

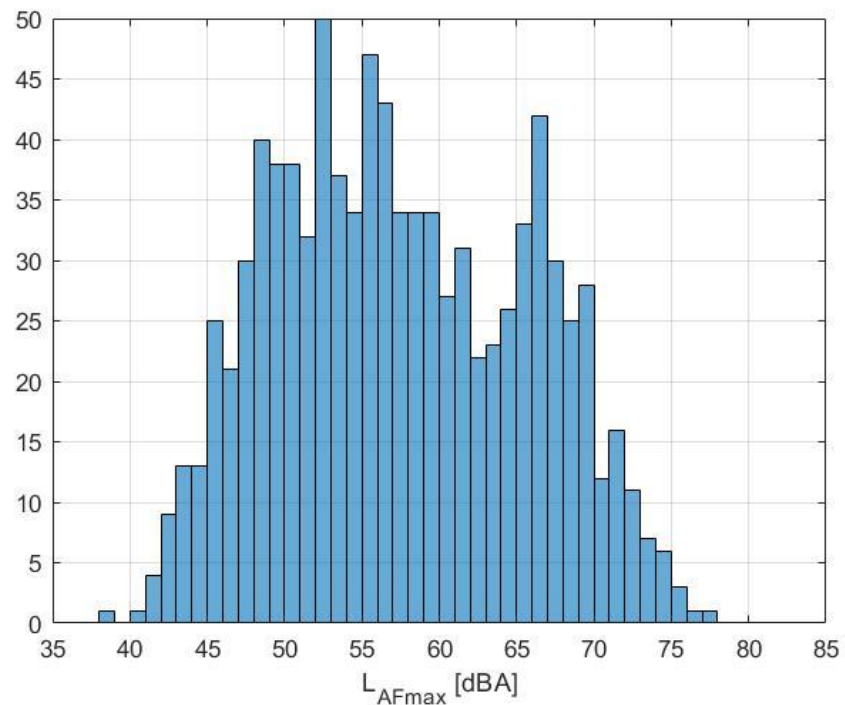
2021:00232 - Åpen

Rapport

Meteorologimodell for bruk ved beregning av støy fra lette våpen

Forfatter(e)

Viggo Henriksen
Herold Olsen



Rapport

Meteorologimodell for bruk ved beregning av støy fra lette våpen

EMNEORD:
Støy, Lydutbredelse,
Nord2000, Meteorologi

VERSJON

1.0

DATO

2020-12-11

FORFATTER(E)Viggo Henriksen
Herold Olsen**OPPDRAGSGIVER(E)**

Forsvarsbygg

OPPDRAGSGIVERS REF.

Øystein Valdem

PROSJEKTNR

102019091-1

ANTALL SIDER OG VEDLEGG:

23

SAMMENDRAG

Som en del av forskningssamarbeidet mellom SINTEF og Forsvarsbygg, som ble startet i 2018, skal SINTEF lage en modell for beregning av skytestøy, som tar hensyn til meteorologi og som gir bedre resultater på 500 til 2000 meter enn dagens modeller.

Klassifisering av de meteorologiske forholdene i 25 klasser har blitt gjort og med denne klassifiseringen har det blitt gjort simuleringer av lydutbredelse med Nord2000. Resultatene fra simuleringene har blitt sammenlignet med målinger utført av Forsvarsbygg. Denne sammenligningen viser en god overensstemmelse mellom målinger og simuleringer.

Statistikk for de meteorologiske klassene har blitt beregnet for fire ulike lokasjoner i Norge. Denne statistikken viser at fordelingen mellom ulike lydpropageringsforhold er svært lik mellom de ulike lokasjonene, men at det naturlig nok er ulikheter i dominerende vindretning, noe som påvirker retningsfordelingen.

UTARBEIDET AV

Viggo Henriksen

SIGNATUR

KONTROLLERT AV

Tor Arne Reinen

SIGNATUR

GODKJENT AV

Erik Swendgaard

SIGNATUR

RAPPORTNR

2021-0032

ISBN

978-82-811-5111-0

GRADERING

Åpne

GRADERING DENNE SIDE

Åpne

Dokumentet har gjennomgått SINTEFs godkjenningsprosedyre og er sikret digitalt

Historikk

VERSJON	DATO	VERSJONSBEKRIVELSE
1.0	2021-02-16	Endelig versjon

Innholdsfortegnelse

1	Innledning	4
2	Litteraturgjennomgang	4
3	Målinger utført av Forsvarsbygg	6
3.1	Datareduksjon i tre trinn.....	6
3.2	Målinger av meteorologiske forhold	6
4	Simuleringer	7
4.1	Programvare	7
4.2	Topografi og bakkesammensetning.....	7
4.3	Meteorologisk klassifisering	7
4.4	Definisjon av lydildens lydeffektnivå og direktivitet.....	8
4.5	Beregning av A-veid nivå og nivå i 1/3 oktavbånd i mottakerposisjonene.....	8
5	Resultater	10
5.1	Midlere nivåer og spredning.....	10
5.2	Ukjent avvik i serie 1	11
5.3	Mulig avvik på grunn av avstand til meteorologisk målestasjon	11
5.4	Sideveis refleksjoner fra skog og bygninger gir avvik	11
5.5	Avvik på grunn av feil i antagelse om kildens direktivitet	11
5.6	Frekvensresponser.....	12
5.7	Spredning i målinger og simuleringer	13
5.8	Oppsummering	14
6	Meteorologisk statistikk	15
6.1	Beregning av meteorologisk statistikk.....	15
6.2	Sammenligning av meteorologisk statistikk fra ulike lokasjoner.....	15
6.2.1	Inndeling etter klasser og propagasjonsforhold.....	15
6.2.2	Sammenligning av dominerende propagasjonsretninger	17
6.3	Oppsummering	18
7	Konklusjoner	19
	Referanser	20
	Vedlegg 1 – Resultater for måler Alfa i serie 4	21

1 Innledning

På avstander over 100 meter vil meteorologi kunne ha stor innvirkning på lydutbredelse. Håndteringen av innvirkningen av meteorologi på lydutbredelse varierer en god del mellom ulike beregningsmetoder. Noen metoder antar moderat gunstige forhold, da dette antas å gi et riktig eller noe konservativt estimat av langtidsmidlede lydnivåer. Andre metoder inkluderer måter å beskrive større variasjon i meteorologien og den tilsvarende innvirkningen på lydutbredelsen. Sammenligninger av resultatene fra noen slike beregningsmetoder [1] [2] viser en god del uoverensstemmelse og dette medfører usikkerhet rundt nøyaktigheten til metodene.

Som en del av forskningssamarbeidet mellom SINTEF og Forsvarsbygg, som ble startet i 2018, skal SINTEF lage en modell for beregning av skytestøy, som tar hensyn til meteorologi og som gir bedre resultater på 500 til 2000 meter enn dagens modeller. Det skal beskrives hvor godt eksisterende beregningsmodell fungerer med hensyn på å beregne gjennomsnittlig støynivå over lang tid og man skal forsøke å kvantisere hvilken spredning man kan oppleve. Dette skal gjøres ved å se på tilgjengelig litteratur, publiserte og tilgjengelige målinger og gjennom vurdering av alternative metoder.

2 Litteraturgjennomgang

Hovedhensikten med lydutbredelsesmodeller for skytestøy, er å kunne beregne støykart, som viser langtidsmidlede lydnivåer med tilstrekkelig nøyaktighet, på en rask og effektiv måte. I tillegg hadde det vært nyttig om man kunne få et estimat av forventet variasjon i lydnivået over tid, slik at man kunne si noe om hvilke nivåer man kunne forvente ved individuelle (tilfeldige) målinger.

For avstander på hundre meter eller mer vil de meteorologiske forholdene kunne ha betydelig innvirkning på lydnivået i et mottakerpunkt [3]. For at beregnede langtidsmidlede lydnivåer skal kunne bli tilstrekkelig nøyaktige er det avgjørende at et tilstrekkelig omfang av variasjonene i de meteorologiske forholdene tas med i beregningene.

En vanlig måte å inkludere variasjonene i de meteorologiske forholdene og deres innvirkning på lydutbredelsen, er via klassifisering av de meteorologiske forholdene. Slik klassifisering av de meteorologiske forholdene har blitt benyttet allerede fra 1960-tallet til å beskrive spredning av luftforurensning [4]. Modellen CONCAWE fra tidlig 1980-tall [5] benytter meteorologisk klassifisering for å relatere variasjoner i meteorologi til innvirkningen på lydutbredelse. I denne modellen er innvirkningen på lydutbredelse detaljerte korreksjonsverdier basert på empiri. Lydutbredelsesmodellen utviklet innen HARMONOISE/IMAGINE prosjektene [6] benytter lignende klassifisering av meteorologi, men hvor relasjonen til lydutbredelsen gjøres gjennom lydshastighetsprofiler. Heimann og Salomons [4] undersøkte betydningen av antall meteorologiklasser og kom fram til at for lydshastighetsprofiler bestående av en logaritmisk og en lineær del, så er det tilstrekkelig med 25 klasser for å begrense avviket i beregnede langtidsmidlede lydnivåer på 1000 meter til maksimalt 2 dB. Disse undersøkelsene ble gjort ved hjelp av paraboliske ligninger og med flatt terreng med hard og myk bakke. Nord2000 benytter samme typen klassifisering og måten å relatere lydshastighetsprofilene på som HARMONOISE/IMAGINE [7]. Den Sveitsiske metoden for å beregne skytestøy, sonARMS [8], benytter en lignende klassifisering og relaterer også de meteorologiske klassene til lydutbredelsen gjennom lydshastighetsprofiler. EU modellen for lydutbredelse, CNOSSOS [9], har kun to meteorologiske klasser (nøytral og gunstig), men fordelingen mellom disse kan justeres i forhold til de lokale forholdene basert på meteorologisk statistikk.

