

FFI RAPPORT

STØY FRA SKYTEFELT

HUSEBY Morten, RAHIMI Reza, TELAND Jan Arild, DYRDAL Idar

FFI/RAPPORT-2005/00471

STØY FRA SKYTEFELT

HUSEBY Morten, RAHIMI Reza, TELAND Jan Arild,
DYRDAL Idar

FFI/RAPPORT-2005/00471

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-2005/00471 1a) PROJECT REFERENCE FFI-V/332101	2) SECURITY CLASSIFICATION UNCLASSIFIED 2a) DECLASSIFICATION/DOWNGRADING SCHEDULE -	3) NUMBER OF PAGES 36		
4) TITLE STØY FRA SKYTEFELT NOISE FROM FIRING RANGES				
5) NAMES OF AUTHOR(S) IN FULL (surname first) HUSEBY Morten, RAHIMI Reza, TELAND Jan Arild, DYRDAL Idar				
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>Noise</u> b) <u>Shooting range</u> c) <u>Non-linear</u> d) <u>Sound propagation</u> e) <u>Weapon</u> </td> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> IN NORWEGIAN: a) <u>Støy</u> b) <u>Skytefelt</u> c) <u>Ikke-lineær</u> d) <u>Lydutbredelse</u> e) <u>Våpen</u> </td> </tr> </table>			a) <u>Noise</u> b) <u>Shooting range</u> c) <u>Non-linear</u> d) <u>Sound propagation</u> e) <u>Weapon</u>	IN NORWEGIAN: a) <u>Støy</u> b) <u>Skytefelt</u> c) <u>Ikke-lineær</u> d) <u>Lydutbredelse</u> e) <u>Våpen</u>
a) <u>Noise</u> b) <u>Shooting range</u> c) <u>Non-linear</u> d) <u>Sound propagation</u> e) <u>Weapon</u>	IN NORWEGIAN: a) <u>Støy</u> b) <u>Skytefelt</u> c) <u>Ikke-lineær</u> d) <u>Lydutbredelse</u> e) <u>Våpen</u>			
THESAURUS REFERENCE: 8) ABSTRACT Norwegian Defence Estates Agency wants to evaluate noise pollution from army firing ranges. At times there can be some noise heard at neighbors near the firing ranges. Norwegian Defence Estates Agency want to extend their ability to assess the extent of this problem. The source data which is used as input for the computations of noise propagation is central in this report				
9) DATE 2005-02-11	AUTHORIZED BY This page only Jan Ivar Botnan	POSITION Director		

UNCLASSIFIED

ISBN 82-464-0922-0

SECURITY CLASSIFICATION OF THIS PAGE
 (when data entered)

INNHOLD

	Side	
1	INNLEDNING	7
2	OPPDELING AV PROBLEMET I FIRE FASER	8
2.1	Fase 1 - Løpet	8
2.2	Fase 2 - Gassekspansjon	8
2.3	Fase 3 – Ikke-lineær akustikk	9
2.4	Fase 4 – Lineær akustikk	9
3	AUTODYN	10
4	WEBERMODELLEN	15
4.1	Ligningene i Webermodellen	16
4.2	Retningsavhengighet	18
4.3	Korreksjon av Weberradien grunnet bakkerefleksjon	20
5	SAMMENLIGNING AV AUTODYN OG WEBERMODELLEN	21
6	FEMNOISE	24
7	MÅLERELEVANTE BETRAKNINGER	24
7.1	Machrefleksjon fra bakken	24
7.2	Height of burst gain	25
7.3	Unngå prosjektillyden	27
7.4	Tidsseperasjon mellom prosjektillyd og munningslyd	27
8	ANBEFALINGER TIL MÅLEPROSEDYRER FOR VÅPEN	28
8.1	Databaser med målte data	28
8.2	Overslag over avstanden til den lineære sonen	29
8.3	Avstand fra kilde til mikrofon	29
8.4	Retninger ut fra våpenet	30
8.5	Høyde over bakken	30
8.6	Fast målestasjon	31
APPENDIKS		
A	ISO OG ANSI-STANDARDER	32
B	NOEN REFERANSER TIL IKKE-LINEÆR LYD I LITTERATUREN	33
B.1	Auregan 1999 (Ref. 3)	33

B.2	Hanyaga 2004 (Ref. 2)	34
B.3	Buick 2000 (Ref. 4)	34
B.4	Wunderli 2004 (Ref. 1)	34
B.5	Ford 1993 (Ref. 10)	34
	Litteratur	36

STØY FRA SKYTEFELT

1 INNLEDNING

I forbindelse med forsvarrets skytefelt ønsker Forsvarsbygg å evaluere den miljømessige belastningen omgivelsene blir utsatt for. I nærheten av anleggene vil det tidvis kunne bli en del støy. Forsvarsbygg ønsker å forbedre sin evne til å anslå omfanget av dette.

I dag benytter Forsvarsbygg seg av programmet Milstøy for å gjøre disse beregningene. Milstøy benytter en database for kilde-data som inngangsdata til forskjellige beregningskjerner, deriblant NORD2000 som er utviklet av bl.a. SINTEF (se Ref. 13 og 14).

Denne rapporten ser særlig på hva som er status og hva som er muligheter i forbindelse med kilde-data. Milstøy er en lineær propagasjonskode som tar som input signaturer tilstrekkelig langt fra lydkilden til at lydforplantningen kan betraktes som lineær. Inngangsdata til Milstøy er 1/3-oktavnband spektre. Forsvarsbygg anser at de største usikkerhetene i dagens beregninger ligger i inngangsdataene.

I utgangspunktet kan man da se for seg at man går ut og gjør målinger for alle aktuelle våpen for alle situasjoner som kan oppstå. Gitt at målingene var tilfredstillende utført ville man da ha tilstrekkelig input og ikke ha behov for å gjøre beregninger. Imidlertid er det mange parametere i problemet som kan ha en rekke forskjellige verdier. Man har forskjellige ladningsmengder og forskjellige kruttyper. Krutttemperatur har også betydning. Prosjektilene kan ha forskjellig vekt. Våpenet vil ha forskjellig utskytningsvinkel, noe som sterkt vil påvirke utbredelsen da våpenstøy er kraftig retningsavhengig. Våpenets geometri (f.eks. en munningsbrems) vil påvirke lyden. Underlaget og meteorologi er viktige faktorer. Lyden vil f.eks. typisk kunne høres langt bedre når vi har en tilstand der det er kald luft nær bakken og varm luft lenger oppe. Forskjellige prosjektiltyper kan også påvirke lydnivået.

Dersom man skal gjøre målinger for alle kombinasjoner av parametere vil antallet målinger bli uoverkommelig. Det er derfor naturlig å se for seg en prosess der man er i stand til å gjøre matematisk modellering av kilde-signaturene. Deretter må man gjøre et begrenset utvalg av målinger som man bruker til å kalibrere og validere beregningene. Beregningene brukes altså til å fylle ut hullene mellom de målingene som er utført. På denne måten burde det være mulig å oppnå sikre estimat av kilde-signaturer for en lang rekke forskjellige situasjoner ut i fra en begrenset database med feltmålinger.

I denne rapporten vil vi først gi en beskrivelse av grunnleggende prosesser i problemet fra lyden blir til fram til den når mottaker. Deretter vil vi beskrive og vurdere en del metoder som kan benyttes til å beregne lyden i forskjellige faser av lydutbredelsen. Til slutt vil vi basert på dette gi en del anbefalinger i forhold til hvordan man bør utføre målinger av støy fra våpen for å

kunne nyttiggjøre seg måleresultatene som inngangsdata til forplantningsmodeller, både de modellene som eksisterer nå, men også de som eventuelt vil kunne bli tatt i bruk noe frem i tid.

2 OPPDELING AV PROBLEMET I FIRE FASER

Det fullstendige problemet tar for seg lydens forplantning helt fra den blir til inne i et våpen til den når fram til mottaker. Når det gjelder støy fra et skytefelt kan man identifisere tre kilder for generering av støy:

- Munningslyden
- Prosjektillyden
- Terminallyd

For hver av disse tre er den fysiske prosessen for generering av støy forskjellig og må studeres separat. I forhold til støy for naboer til et skytefelt vil det først og fremst være munningslyden som er viktig, og det er denne vi har sett på i denne rapporten.

Fra kilde til mottaker vil lyden gå gjennom forskjellige faser der forskjellige fysiske effekter er dominerende. Innen hver av disse fasene vil vi trenge forskjellige matematiske beregningsmodeller. Vi ser for oss en inndeling av problemet i fire faser.

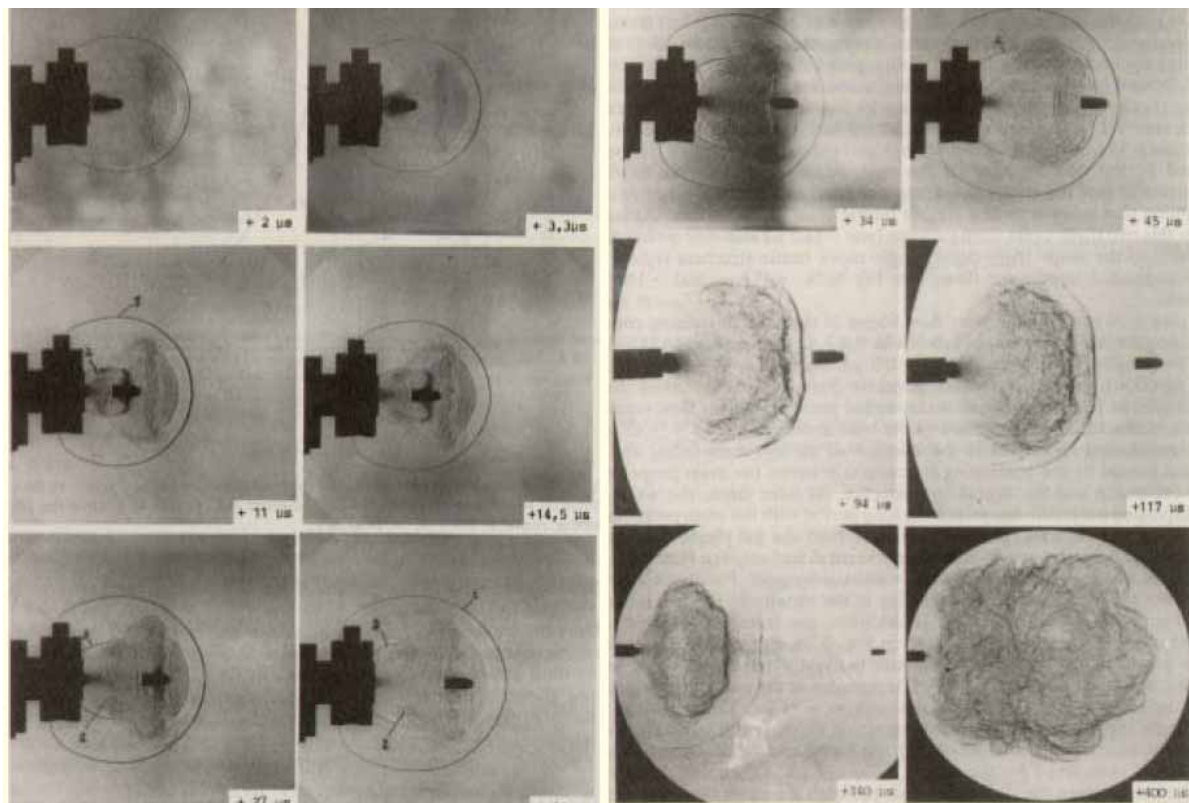
2.1 Fase 1 - Løpet

Inne i løpet på et våpen vil man ha en kjemisk prosess der krutt forbrennes. Man kan ha forskjellig mengde krutt, forskjellig krutttemperatur og krutt som forbrenner med varierende hastighet. Det vil også være varierende hvor mye av den kjemiske energien som omformes til kinetisk energi, og hvor mye som omformes til akustisk energi. Den kjemiske reaksjonen vil gi opphav til et trykk/hastighets-felt inne i løpet.

Her vil man tradisjonelt prøve å unngå å beregne de kompliserte kjemiske prosessene. Man vil f.eks. kunne bruke enkle parametriske modeller som baserer seg kun på kjemisk energi som funksjon av type og mengde sprengstoff, og enkle formler for hvor mye som blir omdannet til akustisk energi. Her kan da parametere tilpasses slik at f.eks. utgangshastighet og/eller lydtrykk samsvarer med målinger rett ved munningen.

