

Flytende tak i en konsertsal

Mathias Sandvær Eftevand

Master i fysikk og matematikk

Innlevert: Mai 2013

Hovedveileder: Ingve Simonsen, IFY

Medveileder: Ulf Kristiansen, Institutt for elektronikk og telekommunikasjon

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for fysikk

Oppgavetekst

Undersøk med numerisk simulering og målinger den variasjon i romakustiske parametre som kan oppnås i en parallelepipedisk konsertsal med et fritthengende tak med justerbar høyde, hvor koplingen mellom volum over og under taket varieres ved å variere arealet av åpning mellom tak og vegger rundt rommet. Salens romakustiske egenskaper karakteriseres først og fremst ved vanlig brukte romakustiske parametre i et antall posisjoner i sal og på podium, men det skal også studeres komplette impulsresponsen og STI for å se etter spesielle effekter. Responsene beregnes ved tilgjengelig strålegangsprogram, men suppleres og korrigeres med målinger i modell, spesielt for å studere innvirkning av diffraksjon på koplingen mellom volum over og under det hengende tak.

Formålet med studien er å klargjøre potensialet for denne type løsning som flerbrukssal.

Abstract

In this master thesis the effect on the room acoustical parameters, by having a freely hanging floating ceiling with openings against the side walls in a concert hall, has been studied. The coupling between the room above and below the floating ceiling were adjusted by changing the height from the floor to the floating ceiling, and the area of the opening between the floating ceiling and the side walls.

The parameters were computed by the acoustical computation software CATT-acoustics. The numerical computations were supplied by a scale model measurement, and auralizations of music and speech in CATT-acoustics.

The results indicates that the largest effect when decreasing the height of the floating ceiling, is the increase in clarity C_{80} and the speech transmission index STI . This may also be used to increase the clarity in music, since the early decay time EDT decreases when lowering the floating ceiling. The reverberation time T seemed, in the scale model measurement, to increase a bit at the lower frequencies, when lowering the floating ceiling. The measurement indicates also that the reverberation time decreases a bit at the higher frequencies by lowering the floating ceiling.

One of the expectations from the solution with a floating ceiling, was that there would be more sound coming from the side of the listener, since sound that is travelling back from the room above the floating ceiling will hit the listener from the sides. This was not the case for the calculated lateral factor LF , which decreases by having a floating ceiling. This may be solved by having side balconies or reflectors in the concert hall, to get early side reflections back to the listener. The ratio between late lateral and total energy seems to increase in the calculations, but the *level* of the late lateral sound decreases. The total effect on the parameter late lateral energy LG , regarding the effect of listener envelopment, will therefore also seem to decrease by having a floating ceiling in the concert hall.

The solution with a floating ceiling in a concert hall is an exciting solution, with some clear advantages as a multi purpose hall for different acoustical conditions, especially the fact that absorption is not used. Hence the early energy in the impulse response is not reduced. It is therefore desirable to further investigate this in a more detailed study.

Sammendrag

I denne masteroppgaven har det blitt sett på hva som skjer med de vanlige romakustiske parametrene ved å ha et fritthengende flytende tak med åpning mot sideveggene i en konsertsal. Koplingen mellom rommet over og under det flytende taket ble regulert ved å endre avstanden mellom gulvet og det flytende taket, og arealet av åpningen mellom det flytende taket og sideveggene.

Parametrene ble beregnet med det akustiske beregningsprogrammet CATT-acoustics. Disse beregningene ble supplert av en skalamodellmåling, samt auraliseringer av musikk og tale i CATT-acoustics.

Resultatene tyder på at den største effekten ved et slikt fritthengende tak, når avstanden mellom gulvet og det flytende taket senkes, er økningen i klarhet C_{80} og tale tydelighet STI . Dette kan også brukes til å øke tydeligheten på musikk, da den tidlige etterklangstiden EDT synker ved å senke det flytende taket. Etterklangstiden T så, i følge skalamålingen, ut til å øke litt for de lave frekvensene, ved å senke det flytende taket. Målingen viste også at etterklangstiden sank litt for de høye frekvensene ved å redusere avstanden mellom gulvet og det flytende taket.

En av forventningene til løsningen var at man ville få mer sideinnfallende lyd på publikum, på grunn av at lyd som kommer tilbake fra rommet over det flytende taket vil komme fra sidene. Dette var ikke tilfelle for den beregnede lateralfaktoren LF , som synker ved å ha et flytende tak. Dette kan trolig løses ved å ha "kunstige" sidebalkonger i salen, for å få tidlige siderefleksjoner tilbake til publikum. Forholdet mellom *sen* lateral- og totalenergi så ifølge beregningene ut til å øke, men *nivået* på den sene laterale lyden synker. Den totale effekten på parameteren *sen* lateralenergi LG , som omhandler aspektet "listener envelopment", ser derfor også ut til å synke med en slik type løsning.

Løsningen med et flytende tak i en konsertsal er derfor en spennende løsning, som har noen klare fordeler som flerbrukssal til forskjellige akustiske forhold, spesielt at det ikke brukes ekstra absorpsjon. Det gjør at den tidlige energien i impulsresponsen ikke reduseres. Det vil derfor være ønskelig å studere dette videre i en mer detaljert studie av en slik type løsning.

Forord

Forfatteren av denne oppgaven ønsker å rette en stor takk til professor emeritus Asbjørn Krokstad som foreslo denne spennende masteroppgaven. Han skal også ha takk for å ha bidratt med mye kunnskap og smittende entusiasme gjennom hele prosessen.

Veileder på akustikk, professor ved NTNU Ulf Kristiansen, skal ha en stor takk for meget god veiledning igjennom hele oppgaven. Professor Ingve Simonsen fortjener takk for at han ville være veilederen på fysikk.

Andre som bør takkes er avdelingsingeniør Tim Cato Netland som har vært en stor hjelp med utstyr til skalamodellmålingen. En takk utrekkes også til medstudent Jakob Vennerød for god hjelp med å bygge skalamodellen.

Innhold

1	Introduksjon	1
2	Teori	3
2.1	Parametre for det flytende taket	3
2.2	Akustiske parametre	5
2.2.1	Etterklangstid, T	5
2.2.2	Tidlig etterklangstid, EDT	6
2.2.3	Klarhet (eng. Clarity), C_{80}	6
2.2.4	Taletydighet, STI	6
2.2.5	Lateralfaktor, LF	7
2.2.6	Sen lateralenergi, LG	7
2.3	CATT-acoustics	8
2.3.1	"Image Source Method" (ISM) - Speilkildemetoden	8
2.3.2	Ray tracing - strålegang	8
2.3.3	Cone tracing - strålegang med kjegler	9
2.3.4	Kantdiffraksjon	9
2.3.5	Parametre i beregningen	9
3	Beregning i CATT-acoustics	11
3.1	Metode	11
3.1.1	Modell	11
3.1.2	Instillinger i CATT	14
3.2	Resultater og diskusjon	15
3.2.1	Beregnete Schröderkurver ved variasjon i A og h	15
3.2.2	Beregnet etterklangstid, T	18
3.2.3	Beregnet tidlig etterklangstid, EDT	20
3.2.4	Beregnet klarhet, C_{80}	22
3.2.5	Beregnet taletydighetsindeks, STI	24
3.2.6	Beregnet lateralfaktor, LF	24
3.3	Sen lateralenergi LG	26
3.3.1	Metode	26
3.3.2	Beregnet modifisert sen lateralenergi LG_{mod}	26
3.3.3	Sen (lateral/total)-energi	28
3.3.4	Beregnet sen (lateral/total)-energi	28

4	Måling på skalamodell	31
4.1	Metode	31
4.1.1	Valg av rom og flytende tak	31
4.1.2	Utstyr	32
4.1.3	Målemetode	35
4.1.4	Beregningsmetode	38
4.1.5	Beregning av lateralfaktoren LF	38
4.2	Resultater	41
4.2.1	Signal- til støyforhold i målinger	41
4.2.2	Målte Schröderkurver ved variasjon i A og h	43
4.2.3	Målt etterklangstid, T	46
4.2.4	Målt tidlig etterklangstid, EDT	48
4.2.5	Målt klarhet, C_{80}	50
4.2.6	Målt lateralfaktor, LF	52
4.2.7	Målt modifisert sen lateralenergi LG_{mod}	54
4.2.8	Målt sen (lateral/total)-energi	56
5	Auralisering i CATT-acoustics	59
5.1	Metode	59
5.2	Resultat	59
5.2.1	Hørbare effekter	60
6	Samlet diskusjon	61
6.1	Klarhet og taetydelighet	61
6.2	Etterklangstid	62
6.3	Lateralfaktor	62
6.4	Usikkerhetsmomenter	63
6.4.1	CATT-beregning	63
6.4.2	Skalamåling	63
6.5	Videre arbeid	64
7	Konklusjon	65
A	Vedlegg	A1
A.1	LG_mod.m	A1
A.2	late_ratio.m	A2
A.3	loadimp_changeFS.m	A3
A.4	calibration.m	A8
A.5	dipole.m	A9
A.6	LG_mod_winmls.m	A10
A.7	late_ratio_winmls.m	A11
A.8	oktfilt.m	A12

Figurer

2.1	De to variable parametrene A og h for det flytende taket	4
2.2	Lineært fall av lydtrykksnivå over tid på logaritmisk skala	5
2.3	Speilkildemetoden	8
3.1	CATT-modell 2D	12
3.2	CATT-modell 3D	13
3.3	CATT: Schröderkurver for $h = 0,25, 0,50$ og $0,75$ ved $A = 0,80$ ved 1 kHz	16
3.4	CATT: Schröderkurver for $A = 0,40, 0,60$ og $0,80$ ved $h = 0,25$ ved 1 kHz	17
3.5	CATT: Beregnet etterklangstid T ved $A = 0,40, 0,60$ og $0,80$ og variasjon i h	19
3.6	CATT: Beregnet tidlig etterklangstid EDT ved $A = 0,40, 0,60$ og $0,80$ og variasjon i h	21
3.7	CATT: Beregnet klarhet C_{80} ved $A = 0,40, 0,60$ og $0,80$ og variasjon i h	23
3.8	CATT: Beregnet taletydighetsindeks STI	24
3.9	CATT: Beregnet lateralfaktor LF ved $A = 0,40, 0,60$ og $0,80$ og variasjon i h	25
3.10	CATT: Beregnet sen lateralfaktor LF_{sen} ved $A = 0,40, 0,60$ og $0,80$ og variasjon i h	27
3.11	CATT: Beregnet sen (lateral/total)-energi ved $A = 0,40, 0,60$ og $0,80$ og variasjon i h	29
4.1	Sponplatene blir plassert oppå stilaset ved maksimal høyde	32
4.2	Bilde av utstyr som ikke er standardutstyr	34
4.3	Oversikt over skalamodellen med høyttalerplassering og måleposisjoner	36
4.4	Testmåling på skalamodell	37
4.5	Impulsresponsen til åttetallsmikrofon nr. 7 ved $A = 0,86$ og $h = 0,75$ ved 125 Hz	39
4.6	Skalamåling: Schröderkurver for $h = 0,30, 0,50$ og $0,75$ ved $A = 0,86$	44
4.7	Skalamåling: Schröderkurver for $A = 0,40, 0,60$ og $0,86$ ved $h = 0,30$	45
4.8	Skalamåling: Målt etterklangstid T ved $A = 0,40, 0,60$ og $0,86$ og variasjon i h	47
4.9	Skalamåling: Målt tidlig etterklangstid EDT ved $A = 0,40, 0,60$ og $0,86$ og variasjon i h	49
4.10	Skalamåling: Målt klarhet C_{80} ved $A = 0,40, 0,60$ og $0,86$ og variasjon i h	51

4.11 Skalamåling: Målt lateralfaktor LF ved $A = 0,40, 0,60$ og $0,86$ og variasjon i h	53
4.12 Skalamåling: Målt modifisert sen lateralenergi LG_{mod} ved $A = 0,40, 0,60$ og $0,80$ og variasjon i h	55
4.13 Skalamåling: Målt sen (lateral/total)-energi ved $A = 0,40, 0,60$ og $0,80$ og variasjon i h	57

Introduksjon

Nesten alle nye konsertsaler som bygges i dag har muligheter for å variere akustikken. Slike flerbrukssaler kan derfor brukes til flere forskjellige formål og musikksjangre. Skulle det i en mindre by vært ett eget lokale for alle de forskjellige akustiske behov slik som symfonisk musikk, opera, kammermusikk, populærmusikk og konferanser, ville dette blitt veldig dyrt. Å kunne bruke samme konsertsal til flere arrangementer er derfor meget økonomisk gunstig. Dagens kulturliv består av et stort mangfold av forskjellige musikksjangre som krever hver sin akustikk i konsertlokalet. Behovet for flerbrukssaler er derfor større enn noen gang.

Etterklangstiden i en konsertsal styres primært av to faktorer: absorpsjonsareal og volum. Den vanligste løsningen for å kunne justere etterklangstiden i en konsertsal er ved å innføre absorpsjon, for eksempel ved skjulte tepper som kan senkes ned i salen. Problemet med denne løsningen er at energien i salen reduseres, slik at verdifull tidlig lydenergi som publikum skulle hatt minker. En annen løsning for å endre etterklangstiden er derfor å endre volumet i salen. Dette er ofte blitt gjort ved å ha store etterklangskammre, med åpninger som kan åpnes eller lukkes etter behov. En slik løsning finnes blant annet i konsertsalene "Culture and Congress Center Concert Hall" i Lucerne, Sveits og "Symphony Hall" i Birmingham, England.

Bakgrunnen for denne oppgaven er et forslag på en ny løsning for å justere volumet, og dermed de akustiske forholdene i salen, ved å ha et fritthengende "flytende" tak i konsertsalen. Dette taket har åpning til sideveggene i konsertsalen for at lyd kan slippe gjennom, og det kan justeres opp og ned etter behov. En slikt løsning vil kunne føre til at sen lyd som kommer tilbake til publikum vil komme fra sidene, noe som bidrar til å øke romfølelsen.

I denne oppgaven har det derfor blitt undersøkt hva som skjer med de vanlige romakustiske parametrene ved å heve eller senke det flytende taket, samt se på effekten av forskjellige bredder på taket. Noen impulsresponser, i form av Schröderkurver, har også blitt studert, for å se etter spesielle effekter. Det har blitt brukt numerisk simulering i programmet CATT-acoustics [1] og det har blitt målt på en skalamodell av konsertsalen, for å kunne sammenligne de numeriske beregningene med målinger. Det ble også foretatt noen enkle auraliseringer av tale og musikk for å undersøke hvordan en slik løsning vil høres ut.

Kapittel 2

Teori

I dette kapitlet gis først noen definisjoner av de varierende parametrene for et flytende tak med åpninger mot sideveggene. Deretter følger definisjoner og optimale verdier av akustiske parametre for å beskrive akustikken i en konsertsal, samt litt om teorien bak det akustiske beregningsprogrammet CATT-acoustics.

2.1 Parametre for det flytende taket

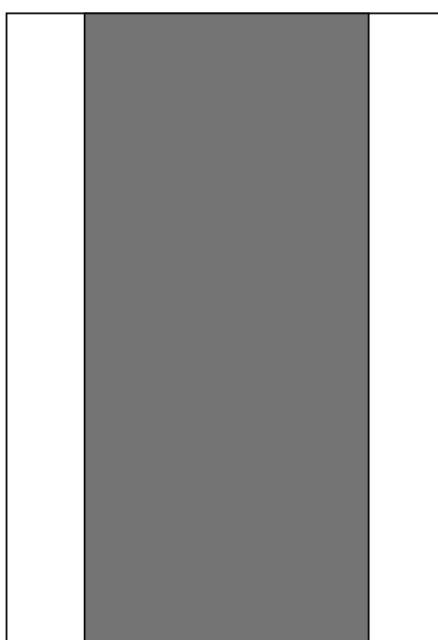
Det er to parametre som kan varieres for det flytende taket. Det er åpningen mellom det flytende taket og sideveggene, og høyden ifra gulvet til det flytende taket. I denne oppgaven er det derfor operert med to parametre: A og h som er definert på følgende måte:

$$A = \frac{\text{Arealet av det flytende taket}}{\text{Arealet av det virkelige taket}}, \quad (2.1)$$

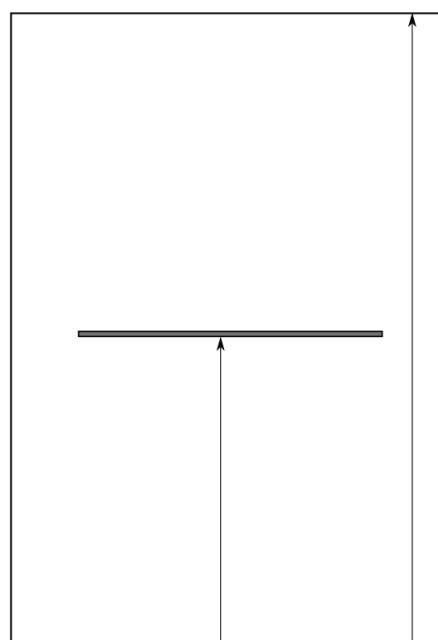
og

$$h = \frac{\text{Høyden på det flytende taket}}{\text{Høyden på det virkelige taket}}. \quad (2.2)$$

Disse kan ha verdier fra 0 til 1, og er vist grafisk i Figur 2.1.



(a) Konsertsalen sett ovenifra. Parameteren A er arealet av det grå området, det flytende taket, delt på arealet av hele tverrsnittet av konsertsalen



(b) Konsertsalen sett fra siden i lengderetningen, fra scenen mot publikum. Parameteren h er høyden fra gulvet til det flytende taket, delt på den totale takhøyden

Figur 2.1: De to variable parametrene A og h for det flytende taket

2.2 Parametre for å beskrive forskjellige aspekter ved akustikken i en konsertsal

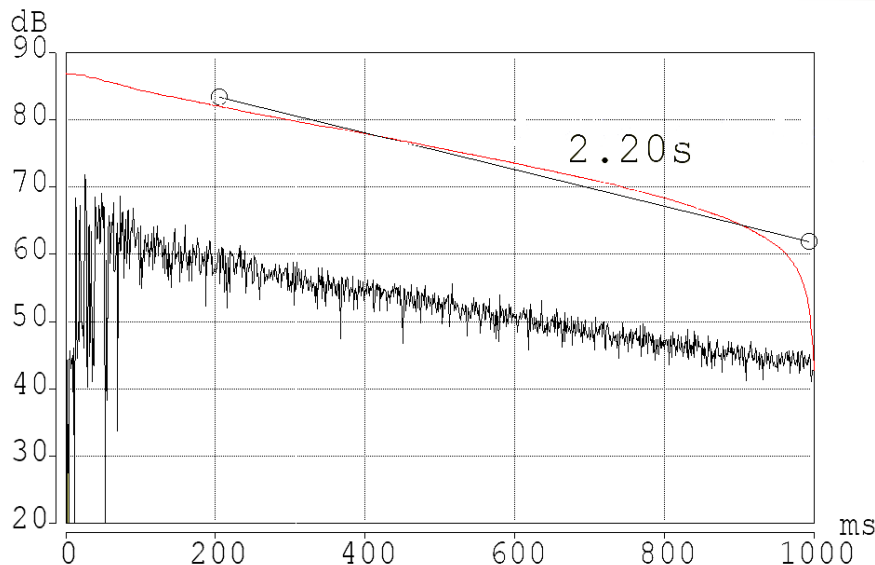
Her følger en oversikt over de mest vanlige akustiske parametrene for å beskrive akustikken i en konsertsal. Optimale verdier for parametrene er hentet fra boken "Concert Halls and Opera Houses" av Leo Beranek [2], og alle er gitt *med* publikum tilstede i salen. Definisjonene er tatt fra samme bok [3] dersom ikke annet er oppgitt.

2.2.1 Etterklangstid, T

Den viktigste parameteren innen konsertsalakustikk er etterklangstiden. Etterklangstiden T i et rom er definert ut ifra tiden det tar for at lydtrykksnivået i et rom har sunket med 60 dB etter at lydkilden er skrudd av.

I følge den enkle modellen av lydutbredelse i et vanlig rektangulært rom i boken "Fundamentals of Acoustics" [4], som blant annet den velkjente Sabines formel bygger på, har man vanligvis et lineært fall av lydtrykksnivået på logaritmisk skala, se Figur 2.2. Dette vil man ikke få dersom man har koplede rom, slik som med et flytende tak. Dette gjør beregningen av etterklangstiden mer komplisert, da denne legger til grunn en lineærtilpassning av impulsresponsen over et fall av lydtrykksnivå på vanligvis 30 dB. Deretter beregner man seg ned til 60 dB ut fra denne lineærtilpassningen. Denne estimerte etterklangstiden kalles ofte T_{30} .

Optimal verdi på etterklangstiden i en konsertsal for symfonisk musikk er rundt 2 sekund ved midlere frekvenser. Til tale ønskes i utgangspunktet etterklangstiden så lav som mulig.



Figur 2.2: Impulsrespons i et vanlig rektangulært rom, med lineært fall av lydtrykksnivå over tid på logaritmisk skala. Figuren er tatt fra en beregning i CATT-acoustics. Den røde kurven er Schröderkurven. Sort strek med sirkler i hver ende er lineærtilpassningen som brukes for å beregne tallet T_{30} som er vist over streken.

Schröderkurven

For å lage en lineærtilpasning av impulsresponsen brukes *Schröderkurven* som grunnlag. Den er definert som

$$R(t) = 10 \log \left(\int_t^\infty h(t')^2 dt' \right), \quad (2.3)$$

der $h(t')$ er den målte impulsresponsen. I denne definisjonen er impulsresponsen normalisert slik at integralet av hele kurven har verdi lik én, slik at kurven starter i 0 dB ved $t = 0$.

2.2.2 Tidlig etterklangstid, *EDT*

Siden den første delen av impulsresponsen ofte er den viktigste delen når det gjelder hvordan akustikken oppfattes, og lydtrykket kan falle raskere i starten av impulsresponsen enn senere, er det definert en parameter for *tidlig* etterklangstid, med symbol *EDT* (eng. Early Decay Time). Det er tiden det tar for lydtrykknivået å falle 10 dB. Denne parameteren blir særlig viktig dersom impulsresponsen ikke er helt lineær, for eksempel for koblede rom.

Optimal verdi av den tidlige etterklangstiden for en konsertsal til symfonisk musikk er rundt 2 sekund. Denne ønskes så lav som mulig for tale.

2.2.3 Klarhet (eng. Clarity), C_{80}

Klarhet er en parameter for å beskrive tydeligheten av musikk eller tale. Tale og musikk med raske partier krever en sal med stor klarhet, da for mye klang i salen vil være forstyrrende og tonene eller talen glir inn i hverandre. For rolig symfonisk musikk trenger ikke klarheten være så stor, da det er ønskelig med mye klang.

Parameteren uttrykker forholdet mellom energien ved de tidlige refleksjonene i forhold til de sene refleksjonene. Matematisk er den definert som forholdet mellom lydenergien de første 80 ms delt på energien fra 80 ms og utover på følgende måte:

$$C_{80} = 10 \log \left(\frac{\int_0^{80ms} p^2(t) dt}{\int_{80ms}^\infty p^2(t) dt} \right), \quad (2.4)$$

der p er det målte trykket fra en mikrofon med kulekarakteristikk.

