

Måling av ST på scenen i konsertsaler

Studie av supportparameterne
måleusikkerhet

Christopher Andre Gehe

Master i elektronikk

Innlevert: juni 2013

Hovedveileder: Ulf R Kristiansen, IET

Medveileder: Bård Støfringsdal, Cowi

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for elektronikk og telekommunikasjon

Oppgavetekst

Den romakustiske ST ("Support") parameteren er et relativt energibasert mål på tidlig energi på scenen i et auditorium. En måling av referansenivået gjøres fra de første 10 ms av impulsresponsen og dette valget gjør ST-parameteren følsom for interferenseffekter.

I prosjektet skal det studeres hvor viktig nøyaktigheten er i referansemålingen for måling av ST og hvordan denne varierer over en scene. Innflytelse av avstand kilde-mikrofon, avstand til gulv og andre reflekterende overflater skal studeres. Både datamaskinsimuleringer og målinger kan brukes for disse studiene.

Oppgaven gitt: 21. Januar 2013
Hovedveileder: Ulf R. Kristiansen, IET

Sammendrag

I denne rapporten er det undersøkt om referansenivået til de sceneakustiske supportparameterne fører til måleusikkerhet. Supportparameterne blir målt med en høyttaler- og mikrofonavstand på 1 meter og de første 10 ms av impulsresponsen, som også inkluderer en gulvrefleksjon, blir benyttet som referanse. Supportparameterne er derfor følsomme for variasjoner i måleoppsettet, høyttalerens direktivitet og nærliggende flater.

Undersøkelsen omfatter endringene i referansenivået som følge av endringer i avstanden mellom og høydene til høyttaleren og mikrofonen, samt hvordan målinger nær scenepodier kan resultere i usikkerhet. Det blir undersøkt hvor stor endringen er i referansenivået ved å måle i konsertsalen Olavshallen i Trondheim ved bruk av to ulike målemetoder og hvor stor endring som kan forventes hvis målingene blir utført med forsiktighet. Det blir ikke undersøkt spesifikt hvilke avvik høyttalerens direktivitet fører til som følge av høyttalerens orientering, men det blir diskutert.

Den estimerte variasjonen til referansenivået er på mellom 0,1 dB og 0,2 dB på en scene med scenepodier hvis målingene nær scenepodiene blir utført med høyttaleren og mikrofonen på samme podium. Målinger som blir utført med høyttaleren og mikrofonen på ulike scenepodier fører til betydelig avvik sammenlignet med målinger på et flatt gulv. Målinger med en høyttaler- og mikrofonhøyde på 1,5 meter i stedet for 1 meter vil resultere i omtrent 1 dB forskjell i referansenivået. Avstanden mellom høyttaleren og mikrofonen er beregnet basert på målinger til å variere med 1 cm som videre vil føre til en variasjon i referansenivået på 0,1 dB.

Faktorene som fører til usikkerhet i referansenivået er måling med høyttaleren og mikrofonen på ulike scenepodier og måling med forskjellige høyttaler- og mikrofonhøyder. Ulike orienteringer av høyttaleren kan føre til store forskjeller i referansenivået. ST_{Late} er mer følsom for endringer i referansenivået enn ST_{Early} . Det er usikkert hvor nøyaktig målingene av referansenivået må være fordi det ikke er kjent hvor liten endring i supportparameterne som er hørbart.

Målinger nær scenepodier må gjøres med høyttaler og mikrofon på samme podium og kanskje parallelt med scenepodiet. Det anbefales å være nøyaktig med plassering av høyttaleren og mikrofonen slik at avstanden mellom de ikke avviker mer enn 1-2 cm fra 1 meter. Høydene til høyttaleren og mikrofonen burde være den samme og ikke avvike mer enn 1-2 cm fra 1 eller 1,5 meter. Det anbefales også at høydene til og avstanden mellom høyttaleren og mikrofonen blir dokumentert, samt hvor både høyttaleren og mikrofonen plasseres. Orienteringen av høyttaleren relativt til mikrofonen burde også beskrives.

Summary

In this report, there is investigated whether the reference level of the stage acoustic support parameters leads to measurement uncertainty. The support parameters are measured with a loudspeaker and microphone distance of 1 meter where the first 10 ms of the impulse response are used as a reference, which also includes a floor reflection. The support parameters are therefore sensitive to variations in the measurement setup, the loudspeaker directivity and nearby surfaces.

Changes in the reference level due to changes in the distance between the loudspeaker and microphone is studied, as well as the resulting uncertainty when measuring close to stage risers. It is investigated how much the reference level varies by measuring on stage in the concert hall Olavshallen in Trondheim by using two measurement methods and what the expected variation of the reference level is when measuring with care. The resulting deviation from different orientations of the loudspeaker because of the loudspeakers directivity is not specifically studied, but it is discussed.

The reference level has an estimated variation between 0.1 dB and 0.2 dB at a concert hall stage if the measurements close to the stage risers are performed with the loudspeaker and microphone placed on the same stage riser. There are significant deviations in the reference level if the measurements are performed with the loudspeaker and microphone placed on different stage risers. Measurements using a loudspeaker and microphone height of 1.5 meter instead of 1 meter will result in a difference in the reference level of 1 dB. The distance between the loudspeaker and the microphone is calculated from the measurements to vary by 1 cm, which will cause a variation in the reference level by 0.1 dB.

Uncertainties in the reference level is mainly due to measurements being performed with different loudspeaker and microphone heights and placement of the loudspeaker and microphone on different stage risers. Different orientations of the loudspeaker can lead to large differences in the reference level. ST_{Late} is more sensitive to changes in the reference level than ST_{Early} . The required accuracy in the reference level is uncertain because it is not known how small changes in the stage support parameters that are audible.

Measurements being performed close to stage risers must be done with the loudspeaker and microphone on the same stage riser and maybe parallel to the stage riser. It is recommended to be accurate with the placements of the loudspeaker and microphone so that the distance between them does not deviate more than 1-2 cm from 1 meter. The height of the loudspeaker and microphone

should be the same and not deviate more than 1-2 cm from either 1 or 1.5 meter. It is also recommended that both the heights of and the distance between the loudspeaker and microphone is documented, as well as the placement of both the microphone and the loudspeaker. The orientation of the loudspeaker relative to the microphone should also be described.

Forord

Denne rapporten er et resultat av masteroppgave i akustikk ved Institutt for elektronikk og telekommunikasjon ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet

Jeg vil takke alle som har vært behjelpelige i arbeidet med oppgaven. Spesiell takk går til veileder Bård Støfringsdal i Cowi for faglig støtte og god veiledning, Rune Sørgaard i Trondheim Symfoniorkester for hjelp og muligheten til å måle i Olavshallen. En stor takk til de som jobbet på kvelden slik at målingene i Olavshallen ble mulig. En takk rettes også til Professor Ulf Kristiansen, Professor Peter Svensson, Jens Jørgen Dammerud, Anders Gade og avdelingsingeniør Tim Cato Netland ved akustikk hos NTNU. Jeg vil også takke Magnus A. Johnsen for assistanse under målingene i Olavshallen.

Fredag 14. Juni 2013
Christopher Andre Gehe

Innhold

1	Innledning og bakgrunnsmateriale	1
1.1	Bakgrunn	1
1.2	Formål	2
1.3	Teori	2
1.4	Tidligere arbeid	3
2	Akustiske forhold i et symfoniorkester	5
2.1	Sceneakustiske parametere	6
2.2	Subjektive undersøkelser av objektive parametere	7
3	Beskrivelse av målinger og beregninger	9
3.1	Målinger i Olavshallen	9
3.1.1	Målemetode og måleoppsett	9
3.1.2	Beskrivelse av scenen i Olavshallen	12
3.2	Måling nær et scenepodium	12
3.3	Undersøkelse av ulike måleoppsett	13
4	Resultater og diskusjon	15
4.1	Målinger i Olavshallen	15
4.1.1	Referansenivået	15
4.1.2	Tidlig support, ST_{Early}	20
4.1.3	Sen support, ST_{Late}	22
4.1.4	Usikkerhet i avstanden mellom høyttaler og mikrofon	24
4.2	Referansenivået ved måling nær et scenepodium	24
4.3	Måleoppsettets innvirkning på referansenivået	26
4.3.1	Sammenligning med måling i Olavshallen	29
4.4	Avsluttende diskusjon	31
5	Konklusjon	35
	Anbefalinger	36
	Videre arbeid	36

Bibliografi	37
Vedlegg	39
A Oversiktsbilde, måling nær et scenepodie	39
B Utstyr	41
C Avstander mellom høyttaler og mikrofon	43
D Måleoppsettets innvirkning	45
E Norsonic NOR276 direktivitet	47
F Matlabkode: Beregninger	49
G Matlabkode: Simulering av gulvrefleksjon	53
H Måleresultater	59
I Kartlegging av risikofylt aktivitet og risikovurdering	65

Kapittel 1

Innledning og bakgrunnsmateriale

I kapittel 1 blir det beskrevet bakgrunnen for og formålet med dette arbeidet. Videre blir den nødvendige teorien og det tidligere arbeidet om temaet utført av andre beskrevet. Til sammen danner dette grunnlaget for valgene som er tatt i arbeidet med denne oppgaven. I kapittel 2 blir det beskrevet og diskutert noen problemstillinger vi står overfor i søken etter objektive parametere som beskriver akustikken i et symfoniorkester. I kapittel 3 blir det beskrevet hvordan målingene og beregningene er gjennomført. I kapittel 4 blir resultatene fra målingene og beregningene vist og diskutert. Konklusjonen fra arbeidet, anbefalinger ved måling av supportparametere og forslag til videre arbeid finnes i kapittel 5.

1.1 Bakgrunn

Forholdene til musikere på en scene er vanskelig å beskrive ved objektive mål. Et forsøk på å beskrive den subjektive oppfatningen av SUPPORT¹ ved en objektiv, målbar parameter ble gjort av Anders C. Gade [1, 2] med parameterne ST (Support). Supportparametere, ST_{Early} og ST_{Late} , er relative og energibaserte mål for henholdsvis musikernes evne til å høre hverandre og opplevd etterklang. Felt- og laboratorieeksperimenter viste god korrelasjon med den subjektive oppfatningen av hvor lett det er å høre hverandre og en selv. Jens Jørgen Dammerud [3] har ikke sett sterk korrelasjon mellom ST_{Early} og subjektive undersøkelser, og nevner andre med liknende funn. Han rapporterer lav pålitelighet fra denne parameteren på grunn av at variasjonen ved små endringer av måleavstand er i samme størrelsesorden som ved store endringer av scenerommet. Direktiviteten til høyttaleren kan også være en årsak til usikkerhet ved måling på scener med podieoppbygning for orkesteret til tross for nøyaktig orientering og plassering

av høyttaler og mikrofon.

1.2 Formål

Formålet med dette arbeidet er å se på hvor viktig nøyaktighet i referansen til supportparametrene er og hvordan denne kan variere. Det skal undersøkes om målingene er sammenlignbare hvis uavhengige målinger blir gjort med avvik fra anbefalingene gitt av Anders C. Gade [4], nærmere bestemt hvilken innvirkning endring av avstanden høyttaler-mikrofon, høyttaler-gulv og mikrofon-gulv har. Det skal også undersøkes om sceneplattformer tilfører betydelig usikkerhet for supportparametrene, ved blant annet å se på orienteringen av høyttaler-mikrofon relativt til scenen.

1.3 Teori

De objektive parameterne ST_{Early} og ST_{Late} ble foreslått av Gade [1, 2] for å måle samspill på en scene. Han har også foreslått ST_{Total} , men den blir ikke undersøkt her. ST_{Early} er et mål for evnen en musiker har til å høre andre musikere på scenen, og er definert som

$$ST_{\text{Early}} = 10 \log \left[\frac{\int_0^{100} p^2(t) dt}{\int_0^{10} p^2(t) dt} \right] \text{ dB} = L_{p,20-100} - L_{p,0-10} \quad (1.1)$$

hvor $p(t)$ er målt lydtrykk med en omnidireksjonell mikrofon ved tiden t ved bruk av en omnidireksjonell høyttaler som kilde. Tidspunktet når direktelyden når målepunktet er definert som $t = 0$. Integrasjonsgrensene er gitt i millisekunder. Den optimale verdien til ST_{Early} for et symfoniorkester er mellom -13 dB og -11 dB [4]. Referansenivået $\int_0^{10} p^2(t) dt$ blir brukt som en kalibreringsverdi, og inkluderer gulvrefleksjonen.

Oppløvd etterklang og respons fra salen for musikerne kan måles med ST_{Late} og er definert som

$$ST_{\text{Late}} = 10 \log \left[\frac{\int_0^{1000} p^2(t) dt}{\int_0^{100} p^2(t) dt} \right] \text{ dB} = L_{p,100-1000} - L_{p,0-100} \quad (1.2)$$

¹”SUPPORT is the property which makes the musician feel that he can hear himself and that it is not necessary to force the instrument to develop the tone.”[1]

Anbefalinger angående målemetode ble senere gitt av Gade [4] og kan sammenfattes ved følgende:

- Avstanden mellom høyttaler og mikrofon¹ skal være 1 meter
- Høyden til høyttaler og mikrofon² skal være 1 meter
- Det skal måles med stoler, notestativ eller liknende på scenen, men de skal ikke være nærmere enn 2 meter fra høyttaler og mikrofon²
- Vegger og tak, samt andre reflekterende flater av interesse skal være minst 4 meter fra høyttaler og mikrofon²
- Det skal måles ved tre posisjoner [2]:
 - Typisk solistposisjon
 - Midt på høyre side, mellom bratsj og cello
 - Helt til venstre på andre rad av treblås
- Hvis høyttaleren ikke er tilstrekkelig omnidireksjonell i enkelte oktavbånd, må de målte ST-verdiene korrigeres

Resultatet skal beregnes som en aritmetisk middelværdi av de fire oktavbåndene fra 250 Hz til 2 kHz og videre midlet over alle målepunkt.

I en ny artikkel fra Gade [5] anbefales det bruk av minst 5 målinger og han gir forslag til 6 posisjoner som han selv benytter.

1.4 Tidligere arbeid

Et forsøk gjennomført av Elisabeth van den Braak et al. [6] viser forbedret og økt ST ved senking av scenepodienes høyde bak på scenen. Økningen av ST, nærmere den optimale verdien foreslått av Gade [2], bak på scenen oppfatter musikerne som en forbedring av sceneakustikken i dette området.

Jeon og Barron [7] har sett liten endring av ST ved endring av takhøyde. Jens Jørgen Dammerud [3] viser også til det samme, scener med signifikante arkitektoniske forskjeller viser minimale forskjeller i ST. Store variasjoner i ST på en scene er også vist av Jeon og Barron [7].

Målinger gjort av Jeon og Barron [7] viser en gjennomsnittlig økning av ST_{Early} på 2,3 dB ved måling med musikermodeller på scenen. O'Keefe [8] derimot så svært liten endring av ST (2-3 %) i sine innledende undersøkelser med og uten musikere. I likhet med Dammerud [3] ble det målt 0,5 dB reduksjon av ST med stoler og notestativ på scenen.

Videre forsøk av Gade [4] viser god reproduserbarhet av målt gjennomsnittlig ST i tre saler ved to ulike tidspunkt. Målingene viser også stor variasjon

¹Avstander er fra akustisk senter til akustisk senter

²Avstander er fra akustisk senter til objekt av interesse

mellom målepunkt. Variasjon på 30 cm fra opprinnelig målepunkt gav et avvik på omtrent 1 dB.

Forventet variasjonsområde for ST_{Early} er -24 dB til -8 dB og for ST_{Late} mellom -24 dB og -10 dB [9]. En endring på 1 dB er derfor ikke ansett som stor for ST parameterne.

Målemetoder fra tidligere forsøk samsvarer ikke godt med hverandre. Parametergruppen ST foreslått av Gade er i dag tatt med som vedlegg i ISO 3382-1 [9]. Standarden baserer seg ene og alene på arbeidet utført av Gade [4], men beskrivelsen av målemetode samsvarer ikke entydig med anbefalingene gitt av Gade [4].

Ifølge standarden skal reflekterende overflater eller objekter være minst 2 meter fra måleposisjon, mens ifølge Gade [4] skal det være minst 2 meter til notestativer og stoler, samt minst 4 meter til vegger, tak og reflekterende flater av interesse fra både høyttaler og mikrofon. Denne forskjellen kan være årsaken til at ulike metoder blir brukt. I følge Jeon og Barron [7] er det fordi overflater innenfor 4 meter kan skjerme lyd, som ellers ikke ville nådd overflaten lengre bort. Jeon, Barron [7] og Wenmaekers et al. [10] mener det er for å forhindre at reflektert lyd skal nå mikrofonen mellom 10 og 20 ms. Målinger utført av John O'Keefe [8], van den Braak et al. [6], Renz van Luxemburg et al. [11] samt Weihwa Chiang og Yan-kuan Shu [12] nevner ikke hva slags avstander de har forholdt seg til. Forsøk utført av Malin Cederlöf [13] beskriver ikke hvilke krav som følges, men det kan se ut til å være i henhold til ISO 3382-1 [9].

Høyden til mikrofon og høyttaler skal ifølge ISO 3382-1 [9] være 1 eller 1,5 meter, mens Gade [4] anbefaler 1 meter. Høyden skal representere det som er normalt for hode og instrument. Dette er trolig årsaken til bruken av ulike høyder. Dammerud [3] og Wenmaekers et al. [10] benytter 1 meters høyde. O'Keefe [8] målte ved 1,1 meter, mens Jeon og Barron [7] samt Cederlöf [13] målte ved 1,2 meter. Luxemburg et al. [11] benyttet 1,3 meter for høyttaler, men nevner ikke for mikrofon. Chiang og Shu [12] samt van den Braak et al. [6] nevner ikke hvilken høyde som er benyttet.

Avstanden mellom mikrofon og høyttaler skal ifølge ISO 3382-1 [9] og Gade [4] være 1 meter. Samtlige forsøk nevnt over har benyttet 1 meter, mens O'Keefe [8] har hovedsakelig målt ved 0.5 meters avstand og ved noen tilfeller også 1 meter.

Wenmaekers et al. [10] påpeker manglende føring og beskrivelse av plassering og orientering av mikrofon og høyttaler i forhold til hverandre og dirigent i andre eksperiment. De anbefaler å plassere høyttaleren mellom mikrofon og dirigent, slik at en kan trekke en rett linje mellom alle tre for å representere instrumentet og musikers øre, som er vendt mot dirigenten. Anders Gade nevner aldri hvordan høyttaler og mikrofon skal plassere i forhold til hverandre. Dammerud [3] benytter samme plassering av mikrofon relativt til høyttaler i alle målingene, der mikrofonen plasseres til høyre for høyttaleren sett fra scenen mot publikum.