2.2 Fase 2 - Gassekspansjon

I det prosjektilet kommer ut av løpet vil kruttgassen som har vært sperret inne bak prosjektilet slippe fri og spre seg hurtig ut i luften. Vi regner gassekspansjonsfasen som tidsperioden fra prosjektilet har forlatt løpet til det tidspunktet der overflaten på den ekspanderende kruttgassen ekspanderer med en hastighet som er mindre enn lyd hastigheten. Det vil altså si fram til tidspunktet der lyd vil spre seg utenfor kruttgassen. Figur 2-1 viser den ekspanderende gassen når den kommer ut fra løpet.



Figur 2-1: Den ekspanderende gassen når den kommer ut av løpet.

I denne fasen vil man være avhengig av å gjøre beregninger som er finstilte med hensyn på tid og rom. Dette er såpass beregningsmessig tungt at man primært vil kjøre beregningene i 2D. Man antar altså en aksesymmetri om løpet. Her vil man i utgangspunktet ikke kunne ta bakken i betraktning. Man kan imidlertid utføre finstilte beregninger inntil trykkbølgen har kommet så langt at den begynner å vekselvirke med bakken. For den videre forplantningen vil man kunne utføre liknende beregninger men med noe grovere grid og tidsoppløsning.

2.3 Fase 3 – Ikke-lineær akustikk

Etter at lydbølgen har startet å forplante seg bort fra kruttgassen vil trykkbølgen anta en form der vi kan beskrive den med enklere matematiske og numeriske metoder. Lyden er her fortsatt så høy at en rent lineær modell ikke vil gi tilfredsstillende resultater. Som en pekepinn vil denne fasen kunne være mellom 10 og 250 m for en kanon og mellom 1 og 10 m for en rifle.

I denne regionen finnes det i dag ingen gode beregningsmetoder. Det finnes en rekke ISO-standarder som gir forenklede metoder for å estimere lydforplantningen i dette området. Disse omhandler til en vesentlig del kontinuerlig støy, og benytter metoder som neppe er gode for impulsstøy. Noe litteratur for spredning av ikke-lineær lyd er beskrevet i appendiks B.

2.4 Fase 4 – Lineær akustikk

Her er lydnivået lav nok til at utbredelsen kan beskrives med lineær akustikk. Det finnes ingen eksakt grense for skillet mellom lineær og ikke-lineær akustikk. Ikke-lineære effekter vil ha

større betydning jo høyere lyden er. Når trykket er lavere enn 1 kPa regner vi at lyden helt sikkert er lineær. Lydtrykket er da 154 db. Denne regionen er altså fra eksempelvis 250 m og utover regnet for en kanon. Faktorer som kommer inn i den lineære sonen er meteorologi, bakkens egenskaper, topografi og hindringer (hus, voller o.l.).

Milstøy gjør i dag beregninger i regionen basert på estimerte og/eller målte lydfelt fra propagasjonen gjennom de første tre regionene. Milstøy er rask å kjøre, men fungerer best for høyfrekvent lyd over ca. 100 Hz med de beregningskjernene som er tilgjengelige i dag.

3 AUTODYN

FFI har siden 1997 brukt den kommersielle hydrokoden Autodyn til enkelte av sine numeriske simuleringer. Programmet har et stort brukermiljø internasjonalt, det er en numerisk svært robust kode, og mulighetene for å kombinere forskjellige typer numeriske skjema (Euler, Lagrange, Smooth Particle Hydrodynamics (SPH)) innenfor ett og samme problem er godt utviklet. På denne måten kan vekselvirkning mellom flere objekter og mellom faste stoffer og væske/gass beskrives. Egne dataprosedyrer for materialbeskrivelse eller andre spesielle behov kan skrives og lenkes inn i koden. Eksempler på anvendelser er forplantning av trykkbølger i luft og vann, enklere strømningsproblemer i gassdynamikk, inntrengning av prosjektiler og detonasjonsforløp. På FFI har Autodyn særlig blitt benyttet til beregning av penetrasjon i betong og andre materialer. Programmet kjøres på en sentral Unix tjenermaskin med 8 prosessorer. Nylig er det gjort mulig å kjøre parallelle prosesser med Autodyn. FFI har vært pilotbruker av nye versjoner, og pleier et tett samarbeid med produsenten.

For å få riktige resultater for sjokkbølgen trenger man informasjon om geometrien til kanonløpet, geometrien og materialegenskapene til prosjektilet, samt egenskapene til kruttet. Innenfor prosjektets meget begrensede tidsramme var det imidlertid ikke mulig å gå altfor detaljert til verks. Dessuten hadde man ikke alle data tilgjengelig, spesielt angående egenskapene til forskjellige typer krutt.

Vi valgte derfor ut ett spesielt eksempel som "test case", en M109 med en 155 mm kanon. Bakgrunnen for dette valget er at denne kanonen er noe av det mest støyende som vil bli brukt på norske skytefelt, og dermed vil representere en øvre grense i forhold til støy for omgivelsene. Meningen var å gjøre en foreløpig simulering for å sjekke at dette i prinsippet lar seg simulere, samt få informasjon om eventuelle vanskeligheter som må løses for å kunne gjøre en mer detaljert simulering. Problemet er modellert i 2D med sylindersymmetri, noe som reduserer antall elementer betydelig, men medfører at man ikke kan ta hensyn til refleksjoner fra bakken o.l. En typisk simulering vil allikevel ta opp mot et døgn på grunn av det store antallet elementer.

Forskjellige 155 mm prosjektiler ser temmelige like ut, men siden det ikke er mulig å gå i detalj foreløpig, valgte vi ut et relativt enkelt geometrisk design. Dette er vist i Figur 3-1.



Figur 3-1: 155 mm prosjektil med masse på 46.35 kg.

Vi ser helt bort fra den interne sammensetning av prosjektilet, da dette ikke er ventet å ha noen betydning for utbredelsen av sjokkbølgen. Prosjektilet er modellert med et Lagrangegrid bestående av kun 3 elementer. Gridet er fylt med stål med en skalert tetthet for at den totale massen skal bli realistisk. Den totale prosjektilmassen er 46.35 kg. Løpet på kanonen er gitt en lengde på 5.0 meter.

Ved firing av en kanon, forbrennes kruttet bak prosjektilet slik at det frigjøres energi som akselererer prosjektilet. Imidlertid finnes det mange forskjellige typer krutt, hvert med sine karakteristiske forbrenningsegenskaper. Selve forbrenningen er en kjemisk prosess som ikke umiddelbart kan simuleres av Autodyn. Innenfor den gitte tidsrammen, modellerte vi derfor kruttet som en gass med en gitt indre energi. Den indre energien er kalibrert slik at den akselererte prosjektilet til riktig hastighet på 820 m/s ved munningen.

I stedet for å starte med tilstanden før kruttet ble antent, antar vi at en del av energien fra kruttet er frigjort slik at prosjektilet har fått hastigheten 300 m/s i det vi starter beregningene.

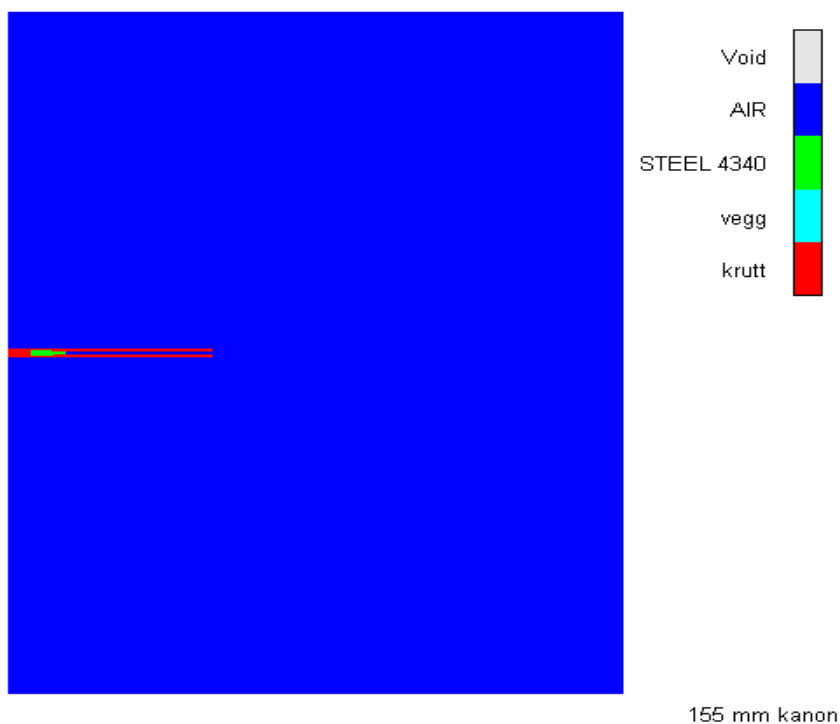
Initialtilstanden er vist i Figur 3-2. Kruttgassen er lagt inn bak prosjektilet og resten av løpet er fylt med luft.



Figur 3-2: Initialtilstanden for simuleringen. Prosjektilet har en starthastighet på 300 m/s og kruttgassen har en lineært stigende hastighet fra 0 til 300 m/s

Resten av modellen er modellert med et stort Eulergrid på 125 000 elementer. På grunn av

symmetrien har gridet form som en sylinder med lengde 15 meter og radius 10 meter. Dette er illustrert i Figur 3-3.



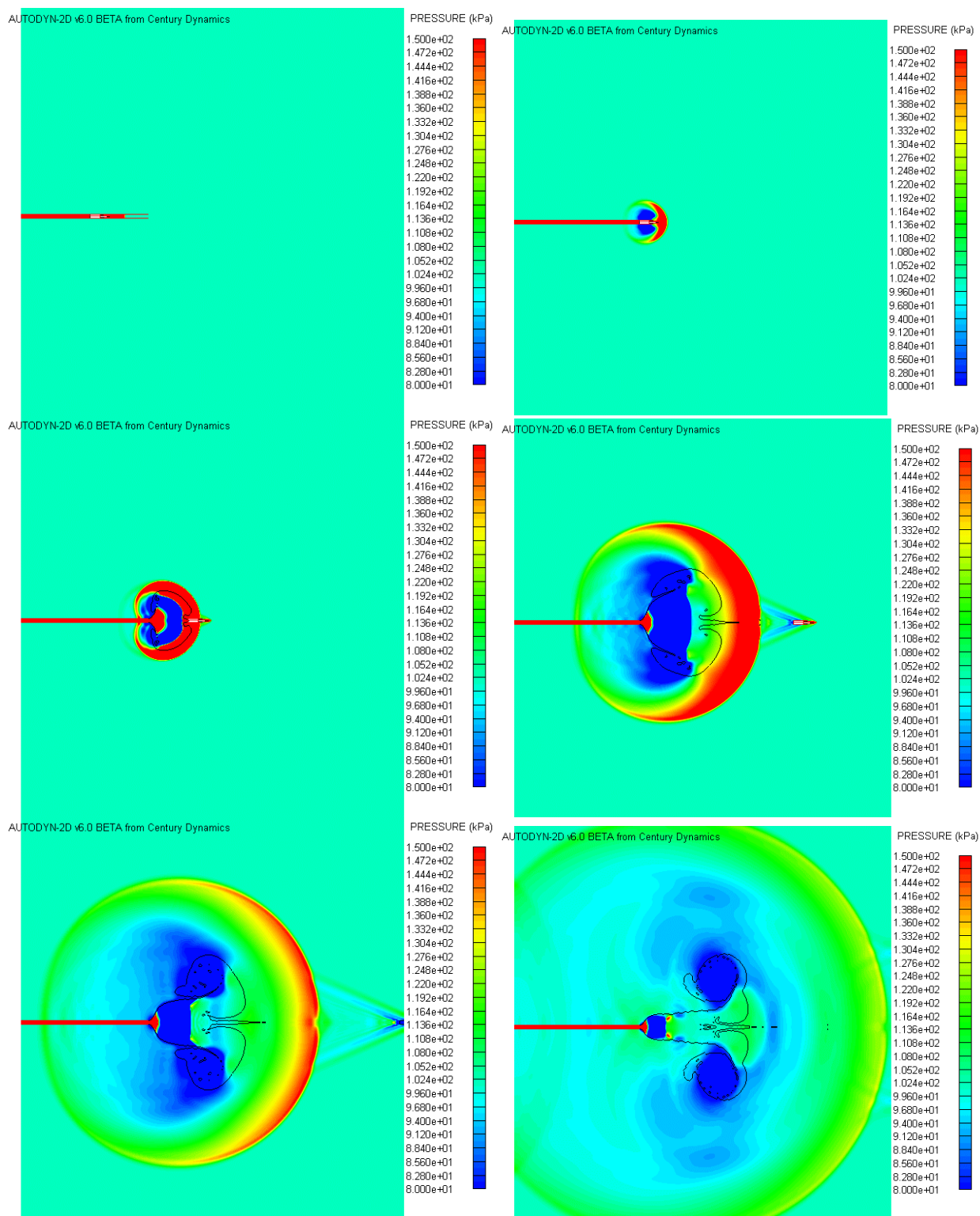
Figur 3-3: Hele modellen av 155 mm kanonen

Bortsett fra den delen av løpet som er fylt med kruttgass, er resten av Eulergridet fylt med luft. Luften er modellert som en ideell gass med initielt trykk på 1 atmosfære.