Verdiene for klarhetsparameteren ligger rundt -1 til -5 dB for en optimal sal til musikkutøvelse, avhengig av hva slags musikk som spilles. For tale ønskes denne så høy som mulig.

2.2.4 Taletydelighet, *STI*

Taletydelighet (eng. *Speech Transmission Index*), definert i [5], er en parameter som uttrykker hvor lett det er å oppfatte tale i et rom. Parameteren tar utgangspunkt i at tale kan tilnærmes som amplitudemodellerte signaler med forskjellige frekvenser.

Parameteren tar verdier fra 0 til 1, der 1 er best. I Tabell 2.1 er det gitt forskjellige grad av taleoppfattberhet med tilhørende verdi av *STI*.

Tabell 2.1: Betydningen av verdiene på *STI*-skalaen

Elendig	< 0,3
Dårlig	0,3-0,45
OK	0,45-0,6
Bra	0,6-0,75
Utmerket	> 0,75

2.2.5 Lateralfaktor, LF

En studie av Bradley og Soulodre [6] har vist at *tidlig* lyd fra sidene av lytteren gir lytteren en følelse av en stor kilde (eng. *Aparent Source Width - ASW*), for eksempel et stort orkester, noe som oppleves tilfredsstillende. En parameter for å måle denne effekten er lateral faktoren, som er definert ved forholdet mellom det målte trykket til en åttetallsmikrofon $p_8(t)$ og en kulemikrofon $p(t)$ på følgende måte

$$LF = \frac{\int_{5ms}^{80ms} p_8^2(t) dt}{\int_0^{80ms} p^2(t) dt}. \quad (2.5)$$

Åttetallsmikrofonen er plassert med nullplanet mot kilden, slik at den tar opp mest lyd fra sidene av lytteren. Grunnen til at integrasjonen over åttetallsmikrofonen starter ved 5 ms er for å ikke ta med direktelyden. Jo høyere lateral faktoren er, jo større oppleves kilden.

Optimal verdi på lateral faktoren er rundt 0,2-0,25 for en konsertsal for symfonisk musikk.

2.2.6 Sen lateralenergi, LG

Studien til Bradley og Soulodre viste også at den *sene* lyden fra sidene fører til at man føler seg omsluttet av lyd (eng. *listener envelopment*), noe som oppleves bra. En parameter som ifølge studien korrelerer bra med denne effekten kalles *sen lateralenergi* og er definert som

$$LG = 10 \log \left[\frac{\int_{80ms}^{\infty} p_8^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_A^2(t) dt} \right], \quad (2.6)$$

som beskriver forholdet mellom sen energi på en åttetallsmikrofon p_8 målt i konsertsalen og en kulemikrofon p_A målt for den samme kilden med samme nivå i en avstand 10 m i ekkofritt rom.

I en bok av Gade [5], settes det spørsmål ved hvor mye denne parameteren skal vektlegges. Parameteren er ganske ny, og har bare blitt testet i labforsøk med lydfelt laget av høyttalere i ekkofritt rom. Optimale verdier for denne parameteren i virkelige konsertsaler er derfor ennå ikke godt nok dokumentert, men den ønskes i utgangspunktet så høy som mulig.

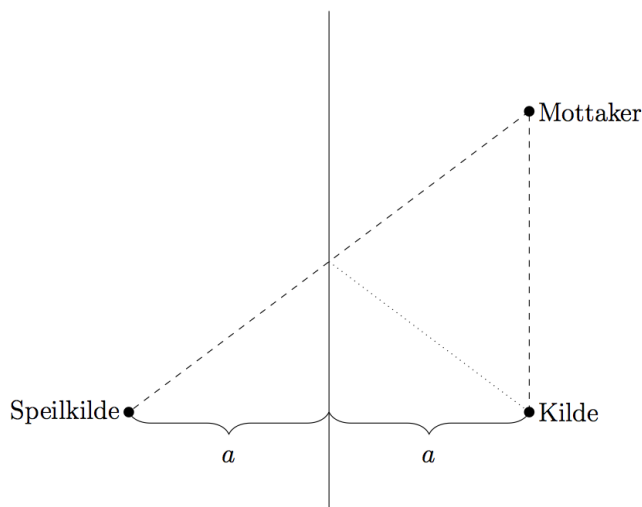
2.3 Beregningsmetode for CATT acoustics, TRC-metoden

CATT-acoustics er et akustisk beregningsprogram som bruker en hybridmetode av de mange kjente løsningsmetodene for å finne impulsresponsen til et rom. CATT kaller metoden ”Randomized Tail-corrected Cone-tracing” (RTC). Den kombinerer de tre metodene ”specular cone tracing”, ordinær ”ray tracing” og ”Image Source Method” (ISM).

2.3.1 ”Image Source Method” (ISM) - Speilkildemetoden

Speilkildemetoden baserer seg på det faktum at for å oppfylle grensebetingelsene ved en hard vegg, som er at partikkelhastigheten er lik null, kan veggen byttes ut med en identisk lydkilde speilet om veggplanet, se Figur 2.3. Direktelyden som når mottakeren fra speilkilden uten veggen tilstede tilsvarer den eksakte spekulære refleksjonen fra veggen. Denne nye speilkilden må igjen speiles om andre veggplan for å oppnå høyere ordens refleksjoner, og den totale impulsresponsen.

Denne metoden tar veldig mye datakraft for høyere ordens refleksjoner, så CATT-acoustics bruker derfor bare denne metoden for å bestemme *direktelyden*, samt *første* og *andre ordens* spekulære refleksjoner.



Figur 2.3: Direktelyd og refleksjon fra en vegg ved bruk av speilkilde plassert i en avstand a fra veggen

2.3.2 Ray tracing - strålegang

Asbjørn Krokstad, Svein Strøm, og Svein Sørsdal var de første til å bruke raytracing i 3 dimensjoner for å finne impulsresponsen til et rom. Dette ble publisert i Journal of Sound and Vibration allerede i 1968 [7], og var et stor gjennombrudd den gang. Senere har denne metoden vist seg å være svært nyttig i romakustiske beregninger.

Metoden går ut på å sende ut tusenvis av lydstråler fra kilden i alle retninger. Når disse treffer en vegg, blir de enten reflektert spekulært eller diffust. En spredningsfak-

tor S som beskriver hvor stor grad av diffus refleksjon flaten gir kan implementeres i modellen. Strålene fortsetter slik rundt i rommet helt til de treffer mottakeren, som er modellert som en kule med en gitt radius.

Impulsresponsen lages ved å ta i betraktning strålenes veilengde og hvor mye de har blitt absorbert på veien til mottakeren. Fordelen med denne metoden er at den tar i betraktning både spekulære og diffuse refleksjoner, og den kan også brukes på kurvede flater og avanserte geometrier. Ulempene er at det å modellere lydbølger som stråler er en høyfrekvent approksimasjon, og de lave frekvensene vil oppføre seg anderledes, slik at man mister noe av lydets bølgenatur. Størrelsen på mottakeren er også en usikkerhet, da for mange stråler treffer hvis den er for stor, men for få treffer dersom den er for liten. Prosessen som styrer de diffuse refleksjonene er også en tilfeldig prosess, noe som innfører en grad av usikkerhet i beregningen.

2.3.3 Cone tracing - strålegang med kjegler

Conetracing er en annen variant av raytracing, der hver stråle bærer et lite sirkulært areal som vokser lineært med tiden. Dette tilsvarer å sende ut tynne kjegler i stedet for stråler. Mottakeren er da modellert som et punkt. Dette vil gi mindre feil ved de tidligere refleksjonene, da det vil bli færre feiltreff enn ved raytracing der mottakerkullen må være relativt stor for å få nok treff.

2.3.4 Kantdiffraksjon

Siden lyd er bølger, vil sidekantene på en plate i et rom gi kantdiffraksjon. Det vil si at lydbølgene ikke lenger går i rette baner slik som lysstråler, men bøyes av ved kanten av platen. CATT-acoustics tar i en viss grad hensyn til dette ved å innføre at første ordens refleksjoner som treffer innenfor en kvart bølgelengde fra en kant, vil bli diffuse istedenfor spekulære, med en egen frekvensavhengig spredningsfaktor. For høyere ordens refleksjoner vil bare spredningsfaktoren for området nær kanten endres.

2.3.5 Parametre i beregningen

Det er kun to parametre som må bestemmes i beregningen av etterklangstid i CATT-acoustics, foruten absorpsjonsfaktorer, mikrofon- og høyttalerplasseringer. De to parametrene kalles *antall stråler per oktav* og *ray truncation time* (tiden det tar før strålen stopper dersom den ikke treffer mottakeren). CATT-manualen sier at antall stråler per oktav bør settes til minst 10.000 for å få resultater som er statistisk reproduserbare. Manualen sier også at *ray truncation time* settes til minst 50% av den lengste etterklangstiden, men anbefaler å ha den like lang som den lengste etterklangstiden.

Kapittel 3

Beregning i CATT-acoustics

I dette kapitlet er metoden og resultatene til beregningen i CATT-acoustics presentert.

3.1 Metode

For å se hvilken påvirkning en endring av høyden og åpningen langs sidene på det flytende taket har på de forskjellige akustiske parametrene, ble det foretatt en beregning av forskjellige parametre i CATT-acoustics. Parametrene T , EDT , C_{80} , STI og LF ble beregnet for $A=0,40$, $0,60$ og $0,80$. Parameteren LG blir omhandlet i seksjon 3.3. Høyden på det flytende taket ble variert mellom $h=0,25$, $0,50$, og $0,75$ for hver verdi av A . Disse ble kombinert til 9 forskjellige varianter det ble beregnet parametre for. Det ble også beregnet de samme parametrene uten noe flytende tak.

3.1.1 Modell

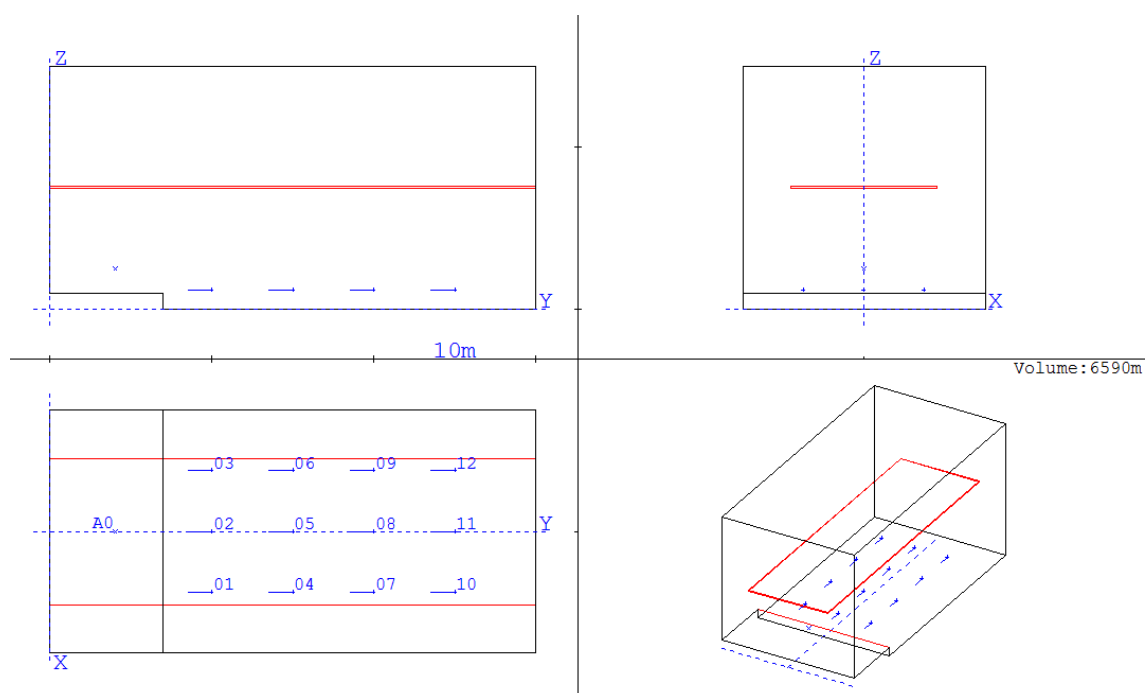
En 3-dimensjonell modell av konsertsalen ble laget i CATT-acoustics, med mål gitt i Tabell 3.1. Disse målene ble valgt slik, da skalamodellen som ble brukt senere i oppgaven hadde disse forholdene mellom høyde, lengde og bredde, samt at det er ganske vanlige mål for en konsertsal til symfonisk musikk.

Tabell 3.1: Høyde, lengde og bredde i CATT-modellen

Høyde	15 m
Lengde	30 m
Bredde	15 m

Modellen sett fra forskjellige sider er vist i Figur 3.1. Scenen er 7 m lang og 1 m høy og det flytende taket 0,1 m tykt. Det flytende taket, vist med røde streker, går helt inntil veggen ved scenen og veggen bak i salen, mens det er åpning mot sideveggene. Det ble plassert 12 mikrofoner og én kilde, A0, i salen. Mikrofonene ble rettet mot scenen, i negativ y-retning, vist med blå streker. Nøyaktig plassering av mikrofonene er gitt i Tabell 3.2. Alle har høyde 1,2 m som en sittende person. Kilden ble plassert i $(x,y) = (0, 4)$ med høyde 1,5 m over scenen.

Absorpsjonsfaktorene som ble satt på de forskjellige materialene i modellen er gitt i Tabell 3.3 og vist med forskjellige farger i Figur 3.2. Publikumsabsorpsjonen, vist med rød farge, er hentet fra boken Fundamentals of Acoustics [8]. Absorpsjonsfaktoren på det flytende taket, vist med blå farge, ble valgt ganske lav, da dette

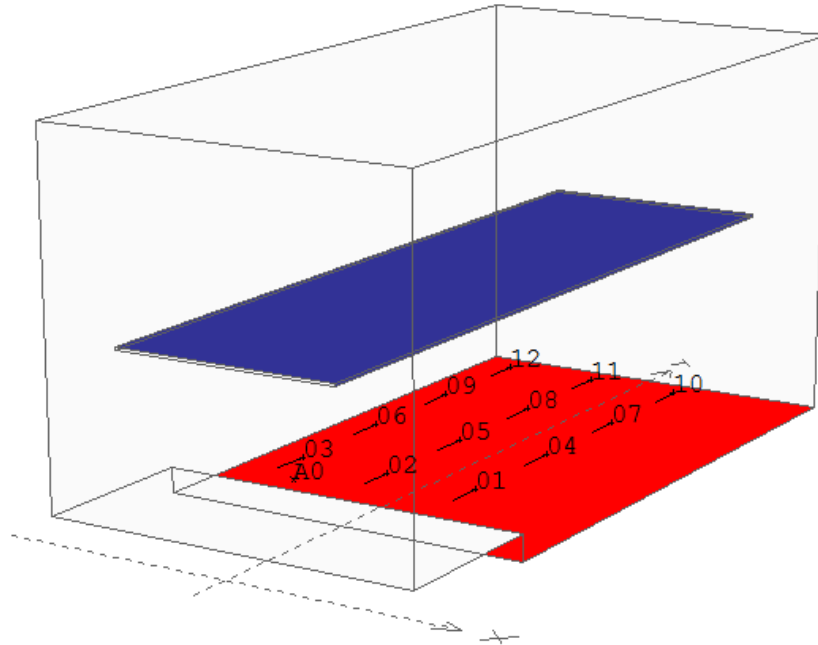


Figur 3.1: Modell av konsertsalen med flytende tak i CATT-acoustics sett fra forskjellige sider

Tabell 3.2: Plassering av mikrofoner i CATT-modell. Alle har høyde 1,2 m.

ID	X (m)	Y (m)
1	3,5	10
2	0	10
3	-3,75	10
4	3,75	15
5	0	15
6	-3,75	15
7	3,75	20
8	0	20
9	-3,75	20
10	3,75	25
11	0	25
12	-3,75	25

ikke skal være absorberende men reflekterende. Absorpsjonsfaktoren på resten av veggene og scenen, vist med hvit farge, ble tilpasset slik at etterklangstiden uten noe flytende tak ble ca. 2 sekunder ved frekvenser under 1 kHz, som regnes som optimalt for en konsertsal til symfonisk musikk.



Figur 3.2: Modell av konsertsalen med flytende tak i CATT-acoustics. Forskjellige farger angir forskjellige absorpsjonsfaktorer

Spredningsfaktoren ble satt ved å bruke `estimate()`-funksjonen i CATT-acoustics, der parameteren er maksimal avstand mellom største og minste kavititet på flaten. Denne parameteren ble valgt til 0,5 m for veggene og 0,1 m for det flytende taket. Spredningsfaktoren for publikumsflaten ble tatt fra CATT-manualen side 285 og er gitt i Tabell 3.4, sammen med resulterende spredningsfaktor fra `esimate()`-funksjonen. I ettertid ser en at spredningsfaktoren på veggene kanskje kunne vært satt litt lavere, siden denne ble nesten like stor som publikumspredningen, og faktisk høyere på de høyeste frekvensene.

På det flytende taket ble det også valgt at det skal tas hensyn til diffraksjon nær kantene, som beskrevet i teoriseksjon 2.3.4.

Tabell 3.3: Absorpsjonsfaktorer på flater i CATT-modell

Frekvens (Hz)	125	250	500	1k	2k	4k
Vegger og scene (hvit farge)	0,19	0,16	0,10	0,06	0,07	0,06
Publikum (rød farge)	0,40	0,55	0,80	0,95	0,90	0,85
Flytende tak (blå farge)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

Tabell 3.4: Spredningsfaktorer på flater i CATT-modell

Frekvens (Hz)	125	250	500	1k	2k	4k
Spredningsfaktor for publikum	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80
estimate(0,1)	0,10	0,13	0,19	0,27	0,38	0,54
estimate(0,5)	0,21	0,30	0,43	0,60	0,85	0,99

3.1.2 Instillinger i CATT

Siden det flytende taket lager to koplede rom, ble det i CATT-acoustics valgt å foreta en vanlig strålegangsberegning uten kjegler for den sene impulsresponsen, etter anbefaling fra CATT-maualen for bedre å beregne koplede rom. Denne overgangen skjer automatisk i programmet. Beregnet impulsresponslengde ble valg til 2 sekunder, og det ble brukt 200 000 stråler per oktav for å være sikker på å oppnå statistisk reproduserbare resultater, da det koplede rommet krever mange flere stråler enn et vanlig rom.

Temperaturen i rommet ble i beregningen valgt lik 20°C og luftfuktigheten 50%.

3.2 Resultater og diskusjon

I denne seksjonen er det først gitt noen beregnede Schröderkurver, fra impulsresponser, ved variasjon i A og h for lettere å forstå resultatene videre. Deretter er resultatene ved beregningen av parametrene T , EDT , C_{80} , STI og LF i CATT-acoustics gitt ved $A = 0, 40, 0,60$ og $0,80$ og variasjon i h .

Alle parameterkurvene er plottet med et student-t-konfidensintervall over de 12 mikrofonene, vist med vertikale streker i figurene. Siden det er forskjellig forventningsverdi på parametrene C_{80} , STI og LF etter hvor mikrofonen er plassert i salen vil disse konfidensintervallene si lite om usikkerheten i beregningen, men mer om spredningen av verdier i salen.

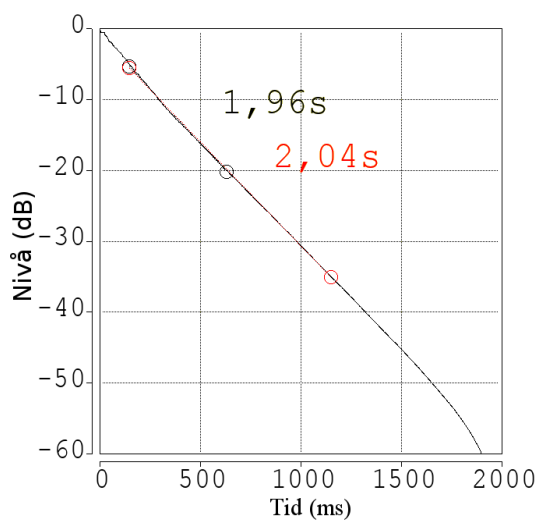
3.2.1 Beregnede Schröderkurver ved variasjon i A og h

Schröderkurvene for mikrofon nr. 5 ved 1 kHz for konstant $A = 0,80$ og forskjellig h er gitt i Figur 3.3 mens Schröderkurvene ved konstant $h = 0,25$ og forskjellig A er gitt i Figur 3.4. Sorte piler indikerer i hvilken retning knekken i Schröderkurven endrer seg når A eller h synker.

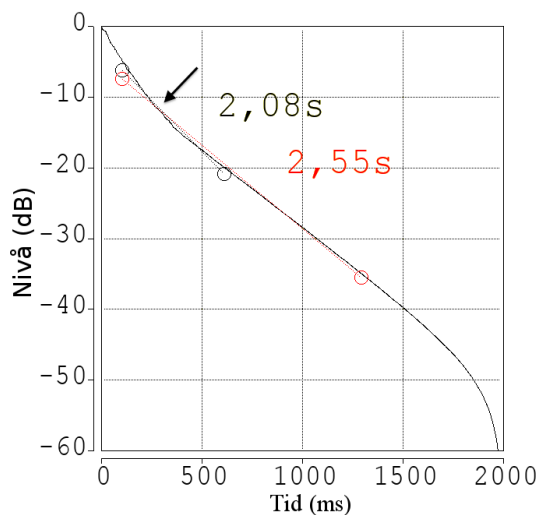
Det første man legger merke til er at Schröderkurvene ikke lenger er lineære, slik som man har for et vanlig rektangulært rom. Dette gjør at det blir noen spesielle effekter på grunn av koplingen mellom rommet over og under det flytende taket. Lyden før knekken domineres av refleksjonene i rommet under det flytende taket, mens lyden etter knekken er dominert av lyd som kommer tilbake fra rommet over det flytende taket.

Ved å se på hva som skjer med Schröderkurven når det flytende taket, med konstant A , senkes i Figur 3.3 ser en at kurven faller raskere i starten når taket senkes. Knekken finner sted ved omtrent samme dB-verdi. Kurven faller altså raskere før knekken og senere etter knekken når det flytende taket senkes. Dette harmonerer bra med at volumet under senkes, og dermed faller kurven raskere i starten, mens det også blir et større volum over slik at kurven vil falle saktere etter knekken.

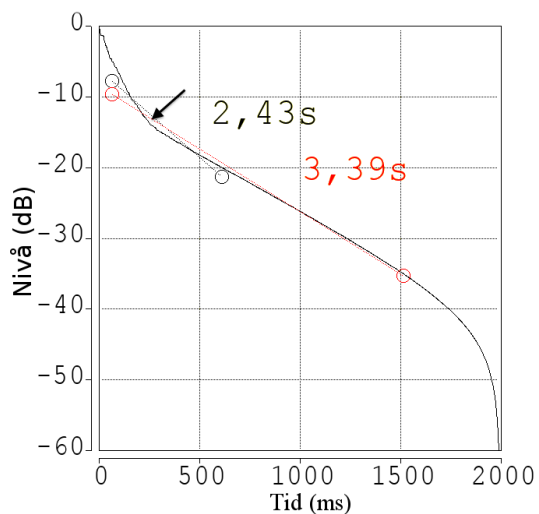
Ved å se på Figur 3.4, med konstant h , ser en at når det flytende taket blir bredere, beveger kurven seg lengre ned i dB-verdi før den knekker med omtrent samme stigning på kurven før og etter knekken. Den synker litt saktere etter knekken også, men mye mindre sammenlignet med Figur 3.3. Dette virker også fornuftig, da lyden vil komme tilbake til mikrofonen mye senere dersom åpningen mellom det flytende taket og sideveggene er liten. Lyden blir på en måte fanget i rommet over taket, og det vil ta lenger tid før den kommer ned og kurven knekker ved et senere tidspunkt.



