

DÄMPNING AV LUFTSTÖTVÅGEN FRÅN
EN LADDNING I JORD

av

R Béranger, J Bergeri, G Bon Mardion, A Eybert
Berard, J Gautier et P Perroud

COMMISSARIAT E L'ENERGIE ATOMIQUE ENTRE
D'ETUDES NUCLEAIRES DE GRENOBLE
Lab. d'Applications Spéciales de la Physique

DS 1971:38

15.9.1971

STIFTELSEN
SVENSK DETONIKFORSKNING
SWEDISH DETONIC RESEARCH FOUNDATION

VINTERVIKEN — 117 48 STOCKHOLM
SWEDEN

DÄMPNING AV LUFTSTÖTVÅGEN FRÅN

EN LADDNING I JORD

av

R Béranger, J Bergeri, G Bon Mardion, A Eybert-
Berard, J Gautier et P Perroud

COMMISSARIAT E L'ENERGIE ATOMIQUE ENTRE
D'ETUDES NUCLEAIRES DE GRENOBLE
Lab. d'Applications Spéciales de la Physique

DS 1971:38

15.9.1971

Föredrag vid Institut für Chemie der Treib- und Explosiv-
Stoffe, Jahrestagung 1970, Karlsruhe, Bundesrepublik
Deutschland.

Översättning av Algot Persson
Originalets titel: Attenuation de L'onde Aerienne D'Explosions
Chimiques Dans Des Sols.

Sammanfattning:

Detta är en sammanställning av experimentella resultat erhållna vid
mätningar av luftstöt vågen från lika laddningar av kemiska sprängäm-
nen som avfyras i marken på olika djup.

Laddningarna som användes var s.k. Gomme A (gummidynamit) och TNT mängd
1, 10 och 50 kg vid skjutning i lera och en dynamit med beteckningen
Gomme AS, mängd 3, 7 och 11 g vid skjutning i sand. Ljudvågen mättes
och registrerades på olika avstånd från explosionsplatsen.

1. Inledning

Studiet av de kratrar som åstadkommes av sprängladdningar i marken har fört oss in på mätningar av luftstöt vågen från laddningar om 1 till 50 kg i lera och laddningar om 3 till 11 g i sand.

Vi känner till att stöt vågen på stort avstånd från explosionscentrum för en nergrävd laddning beror av tre huvudfaktorer

- a/ storleken av den våg som samma laddning åstadkommer i fria luften
- b/ dämpningen till följd av nergrävningen av laddningen i marken
- c/ eventuell fokusering till följd av olika atmosfäriska faktorer (temperaturinversioner, höjdvindar, reflexion mot vissa skikt i atmosfären).

Vi redovisar resultaten av våra mätningar relativt nära explosionen och har inriktat oss på att bestämma en dämpningsfaktor som funktion av explosionscentrums djup.

2. Sprängning i lera

I en serie experiment med avsikt att studera kraterbildning vid detonation i lera utfördes vi i september-oktober 1968 sprängningar vid vilka luftstöt vågen uppmättes /5/.

2.1 Sprängämnen

Vi har använt TNT och dynamit, Gomme A vars karakteristiska data är enligt /4/ och /7/.

Data \ Sprängämne	TNT	Gomme A
Expl. energi, cal/g	1000	1545
Ekv. faktor TNT	1	1.54
Detonationshast. m/s	6900-7000	7800
Täthet g/cm ³	1.64	1.50
Spec. gasvolym cm ³ /g	690	710

De använda laddningarna har varit 1, 10 och 50 kg av vardera sprängämnet. TNT-laddningarna var cylindriska medan dynamitladdningarna var i stort sett sfäriska.

2.2 Markförhållanden

Chambaranlera består dels av en lera som är grå i ytan och gul på djupet dels andra delar av svartaktiga konkretioner. Skikten är horisontella och växlar till ett stort djup. De karakteristiska mekaniska egenskaperna för de olika skikten är samlade i en tabell nedan och i fig. 1 återfinnes granularitetskurvor för skikten liksom ett exempel på kohesionsprofilen som funktion av djupet.

Egenskap		Sort	A	B	C
Täthet, torr	d	g/cm ³	1.43	1.63	1.72
Täthet, fuktig	h	g/cm ³	1.78	1.96	2.10
Kornens täthet	G	g/cm ³	2.7	2.7	3.0
Vattenhalt	W	%	25	20	22
Mättningsgrad	S _r	%	75	83	89
Kohesion	C	bar	0.4	4	2
Friktionsvinkel	φ	°	2	2	2

2.3 Mätanordningar

Luftstöt vågsmätningar utfördes i närheten av marken på olika punkter belägna på ett avstånd från explosionsplatsen varierande från 30 till 400 m och i ett ljudintensitetsområde mellan 0.1 - 100 mbar. Ljudets fortplantning kan betraktas som direkt.

Två sorters tryckgivare användes, piezoelektriska givare och kapacitiva givare.

Givarsignalerna förstärktes och registrerades på magnetband.

a. Piezoelektriska givare

Dessa bestod av keramiska givare av bariumtitanat, godkända av O.N.E.R.A. (3) för mätning av ljudbangar. Data för den använda modellen är följande:

Ingångsimpedans	$10^9 \Omega$
Frekvensområde	0.1 Hz - 20 Hz
Känslighet	60 - 100 mV/mbar
Mätområde:	upp till flera bar

Givaranordningen som är cylindrisk, (ϕ 20 cm, h = 5 cm) är placerad platt på marken med keramikplattan parallell med vågens fortplantningsriktning och mäter det statiska övertrycket.

b. Kapacitiva givare

Dessa var kondensatormikrofoner med hög känslighet täckande ett stort mätområde. I den mån att riktningen för membranet är parallell med eller vinkelrät mot vågens fortplantningsriktning mäter man det statiska respektive dynamiska trycket i vågen.