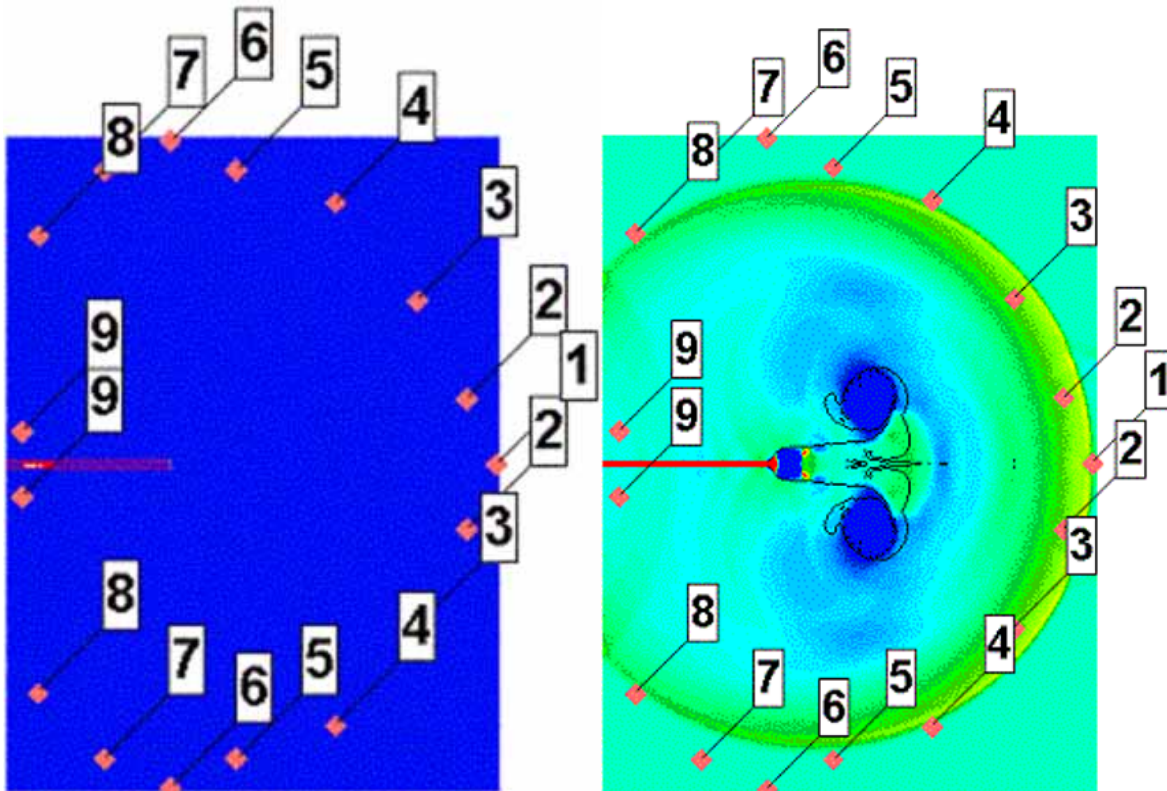
Når simuleringen settes i gang, akselereres prosjektilet og en sjokkbølge dannes foran i løpet. Ved utgangen av løpet kommer denne sjokkbølgen først, men tas snart igjen av en ny sjokkbølge som dannes når prosjektilet ikke lenger blokkerer løpet for kruttgassen. Etter dette reiser prosjektilet i fra sjokket som skyldes gassen, men vi kan se det karakteristiske sjokket som dannes fordi prosjektilet har overlydshastighet.

Litt av prosessen er illustrert i Figur 3-4. Kvalitativt ser det fysiske forløpet riktig ut (Ref. Figur 2-1). Legg spesielt merke til at det dannes undertrykk i store regioner foran kanonen og at sjokket også forplanter seg bakover langs løpet.

Autodyn gir muligheten for å velge ut punkter hvor man kan logge relevante fysiske variabler som funksjon av tiden. Dette er vist i Figur 3-5.

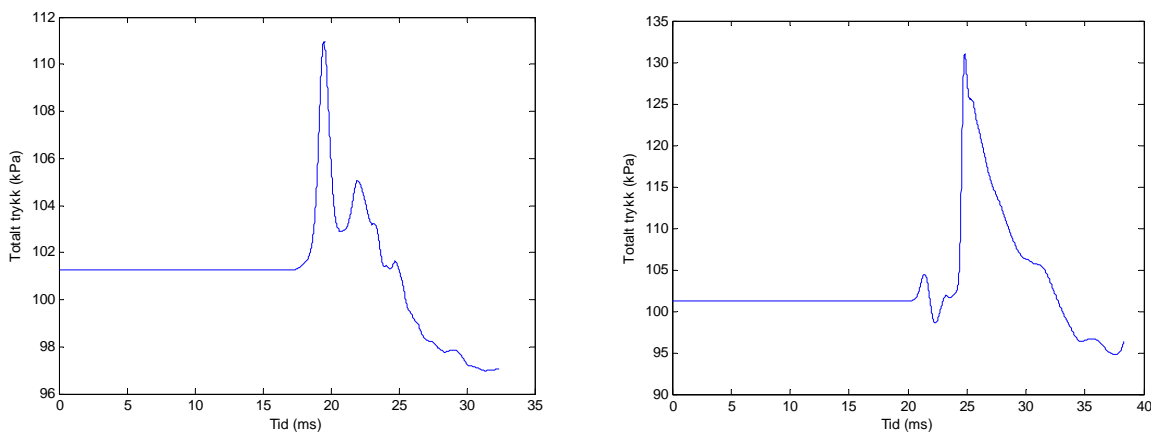


Figur 3-4: Utbredelse av sjokkbølgen fra kanonen. Det er angitt totalt trykk, dvs. at trykket er ca. 101.5 kPa i uforstyrret luft.



Figur 3-5: Punkter der fysiske variabler ble logget.

Data fra disse målepunktene kan sammenlignes med eksperimentelle måledata eller de kan brukes som initialverdier i andre beregningsmodeller for å bestemme utviklingen i større avstand fra kanonen. Figur 3-6 viser trykket som funksjon av tid i to av målepunktene.



Figur 3-6: Trykk som funksjon av tid i to målepunkter, henholdsvis bak og foran utgangen av løpet. Totalt trykk er gitt i kPa.

I eksemplet som er studert ovenfor, har vi som nevnt antatt fullstendig sylinder-symmetri for på den måten å spare beregningstid. Imidlertid er ikke problemet alltid fullstendig symmetrisk. For eksempel har ofte enden av løpet en munningsbrems som vil dempe støyen. Det er imidlertid mulig at dette kan tilnærmes "bra nok" i en sylinder-symmetrisk "2D"-modell.

Et mer alvorlig problem er at en kanon vanligvis vil befinne seg i nærheten av bakken. Når trykkbølgene treffer bakken vil det oppstå refleksjoner, noe som gjør at problemet ikke lenger er sylinder-symmetrisk. For å få realistiske resultater kan det derfor se ut som om man må gjøre en svært tidkrevende 3D-simulering.

En mulig løsning på dette er å gjøre en simulering der vi benytter sylinder-symmetri helt frem til de første bølgeene når bakken. Tilstanden på dette tidspunktet kan deretter ”mappe” over i en 3D-modell som inkluderer bakken og man kan fortsette simuleringen fra dette tidspunktet. I tillegg kan man gjøre gridet grovere for å få ned kjøretiden (på bekostning av nøyaktigheten).

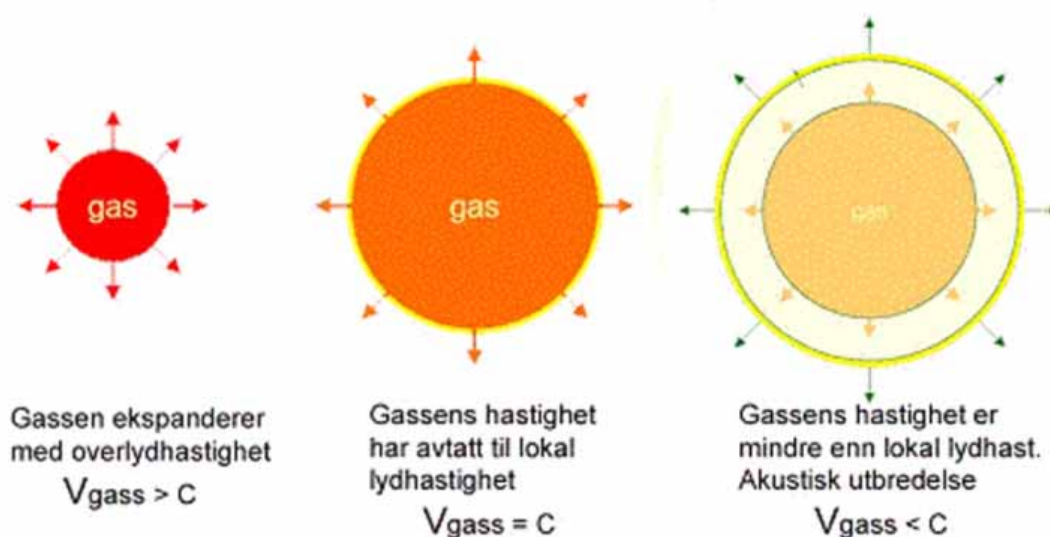
En annen mulighet er å ”mappe” resultatene over i et annet beregningsprogram istedenfor Autodyn-3D, for eksempel en utgave av FEMNOISE (Ref. 5) som modifiseres for å ta hensyn til ikke-lineariteter.

Den første som bør gjøres med simuleringen med Autodyn er antagelig å modellere forbrenningen av kruttet i løpet. Autodyn kan i utgangspunktet ikke simulere kjemiske prosesser, men det er mulig å ordne dette ved å programmere våre egne subrutiner som kan linkes sammen med Autodyn og dermed gi økt funksjonalitet.

Et annet alternativ er å starte simuleringen i det prosjektilet forlater løpet, og i stedet legge inn tilstanden for kruttet ved dette tidspunktet som initialbetingelse. Dette forutsetter imidlertid at vi kjenner tilstanden for kruttet ved dette tidspunktet.

4 WEBERMODELLEN

Weber har sett på tilfellet der vi har en detonasjon av sprengstoff i friluft, uten noen hindringer i nærheten.



Figur 4-1: Weber sin idealisering av en detonasjon

I friluft vil gassen ekspandere kulesymmetrisk. Etter hvert som tiden går vil den symmetriske gasskula ekspandere saktere og saktere. På et tidspunkt vil en partikkel i ytterkanten av den ekspanderende gasskula få en hastighet som er lavere enn lyd hastigheten (**Feil! Fant ikke referanse kilden.**). På dette tidspunktet vil lydbølger begynne å spre seg bort fra gasskula. Radien til gasskula på dette tidspunktet kalles Weberradien.

Weber har ut i fra termodynamiske betraktninger vist at trykket på kuleskallet med Weberradien på dette tidspunktet er 14.4 kPa. Han har også gitt en enkel formel for frekvensinnholdet av trykket på kuleskallet. Det vil si at man da også kan beregne tidshistorien til trykket for et kuleskall med radius lik Weberradien. Den eneste parameteren som er nødvendig for å beregne trykket er massen av sprengstoffet (ekvivalent mengde TNT).

4.1 Ligningene i Webermodellen

Denne modellen ble først presentert i 1939 av Weber (Ref. 6). Modellen var opprinnelig utledet for akustisk karakterisering av gnistgap. Hovedresultatet var lydtrykket som en funksjon av frekvens. Senere ble denne modellen tilpasset eksplosjoner i luft.

Weber introduserte lydtrykket som et frekvensspekter, kalt Weber-spekteret. Den eneste frie variabelen i modellen er Weberradien. Weberradien blir beregnet ut fra hvor mye akustisk energi som er utstrålt i den respektive retningen.

