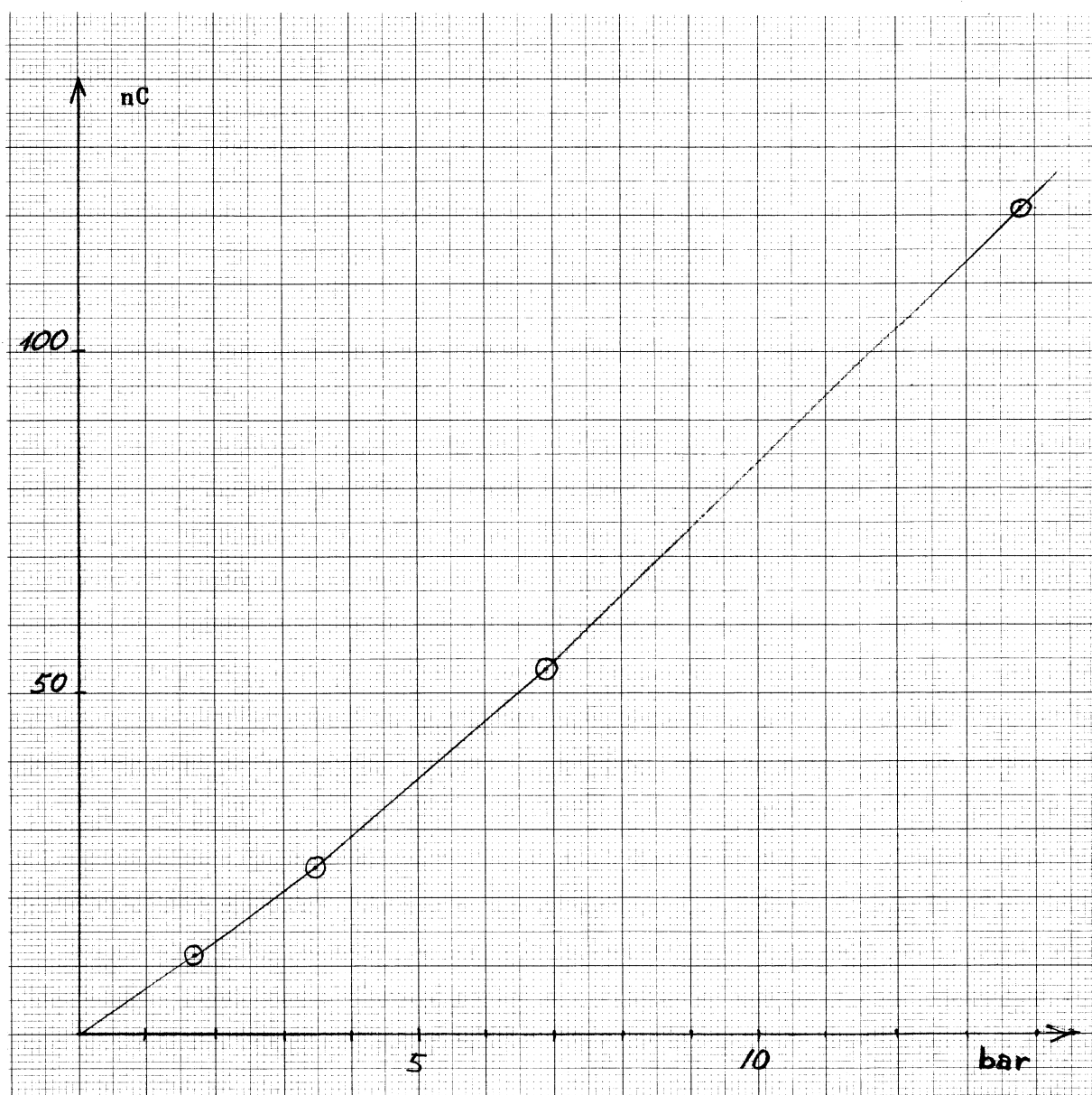


Fig. 6. Kalibreringskurva för LC-13.

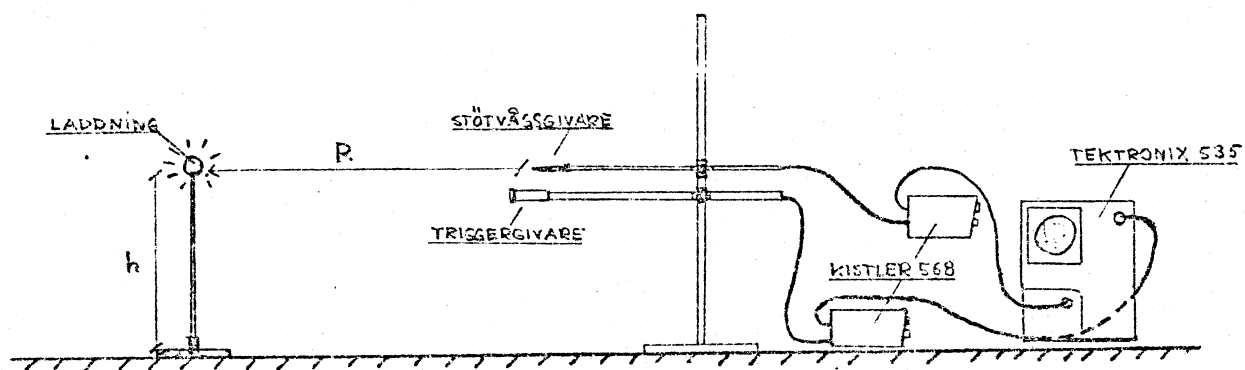


Fig. 7. Mätanordning för registrering av luftstöt vågor från en detonerande laddning.

