

Lydutfbredelse til skyggesiden av tykke skjermer, med spesiell oppmerksomhet på diffraksjonseffekter

Vegard Wøllo

Elektronisk systemdesign og innovasjon
Innlevert: juni 2014
Hovedveileder: Ulf R Kristiansen, IET
Medveileder: Herold Olsen, SINTEF

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for elektronikk og telekommunikasjon

Problembeskrivelse

En utfordring i forbindelse med støyskjerming av bygninger er hvordan lyden fra lydkilder på den ene siden av en bygning opptrer på de sidene av bygningen som ikke er synlige fra lydkilden. Et eksempel er støyforhold ved soveværelsesvindu på baksiden av en bygning. Ingen av de standard lydutbredelsesmodellene som brukes er i stand til å predikere dette. SINTEF og Folkehelseinstituttet er for tiden i gang med en slik undersøkelse, og oppgaven er tenkt å komplementere denne. Interessante parametre i sammenheng med dette er plassering av bygning i forhold til veier eller annen støykilde, mottakerposisjon langs bakfasade, dimensjon av bygning og refleksjon fra andre flater. En utfordring er å beskrive diffraksjon rundt hushjørner eller over mønelinjer, i kombinasjon med streifende lydutbredelse langs ytre bygningsflater.

Det konkrete problemet i denne oppgaven er å finne ut hvordan innskuddstapet endrer seg for ulike mottakerposisjoner nær overflaten på skyggesiden av et skjermende objekt med en gitt tykkelse. Det skal også gjøres beregninger av hvordan innskuddstapet endres dersom kildeposisjonenes avstand fra objektet varieres. Beregninger skal utføres for det skjermende objektet plassert på en totalabsorberende og en totalreflekterende flate, for å finne ut hvor mye dette innvirker på resultatene. Både objekter med flatt og skrått tak skal studeres. Studien skal utføres for både to og tredimensjonale objekter, som kan representere henholdsvis bygninger med en endelig bredde som for eksempel eneboliger og rekkehus eller boligblokker med en bredde som i en akustisk sammenheng kan betraktes som uendelig. Det skal også gjøres sammenligninger mellom, og evalueringer av ulike metoder som kan bli benyttet til å besvare oppgavens problemstilling.

Forord

Denne er utført ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU) i samarbeid med SINTEF, ble utført i tidsrommet mellom januar og juni 2014. Denne oppgaven tar for seg lydutbredelsen ved fasaden til bygninger, som er en problemstilling foreslått av seniorrådgiver ved SINTEF Herold Olsen og professor Ulf R. Kristiansen ved NTNU.

Forfatteren av dette prosjektet vil takke både Herold Olsen og Ulf R. Kristiansen for en spennende og interessant problemstilling og for god veiledning gjennom hele prosessen, både i tilknytning til praktisk utførelse og rapportskrivning. I tillegg vil forfatteren takke professor Peter Svensson for god hjelp og assistanse i forbindelse med bruken av verktøykassen EDB-toolbox i MATLAB. Takk også til Tim Cato Netland for hjelp med måleutstyr og tekniske spørsmål i forbindelse med simuleringer og praktiske målinger.

Vegard Wøllo
Trondheim, juni 2014.

Sammendrag

Denne rapporten tar for seg lydutbredelsen på en side av en tykk skjerm fra en lydkilde på motsatt side av skjermen. Undersøkelsene i tilknytning til dette er utført for generelle objekter utformet som rektangulære kuber konstruert av totalreflekterende plan. Dette kan være en generalisering av geometrien til bygninger. Undersøkelsene er i hovedsak utført ved hjelp av to ulike metoder som er basert på to forskjellige teoretiske grunnlag. Den første teoretiske metoden, som det også er lagt mest vekt på i denne oppgaven, er en verktøykasse for beregning av kantdiffraksjon i MATLAB (*EDBtoolbox*). Den andre teoretiske metoden er endelig elementers metode (*Finite Element Method*) som er benyttet i beregninger med programmet *COMSOL Multiphysics*. Det er også gjort praktiske målinger i en skalamodell av en tilsvarende forenklet bygning som for simuleringene for å verifisere resultatene fra disse. Alle simuleringene og målingene i denne oppgaven er utført i frekvensområdet 50 Hz til 2 kHz, som ble valgt på grunnlag av at dette er det området som veitrafikkstøy er mest signifikant i.

På grunnlag av at ingen av de standard beregningsmetodene er i stand til å predikere lydtrykksnivået helt nær den bakre fasaden på motsatt side av lydkilden, er det dette som er blitt opphavet til oppgavens problemstilling. Det er i denne oppgaven lagt mest vekt på *innskuddstapet* nær fasaden, som beskriver reduksjonen av lydtrykksnivå som følge av bygningen relativt til lydtrykksnivået i samme posisjon uten bygningen til stede. Innskuddstapet ble funnet til å generelt ligge mellom 10 dB og 50 dB og øke med frekvens for alle de ulike tilfellene som ble undersøkt. Det ble også funnet en reduksjon i innskuddstapet dersom mottakerposisjonenes høyde over bakken økte, da disse posisjonene kom nærmere kanten på taket som lyden diffrakteres rundt. Det ble gjort beregninger for bygningsmodeller i både to og tre dimensjoner, samt for modellene plassert på både en totalabsorberende og en totalreflekterende bakke. Bygningsmodellen i to dimensjoner på en totalabsorberende bakke ble benyttet som referanse, og det ble funnet at de andre tilfellene hadde avvik i innskuddstap på opp til 50 dB fra denne.

Målingene som ble utført verifiserte at de teoretiske funnene stemte overens med hva som skjer i praksis. Målingene viste at innskuddstapet også i praksis lå mellom ca 10 dB og 50 dB i det undersøkte frekvensområdet, og økte også med frekvens. Innskuddstapet fra de praktiske målingene ble også redusert dersom måleposisjonenes høyde over bakken økte.

Det ble også gjort sammenligner mellom og evalueringer av de ulike metodene som ble benyttet i denne studien. Det ble funnet at COMSOL og EDBtoolbox ga meget like resultater for innskuddstapet for en todimensjonal bygningsmodell selv om de benytter seg av to fundamentalt ulike beregningsmetoder. Begge metodene kan benyttes til å utføre beregninger i tre dimensjoner, men for beregninger i domener av størrelsesordenen benyttet i denne oppgaven er EDBtoolbox mest egnet. Dette er fordi antall elementer i COMSOL som må benyttes i slike tredimensjonale tilfeller er eksepsjonelt mange. Det ble også funnet at to av de klassiske forenklete beregningsmetodene for innskuddstap, *ISO 9613-2* og *Z. Maekawas metode*, ikke gir en tilstrekkelig god besvarelse på problemet.

Abstract

This report covers a study of how the sound from sources at one side of a thick barrier propagates at the other side of the barrier that is not visible from this source. This is investigated on general geometrical objects constructed as rectangular cuboids consisting of reflecting surfaces. These objects can be viewed as general representations of buildings. The sound propagation is investigated mainly by simulations by two different methods. The first method, which is also used as the reference method in this report, is a toolbox in MATLAB (*EDBtoolbox*) that can calculate diffraction of sound around edges. The other method is the finite element method that is used by the program *COMSOL Multiphysics*. The simulations obtained by these two methods are also verified by measurements in a scale model. All the calculations in this report are carried out within the frequency range 50 Hz to 2 kHz, because this is in the range that road noise is the most prominent.

None of the standard methods for predicting sound propagation are able to predict the sound pressure levels close to the facade at the shadow side of buildings. This has led to the topics that are investigated in this report. The *insertion loss* caused by buildings is the parameter that the majority results in this report are based on. This insertion loss was found to be in the range from 10 dB to 50 dB, where this loss was increased by increasing frequency for all the cases investigated in this report. The insertion loss was also found to be lower when receiver points were close to the edge of the roof as opposed to when they were close to the ground at the shadow side of the building. The calculations were carried out for both two and three dimensional building models, where these models were placed on both total reflecting and total absorbing surfaces. The two dimensional model placed on a total absorbing surface was used as the reference model because this is the simplest case. The insertion loss for the other cases was found to deviate greatly from this reference case, with some deviations up to 50 dB.

The practical measurements verified that the theoretical simulations had properties that were similar to this practical case. The measurements also showed that the insertion loss was in the range from approximately 10 dB to 50 dB, and that it also was increased by increasing the frequency. This practical insertion loss had also the lowest values near the edge of the roof, similar to what was found in the simulations.

The different methods that were used in this study were evaluated and compared to each other. COMSOL and EDBtoolbox gave very similar values for the insertion loss for the two dimensional model, although they are based on completely different theories. These two methods are both capable of three dimensional calculations, but for calculations of big proportions as in this study the EDBtoolbox was found to be the most suited. This is mainly because of the number of elements required in COMSOL that would be exceptionally big. It was also found in this study that two of the classical and simplified calculation methods for insertion loss, ISO 9613-2 and the method of Z. Maekawa, were not giving satisfying results for this problem.

Innhold

1	Innledning	1
1.1	Bakgrunn for oppgavens problemstilling	1
1.2	Besvarelse av problemstilling	1
1.3	Rapportens oppbygning	2
2	Teori	3
2.1	Diffraksjon	3
2.1.1	Generelt om diffraksjonsfenomenet	3
2.1.2	Analytisk modell for kantdiffraksjon ved bruk av sekundære lydkilder	3
2.2	Støyskjerming	5
2.2.1	Innskuddstap	6
2.2.2	Tynne skjermer	6
2.2.3	Tykke skjermer	7
2.3	Endelige elementers metode	9
2.4	Akustisk skalamodell	9
3	Metoder	11
3.1	Teoretiske simuleringer	12
3.1.1	COMSOL Multiphysics	12
3.1.2	EDBtoolbox: Verktøykasse for kantdiffraksjon i MATLAB	13
3.2	Målinger i skalamodell	15
4	Resultater	17
4.1	Todimensjonal modell av bygning	18
4.1.1	Frekvensavhengighet for innskuddstap, absorberende bakke rundt bygning	18
4.1.2	Avstandsavhengighet for innskuddstap, absorberende bakke rundt bygning	22
4.1.3	Frekvensavhengighet for innskuddstap, reflekterende bakke rundt bygning	27
4.1.4	Avstandsavhengighet for innskuddstap, reflekterende bakke rundt bygning	29
4.2	Tredimensjonal modell av bygning	31
4.2.1	Frekvensavhengighet for innskuddstap, absorberende bakke rundt bygning	31

4.2.2	Avstandsavhengighet for innskuddstap, absorberende bakke rundt bygning	32
4.2.3	Frekvensavhengighet for innskuddstap, reflekterende bakke rundt bygning	35
4.2.4	Avstandsavhengighet for innskuddstap, reflekterende bakke rundt bygning	36
4.2.5	Enkeltfrekvenser sammenlignet med 1/3-oktavbånd	36
4.3	Målinger i skalamodell	38
5	Diskusjon	41
5.1	Generelt om metodene som er benyttet	41
5.2	Todimensjonal modell av bygning	43
5.2.1	Absorberende bakke	43
5.2.2	Reflekterende bakke	44
5.3	Tredimensjonal modell av bygning	45
5.3.1	Absorberende bakke	45
5.3.2	Reflekterende bakke	46
5.4	Verifisering av resultater ved målinger i skalamodell	47
5.5	Parametrisk fremstilling av kurver	48
5.6	Videre arbeid	49
6	Konklusjon	51
7	Bibliografi	53
Tillegg A	Simuleringer	55
A.1	Todimensjonal modell av bygning	55
A.2	Tredimensjonal modell av bygning	60
Tillegg B	Målinger i skalamodell	62
B.1	Måleresultater	62
B.2	Måleutstyr	66
Tillegg C	Beregninger i MATLAB	67
Tillegg D	Høytalerkarakteristikk	69
D.1	Frekvensrespons for høytaler	69
D.2	Direktivitet for høytaler	70
Tillegg E	Matematisk representasjon av kurver	71
E.1	Innskuddstap som funksjon av frekvens og avstand	71
E.1.1	Matematisk representasjon	71
E.1.2	MATLAB-kode	73
E.2	Innskuddstap som funksjon av både frekvens og kilde- og mottakerposisjon	74
Tillegg F	Beregninger med EDBtoolbox	75
F.1	Konfigurasjonsfil for beregning av innskuddstap	75
F.1.1	Bygningsmodell med totalabsorberende bakke	75

F.1.2	Bygningsmodell med totalabsorberende bakke	77
F.2	Eksempel på fil som definerer en bygningsmodell	78

1 | Innledning

1.1 Bakgrunn for oppgavens problemstilling

Støyskjermer er objekter der det meste av den innfallende akustiske energien fra en lydkilde mot en side av objektet ikke vil nå frem til objektets bakside som ikke er synlig fra lydkildens posisjon. Mange bygninger fungerer som slike støyskjermer, der lyden er støy fra for eksempel veitrafikk. Det ideelle tilfellet er at skjermen hindrer all akustisk energi å nå dens bakside, noe som ikke er mulig å få til i praksis da det alltid vil være noe av lyden som når rundt skjermen som en konsekvens av diffraksjon av lydbølgene.