Likningen for Weber-spekteret er:

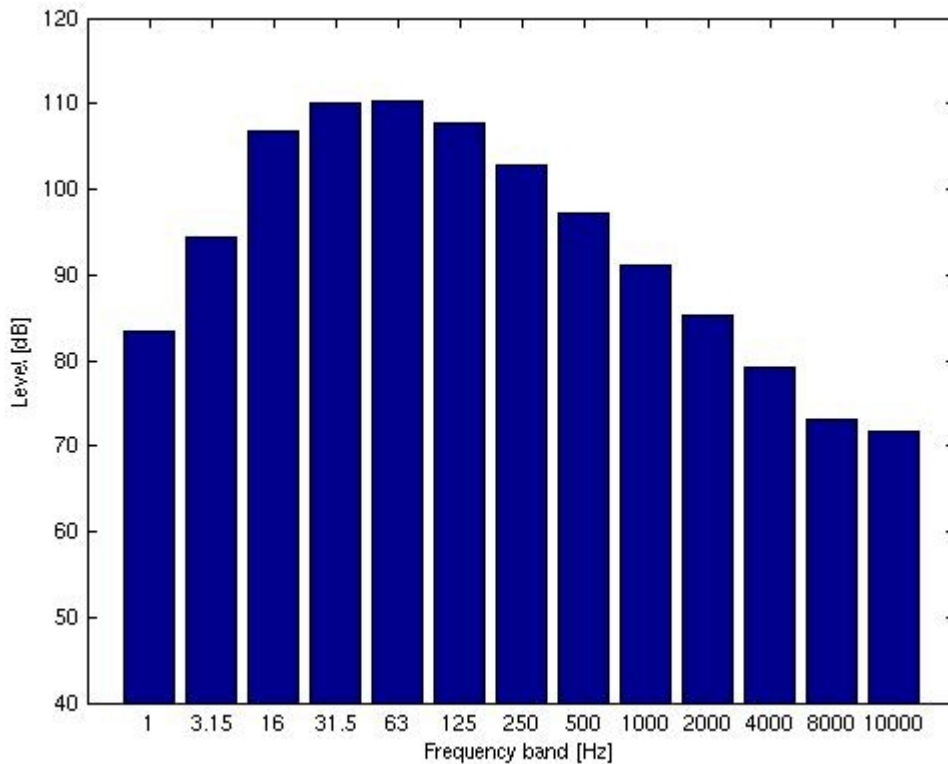
$$p(\omega) = \frac{P_w}{\pi} \left(\frac{\alpha}{\alpha^2 + \omega^2} + j \frac{\omega}{\alpha^2 + \omega^2} \right) \quad (4.1)$$

der α er definert som

$$\alpha = \frac{3c}{R_w} \left[1 + \left(\frac{c}{\omega R_w} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.2)$$

Forskjellige parametre i likningene er: P_w er trykket på kulens skall og er estimert av Weber til å være 14.4 kPa, ω er vinkelfrekvensen, c er den lokale lyd hastigheten og R_w er Weberradien.

Vi ser at Webermodellen gir den nødvendige informasjonen dvs amplituden og fasen til impulssignalet. For å finne størrelser i 1/3 oktavbånd integreres $p(\omega)$ over hvert oktavbånd med de respektive nedre, øvre og senterfrekvensene. Figur 4-2 viser en skisse av $p(\omega)$ i 1/3-oktavbånd.



Figur 4-2 Skisse av Weberspekteret i 1/3 oktavnband

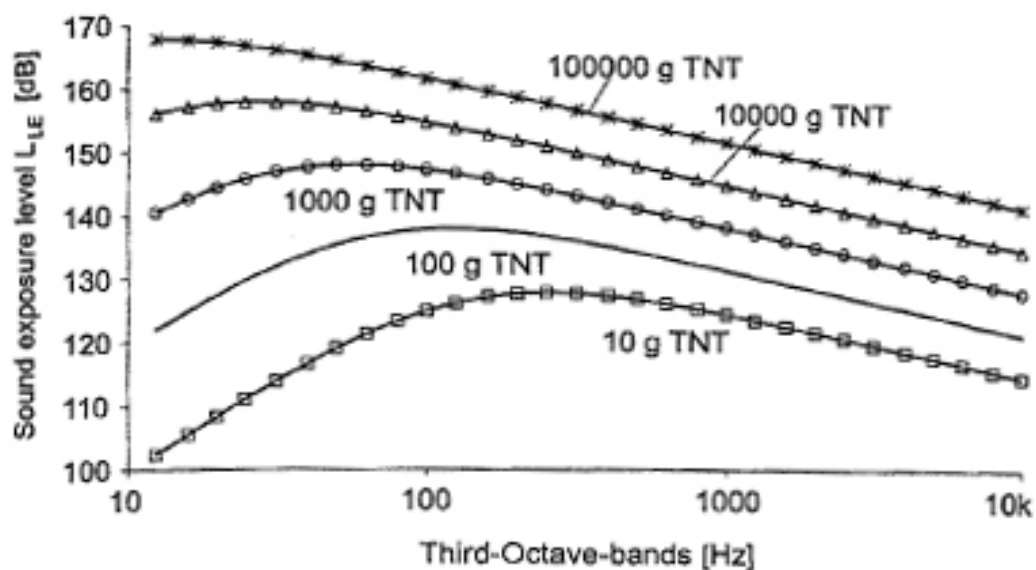
Som vi ser fra ligningen for $p(\omega)$, er det kun én fri variabel dvs R_w som må bestemmes på forhånd. Weberradien er avhengig av den akustiske energien som produseres fra den totale energien som er frigjort ved den raske forbrenningen av ladningen.

Weberradien bestemmes fra ligningen

$$R_w = \sqrt[3]{\frac{Q_y}{Q_w}} \quad (4.3)$$

hvor Q_y er den utstrålte akustiske energien. Q_w kalles Weberenergien og er energitettheten gassen har i det gasskula ekspanderer med partikkelhastighet lik lydhastigheten. Weber estimerte denne størrelsen til $2.25 \text{ kJ} / \text{m}^3$.

Vi vurderer å utvikle en termodynamisk modell for å få mer eksakte verdier for Q_y og Q_w . Det kan være nyttig å utvikle modeller for forskjellige aspekter ved Webermodellen. Det vil si å utvikle modeller for å beregne den kjemiske, kinetiske og akustiske energien for å oppnå mer nøyaktige verdier for å prediktere Weberradien. En viktig del av en slik modell er å finne metoder for å finne retningsavhengigheten ut fra geometriske data for våpenet og omgivelsen i umiddelbar nærhet til våpenet.



Figur 4-3: Forskyvning av Weberspekteret for forskjellige ladningsmengder. Figuren er hentet fra Ref. 1.

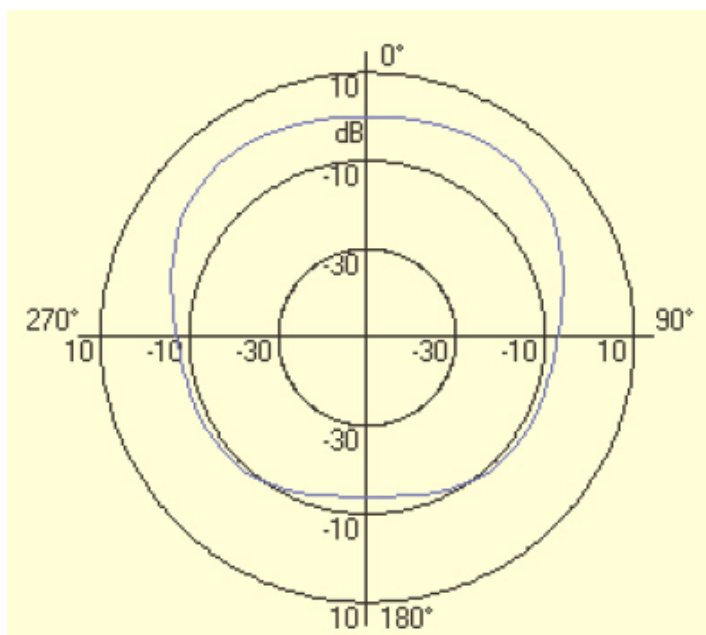
Jo større ladningsmengde desto større er Weberradien. Med større Weberradius forskyves spekteret mot lavere frekvenser. Dette vil si at større våpen genererer mer lyd på lave frekvenser. Figur 4-3 viser forskyvningen av Weberspekteret for økende ladningsmengde. Vi kan se fra figuren at ved større mengde ladning får vi høyere lydnivå i lave frekvensbånd (Ref. 1).

4.2 Retningsavhengighet

I et gevær eller en kanon er ikke den ekspanderende gasskula symmetrisk slik som i Weber sin teori. Hirsch (Ref. 15) har derfor gitt en utvidelse av Webermodellen som skal ta hensyn til den sterke retningsavhengigheten i et våpen. Det høyeste lydtrykket finner vi i skuddretningen. Det blir fordelt mindre lyd i andre retninger rundt våpenet. Det er observert lydnivåer opptil 20 dB mindre i 180° ut fra skuddretningen (det typiske er rundt 12 db). Figur 4-4 viser retningsavhengigheten av munningslyden fra en 105 mm kanon.

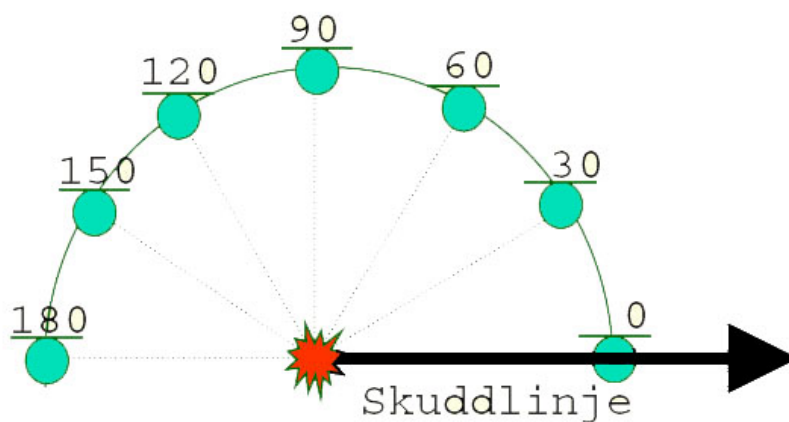
Hirsch har antatt at det vil være mulig å gjenskape retningsavhengigheten i et våpen ved å vurdere lydutbredelsen som en sum av flere retningsbestemte gasskuler på formen kjent fra Weber. Han ser for seg at retningsbestemte eksplosjoner i hver retning ut fra løpet er angitt med forskjellige Weberradier. Da beregnes altså fortsatt skuddet ut fra Weber sin teori, men vi har nå en Weberradius som varierer med retningen ut i fra løpet. Gitt at det er mulig å finne Weberradius som en funksjon av retningen vil lydtrykket kunne beregnes helt korrekt i forhold til Weber sin teori. Forskjellige våpen med forskjellige størrelser og forskjellig geometri har forskjellig retningsavhengighet. En viktig utfordring for en støymodell er da å kunne finne en god beskrivelse for disse parametrene. Det Hirsch har gjort er å måle lydtrykket i syv retninger og bruke dette til å tilpasse Weberradien til forsøkene ved å representere denne som en cosinusrekke med syv ledd. Det er altså her snakk om en slags semi-empirisk modell der vi er

garantert riktig svar i de syv retningene som modellen er kalibrert med. Retningsavhengigheten er her ikke antatt å være avhengig av ladningsmengden, så man vil kunne trenge et sett med retningsdata per våpen. Hirsch (Institut für Lärmschutz) har laget et kommersielt program som heter Winlarm (http://www.ifl-acoustics.de/wlmain_e.htm) som beregner lydgenerering basert på metodene over. Den største verdien av dette programmet ligger i databasen over våpen. Winlarm er utviklet i Tyskland, og databasen inneholder derfor sannsynligvis først og fremst vanlige "tyske" våpen.



Figur 4-4: Eksempel på retningsavhengighet for et våpen. Figuren er hentet fra Ref. 15.