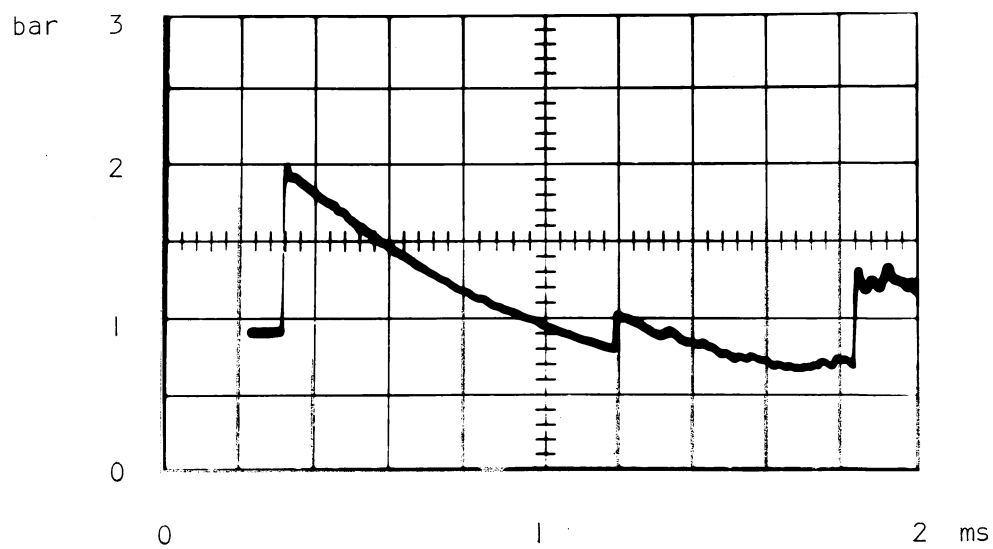


Fig. 8. Trycktidförloppet från en detonerande laddning.

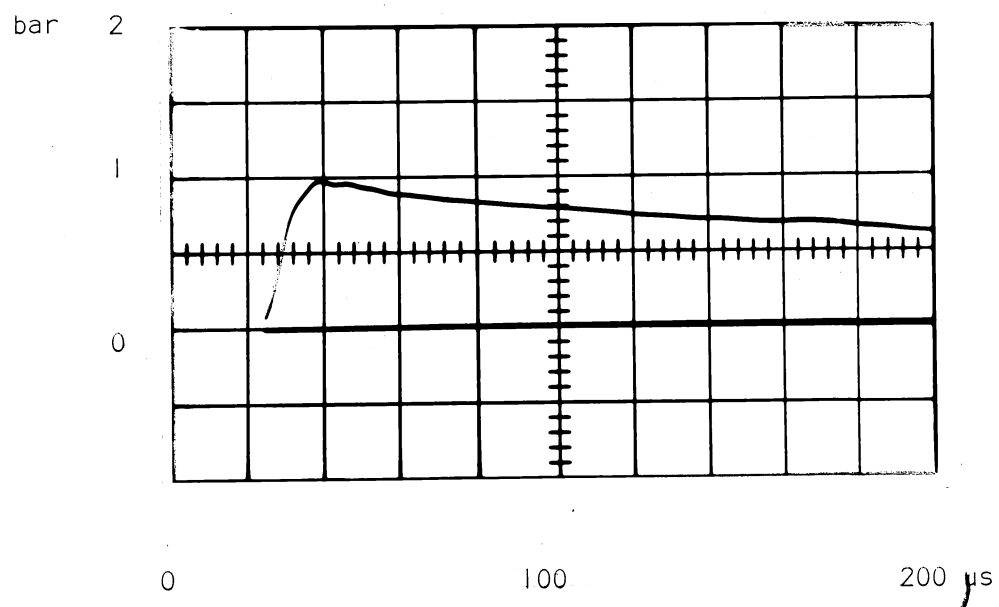


Fig. 9. Inverkan av givarens stigtid på trycktidförloppets front.