(a) $h=0,75$

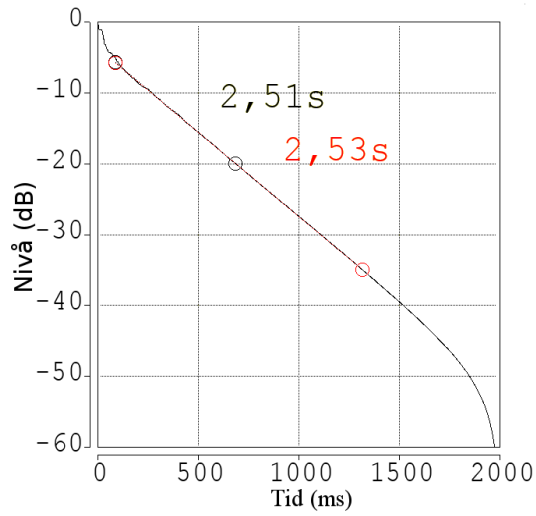


(b) $h=0,50$

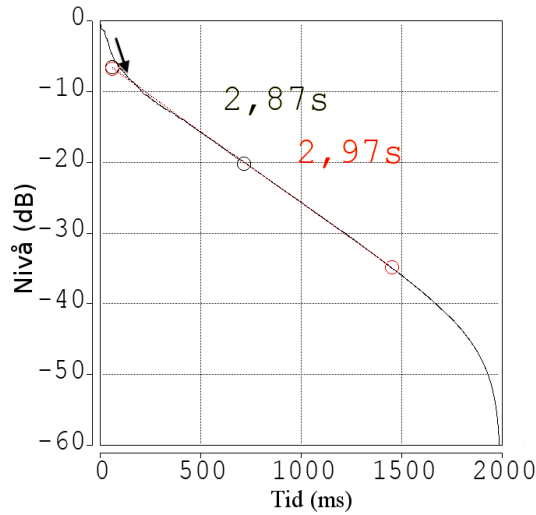


(c) $h=0,25$

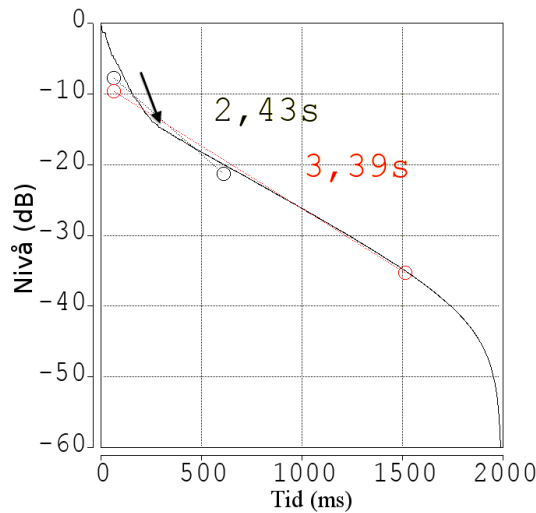
Figur 3.3: Schröderkurver for $h = 0,25, 0,50$ og $0,75$ ved $A = 0,80$ ved 1 kHz . Rødt tall og linje med sirkler på hver side er verdi og kurvetilpassning for T_{30} mens sort tall og linje er T_{20} .



(a) $A=0,40$



(b) $A=0,60$



(c) $A=0,80$

Figur 3.4: Schröderkurver for $A = 0,40, 0,60$ og $0,80$ ved $h = 0,25$ ved 1 kHz . Rødt tall og linje med sirkler på hver side er verdi og kurvetilpassning for T_{30} mens sort tall og linje er T_{20} .

3.2.2 Beregnet etterklangstid, T

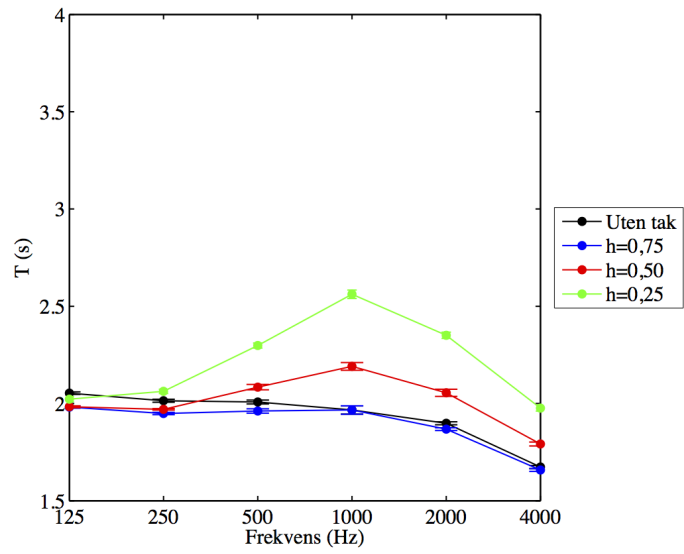
Beregnet etterklangstid T ved $A=0,40$, $0,60$ og $0,80$ og endring i h er gitt i Figur 3.5.

Siden impulsresponsene ikke lenger er lineære, jamfør forrige seksjon, blir parameteren T_{30} som CATT-acoustics regner ut, vist med rødt tall og rød strek med sirkler på i for eksempel Figur 3.4(c), et feil estimat av etterklangstiden, da dette bygger på et lineært fall av lydnivået på logaritmisk skala. Beregnede verdier vil tendere mot å bli for høye, da CATT-acoustics flytter den lineærtilpassede kurven opp til 0 dB, og beregner seg ned til 60 dB utifra den. Litt avhengig av hvor knekken kommer i Schröderkurven og hvor kraftig knekken er vil dette bli et mer eller mindre godt estimat av etterklangstiden. Allikevel vil denne måten å beregne etterklangstiden på si noe om den kommer til å øke eller minke.

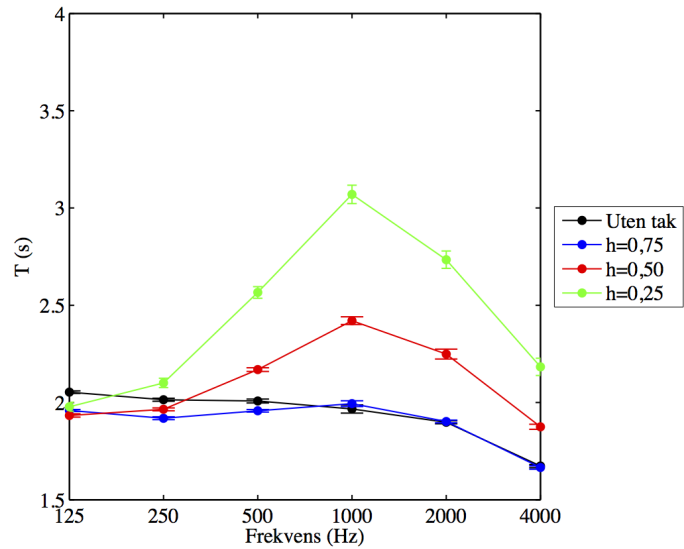
Ved alle verdier av A ser en at etterklangstiden T øker ved å senke taket, sett bort fra de laveste frekvensene. Dette virker fornuftig, da lyden som kommer seg opp forbi det flytende taket vil være i et rom med veldig lite absorpsjon, slik at det øverste rommet fungerer som et slags energilager. Denne lyden vil derfor ha høyere energi ved et senere tidspunkt i impulsresponsen dersom taket er lavt, som gjør at etterklangstiden vil øke, da gradienten til Schröderkurvene etter knekken i Figur 3.3 blir slakere jo lavere taket er. Disse verdiene er nok også litt for høye på grunn av at man trekker lineærtilpasningen opp til 0 dB for å beregne etterklangstiden.

Etterklangstiden øker også mer jo større A er. Det harmonerer med at lyden som kommer opp i rommet over det flytende taket blir fanget der og vanskeligere kommer seg ned tilbake til rommet under dersom åpningen mellom veggene og det flytende taket er liten. Lyden kommer derfor senere tilbake med et bredt tak, enn med et smalt tak, noe som gjør at etterklangstiden øker mer.

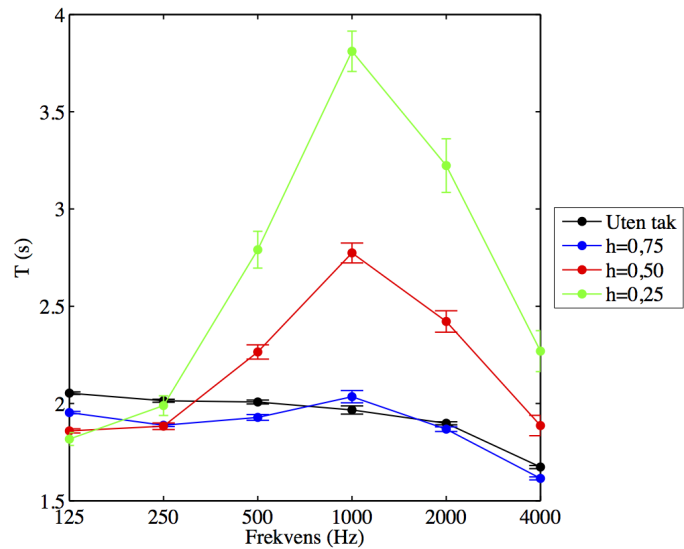
Det ser ut som om etterklangstiden stiger mest for de høye frekvensene. Dette henger antakeligvis sammen med at absorpsjonsfaktoren på veggene er lavest for de høye frekvensene, samtidig som det er der publikumsabsorpsjonen er størst, slik at det blir størst forskjell mellom rommet over og under det flytende taket der, se Tabell 3.3 side 14. Ved de lave frekvensene ser det ut til at etterklangstiden synker når det flytende taket senkes, noe som kan skyldes den relativt høye veggabsorpsjon ved disse frekvensene.



(a) $A=0,40$



(b) $A=0,60$



(c) $A=0,80$

Figur 3.5: Beregnet etterklangstid T ved $A = 0,40, 0,60$ og $0,80$ og variasjon i h

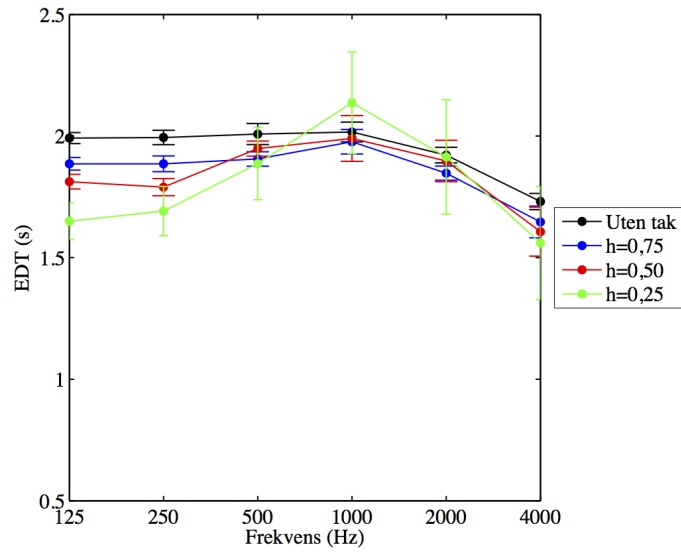
3.2.3 Beregnet tidlig etterklangstid, EDT

Beregnet tidlig etterklangstid EDT ved $A=0,40$, $0,60$ og $0,80$ og endring i h er gitt i Figur 3.6.

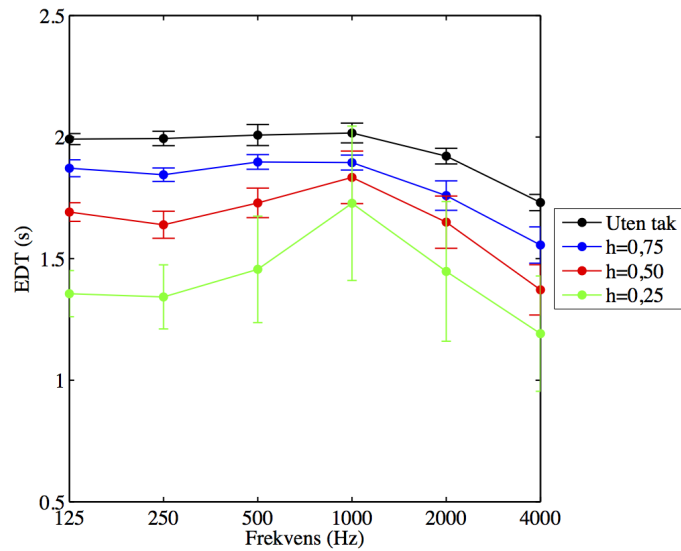
Ved $A = 0,80$ i Figur 3.6(c) er det en tydelig tendens til at den tidlige etterklangstiden synker når taket senkes lavere ned. Dette harmonerer med at den tidlige delen av impulsresponsen vil falle raskere når volumet av rommet under taket er mindre, da lyden reflekteres og absorberes av publikumsflaten raskere ved lavt tak enn ved høyt tak. Dette ser man tydelig av Figur 3.3 der gradienten til Schröderkurven før knekken blir brattere jo lavere det flytende taket er.

Det ser også ut til å være en tendens til at den tidlige etterklangstiden synker mindre for mindre A . Dette viser seg også spesielt ved de høye frekvensene, og EDT stiger faktisk rundt 1 kHz ved $A = 0,40$ og $h = 0,25$ i Figur 3.6(a). Siden den tidlige etterklangstiden er tiden før Schröderkurven har fallt 10 dB, vil denne bli lavere dersom knekken i Schröderkurven finner sted i dette området, noe som er tilfelle ved $A = 0,40$ i Figur 3.4(a).

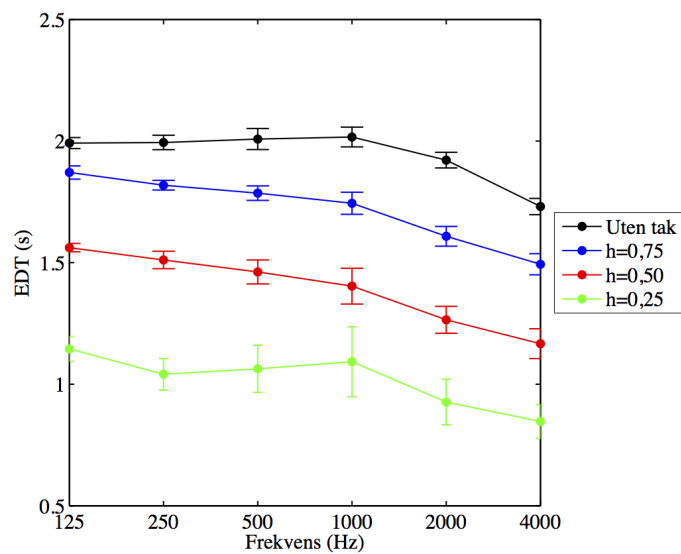
Det ser ut til at det er mer spredning i verdier i salen for $h = 0,25$ enn ved de andre høydene av det flytende taket. Dette skyldes antakeligvis at det blir større forskjeller i forhold til hvor lytteren er plassert i rommet når taket er så lavt.



(a) $A=0,40$



(b) $A=0,60$



(c) $A=0,80$

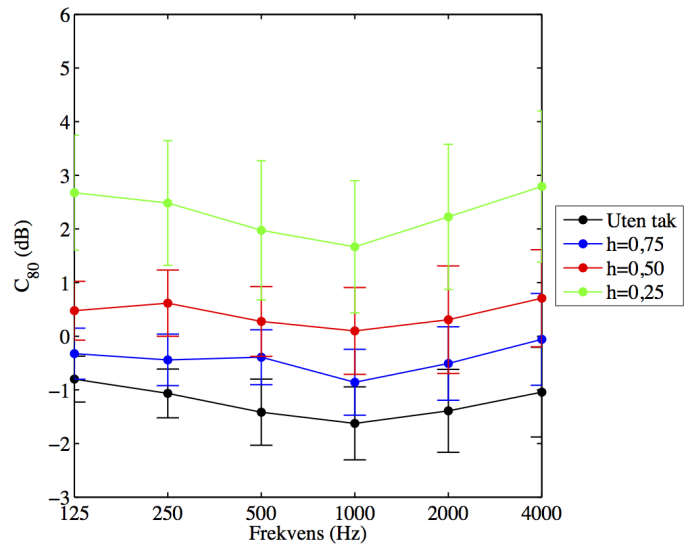
Figur 3.6: Beregnet tidlig etterklangstid EDT ved $A = 0,40, 0,60$ og $0,80$ og variasjon i h

3.2.4 Beregnet klarhet, C_{80}

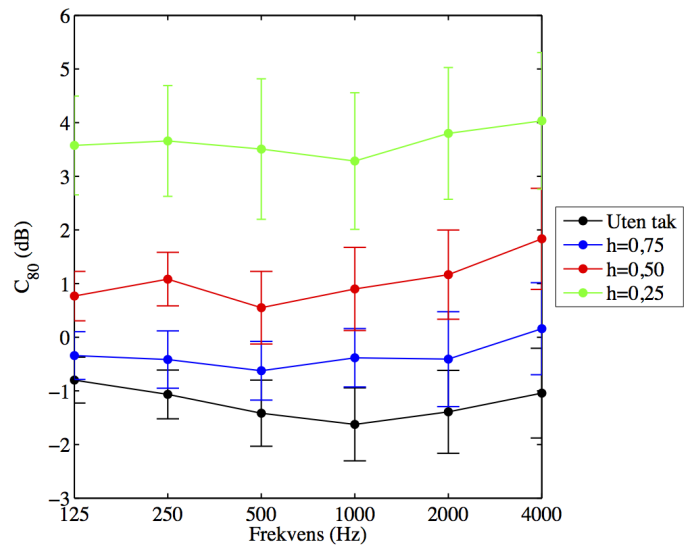
Beregnet klarhet C_{80} ved $A=0,40, 0,60$ og $0,80$ og endring i h er gitt i Figur 3.7.

Som det fremgår ved alle de tre figurene vil klarheten i salen *øke* ved å *senke* det flytende taket. Klarheten uttrykker forholdet mellom tidlig energi og sen energi, og skillet mellom dem er på 80 ms. Ved å senke taket, slik at den tidlige etterklangstiden synker som i forrige seksjon, vil det derfor bli mindre energi senere ut i impulsresponsen, og klarheten øker.

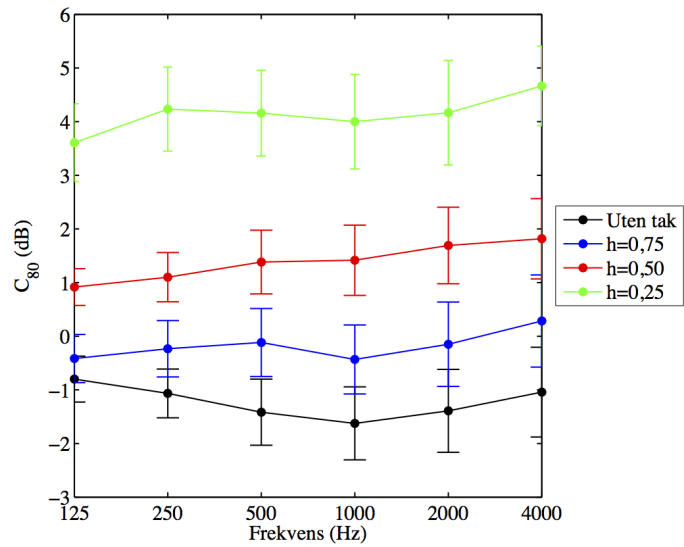
Ved bredere tak øker klarheten enda mer ved å senke taket. Dette henger sammen med at en ennå større andel av lyden blir reflektert tilbake og absorbert av publikum.



(a) $A=0,40$



(b) $A=0,60$

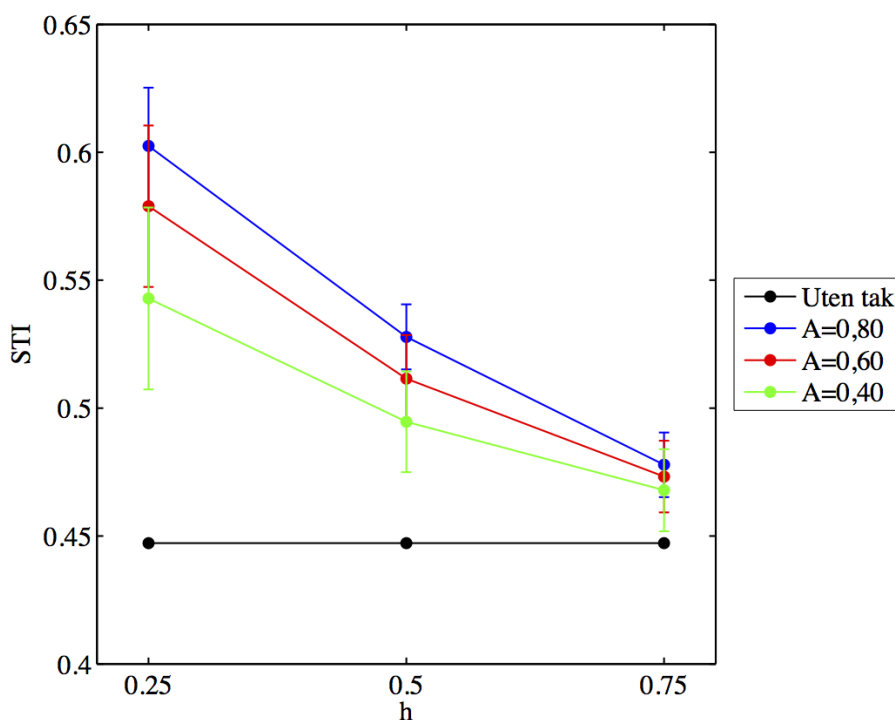


(c) $A=0,80$

Figur 3.7: Beregnet klarhet C_{80} ved $A = 0,40, 0,60$ og $0,80$ og variasjon i h

3.2.5 Beregnet taletydighetsindeks, STI

Beregnet taletydighetsindeks STI som funksjon av A og h er gitt i Figur 3.8.



