

FFI RAPPORT

AKUSTISKE IKKE-DØDELIGE VÅPEN

RAHIMI Reza, KIPPE Halvor

FFI/RAPPORT-2003/01532

FFIBM/823/139

Godkjent
Kjeller 5. februar 2004

Bjarne Haugstad
Forskningsjef

AKUSTISKE IKKE-DØDELIGE VÅPEN

RAHIMI Reza, KIPPE Halvor

FFI/RAPPORT-2003/01532

FORSVARETS FORSKNINGSINSTITUTT
Norwegian Defence Research Establishment
Postboks 25, 2027 Kjeller, Norge

FORSVARETS FORSKNINGSINSTITUTT (FFI)
Norwegian Defence Research Establishment

UNCLASSIFIED

P O BOX 25
 NO-2027 KJELLER, NORWAY
REPORT DOCUMENTATION PAGE

SECURITY CLASSIFICATION OF THIS PAGE
 (when data entered)

1) PUBL/REPORT NUMBER FFI/RAPPORT-2003/01532 1a) PROJECT REFERENCE FFIBM/823/139	2) SECURITY CLASSIFICATION UNCLASSIFIED 2a) DECLASSIFICATION/DOWNGRADING SCHEDULE -	3) NUMBER OF PAGES 42		
4) TITLE AKUSTISKE IKKE-DØDELIGE VÅPEN Acoustic Non-Lethal Weapons				
5) NAMES OF AUTHOR(S) IN FULL (surname first) RAHIMI Reza, KIPPE Halvor				
6) DISTRIBUTION STATEMENT Approved for public release. Distribution unlimited. (Offentlig tilgjengelig)				
7) INDEXING TERMS IN ENGLISH: <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> a) <u>Non-Lethal Weapons</u> b) <u>Acoustic Weapons</u> c) <u>Acoustics</u> d) <u>Less-Lethal Weapons</u> e) _____ </td> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> IN NORWEGIAN: a) <u>Ikke-dødelige våpen</u> b) <u>Akustiske våpen</u> c) <u>Akustikk</u> d) _____ e) _____ </td> </tr> </table>			a) <u>Non-Lethal Weapons</u> b) <u>Acoustic Weapons</u> c) <u>Acoustics</u> d) <u>Less-Lethal Weapons</u> e) _____	IN NORWEGIAN: a) <u>Ikke-dødelige våpen</u> b) <u>Akustiske våpen</u> c) <u>Akustikk</u> d) _____ e) _____
a) <u>Non-Lethal Weapons</u> b) <u>Acoustic Weapons</u> c) <u>Acoustics</u> d) <u>Less-Lethal Weapons</u> e) _____	IN NORWEGIAN: a) <u>Ikke-dødelige våpen</u> b) <u>Akustiske våpen</u> c) <u>Akustikk</u> d) _____ e) _____			
THESAURUS REFERENCE: 8) ABSTRACT This report provides a short introduction to acoustics in general, and discusses acoustic weapon systems more thoroughly. Acoustic weapons used as non-lethal weapons in various field operations are emphasised. The effects of acoustic waves on the human body are presented. A few allegations with respect to acoustic weapons, made mostly in journalistic articles, are discussed.				
9) DATE 5 February 2004	AUTHORIZED BY This page only Bjarne Haugstad	POSITION Director of Research		

ISBN-82-464-0826-7

UNCLASSIFIED

SECURITY CLASSIFICATION OF THIS PAGE
 (when data entered)

INNHOOLD

	Side	
1	INNLEDNING	7
2	AKUSTISKE VÅPEN SOM IKKE-DØDELIGE VÅPEN	7
2.1	Tidligere bruk AV akustiske våpen	8
3	MENNESKETS HØRSELSSYSTEM	9
3.1	Menneskets øre	9
3.2	Ørets virkemåte	9
4	VIRKNINGER AV AKUSTISKE BØLGER PÅ MENNESKER	10
4.1	Infralyd og lavfrekvente lyders virkning på mennesker	10
4.1.1	Skade på hørselen	10
4.1.2	Skade på balanseorganet	11
4.1.3	Virkninger på åndedrettssystemet	12
4.1.4	Virkninger på andre organer	12
4.2	Virkninger av hørbar lyd på menneskets høreterskel	15
4.3	Virkninger av ultralyd på mennesker	16
4.4	Virkninger av impulslyd på mennesker	17
4.4.1	Virkninger av impulslyd på menneskets øre	17
4.4.2	Virkninger av impulslyd på indre organer	17
4.5	Virkninger av akustiske bølger på mennesker. Oppsummering	18
5	BESKYTTELSE MOT AKUSTISKE SIGNALER	19
6	PRODUKSJON AV STERK LYD	21
6.1	Generering av sterk infralyd	21
6.2	Forplantning av lyd i atmosfæren	21
7	PRODUKSJON AV LYD MED HØY INTENSITET FOR IKKE-DØDELIGE VÅPEN	22
8	AKUSTISKE VÅPEN I MEDIA OG LITTERATUR	24
8.1	Virkninger av en infralydstråle i store avstander fra kilden	24
8.2	Ikke-lineær superposisjon av to ultralydstråler	25
8.2.1	Ikke-lineær superposisjon av to ultralydstråler i luft	25
8.2.2	Ikke-lineær superposisjon av to ultralydstråler i øret	25
8.3	Diffraksjonsfritt akustisk prosjektil	25
8.4	Plasma foran målet	26
8.5	Lokalt jordskjelv skapt av infralyd	26
8.6	Vortexringer	27

9	AKUSTISKE VÅPEN - DAGENS TEKNOLOGI	28
9.1	Akustiske våpen som Ikke-dødelige våpen	28
9.2	Gayl Device (US)	29
9.3	Acoustic Irritation	29
9.4	Sound Source Projector	30
9.5	Flashbang, lyd og lys	30
9.5.1	Cougar og Chouka	30
9.5.2	Multi Sensory Distraction Device (MSDD)	30
9.5.3	66 mm Vehicle Launched NL Grenade, Flash Bang	31
9.6	Infralyd	32
9.6.1	Vortexringer	32
9.6.2	Directional Sonic Firehose	33
9.6.3	Acoustic Blaster	34
10	OPPSUMMERING	34
	APPENDIKS	36
A	GRUNNLEGENDE AKUSTIKK	36
A.1	Litt om akustikk	36
A.2	Noen nyttige likninger	39
A.2.1	Lineær akustikk	39
A.2.2	Ikke-lineær akustikk: svak sjokkbølge	40
	Litteratur	41

AKUSTISKE IKKE-DØDELIGE VÅPEN

1 INNLEDNING

I årene etter den kalde krigen tok slutt, har det vært en stadig økende interesse for bruk av ikke-dødelige våpen både i militære operasjoner og i politioperasjoner. De nye utfordringene for fredsbevarende og fredsopprettende styrker krever ofte andre metoder enn bruk av dødelige, konvensjonelle våpen. I en del operasjoner må de militære kunne håndtere situasjoner der sivile - ofte kvinner og barn - er inne i bildet.¹ I mange tilfeller er de militære ikke direkte i krig, men har som oppgave å kontrollere konflikter mellom forskjellige grupperinger i området.² Under slike forhold muliggjør ikke-dødelige våpen maktbruk med lav risiko for alvorlige konsekvenser.

Politioperasjoner er et annet område der ikke-dødelige våpen kan være effektive. Mange politioppgaver utføres i store byer og i tettbebygde strøk hvor det er hensiktsmessig å anvende slike våpen framfor å bruke dødelig makt.

Også i kampen mot internasjonal terrorisme kan bruk av ikke-dødelige våpen være aktuelt. Her står ofte store byer og folkemasser i fare for å bli rammet. Flykapringer er et klassisk eksempel på en slik terrorhandling.

2 AKUSTISKE VÅPEN SOM IKKE-DØDELIGE VÅPEN

Virkingen av akustiske bølger på mennesker og utstyr gjør at de kan brukes som ikke-dødelige våpen dersom det utvikles innretninger som produserer bølger med tilstrekkelig høy intensitet på bestemte frekvenser.

NATOs arbeidsgruppe SAS-035 delte ikke-dødelige våpen i fem kategorier, og én av dem er akustiske våpen. Definisjonen lyder som følger (26):

***Acoustic.** This refers to "sound" energy at both audible and inaudible frequencies transmitted through specific media for the purpose of producing desired effects on human targets and materiel.*

Vi skal ta for oss disse virkningene i detalj i de neste kapitlene. Lydbølger påvirker mennesker på to måter. Enten kan de påvirke hørselssystemet, eller så kan de forårsake resonans i indre organer, som igjen kan gi kvalme og desorientering.

¹ Et eksempel på dette er en episode i Nord-Irak, hvor en gruppe kurdere var redde for sine liv da FN-soldater skulle forlate området med helikopter. Noen unge mødre kastet til og med sine spedbarn inn i helikoptrene.

² For eksempel i Bosnia, hvor mange byer har en blandet etnisk befolkning.

Akustiske våpen har flere fordeler sammenliknet med andre typer ikke-dødelige våpen. Blant annet etterlater de ikke avfallsstoffer som krever etterbehandling, og egenskaper som intensitet og frekvens kan lett justeres i en operasjon. For andre ikke-dødelige våpen vil virkningsparameterne ofte ikke la seg justere underveis.

I motsetning til mange elektromagnetiske bølger, kan akustiske bølger effektivt transmitteres gjennom røyk og støv. Med den nye teknologien som benytter såkalte *vortexringer* (se avsnitt 9.6.1), kan man transportere andre stoffer, som f.eks. pepperspray og CS-gass.

2.1 Tidligere bruk AV akustiske våpen

Lavfrekvent lyd har i noen år vært utnyttet i sensorteknologi for deteksjon av artilleri og tunge kjøretøyer. Forplantningsegenskapene til lavfrekvente lydbølger gjør dem gunstige for deteksjon av lydilder. Lavfrekvent lyd kan gå flere kilometer. Det er nevnt i litteraturen (1) at Storbritannia og Japan skal ha undersøkt mulighetene for anvendelse av lavfrekvent lyd som våpen under annen verdenskrig. Nedenfor viser vi noen eksempler på det som har kommet fram i litteraturen om effektiviteten og virkningene av akustiske bølger.

Applegate (2) nevner i sin bok fra 1969 vitenskapelige diskusjoner om anvendelse av super- og subsoniske maskiner for å kontrollere opptøyer.

I 1970-årene ble akustiske våpen brukt for å desorientere og vanskeliggjøre kommunikasjonen i folkemasser. Det er også nevnt fysiologiske og psykologiske virkninger av infralyd på mennesker, spesielt ved intensiteter over 100 dB³. Et eksempel på dette er eksperimenter ved et forskningssenter i Frankrike, hvor de testet 7 Hz infralyd på mennesker. Det er påstått at de tilstedeværende opplevde virkninger som svimmelhet og stress i flere timer etterpå (8). Nyere eksperimenter viser imidlertid at akustiske bølger med høy intensitet ikke forårsaker slike virkninger, selv i korte avstander fra lydilden (10). Infralyd kan forøvrig ødelegge bygninger, pga resonans i bygningenes struktur.

I en artikkel i tidsskriftet "New Scientist" (5), ble det rapportert om et akustisk apparat som sender ut to ultralydbølger med frekvensene 16 000 Hz og 16 002 Hz. Interferens mellom disse to bølgene i ørene genererer bølger med frekvens på 2 Hz, som i sin tur forårsaker ubehag og kvalme.

Andre eksempler på anvendelse av akustikk som et ikke-dødelig våpen er også nevnt i litteraturen, blant annet bruk av hvit støy⁴ for å gi fanger under avhør psykisk sammenbrudd (2).

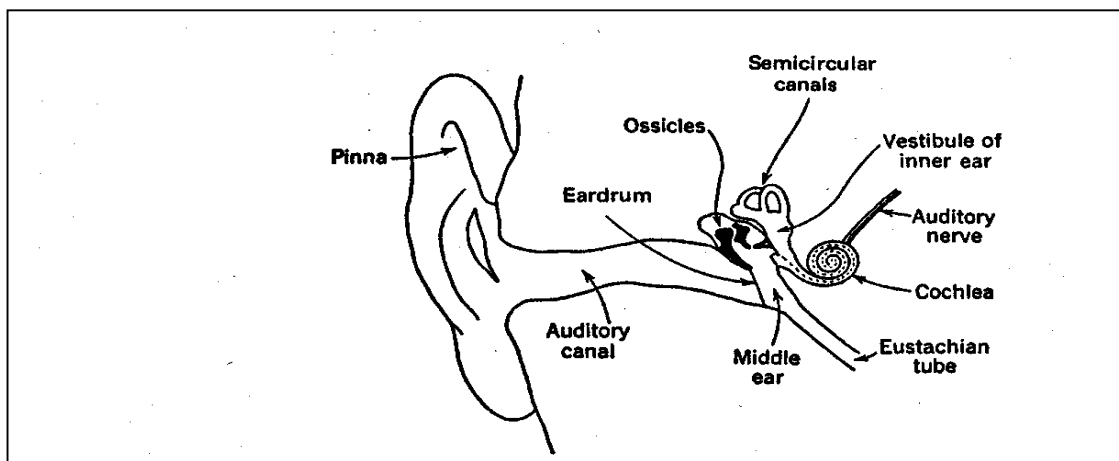
³ Decibel (dB) er et mål på forskjell i lydstyrke, som av praktiske grunner oppgis logaritmisk, siden ørets evne til å oppfatte forskjeller i volum spenner over et svært stort område. Fullstendig diskusjon finnes i appendiks A.1

⁴ Støy som inneholder alle hørbare frekvenser i like forhold.