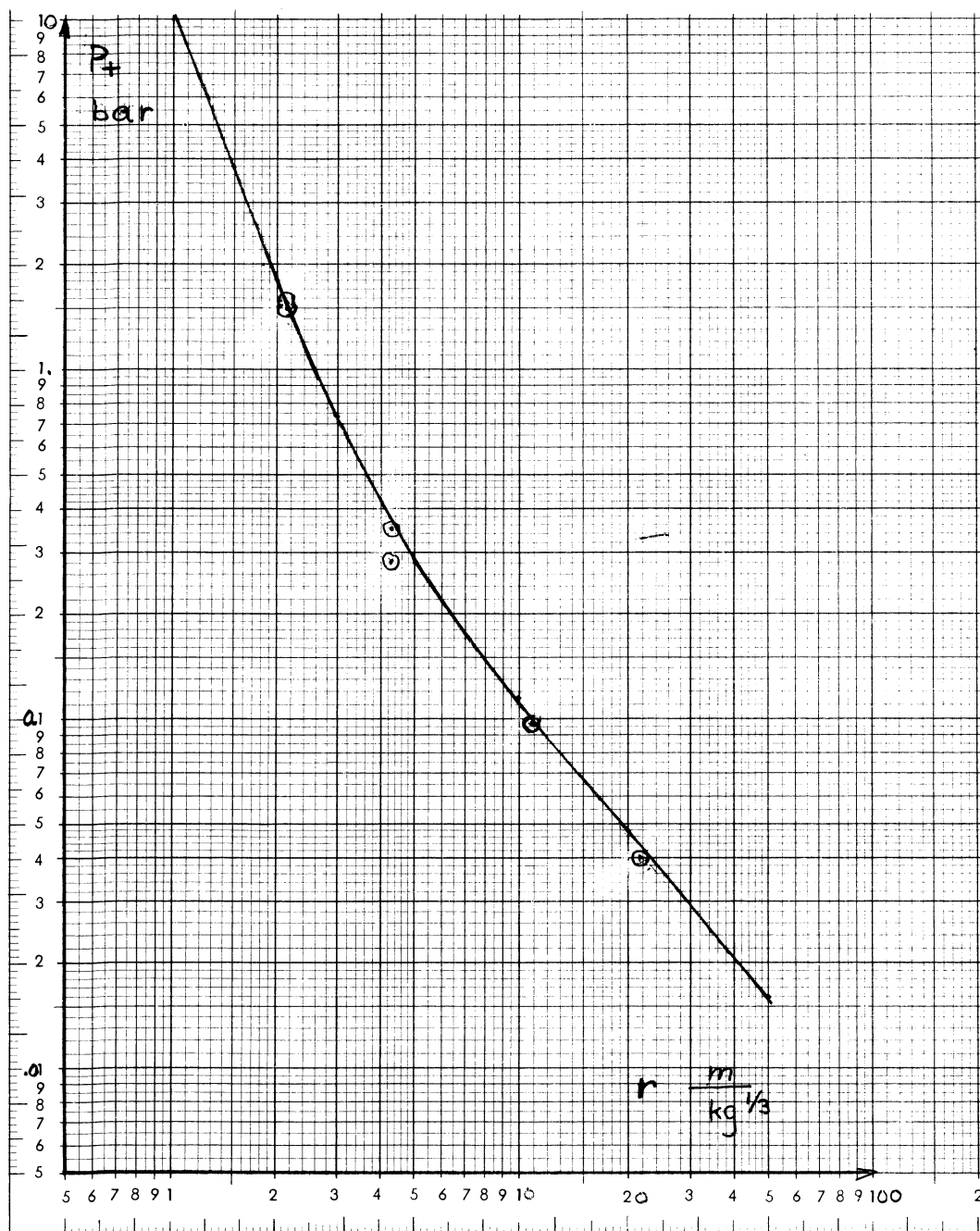


Fig. 10. Fronttrycket i den ostörda stötvågen (P_+) som funktion av reducerade avståndet (r) för TNT heldragen kurva enligt Granström $\circ$ mätvärden.

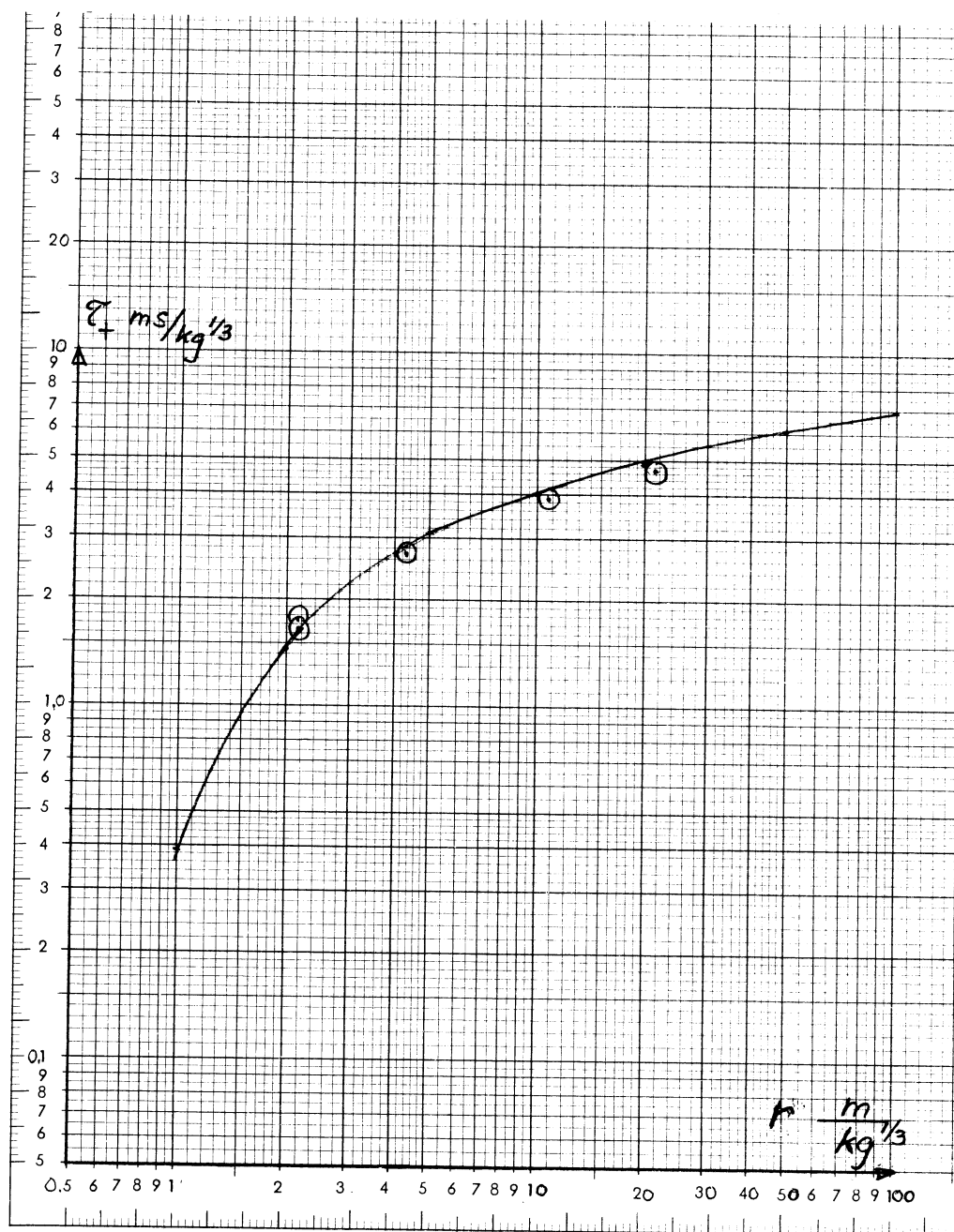


Fig. 11. Specifika väraktigheten, τ_+ , som funktion av reducerade avståndet, r . Helt dragen kurva enligt Granström [1].

