

NÅGOT OM LUFTSTÖTVÅGOR, LJUDBANGAR OCH
BULLER.

Nils Lundborg

DS 1970:11

1.4.1970

STIFTELSEN
SVENSK DETONIKFORSKNING
SWEDISH DETONIC RESEARCH FOUNDATION

VINTERVIKEN — 117 48 STOCKHOLM
SWEDEN

NÅGOT OM LUFTSTÖTVÅGOR, LJUDBANGAR OCH
BULLER.

Nils Lundborg

DS 1970:11

1.4.1970

Sammanfattning.

För att undvika bullerstörningar och skador på bebyggelse orsakade av luftstöt vågor från stora sprängsalvor eller överljudsplan, är det nödvändigt att mäta de tryck som förekommer i dessa stöt vågor och bestämma de värden vid vilka skador börjar uppträda. En viktig gräns är också när närboende anser sig störda från anläggningar av mera permanent natur (t.ex. sprängfogning, flyg- eller trafikbuller). För att få en uppfattning om vad som gjorts på de olika områdena har en kort sammanställning gjorts med utdrag ur olika litteratur. De försök som gjorts visar att de ljudtryck, som orsakar irritation från kontinuerligt buller ligger en tusenfaktor lägre än de som börjar ge skador på bebyggelse. Vid transienta förlopp anges att högre värden tolereras men gränsen är här mera osäker.

Innehåll.

1. Enheter vid bullermätning
2. Tryckförloppet från detonerande laddningar
3. Tryckförloppet från överljudsplan
4. Frekvensanalys av buller
5. Vädrets inverkan på stötvågor utbredning
6. Skadeverkan av stötvågor
7. Störande inverkan på närboende
8. Mätning av buller

1. Enheter vid bullermätning.

Stöt vågor, buller och överhuvudtaget allt som vi uppfattar som ljud är tryckvariationer, som fortplantar sig i luft. Beroende på tryck-tidförloppets utseende uppfattas ljudet som njutbart (musik) eller onjutbart (buller). Exakt samma ljud kan också beroende på attityd, sinnesstämning och yttre omständigheter vid olika tillfällen bedömas helt olika. Tryckförhållandet mellan de ljud som knappt uppfattas och de som börjar bli smärtsamma kan uppgå till 10^7 (tio miljoner). Man har därför infört en logaritmisk skala där trycket anges i decibel (dB).

$$\text{dB} = 20 \log \left(\frac{p}{p_0} \right) \quad (1)$$

där $p_0 = 2 \cdot 10^{-4} \mu\text{bar}$ har valts att representera örats hörseltröskel vid frekvensen 1000 Hz, som där ger 0 dB (se fig. 4). Enheten dB har dessutom fördelen av att vara internationell. Tabell 1 anger några andra vanligen använda enheter.

Tabell 1. Relationen mellan olika måttenheter

1 mb (millibar)	=	100 N/m ² (Newton per kvadratmeter)
1 μb (mikrobar)	=	0.1 N/m ² = 0.001 mb
1 psi (pound per square inch)	=	68.948 mb
1 psf (pound per square foot)	=	478.86 μb
1 kp/m ² (kilopond per kvadratmeter)	=	98.065 μb
1 foot	=	0.305 meter
1 Hz (Hertz)	=	1 p/s (Period/sekund)

Fig. 1 visar relationen mellan dB och μb , och fig. 2 ljudnivån i dB från olika ljudkällor som kan förekomma. Det mänskliga örat är olika känsligt för olika periodtal (svängningar per sekund). Fig. 3 och 4 ger exempel på detta. Vi ser att största känsligheten ligger vid 4000 Hz.

2. Tryckförloppet från en sprängladdning.

Trycket från en sprängladdning stiger i det närmaste momentant enligt fig. 5, för att sedan avta och bli lägre än atmosfärstrycket. Integralen av tryck-tid kurvan benämnes impuls. När stötvågen träffar en vägg ökar trycket varvid reflektionstryck och - impuls erhålles.

Trycket avtar med avståndet och utsträcks i tid enligt fig. 6, samt ökar med sprängämnets vikt. Man finner därvid att reducerade radien

$$r = \frac{R}{Q^{1/3}} \quad (2)$$

ger samma max.tryck, där R är avståndet och Q laddningsvikten. Fig. 7 visar de olika max.trycken som funktion av r. De heldragna kurvorna anger reflektionstrycket mot en fast vägg och de streckade det statiska trycket i stötvågen. Nederst är ett hjälpdigram för beräkning av r. Fig. 8 anger på samma sätt impulsen och fig. 9 varaktigheten av tryckvågen.

Vid små tryck ($r > 100$) erhålles enklare samband mellan de olika storheterna. Tabell II anger dessa relationer. mb.s är impulsen i millibar-sekunder, ms millisekunder och p/s perioder per sekund.

Tabell II. Några egenskaper hos luftstötvågor på avståndet R meter från en detonerande laddning om Q kg.

Max.tryck	$p_+ = 700 \frac{Q^{1/3}}{R} \text{ mb}$	(3)
Max.reflexionstryck	$\bar{p}_+ = 1400 \frac{Q^{1/3}}{R} \text{ mb}$	(4)
Pos. reflexionsimpuls	$\bar{i}_+ = \frac{5 \cdot Q^{2/3}}{R} \text{ mb.s}$	(5)
Total reflexionsimpuls	$\bar{i} = \frac{5,5 \cdot Q}{R^2} \text{ mb.s}$	(6)
Varaktighet	$t_{\pm} = 10 \cdot Q^{1/3} \text{ ms}$	(7)
Våglängd	$\lambda_{\pm} = 3 \cdot Q^{1/3} \text{ m}$	(8)
Frekvens	$f = \frac{50}{Q^{1/3}} \text{ p/s}$	(9)

3. Tryckförloppet från överljudsplan (bangar).

När ett flygplan går fortare än ljudhastigheten i luft uppstår bog- och aktervågor liksom från en gevärskula i luft eller en båt i vatten. Fig. 10 ger ett exempel på detta. I fig. 11 ser vi exempel på ljudbangars tidsförlopp från olika plan, och i fig. 12 max. tryckets variation med flyghöjden. I fig. 13 anges ljudbangens max. tryck (p) vid olika flyghöjder och den laddningsvikt (Q) i kg TNT som ger samma max. tryck vid detonation på samma höjd. Skador på fönster kan börja uppträda redan vid 1 mb, vilket motsvarar 8000 m flyghöjd eller 1300 kg TNT på samma höjd. Dessa tryck uppträder mitt under planets färdväg. Fig. 14 anger hur trycket avtar med avståndet från lodlinjen, för att så småningom plötsligt upphöra. Orsaken till detta torde framgå av fig. 14, och berörs närmare i punkt 5. Av fig. 15 framgår att trycket stiger till ungefär det dubbla när planets hastighet närmar sig ljudhastigheten i luften vid marken.

4. Frekvensanalys av buller.

Som förut nämnts är örats känslighet beroende av de frekvenser, som ingår i bullret, stötvågen eller ljudbangen (se fig. 4). Troligtvis är även byggnader och övrig material också känsligast för vissa frekvenser. Som bekant rasade ju Jerikos murar för trumpetstötar (Josua 6:20), och man vet att vissa toner från en fiol kan spränga en kristallvas.

Man brukar därför göra en frekvensanalys av ljudet. Detta kan ske antingen med hjälp av Fourieranalys /8/ eller med olika filter. Fig. 16 visar ett exempel på en analys med den senare metoden. Fig. 17 visar analysen av en stötvåg från en sprängladdning och fig. 18 från en ljudbang.

5. Vädrets inverkan på stötvågors utbredning.

Ljudhastigheten i luft är i stort sett oberoende av tätheten (trycket) men varierar med vindhastighet och temperatur. Vid stark vind adderas således vindhastigheten till den normala ljudhastigheten (330 m/s) och temperaturberoendet anges av formeln

$$c = 330 \sqrt{1 + \frac{t}{273}} \quad (10)$$

där t är temperaturen i $^{\circ}\text{C}$.

Fig. 20 och 21 anger hur temperaturen kan variera med höjden. Detta påverkar utbredningshastigheten och är bl.a. orsak till den effekt som anges i fig. 14, där bangen plötsligt försvinner. I fig. 22 och 23 anges hur stöt-vågen från en laddning utbreder sig vid olika temperaturvariationer och vindhastigheter. Fig. 24 anger samma effekter vid flygbangar. Fig. 25 visar hur stötvågstrycket från en sprängladdning varierar med vinkeln från vindriktningen vid en vindstyrka på 13,5 m/s. Fig. 19 visar hur en ljudbang ändras vid genomgång av en husvägg.

6. Skadeverkan av luftstötvågor.

Vid exponering i starkt buller under lång tid inträder småningom hörselnedsättning, vilken först drabbar de högre frekvenserna. Fig. 26 ger exempel på detta. Kgl. Arbetarskyddsstyrelsen har utfärdat vissa normer (fig. 27) som anger högsta tillåtna buller vid olika frekvens under varierande del av ett arbetsskift. Vid stötvågor och ljudbangar har man inte kunnat konstatera någon hörselnedsättning även vid upprepad exponering. Detta gäller naturligtvis vid de relativt måttliga tryck (~ 2 mb) det här är fråga om. Vid kraftigare exponering kan troligen även en enstaka stötvåg ge hörselnedsättning och vid c:a 500 mb anses trumhinnan spricka /11/.

Vid beräkning av skador på bebyggelse (väggar, dörrar och fönster) måste man skilja på tryck- och impulsbelastning. Om max.trycket är mindre än statiska hållfastheten föreligger ingen risk för skador, förutsatt att resonans ej förekommer. Vid transienta (hastigt övergående) förlopp uppkommer i regel ej resonans. Ovanstående krav kan ibland vara onödigt hårt, t.ex. vid mycket höga och kortvariga trycktoppar. Påkänningen får då i stället beräknas för impulsbelastning. Om ett av alternativen tryck- eller impulsbelastning uppfyller kravet, att konstruktionen håller, är detta ett tillräckligt villkor /12/.

Fig. 28 visar relationen avstånd - laddningsvikt. $\bar{s}_{omi}$ är gränsen då skador börjar uppträda på bebyggelse. Fig. 29 visar teoretiska beräkningar och experimentella resultat på gränsen för fönsterskador, samt fig. 30 fönsterskador och klagomål orsakade av ljudbangar.

7. Störande inverkan på närboende.

Gränsen då människor störs av buller beror till största delen på personernas attityd till störningskällan, sinnesstämningar och yttre omständigheter. Exakt samma ljud (t.ex. skottsalvor i en Vilda Väster film) kan i ena fallet verka njutbart, men under andra omständigheter vara synnerligen störande.

Fig. 31 anger dock att störningarna kan behandlas statistiskt. Figuren visar antalet störda vid olika ljudstyrka.

8. Mätning av buller.

Som framgår av fig. 3 och 4 är det mänskliga örat olika känsligt för olika frekvenser. Man försöker korrigera detta med olika dämpning i mätutrustningen som tar hänsyn till detta. Fig. 32 visar dämpningen för olika mätutrustningar, varvid bullerstyrkan alltid skall anges i t.ex. dB(A), dB(B) eller dB(C). En tredje vägningskurva dB(D) är även föreslagen. Vid starka ljud blir emellertid skillnaden mindre beroende av frekvensen (fig. 4). När det gäller åverkan på bebyggelse anges trycket vanligen i mb eller ev. dB, som anger det absoluta övertrycket relativt atm. trycket.

- Ref. 1. - Buller - Bok och Bild Förlag (1969).
Sv. Läkaresällskapets Medicinska
Riksstämman 1968.
2. - Sonic Boom - Boeing Document
D6A 10598-1 (1967).
3. Rylander, R.
Kajland, A, och
Sörensen, S. Medicinsk - hygienisk värdering av
Ijudbangar - Statens Inst. för
Folkhälsan. Rapport (1970).
4. Lundborg, N. Luftstöt vågors skadeverkan vid
sprängning. - Bergspr.komm. (1967).
5. Dietz, T. Super Silensair en tyst kompressor -
Tryckluft nr 3 (1969).
6. Granström, S.A. Loading Characteristics of Air
Blasts from Detonating Charges. -
Acta Polytechnica 3 nr 5 (1956) eller
- KTH:s handl. nr 100.
7. - Personlig skyddsutrustning,
II Hörselskydd - Kgl. Arbetarskydds-
styrelsen 45:2 (1961).
8. Manley, R.G. Waveform Analysis - Chapman & Hall
London (1945).
9. Cook, M.A. The Science of High Explosives
- Reinhold Book Corporation N.Y.
(1968).
10. Domenic, J. m.fl. Ground Measurement of Shock -
Wave Pressure for Fighter Airplanes
flying at very low Altitudes and
Comments on Associated Response
Phenomena - NASA Tech. Note D-3443
(1966).
11. Clemenson, C.J. An Experimental Study on Air Blast
Injuries - Acta Phys. Scandinavia
18 (1949).

