



FFI-RAPPORT

16/00578

Lavfrekvent støy fra militær virksomhet 2

sluttrapport

—

Knut Waagan
Morten Huseby

Lavfrekvent støy fra militær virksomhet 2 sluttrapport

Knut Waagan
Morten Huseby

Emneord

Støy
Akustikk
Beregningsmetoder
Skytefelt

FFI-RAPPORT:

16/00578

Prosjektnummer:

3820

ISBN:

P: 978-82-464-2694-5

E: 978-82-464-2695-2

Godkjent av:

Jon E. Skjervold, *avdelingssjef*
Eirik Svinsås, *forskningsleder*

(U) Sammendrag

Denne rapporten oppsummerer oppdraget "Lavfrekvent støy fra militær virksomhet 2". Arbeidet har vært gjort på oppdrag fra Forsvarsbygg som en del av et forskningsprogram finansiert av Forsvarsdepartementet. Målet har vært å forbedre Forsvarsbyggs prediksjonsverktøy for akustisk støy fra tunge våpen og eksplosjoner. Slike prediksjonsverktøy brukes når Forsvarsbygg forvalter Forsvarets skyte- og øvingsfelt.

Når Forsvaret bygger et skyte- og øvingsfelt, underlegges dette utslippsgrenser for støy. Forsvarsbygg benytter i dag programvaren Milnoise (tidligere kalt Milstøy) til å forsikre seg om at disse grensene kan overholdes. Dette er viktig for Forsvaret siden overtredelse av støygrensene kan føre til at treningsområdet stenges, slik at man blir forhindret fra å gjennomføre øvelsesvirksomhet. Manglende øving kan igjen øke faren en soldat utsetter seg for under militære operasjoner.

Input til Milnoise er kildekarakteristikk (avhengig av våpen), antall skudd, kildeposisjon, værdata, topografi og bakke-data. Output er støykart. Støykartet genereres blant annet av en regnemetode for lydutbredelse i luft. Mye av forskningen på utendørs lydutbredelse er motivert av trafikk- og industristøy. Lyd fra tyngre våpen og eksplosjoner skiller seg ut ved lav frekvens, lang rekkevidde, og ikke-linearitet nær kilden. I tillegg vil lydsignalet være kortvarig. Dette stiller andre krav til regnemetodene som benyttes. Som svar på dette har vi arbeidet med en versjon av PE-metoden.

Totalt har oppdraget medført publisering av seks FFI-rapporter, ett FFI-notat og en konferanseartikkel. Det er fremskaffet kildedata for støy fra 13 kombinasjoner av våpen og ammunisjon, til bruk i kildedatabasen til Milnoise. PE-metoden har blitt implementert, testet og validert mot måledata. Vi har undersøkt om regnemetoden kan brukes som støykartleggingsverktøy for langtrekkende, lavfrekvent støy, og spesielt om den egner seg for implementasjon i Milnoise. Svaret er situasjonsavhengig. Det må tas hensyn til ønsket nøyaktighet, tilgjengelig regnetid, aktuelle væertyper og scenarioets omfang; i tillegg må kvalitet på og relevans av vær-, bakke- og kildedata tas i betraktning. FFI-rapportene våre gir innsikt i hvordan og hvor mye disse faktorene virker inn. Angående Milnoise bør det nevnes at de nåværende mulighetene for input av værdata er begrensende. En alternativ løsning er å ha en mer eller mindre uavhengig kode som produserer lydnivåer i form av oppslagsdata for Milnoise.

PE-modeller er å anse som essensielle verktøy innen moderne forskning på langtrekkende lydutbredelse, da de gir innsikt i værvariabilitet på en måte som langt overgår enklere utbredelsesmodeller. Et naturlig neste steg er å implementere modellen i Milnoise for så å feilsøke og validere implementasjonen. Dette bør sees i sammenheng med utviklingen av nye indikatorer for støy rundt Forsvarets anlegg.

(U) Summary

This report summarises the assignment "Low Frequency Noise from Military Activity 2". It was assigned by the Norwegian Defence Estates Agency (NDEA) as part of a research program financed by the Norwegian Ministry of Defence. The goal has been to improve NDEA's prediction tools for heavy weapons and explosions. Such prediction tools are used when NDEA manages shooting and practice ranges.

When the Armed Forces build a shooting and practice range, noise emission limits are imposed. The NDEA presently uses the software Milnoise (previously called Milstøy) to ensure that the limits can be observed. This is important for the Armed Forces as transgressions may lead to closure of the range, and thus stop the practice activity. Lack of practice may increase the danger a soldier is exposed to in military operations.

The input data to Milnoise are source characteristics (weapon dependent), number of shots, source position, weather data, topography and ground data. The output is a noise map. One part of the noise mapping procedure is a computational method for sound propagation in air. Much of the research on outdoor sound propagation is motivated by traffic and industrial noise. Sound from heavy weapons and explosions differ by its low frequency, long range and non-linearity near the source. In addition, the signal will have short duration. The demands on computational methods are therefore different, and as an answer we have considered the PE method.

In total, the assignment has led to six FFI reports, one FFI note and one proceedings article. Sound source data, for inclusion in the source database of Milnoise, have been produced for 13 combinations of weapons and ammunition. A version of the PE method has been implemented and tested against measurements. We have investigated whether this computational method can be used as a noise mapping tool for long-ranging, low frequency noise, and in particular whether it is suitable for implementation in Milnoise. The answer is situation dependent. Factors to take into account are desired accuracy, available computing time, weather types and the scale of the scenario; in addition, the quality and relevance of weather, ground and source data must be considered. Our reports provide insight into how and how much these factors matter. Concerning Milnoise, the current possibilities for weather input would limit the usefulness of the PE method. An alternative solution is to have a more or less independent code that produces sound levels in the form of table look-up data for Milnoise.

PE models are essential tools in modern research on long range sound propagation, as they provide insight into weather variability that far exceeds simpler propagation models. A natural next step is to implement the PE method in Milnoise, and then test and validate the implementation. This should be seen in the context of the development of new noise indicators around the Norwegian Armed Forces' installations.

Innhold

1 Innledning	7
2 Ny regnemetode for lave frekvenser	8
2.1 Regnemethoden	8
2.2 Værmodellering	9
2.3 Bakkemodellering	10
2.4 Anvendelse på Rena	11
2.5 Validering mot Norwegian Trials	13
2.6 Programvare	17
3 Kildedata	18
3.1 Kildedata for støy fra håndvåpen	18
3.2 Kildedata for støy fra artilleri	19
4 Oppsummering	20
Vedlegg	
A Programvare-eksempel	21
Referanser	23



1 Innledning

Denne rapporten oppsummerer oppdraget Lavfrekvent støy fra militær virksomhet 2". Målet har vært å forbedre Forsvarets prediksjonsverktøy for akustisk støy fra tunge våpen og eksplosjoner. Den største delen av oppdraget har gått ut på å studere regnemetoder for lydutbredelse i luft. I tillegg har lydkildespektra for aktuelle våpen blitt målt.

Mye av forskningen på utendørsakustikk er motivert av trafikk- og industristøy. Lyd fra tyngre våpen og eksplosjoner skiller seg ut ved lav frekvens (1-100 Hz), lang rekkevidde (opptil 10km), og ikke-lineær utbredelse nær kilden. I tillegg vil lydsignalet være kortvarig. I dag benyttes C-veid SEL (Sound Exposure Level) per enkeltskudd til å angi utslippskvoter. Hvorvidt dette er det mest fornuftige målet på lydnivå er noe det forskes på. Et kjent moteksempel er at Forsvaret mottar klager på vibrasjoner i hus induisert av infralyd, mens C-veingen filtrerer vekk infralyd. Fremtidens utslippskrav ventes dessuten å inneholde mål for variasjoner i lydnivå, noe som setter store krav til utbredelsesmodellene. Nivåmålet SEL regnes ut fra lydtrykket p ved formelen

$$SEL = 10 \log_{10} t_{\text{ref}}^{-1} \int |p/p_{\text{ref}}|^2 dt \quad (1.1)$$

med $t_{\text{ref}} = 1$ sekund og $p_{\text{ref}} = 2 \times 10^{-5}$ Pa ([16]).