Et praktisk eksempel på et tilfelle der en ønsker at en bygning gir god lydskjerming, er tilfeller der det er vinduer inn til soverom på sidene av bygningen som ikke er synlige fra en lydkilde. Lydkilden i slike tilfeller er typisk trafikkerte veier som gir opphav til trafikkstøy. SINTEF og Folkehelseinstituttet gjør en undersøkelse om slike støyforhold ved soverom på baksiden av bygninger, der denne oppgaven er tenkt å komplementere denne undersøkelsen.

Ingen av de standard lydutbredelsesmodellene som brukes på tidspunktet der denne oppgaven utføres er i stand til å predikere lyden helt nær bygningsfasadene som ikke er synlige fra den aktuelle lydkildens posisjon, noe som har gitt opphav til denne oppgavens problemstilling.

1.2 Besvarelse av problemstilling

Oppgavens problemstilling skal besvares både ved ulike teoretiske metoder og ved praktiske eksperimenter. Det skal bli gjort beregninger for generelle geometriske former med hovedvekt på rektangulære kuber. Disse objektene kan tenkes å være generelle forenklede representasjoner av bygninger som resultatene også kan gjelde for. Disse objektene vil videre i oppgaven bli referert til som bygningsmodeller. De teoretiske beregningene og simuleringene skal i hovedsak gjøres ved bruk av en verktøykasse for beregning av kantdiffraksjon i MATLAB, EDBtoolbox, og ved elementmetode i programmet COMSOL Multiphysics. Refraksjon av lydbølgene vil bli sett bort fra i denne oppgaven, da avstandene som vil bli betraktes kan antas å være små nok til at lyden propagerer i et homogent medium og da vil følge rette linjer. De to enkle beregningsmetodene Maekawas metode og metoden beskrevet i ISO 9613-2 blir også evaluert, men majoriteten av resultatene er ikke fra disse beregningene. Det er ikke utført beregninger med den standard beregningsmetoden Nord2000 på grunn av at

oppgavens omfang måtte begrenses, i tillegg til at det antas at metodene som blir benyttet er tilstrekkelige nok til å svare på problemstillingen. Det er også kun gjort beregninger for bygningsmodeller med samme dimensjoner, både fordi oppgavens omfang måtte begrenses og at det da kan gjøres sammenligninger mellom de ulike tilfellene som er undersøkt. Da denne studien tar for seg en problemstilling som er mest interessant i tilfeller der lydkilden er trafikkstøy, ble det valgt at det interessante frekvensområdet som skal studeres er 50 Hz til 2 kHz da det er i dette området støyen er mest signifikant [7]. Det vil også bli supplementert med praktiske undersøkelser som skal utføres ved målinger i en skalamodell for i hovedsak verifisere de simulerte resultatene. Det vil også gjøres evalueringer av og sammenligninger mellom disse ulike metodene.

1.3 Rapportens oppbygning

Innledningsvis i rapporten, som har en tradisjonell oppbygning, vil det bli presentert teori som er relevant til problemstillingen samt teori bak metodene som er benyttet til å undersøke denne. Innholdet i dette kapitlet er først og fremst en litteraturstudie som skal gi bakgrunnsinformasjon på noe av det som er gjort i sammenheng med lignende problemstillinger tidligere. Det vil i teorikapitlet først bli presentert grunnleggende teori og modeller som er knyttet til diffraksjon av lydbølger. Deretter vil det bli presentert noen begreper og parametre tilknyttet støyskjermer, der noen av de vanligste forenklede beregningsmetodene for slike problem presenteres. Til slutt vil det gis en kort innføring av prinsippet bak endelig elementers metode som blir benyttet til å utføre noen av de teoretiske simuleringene i denne oppgaven, samt noen generelle betraktninger som må tas i forbindelse med forsøk i akustiske skalamodeller.

Deretter vil det være et kapittel som omhandler de ulike teoretiske og praktiske metodene som er benyttet i oppgaven, der både bygningsmodellene og fremgangsmåtene som er benyttet vil bli presentert i detalj.

I det påfølgende kapitlet blir de viktigste resultatene funnet ved bruk av disse metodene presentert, der det vil bli gitt noen forklaringer på resultatene og de viktigste funnene vil bli kommentert. Det neste kapitlet i rapporten inneholder diskusjon rundt de viktigste resultatene, der dette er utført med tanke på å komme frem til en konklusjon på oppgavens problemstilling som presenteres i rapportens siste kapittel.

2 | Teori

2.1 Diffraksjon

2.1.1 Generelt om diffraksjonsfenomenet

Diffraksjon er i forbindelse med bølgeutbredelse avbøyning av bølger rundt blant annet hjørner og kanter på objekter inn til *skyggesoner* [11, s. 100]. Ved disse kantene vil det oppstå nye bølger som brer seg i alle retninger, og kan karakteriseres som *diffraksjonsbølger* [2, s. 55]. Diffraksjon av bølger er et fenomen som er mest betydelig for lave frekvenser der bølgelengden er stor i forhold til geometrien til objektet som lyden diffraktes rundt [2, s. 128]. Dette diffraksjonsfenomenet er interessant i forbindelse med støyreduksjon ved bruk av støyskjermende objekter, da det oppstår diffraksjon av lyden rundt kantene på disse. Teorien om diffraksjon ble først utviklet i forbindelse med optikk, og har senere blitt anvendt i forbindelse med akustisk bølgeutbredelse. Da diffraksjon er et meget komplisert problem, er det utviklet mange modeller både i tids- og frekvensdomenet som er approksimasjoner til problemet. En vanlig approksimasjon til diffraksjonsproblemet er å betrakte det totale lydfeltet som en sum av to komponenter. Den ene er en geometrisk del $p_{\text{geometrisk}}$ som inneholder direkte og reflektert lyd, og en del p_{diff} som består av den diffrakterte lyden. Det totale lydfeltet kan da bli uttrykt som [15, s. 3681]:

$$p_{\text{total}} = p_{\text{geometrisk}} + p_{\text{diff}} \quad (2.1)$$

Komponenten p_{diff} i denne ligningen kan bli beregnet ved mange ulike diffraksjonsmodeller, som for eksempel med modellen presentert i det påfølgende avsnittet. Se [15] for en oppsummering over noen av de viktigste diffraksjonsmodellene.

2.1.2 Analytisk modell for kantdiffraksjon ved bruk av sekundære lydkilder

En modell for kantdiffraksjon ble presentert i 1999 av P. Svensson et al. [14], der denne er en analytisk modell som benytter sekundære kilder ved den aktuelle kanten. Denne modellen benytter seg av analytiske direktivitetsfunksjoner for de sekundære kildene som kantene her kan betraktes som. I dette avsnittet blir denne modellen presentert for første ordens diffraksjon kun for et grunnleggende tilfelle med et objekt med en enkel kant av endelig

utstrekning som vist i figur 2.1. Dette kan utvides til å også gjelde høyere ordens diffraksjon fra flere kanter. Det er gitt en punktkilde S og en mottaker R som har posisjoner gitt i sylinderkoordinater relativt til kanten av objektet som beregningene skal gjøres for. Disse posisjonene er (r_S, θ_S, z_S) og (r_R, θ_R, z_R) , som vist i figur 2.1. Det er i denne modellen antatt harmonisk tidsavhengighet gitt av $e^{j\omega t}$, men denne er utelatt i ligningene i dette avsnittet for å gi en bedre lesbarhet.

Diffraksjonsfeltet for første ordens diffraksjon for lydtrykket $p_{\text{diff}}^{(1)}$ i mottakerposisjonen er gitt som et linjeintegral langs en kant på et gitt objekt. Integrasjonsgrensene er for en kant av en endelig lengde gitt av kantens endepunkter z_1 og z_2 , som i ligningen for $p_{\text{diff}}^{(1)}$ under [15, s. 3682]:

$$p_{\text{diff}}^{(1)} = -\frac{\nu}{4\pi} \sum_{i=1}^4 \int_{z_1}^{z_2} e^{-jk(m+l)} \frac{\beta_i}{ml} dz \quad (2.2)$$

I dette uttrykket er $\nu = \pi/\theta_W$ der θ_W er den ytre vinkelen til kanten. Avstandene mellom kilden og kanten og mellom mottakeren og kanten er gitt som henholdsvis m og l , og $k = \omega/c$. Dette er illustrert i figur 2.1. Ligning (2.2) inneholder også fire funksjoner gitt av β_i , som kan tolkes som direktivitetsfunksjoner for de sekundære kildene på kanten som funksjon av posisjon langs kanten z . Direktivitetsfunksjonene er gitt av følgende ligning:

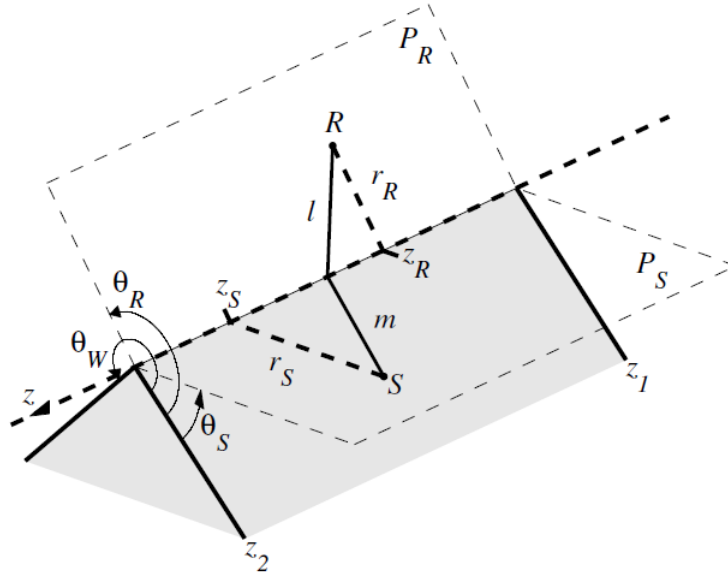
$$\beta_i = \frac{\sin(\nu\phi_i)}{\cosh(\nu\eta) - \cos(\nu\phi_i)} \quad (2.3)$$

I ligning (2.3) er η gitt av [13, s. 569],

$$\eta = \cosh^{-1} \frac{(z - z_S)(z - z_R) - ml}{r_S r_R} \quad (2.4)$$

og vinklene ϕ_i er definert ved ligningene under:

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \pi + \theta_S + \theta_R, & \phi_2 &= \pi - \theta_S + \theta_R, \\ \phi_3 &= \pi - \theta_S - \theta_R, & \phi_4 &= \pi + \theta_S - \theta_R \end{aligned} \quad (2.5)$$



Figur 2.1: Illustrasjon av et objekt med en enkel og endelig kant, hentet fra [13].

Figuren over viser en rett kant med vinkelen θ_W som har en utstrekning langs z -aksen mellom de to endepunktene z_1 og z_2 . En uendelig kant kan fås fra ligning (2.2) ved å sette $z_{1,2} = \mp\infty$. P_R og P_S er to plan som går gjennom både kanten og henholdsvis kilden og mottakeren [13, s. 568]. Denne ligningen er kun på en generell form og gjelder derfor ikke for alle kilde- og mottakerposisjoner, men det er vist i [13] at denne kan utvides til å gjelde for alle kilde- og mottakerposisjoner.

Dette kan også benyttes for objekter med flere kanter som gir opphav til høyere ordens diffraksjon. I slike tilfeller vil den totale løsningen bestå av både første og høyere ordens diffraksjonsbølger fra alle kantene [13, s. 570]. Det totale diffraksjonsfeltet kan da bli uttrykt som en sum av bidrag av alle ordener, der $p_{\text{diff}}^{(n)}$ beskriver uttrykket for diffraksjonskomponenten av orden n [15, s. 3683]:

$$p_{\text{diff},\text{total}} = \sum_{n=1}^{\infty} p_{\text{diff}}^{(n)} \quad (2.6)$$

2.2 Støyskjerming

Støyskjermer er objekter som hindrer fri sikt mellom lydkilde og mottaker slik at lyden hos mottakeren reduseres sammenlignet med tilfellet uten støyskjermen til stede. Slik lyd-reduksjon er tilfellet dersom det skjermende objektet er stort i forhold til bølgelengden til den innfallende lyden. Hvis transmisjonstapet gjennom materialet som støyskjermen er konstruert av er tilstrekkelig høyt, er den skjermende effekten fra dette objektet kun avhengig av dets geometri [9, s. 68]. Lyden som da treffer mottakerposisjonen er kun en konsekvens

av lydrefleksjon rundt kantene på støyskjermen. Det er i dette avsnittet presentert beregningsmetoder for støyskjermer som kun omfatter tilfeller der refleksjoner fra bakken under støyskjermen er neglisjert for enkelthetens skyld. Dersom en ønsker å inkludere refleksjoner fra bakken, kan en benytte speilkildemetoden for å beregne de ulike lydstiene til refleksjonene og deres bidrag til det totale lydtrykket [4, s. 162].