12. Granström, S.A. Beräkningsmetod för stötvågsbelastade konstruktioner. - Kgl. Fort.förv. Rapport 103:18 (1958).
13. Persson, P.A. Luftstötvågons skadeverkan vid sprängfogning. - Rapport DL 1968:23.
14. Grant, R.L. m.fl. Effect of Weather on Sound Transmission from Explosive Shots. - Bureau of Mines RI 6921 (1967).

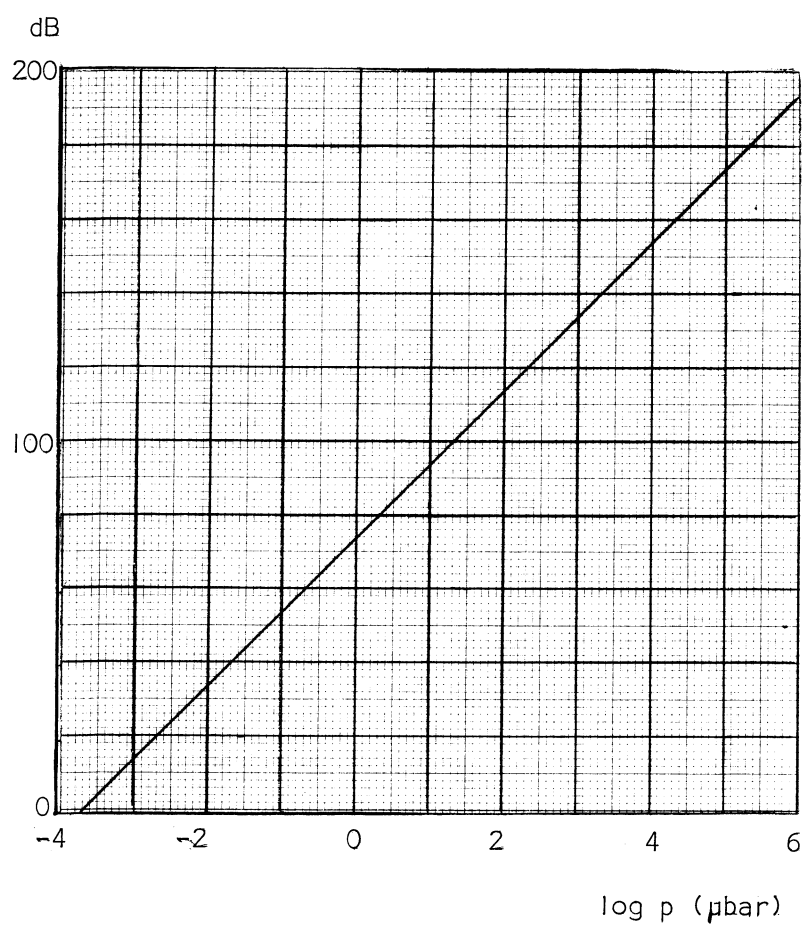


Fig 1. Relationen mellan trycket i μbar och dB

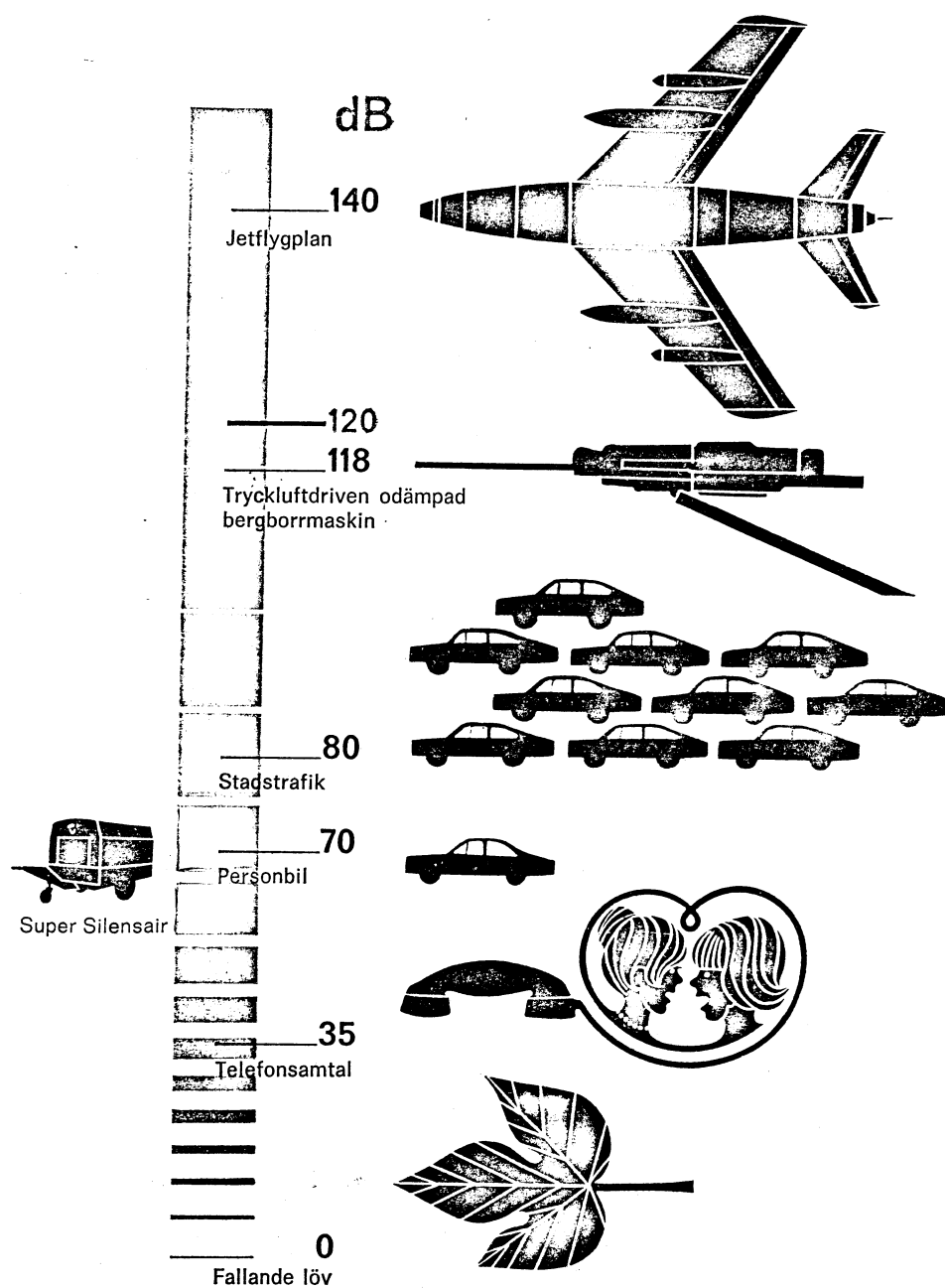


Fig. 2. Översikt av olika bullerkällor med Atlas Copcos Super Silensair transportabla kompressor inmärkt vid 70 dB. Fysisk smärta orsakas vid 130 dB. /5/

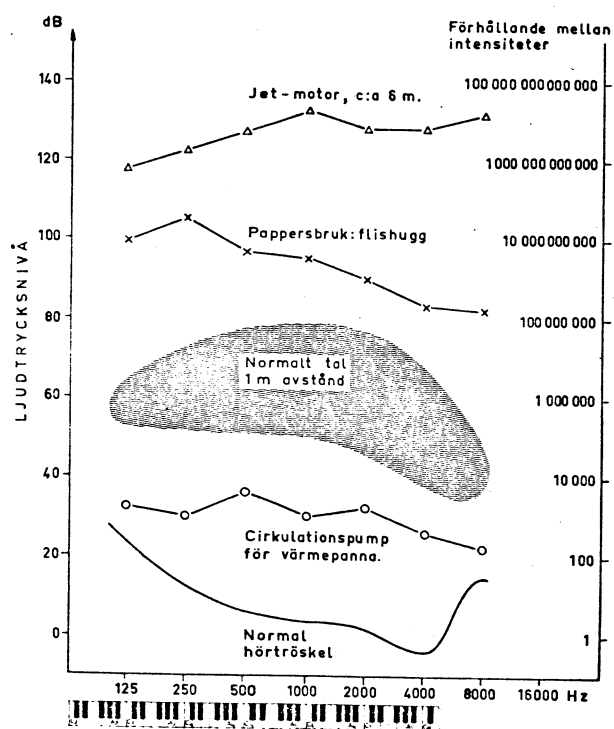


Fig. 3 Några olika ljudkällors ljudspektra i jämförelse med normal hörsel. (Ur Svensk naturvetenskap 1965, B. Johansson) //

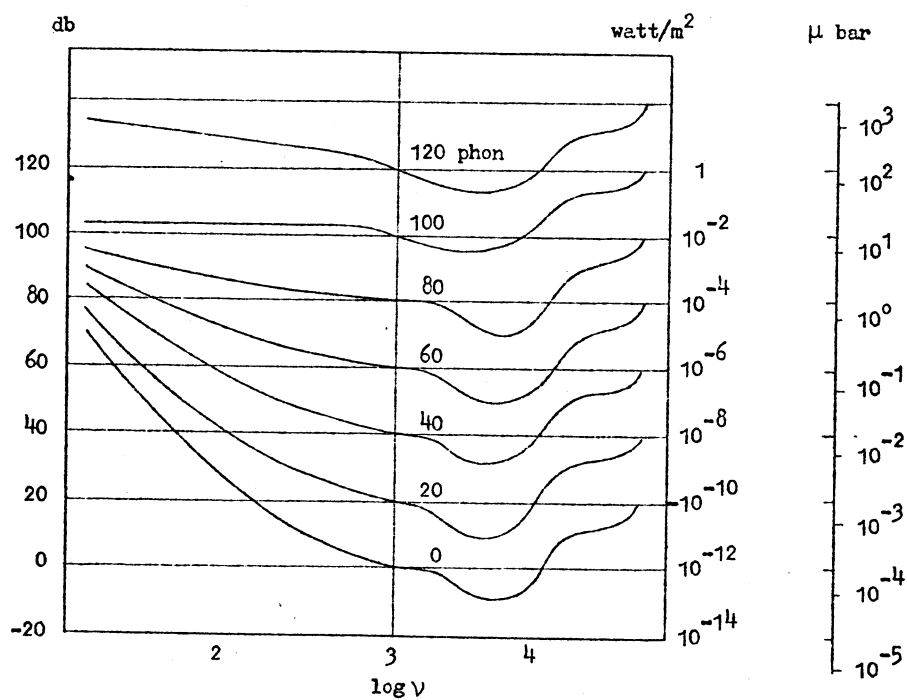


Fig. 4. Örats känslighet i phon vid olika frekvenser (ν).

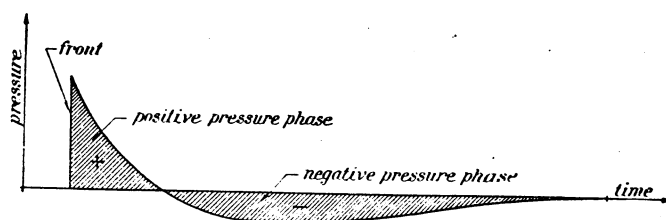


Fig. 5. Pressure-time curve of air blast.