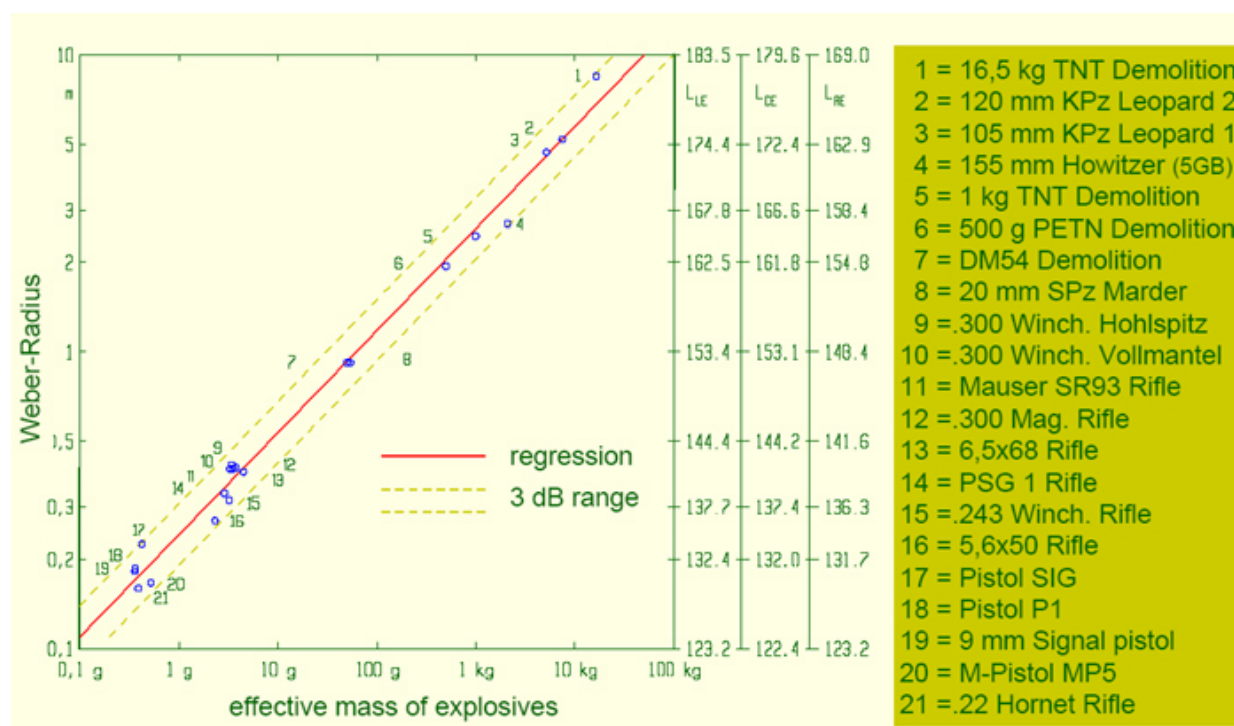
Det finnes allerede tabulerte data for retningsparametere for en del forskjellige våpen basert på målinger. Retningsavhengighetsparametere for noen typiske våpen som rifle, pistol og hagle er nevnt i ISO/DIS 17201-2. Det å utvikle teoretiske modeller for dette bør vurderes. Figur 4-5 viser en skisse av mottakerposisjoner i forskjellige retninger.



Figur 4-5: Typiske målepunkter i forskjellige retninger

Når det gjelder størrelsen av Weberradien for forskjellige typer våpen, har Hirsch presentert

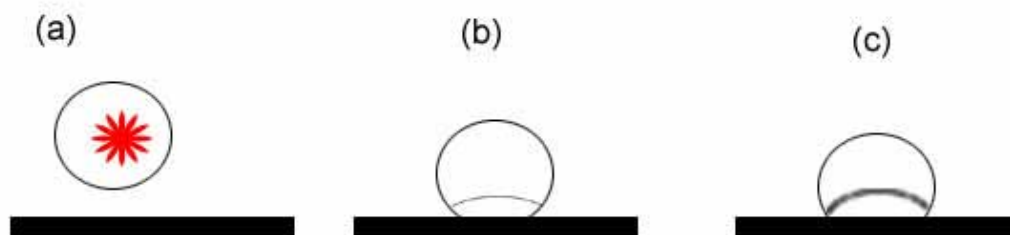
noen eksempler som vi kan se en oversikt over i Figur 4-6.



Figur 4-6: Weberradius for en del vanlige våpen. Figuren er hentet fra Ref. 15.

4.3 Korleksjon av Weberradien grunnet bakkerefleksjon

Når det gjelder refleksjoner innenfor Weberradien, er det foreslått korleksjonsmetoder for Weberradien. Refleksjoner fra bakken innenfor Weberradien forsterker den utstrålte energien fra selve kilden, noe som forårsaker en større Weberradius. Wunderli (Ref. 1) har foreslått korleksjoner av Weberradien i tilfeller med eksplosjoner over og under bakken.



Figur 4-7 Refleksjon av gassen fra bakken

Weberradien gjelder generelt for eksplosjoner med frie omgivelser uten refleksjoner fra andre flater. Wunderli foreslår en metode der refleksjoner fra bakken modifierer størrelsen på Weberradien. Gasskulas radius vil ha samme volum uavhengig av høyden over bakken. På grunn av at kulas utstrekning begrenses av bakken ser man da for seg at Weberradien må økes for at volumet skal kunne beholdes. For eksempelet med en detonasjon på bakken vil vi ha en

halvkuleformet gass i stedet for en kuleformet. Da vil kulas radius øke med en faktor på $2^{(1/3)}$. Denne økningen tilsvarer en dobling av ladningsmengden i Webermodellen. For større ladninger vil vi få en forskyvning av spekteret mot lavere frekvenser. Detonasjonen på bakken i forhold til i fri luft vil rundt regnet forskyve spekteret 1/3 oktav. Figur 4-7 viser refleksjon fra bakken.

5 SAMMENLIGNING AV AUTODYN OG WEBERMODELLEN

Trykkforløpet i nærheten av våpenet kan altså beregnes både ved hjelp av den raske semi-empiriske Webermodellen og det mer tidkrevende simuleringsprogrammet Autodyn. Det kan være interessant å sammenligne resultater fra disse to svært forskjellige metodene og vi har derfor gjort dette for henholdsvis Winchester rifle (7.62 mm) og M109 (155 mm kanon).

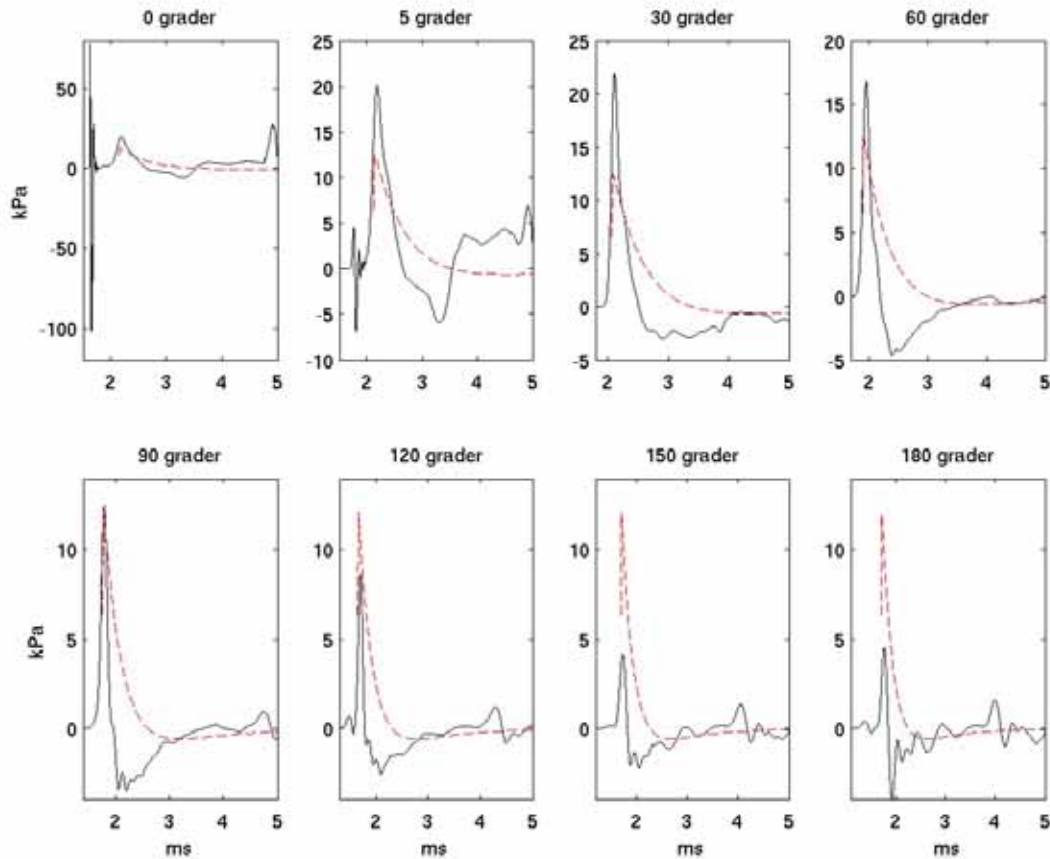
Fra Webermodellen kan vi altså få trykkforløpet på Weberradien (som er retningsavhengig), mens Autodyn beregner trykket over et grid som dekker hele beregningsområdet. For å kunne gjennomføre en sammenligning må vi derfor først bruke Webermodellen til å finne Weberradien for diverse vinkler ut fra skuddretningen, og deretter logge trykkforløpet på nettopp disse punktene i en Autodysimulering.

Det kan være nyttig å legge merke til at avstanden fra munningen er forskjellig for de forskjellige retningene, da denne er gitt av Weberradien. Webermodellen vil (per definisjon) gi samme maksimaltrykk i alle retninger. Gitt en konstant måleradius i alle retninger vil altså likevel trykket beregnet med Webermodellen bli mindre bakover, fordi Weberradien er mindre der.

Winchester riflen er et "standardvåpen" som ofte er beskrevet i ISO-standardene, slik at en del referansedata er tilgjengelig. I Webermodellen trenger man opptil 7 konstanter for å beskrive retningsinformasjon om våpenet. I ISO/DIS 17201-2 er eksempler for disse oppgitt for Winchester rifle, pistol og hagle. I mangel av egne målinger fra skytefelt (som kunne blitt brukt til å beregne disse konstantene), bruker vi dataene fra standarden, noe som antas å gi brukbare resultater. I beregningene har vi benyttet prosjektilhastighet på 778 m/s og prosjektilvekt på 11.6 g.

For M109 har vi ingen retningsdata tilgjengelig så vi bruker derfor riflekonstantene også i dette tilfellet. Siden det kan være stor forskjell mellom en rifle og en 155 mm kanon, er dette åpenbart en betydelig potensiell feilkilde. I beregningene for M109 er det videre benyttet prosjektilhastighet 820 m/s og prosjektilvekt 46.35 kg.

I Figur 5-1 har vi sammenlignet resultatene for Winchester fra Webermodellen og Autodyn. Til tross for at metodene er svært forskjellige ser vi at de gir forholdsvis like resultater. Webermodellen gir imidlertid generelt en puls med noe lavere frekvens og det synes også som om Autodyn gir relativt sett høyere lyd foran enn bak løpet i forhold til Webermodellen.



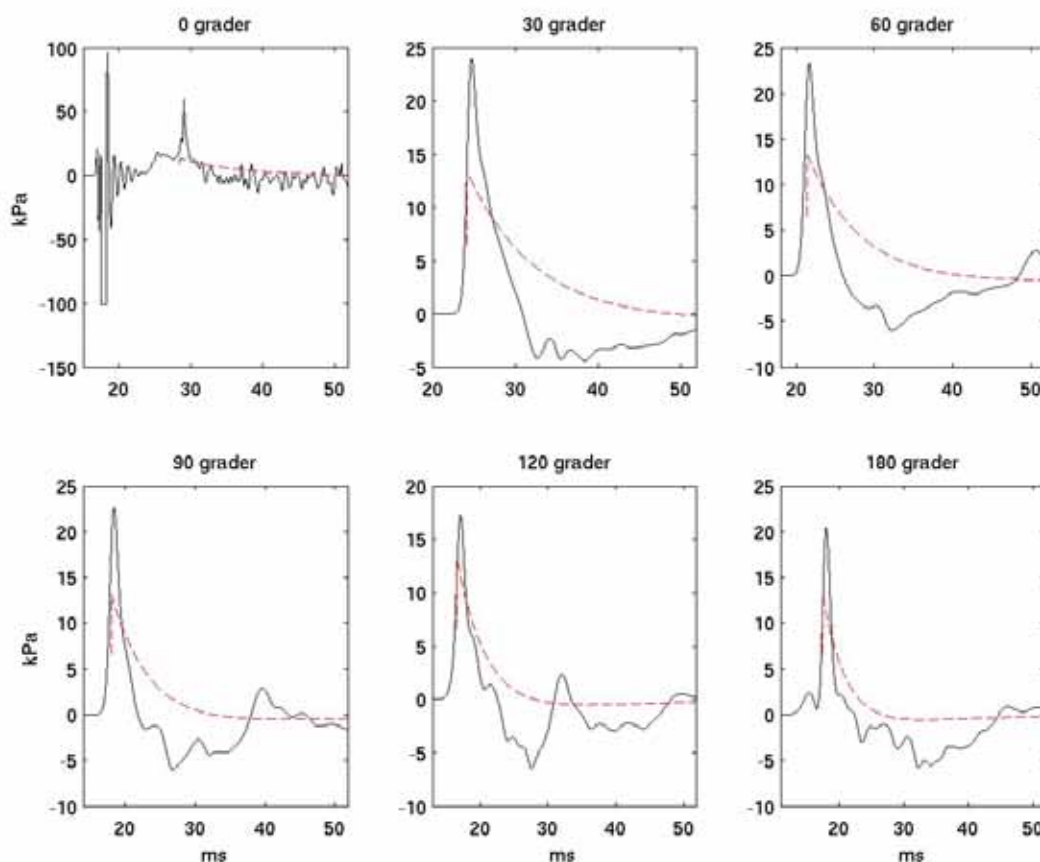
Figur 5-1: Trykk som funksjon av tid i 8 utvalgte punkter for Winchester. Den heltrukne linjen gir verdier fra Autodyn. Den stiplede linjen gir verdier fra Webermodellen. De 8 punktene fra 0 til 180 grader ligger på Weberradien og er henholdsvis 0.57, 0.57, 0.54, 0.44, 0.33, 0.27, 0.23 og 0.22 m fra munningen.