Givarnas huvuddata är sammanställda nedan:

Fabrikat	Frekvensområde	Känslighet	Mätområde
Brüel & Kjaer	0.1 Hz - 20 kHz	40 $\mu\text{V}/\mu\text{b}$	10^{-3} - 600 mb
" "	1 Hz - 20 kHz	2 mV/ μb	0 - 0.2 mb
Sennheiser	0.1 Hz - 20 kHz	0.2 mV/ μb	0 - 5 mb

2.4 Resultat

2.4.1 Allmänna resultat

För varje avfyringsdjup och för varje laddning är det möjligt att rita upp kurvor för förändringen av övertrycket (= positiva max.-trycket) och undertrycket (negativa max.-trycket) som funktion av avståndet till explosionscentrum. Detta har vi visat i fig. 2 för en laddning av 10 kg TNT placerad på olika djup mellan 0 och 2.4 m. Kurvorna för de övriga laddningarna blir analoga. Det är av intresse att använda reducerade variabler i diagrammen d.v.s. avståndet divideras med tredje roten ur laddningsvikten.

Man har likaledes uppritat förloppet för övertrycket och undertrycket av explosionsvågen från skott på marken som funktion av reducerade avståndet $X/W^{1/3}$. I fig. 3 och fig. 4 har man dessutom lagt in de teoretiska kurvorna enligt Berger och Viard [2].

På samma sätt har man avsatt den reducerade varaktigheten av övertrycks- och undertrycksfaserna som funktion av reducerade avståndet och reducerade djupet se fig. 5 och 6.

En sammanställning av övertrycket (positiva max.-trycket) i samtliga mätningar finns i fig. 7. Vi är framförallt intresserade av det positiva max.-trycket som har det största absolutvärdet och är det farligaste.

2.4.2 Dämpningsfaktor

För att kunna bedöma dämpningen av luftvågen vid jordtäckning är det av intresse att införa en dämpningsfaktor som anger förhållandet mellan det övertryck som erhålles av en laddning nergrävd på djupet H_E och övertrycket från samma laddning på markytan ($H_E = 0$). Dessa båda övertryck mätta på samma avstånd (X) från explosionscentrum ger dämpningsfaktorn

$$T = \frac{P(W, H_E, X)}{P(W, 0, X)}$$

Med kännedom om dämpningsfaktorn T och kurvan ΔP som funktion av reducerade avståndet vid $H_E = 0$, är det då möjligt att beräkna storleken av det övertryck som åstadkommes av en nergrävd laddning på måttligt avstånd. (På längre avstånd bör man ta hänsyn till påverkan av fokuserande faktorer vid utbredning genom den högre atmosfären).

Vi skall undersöka hur dämpningsfaktorn varierar vid sprängning i Chambaranlera. T.ex. vi har ritat kurvan $T(H_E, X)$ för 10 kg TNT. Värdena är härledda ur fig 2 och kurvorna återfinnes i fig. 8. Beror det av det reducerade avståndet i fig. 9 är beräknat ur värdena i fig. 7.

Man bör lägga märke till att dämpningsfaktorn i dessa två diagram beror av mätavståndet och att dämpningsfaktorn växer med avståndet.

Vi skall i paragraf 4 undersöka de olika parametrarna som påverkar dämpningsfaktorn.

3. Sprängning i sand

Dessa försök gjordes i modellskala. Vi utförde i juni-juli 1969 sprängningar med små laddningar av dynamit (Gomme AS) i fuktig sand varvid vi lagt oss vinn om att utföra försöken på ett sådant sätt att man hade likartade mekaniska egenskaper från fall till fall.

3.1 Sprängämne

Runtomkring änden på en vanlig elektrisk sprängkapsel har vi format nära nog sfäriska laddningar av Gomme AS. Karakteristiska data för Gomme AS framgår av nedanstående tabell:

Expl. energi	1380 cal/g
Ekv. faktor TNT	1.38
Det.hast.	7000-7500 m/s
Täthet	1.5 g/cm ³
Spec. gasvolym vid 0°C	638 cm ³ /g

Energien som frigöres av sprängkapseln är ungefär 170 cal och laddningsstorlekarna var 3.4 g, 7.15 g och 11 g, Gomme AS. Frigjord energi 5000, 10000 och 15000 cal respektive. D.v.s. att laddningarna motsvarar 5, 10 och 15 g TNT respektive. I fortsättningen anger vi laddningarna med dess ekv. mängd TNT. Denna ekvivalens är emellertid inte giltig annat än då energin betraktas. Man bör komma ihåg att dynamiten som användes har andra data som skiljer sig från motsvarande data för TNT t.ex. detonationshastighet och detonationstryck.

3.2 Markförhållanden

Vi har använt sand från Vourey (Isère), vars granularitetskurva vi återfinner i fig. 10, med två skilda tätheter 1.30 och 1.60 g/cm³.

Sandens karakteristiska egenskaper framgår av nedanstående tabell:

Egenskaper		Sort	opackad sand	packad sand
volymtäthet				
fuktig	h	g/cm ³	1.30	1.60
fukthalt	w	%	5	5.5
friktionsvinkel	θ	ϕ	28	32
kohesion	C	g/cm ³	20	66
seismisk hast.	c	m/s	300	413

3.3 Mätanordningar

Luftstötuvågen har mätts med hjälp av kondensatormikrofon placerad i vågens utbredningsriktning 1 m över marken. Man mäter det dynamiska trycket på avstånd mellan 3 och 100 m.