Figur 3.8: Beregnet taletydighetsindeks STI

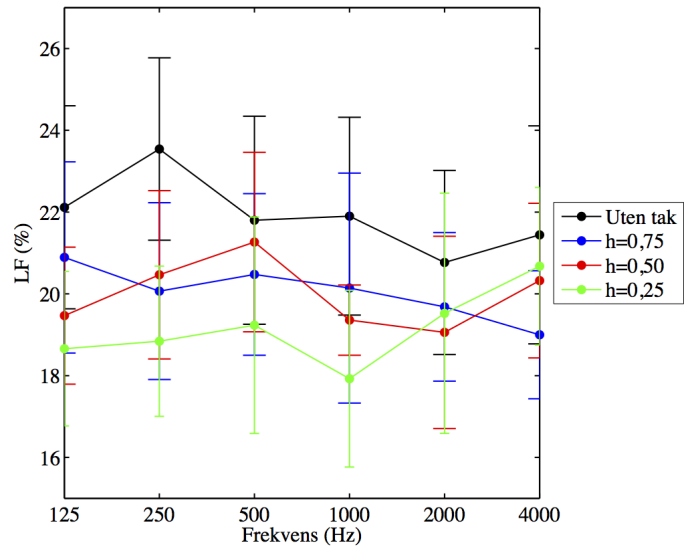
Dette resultatet sier egentlig akkurat det samme som for klarheten i Figur 3.7. Det er tydelig at en senking av det flytende taket vil øke taletydigheten. Denne effekten er større jo bredere det taket er. Dersom $A = 0,80$ vil taletydigheten øke fra dårlig til bra, jamfør Tabell 2.1 side 7.

3.2.6 Beregnet lateralfaktor, LF

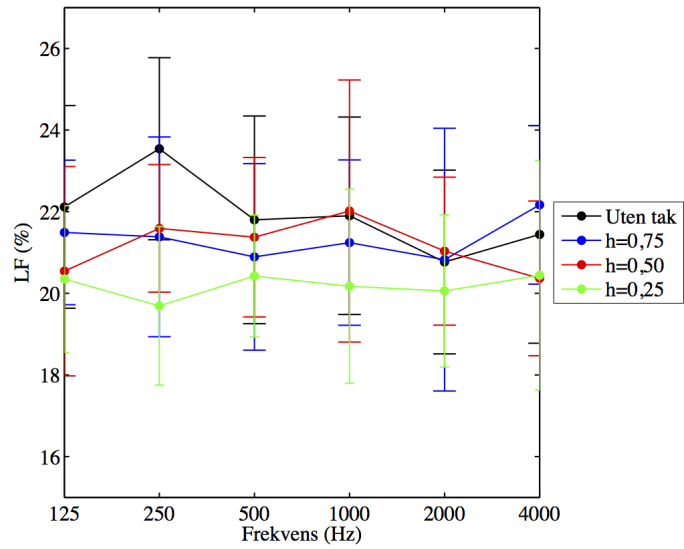
Beregnet lateralfaktor LF ved $A=0,40$, $0,60$ og $0,80$ og endring i h er gitt i Figur 3.9.

Det er litt vanskeligere å si noe bestemt om hva som skjer med lateralfaktoren, siden spredningen i verdier er ganske stor for alle beregningene. Allikevel ser det ut til at lateralfaktoren ved $A = 0,40$ i Figur 3.9(a) *synker* når det flytende taket *senkes*. Den samme tendensen sees også for de andre verdiene av A , men det er mindre forskjell jo større A er. Dette virker vel også å være fornuftig, da dette er den *tidlige* lateralfaktoren, som er de tidlige refleksjonene 80 ms etter direktelyden. Dersom man åpner taket på sidene, vil man miste disse tidlige siderefleksjonene, og lateralfaktoren vil synke.

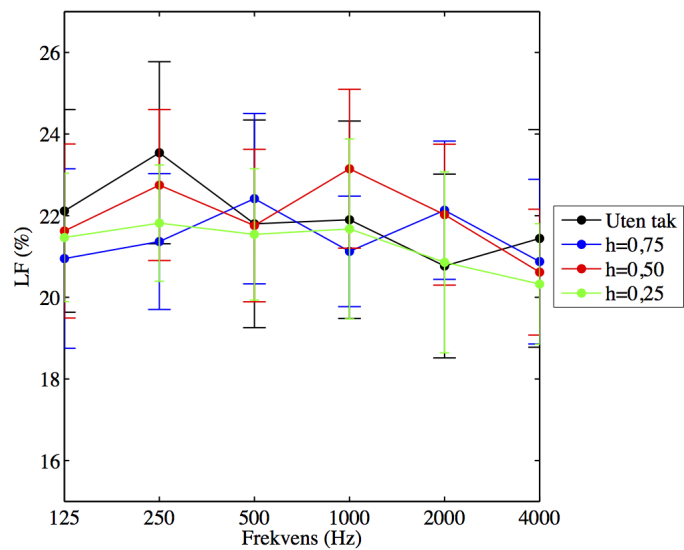
Håpet om at lateralfaktoren skulle stige, ser derfor ut til ikke å stemme. Det har nok å gjøre med at denne parameteren kuttes skarpt ved 80 ms, slik at lyd som er kommet opp rundt det flytende taket ikke rekker å komme tilbake for å bli med i parameteren.



(a) $A=0,40$



(b) $A=0,60$



(c) $A=0,80$

Figur 3.9: Beregnet lateralfaktor LF ved $A = 0,40, 0,60$ og $0,80$ og variasjon i h

3.3 Beregning av sen lateralenergi LG

Parameteren sen lateralenergien LG beregnes ikke automatisk i CATT-acoustics. Denne måtte derfor beregnes manuelt. Siden leddet under brøkstreken i likning (2.6) side 7 vil være uavhengig av A og h , men bare kildestyrken, kan dette egentlig sløyfes dersom en kun er ute etter de relative endringene. Parameteren ble derfor modifisert litt. Det som ble regnet ut har fått navnet modifisert sen lateralenergi

$$LG_{mod} = 10 \log \left(\int_{80ms}^{\infty} p_8^2 dt \right). \quad (3.1)$$

Verdien til den modifiserte sene lateralenergien LG_{mod} blir derfor ikke lik LG , men dB-endringen som følge av en endring i h blir den samme.

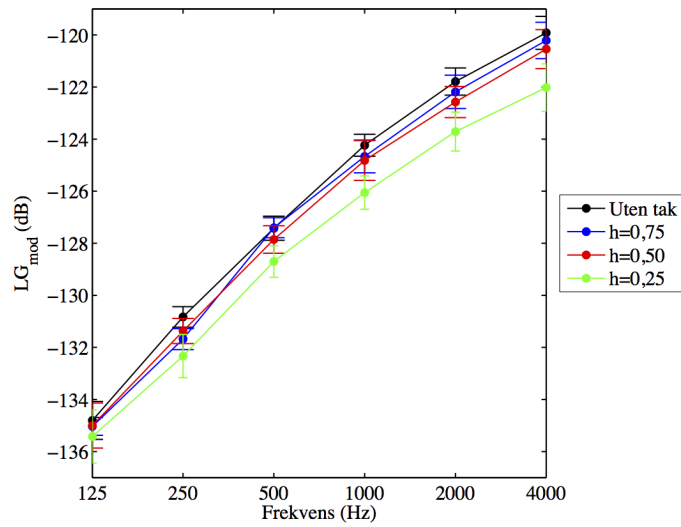
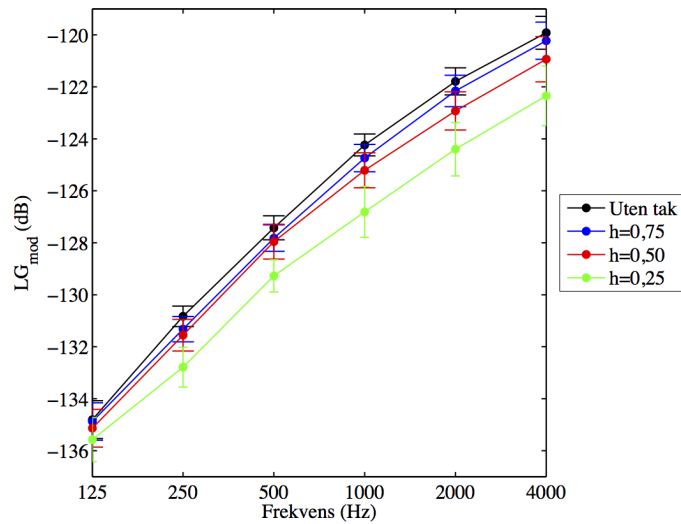
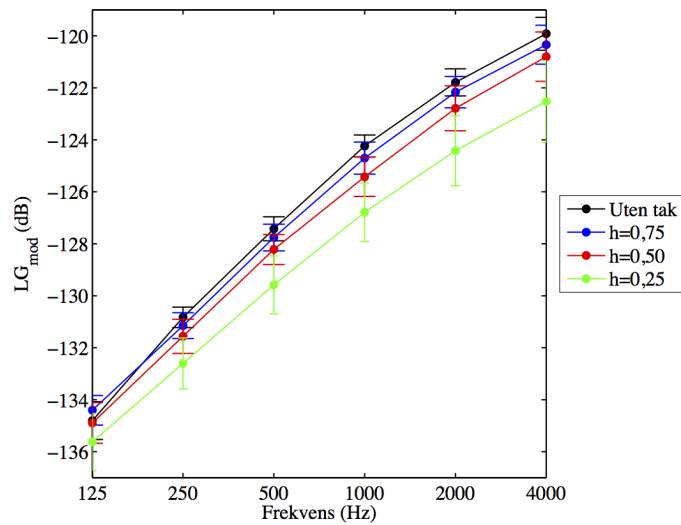
3.3.1 Metode

For å beregne parameteren ble impulsresponsene fra CATT-acoustics for hver av mikrofonene og konfigureringsene av A og h tatt ut, og forholdet ble beregnet med MATLAB-programmet $LG_{mod}.m$ gitt i Vedlegg A.1.

3.3.2 Beregnet modifisert sen lateralenergi LG_{mod}

Beregnet modifisert sen lateralfaktor LG_{mod} ved $A=0,40$, $0,60$ og $0,80$ og endring i h er gitt i Figur 3.10.

Det ser ut til å være en tydelig tendens til at den sene lateralenergien *synker* når det flytende taket *senkes*. Her ville man egentlig forventet at den skulle stige, da lyden vil komme mer fra sidene ved et lavt tak.

(a) $A=0,40$ (b) $A=0,60$ (c) $A=0,80$

Figur 3.10: Beregnet sen lateralfaktor LF_{sen} ved $A = 0,40, 0,60$ og $0,80$ og variasjon i h

3.3.3 Sen (lateral/total)-energi

Resultatet med at den sene lateralenergien synker var ikke som forventet. Det ble derfor gjort en annerledes beregning for å sjekke hva som skjer i dette tilfellet.

Parameteren sen lateralenergi LG tar bare hensyn til om nivået på åttetallsmikrofonen øker eller synker. Det som da kunne være interessant, er å beregne *forholdet* mellom sen lateralenergi og sen totalenergi fra alle kanter, og undersøke om dette øker ved å innføre et flytende tak.

Forholdet som da ble beregnet er

$$\text{sen (lateral/total)-energi} = 10 \log \left(\frac{\int_{80ms}^{\infty} p_8^2 dt}{\int_{80ms}^{\infty} p^2 dt} \right). \quad (3.2)$$

For å beregne dette ble impulsresponsene fra CATT-acoustics for hver av mikrofonene og konfigureringsene av A og h tatt ut, og forholdet ble beregnet med MATLAB-programmet *late_ratio.m* gitt i vedlegg A.2.

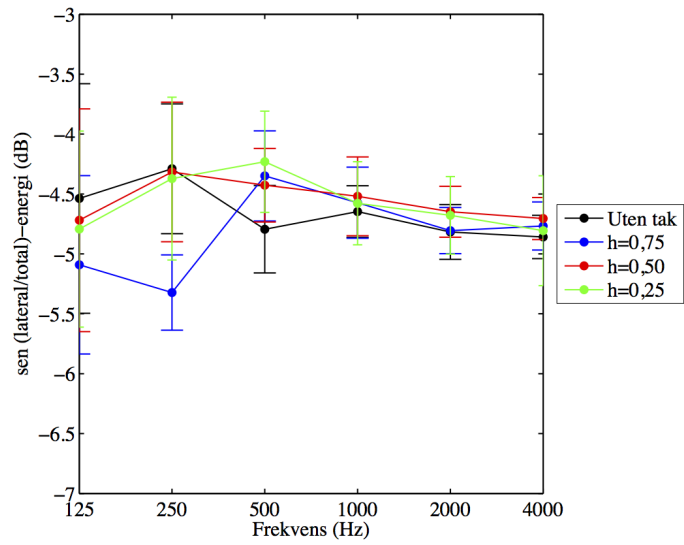
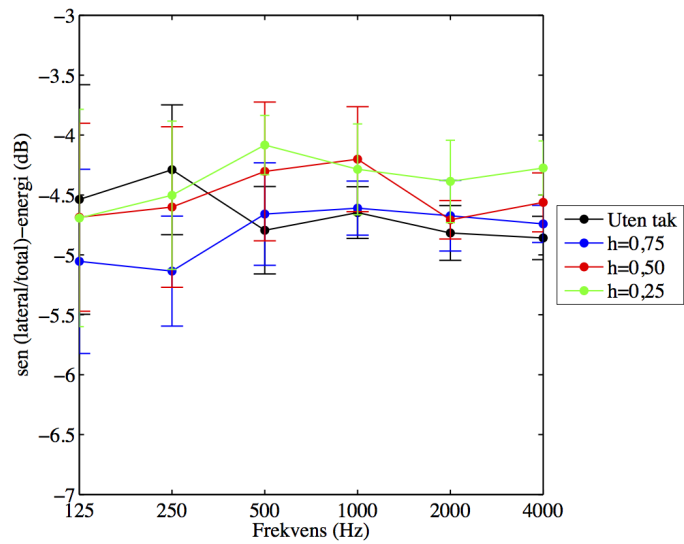
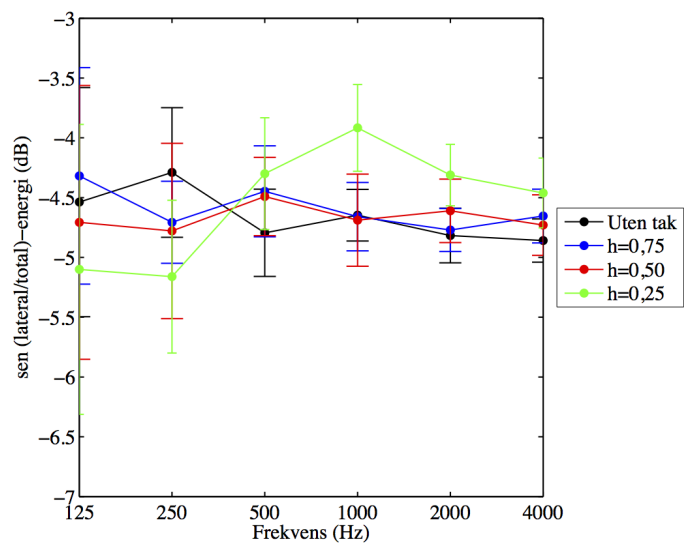
3.3.4 Beregnet sen (lateral/total)-energi

Beregnet sen (lateral/total)-energi ved $A = 0, 80, 0,60$ og $0,40$ og endring i h er gitt i Figur 3.11.

Her ser det ut til at forholdet (lateral/total)-energi *øker*, fra 500 Hz og oppover, når det flytende taket *senkes*, noe som er det man ville forventet. Denne endringen er dog ikke veldig sterk, maksimalt ca. 1 dB mellom "uten tak" og $h = 0,25$. Dette er derfor en liten økning i forhold til at nivået på åttetallsmikrofonen i LG_{mod} som fra "uten tak" til $h = 0,25$ synker med ca. 3 dB.

Det virker derfor som om at det kommer forholdsmessig mer lydenergi fra sidene enn fra alle kanter, når man innfører et flytende tak, slik som forventet, men det totale nivået på denne sideinnfallende lyden synker mer. Nettoeffekten synes derfor å være at parameteren sen lateralenergi LG vil minke, siden LG_{mod} minker.

Under 500 Hz ser det ut til at forholdet sen (lateral/total)-energi synker ved å innføre et flytende tak. Dette kan muligens ha noe å gjøre med den relativt lave absorpsjonsfaktoren på veggene, slik at nivået som kommer tilbake fra rommet over det flytende taket vil ha et lavere nivå ved de lave frekvensene.

(a) $A=0,40$ (b) $A=0,60$ (c) $A=0,80$

Figur 3.11: Beregnet sen (lateral/total)-energi ved $A = 0,40, 0,60$ og $0,80$ og variasjon i h

Måling på skalamodell

I dette kapittelet er metoden og resultatene til skalamålingen som ble gjort presentert og sammenlignet med CATT-beregningene.

4.1 Metode

For å undersøke hvor realistisk CATT-beregningen er, og spesielt for å studere diffraksjon langs kanten av det flytende taket, ble det foretatt en måling av de samme akustiske parametrene på en skalamodell.

4.1.1 Valg av rom og flytende tak

For å få til en realistisk skalamodell var det nødvendig med et rom som hadde samme forhold mellom høyde, lengde og bredde som en virkelig konsertsal. Rommet måtte også ha en absorberende flate tilsvarende publikum, og de andre flatene lite absorberende.

Rommet som ble brukt var kontoret B235 på elektrobygget på NTNU med dimensjoner bredde \times lengde \times høyde = $3 \times 6 \times 3$ m. Dette tilsvarer en konsertsal med mål $15 \times 30 \times 15$ m i skalaforhold 1:5, noe som er en ganske vanlig størrelse på en rektangulær konsertsal. Kontoret hadde absorberende tak, mens sideveggene var av gips. Den ene endeveggen bestod av to vinduer med noen tynne lette gardiner, men disse ble trukket til sidene. Den andre endeveggen var av betong med inngangsdøren inn til rommet av tre. Gulvet hadde et vinylbelegg. Modellen var derfor ganske optimal dersom den ble snudd opp ned, slik at det absorberende taket fungerte som publikumsflaten.

Som flytende tak ble det brukt gulvsponplater med dimensjon 60×240 cm og tykkelse 22 mm, med massetetthet $14,5 \text{ kg/m}^2$. Disse ville gi tilstrekkelig lydisolasjon, da massetettheten også skaleres med en faktor 5, slik at lyd i veldig liten grad propagerer gjennom det flytende taket, men rundt på sidene. Disse ble lagt oppå et stilas av jernrør, med noen treplanker imellom, vist i Figur 4.1.

Grunnet platenes og rommets dimensjon var det ideelt å legge dem i bredder som ga $A = 0,40, 0,60$ og $0,86$. Dette er nesten det samme som for CATT-beregningen, noe som er gunstig for å sammenligne. Disse platene kunne klikkes sammen uten å limes, slik at det var ganske enkelt å endre på bredden av det flytende taket ved å legge disse på tvers av rommet for den største bredden og på langs for de to minste breddene. Platene ble plassert helt inntil veggen ved vinduene, men for å få

opp døren inn til rommet ble det et mellomrom mellom platene og endeveggen ved døren på 1,2 m.

Stilasets maksimale høyde, grunnet lengden på jernrørene, ga en minste $h = 0,30$ (siden modellen er snudd opp ned). Det ble derfor gjort målinger med $h = 0,30$, $0,50$ og $0,75$, for hver verdi av A , som også er ganske likt CATT-beregningen. Det ble også målt uten noe flytende tak.



Figur 4.1: Sponplatene blir plassert oppå stilaset ved maksimal høyde

4.1.2 Utstyr

Utstyret som ble brukt i målingen er gitt i Tabell 4.1. Kulehøytteren og effektforsterkeren, som ikke er standardutstyr, er vist i Figur 4.2. Kulehøytteren tilhører Samfundet i Trondheim, mens effektforsterkeren er laget på NTNU.

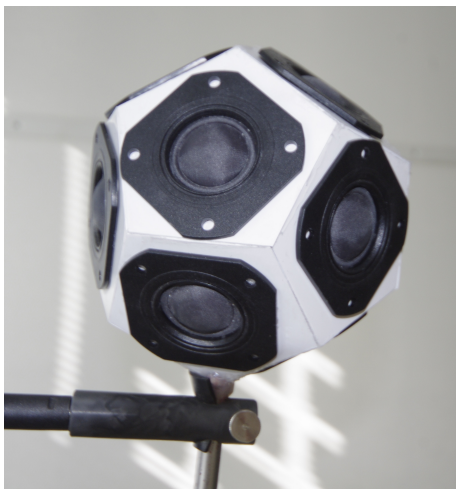
For å kunne måle lateralfaktoren trengs en åttetallsmikrofon. Grunnet mangel på åttetallsmikrofon, ble det valgt å bruke 2 stk 1/2"-mikrofoner med kulekarakteristikk for å lage en åttetallsmikrofon, ved å ta differansen mellom disse. Mikrofonene vises på stativet til høyre i Figur 4.1. Dette mikrofonparet ble plassert, med det tilhørende avstandstykket, 1 cm ifra hverandre, som var det minste avstandstykket som fulgte med mikrofonene. Mikrofonenes diameter er også i denne størrelsesorden, så det ville ikke vært mulig å bruke en kortere avstand, da mikrofonene ikke lenger har kulekarakteristikk for frekvenser med bølgelengder mindre enn dette.

Denne avstanden setter den øvre grensen for hvor høyt opp det er mulig å måle i frekvens. Åttetallsmikrofontilnærmelsen gjelder hvis avstanden mellom mikrofonene er mye mindre enn en bølgelengde. Vanligvis settes denne avstanden til mindre enn

enn tiendedel av bølgelengden. Med en avstand på 1 cm imellom mikrofonene gir dette en maksimal frekvens på 3430 Hz. Dette vil si at med en skala på 1:5, da frekvensene også skaleres i samme forhold som romdimensjonene, vil den maksimale fullskalafrekvensen som fungerer med denne metoden være 686 Hz. Øvre grensen for oktavbåndet til 500 Hz er 710 Hz, som ikke er så langt unna. Det er derfor mulig å få gyldige resultater i oktavbånd opp til ca. 250 Hz, men trolig et ganske godt resultat for 500 Hz også.

Tabell 4.1: Utstyr brukt til måling på skalamodell

- PC med WinMLS
- RME Fireface 800 lydkort
- Kulehøytaler med 12 stk SEAS 25TFFN/Q-diskantelementer
- 30 Watts effektforsterker til høytaleren
- G.R.A.S Sound & Vibration 1/2" intensitetsmikrofonpar
- Avstandstykk, 1 cm, mellom mikrofoner
- 2 stk Norsonic forforsterker til mikrofon type 1201
- 2 stk Norsonic FRONT END mikrofonforsterker type 336
- Brüel & Kjær lydintensitetskalibrator type 3541



(a) Kulehøytaler



(b) Effektforsterker

Figur 4.2: Bilde av utstyr som ikke er standardutstyr

4.1.3 Målemetode

Det gjelder ingen spesiell standard for skalamodellmålinger. Den vanlige ISO-standard 3382-1:2009, for måling av romakustiske parametre i konsertsaler, ble derfor brukt som grunnlag for målingen. Anbefalte avstander mellom mikrofon og vegg/lydkilde ble nedskalert med en faktor 5, da frekvensene oppskaleres med samme faktor. Temperatur og luftfuktighet ble ikke målt under målingen, men temperaturen kunne anslås til vanlig romtemperatur ca. 20°C.