CONCAWE, HARMONOISE, Nord2000 og sonARMS benytter vindhastighet og -retning i klassifiseringen av meteorologien. I tillegg benyttes en eller annen form for indikator på atmosfæriske stabilitet. CONCAWE benytter Pasquill stabilitetsklasser, sonARMS benytter strålingsbalanse og HARMONOISE og Nord2000 benytter skydekke og tid på døgnet som indikatorer på atmosfærisk stabilitet. sonARMS og

HARMONOISE/Nord2000 benytter den såkalte Monin-Obukhov likhetsteorien. Denne leder til en tilnærming til lyd hastighetsprofilen, C , bestående av en logaritmisk og en lineær del.

$$C = A \cdot \ln\left(1 + \frac{z}{z_0}\right) + B \cdot z + C(0) \quad (1-1)$$

Her er z høyden, A er relatert til vindhastighetsprofilen og B er relatert til temperaturprofilen. For HARMONOISE/Nord2000, velges et sett med skaleringsparametere [7], fra likhetsteorien, basert på vindhastigheten 10 meter over bakken, tid på dagen og skydekket. Sammen med vinkelen mellom vindretningen og lydpropageringsretning og noen faste parametere, benyttes disse skaleringsparametere til å beregne A og B . I forbindelse med klassifiseringen defineres fem intervaller hver for A og B , slik at man får i alt 25 klasser.

For å beregne årlige gjennomsnittlige lydnivåer, må statistikk for hyppighet av tilfeller av de ulike meteorologiklassene beregnes. Dette kan gjøres for vilkårlige lokasjoner, men er begrenset av hvor de nødvendige meteorologiske observasjonene er tilgjengelige. sonARMS benytter data fra værvarslingsmodeller og noe tilsvarende kunne nok ha vært gjort i Norge også, dersom nytteverdien av høyere geografisk oppløsning er god nok. Den meteorologiske statistikken kan beregnes for ulike varigheter; hele året, månedsvis eller kvartalsvis for å muliggjøre beregning av lydnivå for spesifikke perioder av året. For å inkludere variasjonene over døgnet og muliggjøre beregning av L_{den} , beregnes statistikk separat for dag, kveld og natt. Det anbefales at den meteorologiske statistikken beregnes basert på meteorologiske observasjoner over en periode på minst 1 år, men aller helst 10 år [7]. Statistikk for de meteorologiske klassene har blitt beregnet for flere av de nordiske landene [7], [10], [11]. Resultatene fra disse undersøkelsene viser at i praksis er det bare 13 klasser som har forekomster, og typisk er antallet forekomster i noen klasser så få at antallet benyttede klasser kan reduseres til 8-10 [11]. For å redusere beregningstiden i tilfeller hvor maksimal nøyaktighet ikke er påkrevd, kan antallet klasser ytterligere reduseres til 4-5. Dette har blitt gjort for Danmark [10], delvis basert på en metodikk foreslått innen HARMONOISE. De resulterende fire klassene tilsvarer ugunstige, nøytrale, gunstige og veldig gunstige propageringsforhold.

Samtidige målinger av utendørs lydutbredelse over lange avstander og interessante meteorologiske parametere kan være krevende. En interessant måleserie for utendørs lydutbredelse, hvor det samtidig ble utført grundige meteorologiske målinger, ble utført ved Sodankylä i Finland i perioden 2004-2005 [12]. Der ble lydutbredelse ut til 3 km målt over en periode 612 dager, samtidig som omfattende meteorologiske målinger ble foretatt. Målingene viste variasjoner i dempingen på opptil 80 dB over alle frekvensene (40-1600 Hz), men typisk rundt 60 dB i individuelle frekvensbånd. De målte dempningsdataene var normalfordelte og med standardavvik fra 7.7 til 11 dB over oktavbåndene fra 40 til 1600 Hz. Basert på disse målingene ble en statistisk modell for innvirkningen av meteorologi utviklet basert på omfattende regresjonsanalyser. Den statistiske modellen ble kombinert med paraboliske ligninger og den kombinerte modellen beskrev lydutbredelsen på en veldig god måte. Gjennom regresjonsanalysen ble mange interessante sammenhenger mellom meteorologi og lydutbredelse funnet. Selv om målingene kun omfatter lydutbredelse til en avstand og over ett terreng, gjør de detaljerte meteorologiske målingene og de gode resultatene som modellen oppnådde, denne måleserie svært interessant. Dessverre er ikke målingene kompilert til et format som gjør det mulig å distribuere dem. Vi har derfor ikke kunnet bruke dem for videre analyser i inneværende prosjekt.

3 Målinger utført av Forsvarsbygg

Forsvarsbygg har gjennomført en serie målinger av lydnivåer på lange avstander fra en impulslydkilde [13]. Målingene er gjennomført på ulike lokasjoner, med varierende avstand, topografi og bakkeegenskaper og under varierende meteorologiske forhold. Parallelt med målingene av lydutbredelse har også en del meteorologiske parametere blitt målt med faste eller mobile målere. Disse målingene har blitt analysert og simuleringer av lydutbredelsen har blitt gjennomført.

3.1 Datareduksjon i tre trinn

For å sikre at de målte dataene er representative, har det blitt gjennomført en tretrinns filtrering av dataene. I det første trinnet ble kun individuelle målinger valgt ut, hvor det var blitt registrert samtidige hendelser i en referansemåler nær kilden (19-36 meter) og i den aktuelle lydnivåmåleren. I det andre trinnet ble dataene filtrert basert på kildens stabilitet. Basert på lydnivåmålingene ved referansemåleren, ble et referansespekter definert og det ble satt krav til at målingene ved referansemåleren skulle ligge innenfor et gitt avvik fra dette referansespekteret. Dette sikret at feilsituasjoner hos lydkilden, hvor nivå og kildespekter ikke var representativt, ikke ble benyttet videre. I det tredje trinnet, ble signal til støyforholdet (SNR) ved den aktuelle lydnivåmåleren vurdert og kun hendelser med et tilstrekkelig SNR ble godkjent for videre analyse. For å unngå at det siste trinnet, med krav til SNR, endrer fordelingen av lydnivåmålingene for mye, ble det satt et krav til at et minimum av målingene måtte passere det siste trinnet. Dette kravet gjaldt både andel av målingene som passerte denne filtreringen og det absolutte antallet. Lydnivåmålere som ikke tilfredsstilte dette kravet, ble fjernet fra den videre analysen. Etter disse filtreringstrinnene, var standardavviket i LAFmax, målt ved referansemålerne, på 0.9-1.3 dB for de godkjente målingene i de ulike lydnivåmålerne.

3.2 Målinger av meteorologiske forhold

En rekke meteorologiske parametere ble også målt samtidig med lydnivåene, av meteorologistasjoner i nærheten av testområdet. For de tre første av de i alt fem måleseriene, var det faste installerte meteorologistasjoner i nærområdet som ble benyttet. For de to siste måleseriene ble det benyttet dedikerte meteorologistasjoner, som var plassert nærmere lydkilden og lydnivåmålerne.

Som det er beskrevet i avsnitt 2, krever klassifiseringen av de meteorologiske forholdene i henhold til metodikken benyttet av HARMONOISE og Nord2000, at det er gjort observasjoner av skydekket. Slike observasjoner er ikke en del av de meteorologiske parametere som ble målt av Forsvarsbygg. Verdier for skydekket ble derfor innhentet fra offisielle meteorologiske målestasjoner [14] for periodene hvor måleseriene fant sted. Observasjoner av skydekket gjøres kun ved et utvalg av de offisielle meteorologiske målestasjonene. Til tross for at nærmeste målestasjon med registrering av skydekket ble benyttet, var avstanden til områdene hvor lydutbredelsen ble målt fra 10-15 til 80-90 km.

4 Simuleringer

4.1 Programvare

Simulering av lydutbredelsen ble gjennomført for å kunne gjøre sammenligning med målingene nevnt i avsnittet over. Simuleringene ble gjennomført med en Matlab-implementasjon av versjon 21 av Nord2000¹. For de målingene som ble godkjent gjennom de tre filtreringstrinnene, ble nødvendig informasjon i form av topografi, bakkeegenskaper og meteorologiske parametere samlet inn.

4.2 Topografi og bakkesammensetning

Topografien mellom lydkilden og den aktuelle lydnivåmåleren ble hentet ut fra Kartverkets digitale terrengmodell med rutenett på 10 x 10 meter (DTM10) [15]. Terrengprofilene ble forenklet til maksimalt 10 segmenter etter metoden anbefalt i Nord2000. Bakkens egenskaper ble karakterisert ut fra studier av kartutsnitt og satellittbilder av området mellom lydkilden og den aktuelle lydnivåmåleren². Følgende kategorier og koblinger til dempningsklassene oppgitt i Nord2000 [16] ble benyttet.