/6/

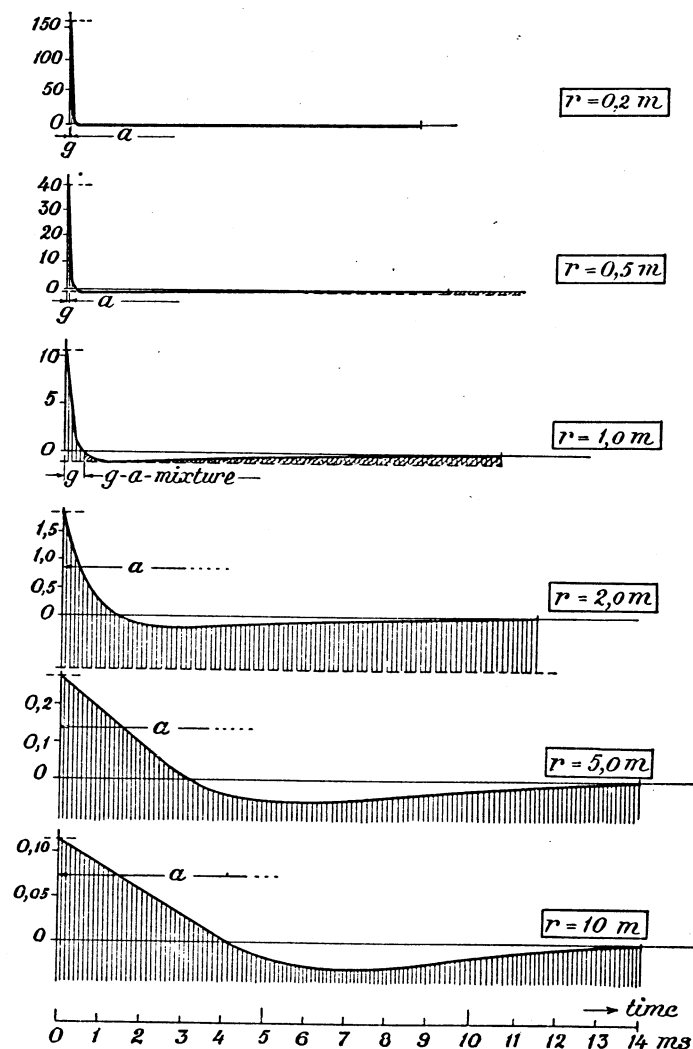


Fig. 6. Pressure-time curves at some selected distances from 1 kg charge of T.N.T. density 1,52 kg/dm³. The ordinates gives the static peak pressure in at. Negative pressure (1 at) corresponding to total vacuum is marked with a dash-line. g = gas, a = air.

/6/

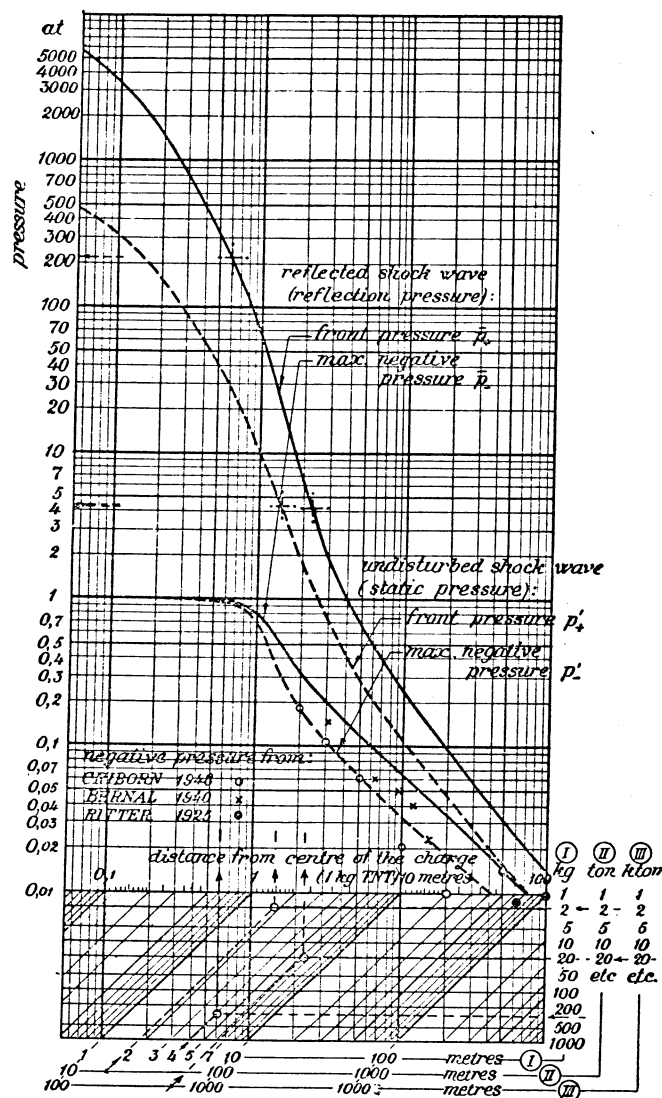


Fig. 7.. The front pressure and the maximum negative pressure as functions of the distance and the weight of charge. T.N.T. density 1,52 kg/dm³.

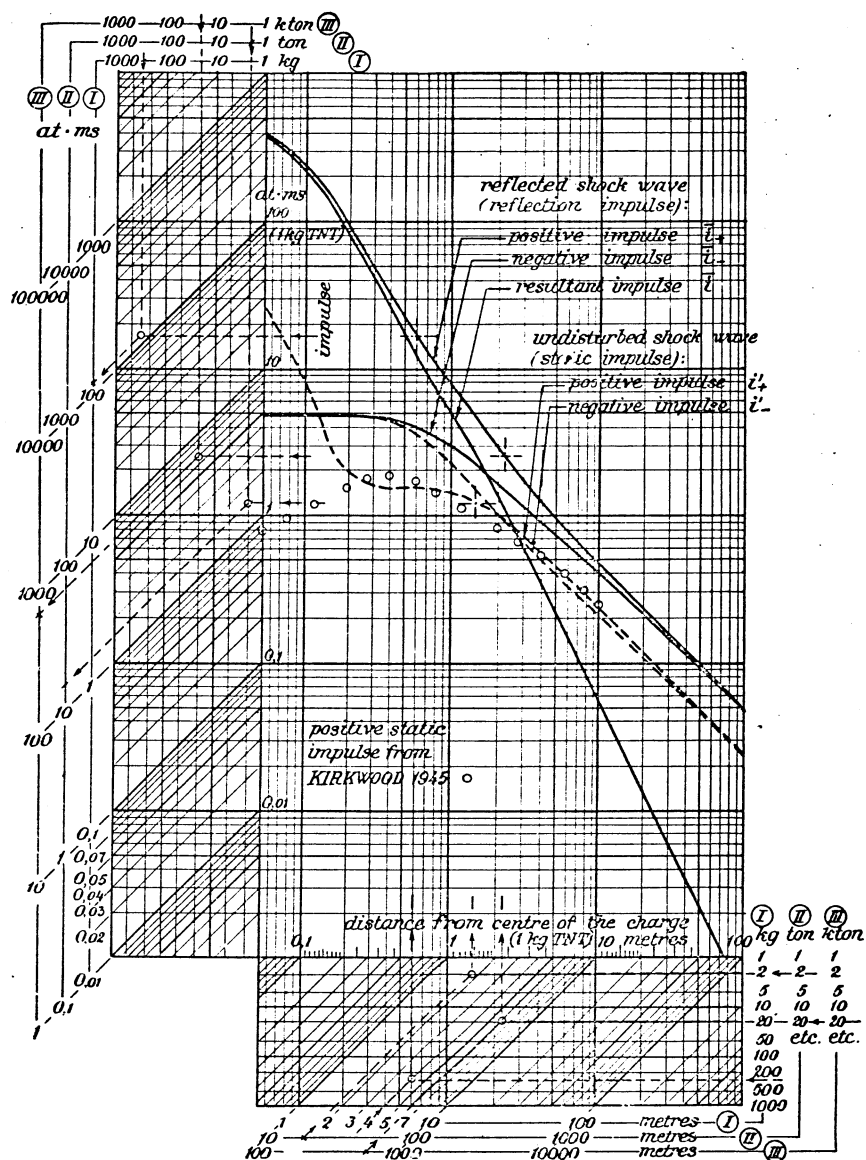


Fig. 8. Impulse characteristics as functions of the distance and the weight of charge.
T.N.T., density 1,52 kg/dm³.

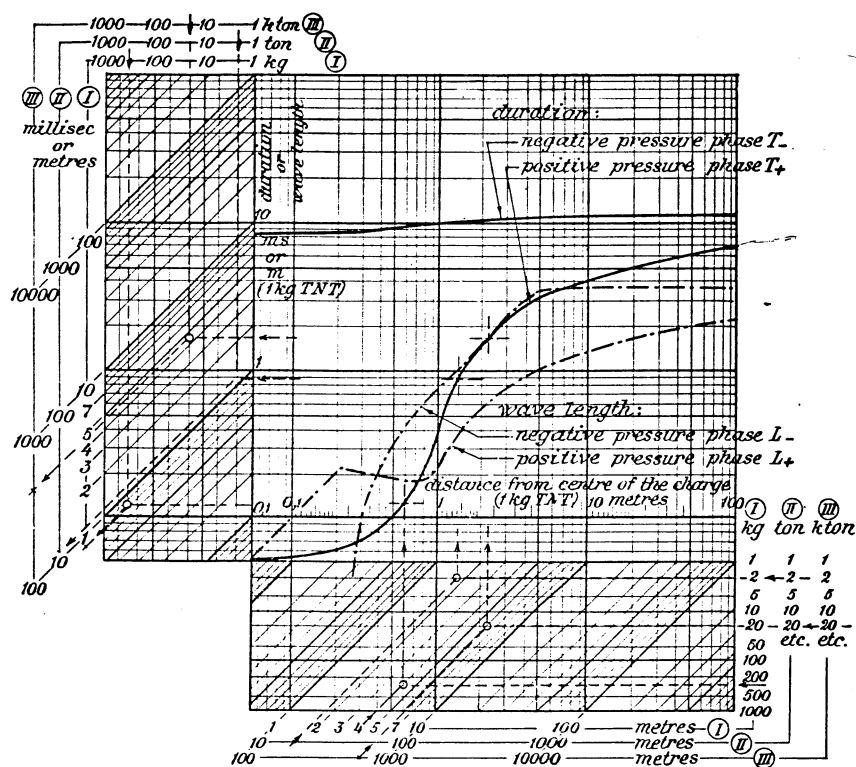


Fig. 9. The duration and the wave length as functions of the distance and the weight of charge. T.N.T. density $1,52 \text{ kg/dm}^3$. /6/

Whitham's theory allows pressure signatures for individual portions of the airplane to be analyzed and then combined to show an overall pressure signature.