2.2.1 Innskuddstap

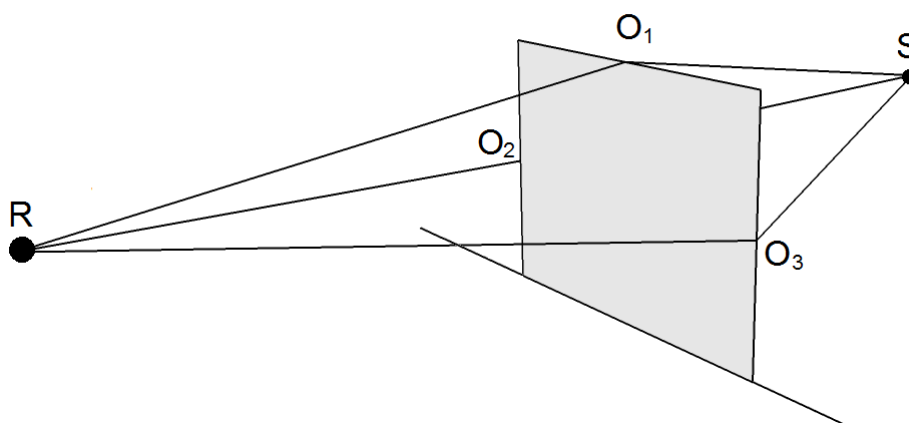
Innskuddstap (*Insertion loss*), IL , er mye brukt i forbindelse med reduksjon av lydtrykksnivå fra støyskjermer. Dette er et mål på hvor mye lydtrykksnivået i et gitt punkt er redusert som følge av introduksjon av et skjermende element [3, s. 206], og kan uttrykkes som:

$$IL = L_{p,\text{fritt}} - L_{p,\text{skjerm}} \quad [\text{dB}] \quad (2.7)$$

Her er $L_{p,\text{skjerm}}$ og $L_{p,\text{fritt}}$ lydtrykksnivået i det samme punktet henholdsvis med og uten skjermende element til stede. Dette er en interessant parameter dersom en ønsker å betrakte hvordan et skjermende objekt reduserer lydtrykksnivået i det gitte punktet.

2.2.2 Tynne skjermer

Det enkleste tilfellet i forbindelse med støyskjerming er tynne skjermer med en tykkelse som er liten i forhold til bølgelengdene til innfallende lyd. Figur 2.2 illustrerer en slik tynn støyskjerm av endelig utstrekning som er plassert på et underlag, slik at det er tre mulige veier hvor lyden kan bevege seg mellom kilden S og mottakeren R via diffraksjonspunkter på kantene. Dette er et problem som ble undersøkt av Z. Maekawa [4] som resulterte i en enkel metode for å beregne lydreduksjonen som følge av støyskjermer, og denne danner grunnlaget for flere moderne beregningsmetoder.



Figur 2.2: Ulike lydstier rundt en uendelig tynn skjerm av endelig størrelse plassert på et underlag. Lydkilden er merket med S og mottakeren er merket med R .

Den lydreduserende effekten slike støyskjermer har kan beregnes ved hjelp av Fresnels nummer (*Fresnel's zone number*) N_i som er definert i ligning (2.8). Dette er et uttrykk for kant

$i=1,2,3$ som vist i figur 2.2. Denne parameteren inneholder δ_i som er lik veiforskjellen mellom kilden S og mottakeren R med og uten skjermen til stede. SO_i og O_iR er henholdsvis avstandene mellom kilden S og diffraksjonspunkt O_i og mellom diffraksjonspunktet O_i og mottakeren R. Dette er veiene som gir de korteste avstandene mellom kilde og mottaker. For tilfellet som vist i figur 2.2 er det tre kanter på skjermen som medfører at $i = 1,2,3$.

$$N_i = \frac{2}{\lambda} \delta_i = \frac{2}{\lambda} (SO_i + O_iR - SR) \quad (2.8)$$

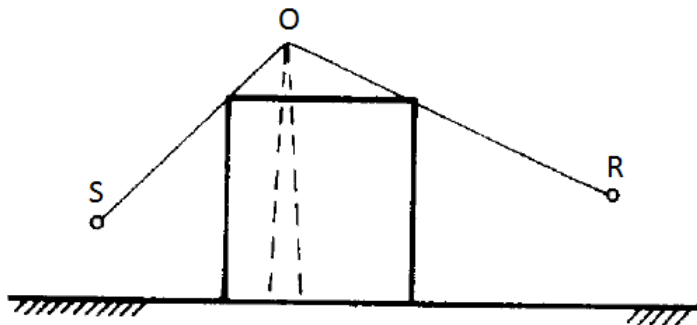
For å beregne innskuddstapet IL_1 fra den øvre kanten av skjermen via lydstien gjennom punktet O_1 kan ligning (2.9) benyttes [8, s. 42]. Dette kan også være en approksimasjon til det totale innskuddstapet dersom skjermen har en uendelig eller tilstrekkelig lang nok bredde til at lydstiene langs de vertikale kantene gjennom punktene O_2 og O_3 kan neglisjeres. Uttrykket for innskuddstapet under er et matematisk uttrykk for Maekawas kurve [4, s. 161], som blir benyttet til å finne sammenhengen mellom innskuddstapet og Fresnells nummer N_1 .

$$IL_1 = 5 + 20 \log_{10} \left(\frac{\sqrt{2\pi N_1}}{\tanh(\sqrt{2\pi N_1})} \right) \quad [\text{dB}] \quad (2.9)$$

I praksis har alle skjermende elementer en endelig lengde, og dersom denne lengde er liten nok vil også diffraksjonen rundt punktene O_2 og O_3 på de vertikale kantene på objektet gi signifikante bidrag til lydfeltet på baksiden [9, s. 70]. Lydstiene rundt de vertikale kantene gjennom disse punktene er vist i figur 2.2. Bidragene fra disse kantene blir også beregnet ut fra ligning (2.9), og det totale innskuddstapet fås ved å summere energiene til alle de tre bidragene i følge Maekawa [4, s. 168].

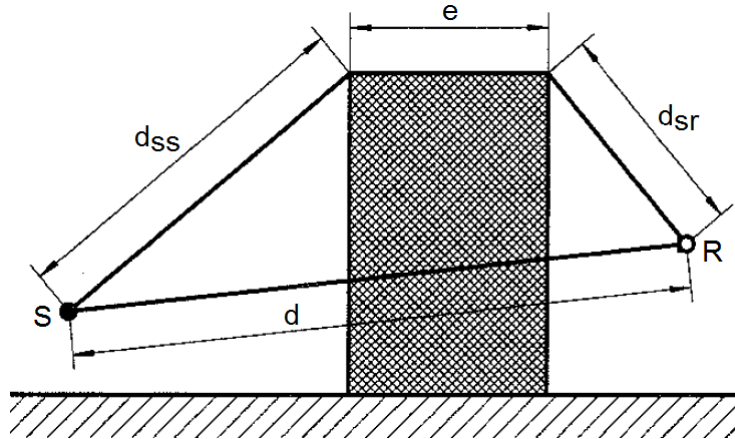
2.2.3 Tykke skjermmer

Mange konstruksjoner, som for eksempel bygninger, har en signifikant tykkelse som er større enn lydets bølgelengde. I slike tilfeller må modellen for tynne skjermmer, som presentert i forrige avsnitt, utvides. En måte å behandle dette problemet på er å erstatte den tykke skjermen med en tynn skjerm med en høyde gitt av skjæringspunktet O mellom linjene ut fra kilde og mottaker som vist i figur 2.3 [4, s. 172]. En kan da benytte ligning (2.9) til å beregne innskuddstapet.



Figur 2.3: Approksimasjon til skjermende konstruksjon med en signifikant tykkelse, hentet fra [4, s. 172].

Det er også utarbeidet andre metoder for denne typen problemer der tykkelsen på objektet e direkte er inkludert i beregningene, som i beregningsmetoden i ISO 9613-2 [10]. Figur 2.4 illustrerer de ulike lengdene som inngår i beregningene i henhold til denne metoden.



Figur 2.4: Skjermende konstruksjon med en signifikant tykkelse e som gir opphav til dobbeltdiffraksjon, hentet fra [10, s. 10].

For beregninger av innskuddstapet for tilfellet som vist i figuren over kan ligning (2.10) benyttes. Denne benyttes for tilfeller der refleksjoner fra bakken er neglisjert og om man ser bort fra meteorologiske forhold.

$$IL_{\text{ISO}} = 10 \log_{10} \left(3 + \frac{C_2}{\lambda} C_3 z \right) \quad [\text{dB}] \quad (2.10)$$

Her er $C_2 = 40$, λ er bølgelengden til lyden og z er veiforskjellen mellom direktelyden uten skjerm og diffraktert lyd. I uttrykket for z under er e tykkelsen til skjermen, og a er avstanden mellom kilden og mottakeren parallelt med skjermen.

$$z = \sqrt{(d_{\text{ss}} + d_{\text{sr}} + e)^2 + a^2} - d \quad [\text{m}] \quad (2.11)$$

C_3 i ligning (2.10) er for dobbeltdiffraksjon, som er uttrykt ved følgende ligning:

$$C_3 = \frac{1 + (5\lambda/e)^2}{1/3 + (5\lambda/e)^2} \quad (2.12)$$

I tilfeller med tykke støyskjermer av endelig bredde får en også tre ulike lydster som bidrar til det totale lydtrykket på baksiden av objektet som for tilfellet for tynne skjermer i figur 2.2. Den totale lydreduksjonen fås også her ved å summere det kvadrerte lydtrykket i mottakerposisjonen fra hvert av de tre bidragene [10, s. 9].

2.3 Endelige elementers metode

Endelige elementers metode (*The finite element method*), også kalt elementmetoden, er en numerisk metode for å finne approksimerte løsninger av differensialligninger [12]. I akustikken er det løsninger av bølge ligningen en ønsker å finne. I denne metoden blir det aktuelle domenet det ønskes å finne en løsning for delt opp i små elementer der løsninger skal beregnes for hjørnene til disse elementene. Disse hjørnene kalles noder. De små elementene kan ha mange ulike former, men enkle geometrier som for eksempel triangulære elementer er oftest benyttet. Elementene kan være asymmetriske, uregelmessige og av ulike størrelser slik at de kan tilpasses til komplekse geometrier. Dette gjør også at en også kan få en bedre oppløsning i de mest interessante områdene i domenet.

Når denne metode blir benyttet i akustikken er det i de fleste tilfellene tilstrekkelig og kun beregne det akustiske trykket p i hver node i domenet. Dersom en kjenner trykket i nodene, kan trykket beregnes i alle punkter innenfor elementene mellom nodene ved å interpolere med basisfunksjoner [12, s. 34]. For mer informasjon om elementmetoden henvises det til [12].

2.4 Akustisk skalamodell

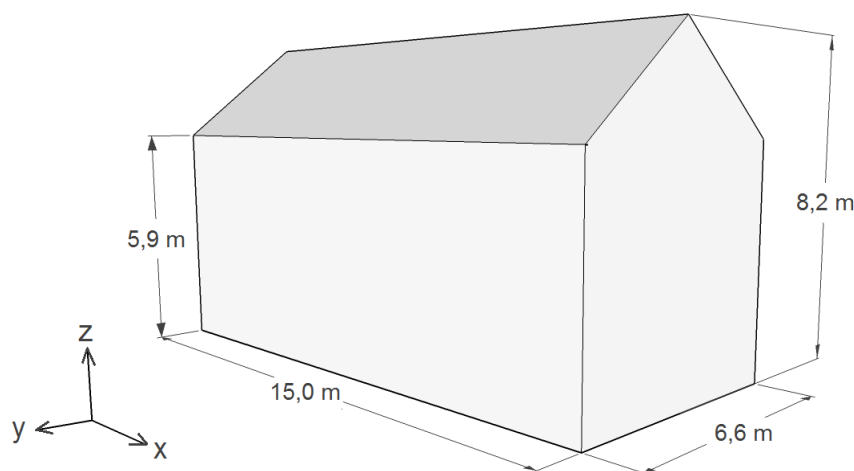
Dersom alle dimensjoner i en modell skaleres med en faktor N , må også bølgelengdene til de akustiske bølgene skaleres med samme faktor. Dette må gjøres for at størrelsesforholdet mellom bølgelengdene og skalamodellens dimensjoner skal være de samme som i fullskala. Skalering av bølgelengder på denne måten kan gjøres dersom lydfarten c er den samme både i full størrelse og i skalamodellen. Dersom en har en skalamodell der dimensjonene er nedskalert med faktoren $1/N$, vil sammenhengen mellom bølgelengdene i nedskalert modell og fullskala være gitt av:

$$\lambda_{\text{fullskala}} = N\lambda_{\text{nedskalert}} \quad [\text{m}] \quad (2.13)$$

En konsekvens av denne sammenhengen vil være at frekvensene som må benyttes i skalamodellen der dimensjonene er nedskalert med $1/N$ må være N ganger høyere enn i full størrelse.