3 MENNESKETS HØRSELSSYSTEM

3.1 Menneskets øre

For å kunne studere virkningene av akustiske bølger på mennesker, må man ha kjennskap til menneskets hørselssystem. Akustiske bølger, spesielt i infra- og ultralydområdet, påvirker kroppen på andre måter også, for eksempel ved resonans i indre organer som lungene. Men vi begynner med menneskets hørselssystem, og ser på en skisse av menneskets øre i Figur 3.1.



Figur 3.1 Forskjellige organer i menneskets hørselssystem. Skissen viser ytre øre (pinna), øregang (auditory canal), trommehinne (eardrum), ambolt, stiggjøyle og hammer (ossicles), mellomøret (middle ear), balanseorgan (vestibule of inner ear), sneglehus (cochlea), høre og balansenerve (auditory nerve), øretrompet (eustachian tube).

Menneskets øre er mest følsomt for frekvenser mellom 20 Hz og 20 kHz. I tillegg til å være en bra mottaker, har øret også en svært god evne til å skille ulike frekvenser. Det siste i samarbeid med nervesystemet gir menneskets øre dets selektivitet (evnen til å skille lydstyrke og frekvens) osv.

3.2 Ørets virkemåte

Med referanse til Figur 3.1 gir vi her en kort oversikt over hvordan øret fungerer. Det ytre øret virker som et horn, og leder lyden gjennom øregangen. Øregangen er en nesten rett kanal med lengde ca 2,8 cm og diameter ca 0,8 cm. I enden av denne kanalen er trommehinnen. Resonansfrekvensen til øregangen er rundt 3 kHz. Derfor er frekvenser mellom ca 2 kHz og ca 6 kHz spesielt godt hørbare. Lydtryknivået ved trommehinnen er omtrent 7 til 20 dB høyere enn lydtryknivået ytterst i øregangen. Trykkbølgene overføres via trommehinne, hammer, ambolt og stiggjøyle til sneglehuset, som er fylt med væske. Sneglehuset har en komplisert struktur. I sneglehusets rør finnes det små hår tett i tett, som settes i bevegelse når trykkbølgene forplanter seg i røret. Disse bevegelsene aktiverer nevroner, som sender impulser til hjernen.

Hørselssystemets egenskaper er viktige for å kunne evaluere virkningene til akustiske ikke-dødelige våpen. Når lydintensiteten øker, øker også følsomheten for lyden. Ved omtrent 120 dB føles kiling. Smertegrensen for hørbar lyd er rundt 140 dB.

Det er to viktige begreper i denne sammenhengen som er verdt å merke seg:

TTS (Temporary Threshold Shift): Når hørselen blir utsatt for svært intens lyd, øker høreterskelen og øret blir mindre følsomt.⁵ Noen ganger er dette midlertidig, og øret får igjen terskelen det hadde før hendelsen. Dette bestemmes av lydintensiteten, hvor lenge øret er utsatt for lyden og frekvensen øret blir utsatt for. TTS måles vanligvis to minutter etter at lyden opphører.

PTS (Permanent Threshold Shift): Hvis øret derimot ikke kan gjenopprette sin opprinnelige terskel, har det fått permanent terskelskift. Dette skjer i tilfeller med terskelskift noe høyere enn 40 dB. Årsaken til PTS synes å være permanent skade på hårecellene i sneglehuset. Lyd (karakterisert ved frekvens, intensitet og eksponeringstid) som kan forårsake PTS, anslås fra TTS av samme lyd. Denne metoden anvendes for å bestemme PTS hos mennesker. TTS kan bestemmes fra eksperimenter på mennesker, og det lages tabeller for PTS ved forskjellige lyder ut fra TTS.

4 VIRKNINGER AV AKUSTISKE BØLGER PÅ MENNESKER

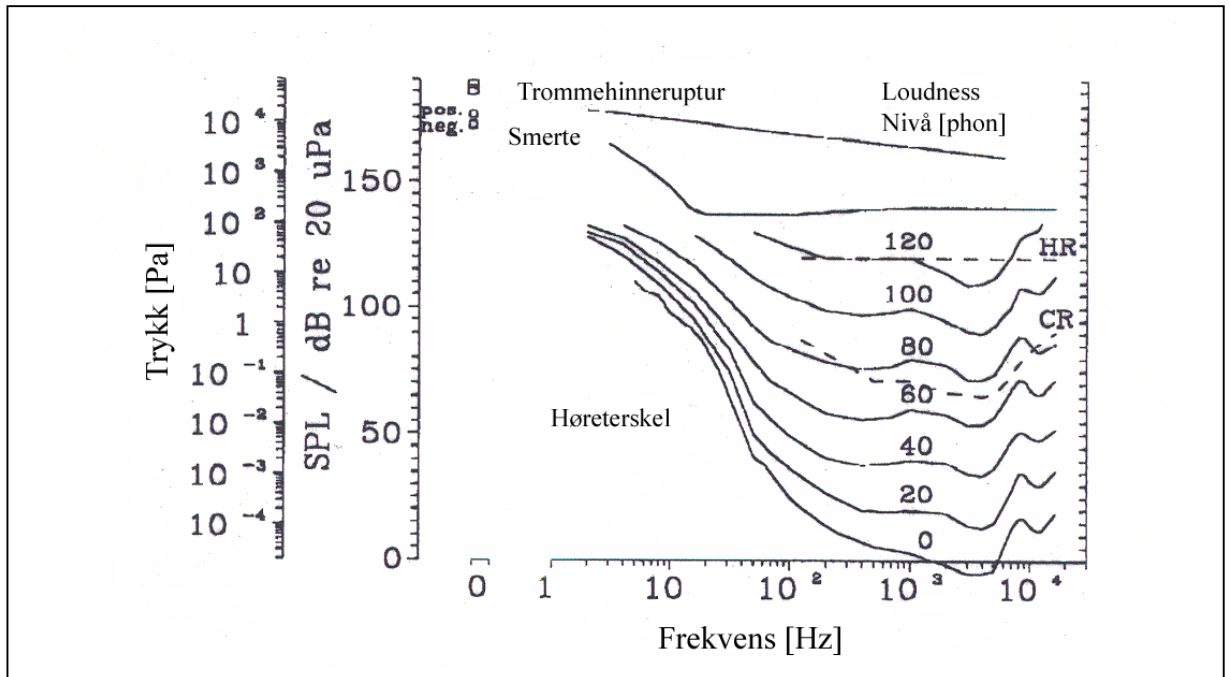
4.1 Infrazyd og lavfrekvente lyders virkning på mennesker

4.1.1 Skade på hørselen

Når det gjelder grensene for ulike påvirkninger av lyd på hørselen, ser vi nøyere på Figur 4.1. Dette er spesielt viktig for å vurdere forskjellige akustiske ikke-dødelige våpen. Virkningene av disse er vanligvis gitt ved frekvens, lydtryknivå eller intensitetsnivå, eksponeringstiden og den effektive avstanden fra målet. Som vi ser av Figur 4.1, er det fire typer terskler som er tydelige.

Over den første terskelen er det fare for permanent hørselsskade, avhengig av lydnivå, eksponeringstid, eksponeringshyppighet og individuelle egenskaper. Ofte kan eksponeringstiden være flere timer daglig. Over den andre terskelen ved 120 dB, hvor ubehaget begynner, er det stor sjanse for hørselstap, selv ved kort eksponeringstid. Den tredje terskelen er smerteterskelen. Smerte inntreffer ved 140 dB (tilsvarer ca 200 Pa) i hørbart frekvensområde. Som en kan se av figuren, øker denne terskelen til 160 – 170 dB (tilsvarer ca 2 - 6 kPa) i infrazydområdet. For statisk trykk begynner smertegrensen ved 173 dB (9 kPa) for undertrykk, og fra 177 dB (14 kPa) for overtrykk.

⁵ Dette på grunn av akustisk refleks (aural reflex). Mellomøret demper vibrasjoner i indreøret.



Figur 4.1 Forskjellige terskler for menneskets hørselssystem. Phon: måleenhet for "loudness" ut fra laveste lydintensitet som er hørbar for mennesker. CR (Conditional Risk): betinget risiko for permanent hørselstap. HR (High Risk): høy risiko for permanent hørselstap (4).

Hørselsskade er ikke et direkte resultat av smerte. Hørselen kan bli skadet uten at en føler smerte. Den fjerde terskelen er terskelen for sprekk i trommehinnen. I det hørbare frekvensområdet er denne terskelen rundt 186 – 189 dB (42 – 55 kPa). Trommehinnen kan repareres, men skadene på mellomøret og det indre øret kan være permanente.

4.1.2 Skade på balanseorganet

Til nå har vi tatt for oss hørselsskader pga akustiske bølger, spesielt i hørbart frekvensområde. Men deler av øret har i tillegg andre funksjoner. En viktig del av det indre øret er balanseorganet, *vestibulum*, også kalt *forgården*.

For å opprettholde kroppens balanse trenges mer informasjon enn muskel- og skjelettsansene gir til hjernen. Tilleggsinformasjonen kommer fra vestibulum. Den inneholder to *otolittorganer* som har som oppgave å registrere tyngdekraften og andre rettlinjete krefter. Ut fra vestibulum går det også tre sirkelformede kanaler som kalles *buegangene*. De er følsomme for rotasjon. Otolittorganene, *utricleus* og *sacculus*, består av en membransekk fylt av *endolympfe* og hårceller. Sansehårene stikker inn i en geleaktig masse som ligger i endolympfen. Otolitter, som er krystaller av kalsiumkarbonat ($CaCO_3$), er innleiret i gelemassen og gir den større treghet enn endolympfen. Når hodet settes på skakke eller utsettes for rettlinjete akselerasjon, beveges alle delene av buegangene like mye. Endolympfen, gelemassen og sansehårene står i ro i forhold til hverandre.

Dersom hodet begynner å dreie, vil endolympfen i buegangene ha en tendens å forbli i ro pga sin

treghet, mens kanalveggen følger rotasjonen. I buegangene blir det derfor en væskestrøm i forhold til kanalveggene. Strømretningen blir den motsatte av hodets rotasjonsretning. Hver av buegangene har størst følsomhet for rotasjoner i sitt eget plan. Hjernen kan derfor beregne alle mulige rotasjonsretninger ved å sammenlikne impulsfrekvensene i de sensoriske nervefibrene fra de tre buegangene. Hvis rotasjonen er langvarig, overvinnes endolymfens treghet slik at den får samme bevegelse som kanalveggen. Gelemassen svinger da tilbake til sin normalstilling, og det blir ingen stimulering av hårcellene. Dette er hovedårsaken til svimmelhet ved langvarig rotasjon av kroppen.

Altmann (6) nevner noen resultater fra eksperimenter som er gjort for å undersøke virkninger av infralyd på vestibularvæsken. I forsøk på dyr kan virkningene evalueres fra øyebevegelser, mens på mennesker gir balansetester grunnlag for evaluering.

I forsøk på dyr (marsvin) begynner øye- og hodebevegelser fra rundt 160 dB. Det lyktes ikke å forårsake slike bevegelser med infralyd (2 – 20 Hz) opp til 172 dB. Infralydforsøk på mennesker ved 140, 142, 155 og 172 dB ga heller ingen registrerte øyebevegelser.

I frekvensområdet 50 – 100 Hz er det registrert kvalme og svimmelhet ved nivåer rundt 150 – 155 dB. Det er også blitt observert merkbare virkninger i frekvensområdet 200 Hz – 2 kHz ved nivåer fra 120 dB. Vestibulare virkninger er mest merkbare ved frekvenser over 250 Hz.

4.1.3 Virkninger på åndedrettssystemet

Virkninger av lavfrekvent lyd på menneskets åndedrettssystem er også blitt studert. Forsøk på mennesker har vist noen virkninger av lavfrekvent lyd (under 50 Hz) på nivåer opp til 150 dB (0,63 kPa). Blant de observerte virkningene kan vi nevne vibrasjoner i brystkassen og forandringer i pusterytmen. Selv om disse virkningene er karakterisert som ubehagelige, regnes de som tålbare.

I det lavfrekvente området mellom 50 og 100 Hz er virkningene på åndedrettssystemet mer merkbare. Lydnivåer rundt 150 – 155 dB viser åndedrettsvirkninger i brystet med hoste og pustevansker.

4.1.4 Virkninger på andre organer

Infralyd og lavfrekvent lyd har også andre virkninger på kroppen. Av disse kan vi nevne: økt pulsrate, rødming, sikling og smerter ved svelging. Noen kilder rapporterer også hodepine, vibrasjoner i synsfeltet og uklart syn. Forandringer i talen er også observert, men uten noen særlig reduksjon i forståelighet.

I infralydområdet skjer de mest merkbare virkningene rundt 7 Hz (i noen kilder: 9 – 13 Hz). Denne frekvensen er nær egenfrekvensen til *median alpha rhythm*⁶ i hjernen. Det er nevnt i litteraturen (8) at Sovjetunionen gjorde eksperimenter med akustiske våpen i infralydområdet,

⁶ "Median alpha rhythm" er en type elektriske oscillasjoner i hjernen.

spesielt ved 7 Hz, for å kunne skape mentale virkninger på mennesker. Det er også nevnt (6) noen viktige grunnfrekvenser til forskjellige deler av menneskekroppen: Hele kroppen vibrerer ved 2 Hz. Mens hodet beveger seg ved 5 Hz, skjer de mest ubehagelige vibrasjonene ved 4 Hz. Forandring i stemmen skjer mellom 10 og 20 Hz. Resonans i øyene kan forårsake synsforstyrrelser. Dette inntreffer ved 15 – 60 Hz. Grunnfrekvensene til indre organer, spesielt lunger og brystkasse, er mellom 4 og 6 Hz. Sterke vibrasjoner fører til flere symptomer hos mennesker, som åndenød, smerte i brystkassen og i noen tilfeller gastronomiske blødninger.