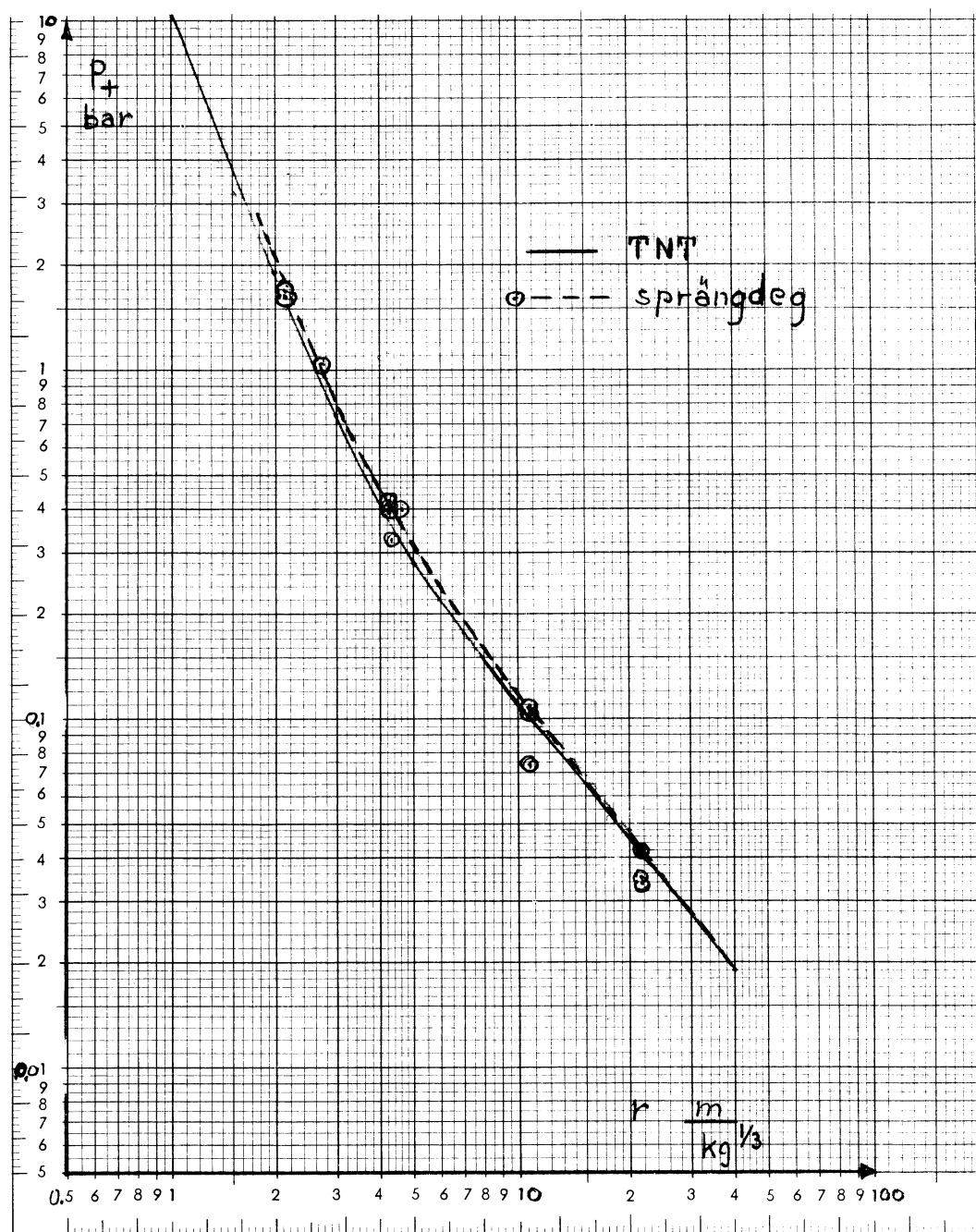


Fig. 12: P_+ som funktion av reducerade avståndet för sprängdeg jämfört med TNT.

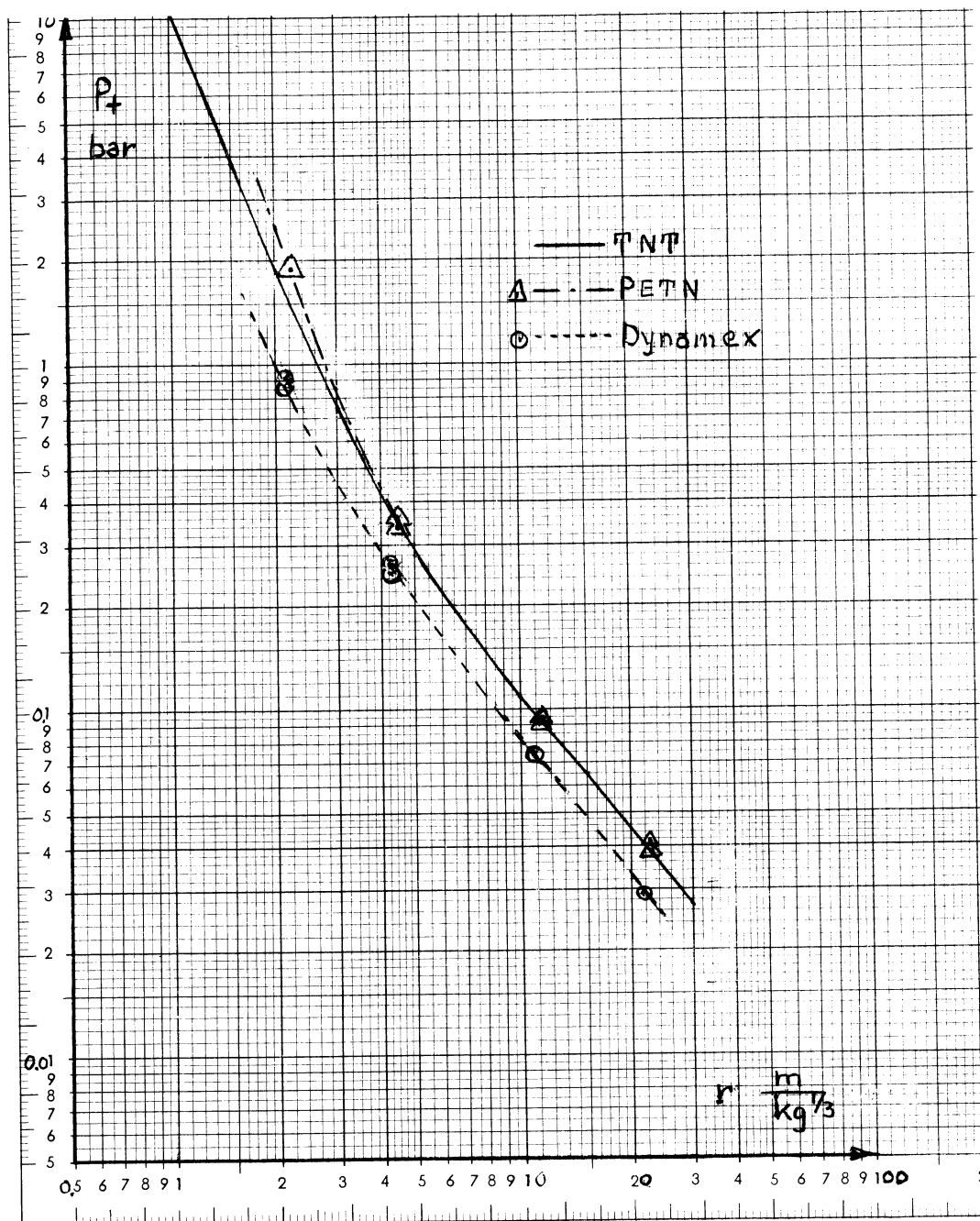


Fig. 13. P_+ som funktion av reducerade avståndet för PETN och Dynamex jämfört med TNT.