Kapittel 2

Akustiske forhold i et symfoniorkester

For å beskrive akustikken på en scene benyttes det per idag mange ulike mål, noen mer enn andre. Forsøkene på å beskrive en scene og undersøke hva som gjør en scene god har vært mange, men dessverre viser ikke forsøkene til enydige resultater. De objektive målene som er foreslått gjennom tidene baserer seg hovedsakelig på forholdet mellom lydenergi, gjennomsnitt av oktavbånd og romlige gjennomsnitt, en meget forenklet modell av det som skal beskrives. Forsøket på å beskrive noe så komplekst som samspillet mellom musikere i et symfoniorkester ved så forenklete mål ser ikke ut til å ha ført frem. På den andre siden vil et stort nok antall forenklete, uavhengige mål til sammen kunne gi en god beskrivelse. Målene samsvarer sjelden med den subjektive oppfattelsen en musiker har av akustikken etter gjentakende uavhengige undersøkelser. Hva skyldes dette? Er det for stor variasjon mellom musikernes preferanser, problematisk kommunikasjon eller rett og slett ikkebeskrivende parametre? Dammerud [3] påpeker at svarene fra musikerne på undersøkelser avhenger av både instrumentet de spiller og deres personlige preferanser avhengig av hvilket akustisk aspekt det etterspørres. Musikerne i undersøkelsen til Dammerud [3] har også problemer med å beskrive hvordan akustikken eller scenedesignet påvirker dem. Forskjeller mellom saler er lett å påpeke, men å definere eller påpeke årsaken er vanskelig. For å beskrive den subjektive følelsen av å spille i et symfoniorkester ved objektive mål står vi overfor store utfordringer. Det kan virke nødvendig å endre måten vi angriper problemene på, ved for eksempel å søke kunnskap og erfaring fra liknende fagområder. Hvorfor er svaret på enhver akustisk parameter en enkelt tallverdi? Når store datamengder skal analyseres innenfor andre fagområder benyttes det gjerne mer visuelle former for representasjon av informasjon.

2.1 Sceneakustiske parametere

Anders Gade [1, 2] foreslo parametrene ST og EEL (Early Ensemble Level), hvor ST ble anbefalt på bakgrunn av god korrelasjon med de subjektive testene han gjennomførte. Selv om det er over 20 år siden parameteren ble anbefalt har det ikke blitt undersøkt hvorvidt tidsgrensene for ST er optimale. Ifølge Dammerud [3] og Wenmaekers et al. [10] er valget av integrasjonsgrensene et direkte resultat av målemetoden som ble brukt når parameteren ble definert. ST sin relevans som en sceneakustisk parameter virker svak på grunn av svært varierende resultater i undersøkelser [14] som er blitt gjort i den senere tid. Om dette kan skyldes målemetoden eller parameteren som helhet gjenstår å undersøkes, men forslag om å benytte G_{20-100} er blitt diskutert. Noen av fordelene og ulempene er nevnt av Gade [14]. En av fordelene er muligheten til å måle ved avstander mellom mikrofon og høyttaler på mer enn 1 meter. Teoretisk sett skal ST representere den mottatte lydenergien fra rommet relativt til den fra ens eget instrument direkte [3], derav den korte avstanden. Som vist av Dammerud [3] vil G_{20-100} være sammenlignbar med ST i forhold til de ønskede verdiene Gade [4] fant. Det er klart at G målt ved avstander større enn 1 meter ikke vil tilsvare ST, men vil i større grad være et objektivt mål for hvor godt en hører andre. G er et mål som er sterkt avhengig av avstanden det måles på og et romlig snitt vil derfor ikke være beskrivende for situasjonen på scenen, ulike måleavstander blir benyttet. Det vil derfor være nødvendig og se på spesifikke situasjoner, som for eksempel hvor mye energi som blir sendt fra fiolin- til cellogruppen i forhold til den fra perkusjon til cellogruppen. I slike undersøkelser må også de individuelle lydnivåene til instrumentene tas i betraktning. Det finnes altså ingen enkle mål for lydnivået mellom musikere, et symfoniorkester er for komplekst.

Dammerud [3] foreslår parametere basert på romlige dimensjoner av scenen. De analytiske undersøkelsene han gjorde med ekkogram viser hvordan refleksjoner fra bakre del av scenen kan nå frem til en musiker fremme på scenen før direktelyden fra en medspiller på siden av scenen når frem. Han viser også hvordan den første refleksjonen til en musiker på enden av scenen fra en musiker på den andre siden kan komme kort tid etter direktelyden, men med et markant høyere nivå. Dette kan i noen tilfeller føre til at en havner utenfor Haas effekten [15], som vil si at oppfattet kildeposisjon for lydilden blir flyttet, som i Dammeruds eksempel vil si på feil side av scenen. Problemstillingen er hovedsakelig rettet mot strykere, som svært ofte er fordelt lengst frem over hele scenens bredde. Ved nøye definering av arkitektoniske parametere vil temporal og nivåmessig maskering kunne reduseres. For eksempel nevner Dammerud vinkling av sidevegger bak på scenen og høyt nok tak som viktig for å bidra til å redusere nivået fra messingblås til strykerne, hvor messinginstrumentenes direktivitet gjør dette mulig uten å redusere kommunikasjonen betydelig fra strykere til messingblås. Parametere som RR_{160} , LQ_{7-40} , EB, EMDT [3] og EDTF [2], er eksempler på foreslåtte parametere, men som det ikke har blitt undersøkt gyldigheten for.

2.2 Subjektive undersøkelser av objektive parametre

Omtrent alle objektive parametre er verifisert eller antatt gjeldende på bakgrunn av subjektive undersøkelser. Slike undersøkelser har lett for å være feilaktige eller misvisende av en rekke grunner, som for eksempel Dammerud [3] påpeker. Musikerne inkludert i undersøkelsen burde spille regelmessig i de aktuelle salene, men deres hovedsal skal være ekskludert. Saler som musikerne kun har besøkt ved en sjelden anledning skal også være ekskludert. Ifølge Dammerud kan tilpasning til sin egen sal redusere gyldigheten av undersøkelsen hvis denne salen tas med. Problemet en ofte står overfor er partenes, akustikere og musikers, manglende evne til å kommunisere med hverandre når slike undersøkelser gjennomføres [3].

Som et avsluttende spørsmål som forfatter ikke har et svar på, vet vi mindre nå enn vi trodde vi gjorde før? Ettersom tiden går og teorier ikke blir entydig motbevist og samtidig mer benyttet, kan troen på at disse teoriene faktisk stemmer øke. Innføring av parametre i standarder og andre troverdige informasjonskilder øker kjennskapen, men kan også redusere personers kritiske syn på de. Dette er blitt påpekt av Dammerud [3]:

”Acousticians are normally trained in natural sciences, while musicians have a musical education which includes very little that is related to natural sciences. There may therefore be a risk of studies carried out by acousticians having a focus on the physical aspects while paying less attention to other less easily quantifiable aspects. With such a positivistic approach there could be an overly optimistic belief in the importance of the quantifiable aspects.”

Kapittel 3

Beskrivelse av målinger og beregninger

I dette kapittelet er det beskrevet metode og oppsett for målingene av ST som ble gjort i konsertsalen Olavshallen i Trondheim, samt en undersøkelse av et scenepodium sin effekt på referansenivået til ST. En teoretisk undersøkelse av måleoppsettets innvirkning på referansenivået til ST er også beskrevet.

Det ble ikke målt temperatur på scenen i Olavshallen og ved eventuell bruk av lyd hastighet antas det en temperatur på 20 °C og følgelig en lyd hastighet på 343 m/s [16]. Alle målinger og beregninger er gjort med en samplingfrekvens på 48 kHz og 16 bit/sampel. Beregningene av oktavbåndsverdiene til supportparameterne og referansenivåene benytter Matlabkodene vist i vedlegg F. Alle målingene ble gjort med samme orientering av høyttaleren relativt til mikrofonen, som vil si at høyttalerens håndtak alltid pekte mot mikrofonen.

3.1 Målinger i Olavshallen

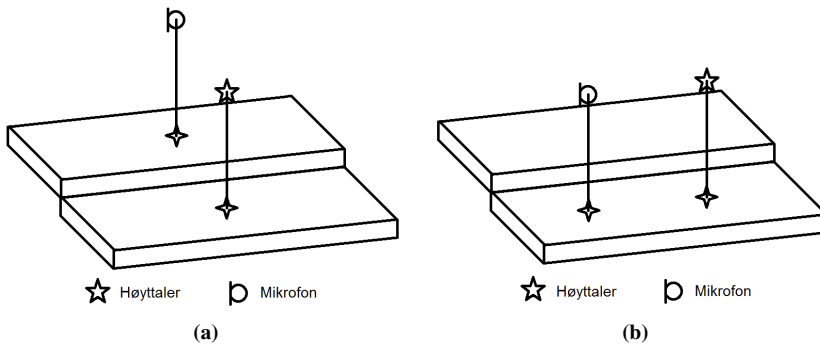
3.1.1 Målemetode og måleoppsett

Målingene i Olavshallen ble gjort for å undersøke variasjonen til ST-parameterne og deres referanse. Olavshallen ble benyttet som målested fordi dette vil gi resultatene et realistisk ståsted.

Målingene ble gjennomført i henhold til Norsk Standard ISO 3382-1:2009 [9] der det var relevant eller mulig, avvik fra standarden blir eksplisitt bemerket. For å måle rommets impulsrespons ble det benyttet WinMLS 2004 med sinussveip eksitert av en Norsonic kulehøyttaler, NOR 276. Resten av utstyret som ble benyttet til målingene er gitt i tabell B.1.

Det ble benyttet 3 hovedgrupper som måleposisjoner, som beskrevet i kapittel 1.3, med 5 høyttalerposisjoner i hver hovedgruppe. For hver høyttaler-

posisjon var det 2 mikrofonposisjoner, en i henhold til Wenmaekers et al. sine anbefalinger [10] beskrevet i kapittel 1.4 og en for å redusere refleksjoner fra scenepodier og for å forhindre ikkespekulære refleksjoner.



Figur 3.1: Ulike målemetoder, (a) Metode 1, og (b) Metode 2

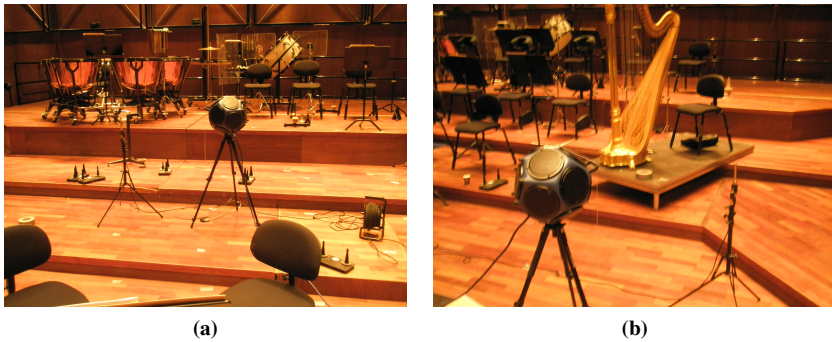
Figur 3.1a skisserer typisk orientering av høyttaler og mikrofon i henhold til Wenmaekers et al. [10] ved måling nær et scenepodium. Generelt vil høyttaler-, mikrofon- og dirigentposisjon danne en rett linje med høyttaler som midterste objekt. Dette blir videre omtalt som metode 1. Selv om plassering av høyttaler og mikrofon på ulike trinn strider imot anbefalinger gitt av Gade [17], vil det vise mulige forskjeller i måleresultatene. Figur 3.1b skisserer typisk orientering for å redusere avvik på grunn av ikkespekulære refleksjoner fra scenepodier. Denne metoden forhindrer plassering av høyttaler og mikrofon på ulike scenepodier som anbefalt av Gade [17]. Denne metoden blir videre omtalt som metode 2.

Målingene ble utført med notestativer og stoler på scenen uten musikere til stede. Stoler og notestativer nærmere enn 2 meter fra høyttaler og mikrofon ble tatt av scenen. Det var ingen reflekterende overflater nærmere enn 4 meter fra høyttaler og mikrofon, med unntak av scenepodier som i dette tilfellet er av interesse, samt noe perkusjon og en harpe som blir beskrevet senere. Hver måling ble gjort med 1 meters avstand mellom mikrofon og høyttaler. Høyden til mikrofonen og høyttaleren var 1 meter over gulvet og høyttalerens rotasjon ble holdt konstant relativt til mikrofonen for å redusere usikkerheten i målingene på grunn av høyttalerens direktivitet.

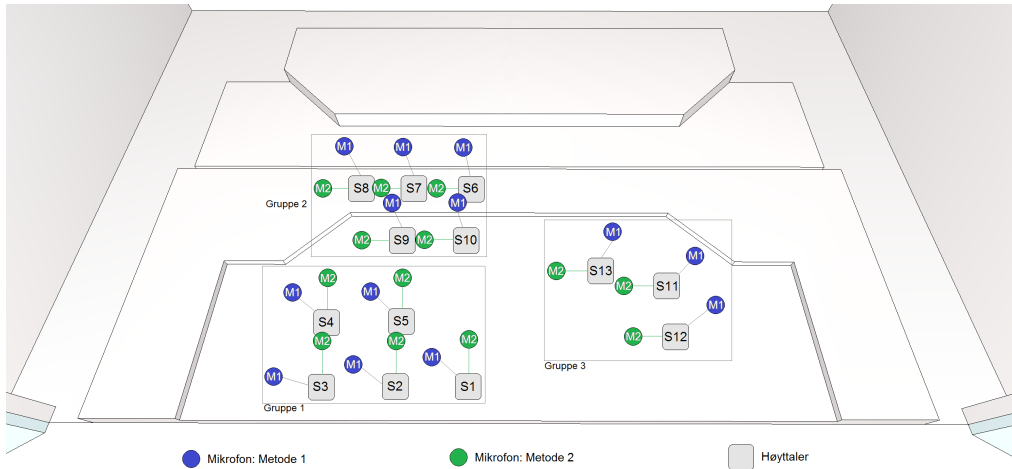
Bruken av 2 mikrofonposisjoner per høyttalerposisjon ble gjort for å undersøke de ulike resultatene ved bruk av metode 1 og metode 2. For å undersøke variasjonen til ST rundt de anbefalte måleposisjonene gitt av Gade [2] ble det benyttet 5 høyttalerposisjoner per anbefalt måleposisjon med omtrent 1 meters avstand. Totalt vil alle målingene gi et forventet estimat av variasjonen på en scene.

Fra figur 3.3 kan en se at høyttaler- og mikrofonposisjonene i gruppe 2 vil være mest utsatt for ekstra refleksjonsbidrag på grunn av nærhet til scenepo-

dier. I gruppe 2 med metode 1 vil den spekulære gulvrefleksjonen kunne være fraværende på grunn av måling på tvers av ulike scenepodier. For målingene i gruppe 2 og i gruppe 3 vil diffraksjon kunne føre til ekstra refleksjonsbidrag på grunn av scenepodiene. I gruppe 3 er det kun 3 høyttalerposisjoner på grunn av begrenset tidsrom med tilgang til konsertsalen. Nærhet til perkusjon og harpe, som vist i figur 3.2 kan bidra til usikkerhet i målingene på grunn av ekstra refleksjoner eller skjerming av lyd som påpekt av Jeon og Barron [7]. Eksitasjon av instrumentene kan også føre til at uønsket lyd blir sendt tilbake.



Figur 3.2: Bilde av en måleposisjon med nærhet til, (a) perkusjon (måling S6M2) og (b) harpe (måling S11M1)



Figur 3.3: Høyttaler- og mikrofonposisjoner på scenen i Olavshallen, merket med henholdsvis S og M

3.1.2 Beskrivelse av scenen i Olavshallen

Storesalen i Olavshallen er en flerbruksal som kan benyttes til fremførelser av ulike slag. For utøvelse av klassisk musikk blir scenepodier og et scenekabinett benyttet på scenen for å gi musikerne bedre forhold å spille i. Takreflektorer kan justeres for å tilpasse dette ytterligere og gi musikerne mer støtte. Scenehuset og scenepodiene i Olavshallen består stort sett av kryssfiner. Scenehuset er 20,7 meter bredt og 11,9 meter dybdt. Fra starten av den kurvede scenefronten er det 15,9 meter til bakveggen. I taket er det reflektorer og høyden til taket er 9,9 meter. Høyden til reflektorene ble ikke målt. Scenepodiene har 4 ulike nivåer med høydene relativt trinnet før på 26 cm, 17 cm, 14 cm og 41 cm for henholdsvis første til fjerde trinn. Figur 3.4 viser scenen fra første balkong i salen med et annet oppsett enn det som var på scenen under målingene.

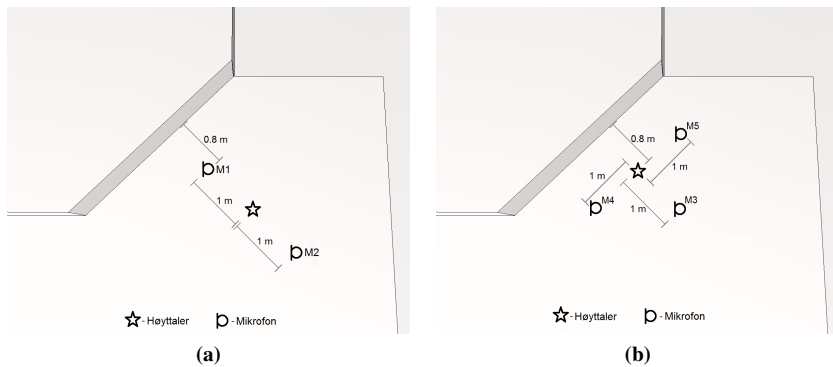


Figur 3.4: Bilde av scenen i Olavshallen med scenekabinett og scenepodium for fremføring av klassisk musikk

3.2 Måling nær et scenepodium

For å undersøke effekten av nærliggende scenepodier ble det tatt utgangspunkt i en av Olavshallens høye scenepodier. Måleposisjonene er vist i figur 3.5 og er et utsnitt av scenen, se figur A.1 for oversikt. Dette scenepodiet er 41 cm høy og i denne situasjonen vil M1, M2 og M3 ha 2 spekulære refleksjoner i tillegg til direktelyden. M4 og M5 vil kun ha 1 spekulær refleksjon. Disse målingene ble

gjort i et område på scenen som ikke ble benyttet av orkesteret, samt at målingene ble gjort ekstra nær scenepodiene som fører til at de ikke er representative posisjoner for sammenligning med de andre målingene.