Som en oppsummering av resonansfrekvensene til menneskekroppen, presenterer vi her resultatene fra Tempest (9) i Tabell 4.1.

Stilling	Kroppsorgan	Resonansfrekvens [Hz]
Sittende:	Øye og syn	12 – 27
	Hode	8 - 27
	Ansikt og kjeve	4 – 27
	Hals	6 - 27
	Bryst	2 – 12
	Arm og bein	2 – 8
	Nedre del av ryggen	4 – 14
	Buken	4 – 12
Stående:	Øye og syn	12 – 27
	Hode	8 - 27
	Arm og skulder	2 – 8
	Bryst	2 – 12
	Buken	2 – 14
	Nedre del av ryggen	6 - 12
	Sete og lårbein	2 – 8
	Tarm	10 – 27

Tabell 4.1 Grunnfrekvenser til forskjellige kroppsdelene hos mennesket. Akustiske bølger nær disse frekvensene, med en tilstrekkelig høy amplitude, forårsaker forskjellige symptomer pga resonans i den enkelte kroppsdelene (6).

Virkningene av infralyd på menneskekroppen er fortsatt under utforskning, og fordi en ikke vet hvor alvorlige eventuelle skadevirkninger kan være, gjøres mange eksperimenter på dyr.

En del forskningsresultater ble offentliggjort på "1st European Symposium on Non-Lethal Weapons" i september 2001 (10). Eksperimenter hadde blitt utført for å undersøke virkningene av infralyd på dyr (i dette tilfellet griser). Akustiske signaler fra 10 til 50 Hz ble generert med intensitet fra 117 dB ved 10 Hz til 144 dB ved 35 Hz. Forskerne kunne identifisere resonansfrekvensene av bukhulen og blære til å være 20 Hz, med første harmoniske komponent

ved 40 Hz. Det var ingen påvirkning på EKG,⁷ men pulsen ble noe lavere. Det finnes også annen forskning som viser virkninger av infralyd på blodtrykk og puls (11). Forskningen antyder at menn er mer utsatt for slike påvirkninger enn kvinner.

Det ble observert virkning på organer som tolvfongertarmen,⁸ mage, blære og rektum ved 130 dB. Det ble også observert voldsom panikk blant apekatter ved høyere lydintensitet (163 dB). Denne virkningen fant ikke sted ved 130 dB. Disse og andre resultater presenteres i Tabell 4.2.

Lavfrekvent lyd (10 – 80 Hz)			
Utstyr	Frekvens, nivå [dB]	Testobjekt, sted	Resultater
Mobile Acoustic Source (MOAS)	10 – 50 Hz 117 – 144 dB	Gris under anestesi, felt	Resonans i kroppens hulrom ved 40 Hz. Ingen påvirkning på EKG.
Subwoofer Speakers	10 – 80 Hz 115 – 142 dB	Gris under anestesi, lab	Resonans i kroppens hulrom.
		Våken gris i lab	Minimalt anslag, rask tilvenning.
		Rhesus-apekatter, ⁹ lab	Ingen påvirkning.
TEAM Industrial Pressure Chamber	40 og 80 Hz 164 – 167 dB	Gris, kammer	Reaksjon mot stor luftstrømning. Ingen andre virkninger.
Infra Sound Test Device	10 Hz, 130 – 163 dB < 1 Hz, ca 120 dB	Primater, lab	Panikk ved 160 dB, men ikke ved 130 dB.
		Gris under anestesi, lab	Påvirkning av indre organer ved frekvenser < 1 Hz.

Tabell 4.2 Oppsummering av eksperimenter for å kartlegge virkningene av infralyd på forskjellige kroppsdelene, utført av Air Force Research Laboratory og Veridian Engineering (18).

Det er verdt å merke seg at det finnes mange uklare og ubeviste påstander om virkninger av lavfrekvente akustiske bølger, både på mennesker og på materiell, spesielt mht infralyd. Det er vanskelig å tro på historier om at infralyd med høy intensitet kan bevege store steiner og vegger. De vitenskapelige resultatene viser at det er i det hørbare frekvensområdet, spesielt 50 – 100 Hz ved rundt 150 dB, de fleste fysiologiske symptomene inntreffer, som f.eks kvalme og svimmelhet. Lewer (12) mener at slike uklarheter og unøyaktigheter også forekommer i

⁷ Elektrokardiogram

⁸ Del av tynntarmen.

⁹ Macaca Mulatta.

rappporter fra produsentene til de militære. Det har vært funnet avvik på hele 40 dB fra vitenskapelige rapporter.

Mer forskning må til før man virkelig kan forstå de reelle virkningene infralyd har på mennesker og materiell. For oppsummering av virkninger av infra- og lavfrekvent lyd, se artikkelen til Altmann (6). Denne artikkelen inneholder også mange referanser for videre fordykning. Samtidig understrekes det at tilfeller med kvalme ikke er rapportert fra alle eksperimenter.

4.2 Virkninger av hørbar lyd på menneskets høreterskel

Med *hørbar-lyd* mener vi her frekvenser over 100 Hz og under 20 kHz. Vi vil understreke at for ikke-dødelige våpen, er korte tidsperioder og høye amplituder mest relevante.

Her velger vi å først presentere en oppsummering om virkninger av hørbar lyd på menneskets øre (med hensyn til TTS og PTS) i Tabell 4.3.

Frekvens [kHz]	Nivå [dB]	Varighet	TTS	PTS	Kommentar
0,25 – 5,6	Opp til 140	Flere sekunder		Ingen	Testing for tunghørsel og smerteterskel
Bredbåndet støy (0,5 – 1,0 kHz, simulert airbag oppblåsing)	153	0,4 sek	TTS 4 – 8 dB ved 1,5 – 12 kHz, forsvant etter noen minutter	Ingen	Unge, friske menn
Støy fra etterbrenneren til en jetmotor	> 140	Noen sekunder av gangen		Ingen PTS etter flere måneder	Fly-personell
9 – 15	140 – 156	5 min	TTS i eksponeringsfrekvenser og deres halvfrekvenser, raskt	Ingen	

Tabell 4.3 Utdrag av oppsummering av midlertidige og permanente virkninger av frekvens og intensitetsnivå på mennesker (6).

Høye amplituder av størrelsesorden 140 dB ved høye frekvenser er skadelige, og kan forårsake PTS hos mennesker. Sprekk i trommehinnen kan forekomme ved 160 dB, og det er observert en liten sprekk i trommehinnen etter fem minutter med 158 dB lyd ved en frekvens på 6,5 kHz (6).

Det har vært foretatt eksperimenter på balansesystemet hos døve mennesker, og det ble da observert vestibular respons ved 120 – 130 dB i området 200 – 500 Hz, ved 140 dB ved 1 kHz og ved 145 – 160 dB ved 2 kHz. I tilfellet med mennesker med normal hørsel, opplevde 50 % forstyrret synsfelt ved 125 dB i området 500 – 1000 Hz. Ved 95 eller 105 dB avtar denne virkningen, og ved gjentakelse forsvinner den helt (7).

Ved 140 dB (f eks nær jetmotorer) er det observert svimmelhet og ubalanse. Det har også vært tilfeller med kvalme i etterkant. En forsker rapporterer om generell ustabilitet og svakhet, ut fra egne erfaringer. Kvalme og forstyrrelser i synsfeltet var ikke blitt observert. Hørselvernet ga en merkbar demping av symptomene.

Siden resonansfrekvenser er nesten like hos forskjellige mennesker, har det vært vanskelig å identifisere den frekvensen i spekteret som er hovedårsaken til virkninger på balansesystemet. Mens forskerne bak den nye rapporten (10) ikke har observert merkbare virkninger på dyr (geiter og apekatter), viser eksperimenter i Altmanns rapport (6) andre resultater, spesielt mht balansesystemet.

Nystagmus (raske øyebevegelser) er observert hos griser (ikke under anestesi) ved 142 – 169 dB i området 500 – 2000 Hz. Etter en varighet på noen minutter, er det observert flere skader på balansesystemet. Hos apekatter er øyebevegelser observert ved 140 – 145 dB ved 500 Hz.

Ved hørbare frekvenser har lydnivåer mellom 90 – 125 dB enkelte fysiologiske virkninger på menneskekroppen, som muskelspenning og økt puls. Disse virkningene dempes ved gjentakelse (tilvenning).

I tilfellet med høyfrekvent, hørbar lyd, synes resonansfrekvensene til munnens og nesens hulrom å gi merkbar virkning ved 125 dB. Ved 165 dB føles kiling i nese og munn.

4.3 Virkninger av ultralyd på mennesker

Til nå har vi sett på virkningene av infralyd og mer høyfrekvent hørbar lyd på menneskekroppen. I dette kapitlet ser vi på ultralyd, dvs akustiske signaler med frekvenser over 20 kHz.

Som vi nevnte i kap. 3, er akustiske signaler over 20 kHz ikke hørbare. I utgangspunktet har ikke disse signalene noen virkning på menneskets øre. Forsøk ved frekvensene 17, 21, 24, 26 og 37 kHz, med lydstyrke 148 – 154 dB, har påvist (13) TTS i halvfrekvenser. TTS forsvant raskt, og ingen PTS ble registrert.

Ultralyd har en del merkbare virkninger på menneskekroppen ved høy intensitet. Ved 160 – 165 dB føles kiling i munn og nese. *Oppvarming av kroppsdel* er allikevel det mest merkbare resultatet av ultralydeksponering. Det har vært gjort eksperimenter på pattedyr og insekter. C. H. Allen og hans kolleger (14) rapporterer dødelig virkning av ultralyd med høy intensitet (160 dB) på insekter og mus. Opphetning var hovedårsaken. Det var nok med eksponeringstider på mellom ti sekunder og tre minutter.

Parrack og hans kolleger (13) kunne vise at hos rotter hovedsakelig absorberes ultralyden hovedsakelig i pelsen. Absorpsjonsraten hos mennesker er av samme størrelsesorden som en barbert rotte. For frekvenser mellom 18 og 20 kHz er opphetingsgrensen på 144 dB for mus med pels, og 155 dB for barberte mus. Dette tyder på at 155 dB kan være en nedre grense for

oppheating av menneskekroppen. Amplituder rundt 180 dB antas å kunne ha dødelig virkning på mennesker (13).

Lokal oppheating mellom fingrene ved 165 dB er rapportert av Allen et al (14). Oppheating av større overflater, som håndflaten, skjer etter flere sekunder. Acton (15) har gjort observasjoner av mild oppvarming av huden hos mennesker ved amplituder på 140 – 150 dB.

Intens ultralyd påvirker også sentralnervesystemet hos mennesker, og forårsaker en følelse av sjøsyke, hodepine og svimmelhet. I Figur 4.2 ser vi en oppsummering av fysiologiske virkninger av ultralyd.

4.4 Virkninger av impulslyd på mennesker

Til nå har vi studert akustiske tonebølger. Men det er situasjoner hvor det akustiske signalet består av pulser. Den mest karakteristiske egenskapen ved slike signaler er en nesten momentan økning av overtrykk som faller relativt raskt. Disse signalene utbreder seg radielt, og amplituden dempes omvendt proporsjonalt med tredje orden av avstanden fra kilden (3). Det er flere kilder som genererer impulslyd med høy intensitet, for eksempel eksplosjoner, pistoler, kanoner osv.

Den høye energien som frigjøres ved for eksempel en eksplosjon, påvirker også menneskekroppen på andre måter enn kun i form av akustiske signaler. Her tar vi bare for oss skadene som har opphav i akustiske effekter.

4.4.1 Virkninger av impulslyd på menneskets øre

Vi begynner med å se på virkningene på menneskets øre. Som med andre typer akustiske signaler, gir impulslyd opphav til TTS og PTS hos mennesker. Grensen for sprekk i trommehinnen er 35 kPa, som tilsvarer 185 dB (3). Ved høyere lydtrykk kan mellomøret også bli skadet.

Impulslyd kan også ha skadelige virkninger på balansesystemet og sneglehuset.¹⁰ Det er utført eksperimenter på dyr, og på marsvin er det blitt observert skader på sneglehuset ved amplituder på 157 – 159 dB.

4.4.2 Virkninger av impulslyd på indre organer

De mest utsatte indre organene er lungene. Terskelen for alvorlige skader på lungene hos sau er 188 dB ved eksponeringstider over 5 ms. For mennesker er terskelen 182 dB for pulser på 8 – 9 ms. Terskelen for total skade på lungene er 202 dB (250 kPa). Mekanismen for skader på lungemembranen og lungesekken er som følger: Når bølgefronten kommer i kontakt med kroppen, er det to pulser som forplanter seg innover. Pulsen som forplanter seg i kroppvæsken har hastighet som lydhastigheten i vann (ca 1500 m/s), mens pulsen som forplanter seg i luften i lungene fortsatt har en hastighet på ca 340 m/s. Pulsen i fluidet øker trykket først, mens trykket i

¹⁰ Se kap. 3.

luften er samme. Denne trykkforskjellen forårsaker sprekk i lungemembranen. Vi oppsummerer skadene av impulslyd i Tabell 4.4.