Karakteristiska data för mikrofonerna är samlade nedan:

Givare	Frekvens område	Känslighet
Brüel & Kjaer 4138	20 Hz - 150 kHz	0.05 mV/ μ b
Sennheiser SZ 110/I	0.1 Hz - 20 kHz	0.2 mV/ μ b
Sennheiser SZ 110	50 Hz - 20 kHz	2 mV/ μ b

Som i föregående försök registrerades trycktidförloppet på magnetband.

3.4 Resultat

3.4.1 Allmänna resultat

Man finner resultatet i tabellerna 1 och 2 som är en sammanställning av de mätningar som gjordes på 57 skott. Vi har med hjälp av dessa värden ritat upp de följande kurvorna. Luftstötstångens avtagande max. tryck som funktion av avståndet och sandens täthet (Fig. 11 och 12). Avsaknanden av mätvärden i den andra försöksserien med packad sand har inte gjort det möjligt att tydligt härleda inverkan av sandens täthet ty de två föregående diagrammen är inte överensstämmande.

De följande kurvorna hänför sig till försöken i packad sand.

- a) Positiva maxtrycket på konstant avstånd som funktion av laddningsdjupet för de tre laddningsstorlekar som användes (Fig. 13).

Man lägger märke till att för området laddningar i luft ($H_E = 0$) närmar sig kurvan en horisontell asymptot, varvid övertrycket förblir oberoende av laddningens höjd över marken. Neg.max.-tryckets variation ger analoga kurvor.

- b) Pos. max. trycket som funktion av avståndet och laddningsdjupet för en given laddning 10 g TNT (Fig. 14).
- c) Pos. max. trycket som funktion av reducerade avståndet (Fig. 15).

Vi har inte redovisat mer än två laddningsdjup för att inte överbelasta diagrammet.

3.4.2 Dämpningsfaktorn.

Som i det föregående har vi uppritat förloppet för T i de båda sammanhängande systemen

- a) som funktion av laddningsdjupet och avståndet för en given laddning (5 g TNT) (Fig. 16). Studium av denna kurva visar att det är rimligt att bortse ifrån inverkan av avståndet på dämpningsfaktorns storlek.
- b) som funktion av reducerade laddningsdjupet och avståndet (Fig. 17). Till följd av punkternas spridning framträder ändå inte inverkan av avståndet när det representeras på detta sätt.

4. Slutsatser

4.1 Dämpningsfaktorns parametrar

Dämpningsfaktorn T beror huvudsakligen av följande parametrar:

- a) laddningens energi W
- b) djupet som laddningen avfyras på (H_E eller H)
- c) avståndet till explosionscentrum
- d) markens beskaffenhet
d.v.s. $T(W, H, X, \text{mark})$

Genom att använda reducerade variabler kan man eliminera inverkan av laddningsstorleken

$$T (H/W^{1/3}, X/W^{1/3}, \text{mark})$$

Dämpningsfaktorn kan å andra sidan antaga olika värden om man betraktar det statiska eller dynamiska övertrycket ΔP . Under alla förhållanden är det inte möjligt att utesluta att dämpningsfaktorn är oberoende av ΔP .

Vi har inte försökt ta i beräkning inverkan av sådana sprängämnesegenskaper som inte framträtt vid dessa experiment.

4.2 Jämförelse med amerikanska resultat

Vi har återgivit i fig. 18 med fyra kurvor faktorn T :s beroende av det reducerade laddningsdjupet. Man behöver inte bevisa att de observerade differenserna inte härrör från markens beskaffenheter utan som vi nyss har sett är ett avståndsberoende. Mätningarna i sand har gällt det dynamiska trycket medan mätningarna i lera har gällt det statiska trycket.

De amerikanska resultaten enligt referens /6/ är skott med stora sprängladdningar och kärnladdningar i berg och i slam.

Man konstaterar att kurvformerna inte är helt olika och utöver ett visst djup kurvornas läge beror av materialegenskaperna.

T.ex. för $H_E = 1.5 \text{ cm} / (\text{kg TNT})^{1/3}$ ökar storleken av överföringsfaktorn T i ordning enligt följande

sand, slam, lera, berg.

Då tätheterna är 1.30, 1.65, 1.90 och 2.2 - 2.7 g/cm³ respektive är den hypotes vi kan tillåta oss att förklara fenomenet med följande. Vid ett visst laddningsdjup är trycktidförloppets utseende och dess början beroende av den våg som induceras av stöten i marken, (se fig. 19 som erhållits ur referens /6/.) Dämpningsfaktorn kan då betraktas som ett materials förmåga att fortplanata en stöt d.v.s. i detta fall i ordning efter täthet och ökande seismisk hastighet.

LITTERATURE REFERENSE:

- 1) AUSSEDAT G., OULON M. et GAUTIER J.
Cratères créés par de petites charges d'explosifs chimiques dans le sable.
Note CENG/ASP No 70 - 06. Mars 1970
- 2) BERGER J. et VIARD J.
Physique des explosifs solides.
Dunod. Paris 1962
- 3) LIENHARD P. et LAMBOURION J.
Qu'est-ce que le bang sonique?
Annales des télécommunications. Cahiers d'acoustique.
Tome 22, n° 3-4. Mars-Avril 1967.
- 4) Manuel Bickford, Ets DBS, Rouen, 1961.
- 5) PERROUD P. et al.
Etude expérimentale des effets d'explosifs chimiques dans des sols: cratères, tranchées et phénomènes associés.
Rapport CEA R-3944 - 1970.
- 6) REED J.W.
Air blast from Plowshare projects.
Proceedings of the symposion on Education for the Peaceful Uses of Nuclear Explosives. Tucson
University of Arizona Press. Tucson. 1970.
- 7) URBANSKY T.
Chemistry and Technology of Explosives.
Pergamon Press, 1967.