Forsvaret benytter i dag programvaren Milnoise (tidligere kalt Milstøy) til å forutsi støy fra skyte- og øvingsfelt. Programmet utgjør et viktig planleggingsverktøy fordi støyplager hos naboer kan forhindre gjennomføring av øvelsesvirksomhet. Input til programmet er kildekarakteristikk (avhengig av våpen), kildeposisjon, værdata, topografi og bakke-data. Output er støykart.

Ved lineær lydutbredelse kan en harmonisk punktkilde med frekvens f , og på en avstand R , beskrives ved formelen

$$L_f = L_0(f) + 10 \log(R^2/r_0^2) + \Delta L(f), \quad (1.2)$$

hvor L_0 angir styrken til en fri kilde i en referanseavstand r_0 . Det andre leddet angir geometrisk spredning, mens det siste leddet, det relative lydnivået, inneholder informasjon om miljøets påvirkning på utbredelsen. Med miljø menes meteorologi og bakkeforhold. På grunn av denne formelen kan kildedata (kapittel 3) og utbredelse (kapittel 2) behandles separat. Det er dog viktig å påpeke at dette er en approksimasjon grunnet ikke-linearitet nær lydkilden. I denne approksimasjonen skal ikke-lineære effekter være inkorporert i kildespekteret L_0 .

2 Ny regnemetode for lave frekvenser

Utvikling av modeller for utendørs lydutbredelse er mye drevet av støy fra trafikk og industri, og regnemetodene i Milnoise er hovedsakelig utviklet for trafikkstøy. Oppdraget har gått ut på å forbedre regnemetodene for lave frekvenser og lang rekkevidde. Frekvensbåndet vi har sett på er hovedsakelig 1-100 Hz. Spesielt er frekvenser under 25 Hz angitt som krevende. En typisk øvre grense for avstand i en Milnoise-beregning er oppgitt som 7 km, men vi har også sett på lengre avstander (opptil 25 km).

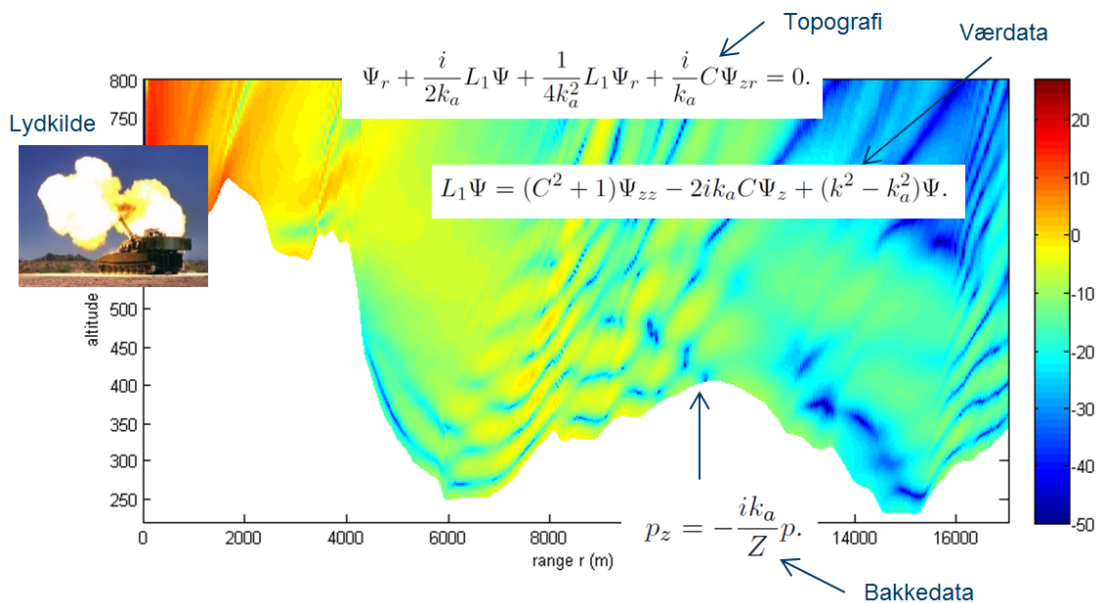
På lang avstand er det påvist at lydutbredelsen er sterkt påvirket, med lokale utslag på flere titalls dB, av værforhold. Grunnen er at lyd hastigheten endrer seg med temperaturen, som særlig vil variere med høyden. I tillegg vil den 'effektive lyd hastigheten' avhenge av vinden. Derfor er det svært nyttig at en regnemetode kan ta i bruk detaljert kunnskap om været. Milnoise inneholder i dag en metode for lave frekvenser som benytter Sommerfeld-approksimasjonen, noe som gir raske resultater, men som forutsetter konstant lyd hastighet ([9]).

2.1 Regnemetoden

Vi har sett på en såkalt 'parabolic equation method' (eller 'PE-metode'), som er en godt etablert modell innen forskning på utendørsakustikk (og andre bølgefenomener). Den er solid teoretisk fundert og bygger på modellantakelser som gjør de grunnleggende bølgelikningene raskere å løse på en datamaskin enn de generelt er. Til tross for forenklingene kan PE-metoden være betydelig mer tidkrevende enn mindre detaljerte modeller. Vi har derfor lagt vekt på effektiv implementasjon, og dokumentert ytelse for de aktuelle frekvensbåndene. Asymptotisk vil regnetiden være proporsjonal med kvadratene av frekvensen og avstanden (hvis man ser bort fra at høye frekvenser i praksis har mindre rekkevidde). Typisk regnetid for et kildepunkt og en værtype vil være fra noen minutter til flere timer avhengig av maksfrekvens, maksavstand og ønsket detaljnivå. Det betyr at metoden i noen tilfeller kan benyttes direkte til støykartlegging, hvilket det var tvil om i starten av oppdraget.

PE-metoden er illustrert i Figur 2.1. Likningene som må løses er angitt, sammen med randbetingelsen på bakken. Viktige inputparametre er bølgetallet k , bakkehellingen C og den komplekse bakkeimpedansen Z . Vi benytter PE-modellen fra [15], som også er beskrevet i [16]. Denne modellen er formulert for en topografisk profil som kan deriveres to ganger, men i praksis er det betydelig mer effektivt å approksimere topografien stykkevis lineært. Likningen omtales ofte som en 'Wide-Angle PE'. Numerikken kan kort beskrives som en Crank-Nicolson-metode hvor det integreres fra avstand $r = 0$ og utover. For å validere vår implementasjon har vi sammenliknet med eksempler fra litteraturen. Dette har dog en vesentlig begrensning: PE-metoden vi har sett på er beskrevet for moderate til høye frekvenser. En viktig del av arbeidet har vært å undersøke hvordan metoden fungerer for lavere frekvenser, og valgene vi anbefaler av numeriske parametre (eksempelvis gridoppløsning og kilde representasjon) er begrunnet med målrettede regneeksempler vi har utviklet.

I tillegg til været er bakken viktig for lydutbredelsen ([3, 16]). PE-metoden gir forbedrede muligheter i Milnoise også for bakkerepresentasjon. For det første kan generell topografi inkluderes



Figur 2.1 Skjematisk fremstilling av PE-metoden. Fargene angir beregnet relativt lydnivå for 20 Hz ut til 17 km avstand. Likningen løses i frekvensdomenet med hensyn på størrelsen $\Psi = p e^{-ik_a r} r^{1/2}$ hvor k_a er et typisk bølgetall. Høyde over bakken er notert som z . Randbetingelsen vises for enkelthets skyld for flat bakke.

dersom det ikke er for bratt, og for det andre kan bakkeimpedansen Z variere med terrenget. En begrensning sammenliknet med lavfrekvensmodulen i Milnoise er at Z ikke kan avhenge av innfallsvinkelen, noe som kan ha betydning ved kompliserte bakkeforhold. I undervannsakustikk benyttes varianter av PE-modeller som tillater mer avansert bakkeinteraksjon ([4]), men vi har valgt å ikke prioritere dette.

Regnemetoden, inkludert implementasjon og grunnleggende testing er presentert i [21]. Rapporten inneholder også sensitivitetsstudier av bakke- og værparametere. Et interessant eksempel ser på sammenhengen mellom gjennomsnittlige og varierende verdier av akustiske bakkeparametere.