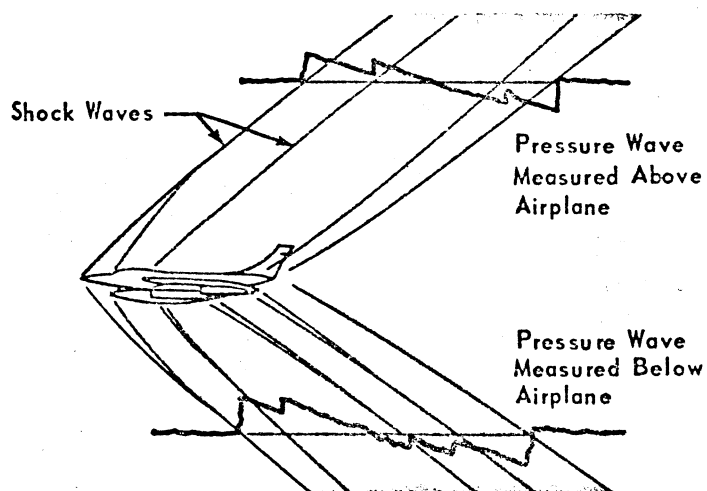


Fig. 10. Bogvågor från ett plan i överljudsfart. /2/

*Flight test data have verified
sonic boom theory*

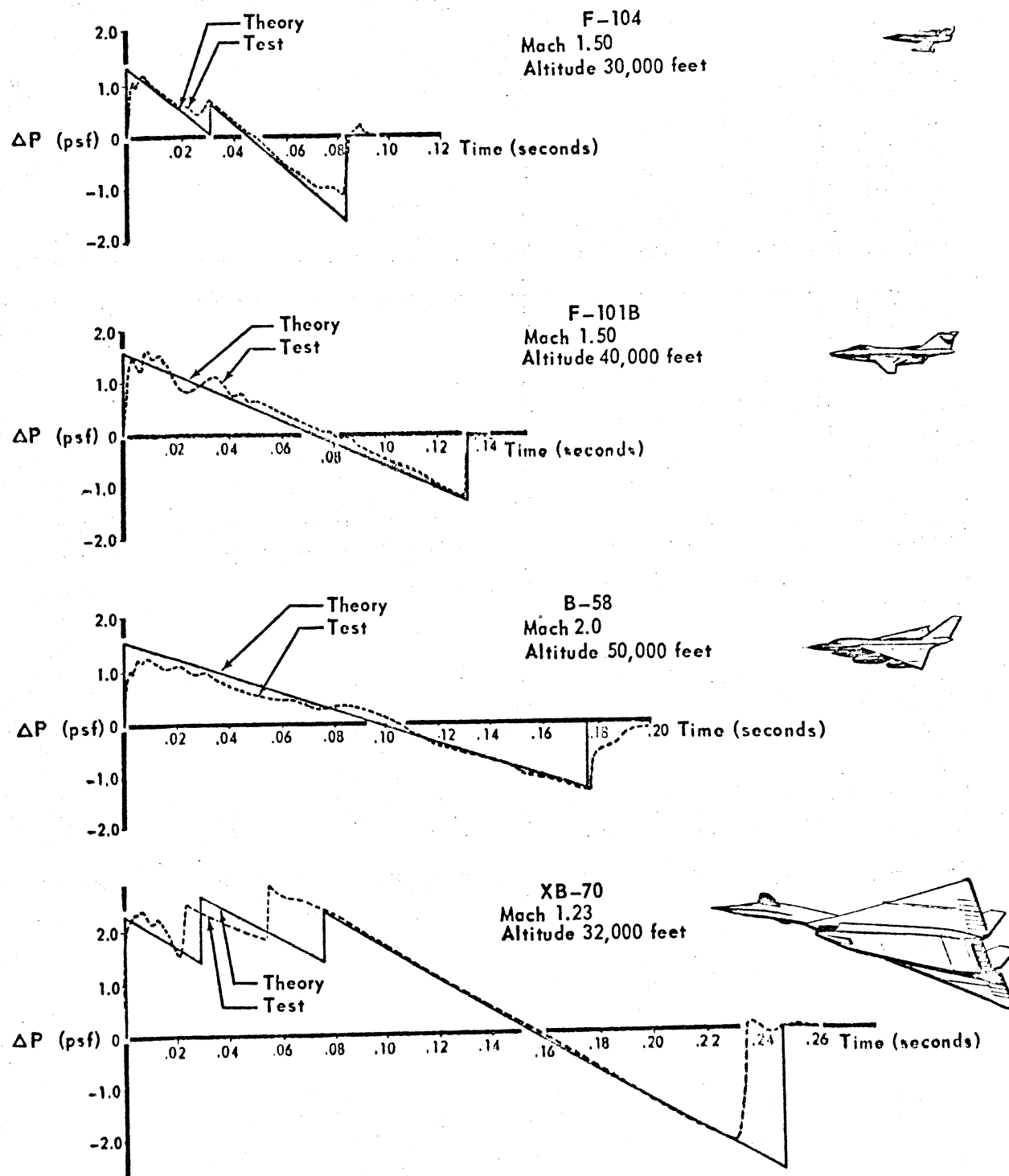
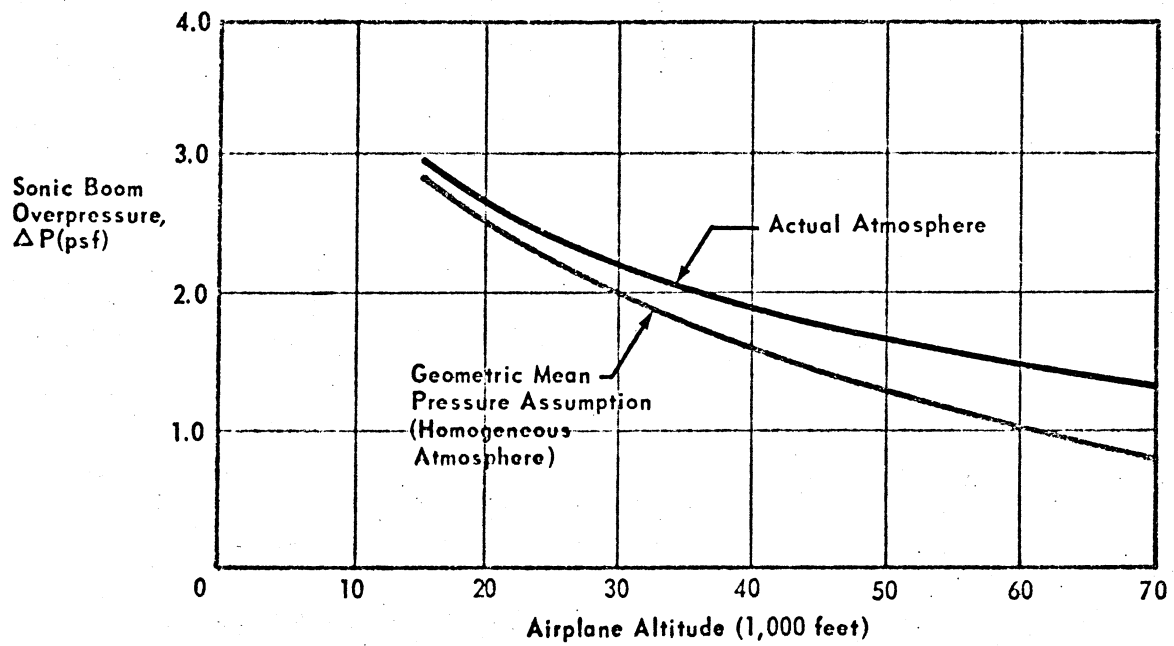
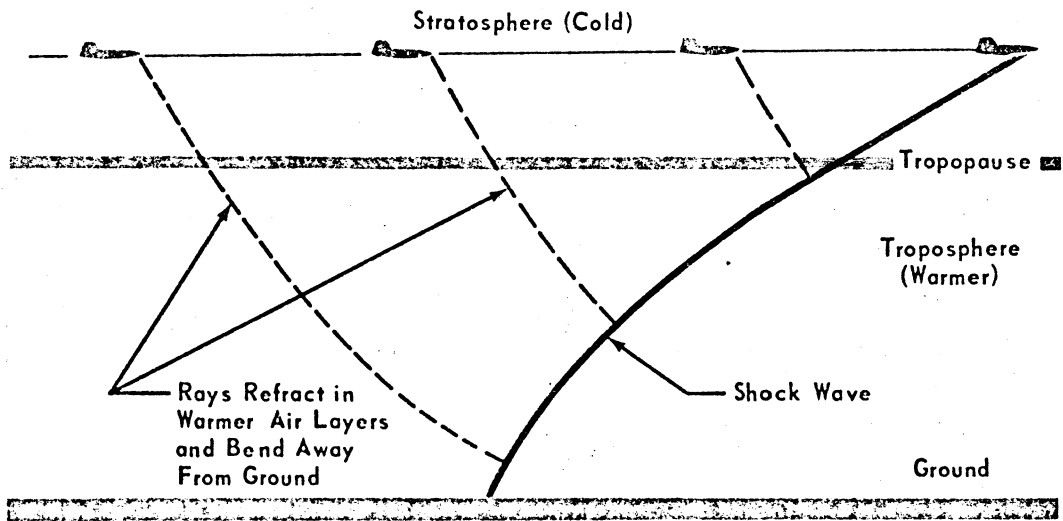
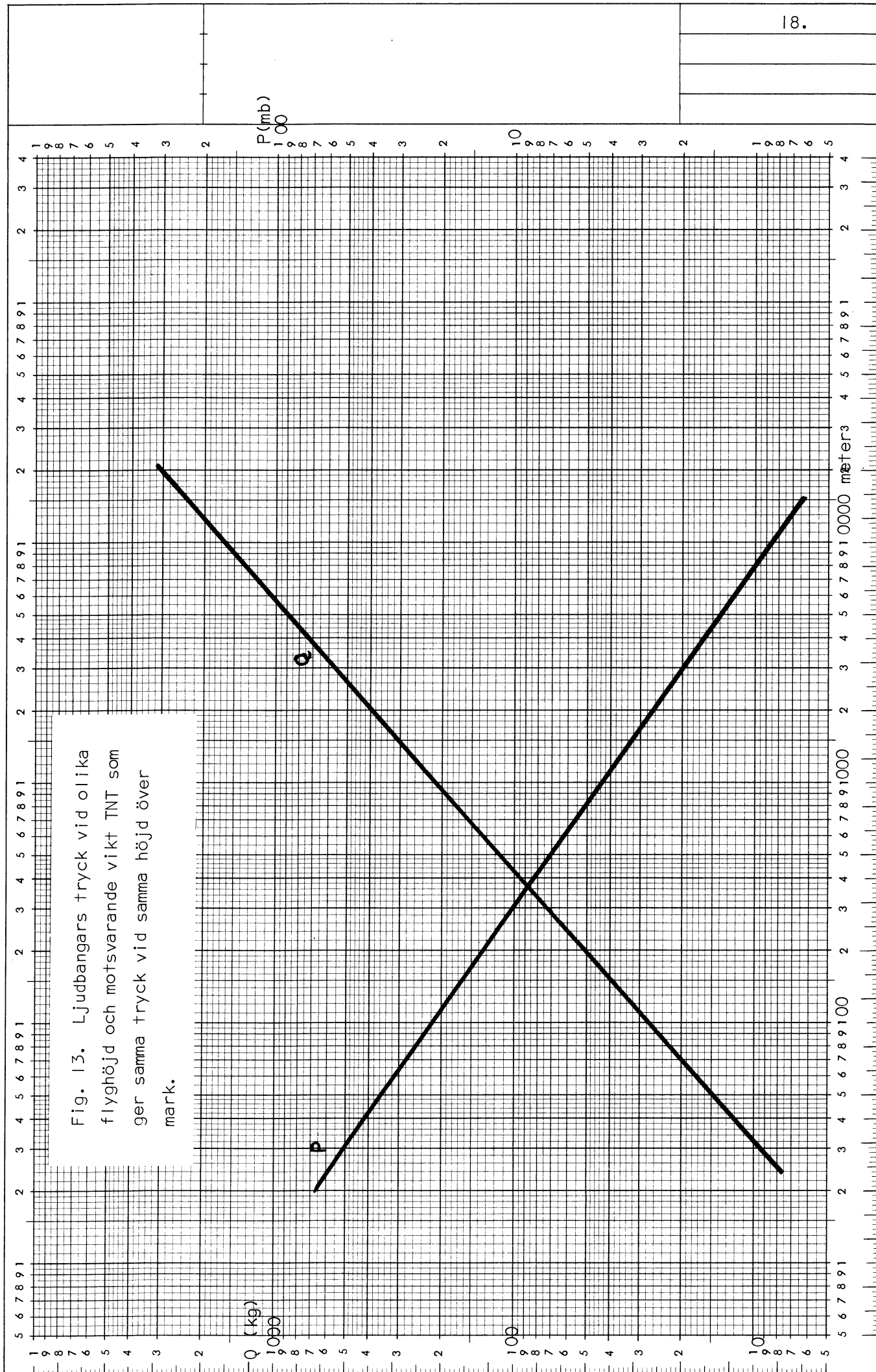


Fig. 11. Ljudbangars tidsförlopp från olika plan.



Attenuation of sonic boom with altitude is dependent on atmospheric properties

Fig. 12. Ljudbangars tryck vid olika flyghöjd. /2/



Sonic boom will be heard to the sides of a supersonic airplane, and the lateral distance over which it will be heard is affected by atmospheric conditions.