Positiva och negativa dynamiska max. trycket i luftstötstången mätt på
avståndet R från explosionscentrum.

	k° tlr	H _c	1er capteur			2ème capteur			3ème capteur		
			R _e	Δp^+_{ub}	Δp^-_{ub}	R _e	Δp^+_{ub}	Δp^-_{ub}	R _e	Δp^+_{ub}	Δp^-_{ub}
5 g TNT	12	- 20	10	11 200	4950	30	2800	1650	100	590	540
	11	- 8	10	6 600	4550	30	NE	1250	100	720	670
	13	- 3	10	8 700	3500	30	2700	1550	100	610	550
	01	0		NE	NE		NE	NE		NE	NE
	02	3	10	3 300	1650	30	1350	700	100	330	260
	03	5	10	1 650	1250	30	850	400	100	200	160
	04	8	10	800	800	30	300	200	100	80	60
	05	10	10	0	0	30	0	0	100	40	30
	06	12,5	3	0	0	10	0	0	30	40	30
	07	15,5		NE	NE	4	200	100	10	70	35
10 g TNT	08	20		NE	NE	4	0	0	10	80	30
	09	24,5		NE	NE	4	150	0	10	50	30
	10	30		NE	NE	4	0	0	10	40	20
	14	- 7	10	12 400	5500	30	3200	3100	100	630	550
	15	0	10	12 000	5200	30	3100	3000	100	590	530
	16	4	5	25 200	13700	15	4650	2900	100	610	700
	17	9,5	5	2 500	1850	15	950	600	30	570	420
15 g TNT	18	12	5	NE	NE	10	200	200	30	NE	NE
	20	16		NE	NE	5	250	150	15	130	70
	19	20	5	NE	NE	10	NE	NE	30	50	15
	21	25		NE	NE	3	200	0	10	80	20
	22	30		NE	NE	3	0	0	10	50	10
	23	37		NE	NE	3	0	0	10	40	10
	34	- 5	10	15 300	11200	30	4650	NE	100	670	590
	33	0	10	13 200	10400	30	3600	3400	100	810	810
5 g TNT	32	5		NE	NE	10	4650	NE	30	670	630
	27	10		NE	NE	5	1550	1550	15	700	700
	28	13,5		NE	NE	5	500	400	15	150	200
	29	17,5		NE	NE	5	0	0	15	120	80
	30	21,5		NE	NE	3	600	0	10	170	50
	26	25,5		NE	NE	3	300	0	10	60	40
	25	30		NE	NE	3	0	0	10	70	30
	24	36		NE	NE	3	200	0	10	50	30
	31	39		0	0	3	0	0	10	40	40

Tabell 1.

Lös sand.

	k° tlr	H _c	1er capteur			2ème capteur			3ème capteur		
			R _e	Δp^+_{ub}	Δp^-_{ub}	R _e	Δp^+_{ub}	Δp^-_{ub}	R _e	Δp^+_{ub}	Δp^-_{ub}
5 g TNT	57	- 3		NE	NE		NE	NE		NE	NE
	56	0		NE	NE		NE	NE		NE	NE
	51	5	5	6200	2500	15	NE	NE	30	150	60
	52	10	3	1250	850	5	720	500	15	0	0
	53	15		NE	NE		NE	NE		NE	NE
	54	20		NE	NE		NE	NE	10	110	50
	55	24,5		NE	NE		NE	NE	5	190	60
10 g TNT	50	- 3		NE	NE		NE	NE		NE	NE
	49	0		NE	NE		NE	NE		NE	NE
	43	5	5	10000	5000	10	3700	1550	30	610	410
	44	10,5		NE	NE		NE	NE		NE	NE
	45	16	3	0	0	5	NE	NE	15	150	130
	46	20,5		NE	NE	3	0	0	10	100	40
	47	25		NE	NE	3	0	0	5	300	80
15 g TNT	48	30		NE	NE		NE	NE		NE	NE
	42	- 3		NE	NE		NE	NE		NE	NE
	41	0		NE	NE		NE	NE		NE	NE
	40	5	4	25700	14500	10	5000	NE	30	920	810
	39	10		NE	NE	5	0	0	15	070	460
	38	15		NE	NE		NE	NE		NE	NE
	37	21		NE	NE		NE	NE		NE	NE
	36	27		NE	NE	3	0	0	10	130	50
15 g TNT	35	35,5		NE	NE	3	NE	NE	10	170	50

Tabell 2.

Packad sand.

Anmärkningar: NE betyder att ingen registrering erhöjits eller att
densamma var oanvändbar.