2.2 Værmodellering

For utbredelse over lange avstander er det svært krevende å få tilstrekkelig presise værdata til modellen. I litteraturstudien [22] har vi derfor gått gjennom de teknikker som vi har funnet beskrevet i akustikklitteraturen. Studien berører også det relaterte temaet usikkerhetskvantifisering. Rapporten inneholder en kort sammenfatning av de fakta som vi fant mest relevante for støy fra tunge våpen. En konklusjon fra studien var at kortvarige lydsignaler som eksplosjoner ikke kan forutsies nøyaktig, derimot kan gjennomsnittlige lydnivåer forutsies brukbart gitt gode værdata.

To hovedstrategier for værmodellering kan skilles ut: Man kan utarbeide værprofiler fra målinger på bakken, for eksempel fra værstasjoner. Dette er enkelt (regnemessig) å implementere, men har begrenset nøyaktighet. I litteraturen består dette stort sett i ekstrapolasjon fra bakkemålinger

ved hjelp av Monin-Obukhov-teori ([16]), noe som er begrenset til forholdsvis enkle miljøer, og visse værtyper. Alternativt kan man benytte data fra meteorologiske mesoskalasimuleringer. Hovedulempen med mesoskalasimulering er at det krever svært mye regnekapasitet. Hovedfordelen er at det er den eneste beskrevne fremgangsmåten som tar hensyn til komplisert topografi. I akustiske målestudier er det blitt tatt i bruk værsonder, som under stasjonære forhold gir et bilde av lydshastighetens profil over et punkt i terrenget.

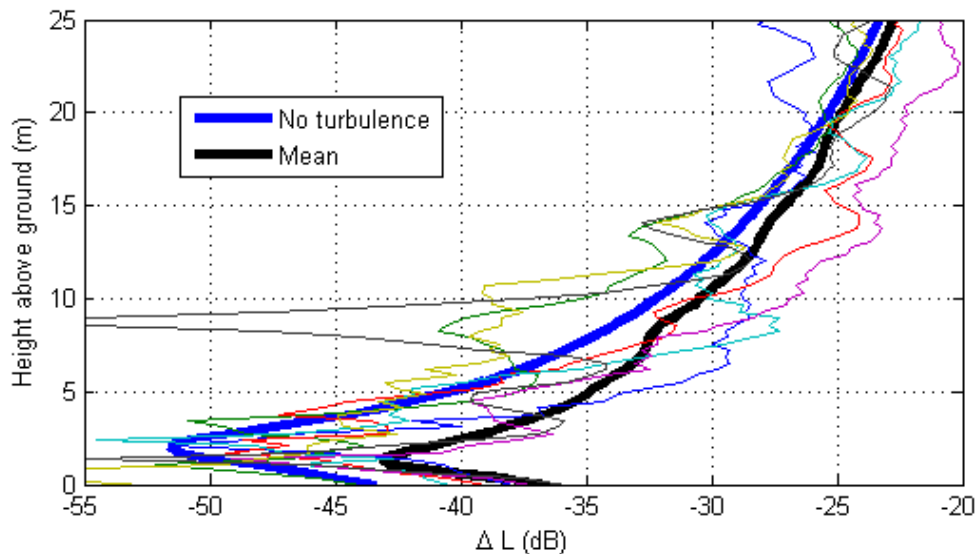
Værvarsling fra Meteorologisk Institutt er på et detaljnivå i dag som kan være av interesse for støysimulering. Vi har lykket med å benytte dette som input til PE-metoden ([20]). En kraftig begrensning er at topografien som benyttes i numerisk værvarsling er en forflatet versjon av det reelle terrenget, noe som vanskeliggjør bruk på for eksempel Rena. På den annen side finnes det data høyt opp i atmosfæren, noe vår studie viste kunne være viktig på lang avstand. Et nyttig akustisk bruksområde for simulerte værddata er sensitivitetsanalyser. Man kan sammenlikne bruk av enkle og mer praktiske værprofiler med mer detaljerte. Vi fant i vårt tilfelle at en slags gjennomsnittlig profil var tilstrekkelig dersom man tok med et enkelt grensesjikt nær bakken.

Lydshastigheten varierer både i tid og rom. I litteraturstudien så vi derfor på hvilke regneteknikker som er dokumentert brukt for å kvantifisere parametrisk variasjon og usikkerhet. Denne variasjonen skjer over et stort spenn av tidsskalaer. Over kortere tidsrom vil temperatur og vind fluktuere på grunn av turbulens, slik at man uansett må til med en form for statistisk modellering for å fange alle effekter. Vi har implementert en stokastisk metode for å ta hensyn til atmosfærisk turbulens, basert på [16]. Dette er dessverre tidkrevende på grunn av Monte-Carlo sampling, hvor hvert sample består av en simulering med PE-modellen (så vidt vi vet mangler dog litteraturen et forsøk på optimering av regnetid). Det er også hindrende at parametrisering av turbulens over noe annet enn flatt, homogent terreng er en åpen, og kanskje uløslig, problemstilling. På tross av utfordringene, er det likevel nyttig å ha en slik implementasjon for å se på kvalitative effekter av atmosfærisk turbulens.

En enkel og utbredt metode for å inkludere turbulens-effekter er å anta en nedre begrensning (for eksempel -30 dB) på det relative lydnivået. I akustiske skyggerregioner vil nemlig gjennomsnittlige værforhold gi underestimert lydnivåer. For lave frekvenser vil det være store områder som får redusert lydnivå av en annen årsak: grunnet akustisk interaksjon med bakken. I Figur 2.2 har vi brukt turbulensmodellen til å studere et slikt eksempel. Bakkeimpedansen tilsvarer her et lag med snø og er tatt fra regneeksemplet i [9]. Turbulensparametriseringen tilsvarer lett vind og overskyet vær ([13], avsnitt 6.2.4), altså ikke veldig sterk turbulens. Vi ser at å bare sette en nedre grense er lite presist, men det kan gi en forbedret tilnærming til gjennomsnittsnivået. Ved kraftigere turbulens finner vi at gjennomsnittlig lydnivå øker nær bakken, og det blir også større fluktuasjoner. Dette er svært likt det man ser i skyggerregioner, som det er forsket mer på. Vi konkluderer med at en kraftig bakkeeffekt som for eksempel over snø, kan ventes å gi en del fluktuasjoner i lydnivå.

2.3 Bakkemodellering

Som nevnt påvirkes lydutbredelsen av bakken gjennom refleksjon og absorpsjon, og vi har studert ulike modeller for det. De vanligste bakkemodellene er ikke korrekte for lave frekvenser, og vi har derfor blant annet tatt i bruk Taraldsen-modellen utviklet under et tidligere norsk forskningsprosjekt ([18]). I samme prosjekt ble også bakkemodellen MULTIPOR utviklet ([12]). Den tar hensyn til flere fysiske effekter (lagdeling og seismikk) enn det er tradisjon for i utendørsakustikk, og da den



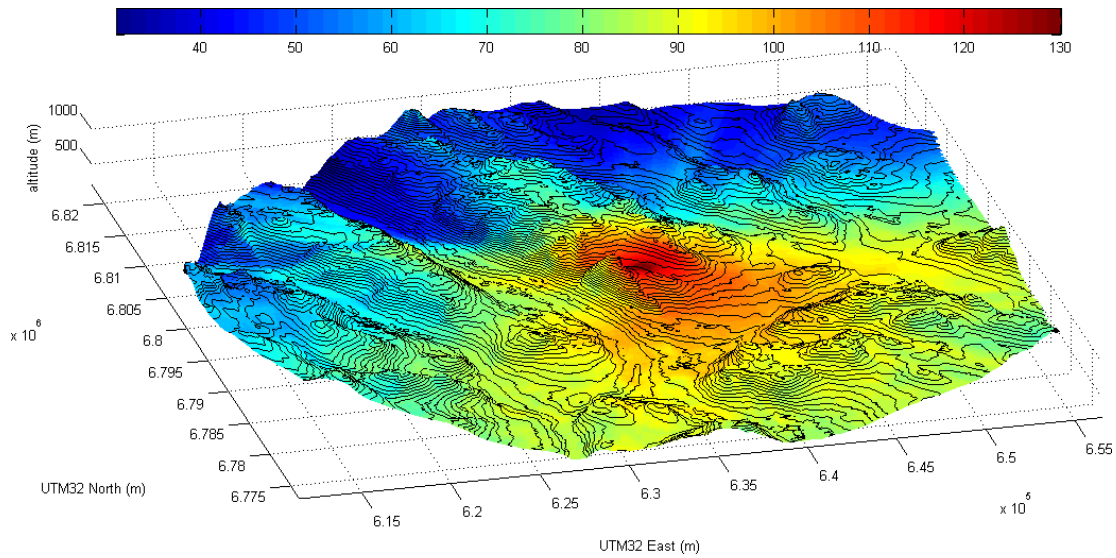
Figur 2.2 Effekt av turbulens over snødekket bakke for 100 Hz. Plottet viser relativt lydnivå ΔL som funksjon av høyden på avstand 1 km. Simulering uten turbulens sammenliknes med (logaritmisk) gjennomsnitt. Sju ulike realiseringer illustrerer variasjonen.