Menneske	Lydnivå	Dyr
Død (ifølge beregninger)	180 dB	
Miste balansen Svimmelhet Mild opphetning	160 dB	Død (kanin)
Mild oppvarming av huden	140 dB	Kroppstemperaturen øker (mus med bar hud) Død (mus, rotte, marsvin) Kroppstemperaturen øker (mus)
Ingen fysiologiske forandringer	120 dB	Mindre biologiske forandringer (rotte, kanin)
	100 dB	

Figur 4.2 Oppsummering av virkningene av ultralyd på kroppen. Basert på (15).

4.5 Virkninger av akustiske bølger på mennesker. Oppsummering

Vi oppsummerer her diskusjonen om virkningene av akustiske bølger på mennesker. Følgende må understrekes:

For det første: det som blir beskrevet i media (radio, TV, aviser, internettsider osv) må betraktes med et kritisk øye, siden mange av påstandene om effektivitet, funksjonalitet osv ikke er vitenskapelig basert.

For det andre: forskningen på virkningene av akustiske bølger på mennesker og materiell (f eks bygninger) er langt fra ferdig. Det gjenstår fortsatt mange virkninger og påstander som må undersøkes nøye gjennom vitenskapelig arbeid. Tabell 5.1 oppsummerer virkningene som funksjon av frekvens og lydintensitet.

Lydtrykknivå [dB]	Puls	Antall pulser	TTS	PTS	Kommentar
140	2 ms	75	40 dB ved 4 kHz	Ingen	Mest sensitive forsøksperson
155	2 ms	75	< 40 dB ved 4 kHz	Ingen	Minst sensitive forsøksperson
159 180-183 189	Rifleskudd Løsskudd Kanon		30-80 dB i opptil 6 dager	Ingen	Skarpskytter Øre nær rifle Kanonmannskap
186-189	3" mortar	Første skudd	Maks 75 dB ved 5,8 kHz	50 dB ved 8,2 og 9,7 kHz	Smerte, øresus, sprekk i trommehinnen, blødning
150-160 ved 0.5 m 130-190 ved 3 m	Lekevåpen Fyrverkeri		Registrert i 2-5 % av befolkningen	29 dB ved 4 kHz 2,5% av befolkningen	Målt etter en landsbyfestival i India
162-171	40-400 ms	Mange		Ingen	Sonic boom

Tabell 4.4 Forskjellige virkninger av impulslyd på menneskekroppen (6).

5 BESKYTTELSE MOT AKUSTISKE SIGNALER

Til nå har vi sett på virkningene av akustiske signaler på menneskekroppen. I dette kapittelet tar vi for oss noen metoder for beskyttelse mot lydbølger.

Vi begynner med øret. Øret kan beskyttes enten ved å bruke øreplugger som puttes i den ytre kanalen, eller ved å bruke spesielle hodetelefoner som dekker hele det ytre øret. For frekvenser fra 500 Hz opp til ultralydområdet, kan begge variantene gi en dempning på 15 til 45 dB (6).

De spesielle hodetelefonene blir mindre og mindre effektive ved lavere frekvenser (mindre enn 20 Hz). Lydtrykket kan til og med forsterkes ved veldig lave frekvenser pga resonans i hodetelefonene (16). Øreplugger demper lyden bedre ved lavere frekvenser (250 Hz og lavere). Den typen som former seg etter ørets form, demper lyden mellom 10 og 30 dB. Én type

øreplugg som er laget av et spesielt skum demper lyden opptil 35 dB. Kombinasjonen av øreplugg og lydisolerende hjelm kan dempe lyden med 30 – 50 dB ved 0,8 – 7 kHz.

Lyd	Frek [Hz]	Øresmerte	PTS	Sprekk i tromme-hinnen	Virknings på balanseorganet	Virknings på pusteorganer
Infralyd	1 – 20	160 dB (1 Hz) 140 dB (20 Hz)	Ingen opp til 170 dB	> 170 dB	Ingen opp til 170 dB	Ingen opp til 170 dB
Lavfrekvent hørbar lyd	20 – 250	135 – 140 dB	Ingen opp til 150 dB	160 dB	150 dB: Mild kvalme	150 dB: Utålelig følelse
Høyfrekvent hørbar lyd	250 Hz – 8 kHz	140 dB	120 dB (1 time) 135 dB (7 min) 150 dB (0,4 s)	160 dB	140 dB Svak likevektsforstyrrelse	140 dB: Kiling i munnen o l
Veldig høyfrekvent hørbar lyd/ ultralyd	8-20 kHz	140 dB	Ingen opp til 156 dB	?	Ingen opp til 154 dB	140 dB: Kiling i munn o l 160 dB: Opphetning
Blast wave	-	145 dB	150 – 160 dB	185 dB	160 dB	200 dB: Lungesprekk 210 dB: Død

Tabell 5.1 Virkninger av lyd med forskjellige frekvenser og amplituder på menneskekroppen (6).

Vi har sett at veldig lave frekvenser, både i infralydområdet og lavfrekvent hørbar lyd, transmitteres inn i kroppen. Så beskyttelse mot vibrasjoner i hele kroppen og indre organer bør skje med andre midler. En lukket innhengning laget av stivt materiale, er en måte å hindre vibrasjoner på. En annen måte er å beskytte brukerne med porøse dempningsmaterialer. Et helt lukket armert militærkjøretøy er god nok beskyttelse mot lavfrekvent lyd, mens et vanlig kjøretøy, for eksempel en personbil, ikke gir tilstrekkelig beskyttelse mot infralydvibrasjoner.

6 PRODUKSJON AV STERK LYD

Vi har sett at akustiske signaler kan påvirke menneskekroppen på forskjellige måter, avhengig av frekvens og styrke. Vi så at det kreves akustiske signaler med relativt stor styrke for å kunne være effektive. Vi ser av Tabell 5.1 at de mest effektive lydstyrkene (sett i et ikke-dødelige våpen-perspektiv) ligger mellom 135 dB og 185 dB. I de neste avsnittene vil vi se mer på metoder for å produsere lyd med høy intensitet. Samtidig ser vi på forplantning av disse bølgene i medier, spesielt i luft.

6.1 Generering av sterk infralyd

Akustiske signaler med frekvenser opp til 20 Hz genereres i naturen. Eksempler på dette er turbulent vind, torden og havbølger (17). Men disse fenomenene forårsaker ikke noe smerte i øret, enten fordi de har for lav styrke eller/også fordi frekvensene er for lave (under 1 Hz). Det er også andre kilder til infralyd, for eksempel ventilasjonssystemer, industrielt maskineri, biler, høyttalere osv.

Når det gjelder å undersøke virkningene av infralyd, anvendes forskjellige kilder som er kontrollerbare både mht frekvens og amplitude. Vi nevner noen av disse her:

Høyttalere (15 W effekt og elementer med 30 cm i diameter) festet til en plate, kobles til hodetelefoner. På denne måten har man oppnådd amplituder på opp til 140 dB (6).

Ved Air Force Research Laboratory har de brukt tre forskjellige metoder for å generere infralyd (10). De tre metodene forklares kort nedenfor.

Mobile Acoustic Source (MOAS): MOAS er et trykkluft drevet horn med lengde 17 m. Den største lydstyrken ble målt til 144 dB. Dette instrumentet produserte signaler fra 10 til 50 Hz. De målte verdiene var 117 dB ved 10 Hz og opptil 144 dB ved 35 Hz.

Subwoofer Speakers: For å få en mer stabil og kontrollerbar lydkilde, brukte de basshøyttalere med to vannbeholdere på 29 liter hver, som ble benyttet for å transmittere signalene gjennom luft. På denne måten kunne forskerne generere lydbølger mellom 10 – 20 Hz med intensitet mellom 115 og 142 dB.

Infrasound Test Device (ITS): For å kunne produsere lydbølger med høyere amplituder, brukte forskerne et stålrør med en diameter på 89 cm og en dybde på 63 cm. I den ene enden av røret er det en dør, og i den andre enden er det et stempel som genererer akustiske bølger med lav frekvens. Når døra er lukket kommer lydintensiteten inne i røret opp i 163 dB. Lydintensiteten minker til 130 dB når døra åpnes.

6.2 Forplantning av lyd i atmosfæren

Det er to faktorer som begrenser forplantningen av akustiske bølger med høye amplituder, som er aktuelle til bruk som ikke-dødelige våpen: Det første er diffraksjon, som betyr at når

bølgelengden er større enn kilden, forplanter bølgene seg sfærisk, slik at energien sprer seg over et stadig større område. Slik avtar intensiteten med avstanden fra kilden. Dette gjelder også for kortere bølgelengder, bare i mindre grad. Det andre fenomenet skyldes de høye amplitudene som disse bølgene gjerne har. Luftas ikke-lineære viskositetsegenskaper gjør at bølgetoppen får stadig større hastighet i forhold til resten av bølgen. Etter en viss tid vil bølgefronten være steil med en vertikal tangent, før den til slutt bryter (19).

Ved kortere bølgelengder (høyere frekvenser) er bølgebryting viktigere enn diffraksjon. Flere parametere bestemmer hvor langt bølger med store amplituder kan propagere, bl a frekvens, kildens størrelse i forhold til bølgelengden, formen til bølgen og egenskapene til mediet (for eksempel temperatur, fuktighet osv).

Generelt er det meget vanskelig å generere akustiske bølger med amplituder høyere enn 140 dB i en avstand større enn 50 m, med akustiske kilder av størrelse rundt 1 m (24).

Dette gjelder for forplantning av lydbølgene i friluft. Hvis derimot forplantningen skjer i et lukket rom eller i en bygning, kan reflekterte bølger fra veggene til og med forsterke de opprinnelige bølgene, spesielt ved frekvenser nær resonansfrekvensene til det lukkede området.

7 PRODUKSJON AV LYD MED HØY INTENSITET FOR IKKE-DØDELIGE VÅPEN

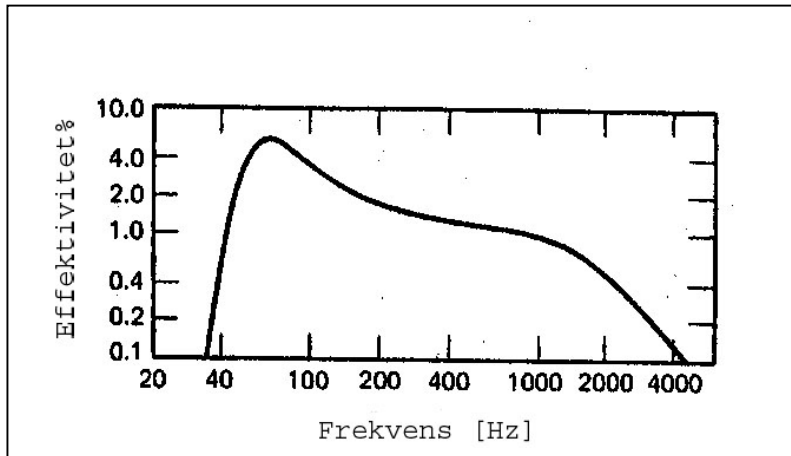
Det finnes flere muligheter for å generere lyd med høy intensitet. Hver av mulighetene har sine fordeler og ulemper.

Store høyttalere kan benyttes som lydkilde med justerbar frekvens og lydstyrke. En av ulempene er at store høyttalere trenger tunge batterier, og det trengs flere av disse høyttalere for at de skal være effektive som ikke-dødelige våpen. Effekten til høyttalere er av størrelsesorden noen hundre watt. I høyttalere er det kun noen få prosent av den elektriske effekten som konverteres til akustisk effekt. Figur 7.1 viser effektiviteten til høyttalere som funksjon av frekvens. Vi ser at disse egner seg bedre for lavere frekvenser.

Høyttaleres effektivitet kan forbedres ved å montere et horn foran dem. Ved lavere frekvenser må hornene være store. Men høyttalere kan med fordel benyttes i laboratorier.

Et annet instrument som benyttes for å lage lyd, er sirener. I en sirene kontrollerer en rotor luftstrømmen gjennom en perforert vegg. Det er for lengst bygd sirener med høy effektivitet. En tidlig utgave av en sirene fra 1941 hadde en effektivitet opptil 70 %, og kunne produsere 37 kW akustisk effekt. Sirenen var tilkoblet seks horn arrangert i en konfigurasjon med totalt 71 cm diameter, og kunne produsere lyd på rundt 170 dB. Med en demping på $1/r$ i åpent terreng, hvor r er avstanden fra kilden, var nivået 137 dB (smerteterskelen) ved 30 m og 127 dB ved 100 m. Sirenen var montert på en liten varebil (24). Ifølge Parrak (13) ble det produsert en sirene for å generere ultralyd ved rundt 150 kHz, med intensitet på 140 dB. Det var mulig å

oppnå høyere amplituder ved hørbare frekvenser. Denne sirenen var så stor at den var montert på et lasteplan. Arkin (20) nevner også et prosjekt, hvor planen er å bygge en multi-kilowatt forbrenningsdrevne sirene montert på et kjøretøy, med optimal infralydfrekvens og tilstrekkelig høy intensitet.



Figur 7.1 Høyttaleres effektivitet som en funksjon av frekvens. Effektiviteten er forholdet mellom effekten som transmitteres og den effekten som er blitt forbrukt. Effektiviteten er mye større for lavere frekvenser (4).