- Myr og skogbunn, klasse D, 200 [kPas/m²]
- Sammenpresset grunn og grus, klasse E, 500 [kPas/m²]
- Veier og parkeringsplasser, klasse F, 2000 [kPas/m²]
- Vann, klasse G, 20000 [kPas/m²]

4.3 Meteorologisk klassifisering

I følge [7], klassifiseres de meteorologiske forholdene ut fra følgende parametere

- Vindhastighet 10 meter over bakken
- Vindens retning relativt til retningen mellom lydkilden og mottakerposisjonen
- Skydekke (i åttendeler)
- Dag eller natt (basert på sol opp- og nedgang)

I tillegg trengs lufttemperatur og relative luftfuktighet. Vindhastighet, vindretning, lufttemperatur og relativ luftfuktighet ble hentet inn fra nærmeste meteorologimåler til lydkilden³. Skydekke ble hentet inn fra den nærmeste offentlige meteorologistasjon hvor dette registreres [14]. På noen få lokasjoner registreres skydekket med intervaller på en eller tre timer, men det mer vanlige er rundt tre observasjoner per døgn. Valg av stasjon hvor skydekket ble hentet fra, ble derfor et kompromiss mellom tidsmessig og geografisk oppløsning. For resultatene i avsnittet under, ble skydekket hentet fra Flisa og Kongsberg for henholdsvis serie 1-3 og 4-5⁴. Det var de nærmeste lokasjonene hvor skydekkeobservasjoner var tilgjengelig. Dette ga tre observasjoner i døgnet, noe som gir en lav tidsoppløsning, til tross for de relativt langsomme variasjonene i skydekke. Skydekkeinformasjon ble også hentet inn fra Gardermoen og Blindern⁵, hvor observasjonene stort sett var blitt gjort med intervaller på tre timer. Sammenligning av simuleringer med skydekkeinformasjon fra de nærmeste lokasjonene og de med best tidsoppløsning viste en differanse i de midlere A-veide nivåene innenfor +/-0.4 dB for alle lydnivåmålerne i serie 1-3. Tilsvarende sammenligning for serie 4-5 viste maksimalt differanse på +2.7/-2.2 dB for to lydnivåmålere, mens det for de resterende var innenfor +0.1/-0.3 dB. De større forskjellene for serie 4-5, skyldes sannsynligvis den større geografiske avstanden og dermed større forskjeller i skydekket.

¹ compro21ABC.m

² <https://www.norgeskart.no/>

³ Avstand fra meteorologimåler til lydkilde for de fem måleseriene [1811, 1593, 2430, 22, 32] meter.

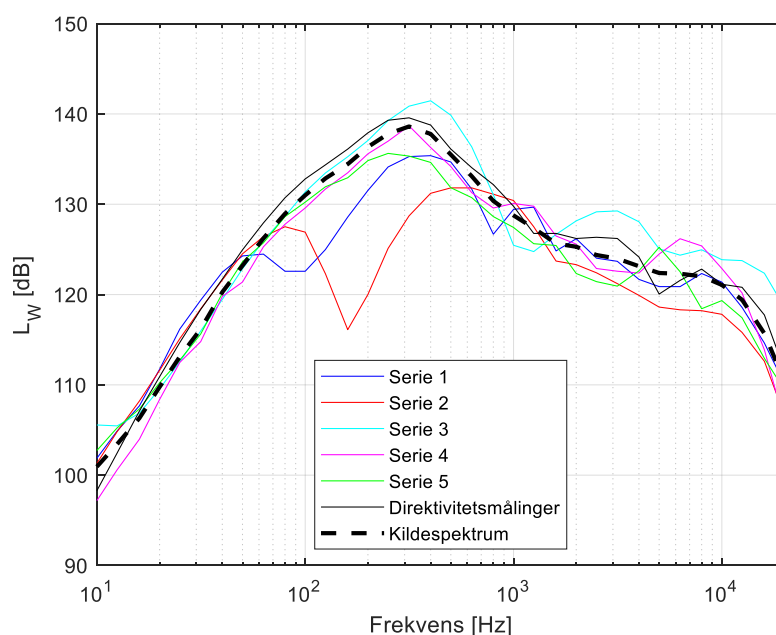
⁴ Hhv 80-90 og 10-15 km fra måleområdene.

⁵ Hhv 120-130 og 80 km fra måleområdene.

4.4 Definisjon av lydkildens lydeffektnivå og direktivitet

Lydkildens lydeffektnivå ble estimert ut fra en kombinasjon av målingene gjort med referansemålerne og en serie målinger, utført av Forsvarsbygg [13], for å karakterisere direktiviteten til lydkilden. En sekvens av målinger fra hver av de fem måleseriene, hvor A-veid nivå var på det mest stabile, ble valgt ut og medianen til de målte spektrene ble benyttet som referansespekter for seriene. Fra målingene av direktiviteten til lydkilden, ble det allerede midlede spektret benyttet for retningen rett foran lydkilden. Bakkeforholdene mellom lydkilden og referansemålerne varierte mellom de fem seriene og direktivitmålingene, noe som medførte ulik innvirkning på de målte spektrene i referansemålerne. Det ble gjort forsøk på å regne seg bakover til kilden basert på simuleringer av lydutbredelsen fram til referansemålerne, men dette ga ikke konsistente resultater. De seks referansespektrene ble derfor korrigert for avstandsdempning og nominell bakkeinnvirkning⁶. Etter disse korreksjonene ble et kildespektrum beregnet som middelverdien mellom de seks referansespektrene. I måleserie 1 og 2 var det en tydelig forsenkning i referansespektrene rundt 100-200 Hz, sannsynligvis på grunn av interferens med bakken. Disse spektrene ble derfor ikke tatt med i midlingen under 1000 Hz. De individuelle referansespektrene og det resulterende kildespekteret er vist i Figur 1.

Direktiviteten til lydkilden ble karakterisert i fem retninger i horisontalplanet (0, 45, 90, 135 og 180 grader) i måleserien nevnt over. Ut fra vinkelen mellom retningen til lydkilden og retningen til den aktuelle lydnivåmålerens posisjon, ble den relative direktivitsresponsen (relativt til frontretningen) estimert ved hjelp av interpolering.



Figur 1: Individuelle referansespektra og resulterende kildespektrum.

4.5 Beregning av A-veid nivå og nivå i 1/3 oktavnivå i mottakerposisjonene

En simulering med Nord2000 ble kjørt for hver godkjent måling og med alle nødvendige parametere definert ut fra de meteorologiske forholdene på det tidspunktet hvor målingen fant sted. Simuleringen med Nord2000 resulterer i et relativt lydtryknivå, ΔL , og inkluderer virkningen av bakke, terreng og meteorologiske effekter, inkludert absorpsjon i luften. Det resulterende lydtrykket i mottakerposisjonen ble beregnet ved å kombinere det simulerte relative lydtryknivået med

⁶ Nominell bakkeinnvirkning ble definert til en forsterkning på 6 dB.

- Kildespekteret, L_W (som vist over)
- Kildens relative direktivitetsrespons, L_{dir}
- Avstandsdempningen, L_{avst}

Dette ble gjort på følgende måte for hvert 1/3 oktavnband, (i)

$$L(i) = L_W(i) + L_{dir} - L_{avst} + \Delta L(i) \quad 4-1$$

Her er avstandsdempningen, for en avstand R, gitt av

$$L_{avst} = 10 \cdot \log_{10}(4 \cdot \pi \cdot R^2) \quad 4-2$$

I tillegg til de beregnede nivåene i 1/3 oktavnband, ble også A-veid nivå beregnet ved å A-veie nivåene i 1/3 oktavnbandene og summere energien fra alle bandene.

5 Resultater

5.1 Midlere nivåer og spredning

En oversikt over resultatene fra målingene og simuleringene er vist i Tabell 1. Lydnivåmålere hvor det etter filtreringstrinnene beskrevet over, gjenstod mindre enn 50 % av dataene eller mindre enn 100 målinger, er utelatt. Tabellen viser gjennomsnittlig A-veid nivå for de godkjente målingene og simuleringene og differansen mellom de to. Videre vises standardavviket for de målte og simulerte A-veide nivåene.

Normalfordelingen til de målte nivåene ble sjekket ved å sammenligne dataene mot en normalfordeling i et såkalt Q-Q plot (kvantil-kvantil). I henhold til en slik analyse, ser de målte nivåene ut til å være normalfordelte stort sett over ± 1 til 2 standardavvik. Men som vi skal komme tilbake til senere, så antyder nærmere studier av histogrammer av dataene at fordelingen for noen av målerne kan være multimodale. De simulerte A-veide nivåene vil, på grunn av diskretiseringen som skjer når meteorologien klassifiseres i et begrenset antall klasser, ikke framstå som normalfordelt. Standardavviket for de simulerte A-veide nivåene er likevel beregnet og tatt med for å gi et inntrykk av spredningen i disse dataene også. I tillegg til de ovennevnte resultatene, inneholder tabellen også noe tilleggsinformasjon om målingene, som avstand fra lydkilde til lydnivåmåler, vinkelen mellom lydkildens frontretning og retningen til lydnivåmålerne og en kort karakterisering av bakkens egenskaper.

Tabell 1: Oversikt over resultater fra målinger og simuleringer.