forventes brukt i Milnoise, har det vært viktig å teste den ut med PE-metoden. Kombinasjonen av MULTIPOR-data med PE-metode er uvanlig, og beskrives i [24]. I dette oppdraget har intensjonen vært å legge vekt på meteorologien, men effekter av vær og bakke kan i liten grad studeres hver for seg; det er derfor viktig at bakkemodellen er presis nok.

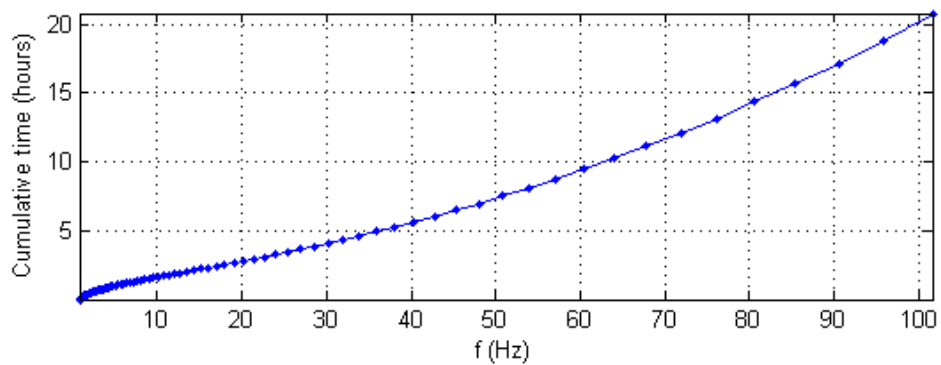
2.4 Anvendelse på Rena

Rundt skyte- og øvingsfeltet på Rena står det flere lokale værstasjoner plassert i ulike høyder. Dermed har en brukbar oversikt over lydshastigheten siden den varierer mye vertikalt, men mindre horisontalt. Som et sentralt eksempel på et scenario PE-metoden er tenkt anvendt på, har vi benyttet disse værdataene til å lage et støykart. Vi valgte da å anta at temperatur og vind kun varierer vertikalt, og interpolerte mellom værstasjonene. En så detaljert utnyttelse av værdataene er ikke mulig å oppnå med dagens Milnoise. Beregningen er beskrevet i [23, ?]. Dette arbeidet ble også presentert på et symposium for langtrekkende lydutbredelse ([19])

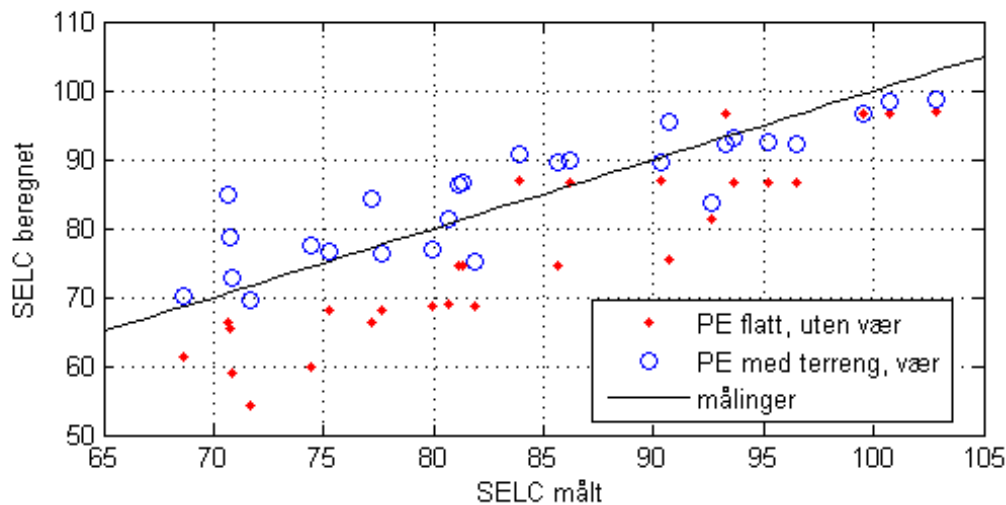
Figur 2.3 viser beregnede støynivåer basert på værstasjonene for en januardag. Fargene angir lydeksponeringen (Sound Exposure Level) fra ett skudd med M109, en 155 mm haubits som avgir mye lyd. Vi ser at været forsterker støyen mot sør og forminsker den mot nord. I tillegg ser vi tydelig at høydedrag begrenser støyutbredelsen. For lave frekvenser er ikke disse effektene representert i Milnoise. Vi har arbeidet med å finne ut hvordan et slikt støykart kan utarbeides best og mest effektivt. Vi så da på oppløsning i frekvensdomenet og i utbredelsesretning, forenkling av topografi-data for å redusere regnetid, hvordan simulert utbredelseslengde kan justeres dynamisk, postprosessering av output for å redusere frekvensoppløsningen, samt håndtering av bratte partier.



Figur 2.3 Støykart for Rena. Sound Exposure Level (SEL) for ett skudd med M109 ut til 25 km avstand.



Figur 2.4 Regnetid for å lage støykartet i Figur 2.3. Plottet viser sammenlagt regnetid for 12-dels oktaver fra 0.8 Hz til angitte frekvens. Regnedomenet var 1.5 km høyt, og det ble regnet i 360 ulike retninger.



Figur 2.5 C-veid SEL for ulike modeller ved temperaturinversjon. Beregnet plottet mot målt lydnivå. Heltrukken linje tilsvarer likhet mellom målinger og beregninger. Data fra Norwegian Trials i september 1994.