3 | Metoder

I dette kapittelet blir metodene som er benyttet til å undersøke oppgavens problemstilling beskrevet i detalj. Det blir gitt beskrivelser av hvordan objektene som representerer forenklete bygningsmodeller som er benyttet i studien er konstruert for de ulike metodene. Hvilke parametere som er benyttet blir også presentert. I alle metodene er det benyttet en modell av en bygning med rektangulær grunnflate med dimensjoner som er basert på dimensjonene til den fysiske modellen som ble benyttet i de praktiske målingene. Denne bygningsmodellen er illustrert i figur 3.1. En lydkilde ble plassert på en side av bygningsmodellen som ble definert til å være bygningens forside, og lydtrykk og tilhørende lydtrykksnivåer ble målt eller beregnet i ulike posisjoner ved bygningsmodellens bakside.



Figur 3.1: Illustrasjon av bygningsmodellen med skrått tak i fullskala.

Modellene av bygningene for de ulike metodene har like dimensjoner for at det lett skal kunne gjøres sammenligninger. Det er også i hovedsak studert modeller der bygningen er plassert i fritt rom på et totalabsorberende underlag, noe som gjør det lettere å studere kun den diffrakterte lyden uten interferens fra lyd som er reflektert fra underlaget og andre flater. For å undersøke hvordan innvirkning bakken rundt bygningen har på resultatene ble bygningsmodellen også plassert på et totalreflekterende underlag. Innskuddstap ble beregnet fra lydtrykksnivået med bygningen til stede og lydtrykksnivået i fritt felt ved samme posisjon i henhold til ligning (2.7). Det ble for alle metodene gjort beregninger i frekvensområdet 50 Hz til 2 kHz.

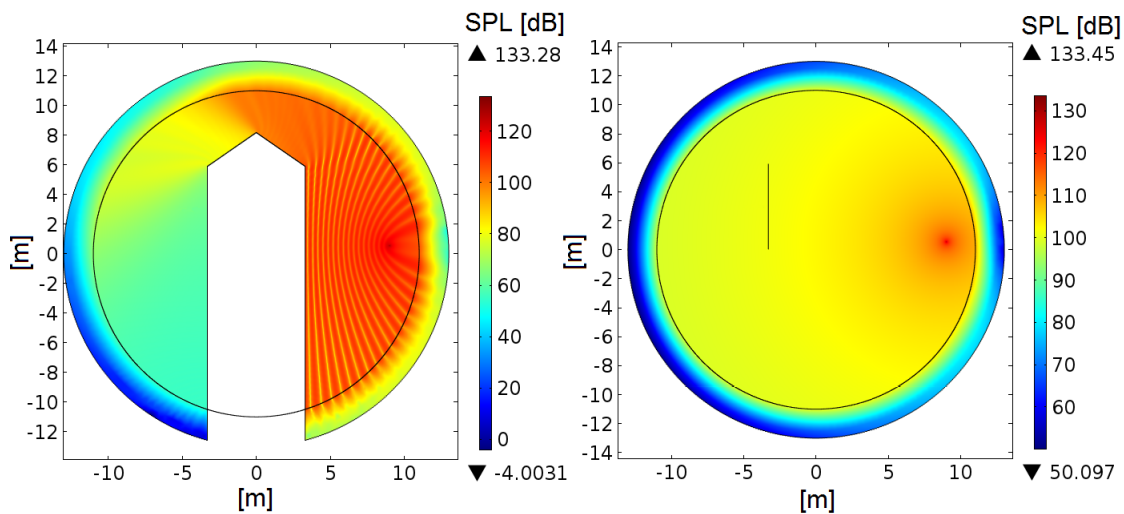
3.1 Teoretiske simuleringer

Det ble benyttet to ulike teoretiske metoder for å undersøke lydutbredelsen på fasaden på baksiden av den enkle bygningsmodellen. Disse bygningsmodellene hadde dimensjonene som vist i figur 3.1. Det ble gjort teoretiske simuleringer i forkant av praktiske målinger, for å få en oversikt over problemet og for å kartlegge og undersøke forhold som eventuelt må ta hensyn til i forbindelse med målingene. Det ble også gjort simuleringer i etterkant av målingene der en nøyaktig rekonstruksjon av måleoppsettet ble benyttet for og lettere kunne sammenligne teoretiske og praktiske resultater.

3.1.1 COMSOL Multiphysics

Det første simuleringsverktøyet som ble benyttet var akustikkmodulen i programmet COMSOL. Dette programmet benytter endelig elementers metode som beskrevet i kapittel 2.3 for å simulere bølgeutbredelse i henhold til bølgeligningen, og finner approksimerte løsninger på denne. Dette gir en god beskrivelse av virkeligheten dersom en benytter tilstrekkelig antall elementer per bølgelengde i simuleringene. Modelloppsettet som ble benyttet i dette programmet var *Pressure Acoustics, Frequency Domain*. Det ble konstruert en todimensjonal modell av en bygning for å få et overblikk over problemet, da denne programvaren kan gi en grafisk representasjon av lydtrykksnivåer og lett kan gjøres beregninger i ønskede punkter i modellen. Det ble kun benyttet en todimensjonal modell da en tredimensjonal modell ville gitt et for høyt antall elementer for den tilgjengelige maskinvaren. En todimensjonal modell er i tillegg enklere å konstruere, samt at problemet som skal undersøkes også i noen tilfeller kan approksimeres til å være todimensjonalt. Fordelen med simuleringer i COMSOL er at en kan betrakte komplekse geometrier som ikke er mulig med f. eks. verktøykassen for kantdiffraksjon i MATLAB, se avsnitt 3.1.2. Modellene i denne oppgaven er laget så enkle som mulig, fordi det ønskes å finne generelle og enkle sammenhenger for resultatene.

Bygningsmodellene ble konstruert med dimensjonene vist i figur 3.1 av perfekt reflekterende linjer med refleksjonskoeffisient $R = 1$, som impliserer total refleksjon av innfallende bølger. En punktkilde ble plassert på den ene siden av objektet, og lydtrykksnivåer ble beregnet langs linjen som danner bakfasaden og langs en linje ut fra denne fasaden. Se figur 3.2 for et eksempel på en bygningsmodell med skrått tak. Problemet ble studert for enkeltfrekvenser som tilsvarer senterfrekvensene i 1/3-oktavbåndene fra 50 Hz til 2 kHz, da denne beregningsmetoden ikke kan gjøre beregninger i oktavbånd. Maksimal størrelse på elementer i modellen bør i henhold til [5, s. 16] være mindre eller lik λ/N , hvor N er et tall mellom 5 og 10, for å oppnå en nøyaktig løsning. I modellene i denne oppgaven ble det benyttet triangulære elementer med maksimal elementstørrelse satt til å være 0,03 m som tilsvarer $N = 5,73$ for 2 kHz, som er den høyeste frekvensen som ble studert. Lydfarten i modellene ble valgt til $c = 344$ m/s og lufttettheten til $\rho = 1,21$ kg/m³.



Figur 3.2: Eksempel på todimensjonale modeller i COMSOL Multiphysics, der begge viser lydtrykksnivåfordelingen for 500 Hz. Lydtrykksnivåer for frittfelt i forbindelse med beregning av innskuddstap er beregnet for den vertikale linjen i delfiguren til høyre.

Den akustiske kilden som ble benyttet i denne modellen var en todimensjonal punktkilde, som kan betraktes som en uendelig lang linjekilde i tre dimensjoner. Denne kilden ble satt til å ha en utstrålt effekt på $p_{\text{rms}} = 1 \text{ W/m}$. Kilden var i alle beregningene plassert 0,55 m over bakken der det i det totalabsorberende tilfellet ble plassert over en tenkt totalabsorberende bakke. Kilden hadde i alle tilfeller en avstand på 5,7 m fra veggen på forsiden av bygningsmodellen. For å unngå refleksjoner fra grensene i domenet som det ble gjort beregninger i, ble det opprettet et sirkulært perfekt tilpasset lag (*Perfectly Matched Layer, PML*) som skal gi minimalt med refleksjoner. Dette ble gjort for å simulere utendørs lydutbredelse uten refleksjoner fra omgivelsene der lydbølgene kun påvirkes av bygningsmodellen. Det ble beregnet lydtrykksnivåer langs linjen som utgjør bakfasaden av huset, og på bakgrunn av elementstørrelsene som ble benyttet ble det totalt 991 punkter langs denne linjen. Det ble også gjort beregninger for lydtrykksnivåene i de samme punktene for et tomt rom, for å kunne kalkulere innskuddstapet i henhold til ligning (2.7). Disse linjene er vist i figur 3.2.

3.1.2 EDBtoolbox: Verktøykasse for kantdiffraksjon i MATLAB

For å studere problemet i tre dimensjoner, ble en verktøykasse for MATLAB for beregning av kantdiffraksjon benyttet (*EDBtoolbox*). Denne verktøykassen ble også benyttet til å studere bygningsmodeller i to dimensjoner. Versjonen som ble benyttet er en foreløpig versjon av den fritt tilgjengelige versjonen som kan bli funnet i [6], der denne foreløpige versjonen også inkluderer høyere ordens diffraksjon. Verktøykassen, som har blitt utviklet av Peter Svensson ved NTNU, er mengde funksjoner som kan beregne lydtrykket i et gitt punkt for en punktkilde i henhold til teorien som er presentert i avsnitt 2.1.2. Med dette verktøyet kan en definere ulike geometrier ved hjelp av harde og perfekt reflekterende plan, der resultatene består av spekulære refleksjoner fra planene samt diffraksjonskomponenter av forskjellig orden. Geometrien blir definert ved hjelp av en .cad-fil, der planene blir konstruert ut fra

punkter i et kartesisk koordinatsystem. Planene kan enten bli definert som totalabsorberende (*totabs*) eller som totalreflekterende (*rigid*). Totalabsorberende betyr at beregninger fra kantene som flaten danner utelates, mens totalreflekterende inkluderer disse kantene i beregningene. Kilde- og mottakerposisjoner defineres ved hjelp av vektorer med koordinater for planenes hjørner i et separat konfigurasjonsskript. Det er gitt et eksempel på et slikt skript i vedlegg F.

Ved hjelp av dette ble det konstruert en tilsvarende rektangulær modell av en bygning som for modellen i COMSOL, men i dette tilfellet hadde bygningen også en lengde på 15,0 m. Bygningsmodellene hadde ellers dimensjonene som vist i figur 3.1, og det ble både laget en modell med flatt tak og en med skrått tak. Det ble konstruert to utgaver av bygningsmodellen der den ene var en tredimensjonal modell og den andre var en approksimasjon til en todimensjonal modell. For den todimensjonale modellen ble begge de korte endesidene med lengder på 6,6 m satt til å være totalabsorberende for å ekskludere bidrag rundt disse veggene. For den tredimensjonale modellen ble planene på endesidene satt til å være totalreflekterende for å inkludere bidragene fra disse. I begge tilfellene var planet som dannet undersiden av bygningen definert som totalabsorberende, slik at det ikke ble beregnet diffraksjon rundt kantene rundt dette planet. Beregningene med den todimensjonale modellen kan bli kalt 2,5D da det benyttes en tredimensjonal punktkilde med et todimensjonalt objekt [19].