Figur 3.5: Måleposisjoner for undersøkelse av scenepodier, sett ovenfra

3.3 Undersøkelse av ulike måleoppsett

Kapittelet beskriver metoden som ble benyttet for å undersøke hvilken effekt ulike måleoppsett har på referansen til ST-parameterne. Målinger som blir gjort med avvik fra målemetoden definert i kapittel 1.3 vil føre til endring av referansenivået. Denne undersøkelsen blir også gjort for å se hvordan referansenivået endrer seg i forhold til avvik i måleoppsettet. Med avvik fra ulike måleoppsett menes det avvik fra en høyttaler- og mikrofonavstand på 1 meter og høyttaler- og mikrofonhøyder på 1 meter.

For å undersøke hvordan referansenivået endrer seg med hensyn på endringer i måleoppsettet ble det sett på et relativt ideelt tilfelle. Det vil si at referansenivåene blir kalkulert basert på målinger i et ekkofritt rom i stedet for å måle referansenivået ved ulike måleoppsett. Referansenivåene blir kalkulert ved å summere impulsresponsen til direktelyden målt i ekkofritt med en ideell gulvrefleksjon basert på de samme målingene i ekkofritt. Det ble benyttet et lydtab $= 1/r$ ved alle frekvenser for gulvrefleksjonen og hvor avstanden mellom de akustiske sentrene til høyttaleren og mikrofonen ikke var 1 meter. Impulsresponsene som blir benyttet i denne undersøkelsen er fra 29 målinger i et ekkofritt rom av Norsonic NOR276¹ med 12,5° intervaller i horisontalplanet. I et ekkofritt rom vil det ikke bli reflektert lyd fra rommets vegger, tak og golv, som betyr at det kun er høyttalerens respons som blir målt. Videre ble det benyttet to metoder for å kalkulere referansenivået, en ved å anta at høyttaleren er perfekt omnidireksjonell og en hvor det antas at direktiviteten i vertikalplanet er identisk til den i horisontalplanet. En omnidireksjonell høyttaler sender ut like mye lydenergi i alle retninger. Matlabkodene for beregning av referansenivåene

i denne undersøkelsen finnes i vedlegg G. De ulike måleoppsettene som er blitt benyttet av andre i sine målinger, se kapittel 1.4, blir undersøkt og 5 cm variasjon av høyttaler- og mikrofonavstand samt inntil 5 cm høydeforskjell mellom høyttaler og mikrofon.

Undersøkelsen med en omnidireksjonell høyttaler benytter et gjennomsnitt av de 29 impulsresponsene målt i ekkofritt, mens undersøkelsen med direksjonell kilde benytter impulsresponsen ved de aktuelle vinklene. De aktuelle vinklene er utgangsvinkelen fra høyttaleren for direktelyden og gulvrefleksjonen og er beregnet ved enkel geometri. Utgangsvinkelen benyttes videre til å velge hvilken impulsrespons som skal benyttes til direktelyden og gulvrefleksjonen. Denne vinkelen vil oftest være ulik vinklene det ble målt ved i det ekkofrie rommet og det blir derfor benyttet vinkelvektet splineinterpolasjon mellom impulsresponsene med vinkler nærmest den aktuelle vinkelen. For eksempel i tilfellet med 1 meters avstand mellom og høyde for høyttaler og mikrofon vil direktelyden reise 1 meter og ha en utgangsvinkel på 0° og gulvrefleksjonen vil ha reist 2,2 meter og ha utgangsvinkel på 63° . Direktelyden vil da være impulsresponsen målt ved 1 meter og 0° , mens impulsresponsen for gulvrefleksjonen må beregnes ved interpolasjon mellom målingene ved $62,5^\circ$ og 75° fordi det ikke ble målt ved 63° . Impulsresponsen vil på grunn av vinkelvektet interpolasjon være mer lik målingen ved $62,5^\circ$ enn den ved 75° og den vil videre bli skalert med $1/2,2 = 0,45$ på grunn av gulvrefleksjonens reiselengde.

¹Norsonic NOR276 er en dodekaederformet høyttaler med 12 høyttalerelementer

Kapittel 4

Resultater og diskusjon

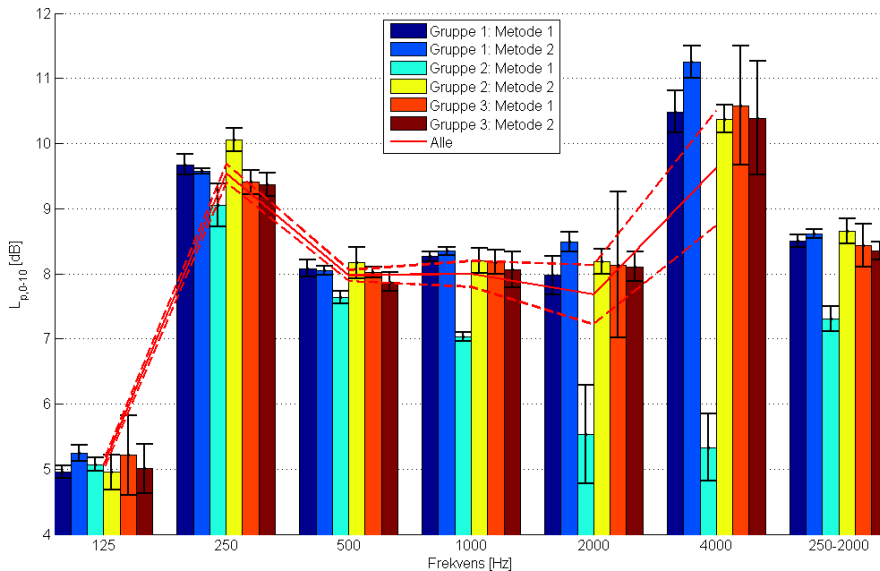
I dette kapittelet er resultatene fra målingene i Olavshallen gjengitt. Resultatene gjengitt i kapittel 4.1.1 omhandler referansenivået til ST målt i Olavshallen. Kapittel 4.1.2 og 4.1.3 viser målt tidlig og sen support, ST_{Early} og ST_{Late} . Resultatene fra målingene finnes også på tabellform i tillegg H. Usikkerheten i avstanden mellom høyttaleren og mikrofonen er gitt i kapittel 4.1.4. Resultatet fra undersøkelsen med nærhet til et scenepodium er gjengitt i kapittel 4.2. Kapittel 4.3 viser resultatene fra beregningene av referansenivået med ulike måleoppsett og i kapittel 4.3.1 er det vist en sammenligning med målingene i Olavshallen. Det er benyttet 95% konfidensintervall med student-t fordeling for estimerte gjennomsnitt og standardavvik. $L_{p,0-10}$, $L_{p,20-100}$ og $L_{p,100-1000}$ er lydtryknivå relativt til målinger i ekkofritt ved et annet lydnivå.

4.1 Målinger i Olavshallen

4.1.1 Referansenivået

Figur 4.1 viser forventet gjennomsnitt for referansenivået i oktavnå, i de ulike gruppene og med metodene beskrevet i kapittel 3.1. Forventet gjennomsnitt og standardavvik i de ulike gruppene og med de ulike metodene for gjennomsnitt av referansen $L_{p,0-10}$ over oktavnåene 250 Hz til 2 kHz er vist i figurene 4.2a og 4.2b. Tendensene til $L_{p,0-10}$ må ikke forveksles med andre mål, denne parameteren skal være en referanse og derfor være så konstant som mulig.

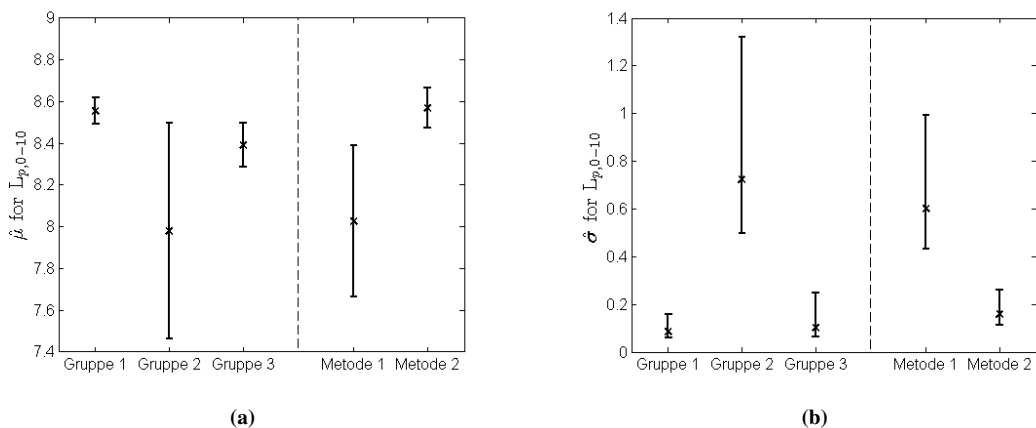
Fra figur 4.1 kan en se at referansenivået i gruppe 2 med metode 1 skiller seg signifikant fra de andre gruppene og metodene, med unntak av 250 Hz og 500 Hz oktavnåene. I 250 Hz og 500 Hz oktavnåene skiller referansenivået i gruppe 2 med metode 1 seg signifikant fra gruppe 1 med begge metodene og fra gruppe 2 med metode 1. I 500 Hz oktavnået skiller referansenivået i gruppe 2 med metode 1 seg i tillegg fra det i gruppe 3 med metode 1. I 250 Hz oktavnået er det en signifikant forskjell mellom gruppe 2 med metode



Figur 4.1: Lydtrykknivå $L_{p,0-10}$, gjennomsnitt av måleposisjoner i grupper og målemetoder, samt 95% konfidensintervall

1 og alle de andre grupperingene. I 2 kHz oktavbåndet er det en signifikant forskjell mellom gruppe 1 med metode 1 og gruppe 1 med metode 2. Totalt sett er det bare målingene med nærhet til et høyt scenepodium når høyttaleren og mikrofonen er plassert på hvert sitt lave scenepodium hvor 95% av målingene vil skille seg signifikant fra de andre.

Forskjellen i gjennomsnittlig $L_{p,0-10}$ mellom de ulike gruppene kan ikke sies å være signifikant, se figur 4.2a, men på bakgrunn av en parett-test kan en si at forskjellen mellom gruppe 1 og gruppe 2 er signifikant ($p = 0,02$). Forskjellen mellom målemetode 1 og 2 er signifikant og en kan si at 95% av målingene med metode 1 vil minst ha litt under 0,1 dB lavere referansenivå enn målinger med metode 2. Fra figur 4.2b er det tydelig at målingene i gruppe 2 vil ha betydelig høyere variasjon enn i de andre gruppene. Det er også er signifikant forskjell i variasjonen til $L_{p,0-10}$ mellom metode 1 og metode 2. Variasjonen til $L_{p,0-10}$ i gruppe 2 vil i 95% av tilfellene være minst 0,3 dB høyere enn i gruppe 1 og gruppe 3, og metode 1 vil minst ha 0,2 dB høyere variasjon enn metode 2. Variasjonen til referansenivået vil være mellom på 0,1 dB og 0,2 dB hvis målingene blir gjort på et flatt gulv med god avstand til scenepodier og andre reflekterende objekter, basert på resultatene fra gruppe 1. Ved måling på store deler av scenen, inkludert nærhet til scenepodier men med høyttaler og mikrofon på samme scenepodium, vil en kunne forvente en variasjon på mellom 0,1 dB og 0,3 dB i referansen, basert på resultatene med metode 2.

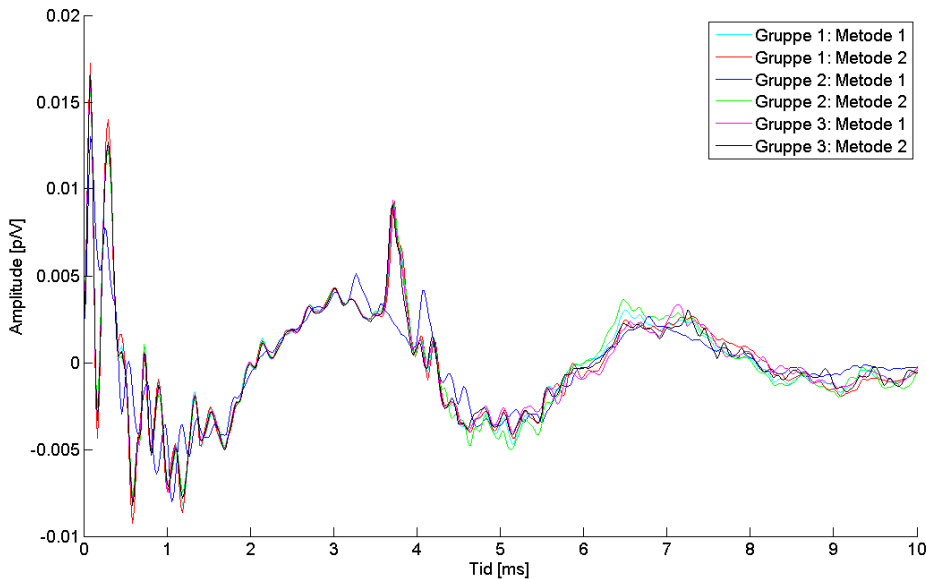


Figur 4.2: Estimert gjennomsnitt (a) og standardavvik (b) for referansens lydtryknivå, gjennomsnitt av $L_{p,0-10}$ fra 250 Hz til 2 kHz, med ulike målemetoder og i ulike grupper, samt 95% konfidensintervall

Hvis en benytter alle målingene, med unntak av de i gruppe 2 med metode 1, er den forventede variasjonen på mellom 0,1 dB og 0,2 dB. Variasjonen til referansenivået ved måling med metode 1 er på mellom 0,4 dB og 1 dB, hvor det er sannsynlig at målingene med plassering av høyttaler og mikrofon på ulike scenepodier i gruppe 2 bidrar til den økte variasjonen.

Referansen i gruppe 2 med metode 1 skiller seg signifikant fra de andre gruppene og metodene, og en undersøkelse av impulsresponsene vil gi en bedre forklaring på årsaken til dette. Det blir derfor sett på et gjennomsnitt av impulsresponsene i de ulike gruppene og med de ulike metodene, se figur 4.3. En kan se at gulvrefleksjonen ved 3,7 ms er nokså lik for gruppe 1, gruppe 3 og gruppe 2 med metode 2. I gruppe 2 med metode 1 er det derimot ingen klar gulvrefleksjon. En sammenligning av alle målingene med metode 1 og 2 i gruppe 2 rundt gulvrefleksjonen vil vise dette tydeligere, se figur 4.4.

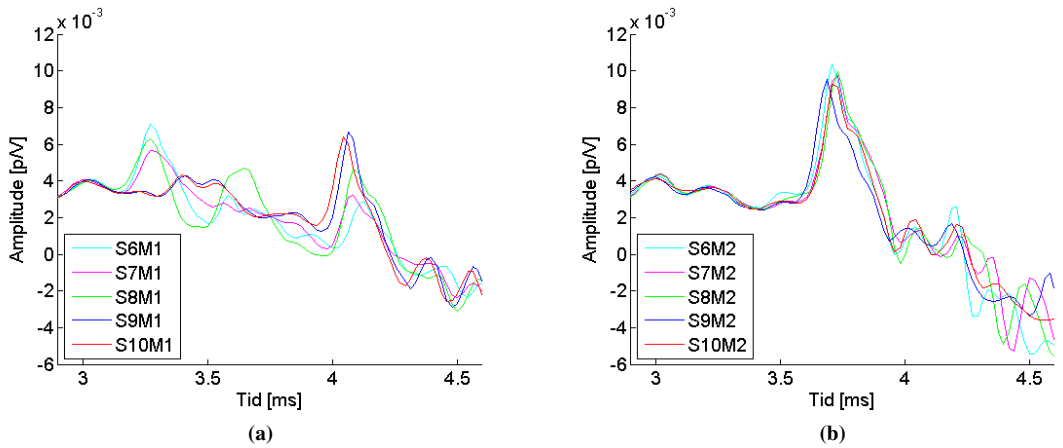
Fra figur 4.4b kan en tydelig se gulvrefleksjonen ved 3,7 ms. Denne gulvrefleksjonen er omtrent den samme i de viste målingene. I figur 4.4a er det derimot ingen tegn til en klar gulvrefleksjon rundt 3,7 ms. Det ser ut til å være refleksjoner ved 3,2 ms og 4,0 ms som tilsvarer en veilengdeforskjell på henholdsvis 1,09 og 1,36 meter relativt direktelyden. For refleksjon 3,7 ms etter direktelyden, som vist i figur 4.4b, er veilengdeforskjellen 1,24 meter. Med en høyttaler- og mikrofonavstand på 1 meter samt høyttaler- og mikrofonhøyde på 1 meter skal veilengdeforskjellen teoretisk sett være 1,24 meter. Årsaken til refleksjonene ved 3,2 ms og 4,0 ms er plasseringen av høyttaleren og mikrofonen på ulike scenepodier. Dette gjelder hovedsakelig for S6M1, S7M1 og S8M1 hvor scenepodiet mellom høyttaleren og mikrofonen er 14 cm høyt. Plasseringen av



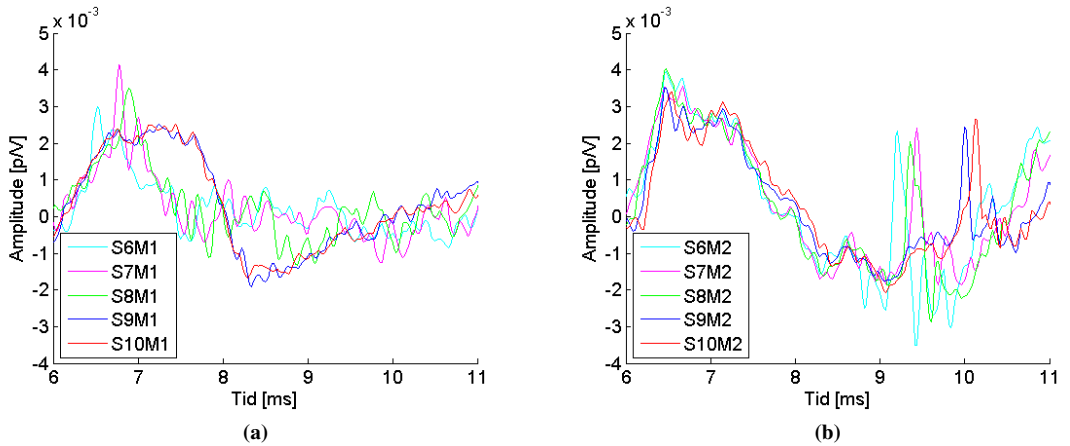
Figur 4.3: Impulsrespons (0-10 ms), snitt av måleposisjoner i grupper og målemetoder

høytaleren og mikrofonen på ulike scenepodier har ført til en refleksjon fra det nedre podiet, hvor høytaleren står, og en refleksjon fra det øvre podiet, hvor mikrofonen står. I teorien ville tiden mellom direktelyden og de refleksjonene være 3,2 ms og 3,9 ms som stemmer forholdsvis godt med det målte. Årsakene til de lavere nivåene kan være diffraksjon og at scenepodiet kan ha skygget deler av lyden. For målingene S10M1 og S11M1 ser det ut til at det primært er en refleksjon fra det nedre scenepodiet hvor høytaleren står.