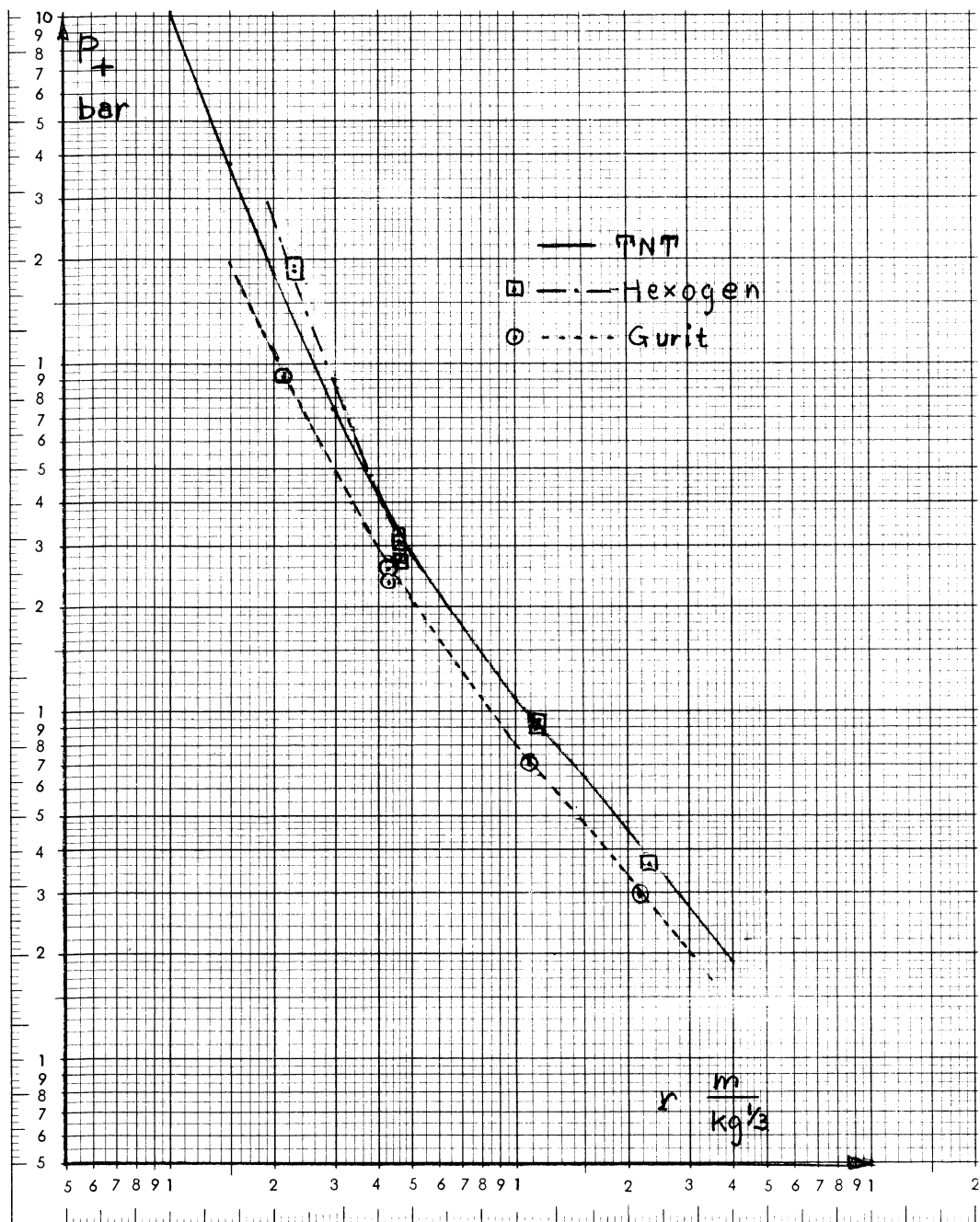


Fig. 14. P_+ som funktion av reducerade avståndet för Hexogen och Gurit jämfört med TNT.