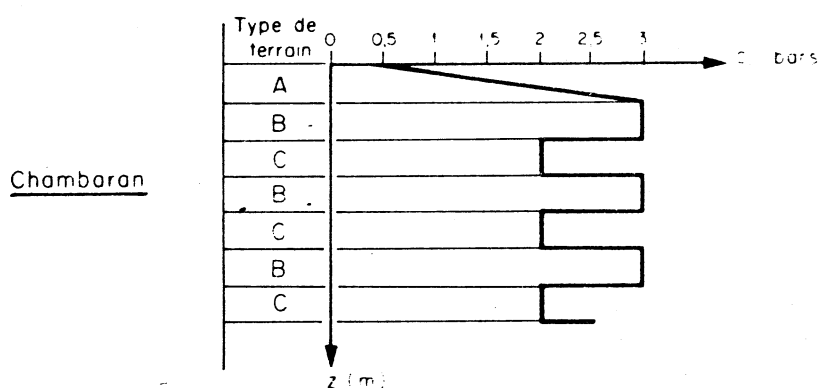
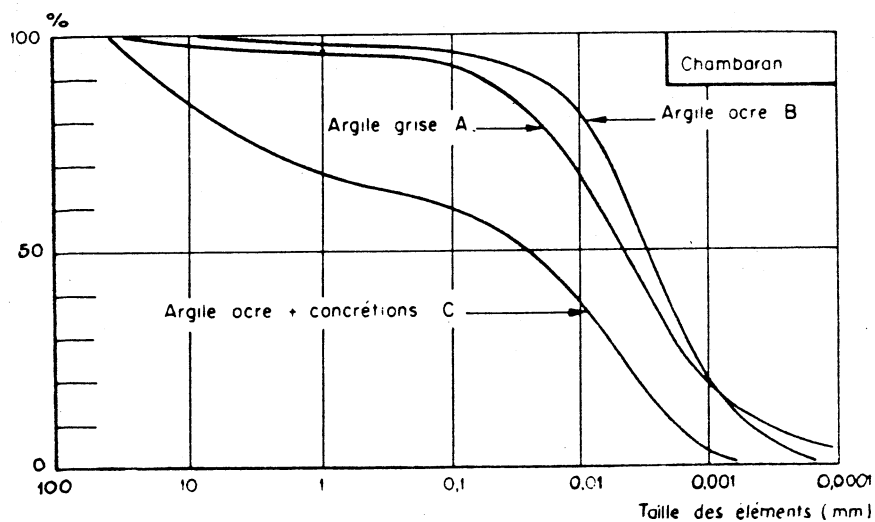


Fig. 1. Kohesionsprofil för Chambaranlera.

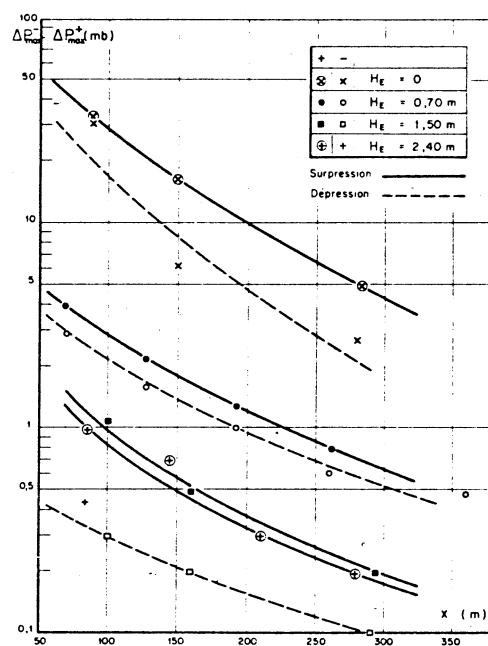


Fig. 2. Lera. 10 kg TNT. Stötvågens positiva och negativa max. tryck (ΔP statistiskt) som funktion av avståndet till explosionscentrum.

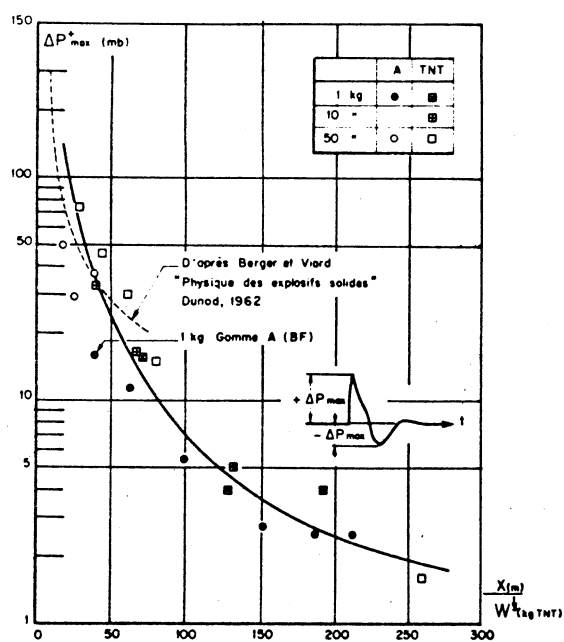


Fig. 3. Lera. Stötvågens positiva max. tryck som funktion av reducerade avståndet. Laddningen på markytan ($H_E = 0$, ΔP statiskt).

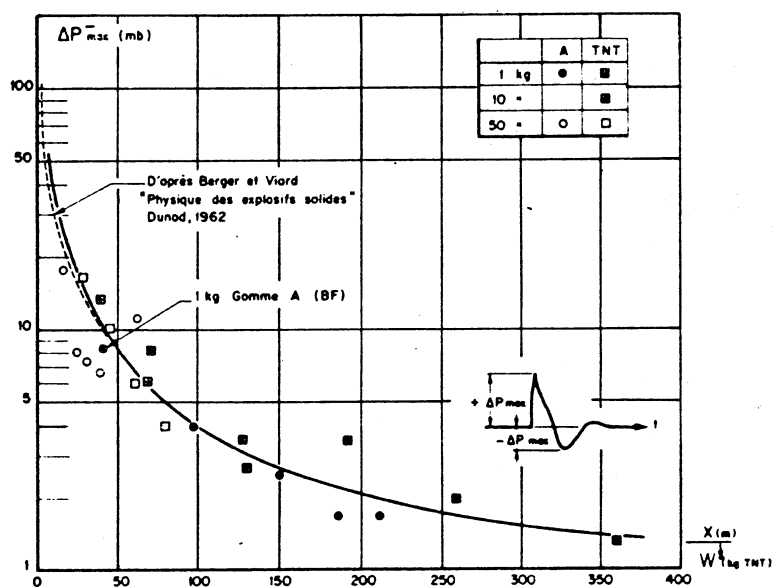


Fig. 4. Lera. Stötvågens maximala undertryck. Laddningen på markytan $H_E = 0$ (ΔP statiskt).