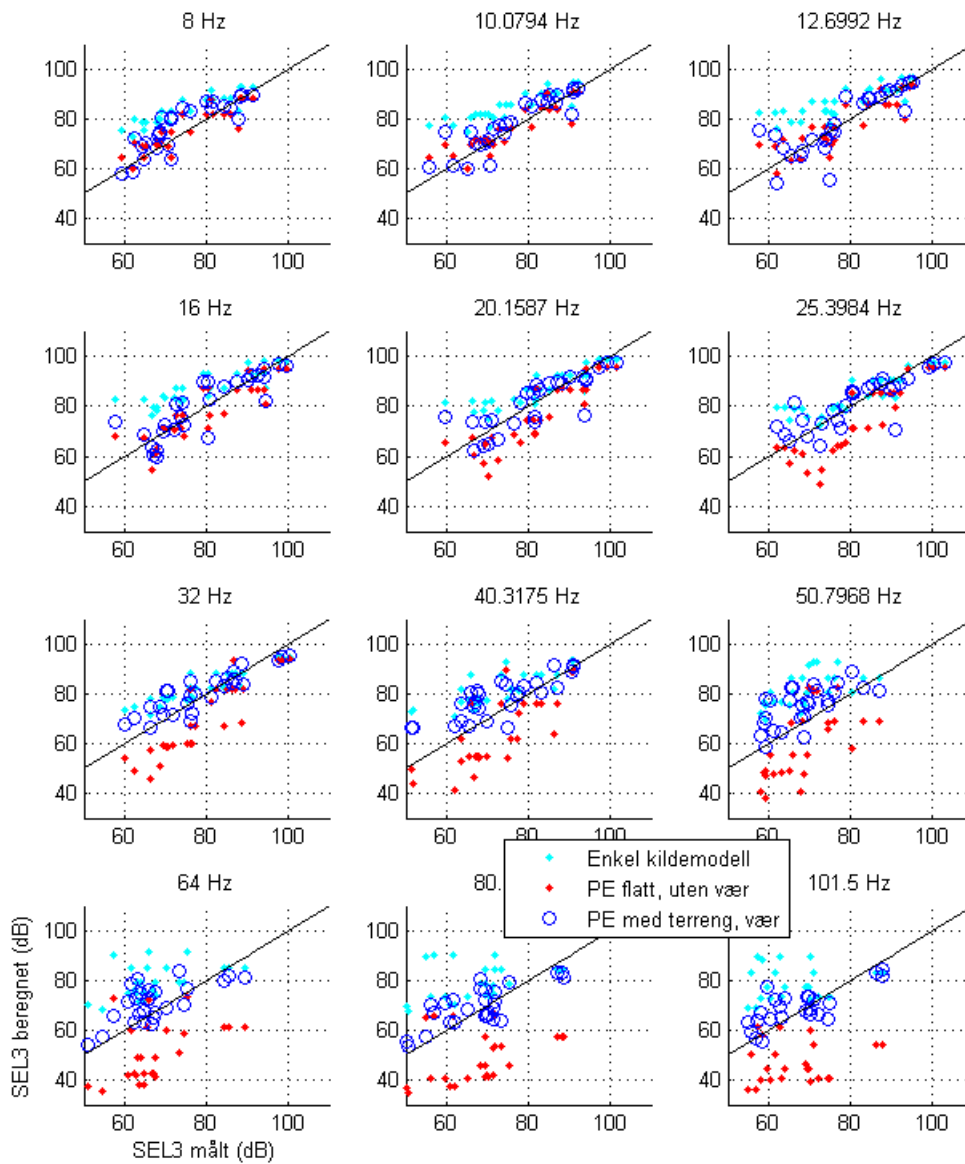
Figur 2.4 viser regnetid for en simulering på Rena med relativt høy oppløsning og lang rekkevidde. Vi klarte å redusere regnetiden betydelig ved å benytte teknikkene nevnt ovenfor.

Bakkeeffekten i simuleringen var basert på kart over markslag og løsmasser fra NGI, som inneholdt viktige parametere (resistivitet, porøsitet, lagtykkelse) ([10]). Disse kartene brukes også i Milnoise. Både MULTIPOR-modellen samt en enklere modell (homøgent, porøst medium) ble brukt og resultatene sammenliknet. De resulterende lydnivåene var forholdsvis like. Sammenlikningen vil bli gjort tilgjengelig i notatet [24]. I dette notatet argumenterer vi for at kombinasjonen av MULTIPOR og PE-modellen fungerer bra på Rena. Det kan likevel tenkes å være tilfeller hvor de to modellene er mindre kompatible (nærmere bestemt når akustisk impedans varierer mye med innfalsvinkelen).

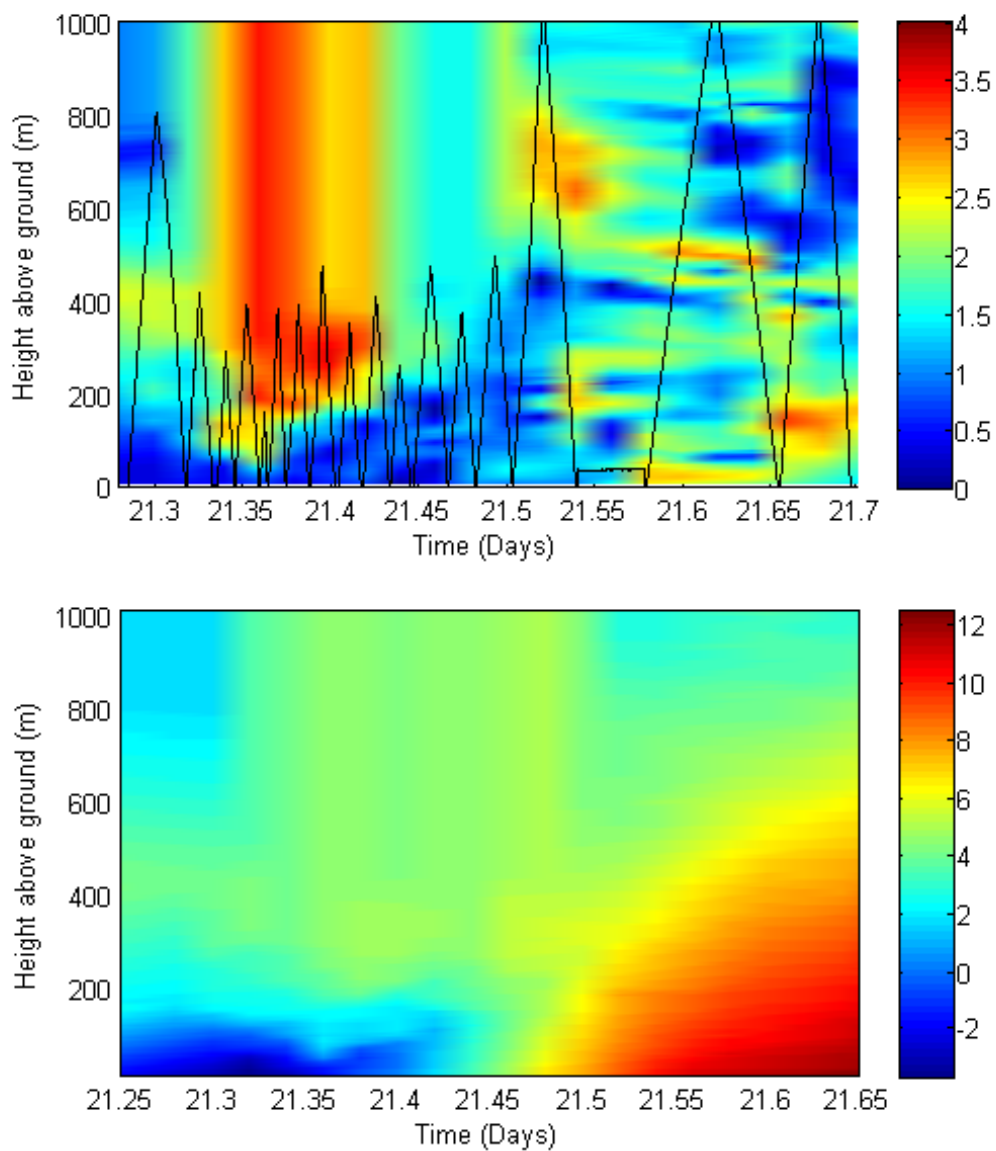
2.5 Validering mot Norwegian Trials

De beste støymålingene å validere PE-metoden mot ble utført på Finnskogen under de såkalte Norwegian Trials. Her var lydkildene (C4-ladninger) og avstandene av samme type som metoden forventes anvendt på. Terrengtet var mindre kupert enn eksempelvis på Rena, men ellers trolig representativt, med mye skog. Været ble registrert fra 30 m høye værtårn, samt en værsonde som registrerte vind og temperatur opp til en variabel makshøyde på noen hundre til tusen meter. Utvalgte data fra Finnskogen har vært sammenliknet med prediksjonsmodeller tidligere i [6], [14] og [17].

Sammenlikningen mellom PE-metoden og Finnskogendataene presenteres i en egen rapport ([25]). Vår hovedkonklusjon er at PE-metoden gir prediksjoner som er presise gitt parameterusikkerheten. Det kommer dessuten tydelig fram at det er nødvendig å ta hensyn til meteorologien i støykartlegging av denne typen.



Figur 2.6 SEL for hvert tredels oktavbånd ved temperaturinversjon. Målt (x-aksen) plottet mot beregnet (y-aksen) lydnivå i dB. Heltrukken linje tilsvarer likhet mellom målinger og beregninger. Data fra Norwegian Trials i september 1994. I tillegg til PE-beregningene har vi tatt med en enkel kildemodell som kun tar hensyn til avstand og ladningsstørrelse.