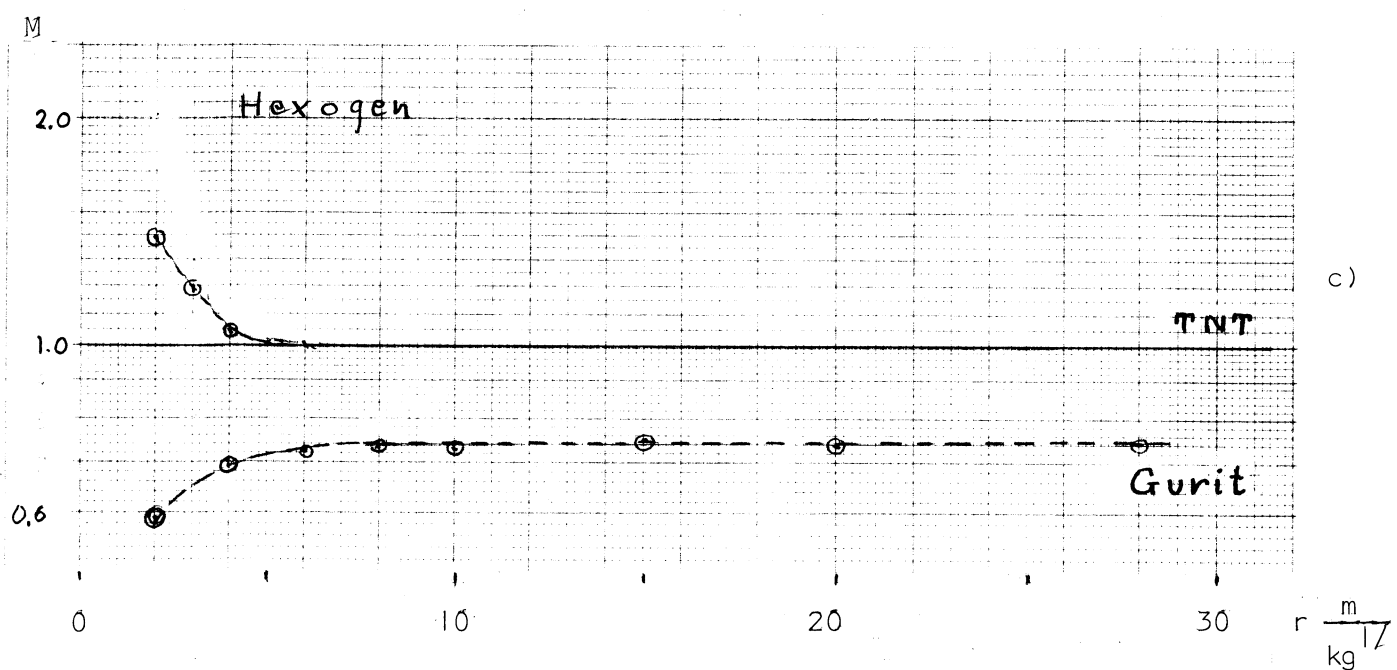
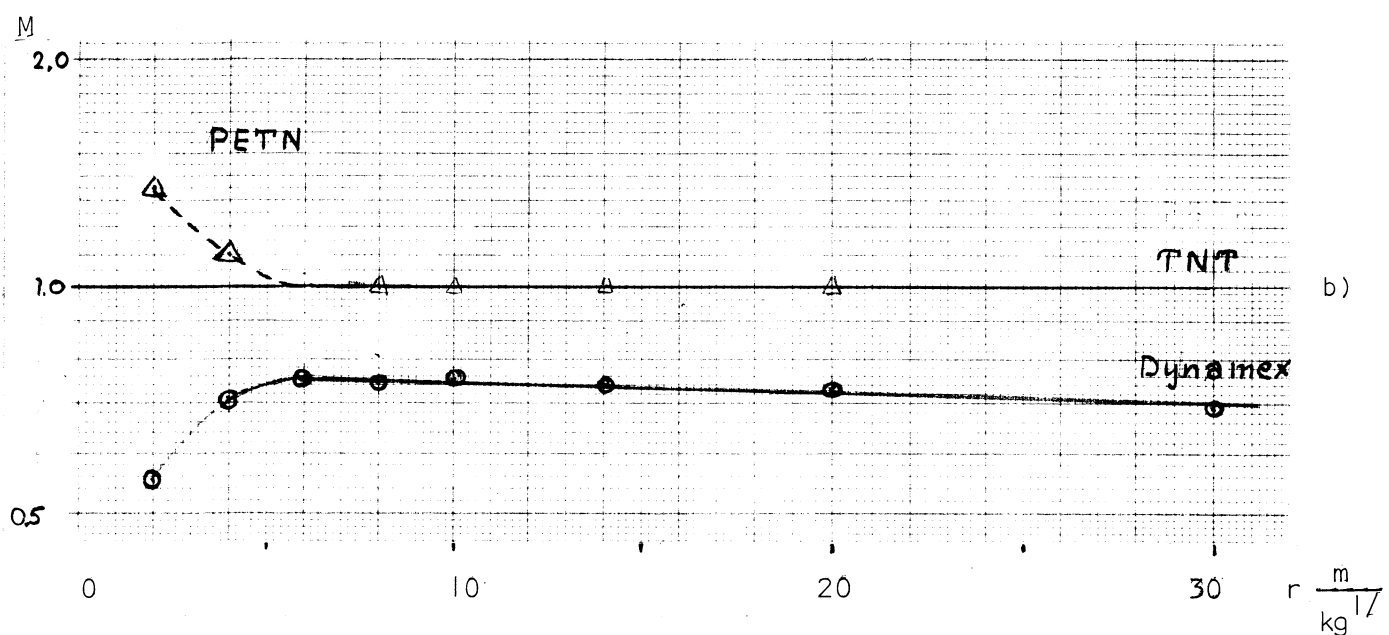