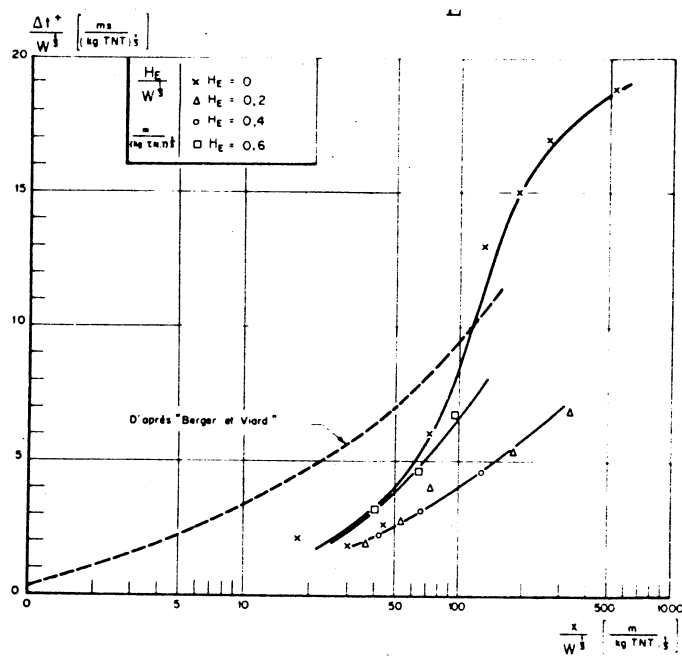


Fig. 5. Reducerade varaktigheten av pos. tryckfasen.

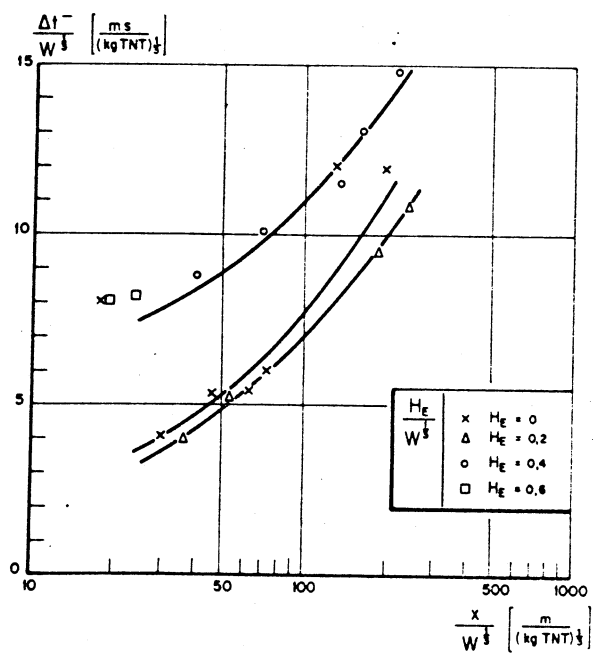


Fig. 6. Reducerade varaktigheten av neg. tryckfasen.

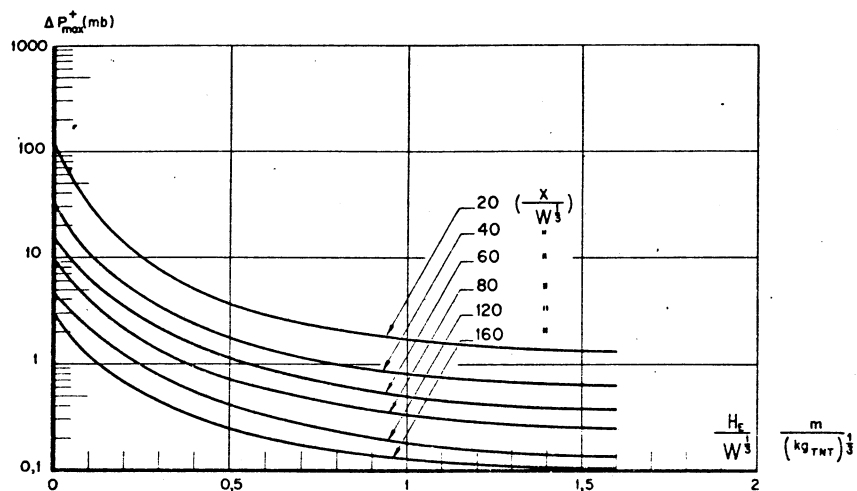


Fig. 7. Lera. Stötvågens positiva max. tryck som funktion av reducerade laddningsdjupet för olika avstånd (reducerat) (ΔP statiskt.)

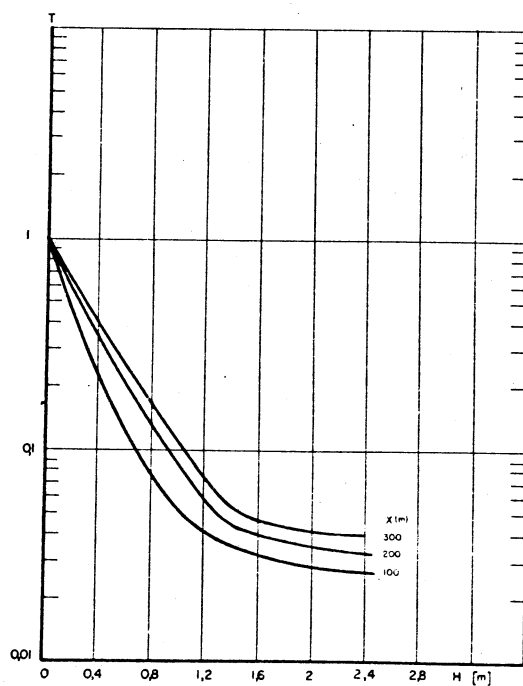


Fig. 8. Dämpningsfaktorn som funktion av laddningsdjupet och distansen för laddningar om 10 kg TNT i lera.