Fra figur 4.5 kan en se at det er en distinkt forskjell mellom målingene med metode 1 og metode 2. Med metode 2 er det klare refleksjoner fra det bakerste scenepodiet, både før og etter 10 ms, på grunn av at mikrofonen er plassert nærmere scenepodiet. Dette viser at noen av referansenivåene vil inkludere en ekstra refleksjon, men ikke alle. Med metode 1 derimot vil det være tidligere refleksjoner, men også her er det stor forskjell mellom målingene. Målingene lengst fra det bakerste scenepodiet, S9M1 og S10M1, viser ingen tydelige refleksjoner men en generelt høyere amplitude. Hva som er årsaken til at disse målingene ikke har en tydelig refleksjon fra bakerste scenepodium er usikkert. Det må også merkes at amplituden rundt 7 ms er høyere med metode 2, nesten like høy som refleksjonene med metode 1, måling S6M1 til S8M1.



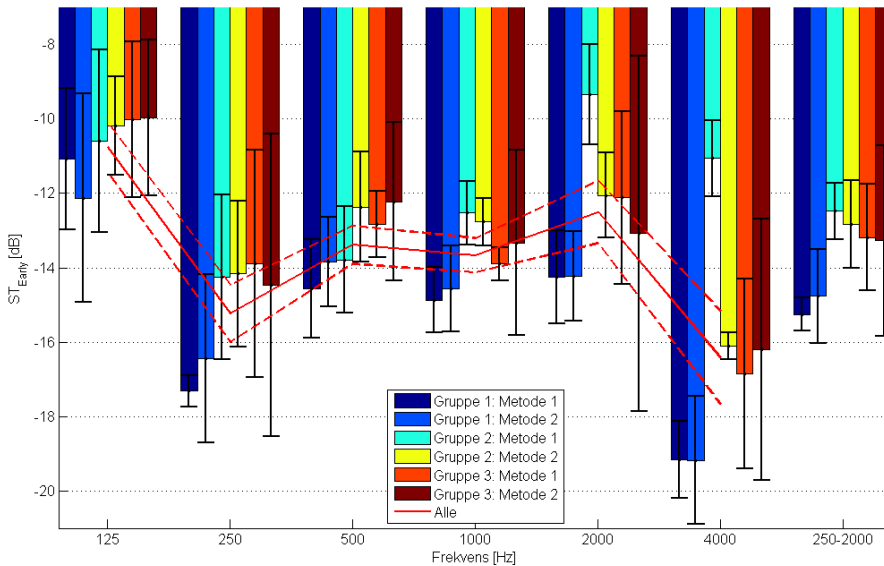
Figur 4.4: Utsnitt av tidlig impulsrespons (0-10 ms) (a) metode 1 og (b) metode 2



Figur 4.5: Utsnitt av impulsrespons (a) metode 1 og (b) metode 2 (0 ms tilsvare ankomst av direktelyd)

4.1.2 Tidlig support, ST_{Early}

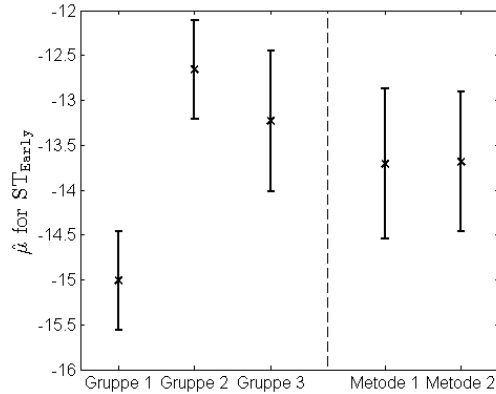
Figur 4.6 viser det forventede gjennomsnitt til ST_{Early} i oktavbånd, og i de ulike gruppene og med metodene beskrevet i kapittel 3.1. Det forventede gjennomsnittet til ST_{Early} og standardavviket til ST_{Early} og $L_{p,20-100}$ i de ulike gruppene og med de ulike metodene for gjennomsnitt over oktavbåndene 250 Hz til 2 kHz er vist i figurene 4.7 og 4.8. For denne parameteren er det ønskelig å se en forskjell mellom de ulike gruppene i mye større grad enn mellom metodene.



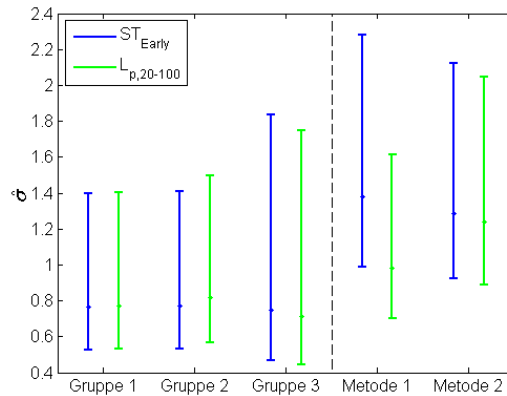
Figur 4.6: Support ST_{Early} , gjennomsnitt av måleposisjoner i grupper og målemetoder, samt 95% konfidensintervall

Målingene viser at det er en signifikant forskjell i ST_{Early} mellom gruppe 1 med metode 1 og gruppe 2 med begge metodene i 250 Hz og 1 kHz oktavbåndene, se figur 4.6. I 2 kHz oktavbåndet er det en signifikant forskjell mellom gruppe 1 med metode 1 og gruppe 2 med metode 1 og i 1 kHz oktavbåndet skiller ST_{Early} i gruppe 1 med begge metodene seg fra gruppe 2 med begge metodene. I dette oktavbåndet skiller ST_{Early} i gruppe 2 med metode 1 seg også fra gruppe 2 med metode 2. Til tross for ingen signifikant forskjell mellom gruppe 1 med metode 1 og gruppe 3 med metode 1 ved undersøkelse av spesifikke oktavbånd, er det en forskjell mellom de ved gjennomsnitt over oktavbåndene fra 250 Hz til 2 kHz. Denne figuren viser også at målingene med metode 1 gir et mye bedre estimat for gjennomsnittlig ST_{Early} i de ulike gruppene på grunn av betydelig mindre konfidensintervall. Spørsmålet er om dette estimerte gjennoms-

snittet er reelt eller beskrivende for musikernes opplevelse. Som et eksempel er forskjellen i 2 kHz oktavbåndet mellom metode 1 og 2 minst 0,2 dB i gruppe 2, som trolig ikke er hørbart.



Figur 4.7: Estimert gjennomsnitt for ST_{Early} , gjennomsnitt av ST_{Early} fra 250 Hz til 2 kHz, med ulike målemetoder og i ulike grupper, samt 95% konfidensintervall



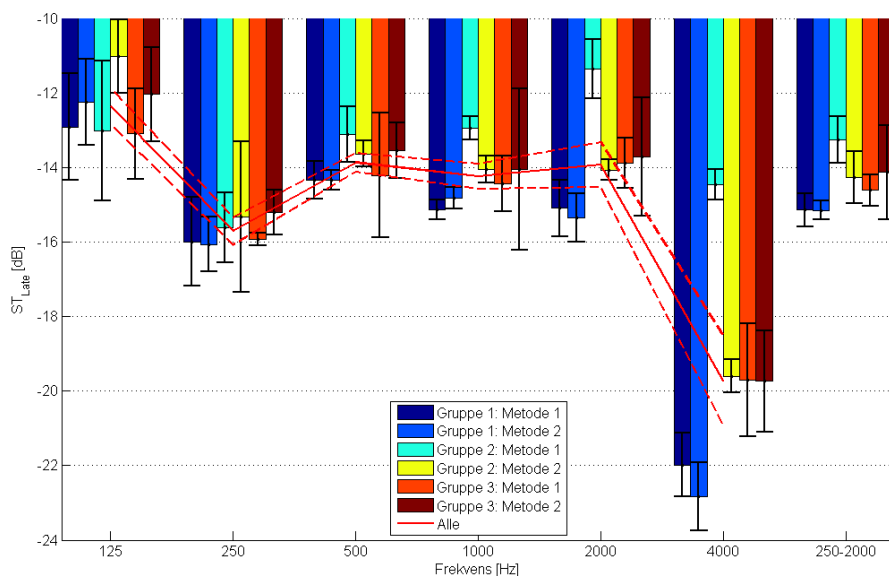
Figur 4.8: Estimert standardavvik for ST_{Early} og $L_{p,20-100}$, gjennomsnitt av ST_{Early} og $L_{p,20-100}$ fra 250 Hz til 2 kHz, med ulike målemetoder og i ulike grupper, samt 95% konfidensintervall

Fra figur 4.7 kan en se at det er en signifikant forskjell mellom gruppe 1 og gruppe 2 og 3 som ikke kom tydelig frem i figur 4.6. Forskjellen i gjennomsnitt mellom gruppe 1 og gruppe 2 er minst 1,3 dB og mellom gruppe 1 og gruppe 3 minst 0,4 dB. ST_{Early} virker å være uavhengig av hvilken målemetode som blir benyttet. Det estimerte standardavviket til ST_{Early} og $L_{p,20-100}$ er vist i fi-

gur 4.8, og viser at det ikke er noen signifikant forskjell mellom gruppene eller mellom metodene for ST_{Early} . Fra figuren er det tydelig at konfidensintervallet i gruppe 3 er større enn i de andre gruppene, men det er rimelig å anta at dette er på grunn av færre målinger i denne gruppen. Fra målingene i gruppe 1 og i gruppe 2 er den forventede variasjonen på mellom 0,5 dB og 1,4 dB ved forflytning av høyttaler og mikrofon med rundt 1 meter, samt forflytning av mikrofonen rundt 1 meter. For alle målingene i Olavshallen er den estimerte variasjonen til ST_{Early} på mellom 1,0 dB og 2,3 dB med metode 1 og mellom 0,9 dB og 2,1 dB med metode 2. Sammenligning av ST_{Early} og $L_{p,20-100}$ i figur 4.8 viser at det ikke er noen signifikant forskjell i variasjonen til disse målene. Det estimerte standardavviket med metode 1 til ST_{Early} er på mellom 1,0 dB og 2,3 dB og for $L_{p,20-100}$ på mellom 0,7 dB og 1,6 dB.

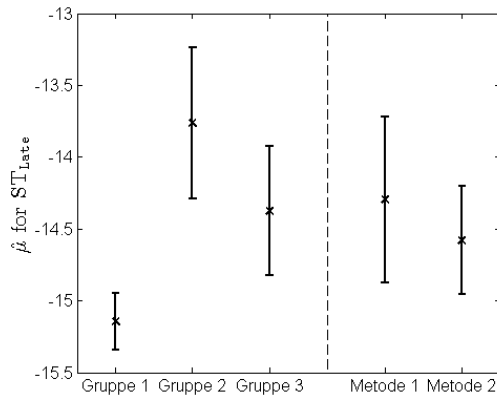
4.1.3 Sen support, ST_{Late}

Figur 4.9 viser det forventede gjennomsnittet til ST_{Late} i oktavnåb, og i de ulike gruppene og med metodene beskrevet i kapittel 3.1. Det forventede gjennomsnittet til ST_{Late} og standardavviket til ST_{Late} og $L_{p,100-1000}$ i de ulike gruppene og med de ulike metodene for gjennomsnitt over oktavnåbene 250 Hz til 2 kHz er vist i figurene 4.10 og 4.11. For denne parameteren er det ønskelig å se forskjell mellom de ulike gruppene i mye større grad enn mellom metodene.



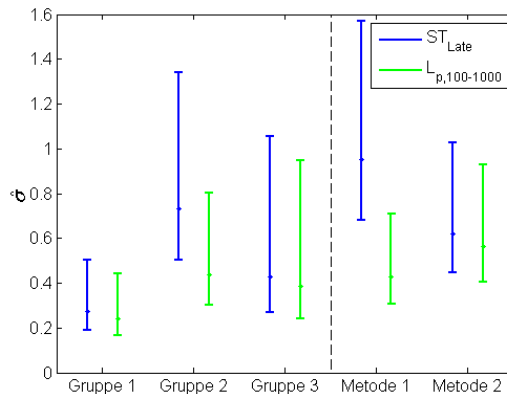
Figur 4.9: Support ST_{Late} , gjennomsnitt av måleposisjoner i grupper og målemetoder, samt 95% konfidensintervall

Målingene av ST_{Late} viser at det er en signifikant forskjell mellom gruppe 2 med metode 1 og gruppe 1 med begge metodene, gruppe 2 med metode 2 og gruppe 3 med metode 1 i 1 kHz og 2 kHz oktavbåndet, se figur 4.9. I oktavbåndene fra 500 Hz til 2 kHz er det en signifikant forskjell mellom gruppe 1 med metode 2 og gruppe 2 med metode 2. For gruppe 1 med metode 1 sammenlignet med gruppe 2 med metode 2 er det bare i 1 kHz oktavbåndet hvor det er en signifikant forskjell. I 250 Hz oktavbåndet er det ikke funnet noen forskjell mellom de ulike gruppene og med ulike metoder. For gjennomsnitt fra 250 Hz til 2 kHz er det kun gruppe 2 med metode 1 som skiller seg fra de andre, gruppe 1 med begge metoder og gruppe 3 med metode 1. I gruppe 2 ved 2 kHz er forskjellen mellom metode 1 og 2 minst 1,6 dB.



Figur 4.10: Estimert gjennomsnitt for ST_{Late} , gjennomsnitt av ST_{Late} fra 250 Hz til 2 kHz, med ulike målemetoder og i ulike grupper, samt 95% konfidensintervall

Fra figur 4.10 kan en se at det er en signifikant forskjell mellom gruppe 1 og gruppe 2 og 3. Forskjellen mellom gruppe 1 og gruppe 2 er minst 0,7 dB og minst 0,1 dB mellom gruppe 1 og gruppe 3. Det er ingen signifikant forskjell mellom gruppe 2 og gruppe 3, samt metode 1 og metode 2. Det er ingen signifikant forskjell mellom standardavviket til ST_{Late} og $L_{p,100-1000}$. Fra målingene med metode 1 er det rimelig å anta at det kan være en signifikant forskjell mellom ST_{Late} og $L_{p,100-1000}$. Det er også rimelig å anta at referansenivået er årsaken til det store konfidensintervallet for ST_{Late} . Det vil i praksis si at andelen målinger med nærhet til scenepodier vil kunne endre standardavviket betraktelig. Sammenligning av metode 1 og 2 for ST_{Late} og $L_{p,100-1000}$ støtter dette.



Figur 4.11: Estimert standardavvik for ST_{Late} og $L_{p,100-1000}$, gjennomsnitt av ST_{Late} og $L_{p,100-1000}$ fra 250 Hz til 2 kHz, med ulike målemetoder og i ulike grupper, samt 95% konfidensintervall

4.1.4 Usikkerhet i avstanden mellom høyttaler og mikrofon

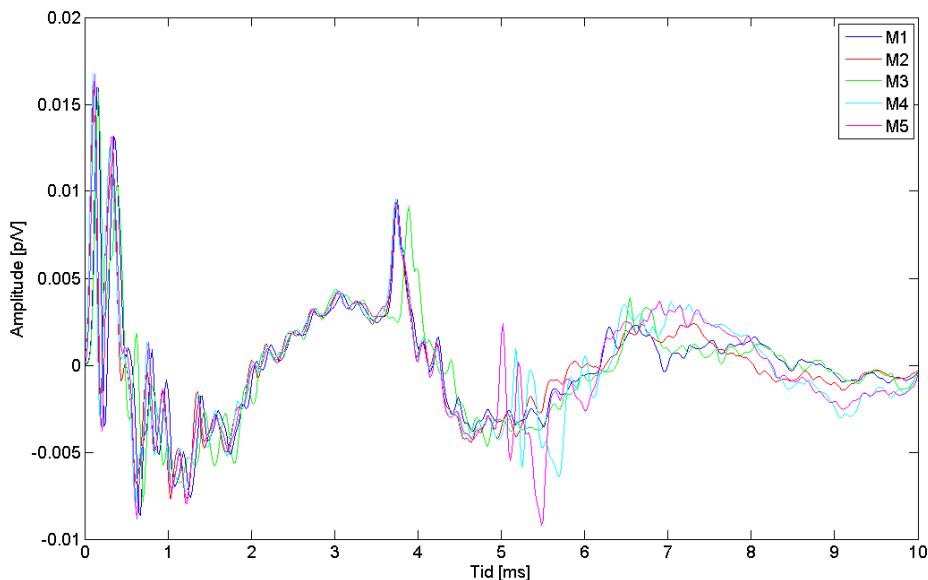
Fra impulsresponsene kan en beregne forskjellen i ankomsttiden til direktelyden og gulvrefleksjonen, og med det undersøke usikkerheten i avstanden mellom høyttaleren og mikrofonen, siden høyden til mikrofon og høyttaler var holdt konstant under alle målingene. Usikkerheten i denne beregningsmetoden er knyttet til samplingsfrekvensen og eventuelle feil som kan oppstå i beregningen av impulsresponsen. Målinger som er gjort på tvers av scenepodier og målinger hvor det er vanskelig å fastslå gulvrefleksjonen må derfor ikke tas med.

Fra tabell C.1 kan en se at gjennomsnittlig avstand mellom høyttaler og mikrofon var $102,1 \text{ cm} \pm 0,9 \text{ cm}$. Usikkerheten i denne beregningsmetoden er 0,7 cm på grunn av samplingsfrekvensen. På grunn av den høye usikkerheten i beregningsmetoden kan den beregnede usikkerheten være et resultat av beregningsmetoden. Den reelle usikkerheten kan også være høyere enn den er beregnet til å være.

4.2 Referansenivået ved måling nær et scenepodium

Målingene av referansenivået nær scenepodier er beskrevet i kapittel 3.2. I figur 4.12 kan en se at det er en tydelig gulvrefleksjon for alle målingene, og tiden mellom direktelyd og refleksjon er omtrent 3,7 ms med unntak av måling M3 hvor den er 3,9 ms. Det tilsvarer en økning i avstanden mellom høyttaleren og mikrofonen på 8 cm for denne målingen sammenlignet med de andre. I teori¹ skal det være spekulære refleksjoner 3,7 og 6,7 ms etter direktelyden for måling M1 og M3, samt 3,7 ms og 11,7 ms etter direktelyden for måling M2.