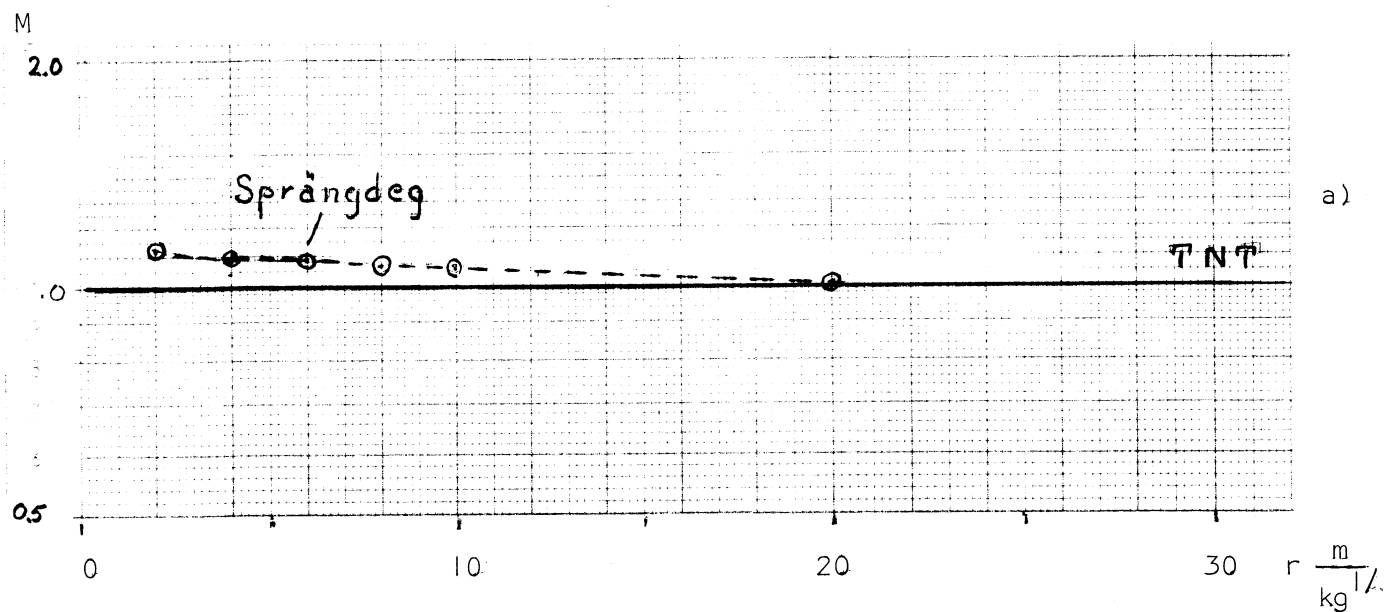
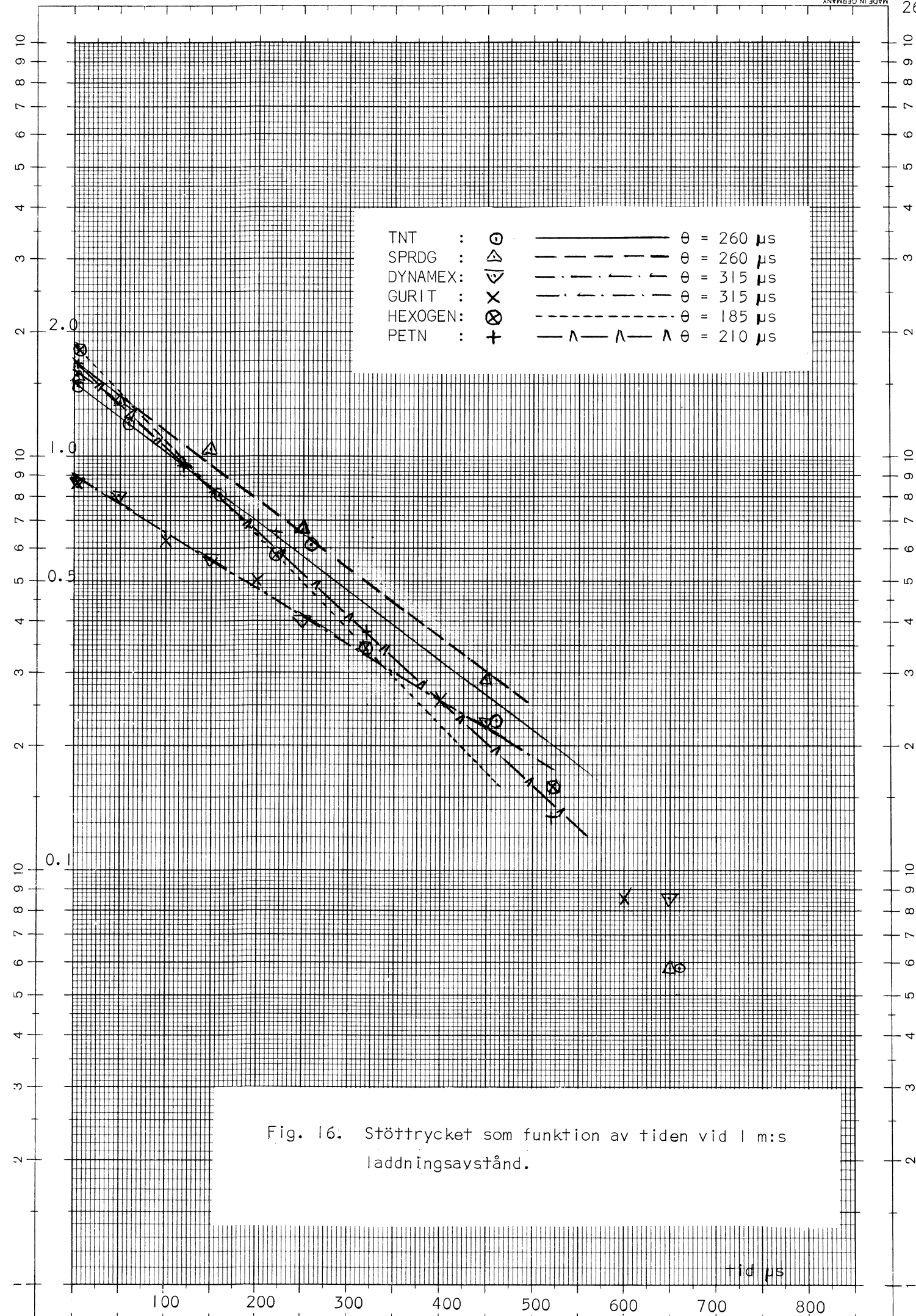