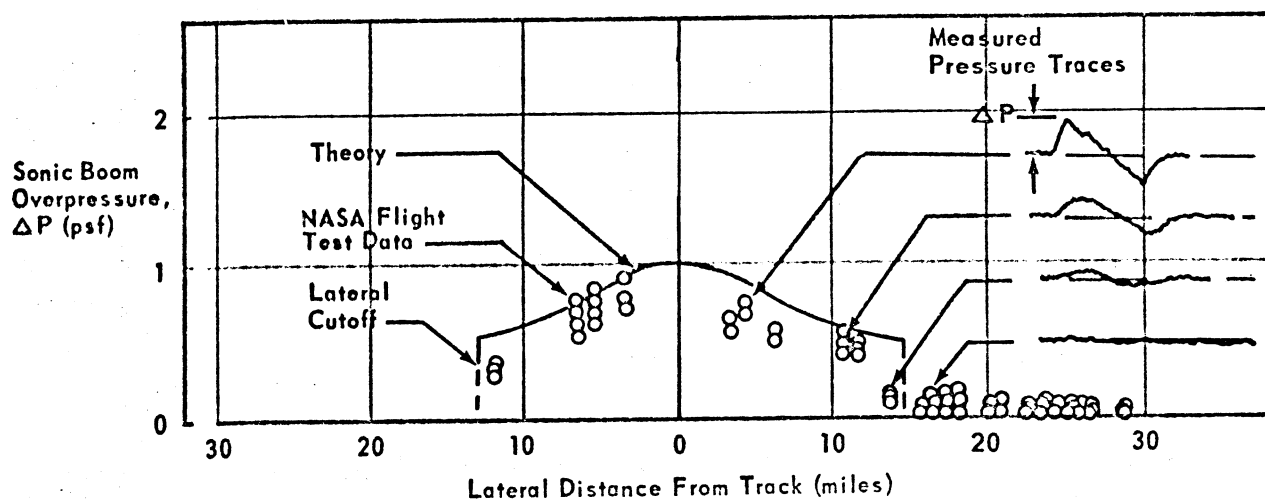
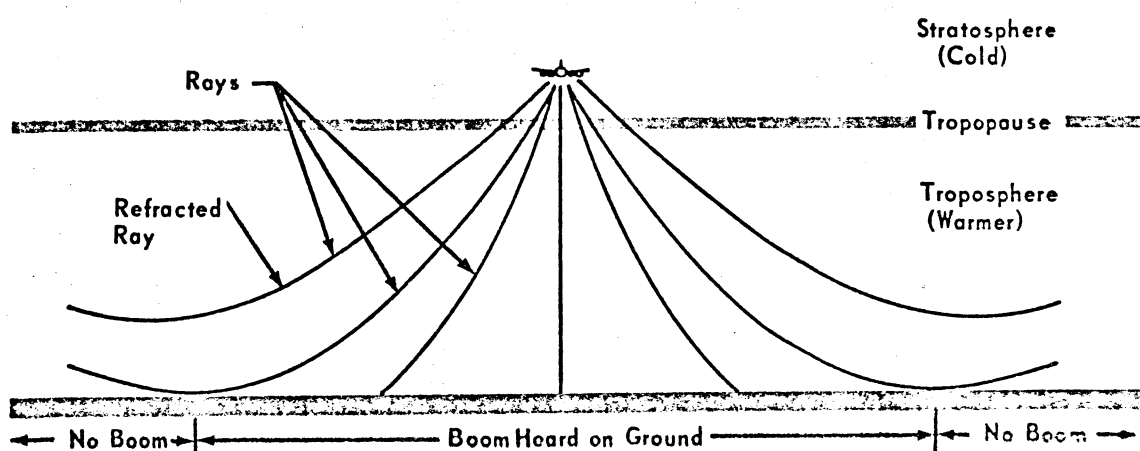
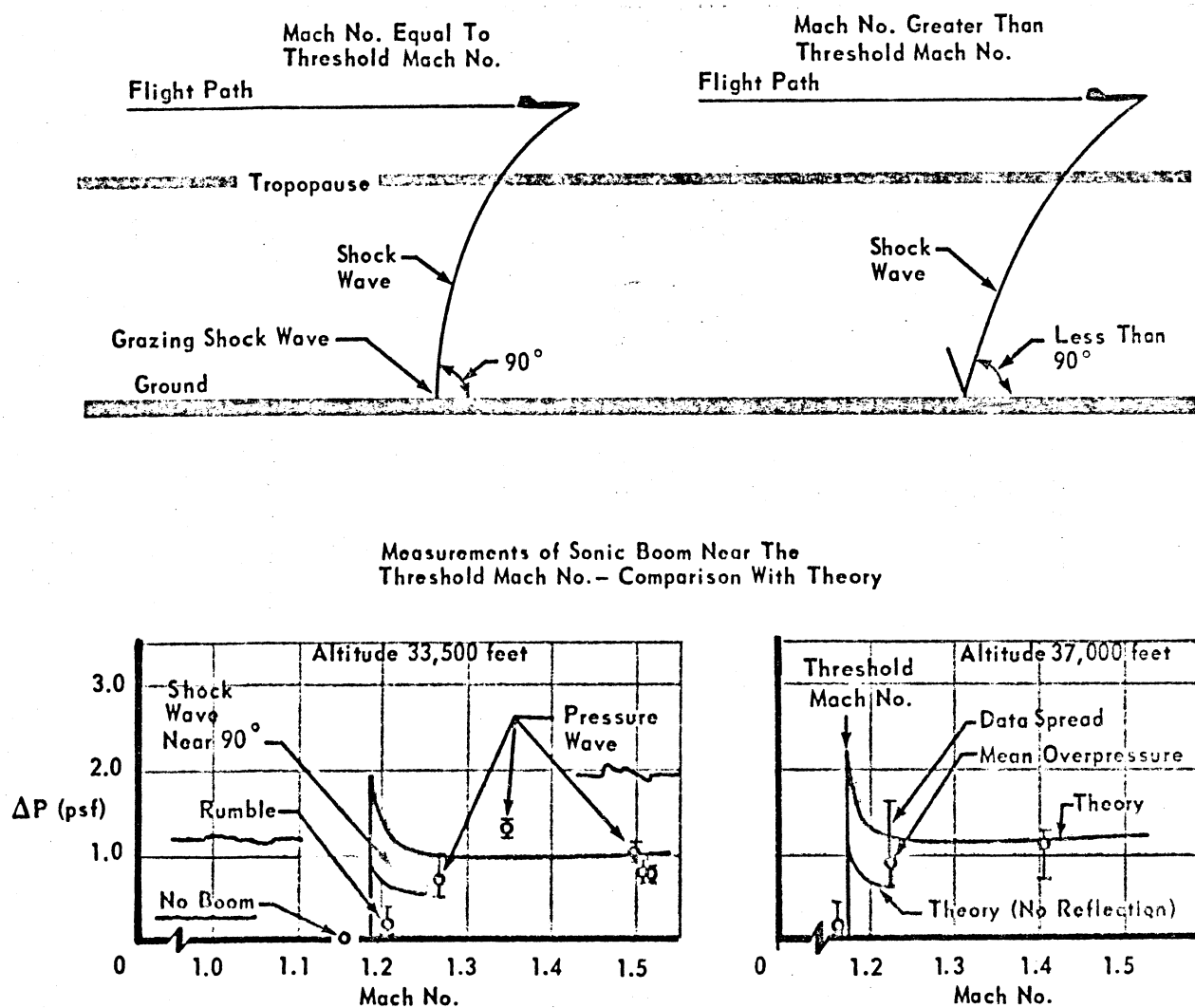


Fig. 14. Ljudbangars styrka på olika avstånd från lodlinjen. /2/



Measurements of Sonic Boom Near The Threshold Mach No.— Comparison With Theory

An airplane is said to be at the threshold Mach number when the speed of the plane is equal to the speed of sound at the ground. Airplane speed must be greater than the threshold Mach number for a sonic boom to be heard on the ground.

Fig. 15. Trycket vid markytan vid olika Mach-tal. /2/

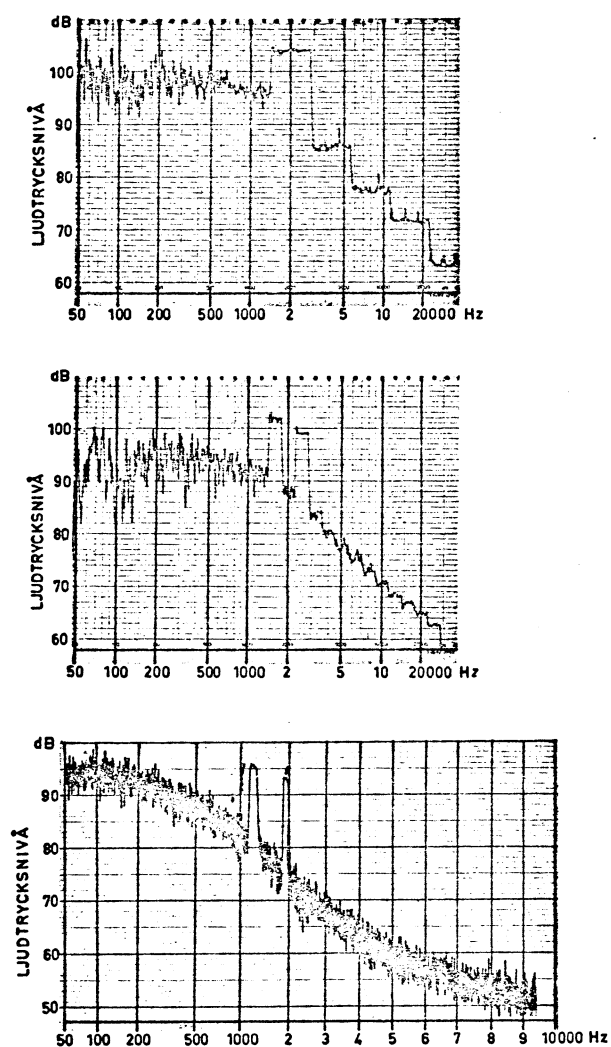


Fig. 16. Frekvensanalys av ett bullerspektrum med tre olika filtertyper. Bullret består av ett brus med två inlagda sinustoner a/ oktavfilter, b/ 1/3-oktavfilter (tersfilter) c/ smalbandsfilter 120 Hz. //

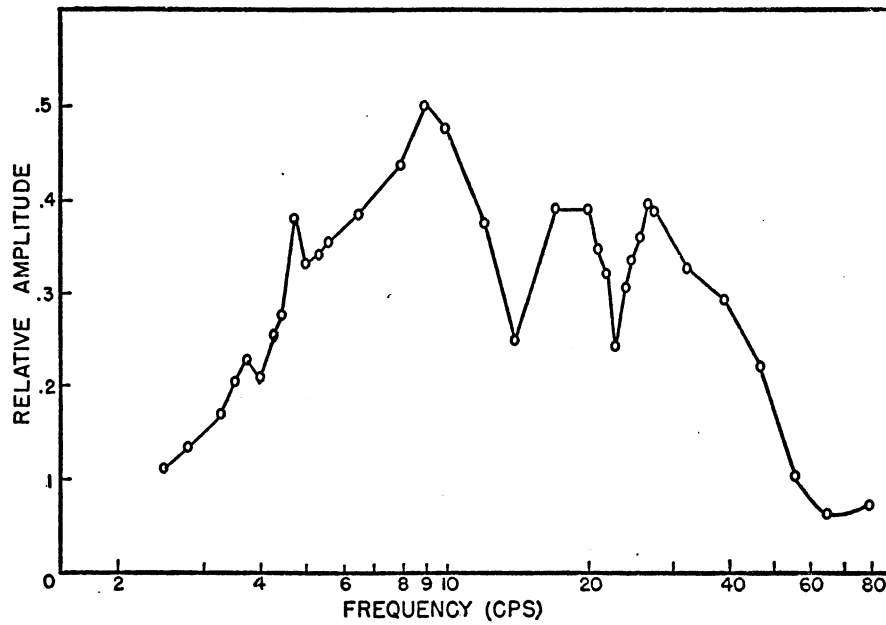
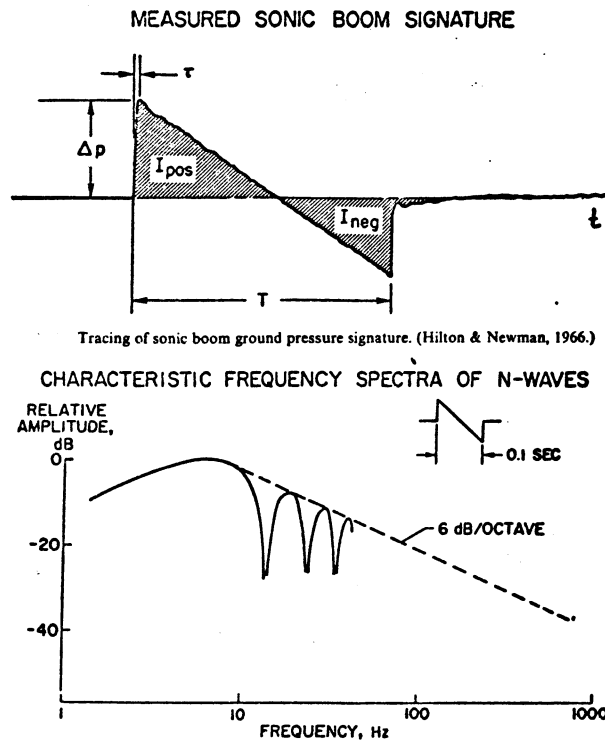


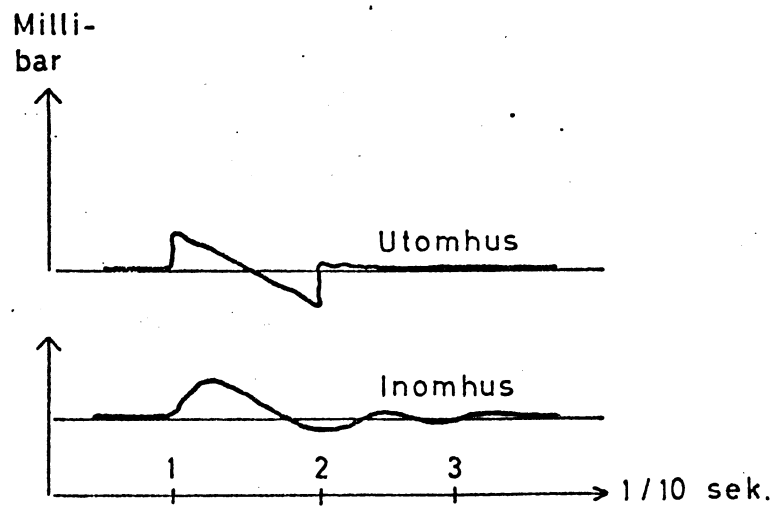
Figure 1.7. Relative amplitude versus frequency analysis of blast wave at 35,000 ft from unconfined 100-lb Composition B shot. /9/



14.7 Characteristic frequency spectra of N-waves. (Hubbard & Maglieri, 1967.)

Fig. 18. Tidsfunktion och frekvensfunktion för en överljudsbang.