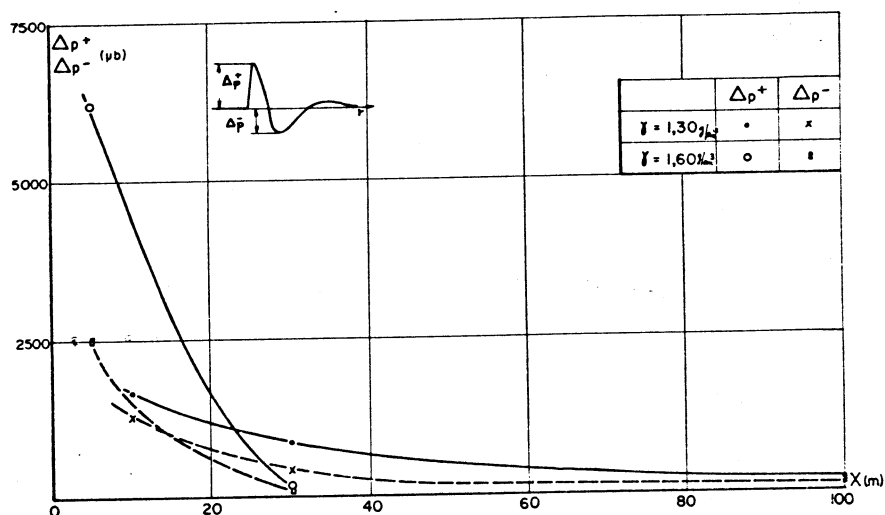


Fig. 11. 5 g TNT på $H_E = 5$ cm. Max. tryckets avtagande som funktion av avståndet och sandens packningsgrad.

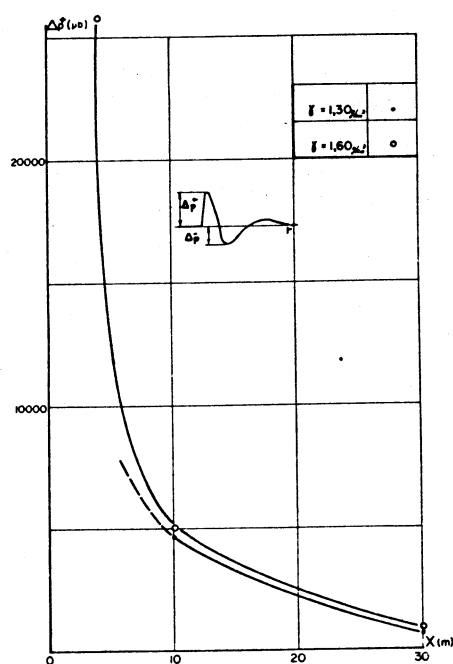


Fig. 12. 15 g TNT på $H_E = 5$ cm. Max. tryckets avtagande som funktion av avståndet och sandens packningsgrad.

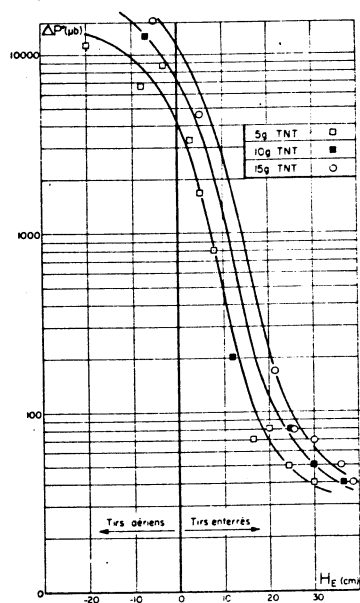


Fig. 13. Luftstötstågens positiva max. tryck som funktion av laddningsmängd och laddningsdjup på konstant avstånd från explosionsplatsen $X = 10$ m.

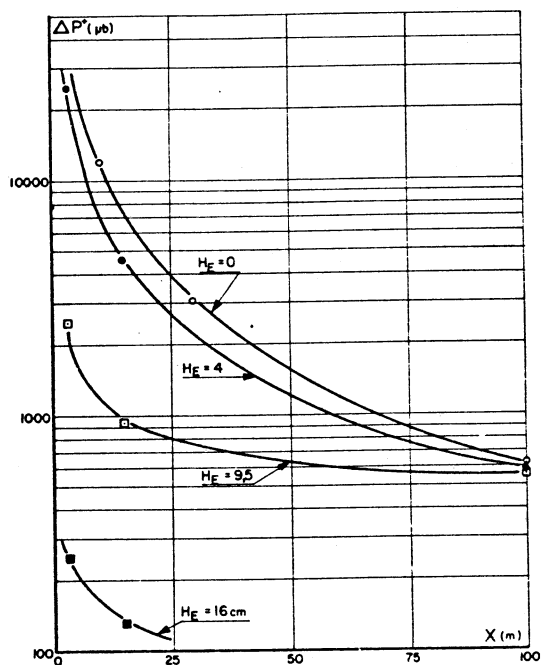


Fig. 14. Luftstötstågens positiva max. tryck som funktion av avståndet och laddningsdjupet $W = 10$ g TNT.