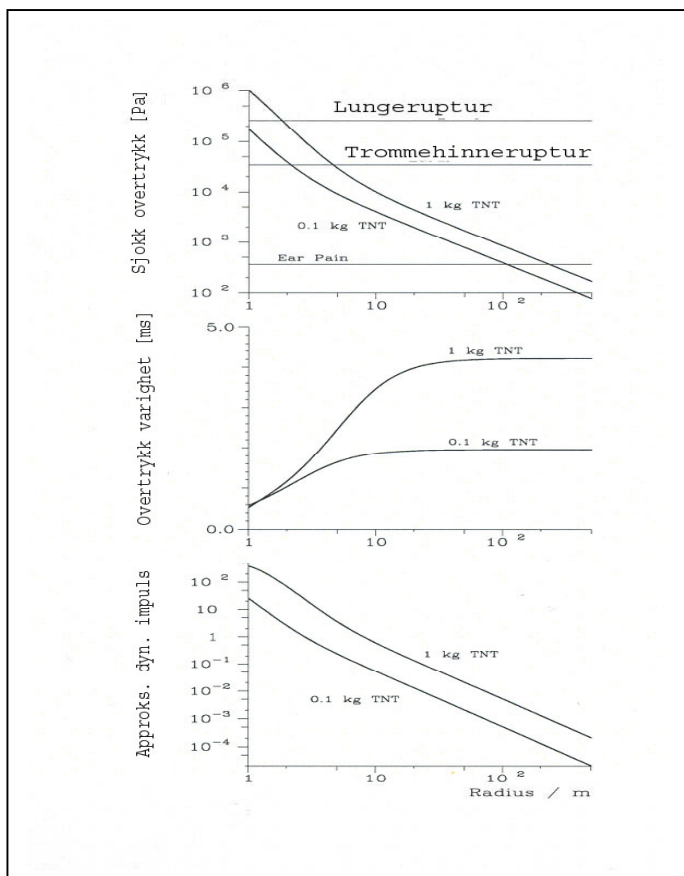
Det finnes en tredje type innretning for lydproduksjon. Her anvendes turbulens sammen med en sylindrisk resonator inne i et apparat. Prinsippet er det samme som i orgelpiper. Akustiske bølger fra infralyd til ultralyd kan produseres, avhengig av resonansfrekvensene til resonatoren. For å øke effektiviteten, kan man erstatte pipens åpning med en dyse (en såkalt *Hartmann whistle*). Slik kan en produsere akustiske bølger helt opp til 120 kHz.

Piezoelektriske transdusere (ultralydkapsler) kan anvendes for å produsere ultralyd med høy intensitet. Nivåer rundt 160 dB er oppnådd på denne måten. I én meters avstand er lydnivået 150 dB, og i ti meters avstand er lydnivået dempet til 130 dB. I praksis blir lydnivået noe mindre, pga brytning av sjokkbølgen (se avsnitt 6.2). I et eksperiment med et lydnivå på 153 dB rett ved kilden, ble nivået målt til 123 dB i 5,7 m avstand.

I avsnitt 4.4 diskuterte vi virkningene til impulslyd på menneskekroppen, og vi vil her se på mulighetene til å produsere impulslyd for ikke-dødelige våpen. Kjemikalier kan benyttes for å produsere impulslyd i form av en kontrollert sprengning. Men det er visse problemer med en slik lydproduksjon. Brukeren bør beskyttes godt, og ingen bør oppholde seg i umiddelbar nærhet, ellers kan eksplosjonen fort få dødelige konsekvenser.

I Figur 7.2 ser vi forplantningsegenskapene til sjokkbølgen som genereres ved en sprengning av 1 kg TNT. Vi ser at denne mengden kan forårsake øresmerter i en avstand på opptil 200 m fra kilden, mens den er dødelig ved noen få meter. Det er mulig å bruke en mindre mengde eksplosivt materiale (av størrelsesorden noen gram) for å oppnå en mindre sprengning. Den kan

i så fall brukes til å overraske og/eller forvirre mennesker. Lydtrykkvirkningen av en slik sprengning i et kammer eller et lukket rom forsterkes, som følge av resonans av trykkbølgene ved visse frekvenser, avhengig av geometriske egenskaper og eventuelle lydempende materialer i det lukkede området.



a

b

c

Figur 7.2 a) Sjokkbølgens overtrykk [Pa] som funksjon av avstand [m] fra kilden.
 b) Sjokkbølgens varighet [ms] som funksjon av avstand [m] fra kilden
 c) Impuls generert av dynamisk trykk per areal

8 AKUSTISKE VÅPEN I MEDIA OG LITTERATUR

Tidligere i avsnitt 4.1.4 nevnte vi at enkelte påstander, til og med i kjent litteratur, ikke holdt mål vitenskapelig. Fra tid til annen kommer påstander om akustiske våpen (både virkemåte og effektivitet) i media som man bør vurdere med et kritisk blikk.

8.1 Virkninger av en infralydstråle i store avstander fra kilden

Det er blitt påstått at infralyd har virkninger over store avstander (mer enn 50 m) fra kilden. Vi ser fra Tabell 5.1 at lydintensitetsnivået for øresmerter må være større enn 140 – 150 dB for at noen virkninger skal være målbare. For å oppnå vestibulære virkninger, må intensiteten være over 170 dB.

Det framgår av formlene i appendiks A.2 at for en lang bølge med frekvens på 20 Hz, og en effekt på ca 10 kW, er lydtrykket ved kilden 0,77 kPa (tilsvarende 150 dB). Ved å anta en demping av orden $1/r$, vil lydtrykknivået 50 m fra kilden være ca 3,2 Pa (104 dB), som er mye mindre enn 140 dB. Ved litt høyere frekvenser blir dette nivået ca 118 dB. Det er høyt, men allikevel mye lavere enn det som er nødvendig for å være effektivt. Det er kun ved kilden vestibulære virkninger kan forekomme.

Altmann (6) har regnet ut lydtrykknivået for høyere frekvenser. Ved 500 Hz oppnår man 122 dB i 50 m avstand fra kilden, og ved 2 kHz er denne størrelsen ca 113 dB. Det er langt under 140 dB, som er smerteterskelen, og enda lengre under 159 dB, som er terskelen for vestibulære virkninger.

8.2 Ikke-lineær superposisjon av to ultralydstråler

To typer interferens av ultralydstråler nevnes i litteraturen.

8.2.1 Ikke-lineær superposisjon av to ultralydstråler i luft

I det første tilfellet ser vi på to ultralydstråler i luft, som interfererer på vei til målet. Det kan vises at trykkamplituden til den modulerte frekvensen er mindre enn amplituden til hver av de opprinnelige lydstrålene. Dempningsfaktoren er lik forholdet mellom den modulerte frekvensen og den opprinnelige frekvensen. Hvis frekvensen til den opprinnelige bølgen for eksempel er 16 kHz, og den ønskede frekvensen er 20 Hz, er dette forholdet $1/800$ ($20/16\ 000$). Det tilsvarende er en demping på hele 58 dB. Vi har vist at for infralyd må lydtrykket være over 140 dB for at det skal påvirke balanseorganet hos mennesker. Derfor må det opprinnelige lydtrykket være rundt 200 dB for å gi infralyd med tilstrekkelig styrke. Da må den akustiske effekten være rundt 79 MW eller mer. Dette er meget vanskelig, for ikke å si umulig, å få til.

8.2.2 Ikke-lineær superposisjon av to ultralydstråler i øret

Følsomheten i øret minker med økende frekvens, pga massetregghet i trommehinnen. Denne reduksjonen har blitt målt opptil en faktor 20 mellom 1 og 10 kHz hos katter. Ved 16 kHz må derfor det opprinnelige lydtrykket være rundt 180 dB for å få vestibulære virkninger i øret. Dette er høyere enn lydtrykket dagens sterkeste ultralydkilder kan produsere. Selv om vi antar at dette lydtrykket kan produseres, blir det til en sjokkbølge allerede 1,4 cm fra kilden, og absorpsjonen demper lydtrykket med 60 dB i en avstand på 39 m fra kilden. Disse beregningene viser at det kun er mulig å oppnå øresmerte og vestibulære virkninger i umiddelbar nærhet til kilden, og ikke i avstander som kan være relevante for bruk som et ikke-dødelig våpen (over femti meter).

8.3 Diffraksjonsfritt akustisk prosjektil

Et annet akustisk våpen som er omtalt i forskjellige artikler (21) og (22) er akustiske prosjektiler som ikke påvirkes av diffraksjon¹¹. Alle typer periodiske bølger (lineære og ikke-lineære) blir på en eller annen måte påvirket av diffraksjon. Dessuten påstås det at det akustiske prosjektilet skal

¹¹ Avbøyning av lydbølger ved passering av hindringer eller trange åpninger (se avsnitt 6.2).

være på størrelse med en basketball. Dersom vi ser på forholdet mellom frekvens og bølgelengde ($c = \lambda f$), hvor c er lydhastigheten (omtrent 340 m/s i luft), λ er bølgelengden og f er frekvensen, er bølgelengden lik 34 m ved en frekvens på 10 Hz. Altså av størrelsesorden hundre ganger diameteren til en basketball. 10 Hz er et eksempel på lavfrekvent lyd.

Det er mulig å generere et akustisk prosjektil som kan transmitteres lengre, ved superposisjon av to forskjellige bølgeformer (altså ikke en periodisk lydkilde). Man må huske at også i dette tilfellet dempes lyden med en faktor $1/r$. Samtidig må det tas i betraktning at for akustiske bølger er det en lineær absorpsjon (som funksjon av avstand) som øker med kvadratet av frekvensen (A.18). Lyd med høy amplitude danner også en sjokkbølge. Jo høyere amplitude og frekvens, jo tidligere dannes sjokkbølgen. Absorpsjonsfaktoren på $1/r$ ødelegger den høye amplituden.

En annen mulighet er en type sjokkbølge som består av en puls (soliton¹²) som transporteres gjennom en kanal (eller et rør) i én retning. I praksis dempes amplituden gjennom mediet, spesielt i avstander større enn kilden.

Den siste muligheten vi studerer for å sende akustiske bølger effektivt i lengre avstander fra lydkilden, er såkalte "vortexringer". Vi tar for oss dette i et eget avsnitt for å kunne diskutere det grundigere, se avsnitt 8.6.

Vi fortsetter diskusjonen med forskjellige påstander om akustiske våpen i media.

8.4 Plasma foran målet

Det er blitt påstått (6) at akustiske våpen kan forårsake plasmadannelse foran målet, noe som vil oppleves som et slag mot kroppen, omtrent som å bli truffet av en hard liten ball. For å kunne skape et plasma, må det genereres et overtrykk på mange titals atmosfærer og en temperatur på flere tusen grader. Dette tilsvarer forholdene i umiddelbar nærhet av en eksplosjon. Ører og lunger blir også påvirket av dette slaget. Lungene tåler mye mindre enn ti atmosfære, så dette kan ikke anvendes som et ikke-dødelig våpen.

Et annet problem er å kunne produsere sjokkbølger med et overtrykk av størrelsesorden MPa. Selv om et så stort overtrykk kan produseres i midten av et rør, er det svært vanskelig å transportere det over særlig lange avstander med en dempningsfaktor på $(1/r^3)$.¹³ Det vil trolig være livsfarlig å oppholde seg i umiddelbar nærhet av en slik kilde.

8.5 Lokalt jordskjelv skapt av infralyd

Den siste påstanden om virkninger av akustiske våpen vi tar for oss, er muligheten for å skape et lokalt jordskjelv med infralyd. Terskelen for bygningsskader ved jordskjelv er satt til 5 mm/s

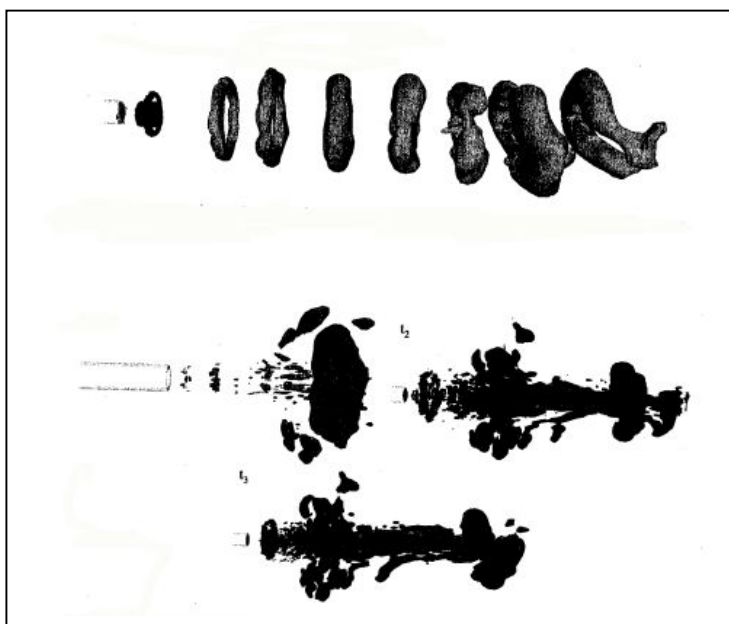
¹² Solitoner er en bestemt klasse av løsninger av ikke-lineære feltlikninger. I naturen er solitoner mest kjent som et bølgefenomen ved strømning i grunne kanaler.

¹³ Antatt som sfærisk sjokkbølge.