/1/



Figur 19.

Tryckvariationer utom- och inomhus från flygplan i överljudsfart registrerat i en given punkt i fjärrfältet. /3/

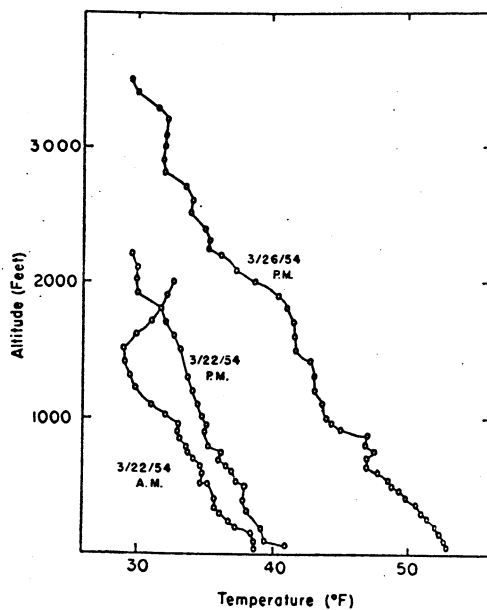


Figure 20. Temperature-altitude plots with no temperature inversion. /9/

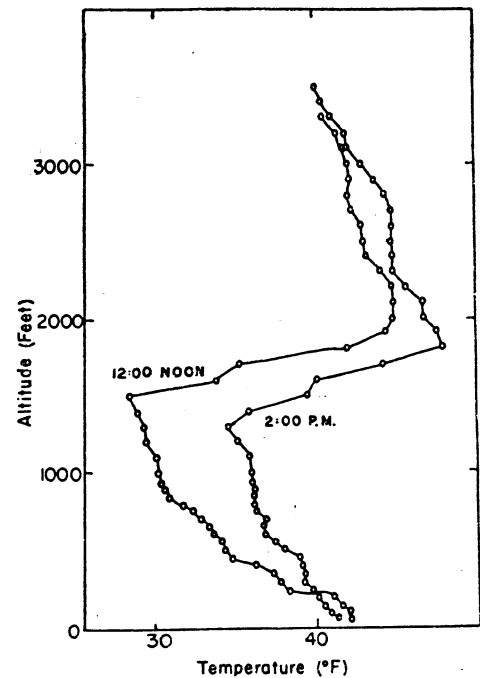


Figure 21. Temperature-altitude plot showing strong temperature inversion. /9/

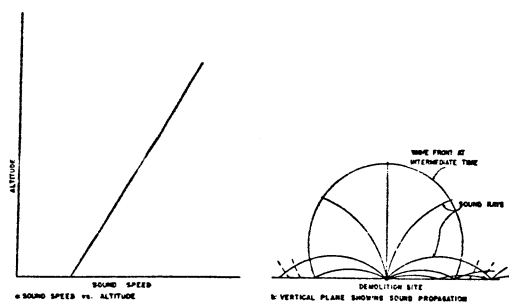


Figure 22a Sound-wave propagation from a demolition shot for sound velocity increasing uniformly with altitude.

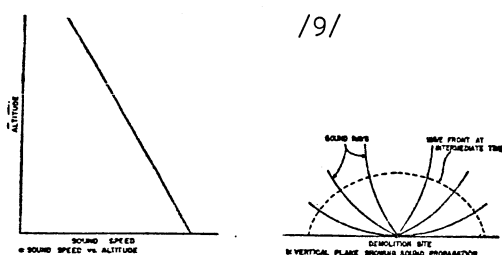


Figure 22b Sound-wave propagation from unconfined shot where C decreases with altitude. /9/

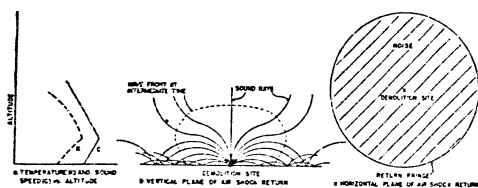


Figure 22c Sound-wave propagation under conditions of a type I sound-speed inversion imposed by temperature inversion. /9/

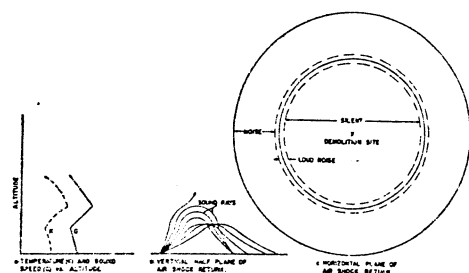


Figure 22d Sound-wave propagation under conditions of a type II sound-speed inversion imposed by temperature inversions. /9/

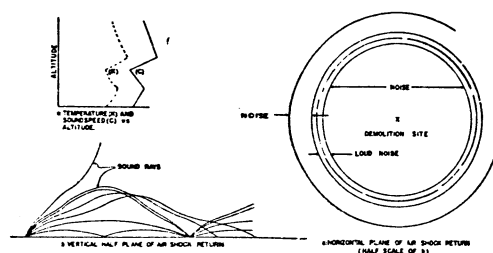


Figure 23a Sound-wave propagation under conditions of a type III sound-speed inversion imposed by temperature inversions. /9/

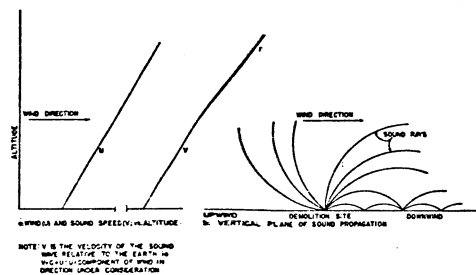


Figure 23b Sound-wave propagation under conditions of constant temperature and a positive wind gradient. /9/

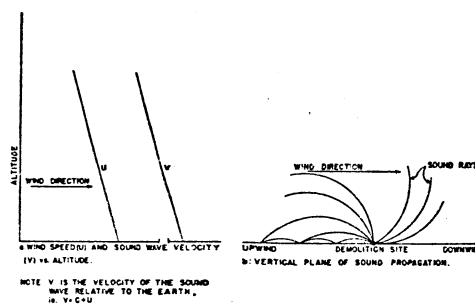


Figure 23c Sound-wave propagation under conditions of constant T and a negative wind-altitude gradient. /9/

The largest effect of weather on sonic boom occurs at low supersonic Mach numbers.