Det ble gjort beregninger med denne bygningsmodellen plassert på både en totalreflekterende og en totalabsorberende flate, tilsvarende som i COMSOL. Den totalabsorberende bakken ble konstruert ved å plassere bygningen i et fritt felt der det kun ble beregnet lydtrykk fra én kilde i hver mottakerposisjon. Den totalreflekterende bakken ble konstruert ved å benytte en speilkilde som var speilet om det tenkte planet i $z = 0$ som utgjør bakken, og et speilbilde av bygningen også om planet $z = 0$. Det ble i alle beregninger benyttet en punktkilde som ble plassert på midten av den ene langsiden til bygningen, med en høyde på 0,55 m over den tenkte bakken. Det ble fra dette beregnet komplekst lydtrykk i 100 mottakerposisjoner nedover midten av baksiden til bygningen, der hvert punkt hadde lik avstand fra veggen. Avstanden fra veggen skulle ønskelig vært 0,0 m, men grunnet begrensinger i dette beregningsverktøyet ble det gjort beregninger der denne avstanden var mellom 0,001 m og 0,0742 m. Det ble også beregnet komplekse lydtrykk i de samme posisjonene uten bygningsmodellen til stede, som ble utført ved å bruke analytiske uttrykk for trykk fra en punktkilde [1, s. 127]:

$$p(r) = \frac{A}{r} e^{-jkr} = \frac{A}{r} (\cos(kr) + j \sin(kr)) \quad [\text{Pa}] \quad (3.1)$$

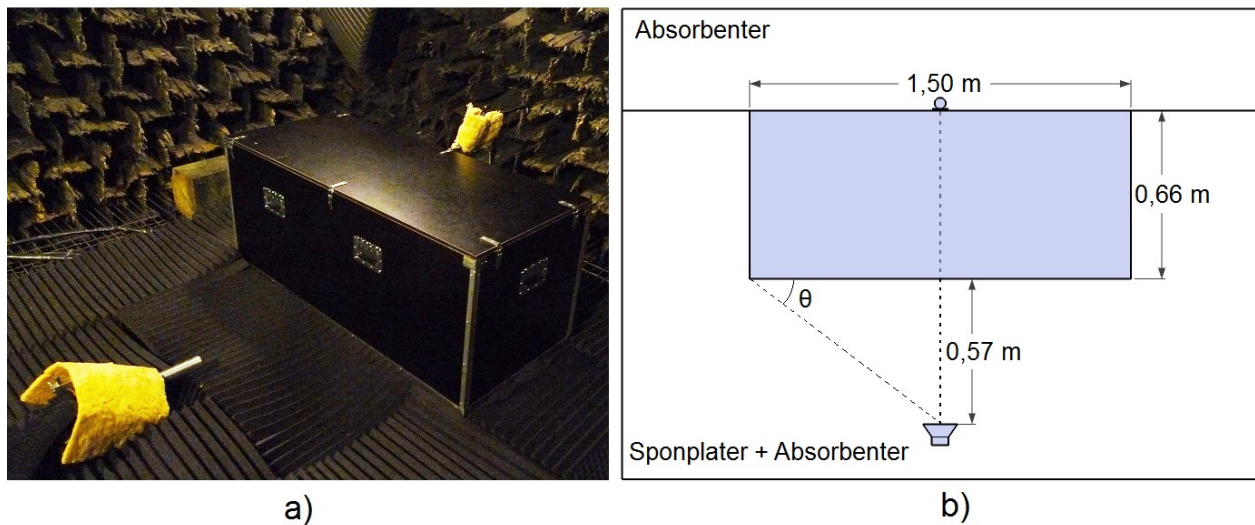
A er her bølgens trykkamplitude, r er radiell avstand fra sentrum av kilden. Bølgetallet k er gitt som $k = \omega/c$, der c er lydfarten og ω er vinkelfrekvensen $2\pi f$. Fra disse komplekse trykkverdier ble tilhørende lydtrykksnivåer som ble benyttet til å beregne innskuddstapet. EDBtoolbox benytter seg av et fast antall punkter langs kantene i beregningene, der det er funnet at det må være ca 2 punkter per bølgelengde for å få et nøyaktig resultat. Gitt av den lengste kantlengden på 15 m i bygningsmodellen, ble antall punkter satt til å være 174 i alle beregninger. Disse beregningene ble som i COMSOL utført for enkeltfrekvenser som utgjør senterfrekvensene i 1/3-oktavbåndene fra 50 Hz til 2 kHz. Det ble også gjort beregninger for 5 og 10 enkeltfrekvenser innenfor grensene til noen utvalgte 1/3-oktavbånd, og disse resultatene ble deretter midlet for å få en approksimasjon til resultater for tilsvarende

bånd. Lydfarten i alle beregningene ble satt til å være $c = 344$ m/s og lufttettheten til $\rho = 1,21$ kg/m³, som i beregningene i COMSOL. Skriptet i vedlegg F er et eksempel på en oppsettsfil til å beregne innskuddstapet for forskjellige kilde- og mottakerposisjoner.

3.2 Målinger i skalamodell

For de praktiske undersøkelsene i en skalamodell ble det gjort målinger av lydtrykksnivået nær overflaten på baksiden av en rektangulær trekasse. Denne kassen hadde dimensjoner som i figur 3.1 som var nedskalert med faktoren $1/N = 1/10$. Dette gjør at bølgelengdene som ble benyttet i disse målingene må skaleres ned med tilsvarende faktor i henhold til ligning (2.13). Måleutstyret som ble brukt i forbindelse med disse målingene er listet i tabell B.1 i vedlegg B.2. Kassen som ble benyttet hadde en flatt tak med grunnflate på 150 cm x 66 cm og en høyde på 59 cm. Kassen var konstruert av kryssfinerplater med lakkerte harde glatte overflater, som kan betraktes som perfekt reflekterende for det interessante frekvensområdet. Et tilsvarende materiale (plywood) har en absorpsjonskoeffisient på $\alpha_1 \leq 0,1$ for frekvenser $f \geq 500$ Hz [1, s. 341]. På sidene av kassen var det montert noen håndtak og hengsler av metall som kan bidra til noe uønskede refleksjoner for de høyeste frekvensene, som kan gi opphav til avvik fra de teoretiske modellene.

Alle målingene ble utført i et ekkofritt rom ved NTNU, der kassen ble plassert på toppen av sponplater med overliggende absorberende matter. Sponplatene ble benyttet for å hindre så mye som mulig av lyden å bre seg under bunnen på kassen, noe som ikke er realistisk for en bygning i praksis. Absorbentene var akustiske skumpaneler med en tykkelse på 5,08 cm, som vist i delfigur a) i figur 3.3. Disse ble brukt for å approksimere en absorberende bakke, for å hindre interferens fra lydbølger reflektert fra underlaget. Absorbentene som er ble brukt var av ukjent fabrikat, men det er funnet absorpsjonsdata for et tilsvarende produkt som antas å ha samme egenskaper. Disse tilsvarende skumpanelene er oppgitt til å ha en absorpsjonsfaktor $\alpha_2 \approx 1$ for frekvensbåndet ved 630 Hz og høyere [17], som også er egenskaper de benyttede skumpanelene antas å ha. Av denne grunn ble det kun benyttet plater under, foran og ved siden av kassen som illustrert i delfigur b) i figur 3.3. Bak kassen ble det kun benyttet absorbenter for å unngå bakkerefleksjoner og skape tilsvarende forhold som i simuleringene.



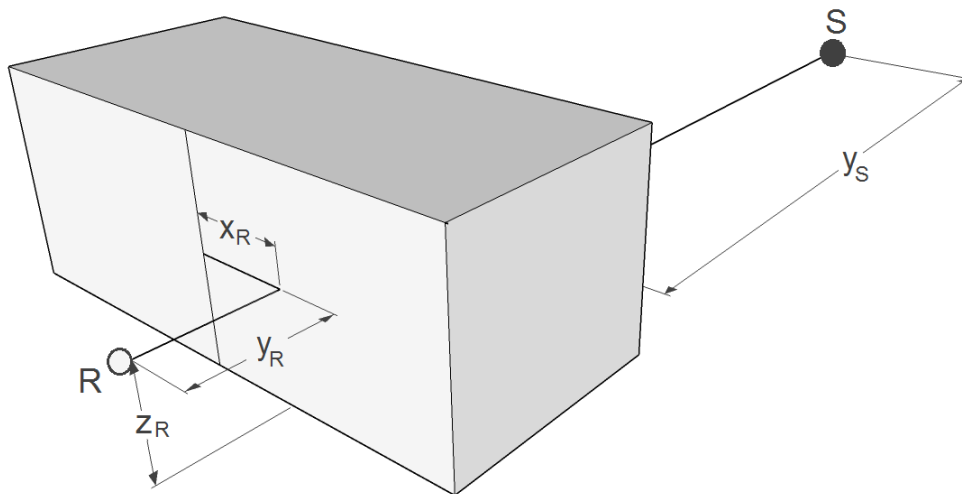
Figur 3.3: Oppsett for målinger i skalamodel i ekkofritt rom. Delfigur a) er et fotografi fra målingene, der høyttaleren er plassert foran kassen til venstre i bildet. Delfigur b) viser en skjematisk fremstilling av det samme oppsettet sett ovenfra.

Det ble under forsøkene plassert en høyttaler pekende mot en av langsidene på kassen med lengde 1,5 m, der denne høyttaleren ble plassert på midten av denne siden. Høyttaleren ble plassert med en høyde på 5,5 cm over absorbentene og 57 cm unna kassen. Det ble målt lydtrykksnivåer i 21 posisjoner loddrett nedover baksiden av kassen, med mikrofonen pekende vinkelrett på veggen på kassens skyggeside. Antall måleposisjoner ble bestemt av den vertikale avstanden mellom hver mikrofonposisjon som ble valgt til å være 2,5 cm. Mikrofonen ble i alle målepunkter plassert så nær kassens overflate som mulig med denne typen mikrofon, noe som ble valgt til å være 0,74 cm fordi dette tilsvarer bredden på en metallplate som benyttet til å legge mellom mikrofonen og overflaten for å gi en konsekvent avstand for alle posisjoner. For å kunne beregne innskuddstapet denne kassen innfører, som definert i avsnitt 2.2.1, ble det også målt i de samme posisjonene uten kassen i rommet.

Alle målingene ble utført med WinMLS 2004 med et målesignal av typen sinus-sveip i frekvensområdet 350 Hz - 24 kHz, med en punktprøvingsfrekvens på 48 kHz. Dette gjør at en får resultater i 1/3-oktavbåndene fra 500 Hz - 20 kHz, som tilsvarer 50 Hz til 2 kHz i fullskala. Høyttaleren som ble benyttet var montert i enden av et metallrør for å skape en mest mulig omnidireksjonal kilderrespons. Frekvensresponsen og den polare responsen til denne lydkilden ble målt, og dette er presentert i vedlegg D. Fra dette kan det observeres at denne høyttaleren blir retningsavhengig for høyere frekvenser og har avvik fra en omnidireksjonal respons. Grunnet høyttalerens avstand fra kassen i måleoppsettet vil lyden som bestråler kassen kun være sendt ut fra elementet med en vinkel $\theta \leq 53^\circ$ i forhold til høyttalerens symmetriakse. Lyd som stråler ut fra kilden med større vinkel enn dette, vil ikke treffe kassen og bli absorbert av veggene i det ekkofrie rommet.

4 | Resultater

Dette kapitlet inneholder de viktigste resultatene som er funnet i denne studien. Kapitlet er delt opp i to hoveddeler der den første delen tar for seg en todimensjonal modell og den andre delen tar for seg en tredimensjonal modell av en bygning. Disse modellene har nøyaktig de samme dimensjonene, sett bort fra lengden som i det todimensjonale tilfellet kan betraktes som uendelig. I denne studien er det valgt å ta utgangspunkt i en enkel modell av en bygning med rektangulær grunnflate, rette vegger og flatt tak. Det er også gjort noen beregninger for skrått tak. Modellens dimensjonaler er vist i figur 3.1. Disse dimensjonene er valgt fordi skalamodellen som benyttes i de praktiske forsøkene har tilsvarende dimensjoner nedskalert med en faktor 10, som gjør at en skal kunne sammenligne de praktiske måleresultatene med de simulerte resultatene.



Figur 4.1: Illustrasjon av bygningsmodellen med flatt tak, der de tre ulike avstandene a , b og c vises.