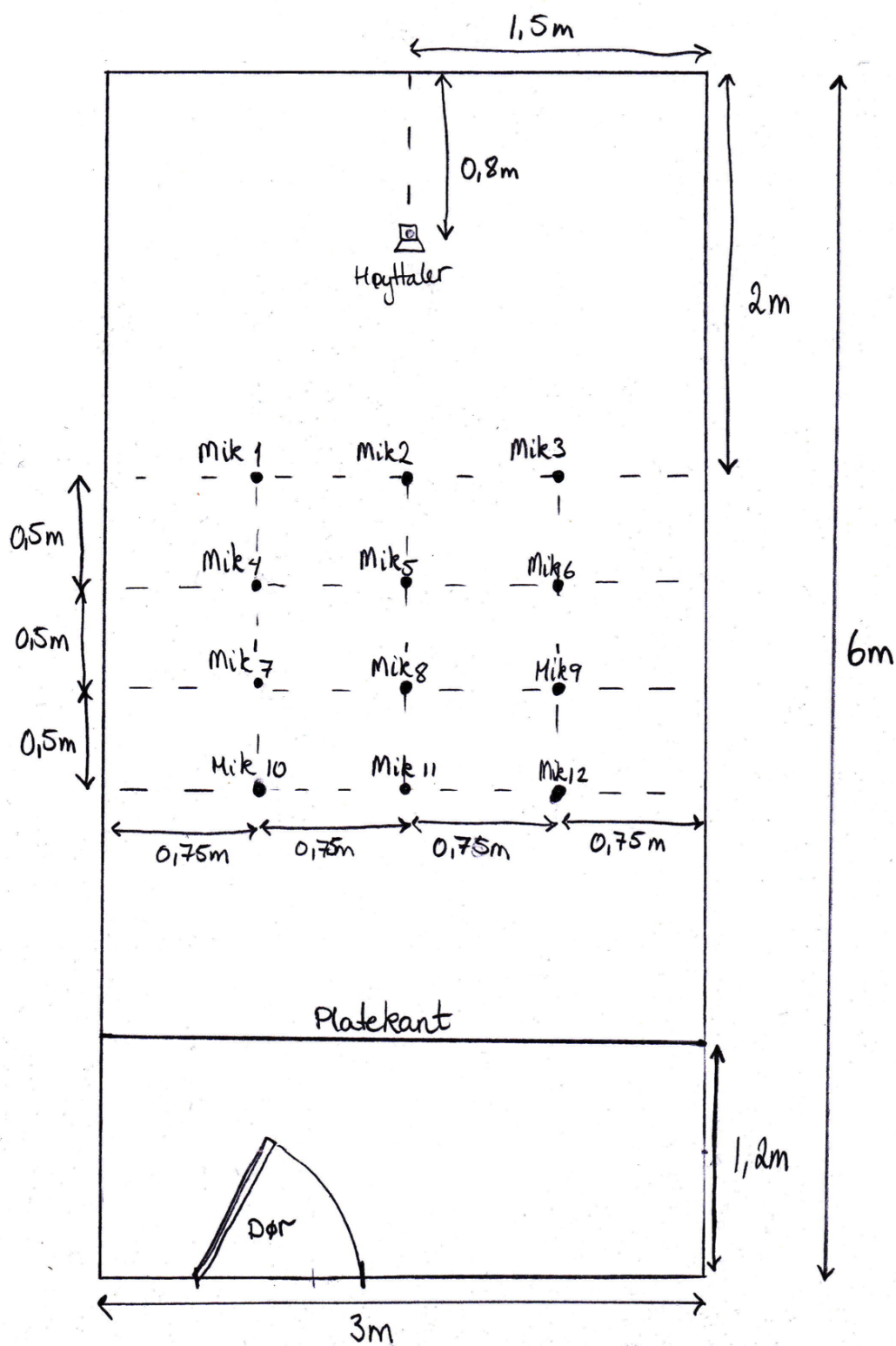
En PC med WinMLS [9] ble brukt for å måle impulsresponsen i rommet. De to mikrofonene, via forsterker og forforsterker, ble plassert i linje-inngangen på lydkortet, og høyttaleren, via effektforsterkeren, ble koblet til linje-utgangen. Samplingsfrekvensen ble satt til 48 kHz. Det vil gi resultater i fullskalafrekvens til 4,8 kHz, og oktavnband opp til og med 2 kHz.

Volumet på høyttaleren ble satt tilstrekkelig høyt uten at det ble noe forvrengning i høyttalerelementene eller vibrasjoner i høyttalerstativet og liknende. De to forsterkerne til mikrofonene ble satt til maksimal forsterkning på 40 dB for å få tilstrekkelig signal i WinLMS.

Mikrofonene ble først kalibrert med intensitetskalibratoren ved å sende ut rosa støy med samme fase og amplitude, for så å ta ett opptak av de to kanalene i WinMLS på 1,2 sekund for å kunne fase- og nivåkalibrere mikrofonene.

Det ble så utført måling av impulsresponsen i WinMLS, i 12 posisjoner fordelt ut over skalamodellen, vist i Figur 4.3. Høyden fra taket til mikrofonene og høyttaler er henholdsvis 24 og 50 cm, som tilsvarer 1,2 og 2,5 m i full skala. Grunnen til at mikrofonplasseringene ikke er de samme som i CATT-beregningen skyldes åpningen på 1,2 m mellom platene og endeveggen ved inngangsdøren. På grunn av denne ble mikrofonene trukket litt tettere fremover for å eliminere mest mulig effekten av åpningen mellom platene og bakveggen.

For å måle impulsresponsene ble det brukt sinussveip med frekvenser fra 50 Hz og oppover, med energi tilsvarende rosa støy. Sveipet hadde varighet på 10 sekund for hver posisjon og høyttaler, og impulsresponslengden ble valgt til 1,2 sekund. En tidlig testmåling med litt annet utstyr er vist i Figur 4.4, men målemetoden er akkurat lik.



Figur 4.3: Oversikt over skalamodellen med høyttalerplassering og måleposisjoner



Figur 4.4: Testmåling med mikrofon og høyttaler på størst A og høyest h (modell snudd opp ned). Det er *ikke* denne mikrofonen som ble brukt i de virkelige målingene. Lysarmaturen ble også skrudd ned, og bordene ble byttet ut med et stilas.

4.1.4 Beregningsmetode

Parametrene T , EDT og C_{80} ble beregnet i WinMLS under modulen *Calculations* → *RoomAcoustics*. Her ble signalet fra kun den ene av mikrofonene brukt. Dette ble gjort ved å endre samplingsfrekvensen på impulsresponsen i etterkant, ved å redigere MATLAB-funksjonen *loadimp.m* som følger med WinMLS, slik at den skriver til en ny WinMLS-fil med endret samplingsfrekvens. Denne endrede funksjonen som ble brukt er gitt i Vedlegg A.3. Dette fører til at impulsresponsen blir 5 ganger så lang som den som ble målt. Dette tilsvarer et rom som er 5 ganger så stort, og parametrene blir beregnet korrekt. Det eneste som ikke er tatt hensyn til da er å korrigere for luftabsorpsjonen, men det ble valgt å ikke gjøre dette i denne oppgaven, da det er de relative endringene som er mest interessante. Absorpsjonsmengden i skalamodellen ble heller ikke er tilpasset for å få rett etterklangstid som en vanlig konsertsal. En luftabsorpsjonskorreksjon vil også ha mest å si på de høye frekvensene.

4.1.5 Beregning av lateralfaktoren LF

For å beregne de laterale parametrene trengs trykket fra en åttetallsmikrofon p_8 . Dette kan beregnes fra to kulemikrofoner p_1 og p_2 på følgende måte [10]

$$p_8 = \frac{p_1 - p_2}{j2\pi fd/c}, \quad (4.1)$$

der d er avstanden mellom mikrofonene i meter, f er frekvensen på signalet i Hz og c er lydhastigheten i m/s.

Fase- og nivåkalibreringen av mikrofonene ble gjort ved å velge mikrofon 1 som referanse, og så lage overføringsvektoren

$$T = \frac{h_1}{h_2} \implies h_{2,kal} = T \cdot h_2 \quad (4.2)$$

der h_1 og h_2 er frekvensresponsen til mikrofon 1 og 2, og $h_{2,kal}$ er den kalibrerte frekvensresponsen til mikrofon 2. Trykksignalene oppnås ved å ta en invers fouriertransform.

Det ble derfor laget to MATLAB-funksjoner som kalibrerte mikrofonsignalene og laget åttetallsmikrofonsignalet, med navn henholdsvis *calibration.m* og *dipole.m* i Vedlegg A.4 og A.5.

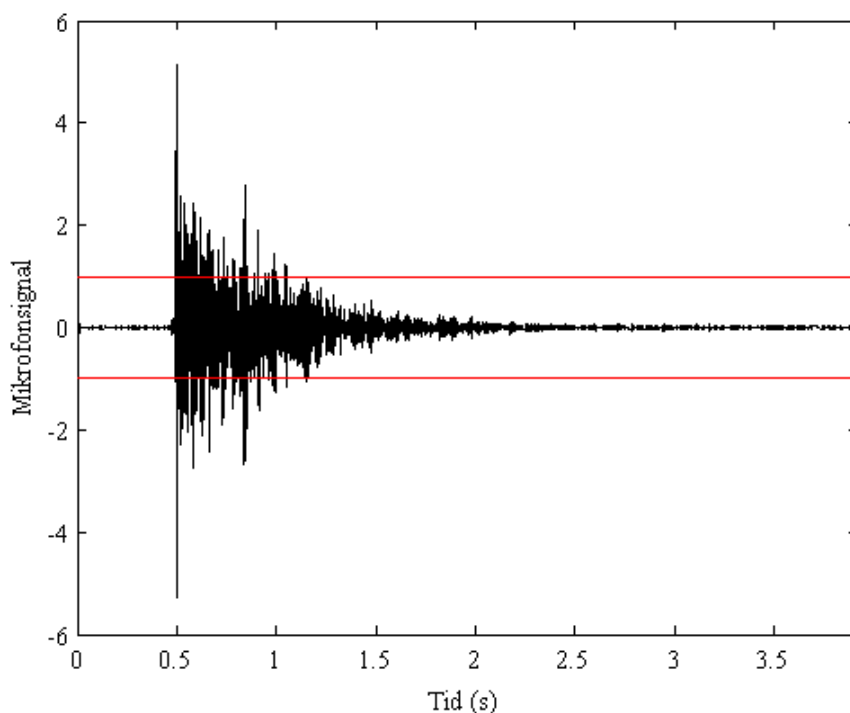
Deretter ble åttetallsmikrofonsignalet og kulemikrofonsignalet importert tilbake i WinMLS, og lateralfaktoren LF ble beregnet ved å velge *Calculation* → *Spaciousness*.

Beregning av LG_{mod} og sen (lateral/total)-energi

For å beregne den modifiserte lateralenergien LG_{mod} , likning (3.1) side 26, ble den beregnet direkte fra impulsresponsene med MATLAB-programmet *LG_mod_winmls.m* som er gitt i Vedlegg A.6. Det samme ble sen (lateral/total)-energi, likning (3.2), beregnet med MATLAB-programmet *late_ratio_winmls.m* gitt i Vedlegg A.7.

Siden de målt impulsresponsene inneholder støy, i motsetning til CATT-beregningen, inneholder begge disse MATLAB-programmene en parameter *threshold* som

er nivået programmet bruker for å finne starten av impulsresponsen. Dersom absoluttverdien av nivået er over denne grensen, settes $t = 0$ der. Denne parameteren ble satt til verdi 1, ved å se på hva nivået på impulsresponsene lå på slik at ikke støyen før direktelyden blir registrert som starten, se Figur 4.5. Det må merkes at dette er en *meget* primitiv metode, som kan gi ganske usikre resultater dersom det ved noen målinger skulle være uønsket støy med nivå over denne grensen i området før direktelyden. Siden det var veldig lite signal på målingen ved 63 Hz, grunnet liten avstand mellom mikrofonene, ble det kun beregnet verdier for LG_{mod} og sen (lateral/total)-energi i oktavbånd mellom 125 og 500 Hz.



Figur 4.5: Impulsresponsen til åttetallsmikrofon nr. 7 ved $A = 0,86$ og $h = 0,75$ ved 125 Hz. Røde streker markerer parameteren $threshold = 1$ i MATLAB-programmet `LG_mod_winmls.m`

4.2 Resultater

I denne seksjonen er resultatene fra målingen av parametrene T , EDT , C_{80} og LF , samt LG_{mod} og forholdet sen (*lateral/total*)-energi, fra skalamodellmålingen gitt ved $A = 0, 40, 0,60$ og $0,86$ og variasjon i h .

Alle frekvensene er gitt som ferdig skalerte fullskalafrekvenser, altså delt på en faktor 5, slik at de er sammenlignbare med CATT-beregningen. De fleste akustiske parametrene er målt i oktavbånd mellom 63 og 2000 Hz, mens de laterale parametrene er målt i oktavbånd mellom 125 og 500 Hz.

Alle målingene er også her, som i CATT-beregningen, gitt med et student-t-konfidensintervall over de 12 mikrofonene.

4.2.1 Signal- til støyforhold i målinger

Signal- til støyforhold snr for den ene av mikrofonene og åttetallmikrofonen er gitt i henholdsvis Tabell 4.2 og 4.3.

Verdt å merke er at det er veldig lavt signal- til støyforhold for åttetallsmikrofonen ved 63 Hz. Dette skyldes nok den lille avstanden på 1 cm imellom mikrofonene, som gir lite signal når bølgelengden er stor og man tar differansen på to veldig like signaler. Det kunne derfor eventuelt blitt gjort en ny måleserie med en større avstand imellom mikrofonene, men [6] tyder på at det er lateralfaktoren imellom 125 og 1000 Hz som har mest å si på oppfattelsen av lateral lyd.

Tabell 4.2: Signal- til støyforhold snr i desibel for den ene av mikrofonene i målingen av impulsresponsen

Frekvens (Hz)	63	125	250	500	1000	2000
snr (dB) A=0,40 h=0,30	34,7	46,7	54,2	58,2	59,4	53,2
snr (dB) A=0,40 h=0,50	35,0	48,1	55,7	59,7	59,5	52,9
snr (dB) A=0,40 h=0,75	32,4	44,9	52,8	58,5	59,7	52,8
snr (dB) A=0,60 h=0,30	33,0	47,2	54,6	57,7	59,7	53,4
snr (dB) A=0,60 h=0,50	35,2	47,9	54,1	60,1	59,8	53,6
snr (dB) A=0,60 h=0,75	31,5	43,7	50,8	54,5	56,7	51,6
snr (dB) A=0,86 h=0,30	34,6	49,0	55,3	60,2	60,4	53,9
snr (dB) A=0,86 h=0,50	32,5	47,1	54,8	59,4	59,5	53,3
snr (dB) A=0,86 h=0,75	33,7	47,3	54,5	59,9	60,0	53,1
snr (dB) Uten tak	34,2	48,0	54,4	57,8	59,3	52,8
snr (dB) Gjennomsnitt	33,7	47,0	54,1	58,6	59,4	53,1

Tabell 4.3: Signal- til støyforhold snr i desibel for åttetallmikrofonen i målingen av impulsresponsen

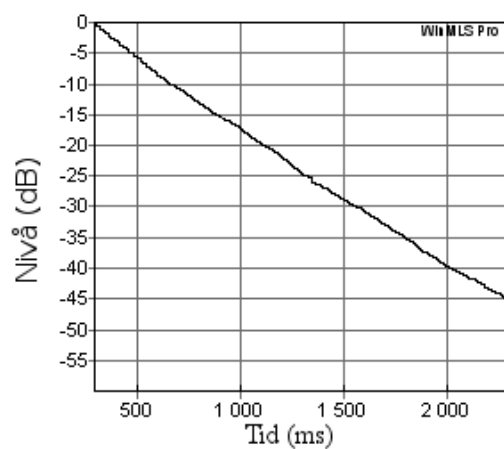
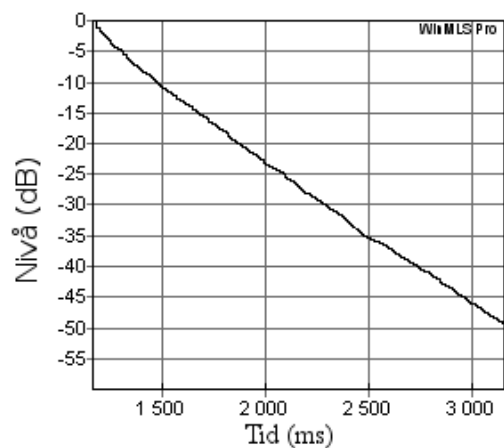
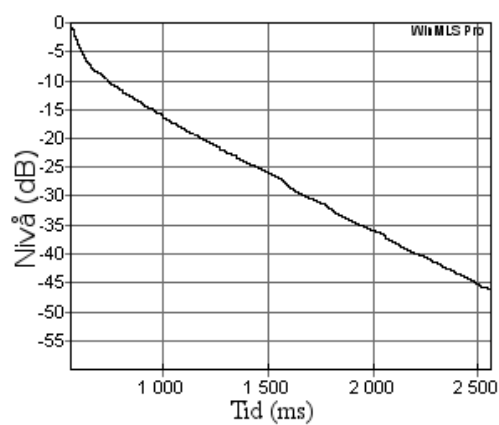
Frekvens (Hz)	63	125	250	500
snr (dB) A=0,40 h=0,30	14,1	27,8	31,4	32,3
snr (dB) A=0,40 h=0,50	15,1	28,0	31,1	31,7
snr (dB) A=0,40 h=0,75	16,4	29,6	32,5	32,5
snr (dB) A=0,60 h=0,30	13,7	27,3	32,5	32,6
snr (dB) A=0,60 h=0,50	15,7	27,2	33,1	33,7
snr (dB) A=0,60 h=0,75	15,8	27,4	32,1	32,2
snr (dB) A=0,80 h=0,30	16,6	27,2	34,0	35,2
snr (dB) A=0,80 h=0,50	15,1	25,9	33,5	35,1
snr (dB) A=0,80 h=0,75	16,3	26,0	34,1	36,2
snr (dB) Uten tak	14,4	28,7	31,2	31,7
snr (dB) Gjennomsnitt	15.3	27.5	32.5	33.3

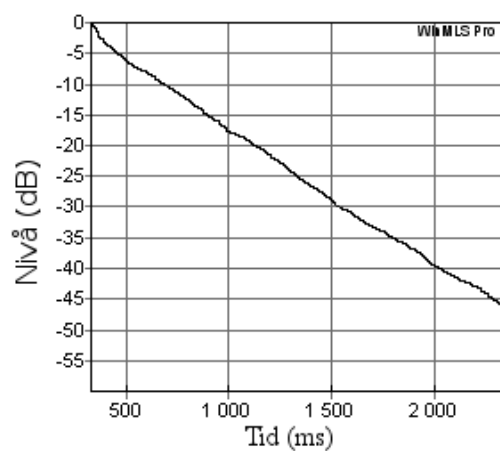
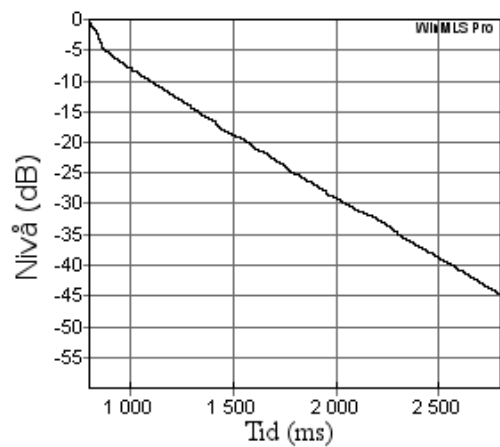
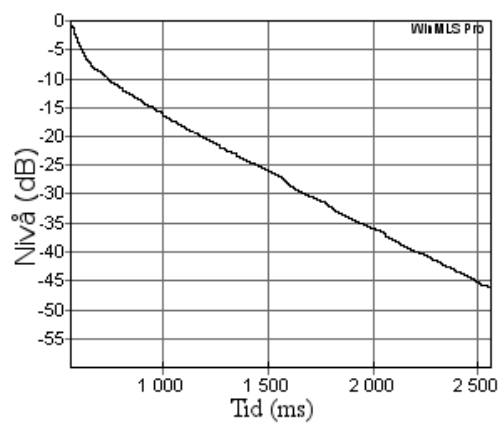
4.2.2 Målte Schröderkurver ved variasjon i A og h

Schröderkurver, for den ene mikrofonen av mikrofonpar nr. 5 i Figur 4.3, med konstant $A = 0,86$ og forskjellig i h er gitt i Figur 4.6 og konstant $h = 0,25$ med forskjellig A er gitt i Figur 4.7.

Siden målingene ikke er synkroniserte, starter tidsaksen på forskjellige tidspunkter i alle figurene, men alle har tidsakse med lengde 2 sekund og dB-akse fra 0 til -60 dB, slik som for CATT-beregningen. Brattheten på kurvene i alle figurene er derfor sammenlignbare.

Dersom en sammenligner de målte Schröderkurvene med de som ble beregnet i CATT-acoustics, side 16 og 17, ser en at mye av de samme tendensene synes å være til stede i målingen som i beregningen. Forskjellen er at den markerte knekken i beregningen er litt mer jevn i målingen.