Serier og målere	Middelverdi		Differanse [dB]	Standardavvik		Lydbane		
	Målt L_{AFmax} [dBA]	Simulert L_A [dBA]		Målt L_{AFmax} [dBA]	Simulert L_A [dBA]	Avstand [m]	Vinkel [grader]	Bakke
Serie 1								
Alfa	70.6	62.5	-8.1	3.9	1.0	1738	339	Myk bakke
B	80.4	69.2	-11.2	3.9	2.1	464	338	Myk bakke
C	71.1	64.4	-6.7	3.8	0.3	1112	341	Myk bakke
Serie 2								
Alfa	67.6	64.6	-3.0	5.5	5.2	994	358	Myk bakke
Beta	59.8	61.7	1.9	4.7	1.6	1295	316	Myk bakke
Gamma	51.9	54.7	2.8	4.9	3.1	1007	262	Myk bakke
B	56.4	54.7	-1.7	7.4	6.1	1006	91	Myk bakke
C	68.6	59.9	-8.7	8.0	9.7	932	45	Myk bakke
Serie 3								
Alfa	55.0	57.5	2.4	3.9	4.2	535	304	Delvis myk, delvis hard
Beta	50.3	55.0	4.7	5.7	7.3	1021	309	Delvis myk, delvis hard
Gamma	65.3	63.9	-1.4	3.8	0.7	966	54	Litt hard, mest myk
Serie 4								
Alfa	59.9	48.3	-11.6	4.6	0.5	266	229	Myk bakke, skog
Beta	69.5	65.8	-3.7	4.4	1.4	342	163	Over vann
C	68.1	66.0	-2.1	6.3	7.8	801	2	Langs kanten av et vann
Serie 5								
Beta	72.4	74.3	2.0	4.8	1.2	596	352	Myk bakke, skog
Gamma	82.1	76.4	-5.7	2.2	0.3	273	76	Over vann
B	71.9	73.5	1.5	4.6	2.1	824	3	Over vann
C	61.1	60.2	-0.9	8.1	7.9	826	357	Langs kanten av et vann

Differansene mellom målt og simulert A-veid nivå er til dels ganske små, men det er en del tilfeller med større avvik. For noen av disse større avvikene har det blitt funnet mulige forklaringer mens det for andre ikke har blitt funnet noen forklaring. Videre kommer en kort gjennomgang av de største avvikene.

5.2 Ukjent avvik i serie 1

For alle målerne i serie 1, er avvikene store, med en underestimert fra simuleringenes side på 6.7 til 11.2 dB. For disse avvikene har det ikke blitt funnet noen forklaring. Innenfor meteorologiklassifiseringen som er benyttet er det ingen klasser som gir lydutbredelse som er gunstig nok til å gi så høye nivåer som i målingene. Temperaturgradienten på stedet ble også estimert ut fra målinger av temperaturen hos forskjellige meteorologiske målestasjoner i ulike høyder. De estimerte temperaturgradientene ble over måleperioden funnet å være ganske små. Det tilsier at det heller ikke var kraftige inversjonsforhold som forårsaket de høye målte nivåene. Basert på det faktum at det i de andre seriene var betydelig mindre avvik mellom simuleringene og målingene for de fleste målerne, så tillegges resultatene fra denne serien mindre vekt i de følgende vurderingene.

5.3 Mulig avvik på grunn av avstand til meteorologisk målestasjon

For måler C i serie 2, underestimerer simuleringene det A-veide nivået med 8.7 dB. Nærmere undersøkelser av simuleringene i dette tilfellet viste at det for cirka 40 % av målingene ble registrert meteorologiske forhold som tilsvarte ugunstige lydutbredelsesforhold på grunn av motvind. Målingen av de meteorologiske parameterne, inkludert vind, ble for denne måleren utført av en måler cirka 1600 meter fra og cirka 100 meter høyere opp enn lydilden. Lydbanen for denne måleren ligger også skjermet av den toppen hvor den meteorologiske stasjonen står. Det er derfor rimelig å anta at de ugunstige vindforholdene her var noe mindre enn antatt i den meteorologiske klassifiseringen. Dersom målingene og tilsvarende simuleringer for de mest ugunstige forholdene tas bort, reduseres avviket til mellom 5 og 6 dB.

5.4 Sideveis refleksjoner fra skog og bygninger gir avvik

For måler Alfa i serie 4, underestimerer simuleringene det A-veide nivået med 11.6 dB. En nærmere undersøkelse av dataene i dette tilfellet, viser at dette avviket høyst sannsynlig skyldes at lydnivåmåleren ligger skjermet i forhold til lydilden og at betydelig lydenergi reflekteres via skog og/eller bygninger som ligger til siden for den direkte lydibanen. I Vedlegg 1 er alle de målte og simulerte lydspektrene for de godkjente målingene vist. I tillegg er ukalibrerte råspekter fra et lydopptak av en hendelse vist, analysert med to ulike tidsutsnitt, begge ett sekund lange. Fra et tidsutsnitt vises spektret til hovedimpulsen, før refleksjonene ankommer og fra et annet tidsutsnitt vises spektret til refleksjonene. En beregning av det A-veide nivået basert på de to tidsutsnittene viser en forskjell på cirka 10 dBA. Reflektert lydnivå ser ut til å være 10 dBA høyere enn direktelyden. Et tidsutsnitt er også vist, hvor direktelyd og reflekter lyd kan sees. I figuren er skillet på 1.9 sekunder angitt, hvor sekundet foran ble benyttet til å beregne nivået til direktelyden og sekundet etter til å beregne nivået på den reflekterte lyden. Refleksjonene ankommer lyd måleren fra ca 100 til 500 ms etter direktelyden.

5.5 Avvik på grunn av feil i antagelse om kildens direktivitet

For måler Beta i serie 4 og Gamma i serie 5 er ikke avvikene så store, men simuleringene underestimerer det A-veide nivået med hhv 3.7 og 5.7 dB. I begge disse tilfellene skjer mesteparten av lydutbredelsen over vann og retningen til de to målerne er henholdsvis cirka 160 og 75 grader i forhold til frontretningen på lydilden. Dette medfører at kildespekteret korrigeres med direktivitetskorreksjoner i henhold til de respektive retningene. De to retningene, som tilsvarer henholdsvis nesten rett bakover og nesten rett til siden fra kilden, er direktivitetskorreksjonene svært store (-10 til -23 dB i frekvensområdet 200-1000 Hz). For disse målerne er lydilden plassert nesten på eksakt samme sted på en gruslagt snuplass ved enden på en vei og terrenget heller oppover bakenfor/på siden av lydilden. Det virker derfor svært sannsynlig at mer lydenergi blir kastet i retning av de to nevnte lyd målerne på grunn av refleksjonene fra skråningen bakenfor/på siden i dette tilfellet. Dersom man studerer de målte og simulerte lydspektrene for disse to målerne, kan man se at de

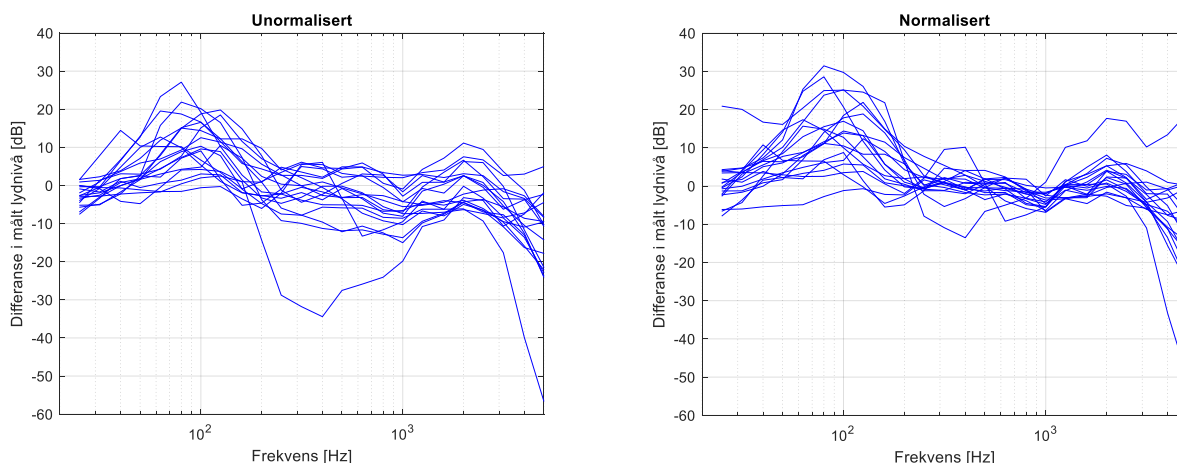
simulerte lydspektrene mangler en god del energi i frekvensbånd som samsvarer godt med de benyttede direktivitetskorreksjonene.

5.6 Frekvensrespons

Nord2000 beregner nivåene i 1/3 oktavbånd og disse resultatene må også vurderes. I Figur 2 vises den gjennomsnittlige differansen mellom målt og simulert lydnivå for de 18 lydnivåmålerne hvor det var tilstrekkelig med godkjente målinger. I den ene delen av figuren vises differansen unormalisert, for også å vise de absolutte avvikene, mens de i den andre delen vises normalisert, for enklere å se likheter i frekvensforløpene. En positiv differanse betyr, som i tabellen over, at simuleringen overestimerer lydnivået. Ved høye frekvenser er det viste frekvensområdet begrenset til 5000 Hz, da måleresultatenes nøyaktighet er begrenset av bakgrunnsstøy og støygulv i måleutstyret. Denne begrensningen kan man se antydning til ved tendensen til økende negativt avvik over 3000 Hz. Den sterkt avvikende kurven i de unormaliserte resultatene (-30 dB rundt 300 Hz) er for måler Alfa i serie 4, hvor avviket høyst sannsynlig skyldes sideveis refleksjon av lyd mens direkteveien mellom kilde og måler er skjermet.