For M109 (Figur 5-2) er det som ventet større avvik. Webermodellen gir gjennomgående lavere trykk og lavere frekvenser enn Autodyn. For skudd rett fram gir Webermodellen opptil 5 ganger lenger tid mellom topp og bunn i pulsen.

En av metodene ser derfor ut til å gi feilaktige resultater for M109. For Webermodellen har vi som nevnt benyttet empiriske retningskonstanter for rifle, som åpenbart er en betydelig feilkilde. Webermodellen inneholder også en del konstanter for overganger, for eksempel mellom kjemisk energi og kinetiske energi og mellom kinetisk energi og akustisk energi (ISO/DIS 17201-2). Disse er imidlertid generelle overslag og man kan muligens tjene på å finne mer nøyaktige verdier for gitte våpen og ammunisjon.

Når det gjelder Autodyn er en feilkilde inngangsdata i forbindelse med indreballistikken. I virkeligheten vil man ha en kruttforbrenning som omdanner kjemisk energi til kinetisk energi i et tempo som er gitt av kjemiske egenskaper ved kruttet. På grunn av tiden som var til rådighet var det ikke mulig å legge dette inn i Autodyn, men man måtte i stedet ty til enklere justeringer i forhold til gitt prosjektilhastighet (kap. 3). Å legge inn dette på en mer korrekt måte vil

sannsynligvis kunne gi et annet beregningsresultat.



Figur 5-2: Trykk som funksjon av tid i 6 utvalgte punkter for M109r. Den heltrukene linjen gir verdier fra Autodyn. Den stiplede linjen gir verdier fra Webermodellen. De 6 punktene fra 0 til 180 grader ligger på Weberradien og er 9.4, 8.2, 7.3, 5.5, 4.4, og 3.6 m fra munningen.

Webermodellen inneholder svært lite informasjon om retningsavhengigheten og behandler denne generelt på en ganske forenklet måte. På den annen side er den en semi-empirisk metode, noe som betyr at den alltid vil gi riktige resultater for det våpenet konstantene i metoden er kalibrert mot. Autodyn inneholder mye mer informasjon om retningsavhengighet, og bruker ikke empiriske konstanter funnet ved måling av lydtrykket. Autodyn finner altså et svar "uten at man trenger å vite svaret på forhånd". Det er derfor sannsynlig at dersom man kan validere at Autodyn beregner tilstrekkelig nøyaktige resultater, så vil man kunne beregne resultater for en hel rekke andre våpen ved hjelp av mye færre kalibreringsmålinger enn man vil trenge med Webermodellen.

Selv om de to metodene gir noe forskjellig resultat for Winchester, og ganske forskjellig resultat for M109, er det ikke nødvendigvis gitt at begge er feil. For å sjekke gyldigheten av disse to modellene er det derfor ønskelig å foreta målinger der man logger lydtrykket nær kanonen, dvs. omtrent 10 m fra munningen.

6 FEMNOISE

FFI har i løpet av de siste årene utviklet en 3D, tidsdomene, finite element beregningskode for lydpropagasjon over porøs bakke, kalt FEMNOISE (Ref. 5). Denne modellen er på samme måte som Milstøy anvendbar i det lineære området. Mens Milstøy er anvendbar for høye frekvenser er FEMNOISE anvendbar i det lavfrekvente området under ca. 100 Hz. Milstøy sin beregningskjerne NORD2000 (Ref. 13 og 14) er et rask operativt beregningsprogram der det har vært nødvendig å operere med en redusert detaljrikdom for å holde beregningstiden nede. I Milstøy ser man for eksempel kun på "enkel" meteorologi, vet at man antar at forplantningshastigheten varierer lineært som en funksjon av høyden over bakken.

I FEMNOISE er det mulig å legge inn stor detaljrikdom i parametere som beskriver lydutbredelsen. F.eks. vil man kunne legge inn bygninger og lokale landskapsmessige variasjoner som vil kunne påvirke lydutbredelsen i spesielle tilfeller. Om ønskelig kan geometri importeres fra vanlig CAD-formater. Man har også stor fleksibilitet når det gjelder å ta med lokale meteorologiske forhold. FEMNOISE kan ta inn både lydshastighet og bakkeparametere fra fil, sånn at disse kan ha en spesifisert verdi i alle evalueringspunkter, og dermed ha en hvilken som helst ønskelig variasjon. Koden arbeider i tidsdomenet, noe som betyr at den f.eks. kan benytte et opptak av trykk på 250 m som direkte input til koden. Ref. 5 gir en oversikt over FEMNOISE (koden er videreutviklet og omformulert siden artikkelen ble skrevet).

Man kan tenke seg en fremgangsmåte der man benytter Milstøy i det tilfellet at man trenger å gjøre raske beregninger for relativt høyfrekvent lyd over større områder der man ønsker mindre detaljrikdom i resultatet, og kanskje også har noe mindre detaljert kunnskap om geometri og parametere for det skytefeltet man ser på. Dersom man derimot har mer detaljerte kunnskaper om geometri og parametere for et spesielt felt, kan man bruke FEMNOISE til mer detaljerte beregninger.

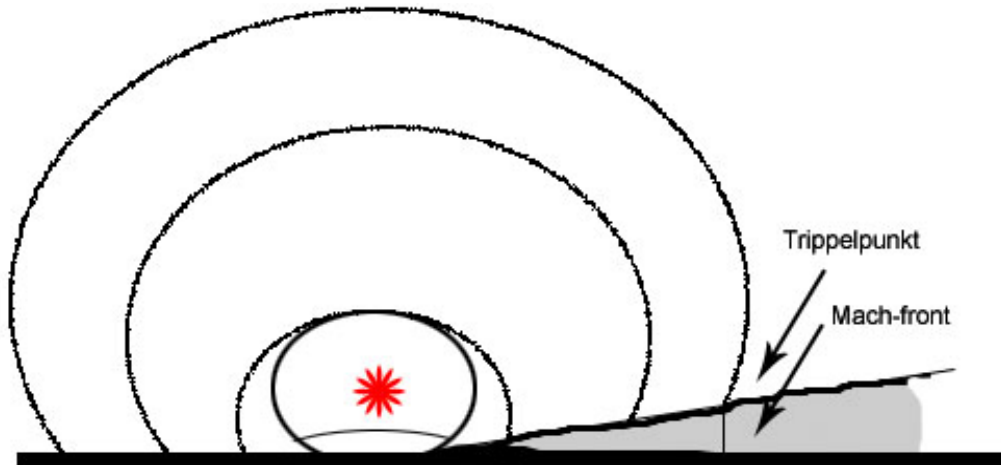
7 MÅLERELEVANTE BETRAKNINGER

Det er en del mekanismer i forbindelse med lydutbredelsen fra våpen som vil ha betydning i forbindelse med målinger. Her ser vi på tre fenomener som må i betraktning når vi skal vurdere hvor mikrofonene skal plasseres.

7.1 Machrefleksjon fra bakken

Et fenomen som det må tas hensyn til ved målinger av store våpen er området ved bakken i nærheten av kilden. Figur 7-1 viser en sfærisk trykkbølge som brer seg ut fra detonasjonspunktet, treffer bakken og reflekteres. Når sjokkbølgen brer seg bortover bakken, løftes den vekk fra bakken av et tilnærmet plant sjokk. Dette plane sjokket oppstår fordi den direkte trykkbølgen varmer opp lufta når den passerer. Når så den reflekterte bølgen kommer til det samme punktet vil den få en høyere hastighet og ta igjen den direkte bølgen. Dette plane sjokket står tilnærmet vinkelrett på bakken. Ved denne nye konfigurasjonen økes trykket og vindhastigheten langs bakken. Punktet som knytter det plane sjokket sammen med

innkommende og reflekterte sjokket kalles et trippelpunkt. Dette punktet øker i høyde etter hvert som bølgen beveger seg utover. Dette gir altså et område nær bakken som kalles Machregionen. Figur 7-1 viser en skisse av Machregionen. Hvis en mikrofon plasseres innenfor denne sonen, registreres høyere lydnivåverdier. Det er derfor viktig å kunne si noe om hvorvidt dette er tilfellet, eventuelt kunne si noe om korreksjonen av lydtrykket.



Figur 7-1: Figuren viser trippelpunkt og Mach-refleksjon fra en detonasjon over bakkenivå.

7.2 Height of burst gain

Forsvaret i USA har utviklet en forenklet empirisk formel for beregning av bakkens innvirkning på SEL (sound exposure level) fra en detonasjon. Denne har senere blitt standardisert (ISO/TS 13474:2003). Man regner SEL som at detonasjonen har skjedd i friluft, og legger deretter til den beregnede verdien. Formelen beregner en gain, G_{hob} , som er økningen av SEL på grunn av bakkens refleksjon. G_{hob} er gitt i db og er kun avhengig av mengde sprengstoff og kildens høyde over bakken. Dette beregnes ut fra følgende uttrykk:

$$G_{hob} = 10 \log(F) \quad (7.1)$$

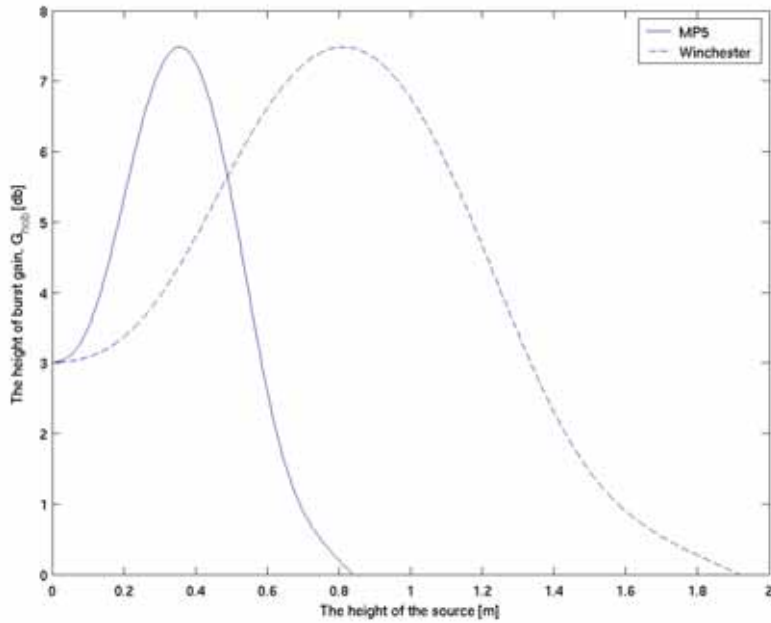
hvor F beregnes fra likningen

$$F = 1.9513 - 0.10458h'_s + 4.05707 \exp[-(h'_s - 3.9047)^2 / 3.428] \quad (7.2)$$

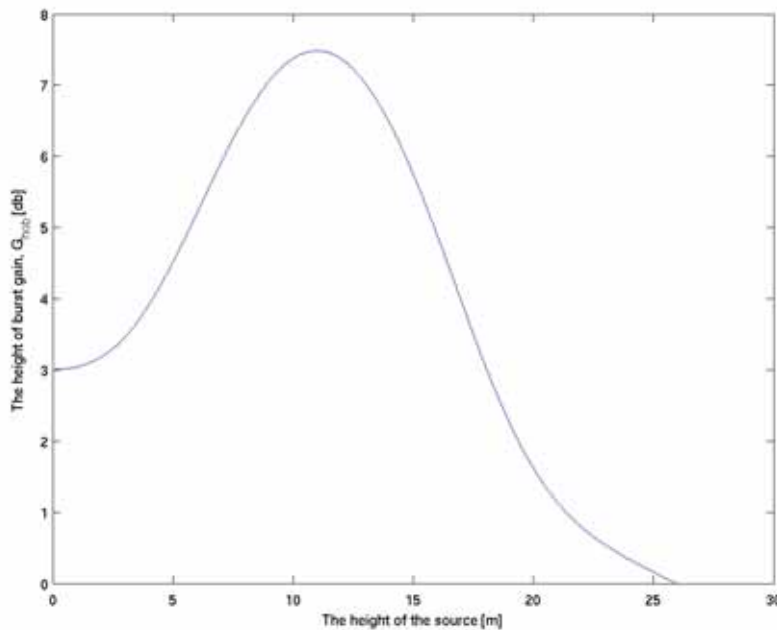
hvor

$$h'_s = \frac{h_s}{m^{1/3}} \text{ meter} / \text{Kg}^{(1/3)} \quad (7.3)$$

h_s er høyden til kilden fra bakken og m er ladningsmengden. Når $h'_s > 9.11$ så er $F = 1$. Formen til korreksjonsfaktoren G_{hob} er skissert i Figur 7-2.