Den siste refleksjonen for M2 vil være utenfor vinduet til referansen. I figur 4.12 er det ingen tydelig refleksjon ved 6,7 ms for måling M1 og M3 og årsaken til dette er ukjent. I måling M4 og M5 rundt 5,2 ms er det trolig flere refleksjoner fra scenepodiet.

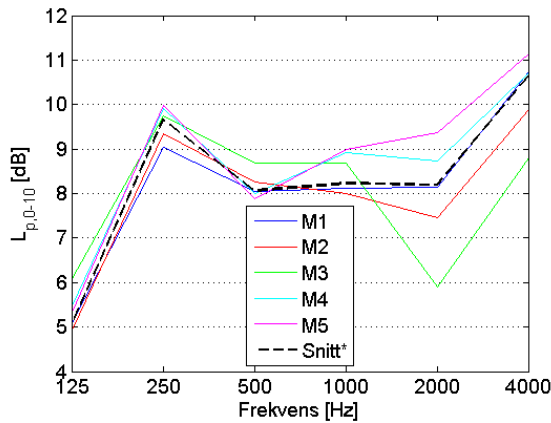


Figur 4.12: Tidlig impulsrespons (0-10 ms) for målingene med nærhet til et scenepodium, se figur 3.5

Figur 4.13 viser målt $L_{p,0-10}$ nær et scenepodium hvor gjennomsnittlig $L_{p,0-10}$ over 250 Hz til 2 kHz oktavbåndene er 8,3 dB, 8,3 dB, 8,3 dB, 8,9 dB og 9,1 dB for henholdsvis måling M1 til M5. Ved å anta gjennomsnittet i figur 4.13 som representativt for referansenivået i Olavshallen generelt kan en foreslå følgende anbefalinger: Måling M1, høyttaler og mikrofon plassert normalt på en linje i forhold til scenepodiet, gir mest korrekte resultater i oktavbånd relativt gjennomsnittet i Olavshallen. Måling M4, høyttaler og mikrofon plassert parallelt med et scenepodium, gir mest korrekte resultater for snitt over oktavbåndene 250 Hz til 2 kHz, relativt gjennomsnittet i Olavshallen. På en annen side er det noen resultater som tyder på at disse forslagene kan være feilaktige ved første øyekast. Måling M4 og M5 burde ha tilsvarende referansenivåer på grunn av symmetri. Årsaken til at dette ikke er tilfellet kan være at avstanden fra høyttaleren til måleposisjon M4 og M5 og mikrofonenes avstand til scenepodiet ikke er identiske. Forskjellen mellom M4 og M5 er kun nevneverdig i 2 kHz oktavbåndet hvor den er 0,6 dB. Måling M1 og M3 burde i det korte tidsrommet kunne anses som akustisk symmetriske og en mulig årsak til at dette

¹Undersøkelse med speilkildemetoden (ISM) i CATT Acoustics

ikke er tilfellet er den økte avstanden mellom høyttaleren og mikrofonen.



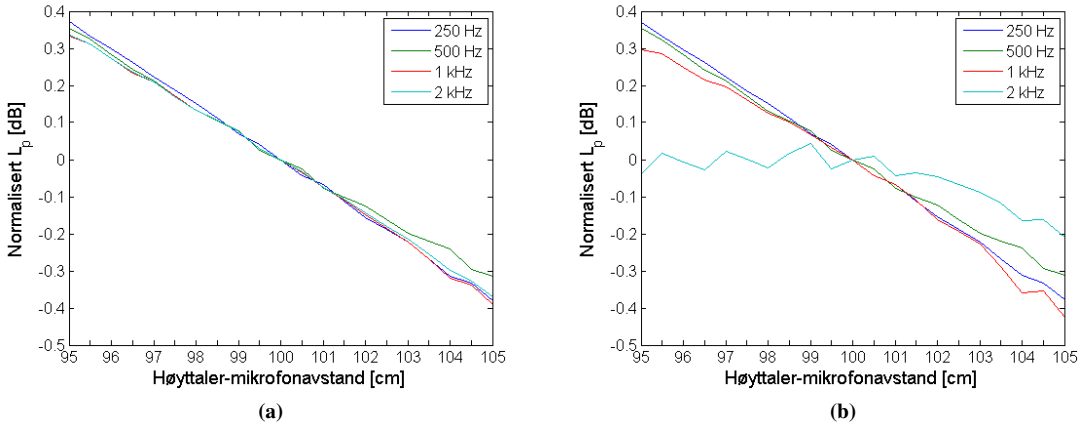
Figur 4.13: $L_{p,0-10}$ for målingene med nærhet til et scenepodium, se figur 3.5. *(Gjennomsnittet er over målingene i gruppe 1 og 3, samt gruppe 2 med metode 2, se kapittel 3.1.1)

4.3 Måleoppsettets innvirkning på referansenivået

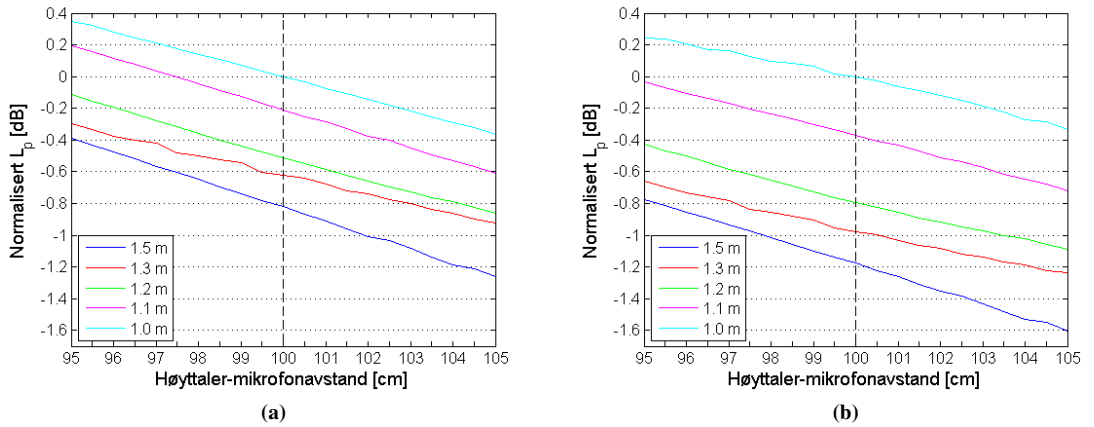
I dette kapittelet blir resultatene fra en undersøkelse med et delvis teoretisk og praktisk grunnlag gjengitt. I denne undersøkelsen er det benyttet antagelser, se kapittel 3.3, som gjør at resultatene ikke nødvendigvis stemmer med virkeligheten.

Figur 4.14 viser at en kan forvente maksimalt 0,4 dB endring i referansenivået ved endring av avstanden mellom høyttaler og mikrofon på opp mot 5 cm gitt at høyttaleren er omnidireksjonell. Hvis høyttaleren derimot er direktiv kan en forvente lavere avvik i 2 kHz oktavnådet, men ellers er resultatene veldig like. Lydtryknivåene i denne figuren er normalisert til det ved 1 meters avstand for hvert enkelt oktavnådet. Det må merkes at et annet direktivitetensmønster vil kunne vise andre resultater, for direktivitetensmønsteret i vertikalplanet er antatt å være lik den i horisontalplanet. Ved å endre avstanden mellom høyttaleren og mikrofonen med 5 cm vil utgangsvinkelen fra høyttaleren for gulvrefleksjonen endre seg med 2,3°. Ved å se på figur E.1, som viser maksimal variasjon ved 3,15 kHz på omtrent 8 dB i horisontalplanet, vil valget av høyttalerens orientering relativt til mikrofonen bidra i mye større grad til endring av referanseverdien, enn det variasjonen i avstanden mellom høyttaleren og mikrofonen vil føre til. Til sammenligning har en at den maksimale forskjellen mellom de 29 målingene i ekkofritt ved ulike vinkler fra 0° til 350° er på 6,8 dB i 2 kHz oktavnådet.

Sammenligning av referansenivåene med de ulike måleoppsettene benyttet av andre, se kapittel 1.4, er vist i figur 4.15. Lydtryknivået er normalisert til

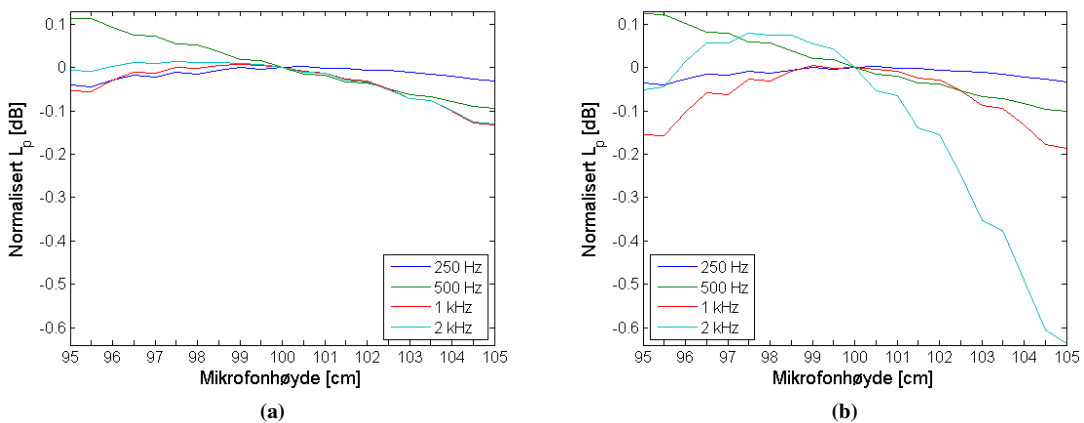


Figur 4.14: Normalisert lydtrykknivå L_p som funksjon av avstanden mellom høyttaler og mikrofon med omnidireksjonell høyttaler (a) og direktiv høyttaler (b)



Figur 4.15: Normalisert lydtrykknivå L_p , snitt av oktavbåndene 250 Hz til 2 kHz, som funksjon av avstanden mellom høyttaler og mikrofon med ulike høyttaler- og mikrofonhøyder med omnidireksjonell høyttaler (a) og direktiv høyttaler (b)

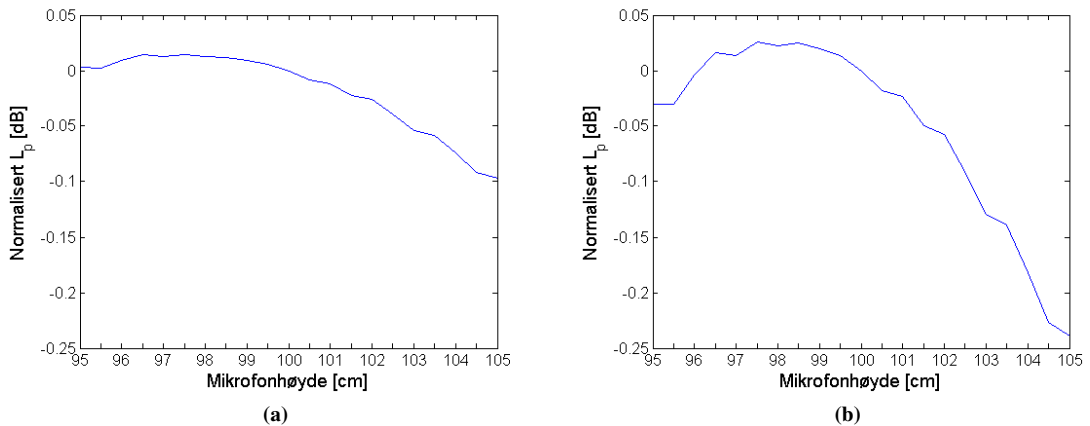
den ved 1 meter for hvert enkelt måleoppsett. Det er samme høyde på høyttaleren og mikrofonen. En kan se at referansenivået synker med økt høyttaler- og mikrofonhøyde. Endringen av referansenivået som funksjon av avstanden mellom høyttaler og mikrofon er ikke den samme for de ulike måleoppsettene, dette kommer tydeligere frem i figur D.1. Den figuren viser at en høyttaler- og mikrofonhøyde på 1,3 meter er minst følsom for endring av høyttaler- og mikrofonavstanden gitt at høyttaleren er omnidireksjonell. Hvis den er direktiv avhenger det av om avstanden mellom høyttaleren og mikrofonen økes eller minkes fra 1 meter. Hvis avstanden mellom høyttaleren og mikrofonen minkes er det måling ved 1 meters høyttaler- og mikrofonhøyde som endrer referansenivået minst, men hvis avstanden økes er det med en høyden på 1,3 meter som endrer referansenivået minst. Med en direktiv høyttaler vil referansenivået endre seg med $-0,4$ dB, $-0,8$ dB, $-1,0$ dB og $-1,2$ dB for henholdsvis 1,1 meter, 1,2 meter, 1,3 meter og 1,5 meter høyttaler- og mikrofonhøyde relativt en høyde på 1 meter gitt en høyttaler- og mikrofonavstand på 1 meter. Til sammenligning vil den maksimale endringen med 1,5 meters høyttaler- og mikrofonhøyde være på $-0,8$ dB for en omnidireksjonell høyttaler.



Figur 4.16: Normalisert lydtryknivå L_p som funksjon av mikrofonhøyde med omnidireksjonell høyttaler (a) og direktiv høyttaler (b)

I motsetning til avstanden mellom høyttaleren og mikrofonen er det lettere å holde høyden til høyttaleren og mikrofonen konstant under måling av en scene. Endring av høyttaler- og mikrofonhøyde er derfor bare et problem mellom målinger fra forskjellige scener og målinger utført av andre personer. Det blir bare vist det normaliserte lydtryknivået som funksjon av mikrofonhøyde, se figur 4.16 og 4.17, fordi endring av høyttalerhøyde gir nær identisk resultat, se vedlegg D. Merk at høyden til mikrofonen i dette tilfellet er ulik høyttalerhøyden. For en omnidireksjonell høyttaler vil en endring i mikrofonhøyde på 5 cm gi en endring på maksimalt 0,1 dB og svært liten endring for mindre endringer i

mikrofonhøyden. For høyder høyere enn 1 meter er endringen i referansenivået større for høyere frekvenser og for høyder lavere enn 1 meter er endringen størst og minst for henholdsvis 500 Hz og 2 kHz. Med en omnidireksjonell høyttaler er endringene mye større, med et maksimalt avvik i 2 kHz oktavbåndet på 0,6 dB med en mikrofonhøyde på 105 cm. Som forventet er det bare i 1 kHz og 2 kHz oktavbåndene hvor forskjellen mellom den omnidireksjonelle og direkte høyttaleren er betydelig. For gjennomsnitt av 250 Hz til 2 kHz oktavbåndene og med bruk av en omnidireksjonell høyttaler vil en økning av mikrofonhøyden føre til en endring av referansen på opp mot 0,1 dB, i motsetning til ved senking av høyden som fører til neglisjerbare endringer. Med den direkte høyttaleren er det også liten endring av referansenivået ved endring av mikrofonhøyden fra 1 meter til 95 cm, men ved økning av høyden over 1 meter er endringen av referansenivået på opp mot 0,2 dB.

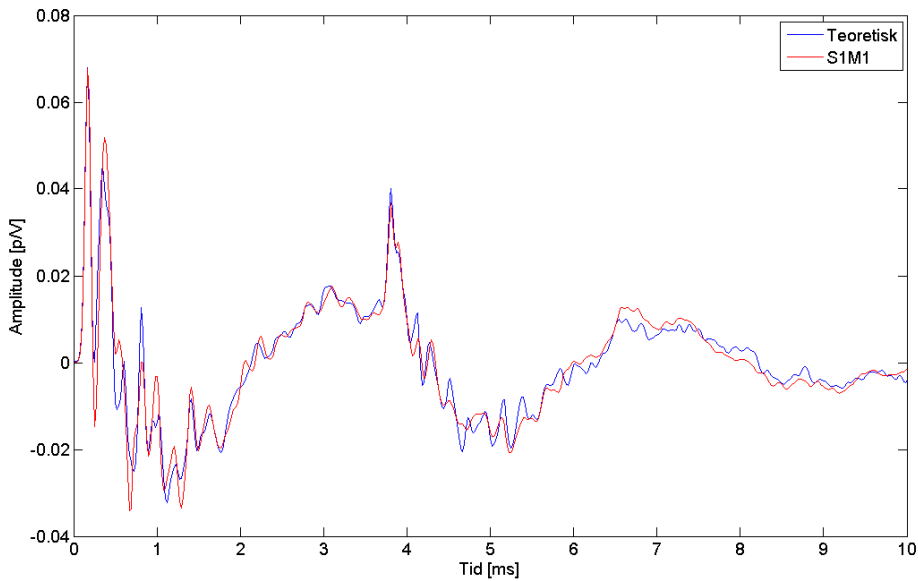


Figur 4.17: Normalisert lydtryknivå L_p , snitt av oktavbåndene 250 Hz til 2 kHz, som funksjon av mikrofonhøyde med omnidireksjonell høyttaler (a) og direktiv høyttaler (b)

4.3.1 Sammenligning med måling i Olavshallen

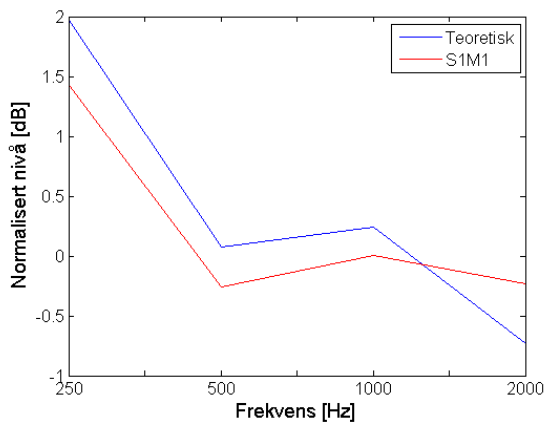
Denne teoretiske undersøkelsen vil åpenbart ikke tilsvare reelle målinger, og det burde derfor undersøkes om feilen som oppstår er betydelig.