Figur 2.7 Data fra værsonde den 21. september 1994. Sondens høyde er plottet øverst, sammen med interpolert verdi av vindstyrke (m/s). Under vises interpolert temperatur (Celsius). De interpolerte feltene ble glattet noe før bruk i PE-metoden, særlig vindfeltet.

For å være mer spesifikk er det gunstig å skille mellom ulike værtyper. Enkelte av målingene ble gjort under temperaturinversjon, som kan gi mye lyd ved bakken. Dette er fordi lydbølgene bøyes nedover. PE-metoden med værsondedata ga da klart bedre resultater enn enklere modeller. Figur 2.5 viser resultater for de 27 tilfellene sommerstid da temperaturinversjon ble registrert. C-veid SEL vises, mens Figur 2.6 viser de enkelte tredels oktavbåndene. Spredningen er størst på høye frekvenser og lavere lydnivåer, hvilket er som forventet. Betydningen av været øker med frekvensen. Et annet scenario som typisk gir mye lyd er i medvind. Vi finner da, også for denne værtypen, at værdata er viktige for å unngå underprediksjon, og at PE-metoden med værdata gir klart bedre resultater. Dette gjelder svak til moderat vind, siden dataene begrenser seg til det. Under de øvrige registrerte værforhold var det vanskeligere å nyttiggjøre seg værdataene, i den forstand at de ikke økte presisjonen til PE-modellen. Typisk for disse værtypene er at modeller underpredikerer. Forklaringen er at stokastiske småskala-variasjoner som turbulens har mest betydning når øvrige forhold virker lydreduserende. En PE-beregning uten værdata er omtrent samme modell som lavfrekvensmodulen i Milnoise så lenge topografien og bakkeimpedansens variasjon har liten innvirkning. PE-beregningen tar dog betraktelig lengre tid.

På vinteren var bakkeinteraksjonen både kraftig og krevende å modellere, og begge deler gjør det vanskeligere å konkludere om værmodellering. Presisjonen var ikke like god som for sommerforhold, men vi så likevel klart at værdataene ga en forbedring.

Målingene fra Norwegian Trials er tilgjengelige i databasen NORTRIAL, som beskrevet i [1], [2] og [11]. En kvalitetsvurdering foreligger av hvert lydopptak, og for vår studie valgte vi å hovedsakelig se på målingene med høyeste kvalitet, 'A'. Vi har også sett litt på målinger med kvalitet 'B1', som har dårligere signal-til-støy-rate. Antallet A-målinger vi endte opp med var 81 fra sommeren 1994 og 157 fra vinteren 1996. I tillegg til krav om signalkvalitet satte vi også krav om værsonde-data fra rundt skuddtidspunktet. Det foreligger ytterligere 46 A-målinger fra 1994 som vi har utelukket, da vi, etter en del forsøk på å finne andre forklaringer, fant ut at det sannsynligvis er en feil i dataregistreringen. Denne feilen kan ha påvirket utfallet av tidligere undersøkelser. Dette gjelder 'Central tower'. Vi fant også etterhvert en del feilregistreringer av ladningsstørrelse.

Lydhastighetsprofilen i simuleringene var basert på interpolasjon av værsondemålinger, som illustrert i Figur 2.7. På den illustrerte dagen var det klart og rolig vær, med temperturinversjon på morgenen som gradvis oppløste seg. På ettermiddagen dominerte ustabil luft. Temperatur og vind ble i simuleringene antatt å kun variere med høyden, med unntak av at det ble forsøkt å simulere et grensesjikt for de nederste 30 meterne over bakken. Sistnevnte viste seg å ha en del betydning for simuleringens resultatene. Ved sammenlikning mellom værstasjonene viste det seg, ikke uventet, å være en del terrengvariasjon, altså er grensesjiktet et viktig usikkerhetsmoment. De meteorologiske målingene under Norwegian Trials er oppsummert i [5]. Selv om det ble samlet forholdsvis omfattende værdata, bør det poengteres at de ikke ga et komplett bilde av vær-situasjonen. Siden det dreide seg om punktmålinger, vil det være usikkerhet om horisontal variasjon. At værsonden nødvendigvis brukte en del tid på tur opp og ned er begrensende. I tillegg rakk ikke alltid sonden så høyt opp. At lydprediksjonene likevel er såpass gode tyder på at vi har et brukbart bilde av meteorologien under forsøket.

En viktig kilde til usikkerhet er bakkeinteraksjonen. En klassifisering av bakken på Finnskogen var tilgjengelig med parameterverdier langs transektene. For sommerekspperimentet brukte vi disse som input i en Taraldsen-modell, noe som syntes å fungere ganske bra. Seismiske effekter kan ikke helt utelukkes for den ene målelokaliteten, da det ble registrert en del demping av infralyd. I

vinterekspementene observerte vi som nevnt kraftig bakkedemping, noe som må skyldes snø. Det viste seg krevende å modellere denne dempeeffekten. Vi valgte å se på et mindre utvalg av dataene og tilpasse bakkeimpedansen til dette utvalget, noe som ga et bra resultat. Vi tolker vanskelighetene dithen at metodene (som vi hadde til rådighet) for å regne ut bakkeimpedans ikke fungerer for de laveste frekvensene, siden vi fikk brukbare resultater med PE-metoden til slutt. Men det kan ikke utelukkes at vinterforhold best simuleres med mer sofistikert håndtering av bakken i selve utbredelses-beregningen.

2.6 Programvare

Implementasjonen av PE-metoden vil kunne bli inkludert som en del av Milnoise. For det formålet har vi laget en versjon og gitt til Sintef som utvikler Milnoise. Programvaren vil også kunne være nyttig som et selvstendig verktøy til forskning og utvikling. Denne versjonen av koden leser inn data om topografi, bakkeimpedans og vær fra datafiler i tillegg til noen andre parametere. Som output kommer transmisjonstap langs et transekt for ønskede frekvenser. Input og output er i form av tekstfiler slik at koden er forholdsvis lett å ta i bruk og samtidig egnet for omfattende scenarier. I vedlegg A er det lagt ved et Matlab-skript som viser hvordan dette fungerer.

3 Kildedata

Kildedatabasen til Milnoise må inneholde støynivået til alle relevante støykilder i Forsvaret, som funksjon av frekvens og utbredelsesretning. En del av oppdraget var å fremskaffe slike lyd-kildedata.



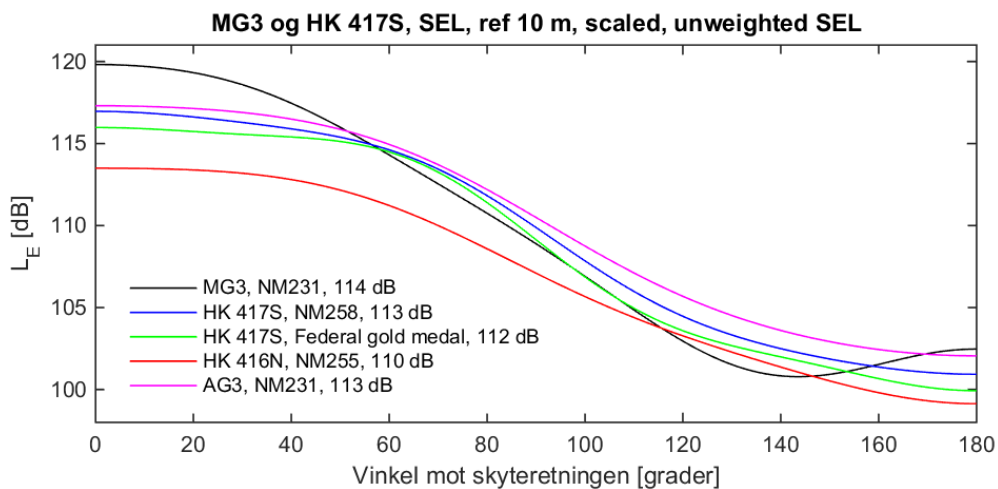
Figur 3.1 FFIs måleanlegg for støy fra håndvåpen.