(6). For å kunne skape vibrasjoner med 10 mm/s, trengs det et overtrykk av infralyd på 1 kPa (154 dB). Som nevnt i kapittel 6.1, er det meget vanskelig å produsere så sterk infralyd i store avstander fra kilden. På den annen side er det ikke først og fremst vibrasjoner i jorda som forårsaker de største skadene, men snarere resonans i selve bygningen, spesielt i lukkede rom. Disse skadene opptrer mest i form av knuste vinduer, risting av løse gjenstander, sprekker i plast o.l.

8.6 Vortexringer

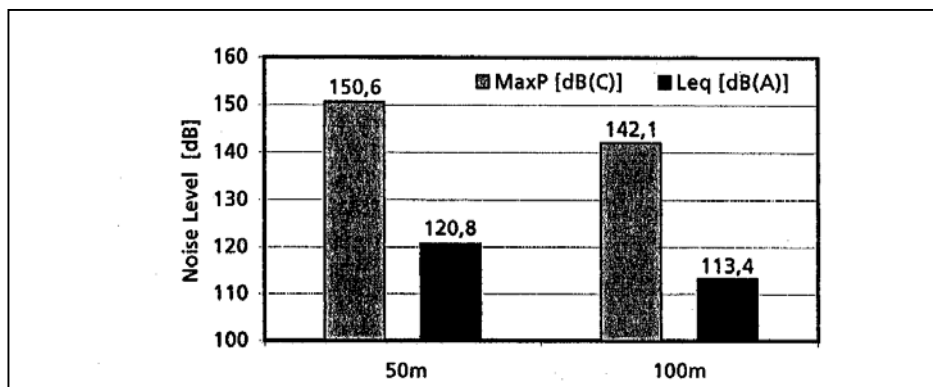
Når akustiske pulser generert av en kilde i den ene enden av et rør kommer ut fra en åpning i den andre enden, forandrer pulsene formen til en torus ("smultring"). Disse pulsene er generert i infralydområdet og kalles *vortexringer*. Kilden til pulsene kan være enten forbrenning eller kontrollerte eksplosjoner. Ringene har stor kinetisk energi, og kan dessuten transportere forskjellige kjemikalier (for eksempel tåregass). Det viskøse draget gjør at ringen trekker til seg fluidet gjennom sin bevegelse. Derfor blir ringen større og hastigheten mindre. Ringen mister til slutt sin form og brytes. På Figur 8.1 ser vi formen til en vortexring fra en simulering. Det er tydelig at ringen brytes i en viss avstand fra åpningen.



Figur 8.1 Forming av vortexringer ut av åpningen på et rør. Hentet fra en simulering gjort i forbindelse med forskning på vortexringer i Sverige (25).

Vortexringer kan forplante seg omtrent hundre ganger åpningens diameter. For eksempel vil en ring som kommer ut fra en åpning med en diameter på 1 m, forplante seg opptil ca 100 m.

Når det gjelder amplituden, velger vi å vise en figur fra et eksperiment som ble presentert i (18).



Figur 8.2 Amplitudeforholdene for vortexringer som en funksjon av avstand fra kilden. MaxP: det maksimale lydnivået. Leq: mål for den subjektive lydopplevelsen (4).

Amplitudene viser at i avstander mindre enn 50 m, kan man forvente merkbare virkninger på øret, og sannsynligvis vestibulare virkninger mye nærmere kilden. Det er også tydelig at virkninger på indre organer kan forekomme veldig nær kilden. De som utførte eksperimentet i 2001 kunne ikke kartlegge biologiske virkninger av vortexringer, men har nevnt en viss grad av stress og redusert konsentrasjon.

Muligheten for å kunne sende en mekanisk impuls og samtidig transportere partikler og gasser over en avstand på 60 – 80 m er også påpekt.

9 AKUSTISKE VÅPEN - DAGENS TEKNOLOGI

Til nå har vi studert akustiske bølger og deres biologiske virkninger generelt. Vi har også nevnt noen påstander i media om disse virkningene. Dessverre kommer slike påstander enkelte ganger også fra produsentenes side.

I dette kapittelet diskuterer vi videre dagens teknologi, og de akustiske våpnene som faktisk er tilgjengelige på en eller annen måte, enten i kommersiell produksjon eller på forskningsstadiet (prototyper).

9.1 Akustiske våpen som Ikke-dødelige våpen

NATO har delt ikke-dødelige våpen inn i fem hovedgrupper (26). Disse hovedgruppene er:

- Elektromagnetiske våpen (for eksempel laser)
- Kjemiske våpen (for eksempel tåregass)
- Akustiske våpen
- Mekaniske og kinetiske våpen (for eksempel nett)

e) Blandingsvåpen (for eksempel paintball)

Videre er akustiske våpen delt inn i:

- Hørbare (20 Hz – 20 kHz)
- Hørbare og optiske (for eksempel flashbang-granat)
- Ultralyd (> 20 kHz)

Infralyd er ikke nevnt, og forskningen på dette området er meldt å være i det alt vesentlige avbrutt. Ingen ultralydeksperimenter eller -teknologier er tatt med heller.

Videre er de antatte virkningene i en del tilfeller tatt fra historiske referanser, som bør evalueres nærmere. Et eksempel på dette er den såkalte *Squawk Box*, som kombinerer to ultralydstråler i øret og produserer frekvenser i infralydområdet. Infralyden skal forårsake kvalme og svimmelhet hos mennesker. Det vises til en historisk referanse, men det er også rapportert som felttestet i 1973. Vi understreker at disse kildene bør evalueres kritisk.

Vi velger allikevel å presentere alle akustiske våpntypene som er nevnt i NATOs rapport (26), med litt flere detaljer og bilder. Noen andre typer akustiske våpen er lagt til.

9.2 Gayl Device (US)

Dette er et bærbart akustisk våpen som genererer hørbar lyd med høy intensitet. Det er produsert i USA. Ifølge rapporten er virkningen en veldig høy, skingrende lyd som forvirrer og irriterer.



Figur 9.1 Prototyp av det bærbare akustiske våpenet Gayl Device.

9.3 Acoustic Irritation

Dette utstyret består av fire store kasser, styrt av en forsterker og en datamaskin med spesiell programvare. Systemet er tyskprodusert. Blant antatte virkninger er det nevnt forstyrrelse av kommunikasjon mellom enkeltindivider i en folkemasse.

9.4 Sound Source Projector

Sound Source Projector er et apparat som kan omdirigere lyden, slik at individer på avstand ikke kan lokalisere lydkilden. Anvendelsen av apparatet som et ikke-dødelige våpen er ikke evaluert.

9.5 Flashbang, lyd og lys

Flashbang er en rekke forskjellige typer ikke-dødelige våpen som produserer store mengder lys og røyk og veldig høy lyd. Disse er produsert som granater som kan kastes for hånd, med mindre granatkastere eller med større granatkastere montert på kjøretøy. Her følger noen eksempler på flashbang.

9.5.1 Cougar og Chouka

Cougar og *Chouka* er to granatkastere produsert i Frankrike. Det er kun størrelsen som er forskjellig, dvs Chouka er litt mindre enn Cougar.

Disse to granatkasterne er beregnet for opprørskontroll og er veldig kompakte. Den største typen er 590 mm lang og veier 3,4 kg. Begge modellene kan avfyre 56 mm-granater, men med et ekstra ledd koblet til tar de også 40 mm-granater.

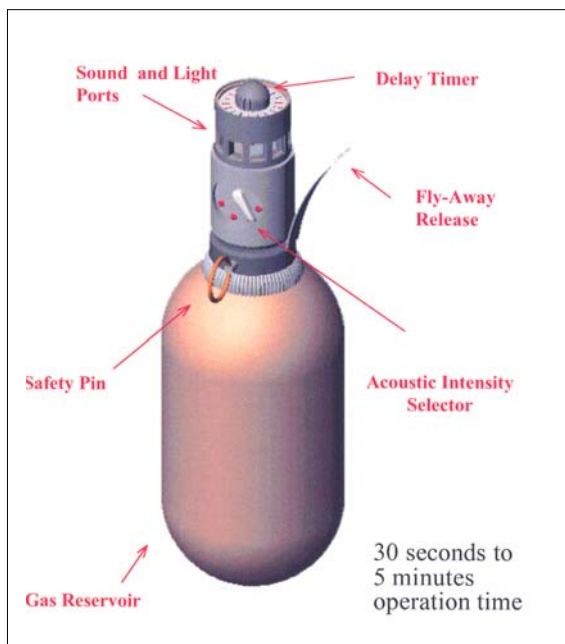
Vi ser et bilde av Cougar på Figur 9.2.



Figur 9.2 Cougar granatkaster og noen flashbanggranater (27).

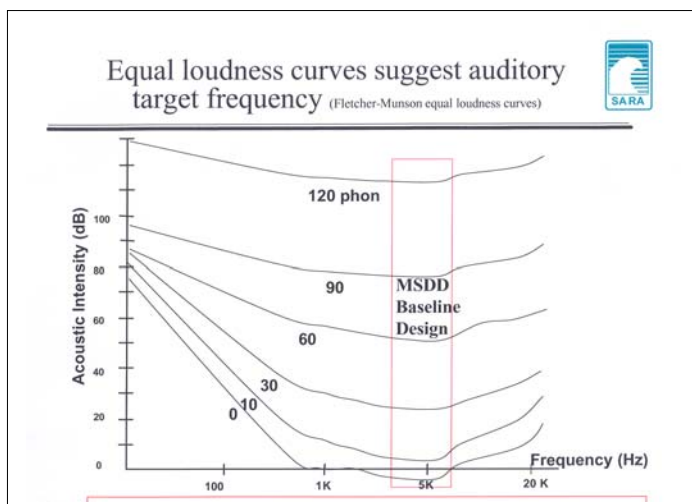
9.5.2 Multi Sensory Distraction Device (MSDD)

Denne typen har en kombinasjon av flere virkninger: sterkt, hvitt lysglimt, hørbar lyd i form av en sjokkbølge og stinkende lukt. Man kan velge mellom ulike lydintensitetsnivåer ved hjelp av en bryter. Figur 9.3 viser en illustrasjon av MSDD.



Figur 9.3 Illustrasjon av MSDD produsert av SARA i USA. Den har tre hovedfunksjoner: intens hørbar lyd, intenst lys og ubehagelig lukt (28).

Figur 9.4 viser lydintensiteten som en funksjon av frekvensen. Frekvensinnholdet til MSDD er merket på figuren som den røde rektangelen.



Figur 9.4 Ekvivalente kurver som viser den subjektive lydstyrken som funksjon av frekvens. Frekvensområdet til MSDD er merket på figuren i den røde rektangelen. Se også Figur 4.1.

9.5.3 66 mm Vehicle Launched NL Grenade, Flash Bang

Denne typen flashbanggranat er beregnet å kunne avfyres fra et kjøretøy. Den pågående

utviklingen av den er sponset av JNLWD. Den har både akustisk og visuell virkning, og kan forårsake forvirring og desorientering hos individer.

9.6 Infralyd

Virkninger av infralyd på menneskets indre organer og på bygninger er nevnt i NATOs rapport (26), men samtidig blir det pekt på at omfattende forskning ikke kunne identifisere de frekvensene som forårsaket disse virkningene.

9.6.1 Vortexringer

Vortexringer er kommet i kategorien for mekaniske og kinetiske ikke-dødelige våpen i NATOs rapport (26). Det er mulig den mekaniske impulsen til ringene er tatt mest hensyn til.

Siden vi diskuterer akustiske våpen som et generelt tema, velger vi å presentere de typer vortexringgeneratorer som er nevnt i litteraturen.

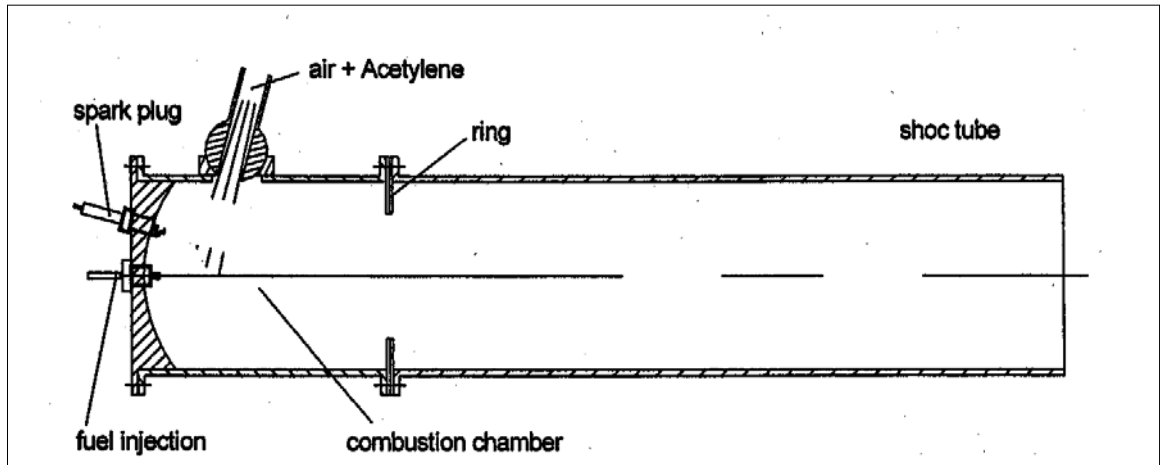
Vi viser forøvrig til Tabell 9.1, som er hentet fra (18).