Figuren over viser de ulike avstandene for kilde og mottaker som blir variert i beregningene av resultatene. Avstandene z_R og y_R er henholdsvis avstand over bakken og avstand fra bakfasaden til en gitt posisjon for mottakeren R , og x_R er mottakerens horisontale avstand fra midten av bygningsmodellen. I alle beregninger er $x_R = 0$ dersom ikke annet er presisert. Dette er valgt fordi mottakerposisjon på midten av denne langsiden er mest tilsvarende beregningene i COMSOL. Avstanden y_S er avstanden fra fasaden på fremsiden av bygningen til kilden S . Alle de simulerte resultatene er beregnet for rene enkeltfrekvenser, mens de

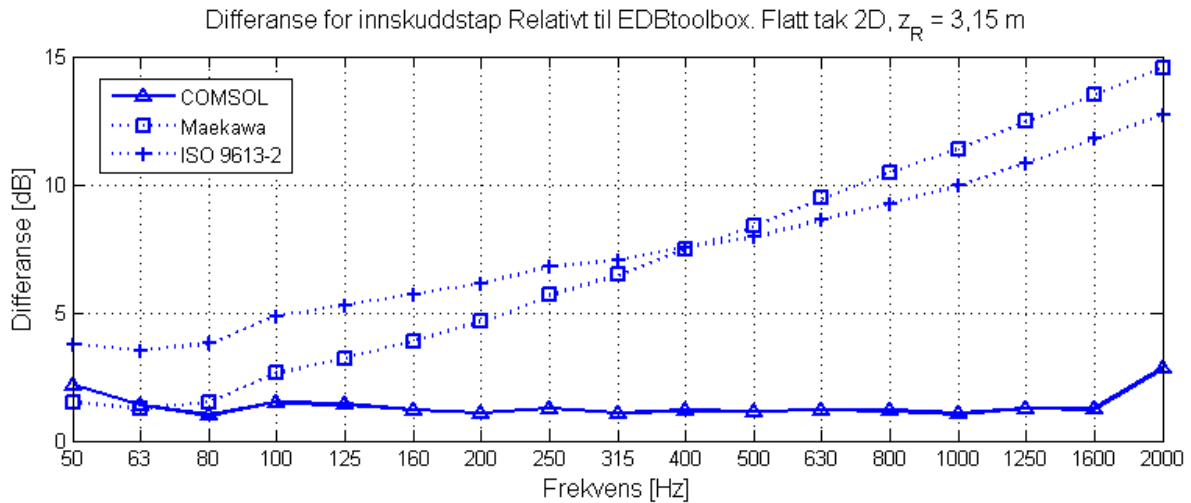
praktiske målingene er presentert i 1/3-oktavbåndsverdier. Det er gjort et valg på å kun presentere frekvensene 50, 100, 500, 1000 og 2000 Hz eller tilsvarende 1/3-oktavbånd i figurene der innskuddstapet er plottet som funksjoner av avstander. Dette er gjort for lesbarhetens skyld, da det ikke er hensiktsmessig å ta med alle frekvensene. Det er også disse frekvensene som diskusjonen og konklusjonen baseres på. Det er i hovedsak resultater fra EDBtoolbox som er presentert i dette kapitlet, da denne metoden antas å være mest realistisk da den er benyttet til beregninger for tredimensjonale modeller. I dette kapitlet er det valgt tre punkter med ulik høyder for z_R på bygningsmodellens bakfasade som det er lagt fokus på. Ett punkt er nær bakken (1,15 m), ett er omtrent midt på veggen (3,15 m), og ett er nær toppen av bygningen (5,65 m).

4.1 Todimensjonal modell av bygning

I dette avsnittet vil resultater fra beregninger for en todimensjonal modell av en bygning bli presentert. I dette todimensjonale tilfellet er kun lyden som beveger seg over taket tatt med i beregningene. En slik todimensjonal bygning vil være en tilnærming til bygninger som har en lengde av stor nok til at lyden som beveger seg rundt sidene av bygningen er liten nok slik at den kan neglisjeres. Praktiske eksempler på et slikt tilfelle er lange rekkehus eller boligblokker. Beregningene i dette avsnittet er utført med COMSOL og EDBtoolbox. Beregningene for den todimensjonale modellen med EDBtoolbox er utført med en tredimensjonal punktkilde, noe som gjør at dette kan karakteriseres som 2,5 dimensjonalt. For enkelhetens skyld er alle beregningene i dette avsnittet referert til som todimensjonale.

4.1.1 Frekvensavhengighet for innskuddstap, absorberende bakke rundt bygning

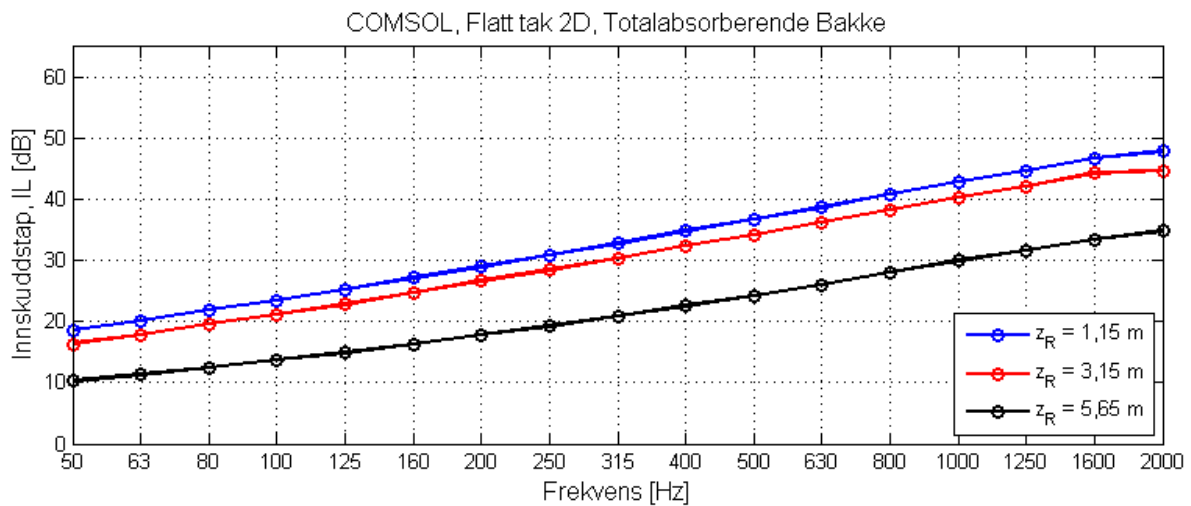
Det ble først gjort undersøkelser av hvordan innskuddstapet for bygningsmodellen med flatt tak endrer seg med frekvens. Innskuddstapet som funksjon av frekvens ble beregnet i et punkt som ligger $z_R = 3,15$ m over bakken for fire ulike metoder. Beregningene er utført med ligningene (2.9) og (2.10) for henholdsvis Maekawas metode og metoden i ISO 9613-2, i tillegg til beregninger fra COMSOL og verktøykassen EDBtoolbox. Figur 4.2 viser differansen i innskuddstap mellom EDBtoolbox og de andre metodene. Alle de fire kurvene for innskuddstapene i dette punktet ligger i vedlegget i figur A.2.



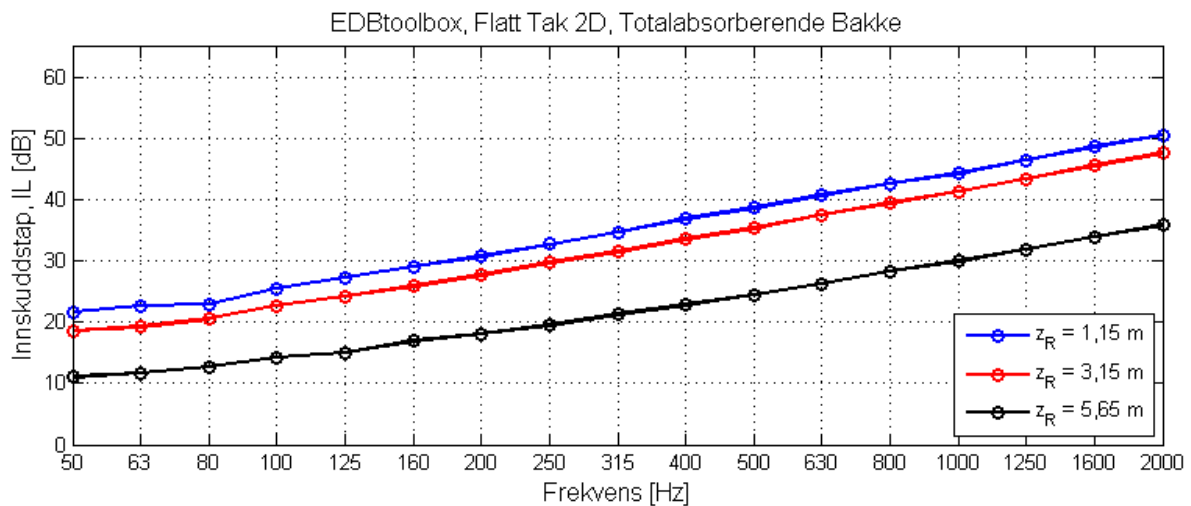
Figur 4.2: Differanse mellom ulike beregningsmetoder for innskuddstap som funksjon av frekvens, der EDBtoolbox er benyttet som referanse. Sammenligning av beregningsmetodene i COMSOL, EDBtoolbox, Maekawa og ISO 9613-2.

Ser av figuren over at resultatet fra COMSOL ligger nærmest verdiene beregnet med EDBtoolbox, og at innskuddstapet beregnet i COMSOL ligger nesten konstant ca 1,5 dB under resultatet fra EDBtoolbox. Det er noe større differanse for de to frekvensene 50 Hz og 2 kHz. Kurvene for innskuddstapene beregnet med Maekawa og ISO 9613-2 gir større differanse fra resultatet beregnet med EDBtoolbox, og denne differansen øker med frekvensen. Generelt estimerer Maekawas metode og metoden i ISO 9613-2 meget like verdier i hele det undersøkte frekvensområdet. Maekawas metode beregner ikke innskuddstapet direkte for en skjerm med en gitt tykkelse, men benytter en tenkt uendelig tynn skjerm som erstatter bygningsmodellen i beregningene i henhold til figur 2.3. Denne ekvivalente skjermen får da en høyde på 12,32 m. Metoden i ISO 9613-2 gjør at en kan beregne innskuddstapet direkte for et støyskjermende objekt med en gitt tykkelse. Da Maekawas metode og metoden i ISO 9613-2 er to meget forenklede metoder for beregning av innskuddstap, vil de påfølgende resultatene i denne studien vil derfor være beregnet ut i fra COMSOL og EDBtoolbox.

Figurene 4.3 og 4.4 på neste side viser begge innskuddstapet som funksjon av frekvens for tre ulike punkter langs veggen av bygningsmodellen med flatt tak, for henholdsvis COMSOL og EDBtoolbox.

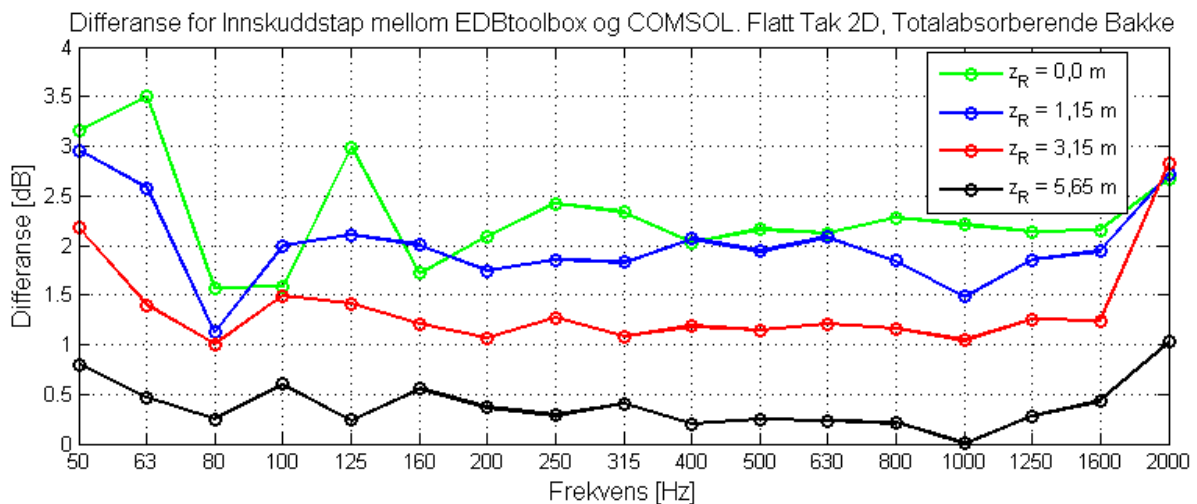


Figur 4.3: Innskuddstap som funksjon av frekvens beregnet i COMSOL for tre punkter på bakfasaden av bygning med flatt tak.



Figur 4.4: Innskuddstap som funksjon av frekvens beregnet med EDBtoolbox for tre punkter på bakfasaden av en bygning med flatt tak.