3.1 Kildedata for støy fra håndvåpen

På FFIs måleanlegg (Figur 3.1) for støy fra håndvåpen er det målt støy og beregnet kildedata til databasen i Milnoise for følgende våpen: NM218 (12.7 mm maskingevær), MØR (12.7mm materiellødeleggelsesrifle), MG3 (7.62 mm maskingevær), HK 417S, treningsammunisjon i 5.56 mm (med plastprosjektil) og løsammunisjon i 5.56 mm og 7.62 mm (uten prosjektil). Totalt har vi funnet kildedata for 13 kombinasjoner av våpen og ammunisjon. Dette er dokumentert i [8]. Beregningsmetoden er dokumentert i [7]. I figur 3.3 ser vi støynivået til HK 417S avhengig av vinkel på skyteretningen.



Figur 3.2 Det er lagd kildedata for blant annet HK 417S og løsammunisjon brukt i HK 416N med rekylforsterker.



Figur 3.3 Retningsavhengig støynivå for MG3 og HK 417S.

3.2 Kildedata for støy fra artilleri

I prosjektavtalen står det at det skulle videreutvikles metoder for å bruke målinger til å beregne kildedata for støy fra tunge våpen. Dette skulle gjøres sammen med målinger på Archer-artilleri. I og med at Archer likevel ikke ble anskaffet falt dette bort. Isteden ble det bestemt å utføre en liten aktivitet i januar 2016 gjennom å være med med når Forsvaret i regi av Forsvarsmateriell testet fire kandidater til nytt artilleri.

Forsvarsbygg gjorde lydmålinger i flere retninger omtrent 250 m fra skytset. Siden operative krav hadde hovedfokus under testene av artillerivognene var det vanskelig å få utført testene fullt ut slik som det er nødvendig for å fremskaffe kildedata. F.eks. er vi avhengig av å få satt av 1 kg C4 i posisjonen til munningen for å ha en referanse som gjør at vi kan fjerne innvirkningen av den lokale bakken i beregningen av kildedata. Vi vil skrive en kort FFI-rapport om dette, med hensikt å kunne si noe om de støymessige konsekvensene av å velge en av de fire kandidatene, i den grad dette er mulig ut i fra tilgjengelige måledata.



Figur 3.4 Fra testene av artillerivogner 26-30 januar 2016 (Foto: Forsvarsbygg).

4 Oppsummering

Totalt har oppdraget medført publisering av 6 FFI-rapporter, ett FFI-notat og en konferanseartikkel. Det er fremskaffet kilde-data for støy fra 13 kombinasjoner av våpen og ammunisjon, til bruk i kilde-databasen til Milnoise. Vi har implementert og testet en versjon av PE-metoden. Målet har vært å undersøke om metoden kan brukes som støykartleggingsverktøy for langtrekkende, lavfrekvent støy, og spesielt om den egner seg for implementasjon i Milnoise. Svaret vil være situasjonsavhengig. Faktorer som det må tas hensyn til er ønsket nøyaktighet, tilgjengelig regnetid, aktuelle værtyper og scenarioets omfang; i tillegg må kvalitet og relevans av vær, bakke og kilde-data tas i betraktning. FFI-rapportene våre gir innsikt i hvordan og hvor mye disse faktorene virker inn. Angående Milnoise bør det nevnes at de nåværende mulighetene for input av værdata er begrensende. En alternativ løsning er å ha en mer eller mindre uavhengig kode som produserer lydnivåer i form av oppslagsdata for Milnoise. PE-modeller er å anse som essensielle verktøy innen moderne forskning på langtrekkende lydutbredelse, da de gir innsikt i værvariabilitet på en måte som langt overgår enklere utbredelsesmodeller. Derfor bør det være nyttig for Forsvaret å ha en slik modell tilgjengelig. Et naturlig neste steg er å implementere modellen i Milnoise for så å feilsøke og validere implementasjonen.

A Programvare-eksempel

Vi inkluderer her et Matlab-skript som forklarer ved et eksempel hvordan PE-programvaren, kalt 'PEformilnoise' kan kjøres.

```
1 %This script generates input data for the PE code, runs the
2 %code, and plots result.
3
4 %The purpose is to explain file formats for input and output.
5
6 freqs=[8, 16];%Frequencies in Hz
7 Nf=length(freqs);%Number of frequencies
8 sourceheight=2;%In meters above ground
9 recheights=[0, 1.5, 4, 10]; %Output heights in m above ground.
   Arbitrary many.
10 %These data are written as a single column:
11 tmp=[Nf ; freqs ' ; sourceheight; recheights '];
12 save PEtransectData.txt tmp -ascii
13
14 %Output range points. One single line
15 rechange=1e3:.1e3:25e3;%Output range data in m from source
16 save PEtransectReceivers.txt rechange -ascii
17
18 %Topography data:
19 inputrange=0e3:5e3:25e3;%In m from source
20 altitude=[400,400,600,800,800,800];%Topography in m above sea
   level.
21 %One line per range point:
22 tmp=[inputrange ' , altitude '];
23 save PEtransectTopo.txt tmp -ascii
24
25 %If the input range is shorter than the output range:
26 %Output range points are truncated at max(inputrange)
27
28 %Plot topography:
29 figure
30 plot(inputrange , altitude , '-');
31 xlabel('Range (m)');
32 ylabel('Altitude (m)');
33
34 %Ground admittance:
35 %On the same range grid as the topography
36 %(in PEtransectTopo.txt).
37 nr=length(inputrange);
38 for jj=1:length(freqs)
39     ftilda=50e3 ./ freqs(jj);
```

```

40     Z=1+.0511*ftilda.^75 +1i*.0768*ftilda.^73;%Delaney-Bazley
        for simplicity.
41     admittance(jj,:)=(1/Z)*ones(1,nr);
42 end
43 %File format: One line per input range point
44 %Real values in the first Nf columns, then imaginary values in
        the last Nf.
45 tmp=[real(admittance)', imag(admittance)'];
46 save PEtransectAdmittance.txt tmp -ascii
47
48 %Weather data
49 dataaltitudes=[285 490 715 900];%In m above sea level.
50 soundspeed=[330 335 333 332];%In m/s
51 windspeed=[0 1 3 4];%In m/s. (Along propagation direction)
52 effsoundspeed=soundspeed+windspeed;
53 %One line per sample height.
54 tmp=[dataaltitudes', effsoundspeed'];
55 save PEtransectEffSoundSpeed.txt tmp -ascii
56 %The code assumes weather only depends on altitude.
57 %Linear interpolation between sample altitudes. Constant
        extrapolation.
58
59 %End of input data generation.
60
61 %Run code
62 tic
63 !PEformilnoise
64 toc
65 %The output is written to 'PEtransectDLfreq<jf>.txt'
66 %The output quantity is  $DL = 10 \cdot \log(|p|^2/|p_{geom}|^2)$  for a
        harmonic source, i.e. relative sound level, where pgeom is
        the pressure resulting from only geometric loss. Each output
        height uses one line in the file. For efficiency DL is
        rounded to nearest integer value between -127 and 127.
67
68
69 %Some error messages etc. may be written to PEMcrlog.txt
70 %(These are automatically generated by Matlab)
71
72 %plot DL for the second frequency listed:
73 r=load('PEtransectReceivers.txt');
74 DL=load('PEtransectDLfreq2.txt');
75 figure
76 plot(r,DL,'.-')
77 xlabel('range (m)')
78 ylabel('Relative sound level (dB)')