Den sterkeste trenden i differansen er at simuleringene overestimerer lydnivået i et frekvensområde rundt 100 Hz med opptil 30 dB. Dette skyldes en forsenkning (reduisert nivå/"dip") i måleresultatene som er til stede i mindre grad eller ikke i det hele tatt i simuleringene. Denne forsenkningen i målingene skyldes sannsynligvis lydens interaksjon med bakken. Det ble gjort noen forsøk i simuleringene på å endre parameteren som beskriver bakken. Det medførte i noen tilfeller at forsenkningen i de simulerte frekvensresponsene flyttet seg til riktig frekvensområde, men dybden på forsenkningen ble fortsatt altfor liten.

I frekvensområdet cirka 300-1000 Hz ser man at den normaliserte differansen er ganske jevn, med en svak tendens til en forsenkning (underestimering) rundt 1000 Hz. Videre oppover i frekvens er det en liten heving (overestimering) rundt 2000 Hz. Forsenkingen og hevingen rundt henholdsvis 1000 og 2000 Hz kan se ut til å skyldes at de simulerte responsene innehar motsatte forløp, muligens som en konsekvens av den simulerte virkningen av bakken. Det kan f.eks. hende at modellen for impedans i bakken (Delany-Bazley) er utilstrekkelig og feiler for dette terrenget.

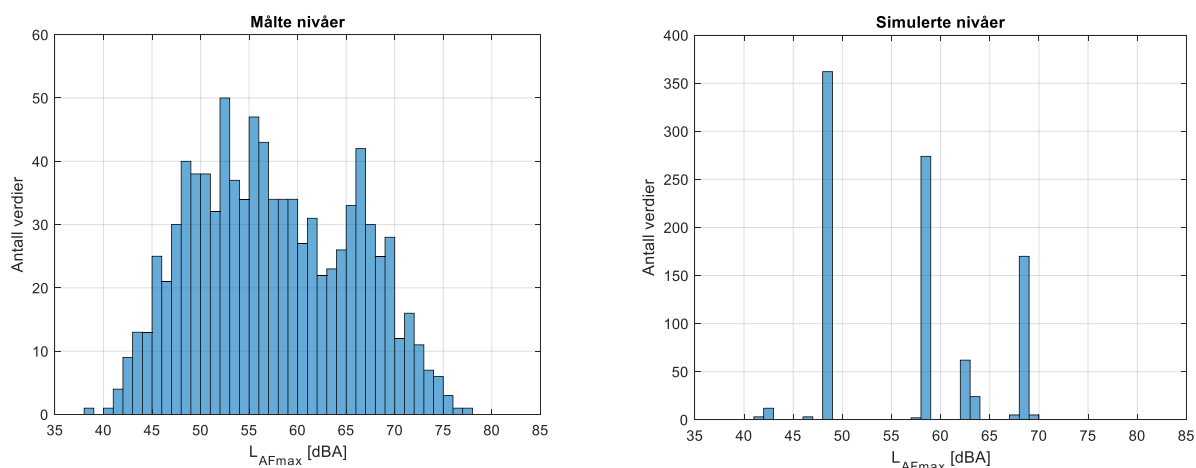


Figur 2: Gjennomsnittlig differanse mellom målte og simulerte nivåer i 1/3 oktavbånd for hver av de 18 lydnivåmålerne med godkjente målinger. Unormalisert til venstre og normalisert (gjennomsnitt mellom 200 og 2000 Hz) til høyre.

5.7 Spredning i målinger og simuleringer

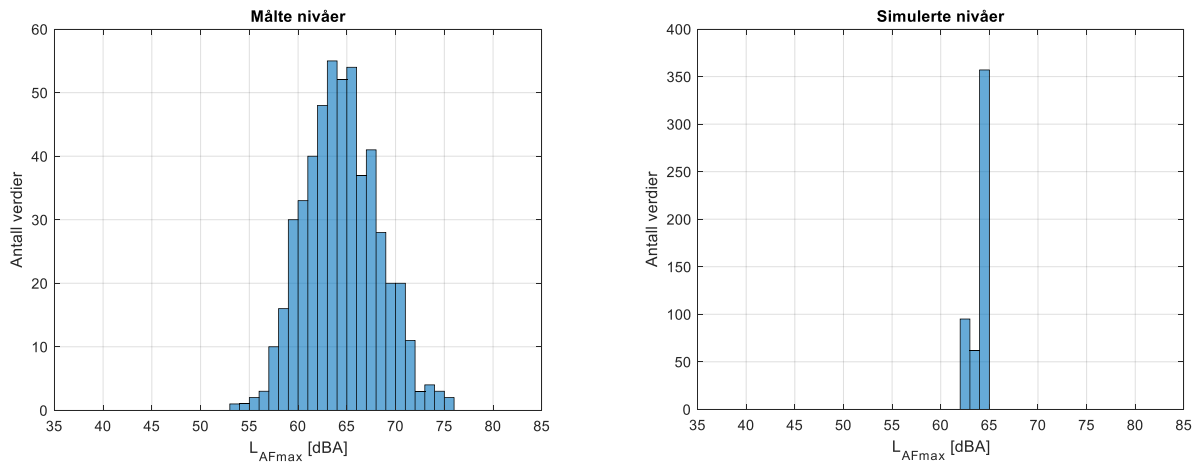
Standardavvikene til de målte A-veide nivåene ligger for de fleste målerne i området 3.8-5.5 dB, mens noen ligger klart høyere rundt 8 dB. Variasjonen i de meteorologiske forholdene varierte mellom måleseriene, men også mellom målerne i hver serie, på grunn av deres individuelle lokasjon og retning i forhold til lyd-kilden. Dette bidrar nok til en viss grad til at spredningen i de målte nivåene varierer ganske mye mellom målerne, men det er rimelig å anta at det er flere faktorer som bidrar.

Det er interessant å observere at selv om resultatene fra simuleringene av naturlige grunner ikke er normalfordelte, så har standardavvikene delvis samme trend. Standardavvikene til de simulerte resultatene er til dels mye mindre enn standardavvikene til de målte resultatene, noe som nok i alle fall delvis skyldes den diskretiseringen som følger av klassifiseringen av de meteorologiske forholdene. I noen tilfeller er likevel standardavvikene til de simulerte resultatene store og dette samsvarer relativt godt med når standardavvikene i målingene er store. Dersom vi ser nærmere på histogrammer for de målte og simulerte nivåene for måler C i serie 5 (se Figur 3), så ser vi at fordelingen for de målte nivåene er svært bred og litt vel bratt på kantene. Man kan derfor se for seg at denne fordelingen kan ha to eller tre toppe, det vil si være multimodal. Fordelingen for de simulerte nivåene er sterkt diskretisert, men med en slags likhet med fordelingen for de målte nivåene. En mulig forklaring kan her være at lydutbredelsen varierer sterkt med de meteorologiske forholdene, slik at det er to eller flere tilstander med noen variasjoner innen hver tilstand. Det er interessant å merke seg at i den meteorologiske klassifiseringen i dette tilfellet, så var det klassene 13, 14 og 15 som var sterkt dominerende og som resulterte i de dominerende stolpene i histogrammet for de simulerte nivåene. Dette til tross for at disse klassene er "naboklasser", kun med forskjeller i parameteren B for lyd-hastighetsprofilen, som beskriver bidraget fra temperaturgradienten. Den direkte banen mellom lyd-kilden og måleren gikk i denne situasjonen langs kanten på et vann og vekslet dermed mellom hard og myk grunn, men en del trær og varierende høyde på land. Den varierende temperaturgradienten har kanskje medført varierende høyde på lyd-banene, slik at de relativt kompliserte topografi og bakkeforholdene har fått varierende betydning for lydutbredelsen.



Figur 3: Histogrammer for de målte og simulerte A-veide nivåene for måler C i serie 5.

Til sammenligning, viser Figur 4 histogrammer for de målte og simulerte nivåene for måler Gamma i serie 3. Her ser vi for de målte nivåene en mye smalere fordeling, noe som gjenspeiler standardavviket på 3.8 dB. Fordelingen for de simulerte nivåene er svært smal, sannsynligvis delvis på grunn av diskretiseringen fra den meteorologiske klassifiseringen.



Figur 4: Histogrammer for de målte og simulerte A-veide nivåene for måler Gamma i serie 3.