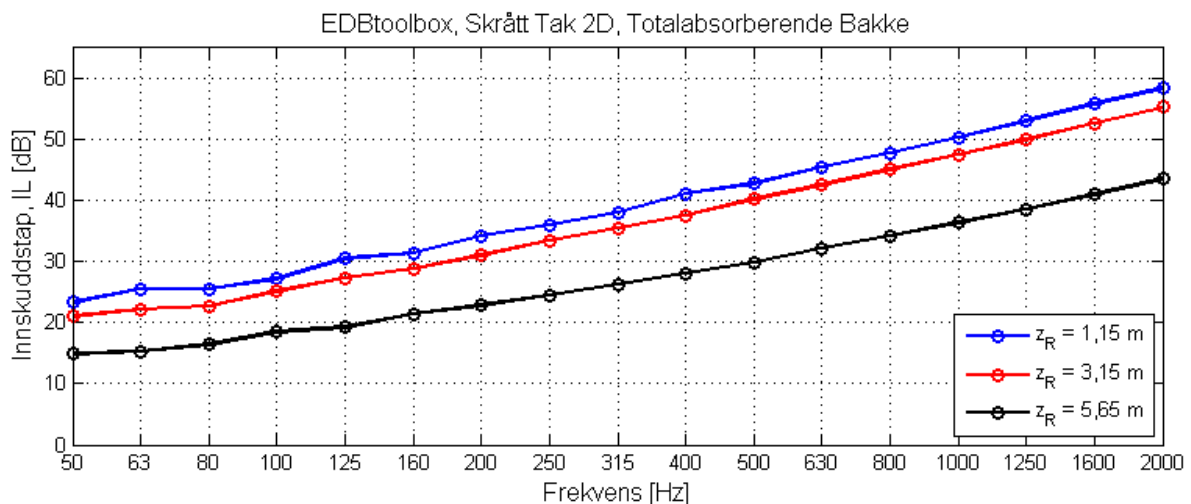
Begge metodene gir en frekvensrespons for innskuddstapet der høyere frekvens gir høyere innskuddstap, og innskuddstapet reduseres jo nærmere taket mottakerposisjonen flyttes. Ser at EDBtoolbox også her gir konsekvent høyere verdier enn COMSOL, noe som tydeliggjøres i figur 4.5 på neste side, som viser differansene mellom kurvene fra figur 4.3 og 4.3. Her er differansen beregnet som $IL_{EDBtoobox} - IL_{COMSOL}$.



Figur 4.5: Differanse mellom beregningene i COMSOL og EDBtoolbox for innskuddstapet som funksjon av frekvens for fire punkter på bakfasade. Bygning med flatt tak.

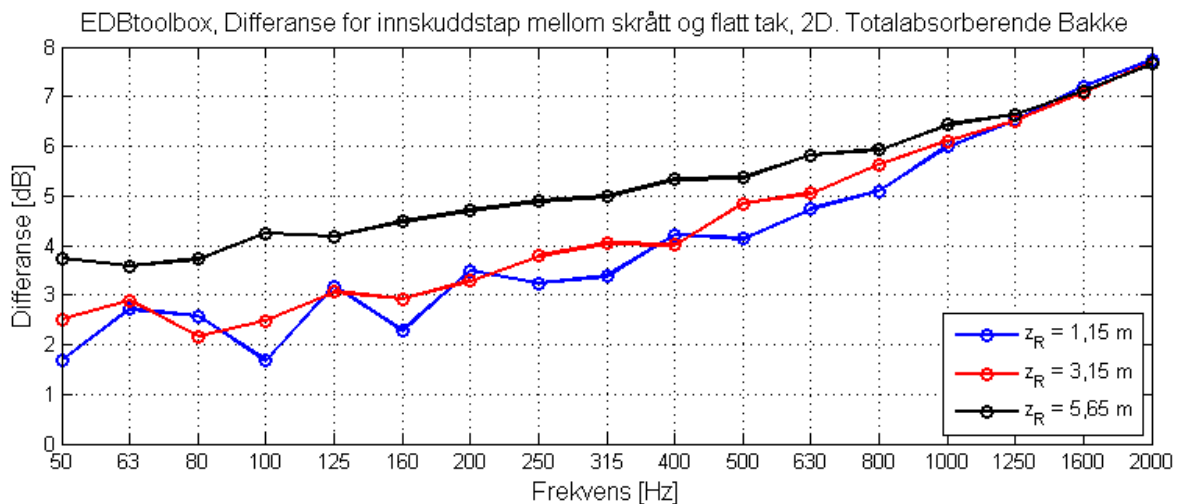
Denne figuren viser at differansen mellom innskuddstapet beregnet med de to metodene minker dersom mottakerposisjonen flyttes nærmere kanten på taket. Differansene har minst variasjon i frekvensområdet 100 Hz - 1600 Hz, men ser ut til å øke noe for frekvenser utenfor dette området.

Det ble også gjort beregninger på en modell av en bygning med skrått tak med EDBtoolbox, og innskuddstapet er beregnet som funksjon av frekvens i de samme tre punktene med ulik høyde over bakken, z_R , som tidligere i dette avsnittet. Figuren under viser dette:



Figur 4.6: Innskuddstap som funksjon av frekvens beregnet med EDBtoolbox for tre punkter på bakfasaden av bygning med skrått tak.

Det observeres at det også for skrått tak er jevnt økende innskuddstap med frekvens i alle tre punktene, og at det skrå taket konsekvent gir høyere innskuddstap langs bakfasaden enn flatt tak. Differansen mellom flatt og skrått tak, $IL_{\text{SkråTak}} - IL_{\text{FlattTak}}$, er vist i figur 4.7 på neste side.



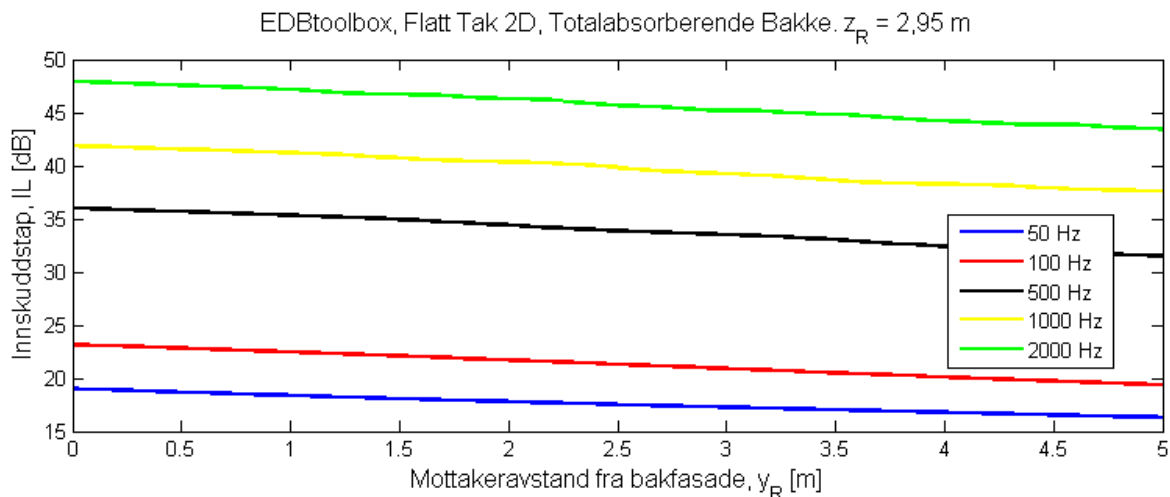
Figur 4.7: Differanse for innskuddstap som funksjon av frekvens mellom skrått tak og flatt tak. Beregnet med EDBtoolbox for tre punkter på bakfasaden av bygningmodellene.

Fra denne figuren går det tydelig frem at bygningen med skrått tak gir et høyere innskuddstap for de tre målepunktene for alle frekvenser. Differansen øker med frekvensen for alle mottakerposisjonene, og innskuddstapet for flatt tak er i mellom 1,5 dB og 8 dB lavere enn for skrått tak.

Det er også gjort tilsvarende beregninger av innskuddstapet for bygningmodellen med skrått tak og absorberende bakke i COMSOL, noe som kan studeres i figuren A.7 i vedlegget. Dette innskuddstapet beregnet i COMSOL ligger i dette tilfellet som for flatt tak også ganske jevnt under resultatet fra EDBtoolbox (som figur A.8 i vedlegget viser).

4.1.2 Avstandsavhengighet for innskuddstap, absorberende bakke rundt bygning

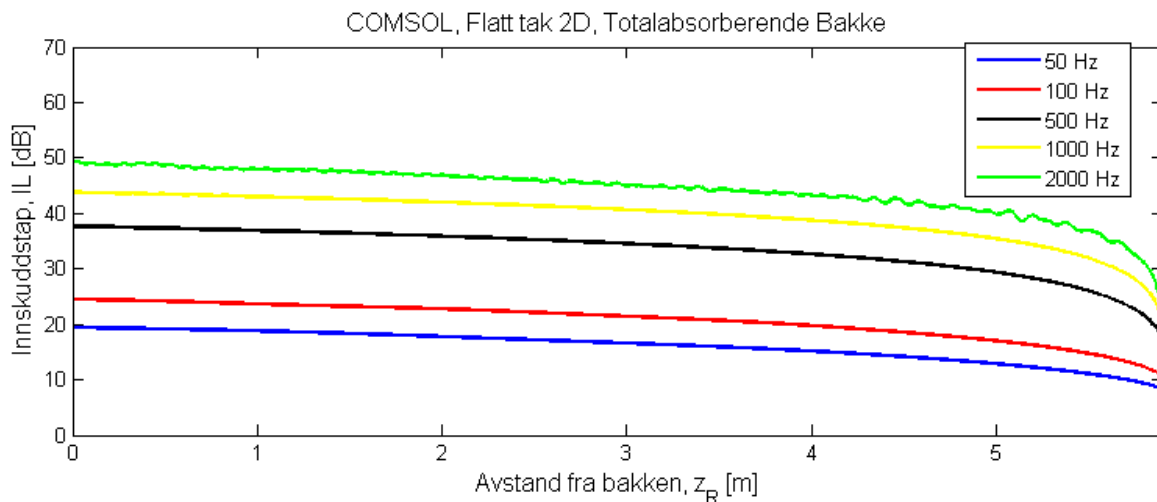
I det forrige avsnittet kunne det bli observert at innskuddstapet varierte med mottakerens posisjon, og på bakgrunn av dette vil det i dette avsnittet bli undersøkt i detalj hvordan innskuddstapet varierer dersom de ulike avstandene vist i figur 4.1 varieres. Det ble først gjort en undersøkelse om hvor mye mottakerens avstand fra veggen, y_R , har å si for innskuddstapet. Det ble i ved hjelp av EDBtoolbox beregnet innskuddstap langs 100 punkter med ulike avstander fra veggen på mellom 0,001 m til 5,0 m. Disse punktene har samme høyde høyde på $z_R = 2,95$ m over bakken, som er midt på veggen. Figur 4.8 på neste side viser disse beregningene for bygningen med flatt tak.



Figur 4.8: Innskuddstap som funksjon av mottakeravstand fra bakfasade til en modell av en bygning med flatt tak. Beregnet for ulike frekvenser med EDBtoolbox.

Det kan fra denne figuren observeres at dette resulterer i tilnærmet rette linjer for alle de undersøkte frekvensene, der innskuddstapet minker med økende avstand fra veggen for alle frekvenser. Forskjellene mellom innskuddstapet 0,001 m fra veggen og 5,0 m fra veggen er funnet til å øke med frekvens, som impliserer at avstanden fra veggen har en større betydning for de høyeste frekvensene. For 50 Hz er differansen i innskuddstapet mellom 0,001 m fra veggen og 5,0 m fra veggen beregnet til å være +2,7 dB. For 2 kHz er den samme differansen beregnet til å være +4,5 dB, som også er den frekvensen med størst differanse. Mottakerposisjonene i COMSOL og i EDBtoolbox er beregnet for avstander y_R på henholdsvis 0,0 m og 0,0742 m fra veggen, noe som i følge figur 4.8 vil medføre så små differanser i innskuddstap at det kan neglisjeres. Det må presiseres at dette kun gjelder den todimensjonale bygningsmodellen.

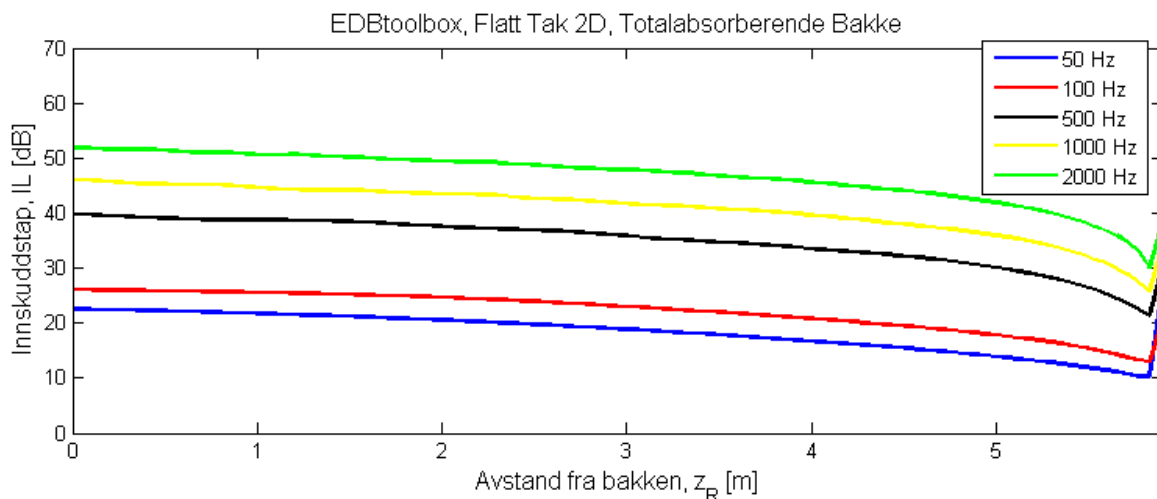
Figur 4.9 på neste side viser innskuddstapet fra COMSOL for ulike punkter oppover langs veggen på baksiden av bygningen med flatt tak, der kun avstanden z_R varieres. y_R er her 0,0 m.