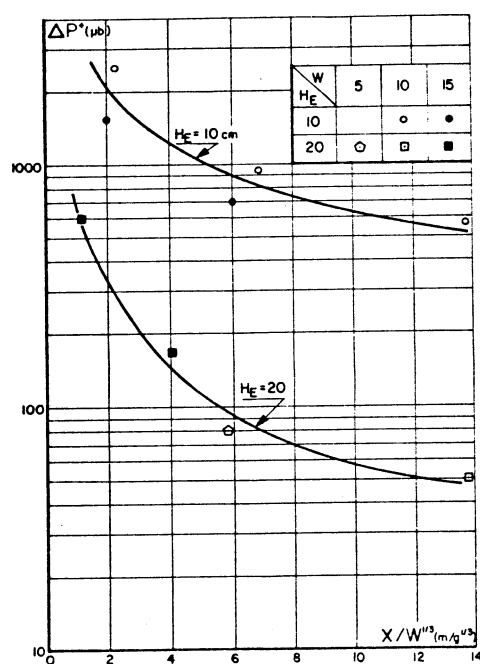


Fig. 15. Luftstöt vågens positiva max. tryck som funktion av reducerade avståndet och laddningsdjupet.

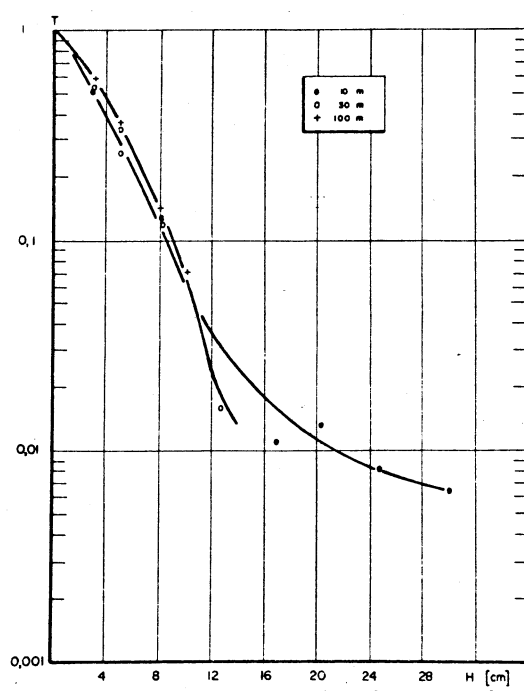


Fig. 16. Däpningsfaktorn som funktion av laddningsdjupet och avståndet för laddningar om 5 g TNT i sand.

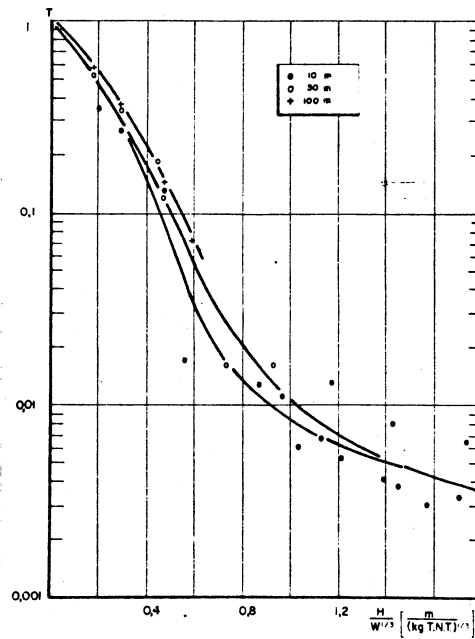


Fig. 17. Dämpningsfaktorn som funktion av reducerade laddningsdjupet.
för skott i sand.

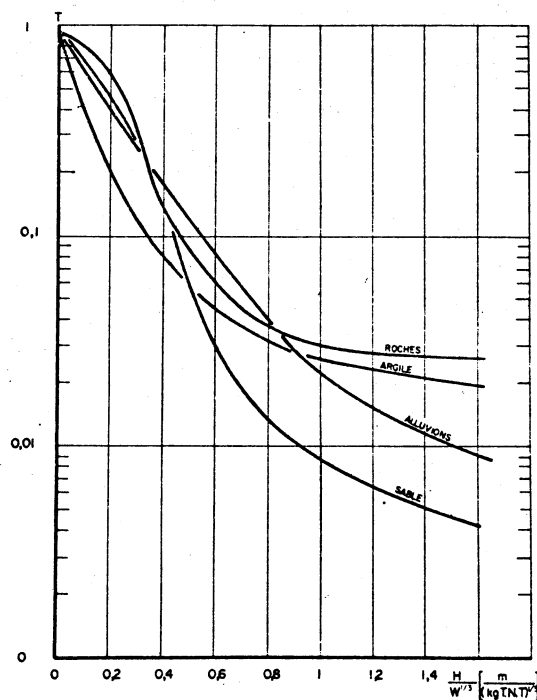


Fig. 18. Dämpningsfaktorn som funktion av reducerade laddningsdjupet i
fyra olika material. Roches = berg. Argile = lera.
Alluvion = slam. Sable = sand.

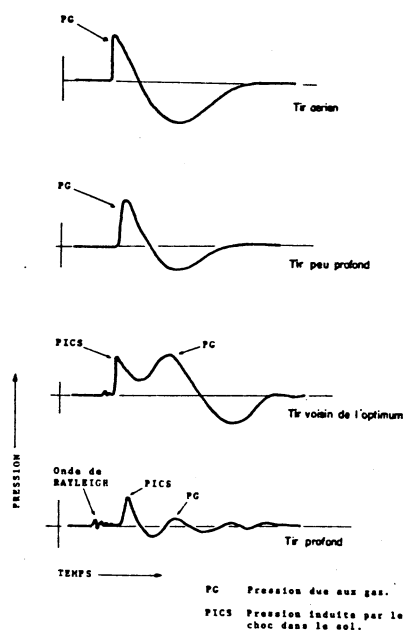


Fig. 19. Ljudsignalernas utseende vid olika laddningsdjup.