System	Institusjon	Lydkilde	Virkning
Vortexgenerator	ARL/USA	Ekspløsjon	Vortex
Akustisk stråle med høy effekt	SARA/USA	Forbrenning	Infralyd
Høyenergi vortex	SARA/USA	Forbrenning	Vortex
Vortex generator	FOI/Sverige	Forbrenning	Vortex + infralyd
Akustisk feltgenerator	Picatinny Arsenal USA	Forbrenning	Hørbar lyd
Komprimert luftkilde	Picatinny Arsenal USA	Komprimert luft	Hørbar lyd
Sekvensiell bueutladning	ARL/USA	Elektrisk	Vortex + infralyd
Infrapuls-generator IPG	ICT/D	Forbrenning	Infrapuls + vortex

Tabell 9.1 Oversikt over pågående prosjekter om akustiske systemer anvendt som ikke-dødelige våpen (18).

Ved Totalförsvarets forskningsinstitut i Sverige forskes det på vortexringer som et ikke-dødelig våpen, og de har bygd sin egen vortexgenerator. De jobber også med modellering og simulering av vortexringer. En FOI-rapport fra desember 1999 beskriver modellering og simulering av vortexringer beregnet som et ikke-dødelig våpen (25).

Det andre fagmiljøet med slike aktiviteter i Europa, er det tyske *Fraunhofer Institut für Chemische Technologie* (ICT), hvor de har en egen avdeling for forsvarsteknologi. De arbeider aktivt med vortexringer, og har bygd en vortexgenerator under navnet *Infrapuls-Generator*, IPG (18). Se Figur 9.5.



Figur 9.5 Skjematisk bilde av IPG, utviklet av ICT i Tyskland (18).

For å vise hvordan vortexringene forplanter seg, har ICT laget et system som består av en vortexgenerator og to såkalte "regngardiner" (en slags vegg av tynne vannstråler). Ringen blir godt synlig når den passerer gjennom vannet, og man kan gjøre videoopptak. Hastigheten kan dessuten beregnes i forskjellige avstander fra kilden på denne måten. Nedenfor viser vi to øyeblikksbilder av en ring. På ICTs webside kan man se en kort videofilm av forsøket (30). På Figur 9.6 ser vi et øyeblikksbilde av opplegget.

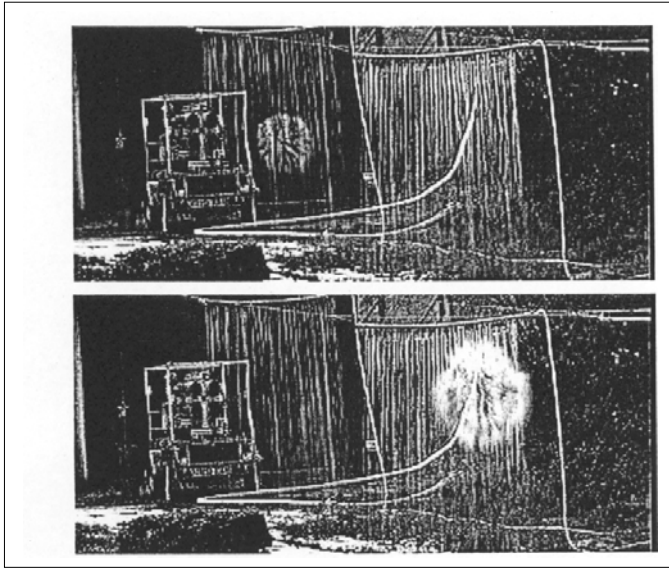
Det tredje miljøet vi viste til befinner seg i USA. En av hovedavdelingene ved Scientific Applications & Research Associates, Inc. (SARA) arbeider med ikke-dødelige våpen. Vi har allerede nevnt ett av deres produkter (MSDD).¹⁴ Når det gjelder vortexgeneratorer, har de bygd systemet *Vortex Launcher*. I beskrivelsen av systemet står det at når en høyhastighets vortexring ($0,5 \text{ Mach} \cong 170 \text{ m/s}$ i luft) slår inn i målet, vil den som blir truffet gjerne gå i bakken. Det står videre at slaget føles som å få en bøtte med isvann kastet mot brystet. Dette våpenet skal kunne brukes for å kontrollere opptøyer og folkemasser. Vi er ikke kjent med tekniske spesifikasjoner som frekvensområde og intensitet på dette våpenet.

9.6.2 Directional Sonic Firehose

Når det gjelder akustiske våpen forøvrig, produserer SARA en såkalt *Directional Sonic Firehose*, som dirigerer høyenergetiske akustiske bølger til målet. Våpenet skal ha en avskrekkende virkning på mennesker på avstander opp til én kilometer. Dette er en påstand som ikke er skikkelig dokumentert, og kan synes å være i strid med generelle prinsipper for

¹⁴ Se kapittel 9.5.2.

dempning av akustiske bølger (A.2).



Figur 9.6 Bilde av en vortextrings forplantning gjennom en regngardin. Forsøket ble gjort ved ICT, og resultatene ble presentert i (30).

9.6.3 Acoustic Blaster

Acoustic Blaster er en type akustisk våpen som produseres i USA av PRIMEX Physics International Company.

Prototypen består av fire lydkilder som drives med forbrenning og detonasjon av energirikt materiale, som propan i væskeform, hydroksyl eller krutt. Man har oppnådd amplituder på opptil 165 dB i en avstand av 15 m. Kilden består av en elliptisk oppstilling av enkeltkilder, som sender ut akustiske pulser uavhengig av hverandre. De har brukt tre forskjellige mengder med detonasjonsmateriale. Dette våpenet kan i følge produsenten anvendes til områdebeskyttelse og for å kontrollere folkemasser og opptøyer. Det kan være enten bærbart eller montert på kjøretøy. Et terrengkjøretøy av typen *HMMWV* (kjent som *Humvee*) er gitt som et eksempel.

10 OPPSUMMERING

Denne rapporten vurderer akustiske våpen som mulige ikke-dødelige våpen. Vi har vist at akustiske våpen er mye mer enn bare flashbanggranater, som er den klassiske oppfatningen. Vi har presentert mulige anatomiske virkninger av akustiske bølger i forskjellige frekvensområder (infralyd, hørbar lyd og ultralyd). Hvis disse akustiske bølgene har tilstrekkelig amplitude, forårsaker de resonans i ulike kroppsdeler, noe som kan resultere i symptomer som bl a kvalme, svimmelhet og desorientering. De kan også føre til midlertidige og permanente skader på hørselen, i form av midlertidig terskelskifte (TTS) og permanent terskelskifte (PTS).

Når det gjelder lydbølgers forplantning tok vi bl a for oss noen påstander om akustiske våpen som er framsatt i media, og til dels også i produsentenes dokumentasjon, og viste hvor viktig det er å se på disse med et kritisk øye. De mest anvendte teknologier for produksjon av akustiske bølger i sammenheng med ikke-dødelig våpen ble presentert, samt mange våpentyper som er produsert enten som prototyper eller som kommersielle produkter (kapittel 9).

Selv om eksperimenter og teoretiske beregninger har vist at akustiske bølger påvirker mennesker fysiologisk, er det få akustiske våpen i kommersiell produksjon. Mange av dagens akustiske våpensystemer er kun på prototypnivå og fortsatt under utvikling. De akustiske våpen som er i produksjon er hovedsakelig ulike typer avanserte flashbang-granater. Noen akustiske systemer kan anvendes som ikke-dødelige midler, selv om de ikke er beregnet som våpen. Disse systemene produserer høy lyd som kan være meget ubehagelig. Dessuten kan høy lyd forstyrre den verbale kommunikasjonen mellom mennesker og forårsake stress og panikk. Dagens politisirene kan ha en slik anvendelse.

Det er viktig å følge utviklingen i forskningen på akustiske våpen. Det pågår aktiv forskning på en del områder, for eksempel vortexringer. Vi har beskrevet det viktige potensialet vortexringer har som ikke-dødelig våpen. På andre områder derimot, for eksempel innen infralyd, er aktiviteten blitt mindre. Selv om media har påstått at infralyd kan ha dramatiske virkninger på kroppen, har det vist seg at det ikke er enkelt å utvikle våpen som er effektive i tilstrekkelig avstand fra infralydkilden. Dagens systemer for å produsere infralyd med tilstrekkelig styrke, er så store at de ikke er aktuelle som feltvåpen.

Et tema som ikke er berørt her er lover og retningslinjer som måtte gjelde i de land som bruker akustiske våpen som ikke-dødelige våpen.¹⁵

¹⁵ For en vurdering av ikke-dødelige våpen i lys av internasjonal humanitær rett se referanse (31).

APPENDIKS

A GRUNNLEGGENDE AKUSTIKK

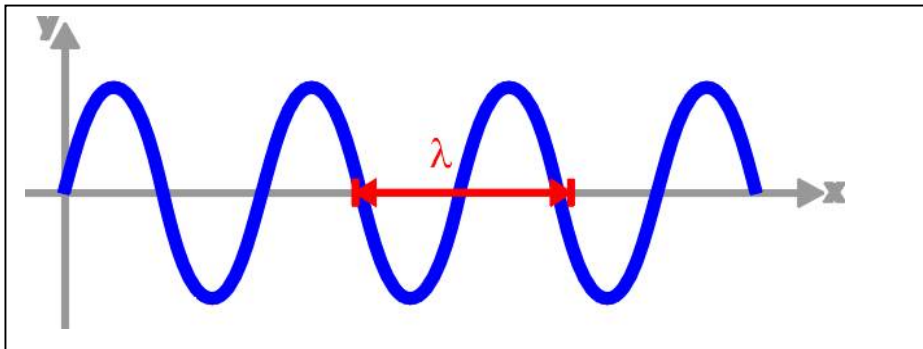
A.1 Litt om akustikk

Før vi diskuterer virkningene av akustiske bølger på mennesker, er det hensiktsmessig å forklare noen begreper og relasjoner.

Akustiske bølger er trykkoscillasjoner rundt en *likevektstilstand* i et fluid. Denne likevektstilstanden kan være atmosfæretrykk i luft. Atmosfæretrykket er rundt 101 kPa ved normale temperaturer. Antall oscillasjoner per sekund kalles *frekvens* f . Andre nyttige størrelser er *bølgelengde* λ og *amplitude*. Forholdet mellom frekvens og bølgelengde er gitt gjennom lydshastigheten c :

$$c = \lambda f$$

En illustrasjon kan være nyttig for å forstå disse begrepene, se Figur A.1.



Figur A.1 Lydbølge. Bølgelengden λ er indikert. Amplituden er utslaget.

Mennesker kan høre lyd i området mellom 20 Hz og 20 kHz. Ofte kalles området under 20 Hz for *infralyd*, mens området over 20 kHz kalles *ultralyd*. Hvis intensiteten er høy nok, kan man fortsatt høre frekvenser under 20 Hz. Begrepene lavfrekvent og høyfrekvent lyd brukes også. Området fra 20 Hz og til 250 Hz kalles vanligvis lavfrekvent. Lyd mellom 250 Hz og 2 kHz kalles *mellomfrekvent*, og lyd fra 2 kHz til 20 kHz betegnes som *høyfrekvent*.

Det er verdt å merke seg at terskelen for å tåle smerte blir lavere med økende frekvens fra noen få Hz opp til 250 Hz (6). Lydtrykk og lydintensitet måles ofte i *desibel*, som er en logaritmisk størrelse. Den er logaritmisk for bedre å reflektere hvordan mennesket opplever endringen av lydstyrke.

Før vi definerer enheten desibel (dB), må vi se på lydtrykk og lydintensitet. Lydtrykket P er trykkperturbasjonen til referansetrykket (for eksempel atmosfæretrykket).

Den øyeblikkelige lydintensiteten er det øyeblikkelige arbeidet som lydbølgen utfører på hvert fluidelement, og kan skrives som:

$$I(t) = pu \quad (\text{A } 1)$$

hvor p er lydtrykket og u er partikkelhastigheten. Enheten er vanligvis W / m^2 .

Den totale lydintensiteten midlet over tid er:

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T pudt \quad (\text{A } 2)$$

For plane harmoniske bølger er $p = \pm \rho_0 cu$, hvor ρ_0 er fluidets tetthet.

Uttrykt med det midlede lydtrykket (P_e) kan man skrive:

$$I = \pm \frac{P_e^2}{2\rho_0 c} \quad (\text{A } 3)$$

Hvor det effektive trykket P_e er definert som:

$$P_e = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt} \quad (\text{A } 4)$$

Nå kan vi definere to størrelser: *lydtrykknivå* (Sound Pressure Level) SPL og *lydintensitetsnivå* (Intensity Level) IL.