5.8 Oppsummering

Fra resultatene over kan vi gjøre følgende observasjoner:

- Dersom vi ser bort fra resultatene fra serie 1, hvor det er noe usikkerhet knyttet til resultatene, og resultatene fra måler Alfa i serie 4, hvor det store avviket høyst sannsynlig er knyttet til refleksjoner, blir den midlere differansen mellom målt og simulert A-veid nivå på 0.8 dB. Det betyr at man kan vente et svært lite avvik i simulerte langtidsmidlede A-veide nivåer når man midler over lokasjoner. Men det vil allikevel være tilfeller hvor man på en enkelt lokasjon vil oppleve avvik på +/-3-5 dB uten at dette har noen kjent årsak.
- Resultatene fra måler Alfa i serie 4 viser at reflektert lyd kan bidra svært mye til og til dels dominere det totale lydnivået, spesielt når mottakeren ligger skjermet i forhold til lyd-kilden. For enkelte lokasjoner kan det derfor være avgjørende at refleksjoner tas med i beregningen i lydutbredelsesmodellen.
- Resultatene i 1/3 oktavbånd i kapittel 5.6 viser at simuleringene typisk overestimerer med 10-30 dB i forhold til målingene i et område rundt 100 Hz. Dette kan se ut til å skyldes at modellen for lydets samvirke med bakken ikke fungerer godt nok. I frekvensområdet 300-3000 Hz ser det ut til at den simulerte responsen i gjennomsnitt stemmer ganske godt over ens med de målte responsene, med en liten tendens til under- og overestimering rundt henholdsvis 1000 og 2000 Hz.
- Det er ingen tegn til at spredningen i de målte A-veide nivåene avhenger av avstanden.
- De målte A-veide nivåene hadde i de fleste tilfellene et standardavvik på 3-6 dB, men i noen tilfeller var det så høyt som rundt 8 dB. I tilfellene med den høyeste spredningen, kunne det se ut til at fordelingene var multimodale og dermed ikke normalfordelte. De høyeste spredningene stemmer rimelig godt over ens med spredningene som ble rapportert av Majjala [12].
- For de tilfellene hvor den målte spredningen var stor (rundt 8 dB), var også spredningen i de simulerte resultatene i samme størrelsesorden. Når den målte spredningen var i det lave området (3-6 dB), var den simulerte spredningen derimot til dels svært lav og gjenspeilet ikke den faktiske spredningen i lydutbredelsen.
- Spredningsresultatene indikerer at det kan være slik at enkelte lokasjoner vil gi større spredning i lydnivåene enn andre lokasjoner, selv om variasjonen i de meteorologiske forholdene er de samme. Man kan anta at det er forskjeller i terrengprofil og bakkeegenskaper som forårsaker disse forskjellene, men det kan også være andre variabler som virker inn.

6 Meteorologisk statistikk

6.1 Beregning av meteorologisk statistikk

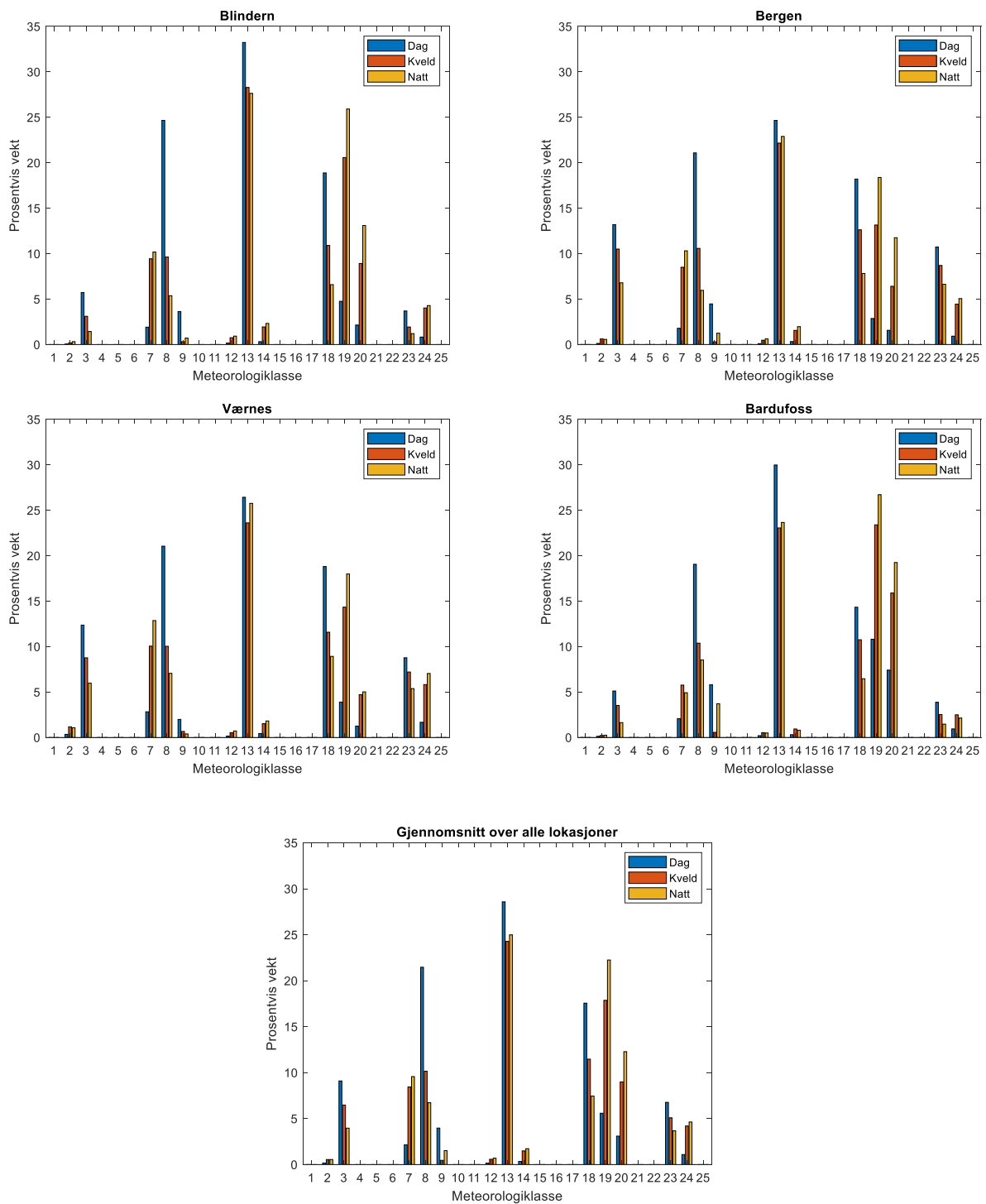
Meteorologiske data for perioden 2010-2019 ble innhentet for lokasjonene Blindern, Værnes (flyplass) og Bardufoss (flyplass). For Bergen (flyplass) var det en del mangler i dataene før 2012 og utvalget derfra ble derfor begrenset til 2012-2019. Disse lokasjonene er geografisk spredt og er også plassert ulikt i forhold til nærhet til kysten. Etter samme metodikk som beskrevet i [7] ble meteorologistatistikk for bruk med Nord2000 beregnet for hver av de fire lokasjonene. Til disse beregningene ble et Matlab-program utviklet av Delta og tilpasset til Norske data av Gunnar Taraldsen benyttet. Den meteorologiske statistikken ble beregnet som et gjennomsnitt over året og for 36 propagasjonsretninger⁷.

6.2 Sammenligning av meteorologisk statistikk fra ulike lokasjoner

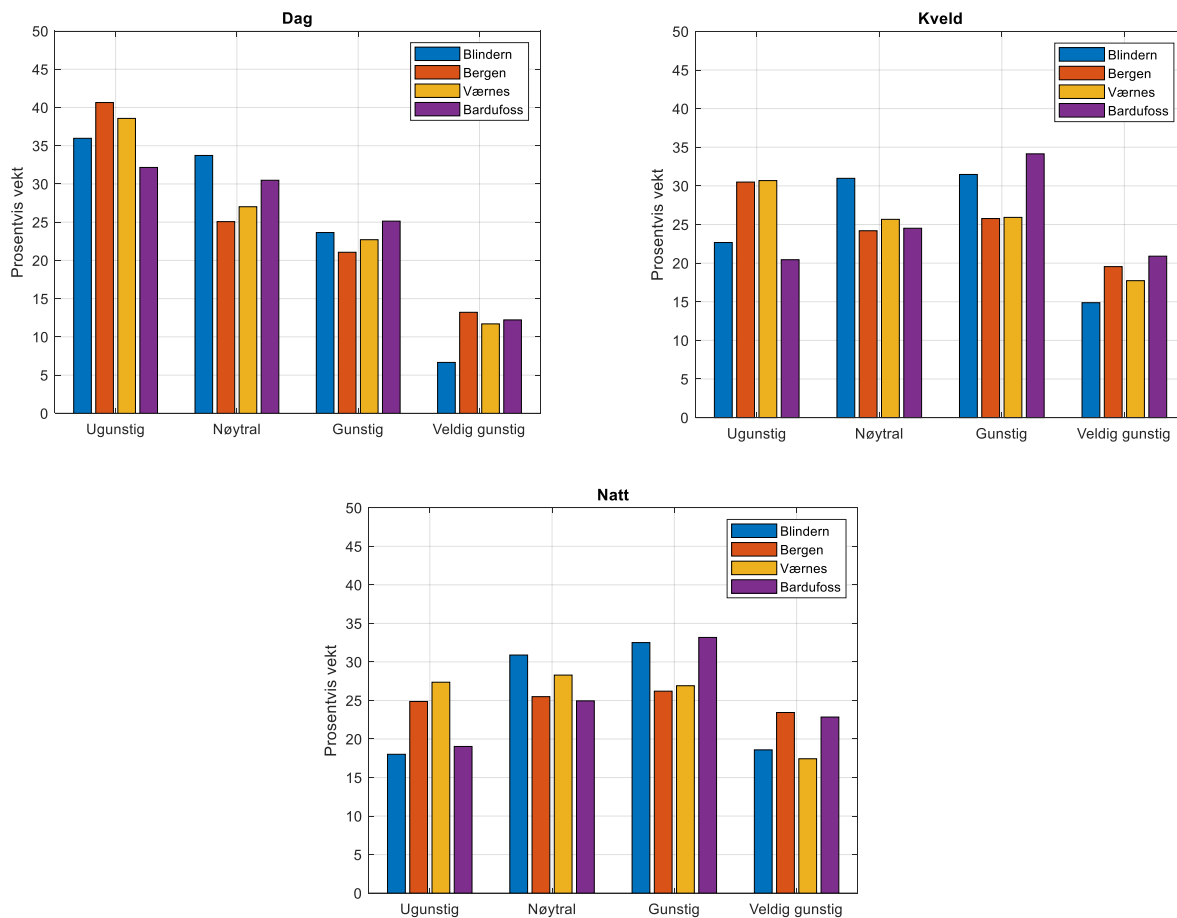
6.2.1 Inndeling etter klasser og propagasjonsforhold