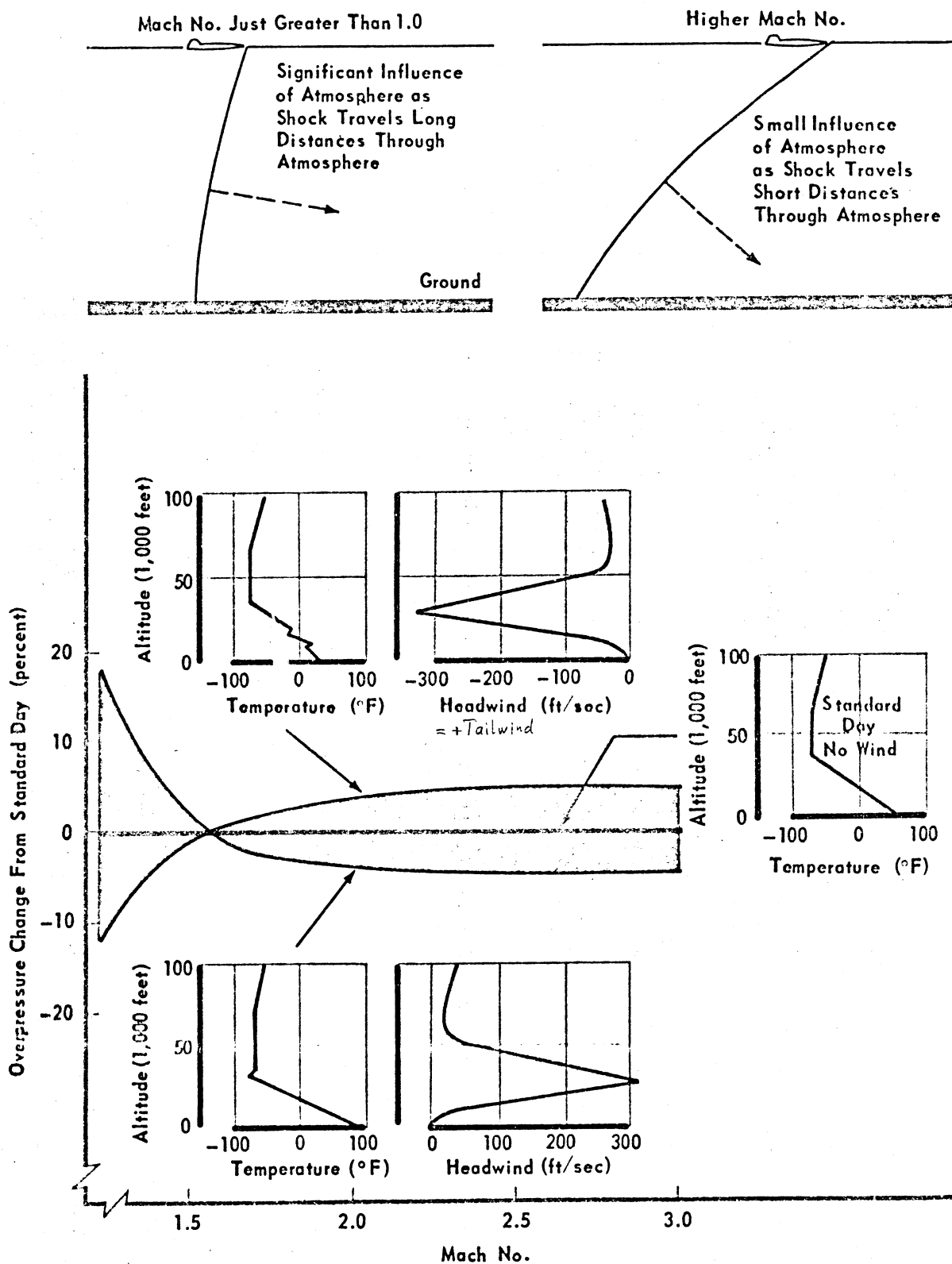


Fig. 24. Temperaturens och vindens inverkan på trycket /2/

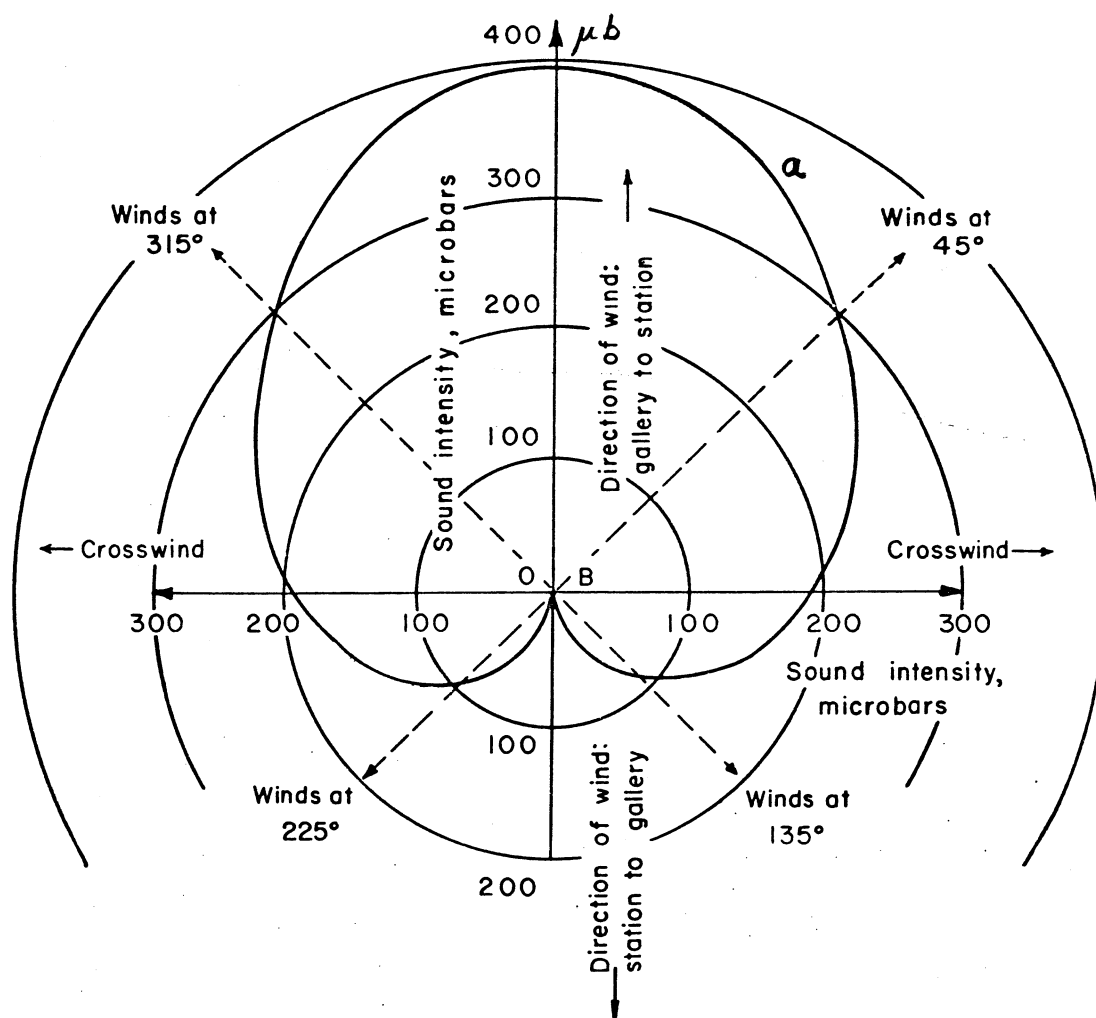


FIGURE 25. Effect of Wind Direction on Sound Intensity of Gallery Shots, Ignitions Only.

Kurva (a) visar trycket i μb från en laddning i centrum då vinden blåser uppåt i fig. med 13.5 m/s. /14/

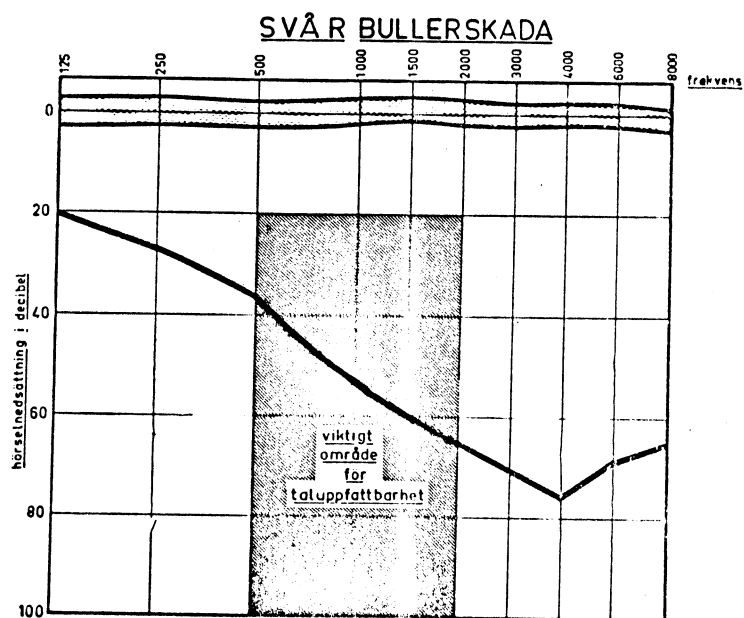
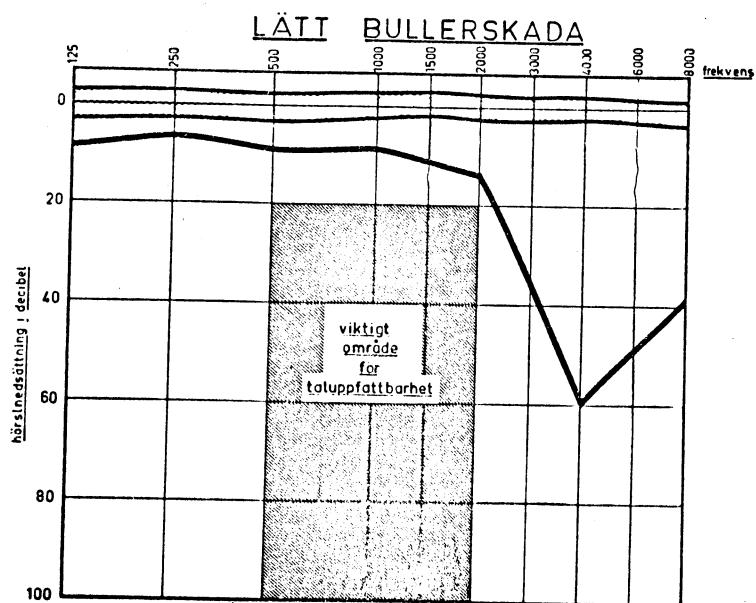


Fig. 26. Olika grader av hörselnedsättning.

/1/

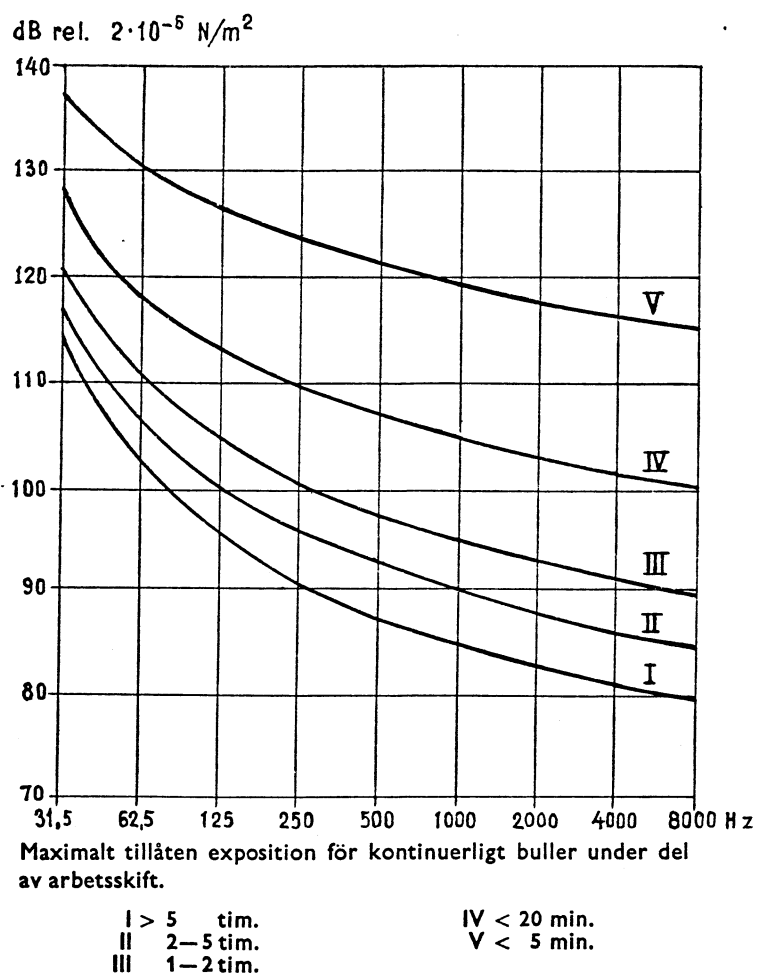


Fig. 27. Arbetarskyddsstyrelsens anvisningar för vistelse i buller. /7/

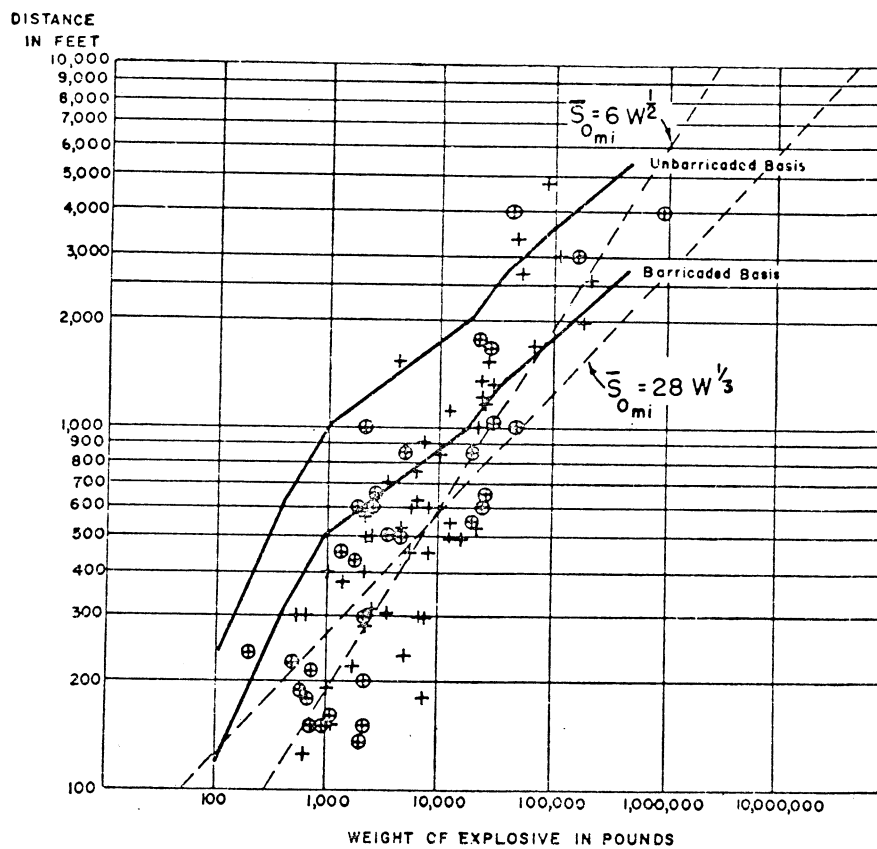


Figure 23, Limits of damage versus charge mass in accidental explosions.