(a) $h=0,75$ (b) $h=0,50$ (c) $h=0,30$ Figur 4.6: Schröderkurver for $h = 0,30, 0,50$ og $0,75$ ved $A = 0,86$

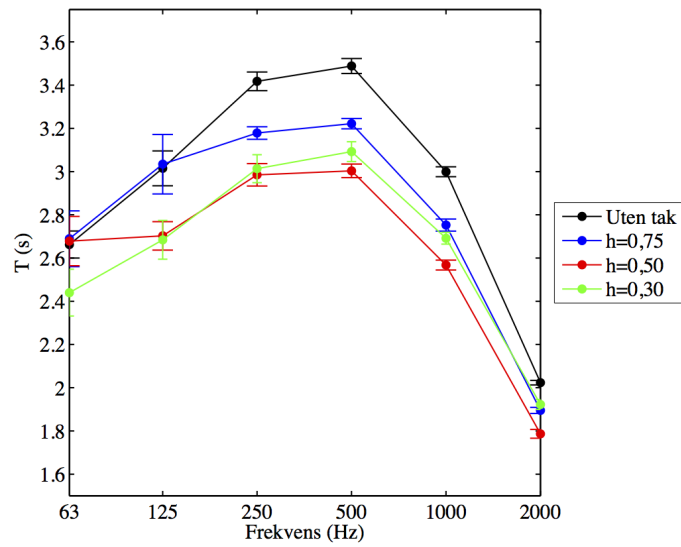
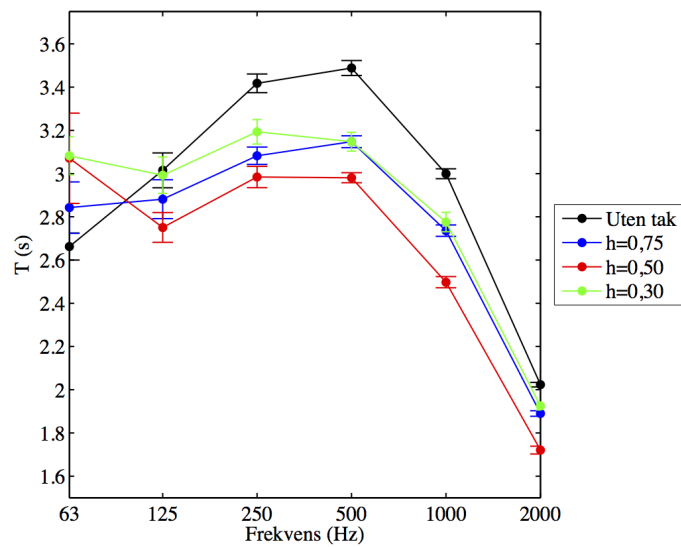
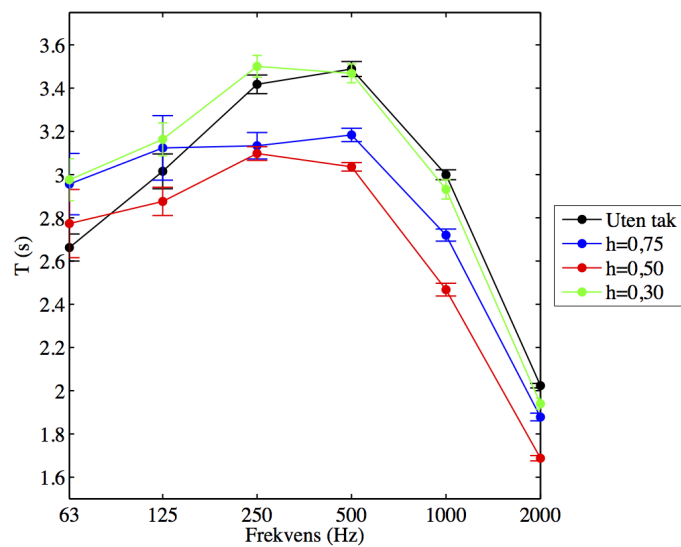
(a) $A=0,40$ (b) $A=0,60$ (c) $A=0,86$ Figur 4.7: Schröderkurver for $A = 0,40, 0,60$ og $0,86$ ved $h = 0,30$

4.2.3 Målt etterklangstid, T

Målt etterklangstid T ved $A=0,40$, $0,60$ og $0,86$ og endring i h er gitt i Figur 4.8.

Som det fremgår av figurene ser det ut til at etterklangstiden *synker* litt når man senker det flytende taket i skalamodellen, i motsetning til CATT-beregningen der etterklangstiden økte. Unntaket er for $h = 0,30$ der etterklangstiden øker igjen, mest for stor verdi av A . Det kan ha noe å gjøre med at det er først på så lavt tak at Schröderkurvene begynner å få en betydelig stor nok knekk til at etterklangstiden øker, slik den gjorde i CATT-beregningen for alle verdier av h . Det virker derfor som om CATT-beregningen overvurderer hvor stor denne knekken blir, slik Schröderkurvene viste. Det ser også ut til at denne økningen for $h = 0,30$ er større for et bredt tak, slik som for CATT-beregningen.

Ved $A \geq 0,60$ ser det ut til at etterklangstiden synker mindre for de lave frekvensene, og til og med øker nede ved 63 - 125 Hz, når det flytende taket senkes. Dette skyldes trolig at mer lavfrekvent lyd passerer åpningen på siden ved en liten åpning, på grunn av at diffraksjonen er større ved de lave frekvensene. Dette er helt motsatt tendens i forhold til CATT-beregningen som predikterte at etterklangstiden synker ved de lave frekvensene når det flytende taket senkes. Det er dog ikke lik absorpsjonsfaktor på veggene i skalamålingen og CATT-modellen, slik at resultatene ikke uten videre kan sammenlignes, men resultatet er interessant. Det kan derfor virke som om det komme mer lavfrekvent lyd opp forbi det flytende taket, og at etterklangstiden kan øke litt her. Ved de høye frekvensene og et bredt tak, vil trolig etterklangstiden synke litt.

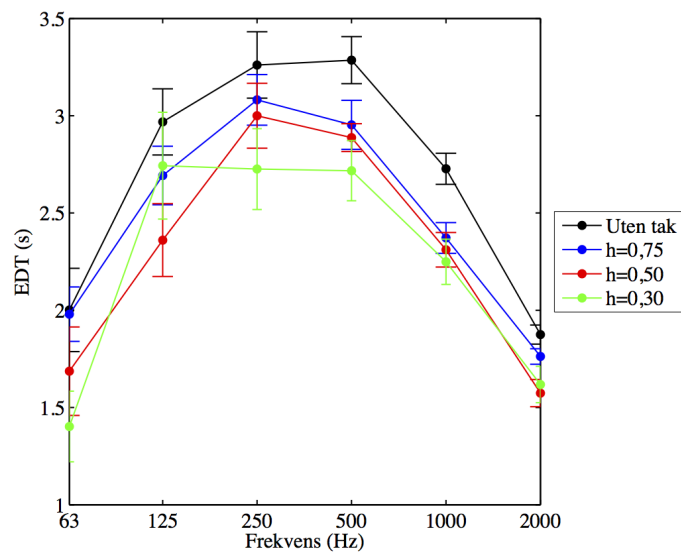
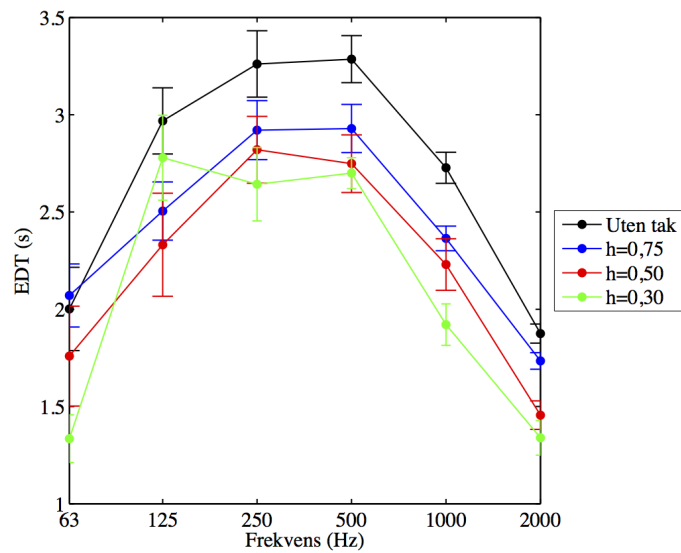
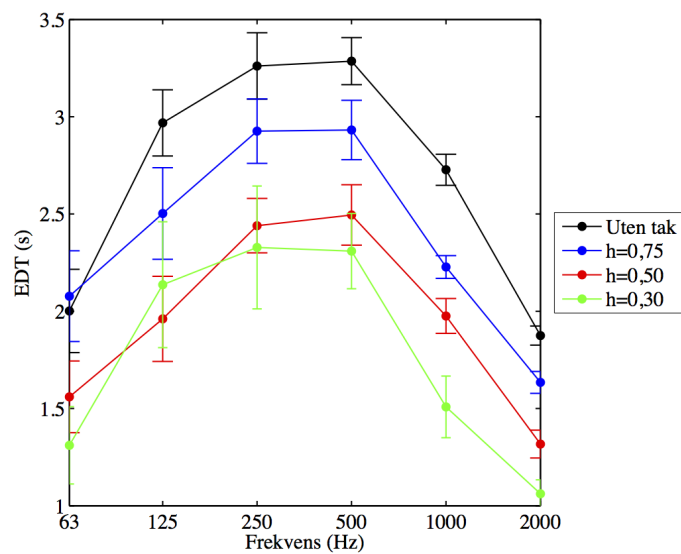
(a) $A=0,40$ (b) $A=0,60$ (c) $A=0,86$ Figur 4.8: Målt etterklangstid T ved $A = 0,40, 0,60$ og $0,86$ og variasjon i h

4.2.4 Målt tidlig etterklangstid, EDT

Målt tidlig etterklangstid EDT ved $A=0,40$, $0,60$ og $0,86$ og endring i h er gitt i Figur 4.9.

Den tidlige etterklangstiden ser ut til å *synke* når det flytende taket senkes for alle verdier av A . Det skjer ikke her at EDT øker slik som i Figur 3.6(a) i CATT-beregningen. Det har nok også å gjøre med at Schröderkurvene ikke knekker like mye som i CATT-bereningen.

Resultatet ved 125 Hz og $h = 0,30$ virker noe rart. Spredningen i verdier er ikke noe særlig større her enn ellers, så det har ikke å gjøre med en tilfeldig målefeil å gjøre. Signal- til støyforholdet i Tabell 4.2 er heller ikke spesielt lavt ved denne høyden på det flytende taket. Det mistenkes at dette resultatet kan skyldes en eller annen resonans på grunn av en rom-mode.

(a) $A=0,40$ (b) $A=0,60$ (c) $A=0,86$

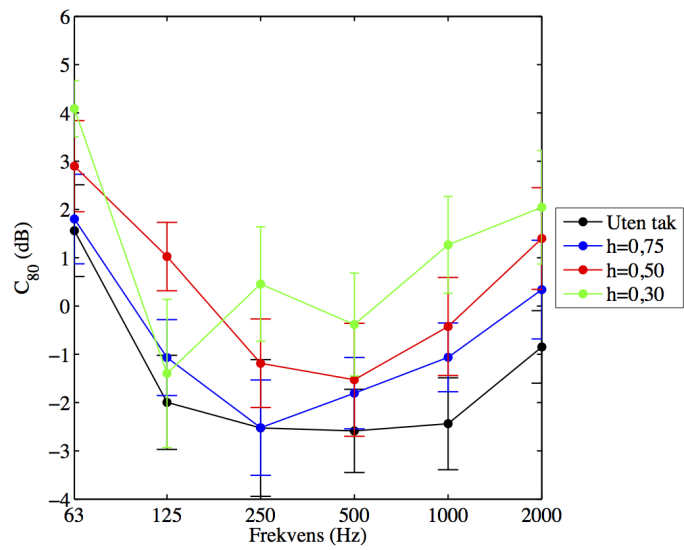
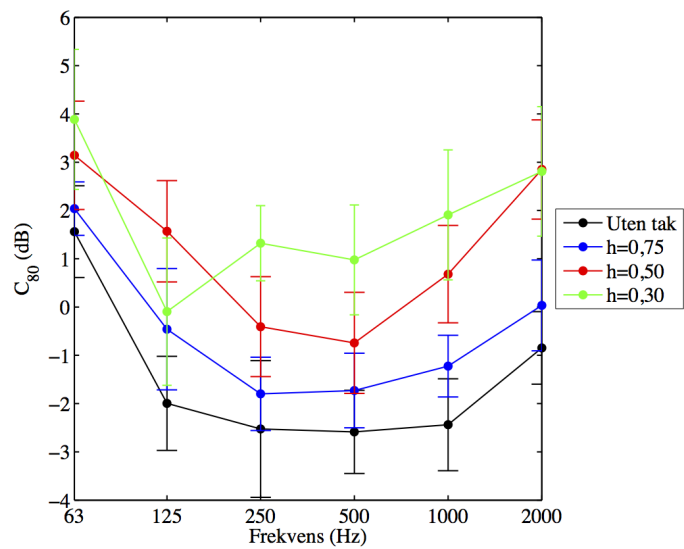
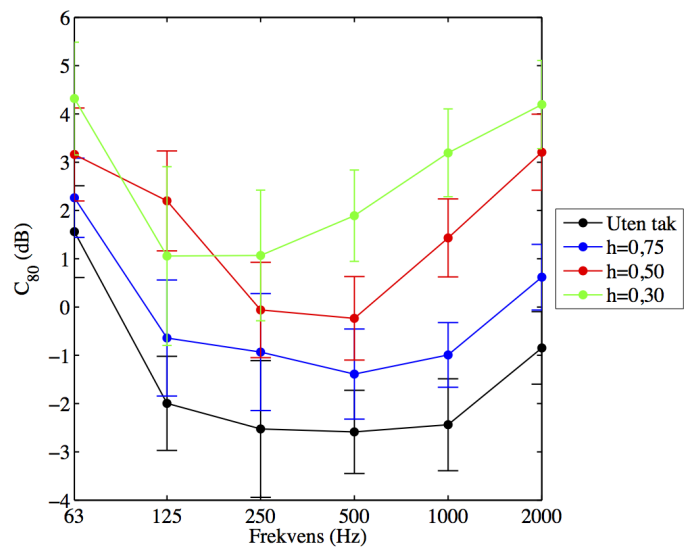
Figur 4.9: Målt tidlig etterklangstid EDT ved $A = 0,40, 0,60$ og $0,86$ og variasjon i h

4.2.5 Målt klarhet, C_{80}

Målt klarhet C_{80} ved $A=0,40$, $0,60$ og $0,86$ og endring i h er gitt i Figur 4.10.

Det er tydelig at klarheten i skalamodellen *stiger* når det flytende taket senkes, som harmonerer med at *EDT* synker. Dette er samme resultat som for CATT-beregningen.

Her er det også samme spesielle resultat for 125 Hz som for *EDT*.

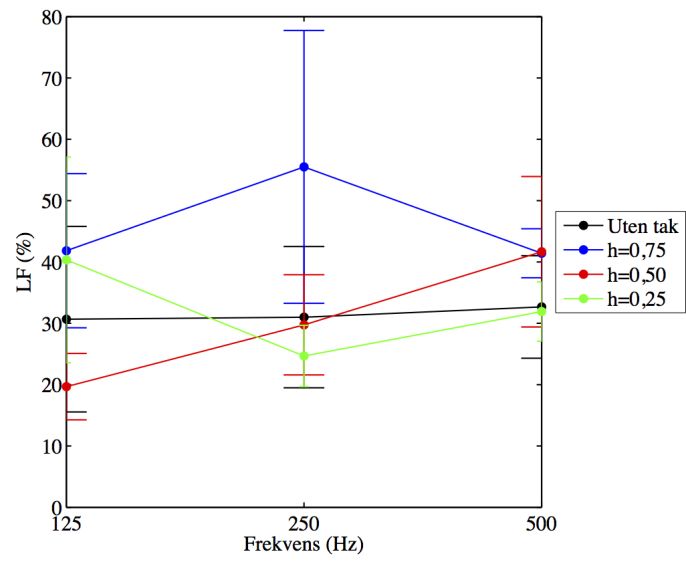
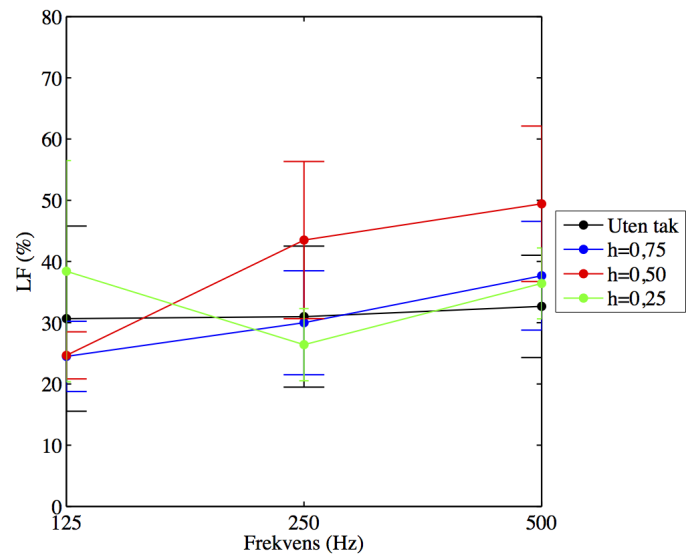
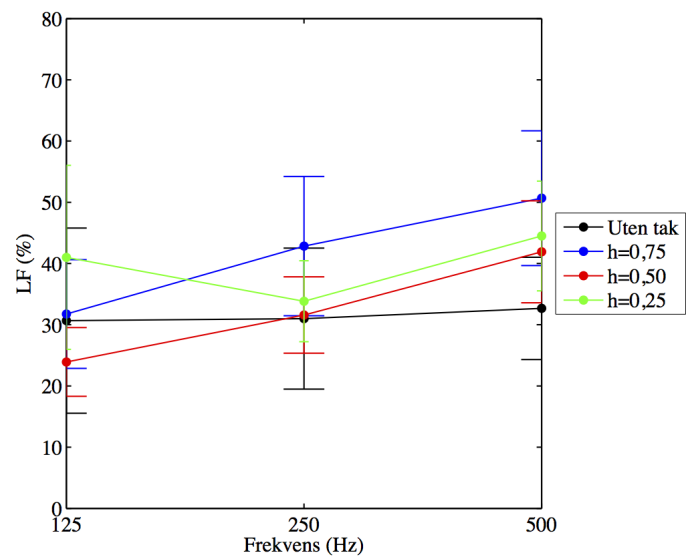
(a) $A=0,40$ (b) $A=0,60$ (c) $A=0,86$ Figur 4.10: Målt klarhet C_{80} ved $A = 0, 40, 0,60$ og $0,86$ og variasjon i h

4.2.6 Målt lateralfaktor, LF

Målt lateralfaktor LF ved $A=0,40$, $0,60$ og $0,86$ og endring i h er gitt i Figur 4.11.

Lateralfaktoren er målt imellom 125 og 500 Hz, da det var for lavt signal på målingen ved 63 Hz. De målte verdiene er trolig litt for høye etter hva man ville forventet. Det er dog ikke korrigeret for luftabsorpsjonen, som nok vil endre verdiene litt, men det settes spørsmål ved hvor pålitelige disse resultatene er.

Det er ikke lett å trekke noen konklusjoner utifra disse figurene. Lateralfaktoren ser ut til å endre seg ganske tilfeldig, og det er stor spredning i verdier, slik at det ikke er mulig å si noe om den synker eller stiger ved å endre h eller A . Målingen er derfor for usikker til å kunne gi anvendbare resultater.

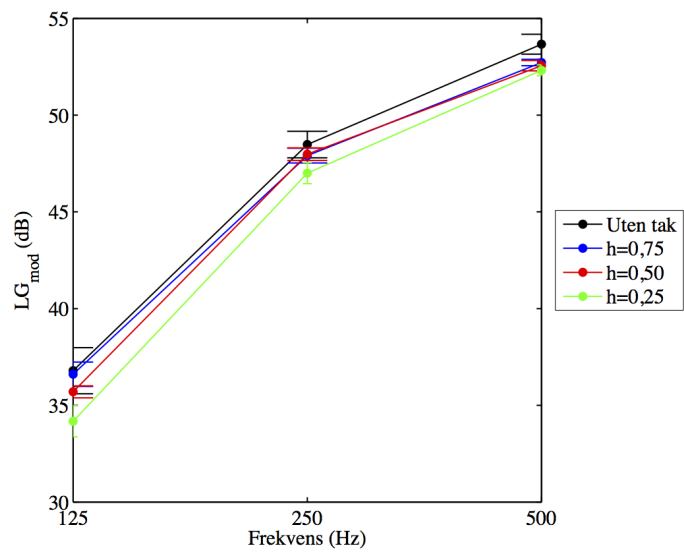
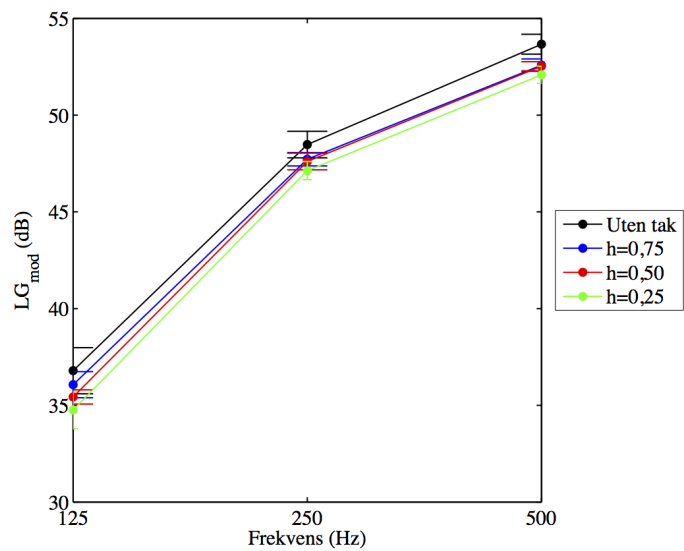
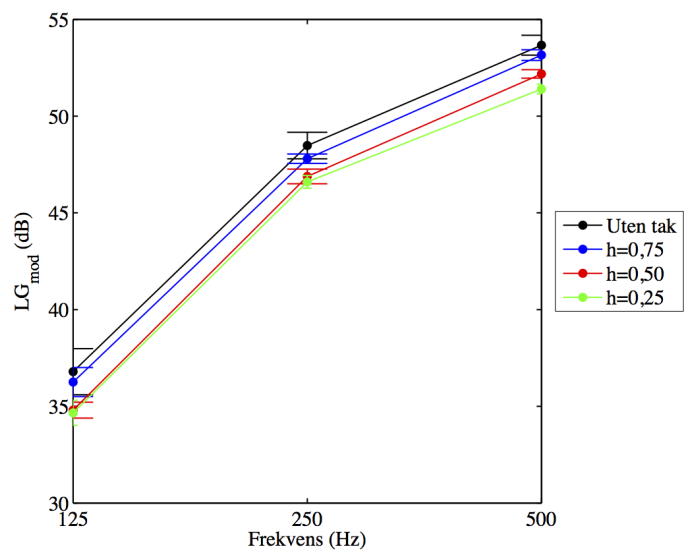
(a) $A=0,40$ (b) $A=0,60$ (c) $A=0,86$ Figur 4.11: Målt lateralfaktor LF ved $A = 0,40, 0,60$ og $0,86$ og variasjon i h

4.2.7 Målt modifisert sen lateralenergi LG_{mod}

Målt modifisert sen lateralfaktor LG_{mod} ved $A=0,40$, $0,60$ og $0,80$ og endring i h er gitt i Figur 4.12.

Den sene delen av impulsresponsen til åttetallsmikrofonen ser ut til å gi mindre spredning i resultatene, sammenlignet med den tidlige delen.

Det ser her ut som om det er en tendens til at LG_{mod} *synker* når høyden på det flytende taket *senkes*, slik som for CATT-beregningen. Det er her også snakk om endringer på maksimalt rundt 3 dB, som for CATT-beregningen.