Figur 4.18 viser en simulert impulsrespons, se kapittel 3.3, med høyttaler og mikrofon 1 meter fra hverandre og med en høyttaler- og mikrofonhøyde på 1 meter, samt impulsresponsen for måling S1M1. Amplituden til S1M1 er økt til samme nivå som direktelyden til den simulerte impulsresponsen. Den beregnede impulsresponsen er fra simulering med direktiv høyttaler, som vil si at det ikke er benyttet samme impulsrespons for direktelyden og gulvrefleksjonen. En kan se av figuren at hovedtrekkene og amplitudene til direktelyden og gulvrefleksjonen er de samme, men med noe mer variasjon for den teoretiske



Figur 4.18: Målt og beregnet tidlig impulsrespons fra simulering med direktiv høyttaler

impulsresponsen. Fra denne figuren kan det se ut som antagelsen om identisk direktivitet i vertikalplanet som i horisontalplanet ikke er så langt fra sannheten, men dette er kanskje ikke sant for andre måleoppsett.



Figur 4.19: Målt og beregnet normalisert referansenivå i oktavnåid fra simulering med direktiv høyttaler

Oktavnåidnivåene til referansen er omtrent like fra 250 Hz til 1 kHz med

unntak av en offset på mellom 0,25 dB og 0,5 dB, se figur 4.19. I 2 kHz oktavbåndet er det derimot en motsatt offset på omtrent 0,5 dB. Basert på dette og på grunn av at den simulerte impulsresponsen varierer mer enn måling S1M1 i figur 4.18, kan det virke som simuleringen er mindre realistisk ved høyere frekvenser.

4.4 Avsluttende diskusjon

Referansenivåene brukes for å få kalibrerte måleverdier og det er derfor viktig at disse er så konsistente som mulig. Forholdsregler som samme orientering av høyttaleren og korrekt avstand mellom høyttaler og mikrofon, samt de respektive høydene beskrevet i kapittel 1.3 bidrar til dette. Så hva er årsaken til resultatene vist i kapittel 4.1.1 og vil variasjonen eller usikkerheten i referansenivået ha en signifikant innvirkning på supportparameterne ST_{Early} og ST_{Late} ? For å finne ut om det er en signifikant innvirkning må JND^2 være kjent og siden dette ikke er tilfellet for supportparameterne blir det antatt at den er mellom 1-2 dB. Dette anses som rimelig basert på variasjonen til supportparameterne funnet av Gade [4] og parameterens typiske område på rundt -24 dB til -8 dB[9]. En JND rundt 2 dB eller høyere vil føre til for små forskjeller mellom ulike scener på grunn av parameterens begrensede område. JND på mye mindre enn 1 dB virker usannsynlig på grunn av at 30 cm forflytning av måleposisjonen fører til en variasjon på 0,3 dB. Som over, blir det videre kun diskutert gjennomsnittlige verdier fra 250 Hz til 2 kHz.

Målingene i Olavshallen viser et forventet standardavvik i referansenivået på 0,1-0,2 dB, som er i samme størrelsesorden som det funnet av Gade [4] ved liten forflytning av måleposisjon. Variasjonen til ST_{Early} er derimot mye større enn dette for målinger over hele scenen og sammenligning med $L_{p,20-100}$ viser ikke at det er signifikante forskjeller. For ST_{Late} kan det virke som referansenivået bidrar i stor grad til variasjonen ved sammenligning med $L_{p,100-1000}$. Årsaken til at ST_{Late} er mer følsom for referansenivået kan være på grunn av den høyere variasjonen til ST_{Early} enn ST_{Late} . Variasjonen til ST_{Early} er estimert til å være 1-1,8 dB og 0,4-0,8 dB for ST_{Late} basert på alle målingene i Olavshallen med unntak av de i gruppe 2 med metode 1.

Undersøkelsene nær et scenepodium strider imot funnene i Olavshallen i gruppe 2 med metode 1. Målingene med metode 1 førte til sterkt reduserte referansenivåer i 2 kHz oktavbåndet. Målingene med metode 1 var i dette tilfellet plassert noen grader fra en vinkelrett plassering relativt til scenepodiet og med høyttaleren og mikrofonen på hvert sitt scenepodium, se figur 3.3. Dette tilsvarer måleoppsettet i måling M1 bare med høyttaleren og mikrofonen på samme scenepodium, se figur 3.5a. Basert på en sammenligning av metode 1 og 2 i gruppe 2 virker det som plasseringen av mikrofonen nære scenepodiet bidro i stor grad til forskjellen mellom metode 1 og 2, spesielt i 2 kHz oktavbåndet. Undersøkelsen beskrevet i kapittel 3.2 viser derimot neglisjerbare endringer i 2

²JND = Just Noticeable Difference

kHz oktavbåndet. Dette kan være på grunn av at avstanden mellom mikrofonen og scenepodiet i måling M1 var noe større enn i gruppe 2 med metode 1, eller at årsaken til dette er plasseringen av høyttaleren og mikrofonen vinkelrett på scenepodiet. Fra sammenligning av impulsresponsene i gruppe 2 med M1 kan det virke som hovedårsaken til de reduserte referansenivåene er plasseringen av høyttaleren og mikrofonen på ulike scenepodier. Videre stemmer måling M4 og M5 med målingene i gruppe 2 med metode 1, det vil si at måling med høyttaler og mikrofon parallelt med scenepodiet fører til noe økt referansenivå.

Forskjellen mellom M1 og M3 påpekt i kapittel 4.2 er vanskelig å forklare. Den senere ankomsten av gulvrefleksjonen viser at mikrofonen kan ha vært plassert omtrent 108 cm fra høyttaleren. En undersøkelse av dette i CATT Acoustics viser at en kan forvente omtrent 1 dB reduksjon i referansenivået for oktavbåndene 250 Hz til 2 kHz. Forskjellen mellom M1 og M3 i 2 kHz oktavbåndet er dobbelt så stor som den funnet med CATT Acoustics. Det er ukjent om undersøkelsen i CATT Acoustics gir realistiske resultater i dette tilfellet. Det kan også være andre årsaker til den store forskjellen, men dette er ukjent.

Ved sammenligning av gruppe 3 med de andre gruppene må antall målinger i de ulike gruppene tas i betraktning. Det er gjennomført 10 målinger i gruppe 1 og 2, mens i gruppe 3 er det kun gjennomført 6 målinger, som fører til at konfidensintervallet i gruppe 3 vil være større enn i gruppe 1 og 2 på grunn av færre målinger. Det vil si at overlapp, som et eksempel, mellom konfidensintervallene til gruppe 3 og de andre gruppene ikke nødvendigvis betyr at det ikke er en signifikant forskjell, men det begrensede antallet målinger gir ikke noe grunnlag til å si at det er en signifikant forskjell. På generell basis kan en heller ikke si at det ikke er en signifikant forskjell selv om konfidensintervallene overlapper. I slike tilfeller kan en utføre en student t-test for å undersøke gyldigheten av hypotesen, men dette kan bli en utfordring ved sammenligning av grupper med ulik størrelse på utvalgene.

Variasjoner i måleoppsettet som endring av avstanden mellom høyttaler og mikrofon ved ulike måleposisjoner og forskjellig høyde på høyttaler og mikrofon, samt bruk av ulike høyttaler- og mikrofonhøyder vil føre til endring av referansenivået. Endringene i referansenivået som følge av endringer i måleoppsettet er hovedsakelig på grunn av kamfiltrering og lydtap, samt høyttalerens direktivitet. Variasjonen i høyttaler- og mikrofonavstand ved målingene i Olavshallen var ± 1 cm, men om denne variasjonen var rundt 1 meter er usikkert. Den resulterende endringen i referansenivået som følge av variasjonen i høyttaler- og mikrofonavstand er i underkant av 0,1 dB. Det kan derfor virke sannsynlig at det estimerte standardavviket, se figur 4.2b, er et resultat av variasjonen i høyttaler- og mikrofonavstand. Sammenlignet med endringer i måleoppsettet som høyere høyttaler- og mikrofonhøyder, fører variasjonen i avstanden mellom høyttaler og mikrofon til neglisjerbare endringer av referansenivået. Målinger med en høyttaler- og mikrofonhøyde på 1,5 meter i stedet for 1 meter vil føre til en reduksjon av referansenivået på rundt 1 dB og følgelig en økning av supportparameterne med 1 dB. Avhengig av hva JND faktisk er vil dette kunne føre til relativt betydelige forskjeller mellom målinger med ulike måleoppsett

på samme scene. Rent måleteknisk vil 1 dB avvik anses som betydelig og korrigerings av måleverdiene ville vært nødvendig. Målinger med ulik høyde på høyttaler og mikrofon vil hovedsakelig føre til endringer i referansenivået i 2 kHz oktavbåndet, trolig på grunn av høyttalerens direktivitet og derfor avhengig av høyttaleren som blir benyttet. Det er usikkert hva som kan være forventet variasjon i høydeforskjellen mellom høyttaleren og mikrofonen, men med en forskjell på opp mot 5 cm vil referansenivået endres med maksimalt 0,2 dB.

Supportparameterens referanse avhenger i størst grad av høyttalerens direktivitet og dens orientering relativt til mikrofonen. Endring av høyttalerens orientering vil kunne endre lydnivået til direktelyden med opp til 6 dB i 2 kHz oktavbåndet, som er betraktelig mer enn endringene i referansenivået ved forskjellige måleoppsett og ved ulike posisjoner på en scene. Spørsmålet er om det resulterende referansenivået vil endre seg med opp til 6 dB eller mer. Det kan hende at direktivitetsmønsteret i vertikalplanet delvis utligner det i horisontalplanet, men dette er også avhengig av høyden på høyttaleren og mikrofonen. Før dette er undersøkt burde høyttalerens orientering holdes konstant. Referansen avhenger i stor grad av én distinkt gulvrefleksjon ved alle målingene. Måling med høyttaler og mikrofon på ulike scenepodier er en av hovedårsakene til upålitelige referansenivå. Videre er det viktig at målingene blir gjort med samme høyttaler- og mikrofonhøyde på alle scener, det er derfor viktig at det blir definert hva denne skal være og ikke slik det er i dag hvor de i henhold til ISO 3382-1:2009 [9] kan være 1 eller 1,5 meter høye. Det må bemerkes at det ikke er undersøkt den resulterende endringen til $L_{p,20-100}$ eller $L_{p,100-1000}$ på grunn av den økte høyden, men det er rimelig å anta at den ville økt på grunn av kortere avstand til taket, som videre ville ført til større feil i ST relativt til målinger med 1 meters høyde. Videre er det viktig at høydene til høyttaleren og mikrofonen ikke endres mellom målingene og at de har samme høyde. Avstanden mellom høyttaleren og mikrofonen er ikke like kritisk for referansenivået, men siden dette varierer mellom hver måling anbefales det å holde avstanden innenfor 1-2 cm fra 1 meter. Dette burde være oppnåelig basert på målingene i Olavshallen og en uttalelse fra Gade [14]. Ved å tillate opp til 2 cm variasjon i avstanden mellom og høydene til høyttaleren og mikrofonen vil variasjonen i referansenivået maksimalt være 0,2 dB. Variasjon på 0,2 dB er mindre enn det målt av Gade [4] ved 60 cm forflytning av måleposisjon og burde derfor ikke bidra til betydelig usikkerhet i ST-parameterne. Uansett hvor nøyaktig målingene utføres er det umulig å forhindre at det blir benyttet andre høyttalere og andre orienteringer av høyttaleren relativt til mikrofonen. På grunn av dette vil referansenivået som blir målt av ulike personer kunne være svært forskjellige, som videre fører til forskjell i supportparameterens målte verdi. Det vil derfor virke mer hensiktsmessig å benytte seg av samme kalibreringsmetode som lydstyrke G [9] eller noe tilsvarende. Dette vil føre til mer usikkerhet i referansenivået sammenlignet med målinger hvor orienteringen holdes konstant, men når dette ikke er tilfellet vil forhåndskalibrering, som med G, føre til mer konsekvente resultater fra forskjellige personer. Forhåndskalibrering vil også redusere eventuelle feil som følge av måling nær scenepodier. Gade [4] nevner

hvordan høyttalerkalibreringen, eller referansenivået til ST, kan korrigeres og hvordan en skal velge orienteringen av høyttaleren relativt til mikrofonen, men det er vanskelig å forstå hva han mener og fraværet av denne informasjonen i ISO3382-1 reduserer kjennskapen til dette.

Kapittel 5

Konklusjon

I denne rapporten er det undersøkt referansenivåets innvirkning på supportparameterne, ST_{Early} og ST_{Late} , ved bruk av ulike måleoppsett og ved måling nær scenepodier. Det er også undersøkt usikkerheten i referansenivået ved å måle på en konsertsalscene.

Usikkerheten i referansenivået er meget lav hvis orienteringen av høyttaleren relativt til mikrofonen holdes konstant i alle målingene og når målingene gjøres på et flatt gulv eller samme scenepodium. Konstant orientering av høyttaleren ved målinger gjennomført av en person forhindrer derimot ikke avvik i referansenivået for målinger gjennomført av andre personer som benytter en annen høyttaler og orientering, men hvilken innvirkning dette vil ha er ikke blitt undersøkt.

Endringer i referansenivået som følge av små endringer og variasjoner i høyttaler- og mikrofonavstand og høyttaler- og mikrofonhøyde er neglisjerbare for ST_{Early} . ST_{Late} kan derimot være mer påvirket av endringene i referansenivået. Målinger som blir utført med en høyttaler- og mikrofonhøyde på 1 og 1,5 meter vil føre til store forskjeller i referansenivået.

Referansenivået på en scene vil variere med mellom 0,1 dB og 0,2 dB. For supportparameterne er det viktig at nøyaktigheten i referansenivået er høy, men hvor høy nøyaktigheten må være er usikkert fordi det ikke er kjent hvor liten endring i supportparameterne som er hørbart.

Anbefalinger

Målinger nær scenepodier må gjøres med høyttaler og mikrofon på samme podium og kanskje parallelt med scenepodiet. Det anbefales å være nøyaktig med plassering av høyttaleren og mikrofonen slik at avstanden mellom de ikke avviker mer enn 1-2 cm fra 1 meter. Høydene til høyttaleren og mikrofonen burde være den samme og ikke avvike mer enn 1-2 cm fra 1 eller 1,5 meter. Det anbefales også at høydene til og avstanden mellom høyttaleren og mikrofonen blir dokumentert, samt hvor både høyttaleren og mikrofonen plasseres. Orienteringen av høyttaleren relativt til mikrofonen burde også beskrives.

Videre arbeid

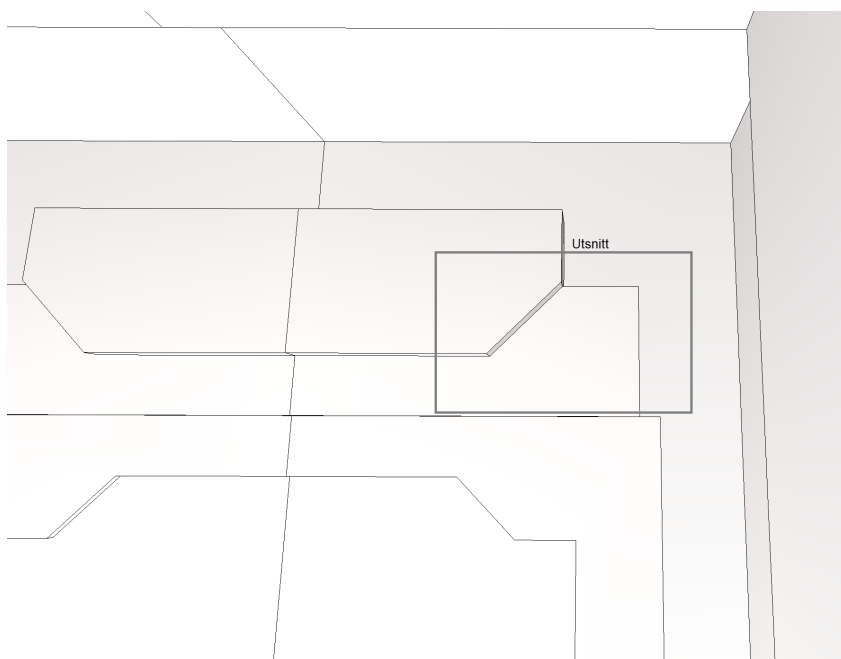
Undersøkelse av en kulehøyttalers direktivitet i vertikalplanet for ulike orienteringer av høyttaleren eller målinger av referansenivået til supportparametrene ved ulike orientering relativt til mikrofonen vil gi bedre innsikt i hva slags variasjon i referansenivået en kan forvente mellom målinger utført av andre personer. Oppdatering av ISO3382-1 med mer konkret og korrekt informasjon som også inneholder retningslinjer for orientering av høyttaleren relativt til mikrofonen, samt hvordan målinger må utføres ved nærhet til scenepodier.

Bibliografi

- [1] Gade A. C. Investigations of musicians room acoustic conditions in concert halls. part 1: Methods and laboratory experiments. *Acustica*, 69(5):193–203, 1989a.
- [2] Gade A. C. Investigations of musicians room acoustic conditions in concert halls. part 2: Field experiments and synthesis of results. *Acustica*, 69(6):249–262, 1989b.
- [3] Dammerud J. J. *Stage acoustics for symphony orchestras in concert halls*. (Doktoravhandling). Department of Architecture and Civil Engineering, University of Bath, 2009.
- [4] Gade A. C. Practical aspects of room acoustic measurements on orchestra platforms. *14th International Congress on Acoustics, Proceedings, Vols 1-4*, pages 935–936, 1992.
- [5] Gade A. C. Subjective and objective measures of relevance for the description of acoustics conditions on orchestra stages. In *International Symposium on Room Acoustics, Toronto*, 2013. Godkjent for publisering.
- [6] van den Braak E.W.M, Hak C, van Luxemburg L.C.J, and Martin H.J. Influence of stage risers on stage acoustics. *Forum Acusticum 2005 Budapest*, pages 2421–2426, 2005.
- [7] Jeon J. Y and Barron M. Evaluation of stage acoustics in seoul arts center concert hall by measuring stage support. *Journal of the Acoustical Society of America*, 117(1):232–239, 2005.
- [8] O’Keefe J. Acoustical measurements on concert and proscenium arch stages. 1995. Hentet 03.02.2013, fra <http://aercoustics.com/innovations-rd/our-technical-papers/>.
- [9] Standard Norge. *Akustikk : måling av romakustiske parametere Del 1 Rom for fremførelser (ISO 3382-1:2009)*. Lysaker, 2009.