/9/

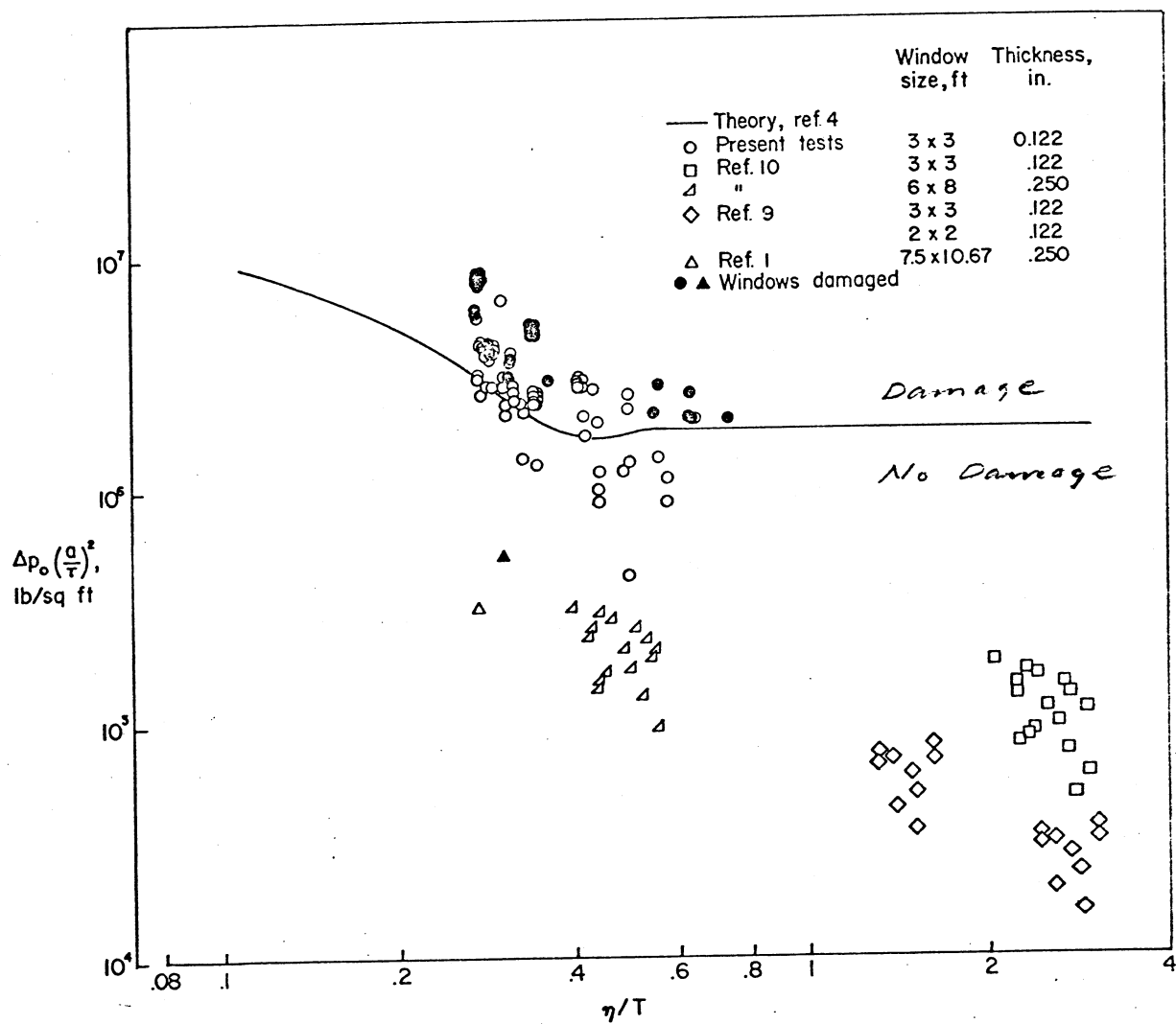
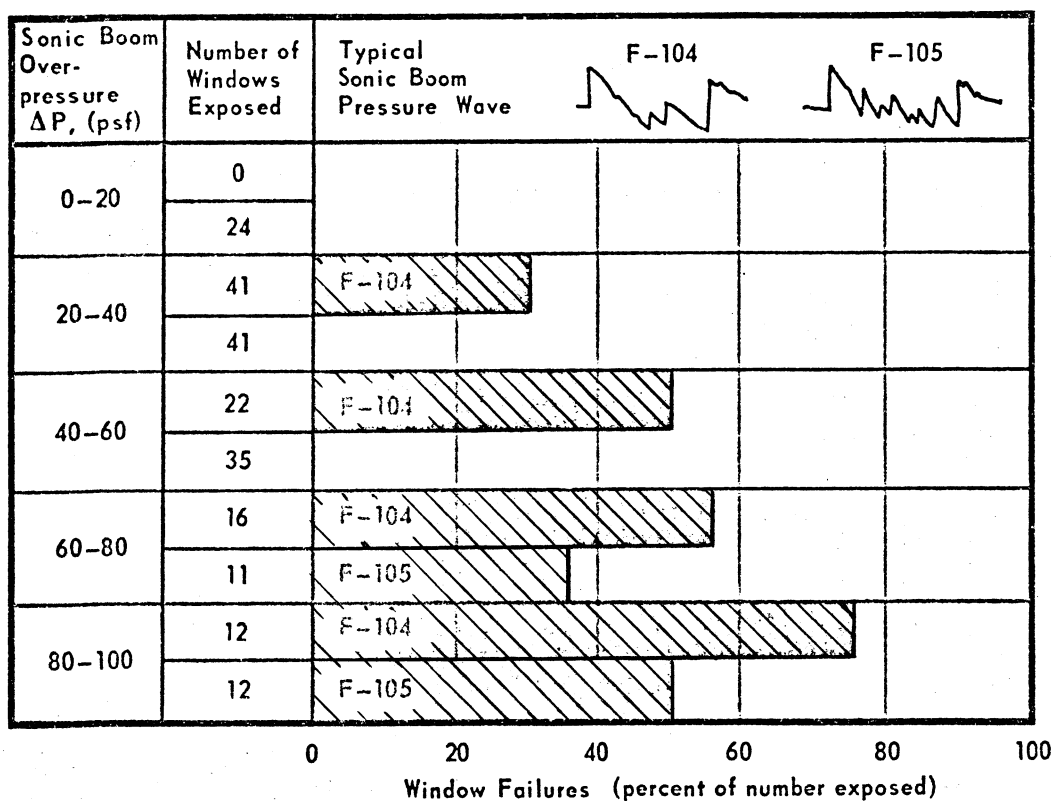


Figure 29.- Summary of window-glass breakage experience due to sonic booms.

a^2 = fönstrets area, τ = glasets tjocklek. η = varaktighet hos positiva pulsen, T = glasrutans egensvängningstid /10/

NASA Data: Edwards Air Force Base, 1961



Damage Complaints Received in St. Louis

TOTAL EXPOSURE: 2.6 MILLION PEOPLE; 50,000 FAMILY UNITS

NOTE: PERCENTAGES BASED ON TOTAL OF 3,114

COMPLAINTS RECEIVED BY GOVERNMENT

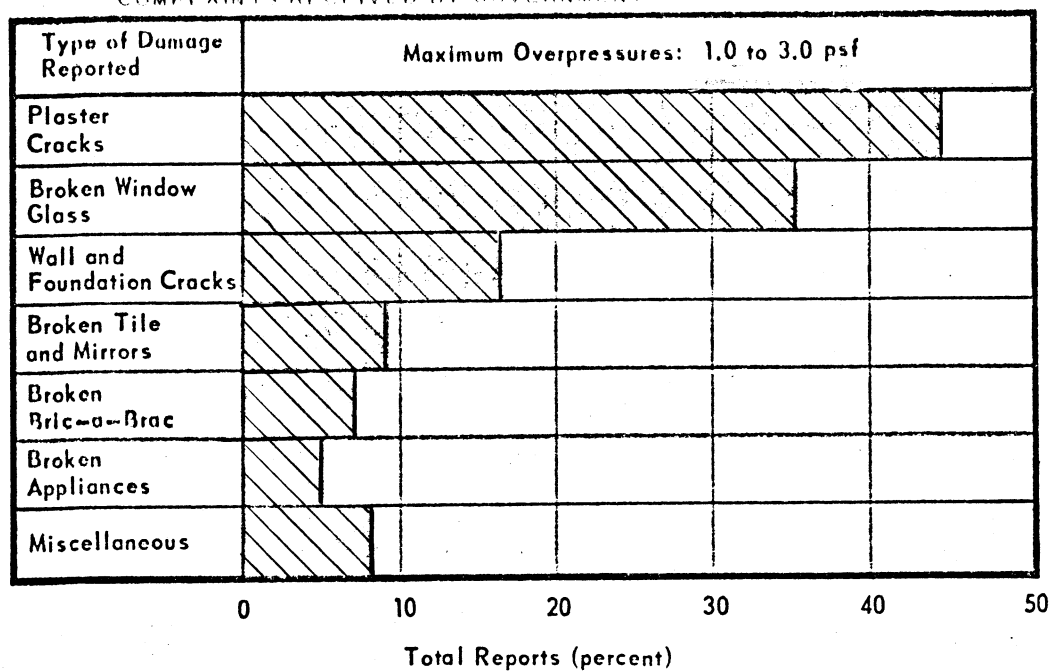
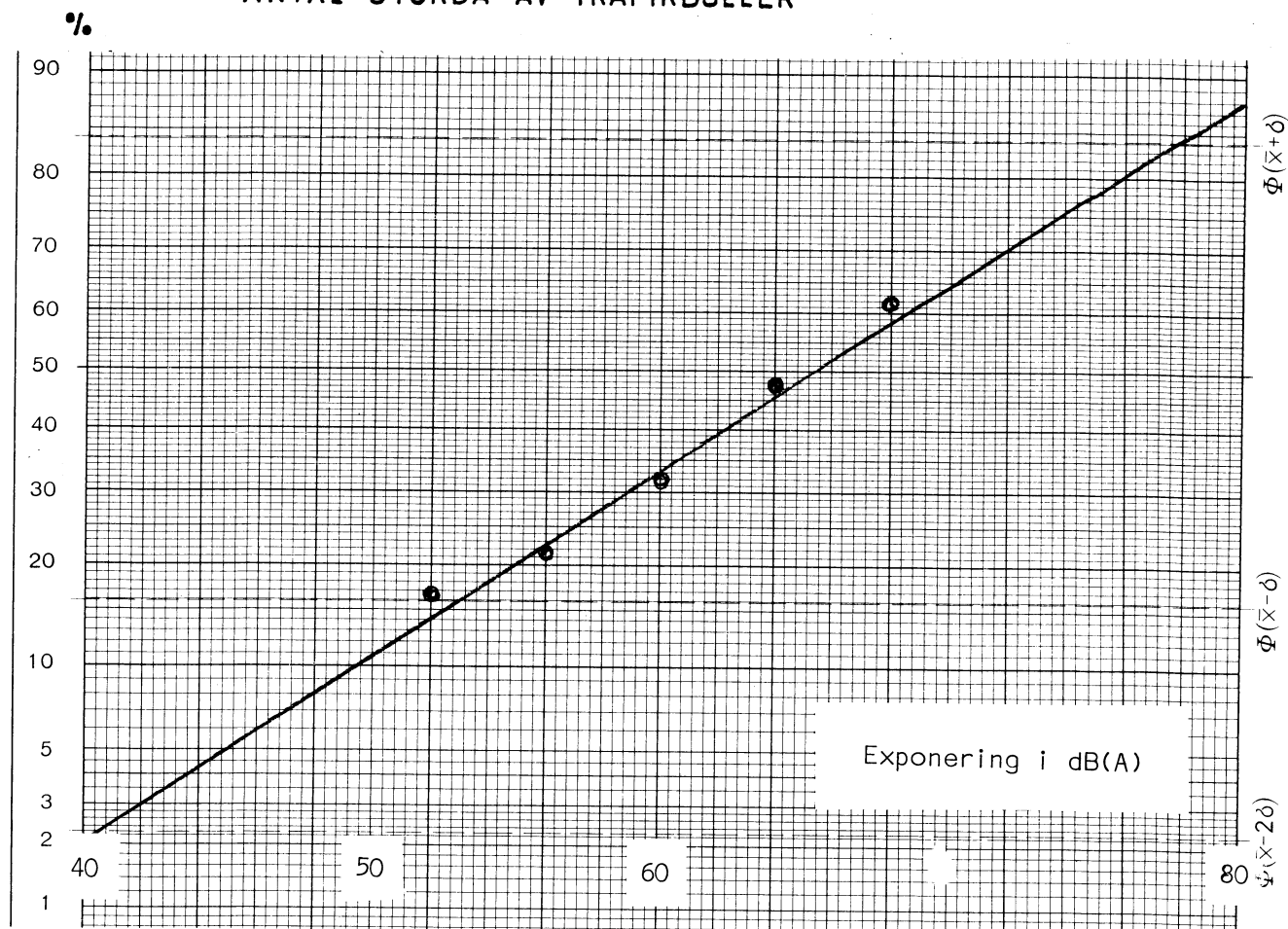


Fig. 30. Skadeverkan och klagomål vid olika ljudbangstryck. /2/

ANTAL STÖRDA AV TRAFIKBULLER



Figur 31.

Dos-responsförhållanden vid exponering för trafikbuller /3/
inprickat i ett normalfördelningsdiagram.

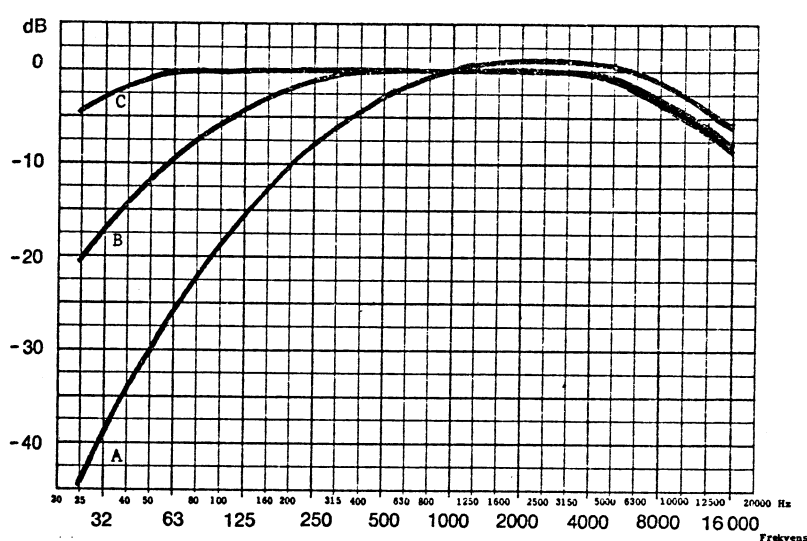


Fig. 32 Vagningsfilter för ljudnivåmätaren enligt IEC publikation nr 179.