(a) $A=0,40$ (b) $A=0,60$ (c) $A=0,88$

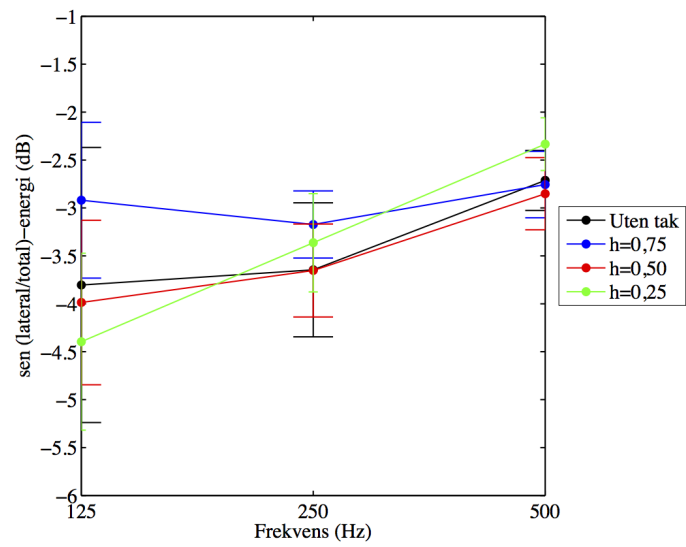
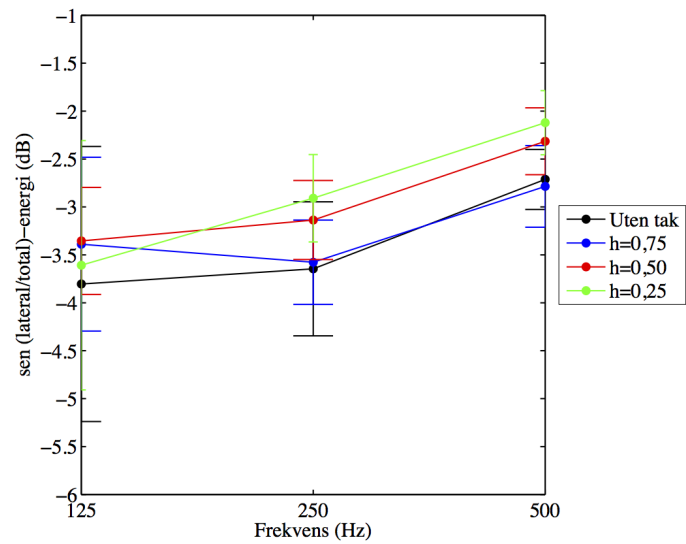
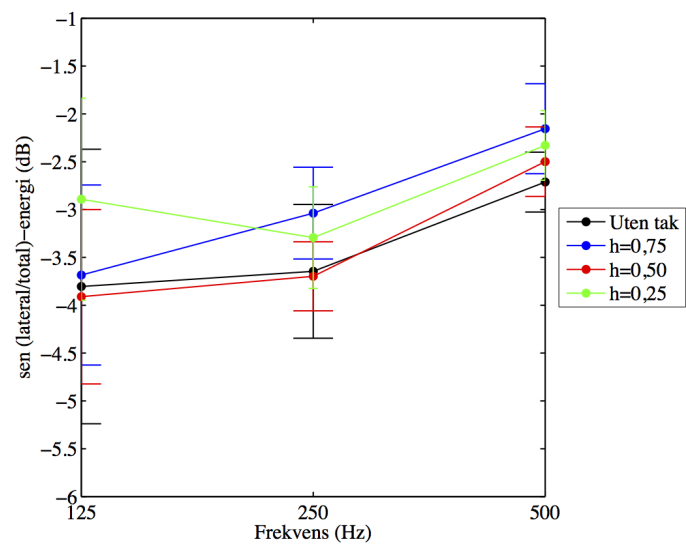
Figur 4.12: Målt modifisert sen lateralenergi LG_{mod} ved $A = 0,40, 0,60$ og $0,80$ og variasjon i h

4.2.8 Målt sen (lateral/total)-energi

Målt sen (lateral/total)-energi ved $A = 0,80, 0,60$ og $0,40$ og endring i h er gitt i Figur 3.11.

Det er mer vanskelig å si noe om hva som skjer med sen (lateral/total)-energi, da det er ganske små endringer på maksimalt ca. 1 dB, og relativt stor spredning i verdier sammenlignet med disse endringene. Til tross for dette, virker det som om det også her, som i CATT-beregningen, er en liten tendens til at dette forholdet *øker* når det flytende taket *senkes*. Disse resultatene er ikke gode nok til å kunne fastslå dette, men det ser ut til at tendensen er der, slik som for CATT-beregningen.

CATT-beregningen tydet på at forholdet sen (lateral/total)-energi ikke ville øke på de laveste frekvensene. Av disse resultatene ser det ut til at forholdet vil øke for de fleste frekvenser og konfigurasjoner av A og h , ved å ha et flytende tak. Dette er ikke gode nok resultater for å fastslå at forholdet sen (lateral/total)-energi vil øke også for de lave frekvensene, muligens på grunn av diffraksjon som ikke er like godt tatt hensyn til i CATT-beregningen, men tendensen er der.

(a) $A=0,40$ (b) $A=0,60$ (c) $A=0,86$

Figur 4.13: Målt sen (lateral/total)-energi ved $A = 0,40, 0,60$ og $0,80$ og variasjon i h

Kapittel 5

Auralisering i CATT-acoustics

For å få en liten idé om hvordan løsningen med et flytende tak kommer til å høres ut i praksis ble det foretatt noen enkle auraliseringer i CATT-acoustics.

5.1 Metode

Auraliseringene i CATT-acoustics ble laget ved å bruke verktøyet *Post-Processing* → *Convolution*. CATT-acoustics beregner da konvolusjonen mellom impulsresponsen til den valgte mikrofonen og et ekkofritt lydopptak. Den tar også hensyn til såkalte HRTF (eng. Head Related Transfer Function) som er et hørselsfilter avhengig av lydens innfallsvinkel mot øret, som er veldig viktig når den resulterende lydfilen skal spilles av via hodetelefoner, slik disse opptakene er ment for.

Det ble laget auraliseringer for mikrofon nr.5 i Figur 3.1 side 12, som er plassert omtrent midt i salen. Det ble gjort auralisering for alle de 9 forskjellige kombinasjonene av parametrene A og h , samt uten flytende tak.

Lydfilene som ble brukt til å lage auraliseringen er gitt i Tabell 5.1. Taleopptaket er tatt fra CATT-acoustics eget bibliotek med ekkofrie opptak. Den klassiske musikken er hentet fra en cd med ekkofrie orkesteropptak [11].

Tabell 5.1: Lydfiler brukt i auralisering i CATT-acoustics

Innhold	Lydfil	Kilde
Tale	mt_44_an.wav	CATT-acoustics
Handel, Water Music Suite - Nr.6, takt 1-11	Spor 9	Denon-cd
Mozart, Figaros bryllup - Overture, takt 1-18	Spor 10	Denon-cd
Bruckner, Symfoni nr.4 - 1.sats, takt 560 - 573	Spor 13	Denon-cd

5.2 Resultat

De resulterende lydfilene er gitt i den vedlagte *auralisering.zip*-filen til denne oppgaven. Filene er organisert i mappene $A40$, $A60$ og $A80$ for hver bredde av det flytende taket i prosent. Filnavnene er laget med følgende system:

$$innhold_h[\text{verdi i prosent}].WAV,$$

der $innhold$ referer til Tabell 5.1 og h -verdien i prosent er høyden på det flytende taket.

5.2.1 Hørbare effekter

Å foreta lyttetester for å evaluere slike auraliseringer er en krevende oppgave, som egentlig krever mange testpersoner som hører på opptakene uten å vite forskjellen på dem på forhånd. Det er mange eksempler på at menneskets øre og oppfattelsesevne i veldig stor grad preges av hva vi forventer, slik at blindtester er helt nødvendig for å oppnå statistisk gyldige resultater. Dette er en krevende og omfattende prosess som ikke har blitt gjort i denne oppgaven. Det vil derfor her ikke bli presentert noe absolutt om hvilke effekter som høres i auraliseringene, men noen tendenser har blitt påpekt som det er interessant å teste ut mer detaljert i en eventuell videre studie.

Av taleauraliseringene virker det som om det er en tydelig tendens til at taleoppfattbarheten øker når det flytende taket senkes. Denne effekten er ennå tydeligere jo bredere det flytende taket er. Dette samsvarer med den beregnede taletydighetsindeksen STI i Figur 3.8 side 24, men dette må undersøkes nærmere for å kunne trekke noen konklusjoner.

Den samme økningen i tydelighet synes også å være hørbar på musikk. Avspillingen av de raske fiolintonene i starten av Figaros bryllup av Mozart synes å være mer definerte ved et lavt og bredt tak enn ved et høyt tak. Det synes å være vanskeligere å høre tydelige forskjeller på musikk enn på tale, da dette er mer komplekse signaler der det er flere faktorer som spiller inn på oppfattelsen. Det vil derfor ikke bli påpekt andre forskjeller her, men det hadde vært interessant å undersøkt dette nærmere i en ny studie av en slik type konsertsal.

Samlet diskusjon

Både CATT-beregningen og skalamålingen viste at det flytende taket har en tydelig effekt. I denne seksjonen vil resultatene bli oppsummert og diskutert i sin helhet.

6.1 Klarhet og taletydighet

Den kanskje mest tydelige effekten av å heve og senke det flytende taket er at klarheten C_{80} stiger når det flytende taket senkes. Ved bredde $A = 0,80$ tyder beregningen og målingen på at man oppnår en total økning i klarhet på ca. 6 dB ved å senke høyden på det flytende taket fra $h = 1$ (uten tak) til $h = 0,25$ i Figur 3.7c side 23. Dette gjør at for eksempel taletydigheten i salen vil øke. CATT-beregningen tilsier at med maksimal bredde på det flytende taket, så vil taletydigheten øke fra *dårlig* til *god*, Figur 3.8 side 24, noe som må sies å være en veldig god effekt.

En av hovedfordelene med denne typen løsning for å øke klarheten, istedenfor å innføre absorpsjon, er at man ikke reduserer energien i salen. Det som heller skjer er at ved å senke det flytende taket flyttes energien til et tidligere sted i impulsresponsen. Man vil derfor få et høyere nivå på for eksempel tale, enn man ville fått ved å innføre absorpsjon ved like god taletydighet.

Dersom hovedpoenget med konsertsalen er å kunne regulere akustikken fra for eksempel orkestermusikk til konferanse, der tale er det viktigste, vil det være gunstig å ha det flytende taket så bredt som mulig. Effekten på parameteren STI er mindre med et smalt tak, jamfør Figur 3.8. Auraliseringene som ble laget med tale indikerer også at det flytende taket bør ha en ganske stor bredde for å oppnå en veldig god effekt.

Til musikkfremførelse er klarheten rundt -2 dB dersom det flytende taket er helt oppe (beregnet for tomt rom), som er innenfor det anbefalte området for en konsertsal for symfonisk musikk. Klarheten kan dermed justeres til ca. +4 dB ved å senke det flytende taket ned til $h = 0,25$. Taket fungerer derfor på noe av samme måte som vanlige overhengende reflektorer i en tradisjonell konsertsal, som kan heves og senkes. Ulempen med disse er at siden de har et gitt areal, vil det effektive arealet avhenge av lydets innfallsvinkel. Det vil derfor være mer gunstig med et heldekkende flytende tak, for å få mer jevn refleksjon tilbake til publikum. En slik type løsning vil også være mye mer effektiv, og ha mulighet til å justere klarheten mye mer enn mange små reflektorer.

6.2 Etterklangstid

Med beregningen av etterklangstid ved en endring i høyden på det flytende taket var det litt sprikende resultater mellom CATT-beregningen og skalamålingen. CATT-beregningen tilsier at etterklangstiden T ville øke ganske mye ved å senke det flytende taket, spesielt for de høye frekvensene. Denne effekten var ikke tilstede i skalamålingen, bortsett fra på den laveste høyden $h = 0,30$. Dette tyder muligens på at raytracingberegningen i CATT-acoustics overestimerer denne effekten, og at den vil være mindre til stede i virkeligheten. Grunnen til at etterklangstiden øker, har også å gjøre med måten den blir beregnet på, siden det er lagt til grunn lineære Schröderkurver på logaritmisk skala. Schröderkurvene i skalamålingen hadde ikke like skarp knekk som CATT-beregningen, noe som kan være grunnen til at den beregnede etterklangstiden ikke øker like mye.

Skalamålingen tydet på at etterklangstiden ville øke ved 63 Hz, og det var en tendens til at den ikke sank så mye på de lave frekvensene. Dette kan skyldes at det er mye større diffraksjon ved de lave frekvensene, slik at det vil komme mer lavfrekvent enn høyfrekvent lyd opp forbi det flytende taket. Dette samsvarer også med det man finner for konsertsalene med et etterklangskammer, slik som konsertsalen i Dallas, USA, der økningen i etterklangstid er størst for frekvenser under 500 Hz [2]. Dette skyldes trolig at de høye frekvensene ikke kommer seg like lett igjennom åpningen inn og ut av etterklangskammeret som de lave frekvensene.

Med den tidlige etterklangstiden EDT var det mer samstemte resultater mellom CATT-beregningen og målingen. Begge resultatene tilsier at den tidlige etterklangstiden synker dersom det flytende taket senkes, som samsvarer med at klarheten øker. Dette virket også å kunne høres i auraliseringene med musikk, der tydeligheten av musikken syntes å øke når det flytende taket senkes.

Til musikkfremførelse er det den tidlige etterklangstiden som har mest å si på hvordan musikken oppfattes, spesielt hvis det er raske partier. Denne har man derfor stor mulighet til å kunne justere med et slikt flytende tak.

6.3 Lateralfaktor

Forventningen med en slik løsning, med et flytende tak med åpning langs sidekantene, var at lateralfaktoren skulle øke. Dette ventes fordi lyd som kommer tilbake fra rommet over det flytende taket vil komme fra sidene. Studien til Bradley og Soulodre [6] tyder på at man kan dele opplevelsen av lateral lyd inn i to faktorer, der økt lateralfaktoren LF gir en følelse av en stor kilde (eng. *aparent source width*), mens økt sen lateralenergi LG gir en følelse av at man er omsluttet av lyd (eng. *listener envelopment*).

CATT-beregningen for lateralfaktoren LF tyder på denne synker når det flytende taket senkes. Dette har nok å gjøre med at parameteren kuttet ved 80 ms, slik at lyden som kommer opp forbi det flytende taket ikke rekker å komme tilbake igjen for å bli med i parameteren. Ved å åpne slik på sidene mister man derfor refleksjoner fra sidene i den tidlige delen av impulsresponsen. Skalamålingen var for usikker til å kunne gi noen brukbare resultater på lateralfaktoren.

På beregningen av sen lateralenergi LG var både skalamålingen og CATT-be-

regningen enige om at denne også kommer til å synke ved å innføre et flytende tak. Denne var forventet å øke, noe som ikke så ut til å stemme. Det som økte var forholdet sen (lateral/total)-energi, slik at det vil forholdsmessig komme mer lyd fra sidene sent i impulsresponsen ved et flytende tak en uten. Problemet er at det totale nivået på denne sideinnfallende lyden vil reduseres, slik at den totale effekten på parameteren LG vil være negativ.

CATT-beregningen tydet også på at forholdet sen (lateral/total)-energi bare økte for frekvenser over 500 Hz. Skalamålingen, som var ganske usikker, hadde ikke denne tendensen. CATT-beregningen tar ikke fullt hensyn til diffraksjon, slik at det er sannsynlig at dette forholdet også vil øke for de lave frekvensene, slik som den usikre skalamålingen antydte.

Det ser ut som at denne løsningen med et flytende tak med sideåpninger ikke fungerer som man hadde ønsket på den sideinnfallende lyden. Det er derfor kanskje nødvendig med sidebalkonger for å få tidlige refleksjoner fra sidene ned til lytteren. Man kunne derfor kanskje tenkt seg en løsning med et flytende tak, og ”kunstige” sidebalkonger for å få tidlige siderefleksjoner tilbake til publikum.

Gade [5] setter også spørsmålsteget til parameteren sen lateralenergi LG , og hvor mye vekt denne skal pålegges, da denne positive effekten bare har blitt vist i lab-forsøk. Det er derfor mulig at det er de tidlige laterale refleksjonene som har mest å si.

6.4 Usikkerhetsmomenter i beregning og måling

6.4.1 CATT-beregning

En strålegansberegning er en statistisk prosess som alltid innebærer en viss grad av usikkerhet. Denne usikkerheten har blitt forsøkt gjort minimal ved å ha mange stråler per oktav (200 000).

Den kanskje største svakheten med en slik beregning er at det ikke tas skikkelig hensyn til bølgenaturen til lyden i området langs kanten av det flytende taket, som vil være ganske betydelig ved en slik åpning mellom to koblede rom. Ved de lave frekvensene vil man derfor ha en akustisk kopling mellom rommene, mens ved de høye frekvensene vil rommene være mer akustisk adskilt. CATT-acoustics tar til en viss grad hensyn til dette ved prøve å etterlikne diffraksjon ved kanten, men det er ikke en fullgod løsning. For å løse dette problemet måtte det blitt brukt andre numeriske metoder som løser bølgelikningen direkte, men disse er meget ressurskrevende på en datamaskin. Denne metoden er derfor en høyfrekventtilnærming.

6.4.2 Skalamåling

Den kanskje største usikkerheten med skalamålingen var den selvlagde åttetallsmikrofonen. En slik mikrofon er vanskelig å lage, siden man ideelt sett skulle hatt null avstand imellom mikrofonene, men dette vil gi veldig lavt signal ved de lave frekvensene. Man har derfor et dilemma imellom stor nok signal og god nok åttetallsmikrofon.

Resultatene for lateralfaktoren ble derfor veldig usikre, og det må stilles spørsmål til om man kan stole for mye på disse resultatene. Ideelt sett skulle det blitt brukt en ordentlig åttetallsmikrofon, som har riktig direktivitet.

Siden døren inn til rommet måtte kunne åpnes ble det også en åpning imellom platene og bakveggen, som ikke er tilstede i CATT-modellen. Dette kan også påvirke resultatene litt, siden lyd også kan propagere rundt det flytende taket denne veien.

Det ble heller ikke gjort korreksjon for luftabsorpsjonen, da denne ikke skaleres lineært. Det ble valgt å ikke gjøre dette da det er de relative endringene som er mest interessant. En eventuell korreksjon for luftabsorpsjon vil ha mest å si på høye frekvenser.

Absorpsjonsfaktoren på flater i skalamodell ble ikke ble korrigeret slik at det ble like verdier på de akustiske parametrene som i beregningen. Dersom forholdet imellom lavfrekvent og høyfrekvent absorpsjon er veldig forskjellig på målingen og beregningen, kan dette påvirke resultatene når man sammenligner.

6.5 Videre arbeid

Et naturlig steg videre i undersøkelsen av denne løsningen med et flytende tak i en konsertsal ville være å foreta lyttetester av auraliseringer, tilsvarende de som har blitt laget i denne oppgaven. Det trengs da mange testpersoner som kan sammenligne forskjellige opptak for å si hva som høres best ut.

Det hadde også gått an å testet ut om det hadde vært bedre å også hatt "kunstige" sidebalkonger for å få tidlige siderefleksjoner tilbake til publikum. Dette kunne også vært gjort med auralisering, eller tilsvarende akustiske beregninger eller måling.

En viktig ting å undersøke er også hvilke frekvenssegenskaper som oppstår ved en slik åpning imellom sideveggene og det flytende taket. Dersom lyden som kommer tilbake ifra rommet over det flytende talet vil ha en tydelig klangfarge som følge av at åpningen danner et frekvensfilter, kan det være veldig ugunstig for musikkfremførelse. Dette kunne derfor ha blitt undersøkt med en kraftigere numerisk beregning som løser bølge-ligningen direkte.

Konklusjon

I denne masteroppgaven har det blitt undersøkt hvilke akustiske egenskaper som kan oppnås ved å ha et fritthengende flytende tak med åpninger mot sideveggene i en modell av en konsertsal. Formålet ved oppgaven var å undersøke muligheten for å bruke denne som flerbrukssal til tale og musikk. Dette har blitt gjort ved å foreta beregninger i programmet CATT-acoustics, samt å måle på en selvlaget skalamodell av konsertsalen. Beregningene og målingen har i hovedsak vært de vanlige romakustiske parametrene for å beskrive akustikken i en konsertsal, men det har også blitt studert noen komplette impulsresponsen i form av Schröderkurver. Det ble i tillegg laget noen enkle auraliseringer i CATT-acoustics for å finne ut av hvordan en slik løsning vil høres ut.

Det var to dimensjonsløse parametre som ble endret for det flytende taket. Den første er A : arealet av det flytende taket delt på arealet av det virkelige taket. Den andre er h : høyden mellom gulvet og det flytende taket delt på den totale høyden av konsertsalen.

Resultatene viser at den største effekten med en slik løsning, er økningen i klarhet C_{80} når høyden på det flytende taket senkes. Taletydeligheten STI kan derfor økes fra ca. 0,45 til 0,6, som er en økning fra dårlig til god taleoppfattbarhet, ved å ha et tak med $A = 0,80$. Dersom hovedformålet med det flytende taket er å øke taletydeligheten, bør det flytende taket være så bredt som mulig. Dette var det også tydelig å høre i auraliseringene.

Den samme økningen i tydelighet gjelder også for musikk, der den tidlige etterklangstiden EDT synker dersom det flytende taket senkes. Dette kan brukes til å justere de akustiske forholdene etter forskjellig type musikk, med forskjellig krav til klarhet. Auraliseringen av musikk tydet også på at klarheten i musikken øker ved å senke det flytende taket. Med konsertsalen som ble brukt i CATT-beregningen økte C_{80} fra ca. -2 dB til 4 dB fra å ikke ha noe flytende tak, til å senke det flytende taket til $h = 0,25$.

Etterklangstiden T så ut til å øke i CATT-beregningen, spesielt for de høye frekvensene. Skalamålingen hadde helt motsatt tendens, da etterklangstiden sank ved de høye frekvensene og steg for de lave. Denne forskjellen skyldes trolig diffraksjon langs åpningen imellom sideveggene og det flytende taket, som CATT-acoustics ikke tar skikkelig hensyn til. En eventuell økning i etterklangstid vil nok være størst for de lave frekvensene, slik skalamålingen viste.

Beregningen og målingen tyder på at lateralfaktoren LF synker ved å innføre et flytende tak, trolig på grunn av at man mister tidlige siderefleksjoner på grunn av åpningen mellom sideveggene og det flytende taket. Den sene lateralenergien LG vil i følge beregningen og målingen også synke. Det som stiger er forholdet mellom sen

lateral- og totalenergi, slik at det forholdsmessig kommer mer lyd fra sidene sent i impulsresponsen ved å ha et slikt flytende tak, men det totale nivået på denne sideinnfallende lyden synker. Den totale effekten av oppfattet kildestørrelse og at lytteren føler seg omsluttet av lyd blir derfor negativ. Det ser derfor ut som at det er behov for ”kunstige” sidebalkonger eller reflektorer for å få tidlige siderefleksjoner tilbake til publikum med en slik type løsning.

Det er flere usikkerhetsmomenter i beregningen og skalamålingen. Hovedproblemet ved CATT-beregningen er at den ikke tar skikkelig hensyn til diffraksjon. Det ble derfor litt forskjellige resultater mellom beregningen og skalamålingen. I skalamodellmålingen ble det heller ikke korrigert for luftabsorpsjon, og absorpsjonsfaktoren på veggene ble ikke endret for å få samme verdier på beregnet og målte parametre. Dette kan ha litt å si når man sammenligner resultatene med beregningen. Den kanskje største usikkerhetsfaktoren i hele oppgaven var den selvlagde åttetallsmikrofonen, og slik at de laterale parametrene ikke er helt pålitelige.