Fig. 15. Förhållandet mellan P_+ för sprängdeg, PETN, Dynamex, Hexogen, Gurit och TNT som funktion av reducerade avståndet.



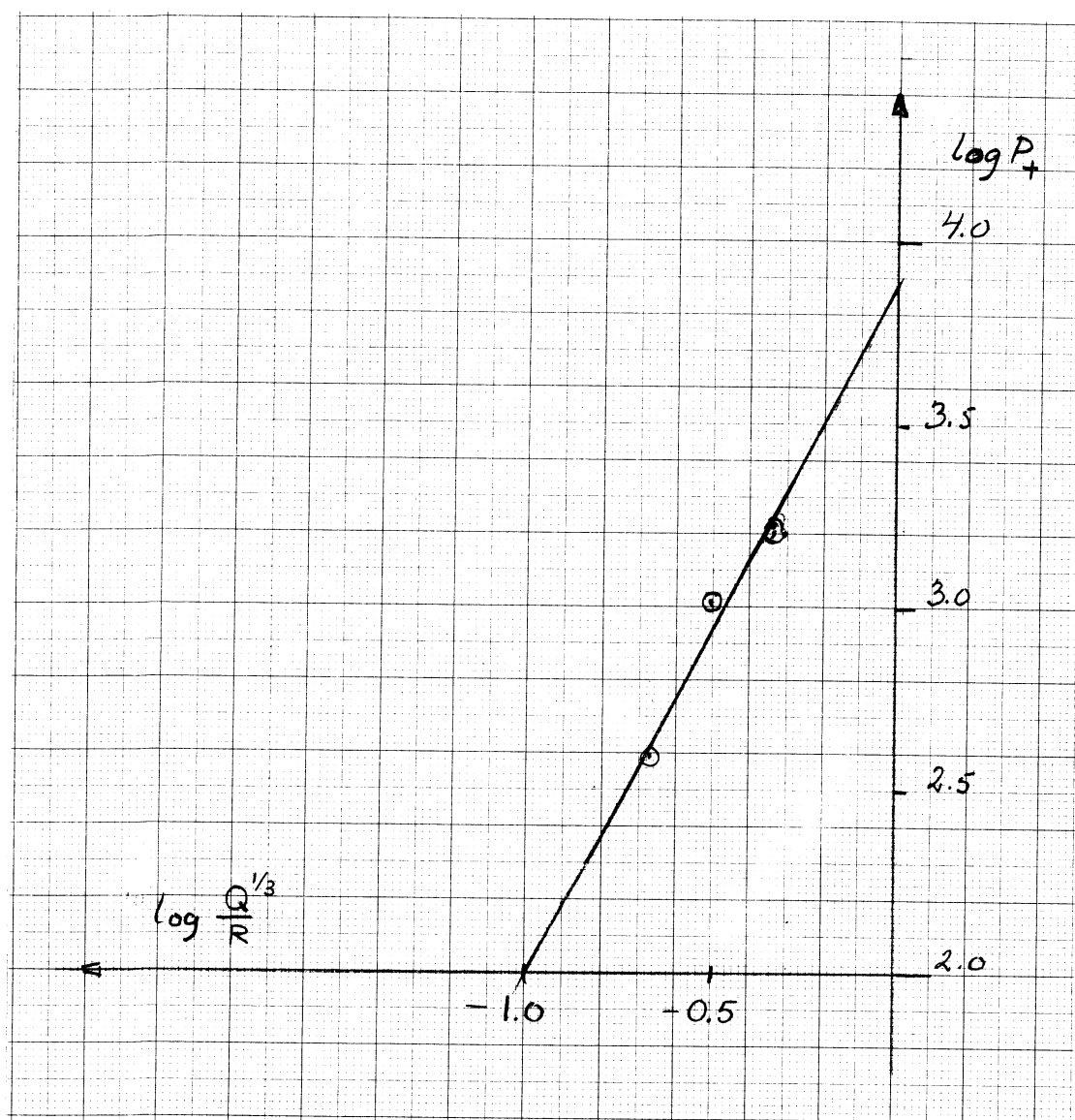


Fig. 17. $\log P_+$ som funktion av $\log \frac{Q}{R}^{1/3}$ för laddningar av sprängdeg.

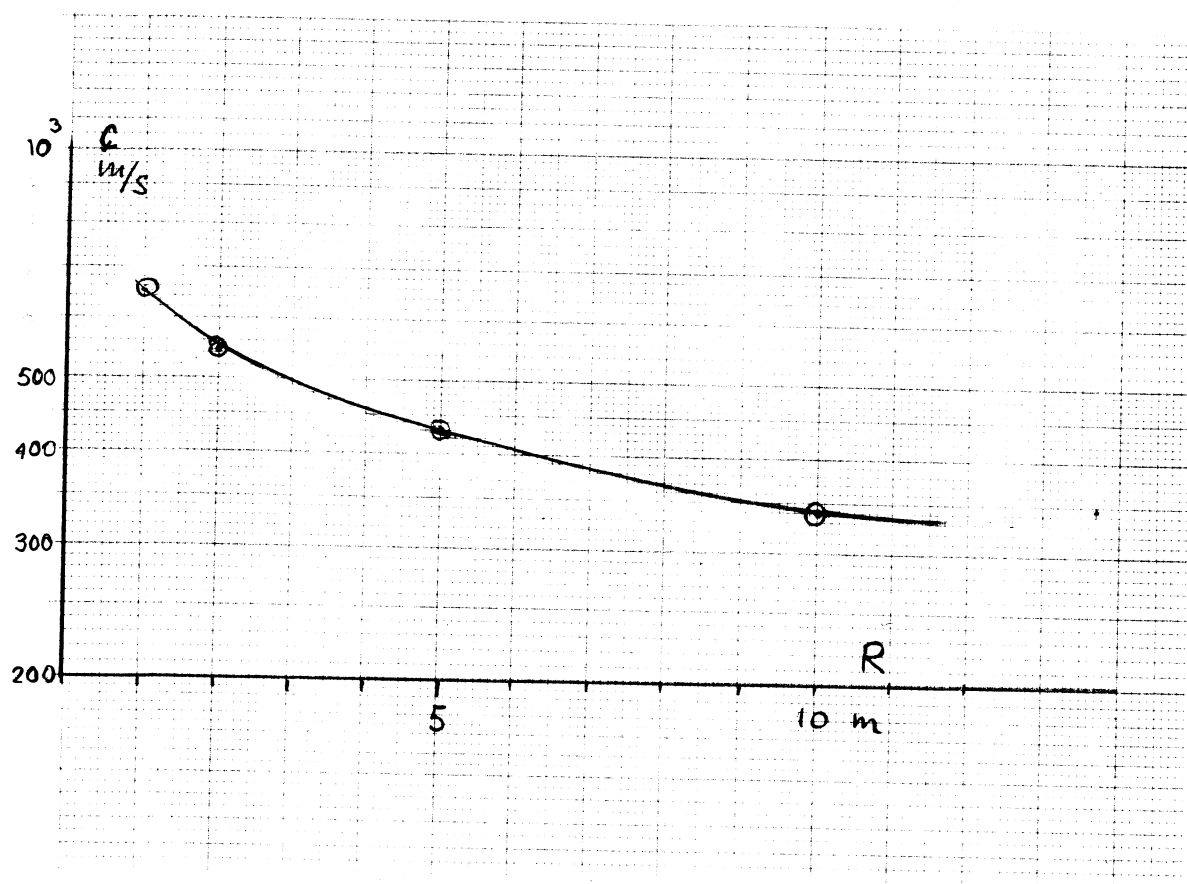


Fig. 18. Stötvågens fronthastighet som funktion av laddningsavståndet för TNT-laddningar om 100 g.