I Figur 5 vises statistikkene, midlet over alle retningene, for de fire lokasjonene og midlet over lokasjonene. En sammenligning av statistikken midlet over lokasjonene med tilsvarende statistikk fra Danmark [10], viser en stor grad av likhet, og de dominerende klassene er i begge tilfeller 3, 7, 8, 13, 18, 19, 20, 23 og 24. Dersom statistikken for de fire ulike lokasjonene sammenlignes på klassenivå, så ser man noen forskjeller, men det er også her klart at det er de samme klassene som er klart dominerende. I [10] beskrives en reduksjon fra de 9 dominerende klassene til 4 klasser, angitt som M1, M2, M3 og M4 og som motsvarer Ugunstige, Nøytrale, Gunstige og Veldig gunstige propagasjonsforhold. Hensikten med denne reduksjonen av klasser er å kunne gjøre raskere beregninger i de tilfeller hvor kravet til nøyaktighet er noe lavere. I Figur 6 er statistikken for de fire ulike lokasjonene sammenlignet, men her kombinert til de fire klassene M1-M4. Når statistikken fra de ulike lokasjonene sammenlignes på dette nivået, ser man at forskjellene ikke er så store.

⁷ Fra 0 til 350 grader med 10 graders oppløsning. 0 grader betyr at kilden er nord for mottakeren og 90 grader betyr at kilden er øst for mottakeren.



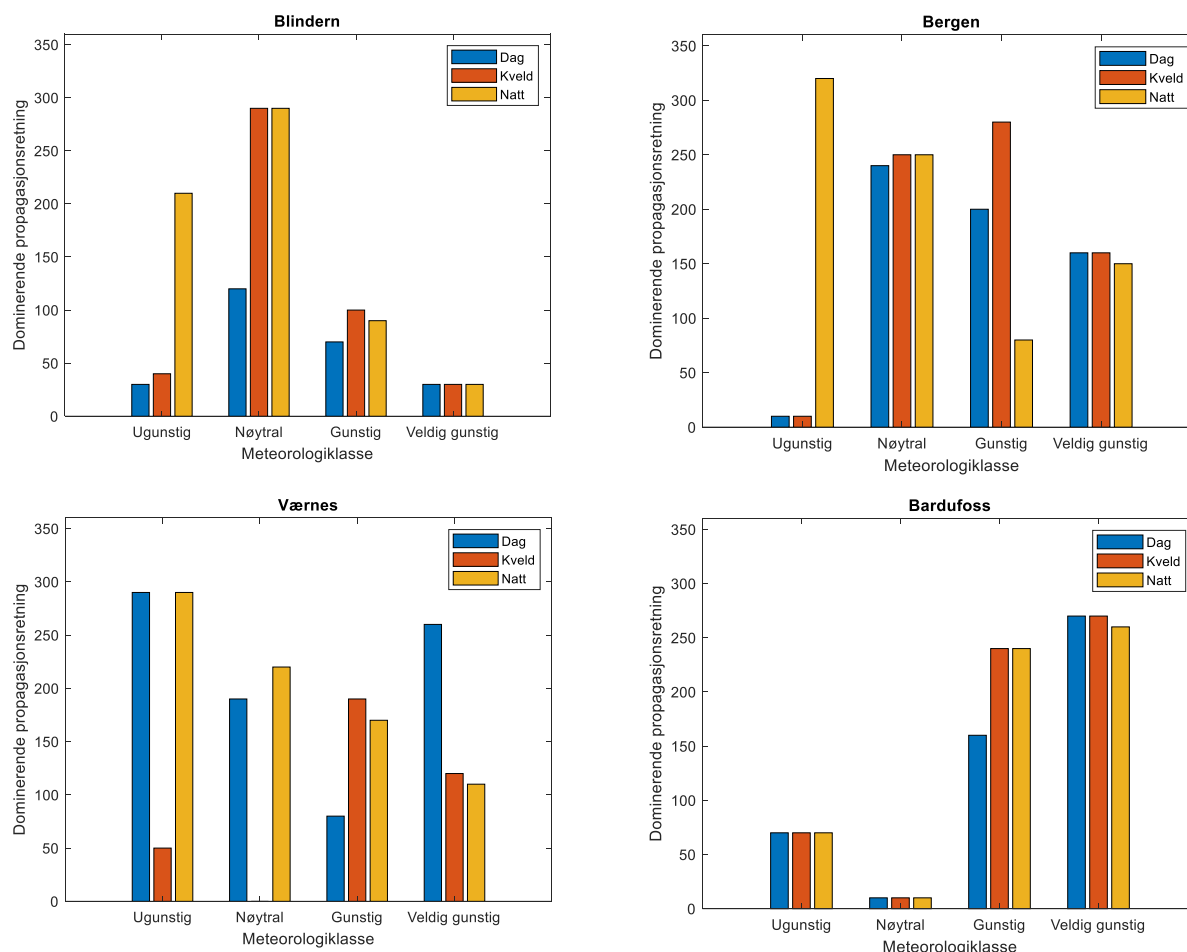
Figur 5: Meteorologisk statistikk for de fire lokasjonene og som gjennomsnitt over lokasjonene.



Figur 6: Sammenligning av meteorologisk statistikk for de fire lokasjonene, slått sammen til fire propagasjonskategorier.

6.2.2 Sammenligning av dominerende propagasjonsretninger

I Figur 7 er dominerende propagasjonsretning i de fire klassene vist for de fire lokasjonene. Dominerende propagasjonsretning er den retningen i hver klasse som har størst forekomst i prosent og er innrettet slik at 0 grader betyr at kilden er nord for mottakeren og 90 grader betyr at kilden er øst for mottakeren. Ikke uventet, viser denne sammenligningen at det er forskjell i dominerende propagasjonsretning mellom de fire lokasjonene.



Figur 7: Dominerende propagasjonsretning for de fire lokasjonene, delt in i de fire propagasjonskategoriene.

6.3 Oppsummering

Fra sammenstillingene av de meteorologiske statistikkene over kan vi gjøre følgende observasjoner:

- Fordelingen mellom de ulike meteorologiklassene og dermed propagasjonsforholdene er svært like i Danmark og Norge
- De innbyrdes forskjellene mellom meteorologiklassene mellom lokasjoner i Norge er små, spesielt når man kombinerer de meteorologiske klassene til de fire reduserte klassene M1-M4
- Det er betydelige forskjeller mellom dominerende propagasjonsretning for de ulike lokasjonene i Norge

7 Konklusjoner

Resultatene fra sammenligningene av målt lydutbredelse og lydutbredelse simulert med Nord2000 viser at når meteorologiklassifiseringen tas hensyn til, så er det i gjennomsnitt ingen avvik av betydning i de langtidsmidlede A-veide nivåene. Allikevel vil man kunne oppleve at man på individuelle lokasjoner observerer avvik i størrelsesorden +/-3-5 dB. For frekvensområdet rundt 100 Hz, tyder resultatene på at Nord2000 kan overestimere lydnivået med opptil 30 dB.

Fordelingen mellom de ulike meteorologiske klassene er så like mellom de undersøkte lokasjonene, at det antas at man med godt resultat kan benytte samme fordeling for hele Norge. Man bør likevel tilpasse den meteorologiske statistikken til vindretningen på den enkelte lokasjon.