Disse to logaritmiske størrelsene er gitt ved:

$$SPL = 20 \log\left(\frac{P_e}{P_{ref}}\right) dB \quad (\text{A } 5)$$

$$IL = 10 \log\left(\frac{I_e}{I_{ref}}\right) dB \quad (\text{A } 6)$$

Her er P_{ref} og I_{ref} hhv *referansetrykket* og *referanseintensiteten*, og tilsvarer menneskets høreterskel ved 1 kHz. Verdiene på disse størrelsene i luft er:

$$P_{ref} = 20 \mu Pa \quad (\text{A } 7)$$

$$I_{ref} = 10^{-12} W / m^2 \quad (\text{A } 8)$$

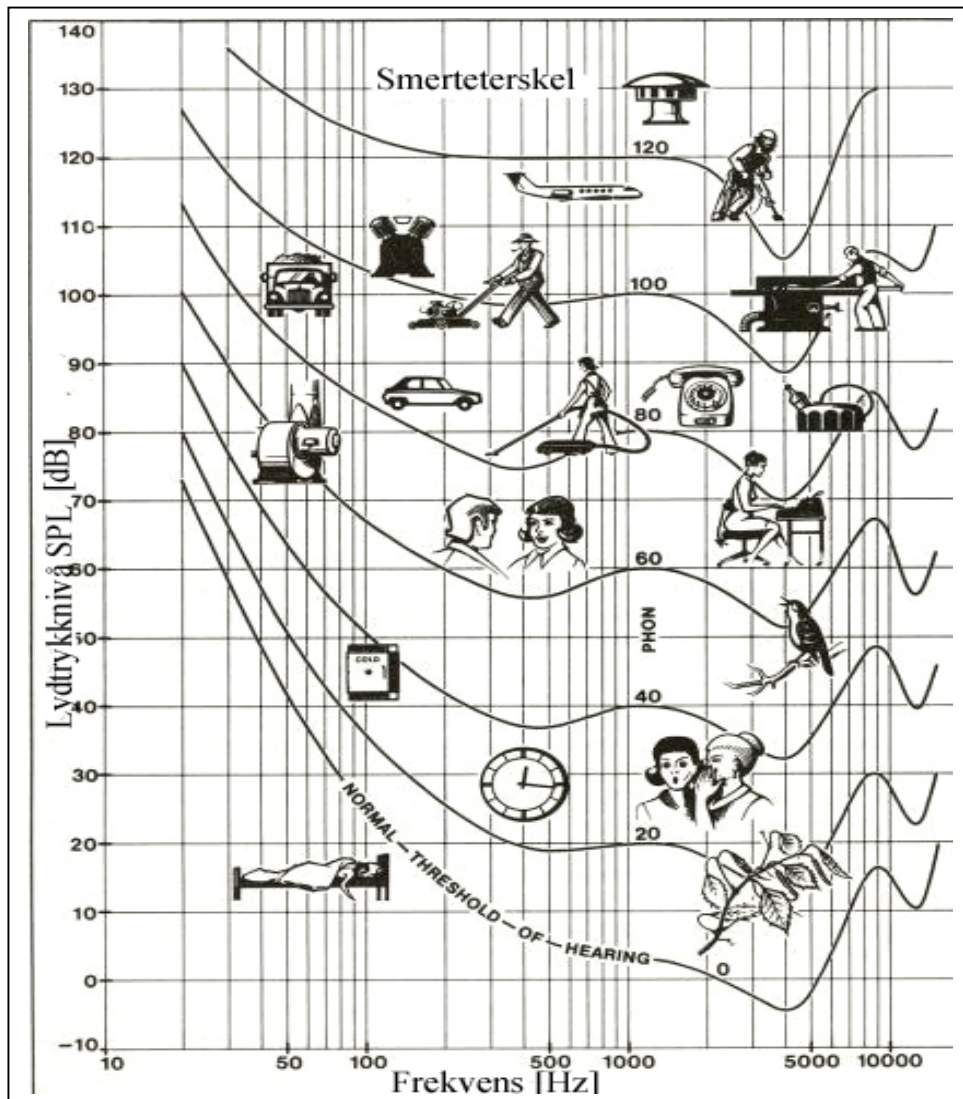
Det finnes også en størrelse som er et mål på den subjektive lydintensiteten, dvs den intensiteten

som føles med menneskets øre relativt til SPL ved 1 kHz. Denne størrelsen kalles *phon*. Phon ved en bestemt frekvens er den lydstyrken som tilsvarer SPL ved 1 kHz. For eksempel vil 40 phon ved en frekvens tilsvare 40 dB ved 1 kHz. Akustiske egenskaper til et akustisk ikke-dødelig våpen kan angis i phon. Figur A.2 viser noen eksempler på forskjellige lydtryknivå fra dagliglivet.

Vi har hele tiden omtalt lyd som akustiske bølger. Hvis overtrykket (perturbasjonstrykket til atmosfæretrykk) er lite nok (opptil 0,1 % av atmosfæretrykket, tilsvarende 134 dB), kan bølgene beskrives ved en lineær bølgelikning, uttrykt for eksempel med overtrykket p :

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (\text{A } 9)$$

For høyere verdier av overtrykket, kan ikke bølgelikningen lineariseres. Akustiske bølger er i disse tilfellene en eller annen form for ikke-lineære sjokkbølger.



Figur A.2 Typiske eksempler på forskjellige lydtryknivå fra dagliglivet (32).

A.2 Noen nyttige likninger

A.2.1 Lineær akustikk

Disse nyttige relasjonene er hentet fra referansene (6) og (4).

Lydtrykket p er en perturbasjon til referansetrykket (for eksempel atmosfæretrykket) P_0 .

I en avstand r fra kilden, hvor r er stor i forhold til kilden, er lydtrykket gitt ved:

$$p(r, t) = \rho_0 \dot{Q} \left(t - \frac{r}{c} \right) / (4\pi r) \quad (\text{A } 10)$$

hvor ρ_0 er mediets tetthet, \dot{Q} er den tidsderiverte av volumstrømmen og c er lydhastigheten i mediet.

Volumstrømmen til en harmonisk bølge er gitt ved :

$$Q(\tau) = Av_0 \sin(\omega\tau) \quad (\text{A } 11)$$

hvor $\tau = t - \frac{r}{c}$, ω er vinkelfrekvensen og c_0 er lydhastigheten. $A = 4\pi a^2$ er arealet av

overflaten til en sfærisk kilde hvor a er kildens radius. v_0 er hastigheten. Da er det harmoniske lydtrykket gitt ved:

$$p(r, t) = 4\rho_0 ck\pi a^2 v_0 \cos(\omega t - kr) / (4\pi r) \quad (\text{A } 12)$$

hvor bølgetallet er gitt ved: $k = \frac{2\pi}{\lambda}$.

Det effektive lydtrykket er gitt ved:

$$P_e(r) = \rho_0 ckAv_e / (4\pi r) \quad (\text{A } 13)$$

Den effektive lydintensiteten er gitt ved kvadratet av trykket:

$$I_e(r) = p_e^2(r) / (\rho_0 c) \quad (\text{A } 14)$$

Og den totale effekten P_e blir:

$$P_e = 4\pi r^2 I_e(r) \quad (\text{A } 15)$$

Uttrykket for det effektive trykket regnes ut ved å sette likning 13 og 14 inn i likning 15 :

$$P_e(r) = \frac{\sqrt{\rho_0 c P_e} / (4\pi)}{r} \quad (\text{A } 16)$$

Dette viser at sfæriske bølger dempes med en faktor $1/r$ i tilstrekkelig avstand fra kilden. Det finnes også andre dempningsfaktorer, som følge av mediets viskositet, termiske virkninger osv. Disse dempningsfaktorene kan angis ved en absorpsjonsfaktor α og er altså bestemt av mediet bølgen brer seg i. Dempningen er gitt ved:

$$P_e(r) = P_{e0} e^{(-\alpha r)} \quad (\text{A } 17)$$

Hvor P_{e0} er det effektive lydtrykket ved kilden. Dette betyr at det effektive lydtrykket dempes eksponentielt som funksjon av avstanden r fra kilden. For sfæriske bølger må de to dempningsfaktorene multipliseres sammen for å få den totale dempningen.

Tabell A.1 viser noen typiske verdier av α ved ulike frekvenser.

Frekvens (Hz)	Verdier av α (m^{-1})
125	$9 \cdot 10^{-5} - 3 \cdot 10^{-5}$
1000	$1,6 \cdot 10^{-3} - 0,6 \cdot 10^{-3}$
20.000	0,03 - 0,05

Tabell A.1 Tabell over typiske verdier av absorpsjonskoeffisienten α i luft.

Tabell A.1 viser at dempningen er mest virkningsfull for høyfrekvente bølger. For veldig lave frekvenser, særlig i infralydområdet, er virkningen nærmest neglisjerbar.

A.2.2 Ikke-lineær akustikk: svak sjokkbølge

I tilfeller hvor perturbasjonen til referansetrykket (i vårt tilfelle atmosfæretrykket) ikke er liten, er bølgehastigheten ikke lenger konstant. Da vil hastigheten til bølgetoppen bli større enn resten av bølgens hastighet, pga økt tetthet og trykk ved bølgetoppen. For sjokkbølger er uttrykket for absorpsjonskoeffisienten α gitt ved:

$$\alpha = \frac{b\omega^2}{2\rho_0 c^3} \quad (\text{A } 18)$$

som viser at denne koeffisienten varierer med kvadratet av frekvensen. b er en faktor som er avhengig av forskjellige egenskaper ved mediet (viskositet, termiske egenskaper osv).

Når en studerer sjokkbølger, begynner en gjerne med andre ordens approksimasjon til bølgelikningen (A 8). Uttrykket i likning (A 18) gir oss avstanden fra kilden hvor en sjokkbølge tar form:

$$x_p = \frac{\lambda}{\pi(\gamma+1)M} \quad (\text{A } 19)$$

der λ er bølgelengden og γ er "specific heat ratio" som er lik 1,4 for luft. Machtallet er definert som $M = \frac{v_0}{c}$, hvor v_0 er partikkelhastigheten. Vi tar et eksempel hvor $M = 0,01$. Det gir $v_0 = 3,4$ m/s i luft. Hvis vi antar et effektivt trykk på 1,4 kPa (156 dB) ved kilden, vil en bølge med frekvens 100 Hz ta form som en sjokkbølge etter 45 m, og en bølge med frekvens 10 kHz allerede etter 45 cm. Deretter dempes amplituden med en faktor som er omvendt proporsjonal med avstanden. Bølgen går over til en dempet planbølge, der amplituden avtar eksponentielt.

Litteratur

- (1) N Broner (1993): The Effects of Low Frequency Noise on People- A Review, *Journal of Sound and Vibration* **58**, 4.
- (2) R Applegate (1969): Riot Control, Material and Techniques. Paladin Press.
- (3) R Edberg (Chairman) (1978): Anti-personnel Weapons, SPIRI, London.
- (4) L E Kinsler, m fl (2000): Fundamentals of Acoustics. John Wiley & Sons, Inc.
- (5) New Scientist, september 1973.
- (6) J Altmann (1999): Acoustic Weapons - A Prospective Assessment: Sources, Propagation and Effects of Strong Sound, Science and Global Security.
- (7) J Altmann (2001): Acoustic Weapons - A Prospective Assessment, Science and Global Security.
- (8) J B Alexander (1999): Future War. St. Martin's Press, New York.
- (9) W Tempest (1976): Infra Sound and Low Frequency Vibration. Academic Press.
- (10) M R Murphy m fl (2001): Acoustic Bioeffects Research for Non-Lethal Applications, Non-Lethal Weapons, New Options Facing Future, Ettlingen, Germany, September 25 - 26.
- (11) L Andrén (1982): Cardiovascular Effects of Noise, *Acta Med Scand Suppl* **657**, 1 - 45.
- (12) N Lewer (2002): The Future of Non-Lethal Weapons. Frank Cass & Co., London.
- (13) H O Parrak (1966): Effects of Air-born Ultrasound on Humans, *International Audiology* **5**, 294-307.
- (14) C H Allen, H Frings, I Rudnick (1948): Some Biological Effects of Intense High Frequency Airborne Sound, *JASA* **20**, 62-65.
- (15) W I Acton (1975): The Effects of Industrial Airborne Ultrasound on Humans, *Ultrasonics*, mai 1975, 124-128.
- (16) Swedish Defence Material Administration (1985): Infrasound, A Summary of Interesting Articles.
- (17) B Berglund, P Hassmen (1996): Sources and Effects of Low-Frequency Noise, *JASA* **99**, 5.
- (18) European Working Group, Non-Lethal Weapons (2001): Proceedings 1st European Symposium on Non-Lethal Weapons.

- (19) B Gjevik (1989): Forelesninger i bølgeteori, Universitetet i Oslo.
- (20) W M Arkin (1997): Acoustic Anti-personnel Weapons: An Inhuman Future? *Medicine, Conflict and Survival* **14**, 314-326.
- (21) Defense Electronics, februar 1993.
- (22) International Defense Review, no 4, 1993.
- (23) P G Saffman (1992): Vortex Dynamics. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- (24) J Altmann (2001): Acoustic Weapons, Science & Global Security. Vol 9, 165-234.
- (25) E Lilleberg, C Fureby (1999): A Computational Study of Vortex Ring. Generation. Defence Research Establishment, Weapons and Protection Division, Sweden.
- (26) SAS-035 Study Team (2003): Non-Lethal Weapons Effectiveness Assessment. The Final Study Report of NATO SAS-035, RTO-TR-085.
- (27) Alsetex i Frankrike (2004): <http://www.asetex.fr/gb/ordre/000.htm>.
- (28) SARA (2004): <http://www.sara.com/nonlethal/MSG.html>.
- (29) Curt Larsson (1999): Ikke-dødlige vapen. Lagesrapport 1999, Totalforsvarets forskningsinstitutt, Stockholm.
- (30) Institut Chemische Technologie (2004): <http://www.ict.fhg.de>.
- (31) Gro Nystuen (2003): Ikke-dødelige våpen og internasjonal humanitær rett, FFI/Rapport - 2003/01471.
- (32) J.R. Hassel, K. Zaveri (1988): Acoustic Noise Measurements, Brüel & Kjær, Nærum, Denmark.