Figur 7-2: Height of burst gain rett foran løpet for MP5 og rifle



Figur 7-3: Height of burst gain rett foran løpet for M109 med prosjektilhastighet 820 m/s.

Basert på denne metoden kan man også finne ut om vi ved opptak vil oppleve en større SEL på grunn av bakken. Formelen er oppgitt å gjelde for ladningsmengder fra 50 g til 1000 kg, og vil dermed først og fremst gi riktige resultater for store våpen. Likevel kan vi bruke formelen for mindre våpen, ikke for å finne verdien av SEL, men for å gjøre et overslag på hvor høyt våpenet må før det gir høyere SEL på grunn av bakken. For en Winchester rifle (standard eksempel) ser

vi at for en kildehøyde på over ca 1.9 m over bakken vil man ikke ha høyere SEL på grunn av bakken. For små våpen av denne typen vil det altså være tilstrekkelig at våpenet er ca. 2 m over bakken for å unngå at man får økt SEL på grunn av bakkerefleksjoner.

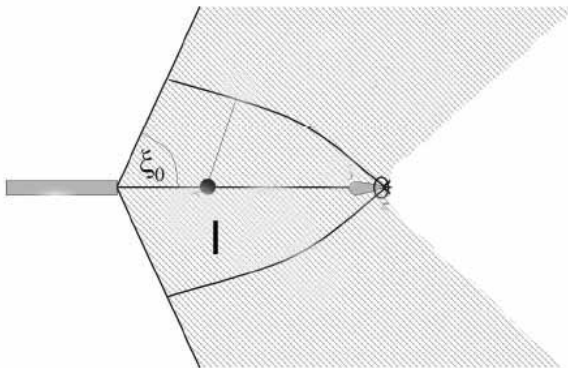
For større våpen vil vi ha en betydelig korreksjon på grunn av bakkerefleksjonen, som vi ser for et eksempel med M109 i Figur 7-3.

7.3 Unngå prosjektillyden

Prosjektillyden eksisterer når prosjektilet er supersonisk. Dette vil typisk være tilfelle for kanon og gevær, men kan også være tilfelle for pistoler. Det finnes da en sone foran våpenet der prosjektillyden eksisterer. Denne sonen kalles machsonen. I kanten av denne sonen kommer prosjektillyden og munningslyden samtidig fram. Der vil det være meget vanskelig å skille disse to lydene fra hverandre. Machsonen sin størrelse er gitt ved vinkelen ut fra munningen, ξ_0 , som vi ser i Figur 7-4. Vinkelen er gitt ved at

$$\xi_0 = \arccos\left(\frac{c}{v}\right) \quad (7.4)$$

der v er hastigheten til prosjektilet og c er den lokale lyd hastigheten. Prosjektillyden vil kun være tilstede foran denne linja, og den vil da komme fram før munningslyden. Det er derfor viktig at man plasserer mikrofonene i en passende avstand, bak eller foran denne linja.



Figur 7-4: Utbredelse av prosjektillyd

7.4 Tidsseperasjon mellom prosjektillyd og munningslyd

Gitt et punkt i rommet med avstand r fra munningen og vinkel ξ fra skuddretningen, kan vi beregne tidsseperasjonen mellom prosjektillyden og munningslyden. Dette er gitt ved formelen

$$\delta t = \frac{r}{c} [1 - \sin(\Phi_M + \xi)] \quad (7.5)$$

Her er Φ_M vinkelen til konen som prosjektilsjokket danner bak prosjektilet, og

$$\sin(\Phi_M) = \frac{c}{v} \quad (7.6)$$

Når $\delta t = 0$ er altså $\xi = \xi_0 = \pi/2 - \Phi_M$.

Vi ser her på et eksempel. Anta at prosjektilet beveger seg med $v = 820$ m/s og $c = 344$ m/s. Da har vi at $\xi_0 = 65.2$ grader og $\Phi_0 = 24.8$. Ser vi på at punkt 30 grader ut fra skuddretningen ($\xi = 30$) i avstand 250 m fra munningen, så er $\delta t = 133$ ms. I en avstand 10 m fra munningen er $\delta t = 5.3$ ms.

8 ANBEFALINGER TIL MÅLEPROSEDYRER FOR VÅPEN

Måling av kildedata fra våpen er tidkrevende og kostbart. Det er derfor viktig at resultatene av målingene foreligger på en form som gjør dem godt egnet til allsidig bruk noe fram i tid. I tillegg er det noen konkrete fallgruver som må unngås. Mye av tekniske betraktninger er nevnt i Ref. 11. Så vidt forfatterne kan se finnes den mest fullstendige beskrivelsen av metoder for målinger fra store våpen i Ref. 12.

8.1 Databaser med målte data

De databasene med måledata som finnes i dag er ofte gamle og udokumenterte. Dataene kan for eksempel være samlet inn ved målinger på 250 m. Deretter er dataene regnet om til for eksempel SEL (sound exposure level) ekvivalent ved 10 m. Dvs. en verdi ved 10 m som ved lineær utbredelse vil gi målt verdi ved 250 m. Man har altså benyttet en beregningsmetode for å regne seg tilbake fra 250 m til 10 m. Denne metoden vil ofte være like utdatert som databasen er gammel. Metoden vil også ofte være udokumentert. Dataene vil ofte være A eller C-vektet før man regner seg tilbake. Vektingen gjøres ved at man avhengig av frekvens, trekker fra eller legger til verdier til lydtrykket. Dette gjøres for å etterligne øret som har forskjellig evne til å oppfatte lyd på forskjellige frekvenser. Det finnes forskjellige vektinger avhengig av type lyd og lydnivå. For A-vekting vil man for eksempel trekke fra 26.2 db ved 63 Hz. Dette vil gi forskjellige utslag avhengig av beregningsmetode. Ofte vil man også ha lagret data i oktavspektre eller 1/3-oktavspektre innenfor et mer begrenset frekvensområde enn man kunne ønske seg.

Fagfeltet som omhandler beregning av støyutbredelse er fortsatt i utvikling. Det eksisterer mange forskjellige beregningsmetoder og det er vedtatt et uttall standarder (App. A). En del av disse vil være motstridene. Den utviklingen som skjer innen fagfeltet vil også være slik at man i løpet av noen år vil kunne ha nye beregningsstandarder som er forskjellige fra de vi har i dag.

Dersom man skal kunne ha nytte av innsamlede data fra våpen på litt lengre sikt er det altså avgjørende at man samler data på en form der alle data taes vare på. Derfor mener vi at man, i

tillegg til å logge SEL, bør logge trykket og lagre dette uten å utføre noen form for analyse eller vektning av data. Analyse vil da kunne gjøres i ettertid med nøyaktighet kun begrenset av trykkmålingenes nøyaktighet. For å kunne gjøre denne type analyse er det også svært viktig at geometri er nøyaktig målt og godt dokumentert. Dvs. våpenets høyde over bakken, mikrofoners høyde over bakken, og vinkelen mellom mikrofoner og løp. Parametere som bakketype og meteorologi bør også beskrives så nøyte som det er praktisk mulig.

Det er viktig at man har en høy samplingrate for å kunne være i stand til å måle den svært raske stigningen i trykk som oppstår når våpen avfyres. En samplingrate på i størrelsesorden 100 kHz til 1 MHz vil være ønskelig.

8.2 Overslag over avstanden til den lineære sonen

Vi vil her vise eksempel på noen grove overslag. Ved å ta som utgangspunkt prosjektilhastighet, prosjektilmasse, måleretning og høyde over bakken kan vi anslå hvor den lineære sonen begynner (dvs. hvor trykket er 1 kPa). Dette gjør vi ved å benytte parametere og retningsinformasjon fra Webermodellen, sfærisk demping og bakkerefleksjon fra "height of burst gain"-modellen. Tabell 8.1 gir eksempel for noen typiske våpen. Vi ser altså at dersom man måler ved 10 m for små våpen og 250 m for store våpen så er man i omtrent riktig område. For forholdsvis støysvake våpen i forhold til disse kategoriene kan man måle noe nærmere etter å ha foretatt en prøvemåling for å se at målnivået ikke overstiger 1 kPa. Et overslag av typen som er gjort her kan være til hjelp for å gjette på et første sted å gjøre en slik prøvemåling.

	v	M	h	R	10 kPa	1kPa	G_{hob}
M109	820 m/s	46.35 kg	3 m	9.4 m	20.2 m	202 m	3.5 db
Winch.	778 m/s	11.6 g	2 m	0.57 m	0.82 m	8.2 m	0.0 db
MP5	400 m/s	7.45 g	2 m	0.30 m	0.43 m	4.3 m	0.0 db

Tabell 8.1: Grovt overslag på avstanden til den lineære sonen er gitt i kolonnen "1 kPa". Her er v prosjektilhastigheten, m er prosjektillets masse, h er våpenets høyde over bakken, R er Weberradien, kolonnene 10 kPa og 1 kPa angir avstanden fra kilden til man har dette lydtrykket, og G_{hob} angir bakkekorleksjon over en myk bakke.

8.3 Avstand fra kilde til mikrofon

I dag finnes det så vidt forfatterne bekjent ingen fullgode måter å regne ut lydforplantningen fram til det lineære området. Dette vil altså si at vi slik som situasjonen er nå, er prisgitt å måle signaturene fra våpen i starten på den lineære regionen (altså grovt regnet rundt 250 m for en kanon). Dette vil imidlertid medføre en rekke usikkerheter. Bakketypen, meteorologiske forhold og topografi vil gjøre at den faktiske signaturen vil kunne være svært forskjellig fra signaturen man fikk den dagen og i de omgivelsene man gjorde feltforsøket.

En måling av lyden f.eks. 10 m fra en kanon vil i langt større grad være uavhengig av de lokale forhold og variasjon av meteorologi over tid. For å kunne benytte seg av slike målinger er man imidlertid avhengig av å ha en god metode for å beregne lydforplantningen i den ikke-lineære

sonen.

Når man vurderer hvor målinger skal utføres vil man altså innføre mindre usikkerhetsmomenter i målingen jo nærmere våpenet man måler. Men, man er altså avhengig at beregningsmetodikken i den ikke-lineære sonen er av større nøyaktighet enn de vanlige usikkerhetsmomentene ved måling langt fra våpenet. Ideelt sett vil man kun trenge et begrenset antall målinger ved munningen av våpenet og fra dette kunne man beregne seg fram til signaturer for de parameterverdiene man er interessert i.

For håndvåpen vil den lineære sonen begynne så nær våpenet (grunnet at disse lager relativt mindre lyd) at man kan gjøre målingene på rundt 1 m uten å få nevneverdige forstyrrelser av verken meteorologiske forhold eller bakken. For store våpen derimot vil man kunne ha behov for målinger nær våpenet (ca. 10 m) både for å kunne kalibrere modeller som beregner lyden ut fra løpet og i gassekspansjonssonen, og for å ha data å bruke som inngangsverdier i mulige ikke-lineære modeller. Inntill disse ikke-lineære modellene er pålitelige vil man imidlertid også være avhengig av å ta målinger i starten av den lineære sonen, dvs. omtrent 250 m fra kilden. Også i forhold til belastninger på personell som betjener disse våpnene vil det være behov for å gjøre målinger helt i nærheten av våpenet.

De nøyaktige avstandene bør finnes for hvert våpen som skal måles. For lette våpen vil man ønske å gjøre målinger der makstrykket er i underkant av 1 kPa. For store våpen bør trykket være i underkant av 1 kPa ved målingene langt borte fra våpenet. For målinger nær store våpen vil det i første rekke være målemessige begrensninger som avgjør hvor nær man kan gå. Dvs. hvor nærme det er mulig å få trykkmålerne til å fungere tilfredstillende.