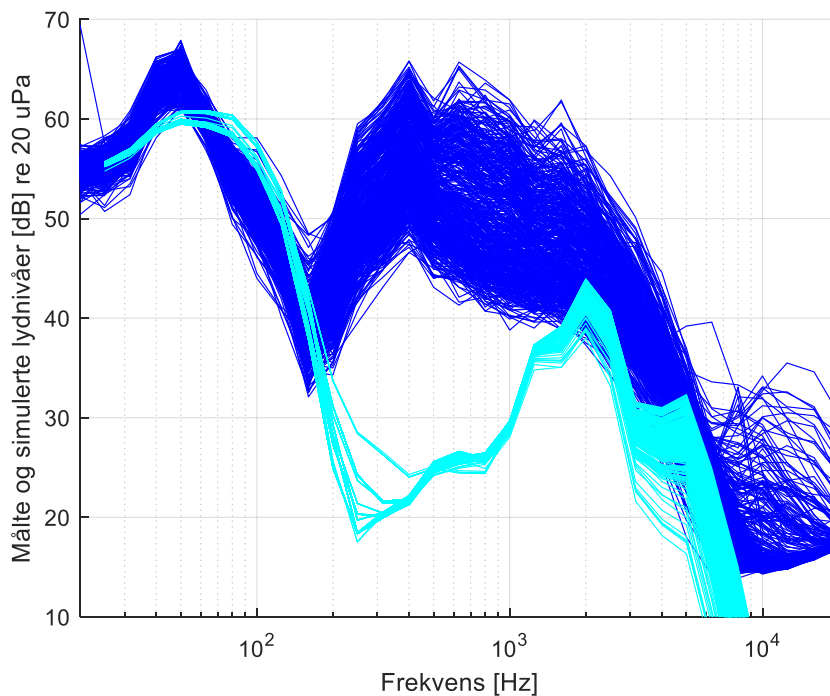
Spredningen i de målte lydnivåene ser ut til å være uavhengig av avstand for de undersøkte avstandene (ca. 250 til 1700 meter). Spredningen kan se ut til å være påvirket av et samvirke mellom meteorologi og variabler relatert til terrengprofil og bakkeegenskaper. I de tilfellene hvor spredningen er på det laveste, så er standardavviket på rundt 3 til 6 dB. I noen tilfeller er spredningen en del høyere, med et standardavvik på rundt 8 dB. I sistnevnte tilfelle kan det se ut til at fordelingene av nivåene er multimodale og dermed strengt tatt ikke normalfordelte.

For om mulig å redusere beregningstiden, hadde det vært interessant å undersøke virkningen av å redusere antall meteorologiske klasser for Nord2000 til fire og eventuelt to, med tilpassede fordelinger. I sistnevnte tilfelle, med to klasser ville det også være mulig å sammenligne med CNOSSOS_EU, som benytter to klasser (nøytrale og gunstige forhold).

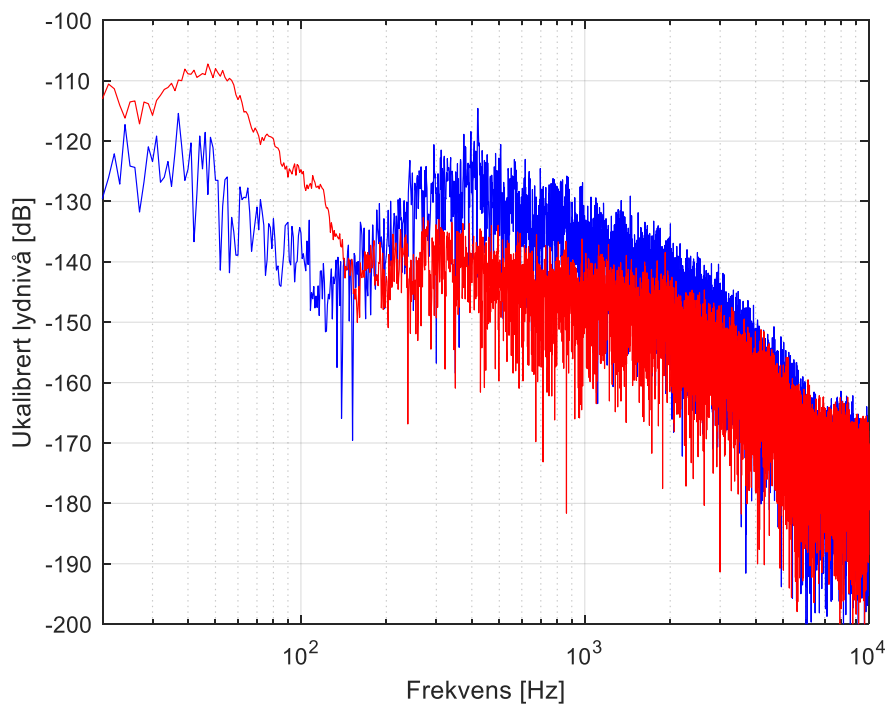
Referanser

- [1] G. B. Jónsson, F. Jacobsen, A comparison of two models for outdoor sound propagation: Harmonoise and Nord2000. In Proceedings of 19th International Congress on Acoustics 2007.
- [2] M. P. C. Gonzalez, Comparison of impulse noise measurements and calculations by noise prediction methods: ISO 6913-2, NMPB 2008, Nord2000 and Harmonoise. Masteroppgave, NTNU, 2017.
- [3] E. Salomons, Computational Atmospheric Acoustics. Springer Science & Business Media, 2012.
- [4] D. Heimann, E. M. Salomons, Testing meteorological classifications for the prediction of long-term average sound levels. Applied Acoustics 65 (2004) 925–950.
- [5] K. J. Marsh, The CONCAWE model for calculating the propagation of noise from open-air industrial plants. Applied Acoustics 15 (1982) 411–428.
- [6] J. Defrance, E. Salomons, I. Noordhoek, D. Heimann, B. Plovsing, G. Watts, H. Jonasson, X. T. Zhang, E. Premat, I. Schmich, F. Aballea, M. Baulac, F. de Roo, Outdoor sound propagation reference model developed in the European Harmonoise project. Acta Acustica United with Acustica 93 (2007) 213–227.
- [7] R. Eurasto, Nord2000 for road traffic noise prediction. Weather classes and statistics, VTT Research Report No. VTT-R-02530-06, Esbo 2006.
- [8] J. Wunderli, R. Pieren, K. Heutschi, The Swiss shooting sound calculation model sonARMS. Noise Control Engineering Journal. 60 (2012) 224–235.
- [9] S. Kephelopoulos, M. Paviotti, F. Anfosso-Lédée, Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS-EU), Joint Research Centre Report EUR 25379 EN 2012.
- [10] B. Plovsing, Noise Mapping by Use of Nord2000, Reduction of Number of Meteo-classes from Nine to Four. Technical Report 18, DELTA Danish Electronics Light & Acoustics, 2007.
- [11] G. Taraldsen, H.O. Hygen, Meteorology and noise emission from road vehicles. SINTEF 90-NO050193, 2005.
- [12] P. Maijala, A measurement-based statistical model to evaluate uncertainty in long-range noise assessments. VTT Science; 48, 2014.
- [13] Ø. Valdem, L. Nordin, H. Olsen, Variasjon i lydnivå på lange avstander, Forsvarsbygg Rapport 200/2018/Miljø, 2018.
- [14] Norsk Klimaservicesenter. Observasjoner og værstatistikk. Tilgjengelig på: <https://seklima.met.no/observations/>
- [15] Kartverket. Digital terrengmodell 10 m UTM 33. Tilgjengelig på: <https://kartkatalog.geonorge.no/>
- [16] Statens vegvesen, Brukerveileder Nord2000 Road Norsk oversetting og implementering i NorStøy Nr. V717 i Statens vegvesens håndbokserie, ISBN 9788272076381.

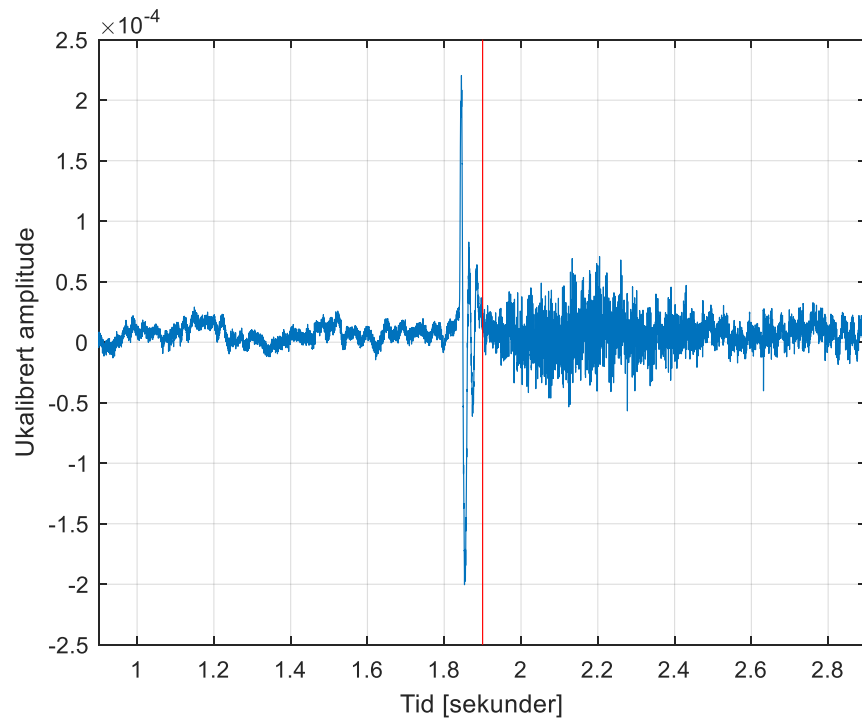
Vedlegg 1 – Resultater for måler Alfa i serie 4



Figur 8: Målte (mørkeblå) og simulerte (lyseblå) lydspekter for måler Alfa i serie 4.



Figur 9: Ukalibrert råspekter som viser reflektert lyd (blå) og direktelyd (rød).



Figur 10: Tidsutsnitt som viser direktelyd og reflektert lyd.



Teknologi for et bedre samfunn

www.sintef.no