Det er flere ting som ikke er helt fastlagt med en slik type løsning med et flytende tak i en konsertsal. Det gjelder kanskje spesielt hvordan det flytende taket fungerer for forskjellige frekvenser. Dette kunne derfor ha blitt undersøkt nærmere med en kraftigere numerisk metode, som løser bølgelikningen direkte, for å bekrefte de resultatene som ble funnet i skalamålingen. Det kan også bli gjort mere detaljerte studier med auraliseringer, med lyttetester og mange testpersoner, for å finne ut hvordan løsningen vil høres ut i praksis. Da kunne det også litt undersøkt om å legge til sidebalkonger ville være ønskelig.

Løsningen med et flytende tak i en konsertsal er derfor en spennende løsning som har sine klare fordeler som flerbrukssal. Spesielt at man slipper å innføre absorpsjon, slik at den tidlige lydenergien ikke reduseres. Det er derfor en løsning det er spennende å undersøke nærmere i en videre studie.

Vedlegg **A**

Vedlegg

A.1 MATLAB-funksjon for å beregne LG_{mod} fra CATT-acoutics

```
1 function LG = LG_mod(fig8file)
2     [fig8,sr] = wavread(fig8file); fig8 = transpose(fig8(:,1));
3
4     % Octave band filtering
5     fig8 = oktfilt(fig8,1,sr);
6
7     length = size(fig8,2);
8     LG = zeros(1,6);
9     for i = 1:6 % From 125 to 4 kHz
10        divisor=0;
11        sum=0;
12        % Squaresumming the fig8 signal from 80 to inf ms
13        start = find(fig8(i+1,:)≠0, 1, 'first') + ...
14                round((80e-3)*sr); % First nonzero element index + ...
15                80 ms
16        for j=start:length
17            sum = sum + fig8(i+1,j).^2;
18        end
19        LG(i) = sum;
20    end
21    LG = 10*log10(LG);
22 end
```

A.2 MATLAB-funksjon for å beregne forholdet (sen/total)-energi fra CATT-acoustics

```
1 function LF = late_ratio(omnifile,fig8file)
2     [omni,sr] = wavread(omnifile);
3     [fig8,sr] = wavread(fig8file); fig8 = transpose(fig8(:,1));
4
5     % Octave band filtering
6     omni = oktfilt(omni,1,sr);
7     fig8 = oktfilt(fig8,1,sr);
8
9     length = size(omni,2);
10    int_size = (80e-3)*sr;
11    LF = zeros(1,6);
12    for i = 1:6 % From 125 to 4 kHz
13        divisor=0;
14        denom=0;
15
16        % Squaresumming the omni signal from 80 to inf ms
17        start = find(omni(i+1,:)≠0, 1, 'first') + ...
18                round((80e-3)*sr); % First nonzero element index + ...
19                80 ms
20        for j=start:length
21            divisor = divisor + omni(i+1,j).^2;
22        end
23        % Squaresumming the fig8 signal from 80 to inf ms
24        for j=start:length
25            denom = denom + fig8(i+1,j).^2;
26        end
27        LF(i) = denom/divisor;
28    end
29    LF = 10*log10(LF);
30 end
```

A.3 MATLAB-funksjon for å endre samplerate i WinMLS

```

1 function [h, Fs, Format, Comment] = ...
   loadimp_changeFS(filename,samplerate)
2 %
3 %LOADIMP Load WinMLS measurement file.
4 % Supported file extensions:
5 % .WMB binary file containing impulse response and header
6 % .WMT ASCII (text) file containing impulse response and ...
   header
7 % (Please use wavread.m to read wav-files)
8 %
9 % If the file can not be read, an error message is given ...
   and the
10 % variables are returned as empty, that is <[]>;
11 %
12 % [h]=LOADIMP(filename) loads a .WMB or .WMT format file ...
   specified by "filename",
13 % returning the sampled data in variable "h". The ...
   extension
14 % must be included in the filename.
15 %
16 % [h,Fs]=LOADIMP(filename) loads a .WMB or .WMT format ...
   file specified by
17 % "filename", returning the sampled data in variable ...
   "h" and the
18 % sample rate in variable "Fs".
19 %
20 % [h,Fs,Format]=LOADIMP(filename) loads a .WMB or .WMT ...
   format file specified by
21 % "filename", returning the sampled data in variable ...
   "h", the
22 % sample rate in variable "Fs" and format information ...
   in the variable
23 % "Format". The format information is returned as a 6 ...
   element
24 % vector with the following order:
25 %
26 % Format(1) Sequence Order
27 % Format(2) Number of averages
28 % Format(3) Channel
29 % Format(4) Maximum level recorded ...
   during the measurement (percent)
30 % Format(5) # of bits used for record
31 % Format(6) # of bits used for play
32 %
33 % For version 3 files, more fields are present in the ...
   header. To change the
34 % arguments returned in the Format variable, selecting ...
   additional fields,
35 % change the line assigning to the variable in ...
   'loadimp.m'. The line is marked (*).
36 %

```

```

37     %     If the file cannot be read, an error message is given ...
        and h is returned as -1;
38     %     This function uses the file function Valstr.m
39     %
40     % Copyright Morset Sound Development 1998–2007.
41     % update 21112001 – removed reading of extra header
42     % update 13062003 – support for file format version 4, problems
43     % update 23062003 – fixed problems with support for ver. 4
44     % Contact: www.winmls.com
45     %
46     % Example: [h1, Fs, Format, Comment]=loadimp('h1.wmb');
47
48     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
49     % Change log
50     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
51
52     % KP08012001: Updated for version 3 headers
53     % LM03072001: Made it work for Matlab ver. 4
54
55     VersionNumber=4; % Reads header version 3
56     VersionNumber_1=1; % Old files are version number 1
57
58     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
59     % Initialize return variables
60     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
61     h = []; Fs = NaN; Format = []; Comment = []; % Fs is ...
        scalar and cannot be []
62
63
64     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
65     % OPEN FILE
66     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
67     %% Filename
68     filename2 = [num2str(samplerate) '_' filename];
69     fid=fopen(filename, 'r');
70     fid2 = fopen(filename2, 'w');
71
72     if isunix == 1,
73         fid=fopen(filename, 'r', 'ieee-le');
74         fid2 = fopen(filename2, 'w', 'ieee-le');
75     else
76         fid=fopen(filename, 'r');
77         fid2=fopen(filename2, 'w');
78     end
79
80     if ( fid == -1 )
81         disp(' '); disp('Error. Could not open a file with the ...
            the specified filename.')
82         return
83     end
84
85     % Read format identifier
86     id = fread(fid, [1,4], 'uchar');
87     fwrite(fid2, id, 'uchar');
88
89     % Read header data, check on header version first.

```

```

90     Version=fread(fid,1, 'ulong');
91     fwrite(fid2,Version,'ulong');
92
93     % Read version 3 header
94     Title = fread(fid,80,'uchar');           % Measurement title
95     fwrite(fid2,Title,'uchar');
96     Comment = fread(fid,60,'char');         % Channel comment
97     fwrite(fid2,Comment,'char');
98     DateOfMeas = fread(fid,20,'uchar'); % Date of measurement
99     fwrite(fid2,DateOfMeas,'uchar');
100    d_new_header_exists = fread(fid,1,'ulong'); % For internal use
101    fwrite(fid2,d_new_header_exists,'ulong');
102    Channel = fread(fid,1,'ulong');           % Channel ...
103    number in measurement
104    fwrite(fid2,Channel,'ulong');
105    NumberOfChannels = fread(fid,1,'ulong'); % Total ...
106    number of channels in this measurement
107    fwrite(fid2,NumberOfChannels,'ulong');
108    %% Sampling rate
109    Fs = fread(fid,1,'float');               % ...
110    Sampling frequency
111    fwrite(fid2,samplerate,'float');
112    Length = fread(fid,1,'ulong');           % Length of ...
113    measurement
114    fwrite(fid2,Length,'ulong');
115    UseFeedbackLoop = fread(fid,1,'uchar'); % Flag: Is ...
116    feedback loop used?
117    fwrite(fid2,UseFeedbackLoop,'uchar');
118    Mixer = fread(fid,1,'uchar');           % Flag: ...
119    Is WinMLS mixer used?
120    fwrite(fid2,Mixer,'uchar');
121
122    % Input settings
123    InputDevice = fread(fid,30,'uchar');     % Name of ...
124    input device
125    fwrite(fid2,InputDevice,'uchar');
126    MaxRecLevel = fread(fid,1,'float');      % ...
127    Maximum recording level
128    fwrite(fid2,MaxRecLevel,'float');
129    RecBitsPerSample = fread(fid,1,'ulong'); % ...
130    Number of bits per sample
131    fwrite(fid2,RecBitsPerSample,'ulong');
132    MixerInputVolume = fread(fid,1,'ulong'); % ...
133    Mixer input volume
134    fwrite(fid2,MixerInputVolume,'ulong');
135    MixerInputIsCalibrated = fread(fid,1,'uchar'); % Flag: ...
136    Set to 1 if mixer input is calibrated
137    fwrite(fid2,MixerInputIsCalibrated,'uchar');
138    dummy = fread(fid,3,'uchar'); % SKIP 3 bytes of padding
139    fwrite(fid2,dummy,'uchar');
140    MixerInputVol.db = fread(fid,1,'float'); % ...
141    Mixer input volume in decibels.
142    fwrite(fid2,MixerInputVol.db,'float');
143    HardwareInputIsCalibrated = fread(fid,1,'uchar'); % Flag: ...
144    Set to 1 if hardware input is calibrated
145    fwrite(fid2,HardwareInputIsCalibrated,'uchar');

```

```

133     InputUnitLabel = fread(fid,11,'uchar');      % Input Unit Label
134     fwrite(fid2,InputUnitLabel,'uchar');
135     InputConversionFactordB = fread(fid,1,'float'); % Input ...
        Conversion Factor
136     fwrite(fid2,InputConversionFactordB,'float');
137
138     % Output settings
139     OutputDevice = fread(fid,30,'uchar');      % Name of output ...
        device
140     fwrite(fid2,OutputDevice,'uchar');
141     dummy = fread(fid,2,'uchar'); % SKIP 2 bytes of padding
142     fwrite(fid2,dummy,'uchar');
143     PlayBitsPerSample = fread(fid,1,'ulong'); % ...
        Number of bits per sample
144     fwrite(fid2,PlayBitsPerSample,'ulong');
145     MixerOutputMasterVolume = fread(fid,1,'ulong'); % Mixer ...
        output master volume
146     fwrite(fid2,MixerOutputMasterVolume,'ulong');
147     MixerOutputVolume = fread(fid,1,'ulong'); % ...
        Mixer output volume
148     fwrite(fid2,MixerOutputVolume,'ulong');
149     MixerOutputIsCalibrated = fread(fid,1,'ulong'); % Flag: ...
        Set to 1 if mixer output is calibrated
150     fwrite(fid2,MixerOutputIsCalibrated,'ulong');
151     MixerOutputVol_db = fread(fid,1,'float'); % ...
        Mixer input volume in decibels.
152     fwrite(fid2,MixerOutputVol_db,'float');
153     HardwareOutputIsCalibrated = fread(fid,1,'uchar'); % Flag: ...
        Set to 1 if hardware output is calibrated
154     fwrite(fid2,HardwareOutputIsCalibrated,'uchar');
155     OutputUnitLabel = fread(fid,11,'uchar'); % Output Unit Label
156     fwrite(fid2,OutputUnitLabel,'uchar');
157     OutputConversionFactordB = fread(fid,1,'float'); % Output ...
        Conversion Factor
158     fwrite(fid2,OutputConversionFactordB,'float');
159
160     SpeedOfSound = fread(fid,1,'float'); % ...
        Speed of sound in meters per second
161     fwrite(fid2,SpeedOfSound,'float');
162     MeasurementMode = (fread(fid,257,'uchar')); % Measurement Mode
163     fwrite(fid2,MeasurementMode,'uchar');
164     MeasurementSystemCorrection = fread(fid,1,'uchar'); % Flag: ...
        Is measurement system correction used?
165     fwrite(fid2,MeasurementSystemCorrection,'uchar');
166     PreEmphasis = fread(fid,1,'uchar'); % ...
        Flag: Is preemphasis used?
167     fwrite(fid2,PreEmphasis,'uchar');
168     DeEmphasis = fread(fid,1,'uchar'); % ...
        Flag: Is deemphasis used?
169     fwrite(fid2,DeEmphasis,'uchar');
170     EmphasisFileName = (fread(fid,256,'uchar')); % Name of ...
        emphasis file
171     fwrite(fid2,EmphasisFileName,'uchar');
172     SeqOrder = fread(fid,1,'ulong'); % ...
        % Sequence order
173     fwrite(fid2,SeqOrder,'ulong');

```

```

174     AvgNo = fread(fid,1,'ulong'); ...
        % Number of averages
175     fwrite(fid2,AvgNo,'ulong');
176     NumberOfPreMLS = fread(fid,1,'ulong'); % ...
        Number of Pre-MLS
177     fwrite(fid2,NumberOfPreMLS,'ulong');
178     TypeOfMLS = (fread(fid,11,'uchar')); % Type of MLS
179     fwrite(fid2,TypeOfMLS,'uchar');
180
181
182     %Version 4 data
183     dummy = fread(fid,6,'uchar'); % Skip ...
        one byte of padding
184     fwrite(fid2,dummy,'uchar');
185     MeasID = (fread(fid,16,'uchar')); % MeasID
186     fwrite(fid2,MeasID,'uchar');
187     ExtraHeaderSize = fread(fid,1,'ulong'); ...
        % not used
188     fwrite(fid2,ExtraHeaderSize,'ulong');
189     IsTransferfunction = fread(fid,1,'uchar'); ...
        % Flag: Is this a transfer function or a recording ...
        (scope mode)
190     fwrite(fid2,IsTransferfunction,'uchar');
191     SpecifyImpLen = fread(fid,1,'uchar'); ...
        % Flag: If transfer function: is impulse response ...
        truncated. If scope mode: is mode transient or stationary
192     fwrite(fid2,SpecifyImpLen,'uchar');
193     Resample = fread(fid,1,'uchar'); % ...
        Flag: Is the data resampled (used for low frequency ...
        measurements
194     fwrite(fid2,Resample,'uchar');
195     SweepLenInSec = fread(fid,1,'double'); ...
        % Sweep length in seconds
196     fwrite(fid2,SweepLenInSec,'double');
197     StartFreq = fread(fid,1,'double'); % ...
        Sweep start frequency
198     fwrite(fid2,StartFreq,'double');
199     EndFreq = fread(fid,1,'double'); % ...
        Sweep end frequency
200     fwrite(fid2,EndFreq,'double');
201     HPfiltered = fread(fid,1,'uchar'); % ...
        Flag: HighPass-filter used to avoid noise blowup for ...
        sine-sweep measurement
202     fwrite(fid2,HPfiltered,'uchar');
203     dummy = fread(fid,7,'uchar'); %7 Skip 7 bytes of padding
204     fwrite(fid2,dummy,'uchar');
205     % read impulse response
206     h=zeros(1,Length); % initialize data to make it faster
207     h=fread(fid,Length,'float');
208     fwrite(fid2,h,'float');
209     fclose(fid);
210     fclose(fid2);

```

A.4 MATLAB-funksjon for å fase- og nivåkalibrere mikrofonene

```
1 function calibration(WMBfile1, WMBfile2)
2
3 % The function takes in two .wmb-files and saves a ...
4 % calibration-matrix T in
5 % the matlab workspace calib.mat
6
7 SR = 48000; %Sample rate
8 NFFT = 57600; %Number of samples = 1.2 seconds
9
10 calib_1 = loadimp(WMBfile1); %Imports signal 1
11 calib_2 = loadimp(WMBfile2); %Imports signal 2
12
13 H1 = fft(calib_1,NFFT); %Takes the FFT of signal 1
14 H2 = fft(calib_2,NFFT); %Takes the FFT of signal 2
15
16 T = H1./H2; % Dividing the FFTs, making signal 1 the reference
17
18 save('calib.mat','T');
```


A.5 MATLAB-funksjon for å lage åttetallsmikrofon fra to kulemikrofoner

```
1 function dipole(WMBfile1,WMBfile2,SR,SR.write,d)
2
3 % The creates a dipole signal from two omni directional ...
   microphones and
4 % writes it to a new wmb file
5 % SR = sample rate
6 % d = distance between microphones (cm)
7
8 load('calib.mat');
9 c = 343; % Speed of sound
10 d = d/100; % Converting to meters
11 % Importing p1 and p2 from the WMB-files
12 p1 = loadimp(WMBfile1);
13 p2 = loadimp(WMBfile2);
14
15 % Taking the FFT
16 NFFT = 57600;
17 H1 = fft(p1,NFFT);
18 H2 = fft(p2,NFFT);
19
20 % Multiplying signal 2 by the calibration transfer vector T
21 H2_new = T.*H2;
22
23 % Making f-vektor to use in jkd
24 f = linspace(-SR/2,SR/2,NFFT);
25 k = transpose(2*pi*f./c);
26
27 % Taking the difference and dividing by jkd to make dipole mic
28 mic_dipole = (fftshift(H1-H2_new))./(1i*k*d);
29 mic_dipole = ifftshift(mic_dipole);
30 mic_dipole = real(ifft(mic_dipole));
31
32 % Making the omni-signal as the mean of the two signals
33 mic_omni = (p1+real(ifft(H2_new)))./2;
34
35 %Writing the fig8- and omni-signal to .wmb with the scaled ...
   sample rate
36 loadimp_writeimp(WMBfile1,'dipole',SR.write,mic_dipole);
37 loadimp_writeimp(WMBfile1,'omni',SR.write,mic_omni);
```

A.6 MATLAB-funksjon for å beregne LG_{mod} fra WinMLS

```
1 function LF = LG.mod.winmls(fig8file,treshold)
2     [fig8,sr] = loadimp(fig8file); fig8 = transpose(fig8(:,1));
3
4     % Octave band filtering
5     fig8 = oktfilt(fig8,1,sr);
6
7     length = size(fig8,2);
8     int_size = (80e-3)*sr;
9     LF = zeros(1,4);
10    for i = 2:5 % From 125 to 1 kHz
11        sum=0;
12        % Squaresumming the fig8 signal from 80 to inf ms
13        start = find(abs(fig8(i,:))>treshold, 1, 'first') + ...
14                round((80e-3)*sr); % First nonzero element index + ...
15                80 ms
16        for j=start:length
17            sum = sum + fig8(i,j).^2;
18        end
19        LF(i-1) = sum;
20    end
21    LF = 10*log10(LF);
22 end
```

A.7 MATLAB-funksjon for å beregne forholdet (sen/total)-energi fra WinMLS

```
1 function LF = late_ratio_winmls(omnifile,fig8file,treshold)
2     [omni,sr] = loadimp(omnifile);
3     [fig8,sr] = loadimp(fig8file); fig8 = transpose(fig8(:,1));
4
5     % Octave band filtering
6     omni = oktfilt(omni,1,sr);
7     fig8 = oktfilt(fig8,1,sr);
8
9     length = size(omni,2);
10    int_size = (80e-3)*sr;
11    LF = zeros(1,4);
12    for i = 2:5 % From 125 to 1 kHz
13        divisor=0;
14        denom=0;
15
16        % Squaresumming the omni signal from 80 to inf ms
17        start = find(abs(omni(i,:))>treshold, 1, 'first') + ...
18            round((80e-3)*sr); % First nonzero element index
19        for j=start:length
20            divisor = divisor + omni(i,j).^2;
21        end
22        % Squaresumming the fig8 signal from 80 to inf ms
23        for j=start:length
24            denom = denom + fig8(i,j).^2;
25        end
26        LF(i-1) = denom/divisor;
27    end
28    LF = 10*log10(LF);
29 end
```

A.8 MATLAB-funksjon som filtrerer impulsrespon- sen i oktavbånd

Denne funksjonen brukes i noen av de andre matlabfunksjonene

```

1 function [y,f0] = oktfilt(x,N,fs,option)
2     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
3     % Creates 1/N octave bands from 63Hz to 16kHz
4     % Returns y, a [bands,N_samples]-matrix with the signal ...
5     % filtered into
6     % the different octavebands, as well as the center frequency ...
7     % vector f0.
8     %
9     % Usage: [y,f0] = oktfilt(x,N,fs,option)
10    % y is the filtered signal
11    % f0 is the center frequencies
12    % x is the input signal
13    % N is the 1/N-octave coefficient (3 gives 1/3-octavebands)
14    % fs is the sampling frequency
15    % The octave-band frequency response is plotted if option='plot'
16    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
17
18    N = round(abs(N));
19
20    f0 = 1000*2.^((-4*N):(5*N)/N);    %Calculate 1/N-octave ...
21    band center
22
23    %frequencies
24    ranges = [2^(-1/N*0.5) 2^(1/N*0.5)];
25    fc = f0.*ranges;                %calculate cutoff ...
26    frequencies for
27
28    %the respective bands
29
30    fc(fc > fs/2) = fs/2.05;        %Upper cutoff frequency ...
31    must be
32
33    %lower than fs/2 because ...
34    wn must be
35    %in the interval (0,1).
36
37    wc = fc/fs*2;                    %Normalize values for ...
38    filter design
39
40    y = zeros(size(wc,1),length(x));
41    for i=1:size(wc,1)
42        [z, p, k] = butter(3,wc(i,:));    %Creates a 6th-order ...
43        Butterworth
44
45        %bandpassfilter
46
47        [sos_var,g] = zp2sos(z, p, k);
48        Hd = dfilt.df2sos(sos_var,g);
49        %If to plot:
50        if nargin == 4 && strcmp(option,'plot') == 1
51            [H,W] = freqz(Hd,2^14);
52            semilogx(W*fs/2/pi,20*log10(abs(H)));
53            hold on;
54        end
55        y(i,:) = filter(Hd,x);          %Filters the bandpassed ...

```

```

    signal
42     end
43
44     %Plot properties
45     if nargin == 4 && strcmp(option,'plot') == 1
46         grid;
47         axis([40 20000 -7 3]);
48         xlabel('f[Hz]');
49         ylabel('Magnitude [dB]');
50         s=['1/' num2str(N) '-octaveband filter response'];
51         title(s)
52     end
53
54 end
```


Referanser

- [1] CATT acoustics v.8. <http://www.catt.se>.
- [2] L. Beranek. *Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture*, side 503–527. Springer, 2003.
- [3] L. Beranek. *Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture*, side 616–618. Springer, 2003.
- [4] L.E. Kinsler. *Fundamentals of acoustics*, kapittel 12.3, side 336. Wiley, 2000.
- [5] Anders Gade. Acoustics in halls for speech and music. I Thomas D. Rossing, redaktør, *Springer Handbook of Acoustics*, side 301–350. Springer New York, 2007.
- [6] J. S. Bradley og G. A. Soulodre. Objective measures of listener envelopment. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 98(5):2590–2597, 1995.
- [7] A. Krokstad, S. Strøm og S. Sørsdal. Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique. *Journal of Sound and Vibration*, 8(1):118–125, 1968.
- [8] L.E. Kinsler. *Fundamentals of acoustics*, kapittel 12.5, side 341. Wiley, 2000.
- [9] WinMLS 2004. <http://www.winmls.com>.
- [10] Meritxell Genesca Francitorra og U. Peter Svensson. Direction measurement of airborne sound sources over a reflective ground using an array of virtual directional microphones. Proc. of AIA-DAGA, 2013. Merano, [2013].
- [11] Denon. Anechoic orchestral music recording. Lyd-CD, Denon Records, 1995. ANSI:B0000034M9.