8.4 Retninger ut fra våpenet

For å kunne ha en god angivelse av retningsavhengigheten av våpenet bør man gjøre målinger i flere retninger ut i fra løpet. For eksempel kan det være ønskelig å måle i vinklene 0, 30, 60, 90, 120, 150 og 180 grader ut i fra løpet. Imidlertid må man være påpasselig med at man ikke måler i en vinkel der munningsstøyen vil ha overlapp med prosjektilstøyen, slik at man dermed ikke kan finne munningsstøyen. Vinkelen man må unngå er gitt fra likning (7.4), og må beregnes for hvert enkelt våpen ut i fra prosjektilhastigheten. Deretter må man gjøre pilotforsøk der man studerer tidsserien og forsikrer seg om at man ser en tidsseparasjon av de to pulsene for alle målevinklene som er valgt. Det er ønskelig å ta opp lyden i alle syv retninger på likt, og man vil dermed trenge et oppsett med syv mikrofoner som logger trykket.

8.5 Høyde over bakken

For små våpen vil en høyde på 2 m over bakken være tilstrekkelig for at man skal unngå å få nevneverdige ikke-lineære forstyrrelser fra bakken. For store våpen vil den ikke-lineære refleksjonen fra bakken på målestedet være betydelig. Man vil her uansett sjelden ha mulighet til å justere høyden.

8.6 Fast målestasjon

På grunn av varierende meteorologi vil man ofte oppleve at målinger tatt på samme sted med samme våpen kan variere ganske mye. Det er derfor ønskelig å kunne ta målinger under konstante og nøytrale forhold, dvs. når vi har lite vind, det ikke regner og vi har en enkel temperaturvariasjon i høyden. For å få til dette ville det være ønskelig dersom man kunne rigge opp en fast målestasjon slik at man kunne avvente til de dagene/timene været er nøyaktig slik man ønsker seg det, og så raskt foreta en målinger under nøytrale forhold.

APPENDIKS

A ISO OG ANSI-STANDARDER

Det finnes en rekke standarder for støy. Felles for dem er at de beskriver til dels enkle metoder for å gjøre omtrentlige overslag. Likevel oppsummerer de en felles basis innen miljøstøy og kan sees som et bakgrunnsteppe for å gjøre mer presise estimater av lydforplantningen:

- ISO 17201-1: Sound source energy determination of muzzle blast
- ISO 17201-2: Estimation of source data for muzzle blast and projectile noise
- ISO 9613-2: Acoustics -- Attenuation of sound during propagation outdoors -- General method of calculation
- ISO 10843: Acoustics -- Methods for the description and physical measurement of single impulses and series of impulses
- ANSI S1.1-1994: Acoustical terminology
- ISO/TS 13474: Acoustics -- Impulse sound propagation for environmental noise assessment
- ISO 17201-4: Prediction of projectile noise
- ISO 9613-1: Acoustics -- Attenuation of sound during propagation outdoors -- Calculation of the absorption of sound by the atmosphere
- ANSI S12.17-1996: Impulse sound propagation for environmental noise assessment
- ANSI S2.20-1983: Estimating airblast characteristics for single point explosions in air
- ISO 3741, ISO 3745 and ISO 9614-3: Correction for non standard meteorological conditions
- ISO 3744:1994: Acoustics. Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure. Engineering method in an essentially free field over a reflecting plane
- Fortschrittenberichte VDI: ``Standard method to measure the sound exposure emissions and immissions from large weapons'', Reihe 8, Nr. 559, ISBN 3-18-355908-9.
- ISO 1996-1: Acoustics -- Description, measurement and assessment of environmental noise -- Basic quantities and assessment procedures
- ISO 1996-2: Acoustics -- Description, measurement and assessment of environmental noise -- Determination of environmental noise levels
- ISO 1996-3: Acoustics -- Description, measurement and assessment of environmental noise -- Application to noise limits
- ISO 10847: Acoustics -- In-situ determination of insertion loss of outdoor noise barriers of all types

B NOEN REFERANSER TIL IKKE-LINEÆR LYD I LITTERATUREN

Generelt kan man si at når man gjør opptak av lyd nær en kilde vil man få svært repeterbare resultater uavhengig av vær og bakkeforhold. Opptak lenger fra kilden, anslagsvis 250 m for en kanon, vil man i verste fall kunne gi avvik på opp mot 30 db. Det kunne derfor være ønskelig å kunne etablere en database av repeterbare målinger på nært hold, og samtidig kunne regne seg fram til lyden lenger borte fra kilden. Dette er nødvendig siden vanlige propagasjonsprogrammer er avhengig av lyden langt borte fra kilden som input. Av den grunn er det av interesse å vurdere en del fremgangsmåter som er gitt i litteraturen.

B.1 Auregan 1999 (Ref. 3)

Her omhandles ikke-lineær lyd i porøse media. Man sammenlikner målinger og ”ekvivalent fluid” modellen som er den vi har implementert ved FFI for lineær bølgeforplantning over porøs bakke (denne er på en konstant nær lik rigid frame Biot-modellen, Ref. 5). Mye er basert på resultater fra McIntosh & Lambert (Ref. 7).

Målingene viser at resistiviteten øker kvadratisk med Reynoldstallet (Re) for små Re og lineært for store Re . Den største forskjell mellom de ikke-lineære forsøkene og den lineære ekvivalent fluid modellen er at den høye lyden gir en variasjon av flow resistivitet. Et raskt overslag viser at man ved 134 db ved 1 m vil ha Re på ca. 30. Dette er med andre ord et stort Re .

For svært små Re sier Darcy's lov at

$$\sigma_0 = \frac{\nabla p}{VL}, \quad (\text{A.1})$$

der σ_0 er resistiviteten, V er fluidhastighet i porene og L er tykkelsen av materialet. σ_0 er direkte proporsjonal med den lokale dempingen i det porøse mediet.

I FEMNOISE, benytter vi at $\sigma_0 = \mu/k_0$, der μ er viskositeten og k_0 er permeabiliteten. σ_0 er altså en konstant uavhengig av lydstyrken.

For høy (ikke-lineær) lyd vil σ_0 være avhengig av lydstyrken. Forchenheimers (Ref. 8) lov gir at

$$\sigma = \sigma_0 \left((1 - \delta) + C_1 Re \right) \quad (\text{A.2})$$

I et typisk tilfelle med $Re = 42$ får vi at $\sigma = 5\sigma_0$. Vi har altså 5 ganger så mye demping ved høy lyd som ved lav lyd.

I følge Auregan er det å justere σ det eneste som er nødvendig å gjøre for å også kunne behandle høy lyd i porøst medium. Vi vil altså med enkle tilpassinger kunne få FEMNOISE til å beregne ikke-lineær lyd i porøse media. Vi vil her mest sannsynlig få med de dominerende ikke-

lineære effektene av stivhet og demping i bakken som vil ha effekt for luft til luft propagasjon av lyd. Antagelig må koden modifiseres noe for å få med ikke-lineære effekter av ren luftpropagasjon.

B.2 Hanyaga 2004 (Ref. 2)

Her blir det gitt en utvidelse av Biot sin teori som inkluderer blant annet et ikke-lineært drag ledd (hysteresis) og mulig ikke-lineær elastisitet. FFI har tidligere implementert både en 2D-versjon av de fulle Biot-likningene og en 3D-versjon av rigid-frame tilnærmelsen av denne (FEMNOISE, Ref. 5). Det er derfor interessant å vurdere en mulig utvidelse for bedre å kunne håndtere ikke-lineær propagasjon. Likningene som presenteres er forholdsvis kompliserte, og det vil sannsynligvis bli relativt tidkrevende dersom man skulle velge å implementere dette.

B.3 Buick 2000 (Ref. 4)

Lattice Boltzmann metoden som er beskrevet her er en forholdsvis ny og utradisjonell metode som er lite brukt i akustikk. Den skal kunne takle ikke-lineariteter med små krav til beregningskraft. Umiddelbart er inntrykket at metoden virker komplisert og uoversiktlig.

B.4 Wunderli 2004 (Ref. 1)

Her har man gjort forsøk over forskjellige bakketyper og sammenlikner med to forenklede modeller. Begge tar utgangspunkt i Webermodellen for lyden umiddelbart nær kilden. Den ene metoden benytter seg så av en enkel empirisk formel for hvor mye lydstyrken øker avhengig av kildens høyde over bakken. Formelen er utviklet av forsvaret i USA en gang på 80-tallet. Den andre metoden beregner en modifisert Weberradius ut i fra tyngdepunktet til gassen i det sprengstoffet detonerer. Beregningene synes å fungere tålelig bra for kilde over flat bakke. For kaviteter gjøres det visse ekstra justeringer.

B.5 Ford 1993 (Ref. 10)

Ford tar for seg utviklingen av bølgeformen fra kildepunktet over det ikke-lineære området. Artikkelen omhandler først og fremst forsøk, men også beskrivelse av analytisk teori for detonasjon av sprengstoff i åpent rom. Det er gitt enkle formler for maks trykk og impuls. Målingene er gjort på 25, 50, 100, 200, 500 og 1000 m over betong, vann og gress. Over vann og betong har sjokkbølgen omtrent samme form, dvs. ganske uforandret etter hvert som avstanden øker, bortsett fra at amplituden minker og perioden øker. Over gress vil den skarpe fronten bli absorbert når bølgen beveger seg bort fra kilden. Han får til slutt en nærmest harmonisk bølge.

Som resultat av utviklingen av frekvensinnholdet i spekteret som er beskrevet ovenfor mener Ford at vekting (A-vekting eller C-vekting er mest aktuelt) vil forandre signalet i større grad for forplantning over gress, fordi signalet da inneholder mer lavfrekvente signaler.

Generelt bør vekting av lyden ikke gjøres ved opptak, men helt til slutt etter at den er analysert.

Det er gjort en del betraktninger om måleprosedyrer og måleutstyr. For å kunne måle sjokkfronten anbefales det å bruke mikrofoner med en så høy frekvensrespons som mulig, samtidig som man også må ha en flat frekvensrespons godt under 20 Hz. Det siste er spesielt viktig ved store detonasjoner.

Litteratur

- (1) Wunderli, J. M. (2004): Modelling the source strength of explosions under consideration of the ground influence, *Acta Acust. United Ac.* 90, 690-701.
- (2) Hanyaga, A. (2004): Two-fluid porous flow in a single temperature approximation., *Int. J. eng. Sci.* **42**, 1521-1545.
- (3) Auregan, Y. & Pachebat, M (1999): Measurement of the nonlinear behaviour of acoustical rigid porous materials, *Phys. Fluids* **11**, 6, 1342-1345.
- (4) Buick, J. M., Buckley, C. L., Created, C. A. & Gilbert, J. (2000): Lattice boltzmann bgk simulation of nonlinear sound waves: the development of a shock front., *J. Phys. A-Math. Gen* **33**, 3917-3928.
- (5) Huseby, M. & Langtangen, H. P. (2003): Modelling propagation of noise over three-dimensional terrains., In: *Proceedings MekIT'03 Computational Mechanics*, ed. B. Skallerud and H. I. Andersson, ISBN 82-519-1868-5, 175-188.
- (6) Weber, W. (1939): Das schallspektrum von knallfunken und knallpistolen mit einem beitrage über die anwendungsmöglichkeiten in der elektroakustischen meßtechnik., *Akustische zeitschrift* **4**, 373-391.
- (7) McIntosh, J. D. & Lambert, R. F (1990): Nonlinear wave propagation through rigid porous materials. I: Nonlinear parametrization and numerical solutions, *J. Acoust. Soc. Am.* **88**, 4, 1939-1949.
- (8) Forchenheimer, P. H (1901): Wasserbewegung durch boden, *Z. Ver. Dtsch. Ingen.* **45**, 1782-1788.
- (9) Hirsch, K. W. (1998): On the influence of local ground reflections on sound levels from distant blast at large distances, *Noise Constrol Eng. J.* **46**, 5, 215-226.
- (10) Ford, R. D., Saunders, D. J, & Kerry, G. (1993): The acoustic waveform from small unconfined charges of plastic explosive, *J. Acoust. Soc. Am.* **94**, 1, 408-417.
- (11) SINTEF (2004): Noise data for weapons, Revision 1, Report No. 101555-2/23.
- (12) Buchta, E. (1996): Fortschrittenberichte VDI: ``Standard method to measure the sound exposure emissions and immissions from large weapons'', Reihe 8, Nr. 559, ISBN 3-18-355908-9.
- (13) DELTA (2001): NORD2000. Comprehensive outdoor sound propagation model. Part 1: Propagation in an atmosphere without refraction, AV 1849/00.
- (14) DELTA (2001): NORD2000. Comprehensive outdoor sound propagation model. Part 2: Propagation in an atmosphere with refraction, AV 1851/00.
- (15) Hirsch, K. W. (2003): "An overview on military weapon noise: Its physics and annoyance", Lecture held at Seol National University, Korea, http://www.ifl-acoustics.de/wlmain_e.htm