-
- [10] Wenmaekers R. H. C, Hak C. C. J. M, and van Luxemburg L. C. J. On measurements of stage acoustic parameters: Time interval limits and various sourcereceiver distances. *Acta Acustica united with Acustica*, 98(5):776–789, 2012.
- [11] van Luxemburg R. C. J, Heijnen P.H, Kivits M, and Hak C. C. J. M. Stage acoustics: experiments on 7 stages of concert halls in the netherlands. In *Proc.38th Inter-noise, Ottawa*, 2009.
- [12] Weihwa Chiang and Yan-kuan Shu. Acoustical design of stages with large plane surfaces in rectangular recital halls. *Applied Acoustics*, 64(9):863–884, 2003.
- [13] M. Cederlöf. *Podium Acoustics for the Symphony Orchestra*. (Masteravhandling). Royal Insitute of Technology, Stockholm, 2006.
- [14] Gade A. C. Acoustics for symphony orchestras; status after three decades of experimental research. In *Proceedings of the International Symposium on Room Acoustics*, 2010.
- [15] Kuttruff H. *Room acoustics, 5th Edition*. ISBN 978-0-415-48021-5. Spon Press, 2009.
- [16] Kinsler L. E, Frey A. R, Coppens A. B, and Sanders J. V. *Fundamentals of Acoustics, 4th Edition*. ISBN 978-0-471-84789-2. John Wiley and Sons inc., 2000.
- [17] Gade A. C. Personlig korrespondanse. 8. April 2013.
- [18] Norsonic. *Noise Excitation Equipment for Building Acoustic Measurements*. Hentet 26.05.2013, fra http://www.norsonic.com/filestore/PDF-filer/Product_Data/PDNoiseExcitEd5Rev3Eng0113_web.pdf.
- [19] MathWorks. *Octave-Band and Fractional Octave-Band Filters*. Hentet 08.05.2013, fra <http://www.mathworks.se/products/dsp-system/examples.html?file=/products/demos/shipping/dsp/octavedemo.html>.

Oversiktsbilde, måling nær et scenepodie



Figur A.1: Oversiktsbilde, viser utsnittet brukt i figur 3.5

Tillegg **B**

Utstyr

Utstyret benyttet i målingene er vist i tabell B.1.

Tabell B.1: Utstyr

Type	Modell	Serienummer
Målesystem	WinMLS 2004	Build 1.07e
Lydkort	AXYS D-AUDIO	009900092
Mikrofon	BSWA TECH MP201	4502558
Forsterker	Norsonic NOR 280	2804053
Dreiebord	Norsonic NOR 265	29300
Mikrofon kalibrator	Brüel & Kjær Type 4230	752331

Tillegg **C**

Avstander mellom høyttaler og mikrofon

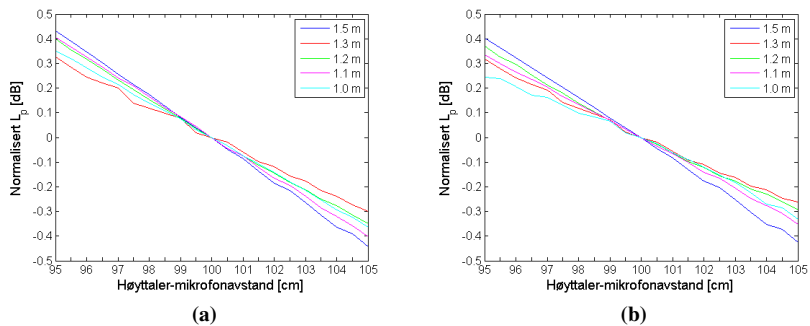
Tabell C.1 viser den kalkulerte avstanden mellom høyttaler og mikrofon fra impulsresponsene målt i Olavshallen.

Måling	Direktelyd [sempel]	Refleksjon [sempel]	Direkte-Refleksjon [sempel]	Høytaler-Mikrofon [meter]
G1M1S1	428	603	175	1,032
G1M2S1	428	603	175	1,032
G1M1S2	429	603	174	1,016
G1M2S2	428	603	175	1,032
G1M1S3	429	603	174	1,016
G1M2S3	428	602	174	1,016
G1M1S4	428	603	175	1,032
G1M2S4	427	602	175	1,032
G1M1S5	430	604	174	1,016
G1M2S5	428	603	175	1,032
G2M2S6	429	603	174	1,016
G2M2S7	428	603	175	1,032
G2M2S8	428	603	175	1,032
G2M2S9	429	603	174	1,016
G2M2S10	428	602	174	1,016
G3M1S11	428	602	174	1,016
G3M2S11	428	602	174	1,016
G3M1S12	429	603	174	1,016
G3M2S12	428	602	174	1,016
G3M1S13	428	602	174	1,016
G3M2S13	430	603	173	1,000
Gjennomsnitt	428.4	602.7	174.3	1.021
Standardavvik	0.75	0.55	0.56	0.009

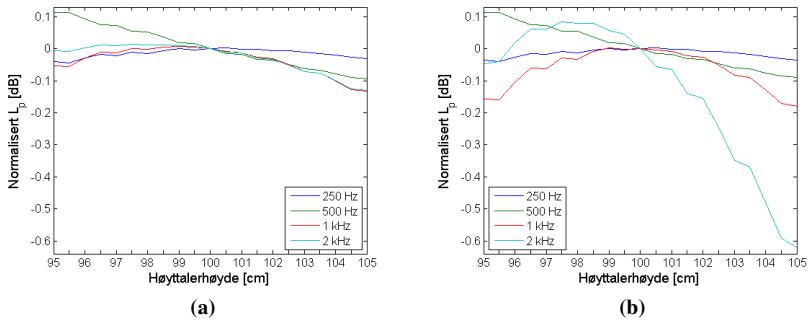
Tabell C.1: Antall sampel mellom direktelyd og refleksjon, samt beregnet avstand mellom høytaler og mikrofon

Tillegg D

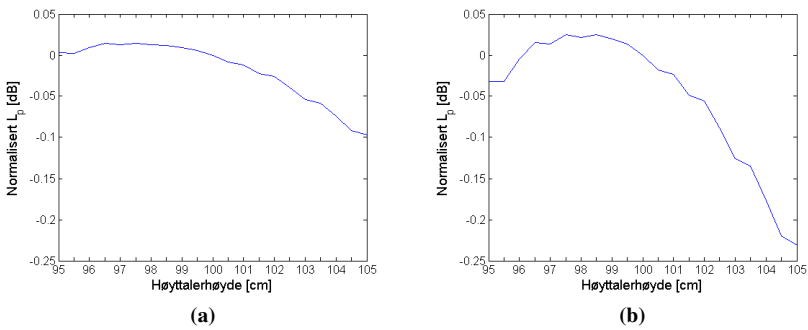
Måleoppsettets innvirkning



Figur D.1: Normalisert lydtrykknivå L_p , snitt av oktavbåndene 250 Hz til 2 kHz, som funksjon av avstanden mellom høyttaler og mikrofon med ulike høyttaler- og mikrofonhøyder med omnidireksjonell høyttaler (a) og direktiv høyttaler (b)



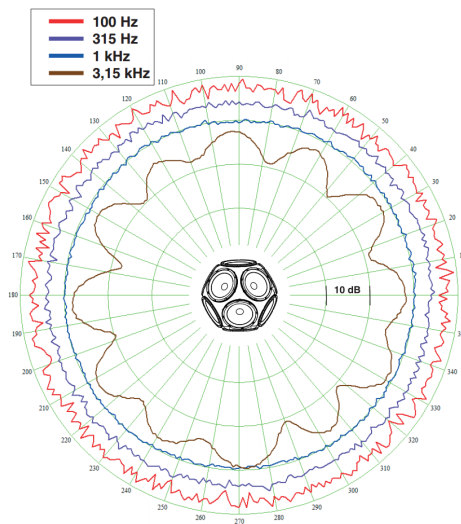
Figur D.2: Normalisert lydtrykknivå L_p som funksjon av høyttalerhøyde med omnidireksjonell høyttaler (a) og direktiv høyttaler (b)



Figur D.3: Normalisert lydtrykknivå L_p , snitt av oktavbåndene 250 Hz til 2 kHz, som funksjon av høyttalerhøyde med omnidireksjonell høyttaler (a) og direktiv høyttaler (b)

Tillegg E

Norsonic NOR276 direktivitet



Sound power in different directions for Nor276. The measurement is done in a horizontal plane through the centre of the loudspeaker. The graph shows the respons for a sinusoidal signal at 100 Hz, 315 Hz, 1 kHz and 3,15 kHz.

Figur E.1: Direktivitet i horisontalplanet til Norsonic NOR276 helkulehøytaler, figur hentet fra [18]

Matlabkode: Beregninger

Matlabkoden under beregner de ulike L_p og ST verdiene. `loadimp()` er en funksjon for å laste inn impulsresponser fra WinMLS i Matlab. Variablene G_{Strength} er i realiteten L_p .

```

1 Start = 423; % Ankomst direktelyd i sampel
2
3 Fs = 48000; % Samplingsfrekvens
4
5 % Tidsgrenser for ulike G verdier
6 LowerLowLimit = 1+Start; % Start G_{0-10}
7 UpperLowLimit = 10*Fs/1000+Start; % Slutt G_{0-10}
8 LowerHighLimit = 20*Fs/1000+Start; % Start G_{20-100}
9 UpperHighLimit = 100*Fs/1000+Start; % Slutt G_{20-100}
10 LowerTopLimit = 100*Fs/1000+Start; % Start G_{100-1000}
11 UpperTopLimit = 1000*Fs/1000+Start; % Slutt G_{100-1000}
12
13 %%
14
15 % Laster inn kalibreringsdata
16 load('../Gref.mat')
17
18 i = 0;
19 % Hoyttalerposisjoner
20 for S = 1:13
21     % Mikrofonsposisjoner
22     for M = 1:2
23         % Gruppe
24         if S ≤ 5
25             G = 1;
26         elseif (S ≥ 6) && (S ≤ 10)
27             G = 2;
28         elseif (S ≥ 11) && (S ≤ 13)
29             G = 3;
30         end
31

```

```

32     i = i + 1;
33     % Laster inn impulsresponser
34     [IR, Fs] = eval(['loadimp(''G' num2str(G) 'M' ...
35                     num2str(M) 'S' num2str(S) '.wmb'')']);
36     % Henter inn navn paa maaling
37     G_Strength.FileName{i,:} = ['G' num2str(G) 'M' ...
38                                 num2str(M) 'S' num2str(S)];
39     % Filterer impulsresponser
40     [filteredIR, F0] = OctaveFilter(IR,Fs);
41     % Beregner totalt G nivaa
42     Level(:,i) = 10*log10(sum(filteredIR.^2))' - ...
43                     Gref.Calib;
44
45     % Beregner ulike G verdier
46     G_Strength.G0_10(:,i) = 10*log10(sum(filteredIR( ...
47         LowerLowLimit:UpperLowLimit,:).^2))' - Gref.Calib;
48     G_Strength.G10_20(:,i) = 10*log10(sum(filteredIR( ...
49         UpperLowLimit:LowerHighLimit,:).^2))' - ...
50         Gref.Calib;
51     G_Strength.G20_100(:,i) = 10*log10(sum(filteredIR( ...
52         LowerHighLimit:UpperHighLimit,:).^2))' - ...
53         Gref.Calib;
54     G_Strength.G10_100(:,i) = 10*log10(sum(filteredIR( ...
55         UpperLowLimit:LowerTopLimit,:).^2))' - Gref.Calib;
56     G_Strength.G100_1000(:,i) = ...
57         10*log10(sum(filteredIR( ...
58             LowerTopLimit:UpperTopLimit,:).^2))' - Gref.Calib;
59
60     end
61 end
62
63 % Beregner support ST verdier
64 ST_Early = G_Strength.G20_100 - G_Strength.G0_10;
65 ST_Late = G_Strength.G100_1000 - G_Strength.G0_10;

```

Følgende funksjon er i stor grad hentet fra Matlab sine ressursider [19] og er en funksjon for å filtrere signaler i oktavbånd.

```

1 function [filteredIR, F0] = OctaveFilter(Impulse, Fs)
2 %OctaveFilter 1/1 okt. filter
3 % [filteredIR, F0] = OctaveFilter(Impulse, Fs) filtrerer en
4 % impulsrespons 'Impulse' med samplingfrekvensen 'Fs' i 10 ...
5 % oktavbaand
6 % fra 32 Hz til 16 kHz og returnerer filtrerte impulsresponser
7 % 'filteredIR' og deres oktavfrekvenser 'F0'
8 %
9 % Kilde:
10 %
11 % ...
12 % http://www.mathworks.se/products/dsp-system/examples.html?file=/...
13 % products/demos/shipping/dsp/octavedemo.html
14 %
15 % See also FDESIGN.OCTAVE, DESIGN, FILTER
16 %
17 % Filter spesifikasjon
18 BandsPerOctave = 1; % Antall baand per oktav

```

```
18 N = 6; % Filterorden
19 F0 = 1000; % Senterfrekvens, benyttes ikke for endelig filter
20
21 %%
22
23 f = fdesign.octave(BandsPerOctave,'Class ...
    1','N,F0',N,F0,Fs); % Spec
24 F0 = f.validfrequencies; % 1/1 okt. frekvensene
25 Nfc = length(F0);
26 for j = 1:Nfc,
27     f.F0 = F0(j);
28     Hd(j) = design(f,'butter'); % Lager okt. filter basert ...
        paa "f"
29 end
30
31 for j = 1:length(F0)
32     filteredIR(:,j) = filter(Hd(j),Impulse); % Filtrerer ...
        impulsen
33 end
34
35 end
```


Matlabkode: Simulering av gulvrefleksjon

Følgende kode beregner lydtrykknivået med ulikemåleoppsett, ulike høyttaler og mikrofonhøyder og avstanden mellom de. Nivået er et resultat av direktelyden og en perfekt spekulær gulvrefleksjon.

```

1 %ReflectionSIM - Simulering av gulvrefleksjon
2 % Skriptet beregner resulterende impulser ved ulike ...
   avstander mellom
3 % mikrofon-gulv, hoyttaler-gulv og mikrofon-hoyttaler ...
   pseudoanalytisk.
4 % Impulsene som blir benyttet er fra maalte ...
   impulsresponser i ekkofritt
5 % av Norsonic NOR276. Impulsene er fra 0-250 grader med ...
   12.5 graders
6 % intervaller. I skriptet blir det interpolert mellom ...
   disse der det er
7 % nødvendig.
8 %
9 %Eksempel
10 % L = [0.5 1 1.5]; % - Avstand mellom hoyttaler og mikrofon
11 % Sh = [0.9 1 1.1]; % - Avstand mellom hoyttaler og gulv
12 % Mh = [0.9 1 1.1]; % - Avstand mellom mikrofon og gulv
13 %
14 % Dette vil beregne resulterende impulsrespons naar ...
   avstanden mellom
15 % mikrofon og hoyttaler varierer mellom 0.5 og 1.5 meter ...
   med 0.5 meters
16 % intervaller og naar mikrofonhoyde og hoyttalerhoyde ...
   varierer mellom
17 % 0.9 og 1.1 med 0.1 meters intervaller.
18 %
19 %Dette er ekstremt tidkrevende, antall iterasjoner er
20 % (length(L)*length(Sh)*length(Mh)), og resultatene lagres ...

```

```

        derfor i
21 % Results.mat
22
23 %% Input
24
25 L = [0.5 1 1.5]; % - Avstand mellom hoyttaler og mikrofon
26 Sh = [0.9 1 1.1]; % - Avstand mellom hoyttaler og gulv
27 Mh = [0.9 1 1.1]; % - Avstand mellom mikrofon og gulv
28
29 %% Kalkulasjoner
30
31 Iterasjoner = length(L)*length(Mh)*length(Sh);
32
33 % Laster inn impulsresponsen og vinkler maalt i ekkofritt
34 load Impulse
35
36 % Laster inn kalibreringsverdier i oktavbaand
37 load('Gref.mat')
38
39 Iterasjon = 0;
40 for iL = 1:length(L)
41     for iSh = 1:length(Sh)
42         for iMh = 1:length(Mh)
43
44             % Aktuelle avstander
45             Placement(iL,iSh,iMh,:) = [L(iL), Sh(iSh), ...
46                                     Mh(iMh)];
47
48             % Kalkulerer avstander, tid og vinkel for ...
49             direkte og reflektert
50             [Time, Angle, Dist] = GetTimeDistAngle(L(iL), ...
51             Sh(iSh), Mh(iMh));
52             Direct.Time(iL,iSh,iMh) = Time(1);
53             Reflection.Time(iL,iSh,iMh) = Time(2);
54             Direct.Angle(iL,iSh,iMh) = Angle(1);
55             Reflection.Angle(iL,iSh,iMh) = Angle(2);
56             Direct.Dist(iL,iSh,iMh) = Dist(1);
57             Reflection.Dist(iL,iSh,iMh) = Dist(2);
58
59             % Kalkulerer impulsrespons for direkte og ...
60             reflektert lyd
61             [Reflection.Impulse, Direct.Impulse] = ...
62             GetImpulses(Time, Angle, Impulse);
63
64             % Summerer impulsresponsene til direkte og ...
65             reflektert lyd
66             % med lydtap
67             Received.Impulse = ...
68                 Reflection.Impulse.*(2.7/Dist(2)) + ...
69                 Direct.Impulse.*(2.7/Dist(1));
70
71             % Oktavbaandsfiltrerer impulsresponsene
72             Received.OctFiltered = ...
73                 OctaveFilter(Received.Impulse,Impulse.Fs(1));
74
75             % Beregner oktavbaandsnivaa
76             Received.OctLevel = ...