```

Referanser

- [1] Eyvind Aker. NORTRIAL - innlegging av måledata fra Finnskogen 1994 og 1996. Technical report, 20071037-3, Norwegian Geotechnical Institute, 2007.
- [2] Eyvind Aker. NORTRIAL databasen. Technical report, 20061034-2, Norwegian Geotechnical Institute, 2007.
- [3] Keith Attenborough, Ming Li Kai, and Shahram Taherz. *Predicting Outdoor Sound*. Taylor & Francis Ltd, Hoboken, NJ, 2006.
- [4] Michael D Collins. A split-step padé solution for the parabolic equation method. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 93(4):1736–1742, 1993.
- [5] Lars R Hole, Yngvar Gjessing, Tor De Lange, and Jack W Reed. Meteorological measurements and conditions during Norwegian trials. *Noise Control Eng J*, 46(5):199–207, 1998.
- [6] M. Huseby. A selection of data from measurements of C4 detonations at Finnskogen in 1994, test case C1. FFI-rapport 2007/00528, Norwegian Defence Research Establishment, 2007.
- [7] M. Huseby. Evaluering av støy fra håndvåpen ved måleanlegget på FFI. FFI-rapport 2015/01416, Norwegian Defence Research Establishment, 2015.
- [8] M. Huseby. Kildedata for støy fra NM218, MØR, HK 417S, MG3, treningsammunisjon og løssammunisjon. FFI-rapport 15/01748, Norwegian Defence Research Establishment, 2015.
- [9] M. Huseby, R. Rahimi, J. A. Teland, I Dyrdal, H. Fykse, B. Hugsted, C. E. Wasberg, E. Aker, R. Cleave, F. Løvholt, C. Madshus, K. Rothschild, H. Olsen, S. Storeheier, and G. Taraldsen. Final report: Improvement of the computational methods of the Norwegian Defence Estates Agency for computing noise from the Norwegian defence training ranges. FFI-rapport 2007/02602, Joint report by: Norwegian Defence Research Establishment (FFI), Norwegian Geotechnical Institute (NGI) and SINTEF ICT, 2008.
- [10] Finn Løvholt. Ground classification. *NGI report*, pages 20071037–5, 2007.
- [11] Christian Madshus, Eyvind Aker, Finn Lovholt, Ra Cleave, and Nils I Nilsen. Nortrial database on long range low frequency sound and vibration propagation. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, volume 2006, pages 18–24. Institute of Noise Control Engineering, 2006.
- [12] Christian Madshus, Finn Løvholt, Amir Kaynia, Lars Robert Hole, Keith Attenborough, and Shahram Taherzadeh. Air-ground interaction in long range propagation of low frequency sound and vibration - field tests and model verification. *Applied Acoustics*, 66(5):553–578, 2005.
- [13] Vladimir E Ostashev and D Keith Wilson. *Acoustics in moving inhomogeneous media*. Crc Press, 2015.
- [14] R. Rahimi and M. Huseby. Innledende testing av utviklingsversjon av MILSTØY II: Testutvalg C2 fra NORTRIAL. FFI-notat 2007/01867, Norwegian Defence Research Establishment, 2007.

-
-
- [15] RA Sack and M West. A parabolic equation for sound propagation in two dimensions over any smooth terrain profile: the generalised terrain parabolic equation (GT-PE). *Applied acoustics*, 45(2):113–129, 1995.
- [16] Erik M Salomons. *Computational Atmospheric Acoustics*. Springer Netherlands, 2001.
- [17] M. E. Swearingen, M. Huseby, and R. Rahimi. Comparison of sound propagation codes: Milstøy, BNoise and a PE-method. FFI-rapport 2008/02329, Norwegian Defence Research Establishment, 2009.
- [18] G. Taraldsen. The Delany-Bazley impedance model and Darcy’s law. *Acta Acustica united with Acustica*, 91(1):41–50, 2005-01-01T00:00:00.
- [19] K Waagan. Mapping low frequency blast noise in Norwegian terrain. In James P. Chambers and Keith Attenborough, editors, *Fifteenth International Symposium on Long Range Sound Propagation*, 2015.
- [20] K Waagan. Mapping low frequency blast noise using a numerical weather forecast. In Rolf J Korneliussen, editor, *Proceedings of the 38th Scandinavian Symposium on Physical Acoustics*, 2015.
- [21] Knut Waagan. Low-frequency long-range atmospheric noise propagation modelling with the PE method. Technical report, FFI/RAPPORT-2014/00260, Norwegian Defence Research Establishment, 2014.
- [22] Knut Waagan. Numerical prediction of long-range sound propagation - parametric uncertainty and atmospheric models. Technical report, FFI/RAPPORT-2014/00577, Norwegian Defence Research Establishment, 2014.
- [23] Knut Waagan. Noise mapping with the PE method – a case study from interior Norway. Technical report, FFI/RAPPORT-2015/00809, Norwegian Defence Research Establishment, 2015.
- [24] Knut Waagan. Noise mapping with the PE method – a case study from interior Norway: Ground impedance models. Technical report, FFI/NOTAT-16/00266, Norwegian Defence Research Establishment, 2016.
- [25] Knut Waagan. Validation of a parabolic equation method against long range blast wave measurements. Technical report, FFI/RAPPORT-2016/00577, Norwegian Defence Research Establishment, 2016.

About FFI

The Norwegian Defence Research Establishment (FFI) was founded 11th of April 1946. It is organised as an administrative agency subordinate to the Ministry of Defence.

FFI's MISSION

FFI is the prime institution responsible for defence related research in Norway. Its principal mission is to carry out research and development to meet the requirements of the Armed Forces. FFI has the role of chief adviser to the political and military leadership. In particular, the institute shall focus on aspects of the development in science and technology that can influence our security policy or defence planning.

FFI's VISION

FFI turns knowledge and ideas into an efficient defence.

FFI's CHARACTERISTICS

Creative, daring, broad-minded and responsible.

Om FFI

Forsvarets forskningsinstitutt ble etablert 11. april 1946. Instituttet er organisert som et forvaltningsorgan med særskilte fullmakter underlagt Forsvarsdepartementet.

FFIs FORMÅL

Forsvarets forskningsinstitutt er Forsvarets sentrale forskningsinstitusjon og har som formål å drive forskning og utvikling for Forsvarets behov. Videre er FFI rådgiver overfor Forsvarets strategiske ledelse. Spesielt skal instituttet følge opp trekk ved vitenskapelig og militært teknisk utvikling som kan påvirke forutsetningene for sikkerhetspolitikken eller forsvarsplanleggingen.

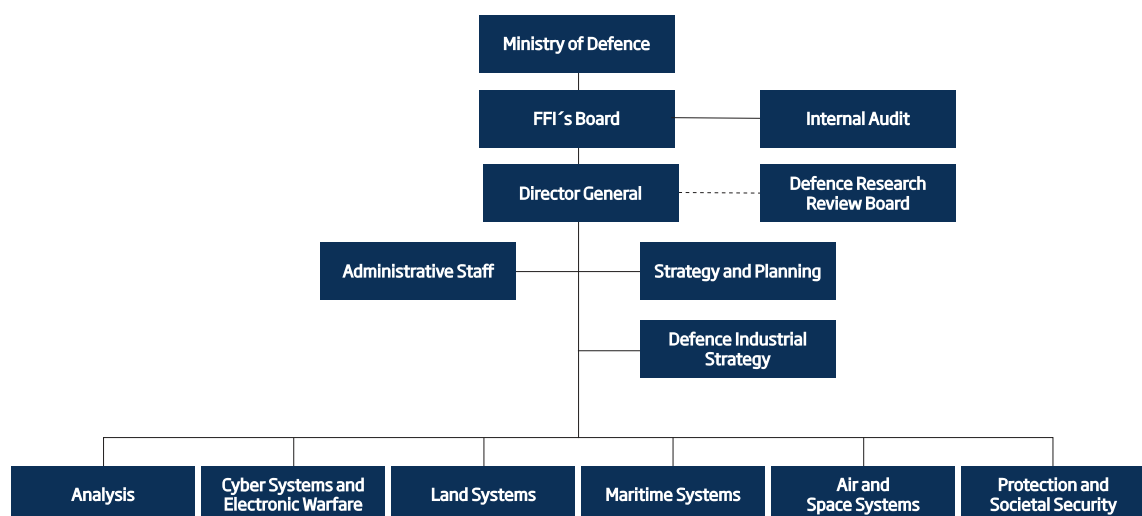
FFIs VISJON

FFI gjør kunnskap og ideer til et effektivt forsvar.

FFIs VERDIER

Skapende, drivende, vidsynt og ansvarlig.

FFI's organisation



Forsvarets forskningsinstitutt

Postboks 25
2027 Kjeller

Besøksadresse:
Instituttveien 20
2007 Kjeller

Telefon: 63 80 70 00
Telefaks: 63 80 71 15
Epost: ffi@ffi.no

Norwegian Defence Research Establishment (FFI)

P.O. Box 25
NO-2027 Kjeller

Office address:
Instituttveien 20
N-2007 Kjeller

Telephone: +47 63 80 70 00
Telefax: +47 63 80 71 15
Email: ffi@ffi.no