```

```

10*log10(sum(Received.OctFiltered.^2,1));
68
69         % Beregner G
70         Received.G(iL,iSh,iMh,:) = ...
            squeeze(Received.OctLevel) - Gref.Calib';
71
72     end
73 end
74 end
75
76 save('Results','Received','Reflection','Direct','Placement');

```

Følgende funksjon beregner tiden lyden bruker på å nå mikrofonen direkte og via gulvet, samt avstanden lyden har forflyttet seg. Den beregner også utgangsvinkelen fra høyttaleren for å ta hensyn til høyttalerens direktivitet. Disse variablene blir beregnet basert på høyttalerens og mikrofonens høyde og avstanden mellom de.

```

1 function [Time, Angle, Dist] = GetTimeDistAngle(L, Sh, Mh)
2 %GetTimeDistAngle
3 % [Time, Angle, Dist] = GetTimeDistAngle(L, Sh, Mh) kalkulerer
4 % avstander 'Dist', tid 'Time' og vinkler 'Angle' for ...
   direktelyd
5 % og gulvrefleksjon basert paa avstanden mellom hoyttaler ...
   og mikrofon
6 % 'L', hoyden til hoyttaler 'Sh' og hoyden til mikrofon 'Mh'.
7 %
8 % Time(1) er tiden det tar for direktelyden aa naa mikrofonen
9 % Time(2) er tiden det tar for gulvrefleksjonen aa naa ...
   mikrofonen
10 %
11
12 c = 343; % Lydfart
13
14 % Avstand direktelyd
15 Dist(1) = sqrt(L.^2 + (Sh - Mh).^2);
16 % Avstand gulvrefleksjon
17 Dist(2) = sqrt(Sh.^2 + (L/((Mh/Sh)+1)).^2) + sqrt(Mh.^2 + ...
   (L - (L/((Mh/Sh)+1))).^2);
18
19 Time(1) = Dist(1)/c; % Tid direktelyd
20 Time(2) = Dist(2)/c; % Tid gulvrefleksjon
21
22 Angle(1) = atand((Sh - Mh)/L); % Vinkel direktelyd
23 Angle(2) = 90 - atand(L/(Mh + Sh)); % Vinkel gulvrefleksjon
24
25 % Hvis vinkelen er negativ pluss paa 360 grader
26 if Angle(1) < 0
27     Angle(1) = Angle(1) + 360;
28 end
29 if Angle(2) < 0
30     Angle(2) = Angle(2) + 360;
31 end
32
33 end

```

Følgende matlabfunksjon finner impulsresponsene som en høyttaler ville sendt ut ved ulike vinkler på grunn av ulike måleoppsett. Impulsresponsene i de ulike vinklene blir funnet ved interpolasjon av målinger i ekkofritt ved 12.5 graders intervaller. Målingene fra ekkofritt er gjort i horisontalplanet og blir brukt som impulsresponsene i vertikalplanet.

```
1 function [Reflection, Direct] = GetImpulses(Time, Angle, ...
2     Impulse)
3 %GetImpulses
4 % [Reflection, Direct] = GetImpulses(Time,Angle,Impulse) ...
5     finner
6 % impulsresponsene i filen 'Impulse.mat' som stemmer ...
7     overens med
8 % vinkelen 'Angle', hvis denne ikke eksisterer ...
9     interpoleres det med
10 % vekt paa 'Angle' fra de naermeste impulsresponsene ift. ...
11     den vinkelen.
12 % Tidsforsinkelser 'Time' blir lagt til impulsresponsene. ...
13     'Reflection'
14 % og 'Direct' er resulterende impulsresponser for henholdsvis
15     % gulvrefleksjonen og direktelyden
16
17 % Direktelyd
18 if any(Angle(1) == Impulse.Angle) % Hvis en maalt vinkel
19     % Legger til forsinkelse
20     Direct = [zeros(1,round(Time(1)*Impulse.Fs(1))) ...
21         Impulse.Original(find(Angle(1) == Impulse.Angle),:)];
22 else % Hvis en ikke maalt vinkel
23     % Legger til forsinkelse og interpolerer
24     Direct = [zeros(1,round(Time(1)*Impulse.Fs(1))) ...
25         interp1(Impulse.Angle,Impulse.Original,Angle(1),'spline')];
26 end
27
28 % Refletert lyd
29 if any(Angle(2) == Impulse.Angle) % Hvis en maalt vinkel
30     % Legger til forsinkelse
31     Reflection = [zeros(1,round(Time(2)*Impulse.Fs(1))) ...
32         Impulse.Original(find(Angle(2) == Impulse.Angle),:)];
33 else % Hvis en ikke maalt vinkel
34     % Legger til forsinkelse og interpolerer
35     Reflection = [zeros(1,round(Time(2)*Impulse.Fs(1))) ...
36         interp1(Impulse.Angle,Impulse.Original,Angle(2),'spline')];
37 end
38
39 % Forlenger impulsresponsene slik at alle er like lange ...
40     (Legger til nuller)
41 Direct = [Direct ...
42     zeros(1,4000-(length(Direct)-length(Impulse.Original)))]];
43 Reflection = [Reflection ...
44     zeros(1,4000-(length(Reflection)-length(Impulse.Original)))]];
```

Matlabkodene uten bruk av høyttalerdirektivitet er omtrent identisk til de kodene over, forskjellen ligger i impulsresponsene som blir benyttet og fraværet av interpolasjon mellom impulsresponser. Impulsresponsene benyttet er et

gjennomsnitt av de 29 målinger i ekkofritt.

Tillegg **H**

Måleresultater

	Frekvens [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
G1M1S1	4.94	9.76	8.07	8.33	8.10	10.75
G1M2S1	5.18	9.59	8.01	8.34	8.44	11.28
G1M1S2	4.85	9.73	8.14	8.20	8.02	10.38
G1M2S2	5.23	9.61	8.06	8.41	8.70	11.55
G1M1S3	4.94	9.74	8.02	8.29	8.20	10.74
G1M2S3	5.26	9.60	8.09	8.37	8.45	11.12
G1M1S4	5.00	9.69	8.22	8.30	7.57	10.13
G1M2S4	5.40	9.53	8.11	8.34	8.48	11.27
G1M1S5	5.04	9.45	7.96	8.20	7.99	10.42
G1M2S5	5.14	9.54	7.99	8.27	8.37	11.02
G2M1S6	5.04	8.73	7.71	7.08	5.38	4.99
G2M2S6	4.73	10.14	8.30	8.31	8.32	10.23
G2M1S7	5.03	8.90	7.69	7.09	4.80	5.45
G2M2S7	4.86	10.17	8.31	8.28	8.17	10.35
G2M1S8	4.98	8.96	7.66	7.01	6.49	5.21
G2M2S8	4.84	10.17	8.31	8.32	8.31	10.20
G2M1S9	5.17	9.32	7.56	6.99	5.54	5.00
G2M2S9	5.03	9.88	7.96	7.96	7.94	10.58
G2M1S10	5.14	9.32	7.54	6.98	5.43	5.99
G2M2S10	5.29	9.92	7.96	8.12	8.21	10.54
G3M1S11	5.22	9.33	8.01	8.17	7.62	10.16
G3M2S11	5.10	9.35	7.88	7.94	8.03	9.98
G3M1S12	4.96	9.48	7.99	8.11	8.46	10.85
G3M2S12	5.09	9.45	7.93	8.16	8.09	10.57
G3M1S13	5.45	9.40	8.06	8.25	8.32	10.73
G3M2S13	4.83	9.31	7.81	8.06	8.21	10.62

Tabell H.1: Lydtrykknivå $L_{p,0-10}$ i alle måleposisjoner i Olavshallen

	Frekvens [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
G1M1S1	-5.55	-7.55	-6.45	-6.66	-5.99	-7.48
G1M2S1	-9.14	-8.58	-7.11	-5.91	-5.41	-9.56
G1M1S2	-7.45	-7.60	-5.73	-7.26	-6.36	-9.49
G1M2S2	-8.44	-6.51	-5.58	-5.64	-5.64	-8.69
G1M1S3	-8.01	-7.58	-7.01	-5.57	-7.61	-9.13
G1M2S3	-7.94	-8.88	-6.25	-7.82	-7.07	-7.65
G1M1S4	-4.19	-8.10	-7.86	-6.18	-6.43	-9.40
G1M2S4	-4.04	-5.47	-5.53	-6.07	-6.09	-7.48
G1M1S5	-5.41	-7.37	-5.39	-7.35	-5.01	-7.89
G1M2S5	-4.82	-4.89	-4.50	-5.63	-4.52	-6.29
G2M1S6	-7.40	-6.85	-4.89	-6.33	-3.91	-5.77
G2M2S6	-5.27	-4.42	-4.74	-4.77	-4.11	-6.19
G2M1S7	-3.39	-4.58	-5.33	-5.75	-4.26	-6.64
G2M2S7	-4.09	-5.17	-5.11	-5.06	-4.03	-5.43
G2M1S8	-7.96	-6.83	-6.26	-5.57	-4.52	-5.18
G2M2S8	-5.42	-5.71	-4.19	-4.63	-5.00	-5.98
G2M1S9	-4.59	-5.60	-8.03	-4.58	-2.45	-5.28
G2M2S9	-6.85	-2.63	-2.38	-4.21	-3.31	-5.74
G2M1S10	-4.30	-2.17	-6.25	-5.28	-4.01	-5.78
G2M2S10	-4.52	-2.58	-4.59	-4.17	-2.87	-5.28
G3M1S11	-3.82	-3.19	-4.51	-5.65	-3.62	-5.65
G3M2S11	-5.72	-6.42	-5.33	-4.64	-5.39	-5.09
G3M1S12	-5.60	-4.85	-4.75	-5.66	-4.64	-7.02
G3M2S12	-4.85	-5.56	-3.73	-6.31	-6.72	-7.21
G3M1S13	-4.98	-5.46	-5.17	-5.85	-3.70	-6.12
G3M2S13	-4.31	-3.33	-3.97	-4.87	-2.80	-5.10

Tabell H.2: Lydtrykknivå $L_{p,20-100}$ i alle måleposisjoner i Olavshallen

	Frekvens [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
G1M1S1	-10.49	-17.32	-14.52	-14.99	-14.09	-18.23
G1M2S1	-14.33	-18.16	-15.12	-14.25	-13.85	-20.83
G1M1S2	-12.30	-17.33	-13.86	-15.46	-14.38	-19.86
G1M2S2	-13.67	-16.12	-13.64	-14.05	-14.34	-20.24
G1M1S3	-12.95	-17.32	-15.03	-13.87	-15.80	-19.87
G1M2S3	-13.21	-18.48	-14.33	-16.18	-15.52	-18.77
G1M1S4	-9.19	-17.79	-16.08	-14.47	-13.99	-19.53
G1M2S4	-9.45	-15.00	-13.64	-14.41	-14.57	-18.75
G1M1S5	-10.45	-16.82	-13.35	-15.55	-13.00	-18.31
G1M2S5	-9.97	-14.43	-12.49	-13.90	-12.89	-17.31
G2M1S6	-12.44	-15.59	-12.59	-13.41	-9.30	-10.76
G2M2S6	-10.01	-14.56	-13.04	-13.08	-12.43	-16.42
G2M1S7	-8.42	-13.49	-13.02	-12.83	-9.06	-12.09
G2M2S7	-8.96	-15.34	-13.41	-13.34	-12.21	-15.77
G2M1S8	-12.94	-15.79	-13.93	-12.58	-11.01	-10.39
G2M2S8	-10.26	-15.89	-12.50	-12.95	-13.31	-16.18
G2M1S9	-9.77	-14.92	-15.59	-11.57	-7.98	-10.28
G2M2S9	-11.88	-12.51	-10.34	-12.18	-11.25	-16.31
G2M1S10	-9.43	-11.49	-13.79	-12.26	-9.43	-11.78
G2M2S10	-9.81	-12.51	-12.55	-12.28	-11.07	-15.82
G3M1S11	-9.04	-12.52	-12.52	-13.83	-11.24	-15.82
G3M2S11	-10.82	-15.77	-13.21	-12.58	-13.42	-15.07
G3M1S12	-10.57	-14.33	-12.74	-13.77	-13.10	-17.87
G3M2S12	-9.94	-15.01	-11.66	-14.47	-14.81	-17.78
G3M1S13	-10.43	-14.86	-13.23	-14.11	-12.03	-16.85
G3M2S13	-9.15	-12.64	-11.79	-12.93	-11.01	-15.72

Tabell H.3: Support ST_{Early} i alle måleposisjoner i Olavshallen

	Frekvens [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
G1M1S1	-8.70	-7.26	-5.62	-6.61	-7.41	-11.66
G1M2S1	-6.48	-6.78	-6.34	-6.72	-6.88	-11.96
G1M1S2	-7.17	-6.40	-6.52	-7.15	-7.79	-12.32
G1M2S2	-6.53	-6.49	-6.41	-6.67	-7.29	-11.95
G1M1S3	-9.53	-6.17	-6.26	-7.10	-7.03	-11.56
G1M2S3	-6.28	-5.88	-5.89	-6.22	-7.20	-12.25
G1M1S4	-7.76	-6.78	-6.47	-6.73	-7.02	-11.01
G1M2S4	-8.37	-7.36	-6.42	-6.27	-6.12	-10.81
G1M1S5	-6.62	-5.01	-6.38	-6.80	-6.36	-10.94
G1M2S5	-7.32	-5.98	-6.44	-6.51	-6.84	-10.96
G2M1S6	-6.77	-5.87	-4.84	-5.71	-5.60	-9.62
G2M2S6	-5.81	-4.31	-4.88	-5.79	-5.58	-9.44
G2M1S7	-6.35	-6.38	-4.97	-5.80	-6.25	-9.07
G2M2S7	-7.42	-6.10	-5.45	-5.83	-6.14	-9.33
G2M1S8	-7.77	-7.68	-6.25	-6.34	-5.85	-8.75
G2M2S8	-5.78	-7.28	-5.45	-6.12	-5.96	-8.77
G2M1S9	-9.33	-6.25	-5.33	-5.69	-6.15	-9.39
G2M2S9	-5.34	-3.34	-5.63	-5.66	-5.86	-9.28
G2M1S10	-9.51	-6.66	-6.01	-6.03	-5.32	-8.87
G2M2S10	-6.05	-5.32	-5.96	-5.85	-5.89	-9.28
G3M1S11	-7.74	-6.58	-6.22	-6.02	-5.97	-9.04
G3M2S11	-6.36	-5.94	-5.78	-6.15	-5.71	-9.19
G3M1S12	-7.73	-6.40	-6.88	-6.25	-5.65	-9.53
G3M2S12	-7.33	-5.96	-5.85	-6.74	-6.25	-9.70
G3M1S13	-8.19	-6.61	-5.47	-6.52	-5.63	-8.78
G3M2S13	-7.40	-5.64	-5.40	-5.11	-4.85	-9.15

Tabell H.4: Lydtrykknivå $L_{p,100-1000}$ i alle måleposisjoner i Olavshallen

	Frekvens [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
G1M1S1	-13.64	-17.03	-13.69	-14.94	-15.50	-22.41
G1M2S1	-11.67	-16.37	-14.35	-15.06	-15.32	-23.23
G1M1S2	-12.02	-16.13	-14.66	-15.36	-15.82	-22.70
G1M2S2	-11.76	-16.10	-14.46	-15.09	-15.99	-23.50
G1M1S3	-14.47	-15.91	-14.28	-15.39	-15.23	-22.30
G1M2S3	-11.54	-15.48	-13.98	-14.58	-15.65	-23.37
G1M1S4	-12.77	-16.47	-14.70	-15.03	-14.59	-21.15
G1M2S4	-13.77	-16.89	-14.52	-14.62	-14.60	-22.08
G1M1S5	-11.66	-14.46	-14.34	-15.00	-14.35	-21.36
G1M2S5	-12.46	-15.52	-14.42	-14.78	-15.21	-21.98
G2M1S6	-11.81	-14.60	-12.55	-12.80	-10.98	-14.61
G2M2S6	-10.54	-14.44	-13.17	-14.10	-13.90	-19.67
G2M1S7	-11.37	-15.28	-12.66	-12.88	-11.05	-14.52
G2M2S7	-12.29	-16.27	-13.75	-14.12	-14.31	-19.67
G2M1S8	-12.75	-16.64	-13.92	-13.34	-12.34	-13.96
G2M2S8	-10.62	-17.45	-13.76	-14.43	-14.26	-18.97
G2M1S9	-14.50	-15.57	-12.90	-12.68	-11.69	-14.39
G2M2S9	-10.37	-13.22	-13.58	-13.62	-13.80	-19.86
G2M1S10	-14.64	-15.99	-13.55	-13.01	-10.75	-14.86
G2M2S10	-11.34	-15.24	-13.92	-13.97	-14.09	-19.82
G3M1S11	-12.96	-15.91	-14.22	-14.19	-13.58	-19.20
G3M2S11	-11.46	-15.29	-13.66	-14.09	-13.74	-19.17
G3M1S12	-12.70	-15.88	-14.88	-14.36	-14.10	-20.38
G3M2S12	-12.42	-15.41	-13.79	-14.91	-14.33	-20.27
G3M1S13	-13.64	-16.01	-13.53	-14.77	-13.96	-19.52
G3M2S13	-12.24	-14.95	-13.21	-13.17	-13.06	-19.77

Tabell H.5: Support ST_{Late} i alle måleposisjoner i Olavshallen

Tillegg **I**

Kartlegging av risikofylt aktivitet og risikovurdering

NTNU		 <h2 style="margin: 0;">Kartlegging av risikofylt aktivitet</h2>		Utarbeidet av		Nummer		Dato	
				HMS-avd.		HMSRV2801		22.03.2011	
				Godkjent av		Side		Erstatter	
				Rektor				01.12.2006	

Enhet: _____ Lydmåling i konsertsal _____ Dato: 28.05.2013
 Veileder Bård Støffingsdal

Linjeleder: (ansv. veileder, faglig ansvarlig)
 Deltakere ved kartleggingen (m/ funksjon):
 (Ansv. veileder, student, evt. medveiledere, evt. andre m. kompetanse) Bård Støffingsdal (Veileder), Christopher Gehe (Student)
 Kort beskrivelse av hovedaktivitet/hovedprosess: Masteroppgave student Christopher Gehe. Måling av ST på scenen i konsertsaler.
 Signaturer: *Bård Støffingsdal* *Christopher Gehe*

ID nr.	Aktivitet/prosess	Ansvarlig	Eksisterende dokumentasjon	Eksisterende sikringstiltak	Lov, forskrift o.l.	Kommentar
1	Lydmåling	Christopher Gehe	Brukermanual for høytaler	Hørselvern, begrenset eksponeringstid	FOR-2006-04-26-456	Høytalerens lydnivå kan justeres.
2						
3						
4						
5						
6						

NTNU	<h1>Risikovurdering</h1>			Utarbeidet av	Nummer	Dato
HMS/KS				HMS-avd.	HMSRV2603	04.02.2011
		Godkjent av	Side			
		Rektor	09.02.2010			

Enhet: Lydmåling i konsertsal Dato: 28.05.2013

Linjeleder: (ansv. veileder, faglig ansvarlig) Veileder Bård Støfringsdal

Deaktører ved risikovurderingen (m/ funksjon):

(Ansv. veileder, student, evt. medveiledere, evt. andre m. kompetanse)

Risikovurderingen gjelder hovedaktivitet:

Signaturer: Bård Støfringsdal Christopher Gehe

Bård Støfringsdal (Veileder), Christopher Gehe (Student)

Masteroppgave student Christopher Gehe. Måling av ST på scenen i konsertsaler.

ID nr.	Aktivitet/prosess fra kartleggingsskjemaet	Mulig uønsket hendelse	Vurdering av sannsynlighet (1-5)	Vurdering av konsekvens			Risiko-verdi (menneske)	Kommentarer/status Forslag til tiltak
				Menneske (A-E)	Ytre miljø (A-E)	Øk./materiell (A-E)		
1	Lydmåling	Redusert hørsel og andre hørselsproblemer	1	C	A	A	A	Risikoverdien for hørselskader er vanskelig å gradere med en slik vurdering
2								
3								
4								
5								
6								