Figur 4.9: Innskuddstap som funksjon av avstand langs bakfasade til en modell av en bygning med flatt tak. Beregnet i COMSOL for ulike frekvenser.

Ser fra denne figuren at innskuddstapet reduseres med økende avstand z_R fra bakken for alle frekvenser. For verdier av z_R større enn 5 m er reduksjonen av innskuddstapet raskest og denne krumningen på kurven er noe større for de høyeste frekvensene enn for de lave.

Figur 4.10 viser det samme tilfellet, men her er beregningene gjort med EDBtoolbox. Her er mottakerposisjonene plassert $y_R = 0,0742$ m fra bakre fasade, i motsetning til 0,0 m i COMSOL.

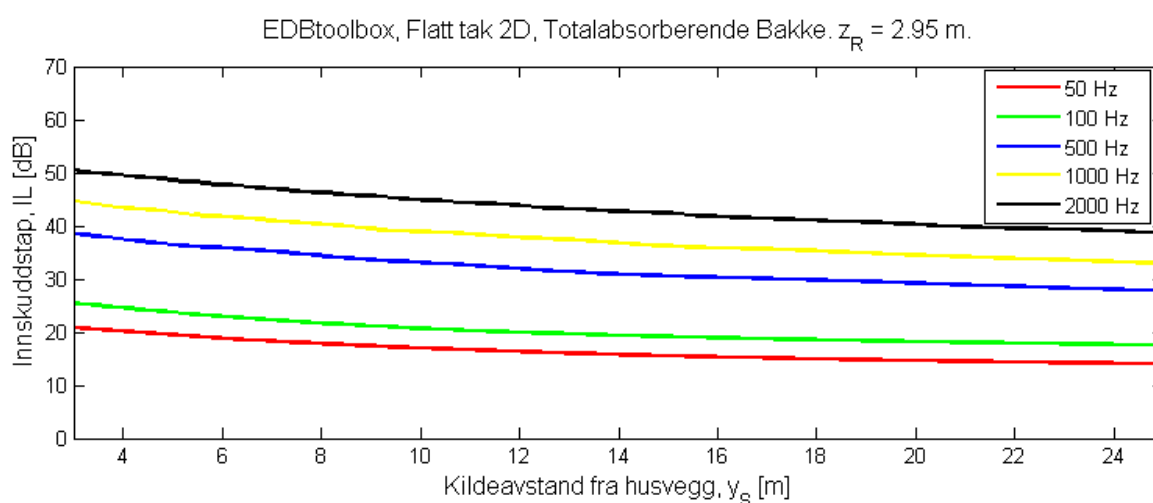


Figur 4.10: Innskuddstap som funksjon av avstand langs bakfasade til en modell av en bygning med flatt tak. Beregnet med EDBtoolbox for ulike frekvenser.

Det går fram av denne figuren at disse kurvene har tilvarende former som beregningene i COMSOL. Det observeres også her at alle linjene her ligger konsekvent noe høyere enn linjene beregnet i COMSOL. Differansen i innskuddstap mellom de to metodene er lavest for de største avstandene fra bakken, og differansene øker jo nærmere man kommer bakken for de fleste frekvensene. Dette kan studeres i figur A.6 i vedlegget som viser differansen

mellom innskuddstapet for de to metodene. Punktet $z_R = 0,0$ m fra bakken gir det største avviket i innskuddstapet som ble funnet til å være 3,7 dB ved 2 kHz. For et punkt 5,65 m fra bakken er det største avviket i innskuddstapet 1,5 dB som også inntreffer ved 2 kHz. Innskuddstapet for EDBtoolbox får en bratt økning for avstander større enn ca 5,8 m fra bakken, noe som ikke skjer for tilsvarende kurver fra COMSOL.

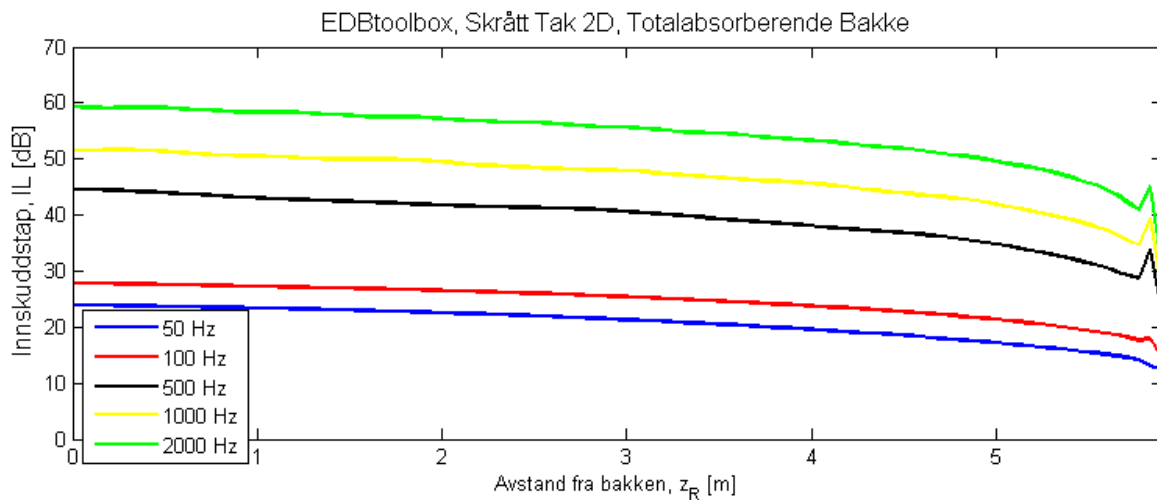
Et annet tilfelle som ble undersøkt er hvordan innskuddstapet endrer seg dersom kildens avstand fra bygningen med flatt tak varieres, der resultatet er presentert i figur 4.11. Dette ble undersøkt ved hjelp av EDBtoolbox, der mottakerposisjonen var stasjonært plassert $y_R = 0,001$ m fra den bakre veggen og $z_R = 2,95$ m over bakken. Kilden S hadde varierende avstander y_S mellom 3 m til 25 m unna denne veggen. Kildens høyde over bakken var 0,55 m for alle posisjonene



Figur 4.11: Innskuddstap som funksjon av kildeavstand fra vegg beregnet med EDBtoolbox for en modell av en bygning med flatt tak.

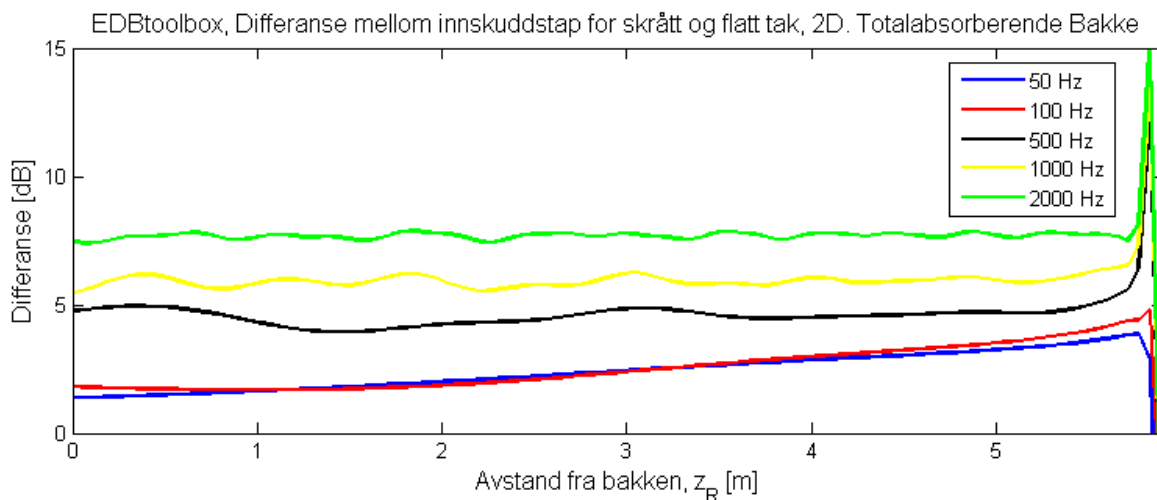
Fra denne figuren observeres det at innskuddstapet i mottakerposisjonen reduseres når kildens avstand y_S fra forsiden av bygningen øker. Denne reduksjonen med økende avstand er større for høyere frekvenser enn for lave. For den høyeste frekvensen som er undersøkt, 2 kHz, blir innskuddstapet redusert med 11,8 dB dersom kilden flyttes fra 3 m til 25 m fra veggen på forsiden av bygningen. For 50 Hz er det kun en reduksjon på 6,8 dB dersom kilden flyttes på tilsvarende måte.

Mange bygninger er også konstruert med skrått tak, og det er derfor også undersøkt hvordan innskuddstapet endrer seg som funksjon av avstanden z_R for en bygning med skrått tak. Innskuddstapet er blitt beregnet ved hjelp av EDBtoolbox er presentert i figur 4.12 på neste side.



Figur 4.12: Innskuddstap som funksjon av avstand langs bakfasade til en modell av en bygning med skrått tak. Beregnet med EDBtoolbox for ulike frekvenser.

Innskuddstapet for bygningen med skrått tak reduseres dersom avstanden z_R økes på tilsvarende måte som for bygningen med flatt tak i figuren 4.10. For å undersøke forskjellene mellom innskuddstapet for skrått og flatt tak er differansen mellom disse presentert i figuren under. Her er innskuddstapet for flatt tak er trukket fra innskuddstapet for skrått tak:



Figur 4.13: Differanse for innskuddstap mellom skrått tak og flatt tak. Differanse som funksjon av avstand langs bakfasade til en modell av en bygning. Beregnet med EDBtoolbox for ulike frekvenser.

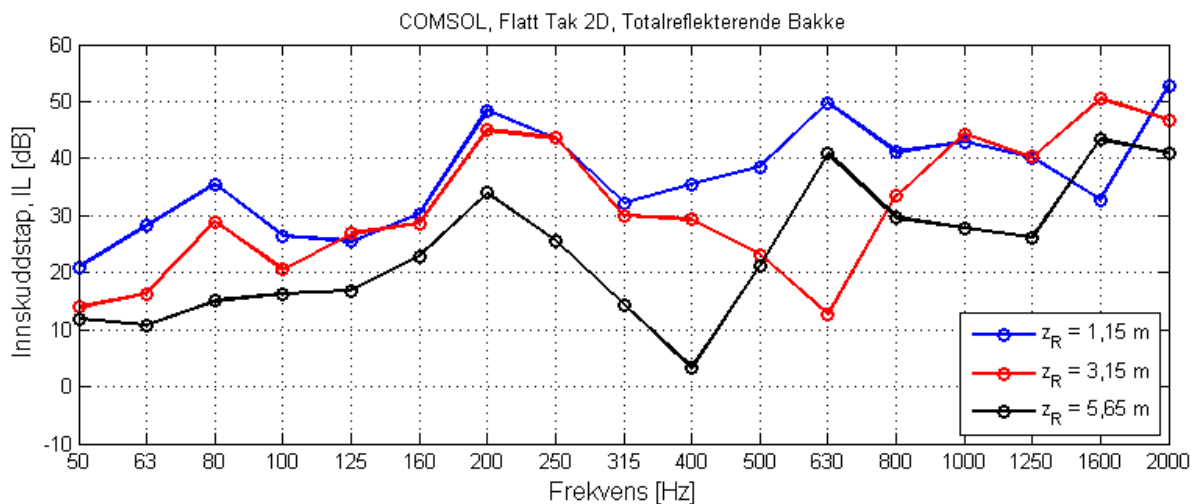
Det observeres fra denne differansen at bygningen med skrått tak gir et konsekvent høyere innskuddstap enn flatt tak for alle posisjoner og frekvenser. Forskjellene mellom flatt og skrått tak øker også med frekvens, og innskuddstapet for skrått tak ligger mellom 1,4 dB og 7,9 dB over tilfellet med flatt tak. For de laveste frekvensene 50 Hz og 100 Hz kommer det også frem at differansene mellom innskuddstapet øker dersom z_R øker. Differansene for $z_R \geq 5,8$ m er mye større, men dette skyldes beregningsmetodene i EDBtoolbox som vil bli diskutert i kapittel 5.

Tilsvarende beregninger av innskuddstapet for bygningen med skrått tak er utført med COMSOL er vist i figur A.7 i vedlegget, der det kan observeres at beregningene i COMSOL konsekvent gir et lavere innskuddstap som differansen i figur A.8 tydelig viser.

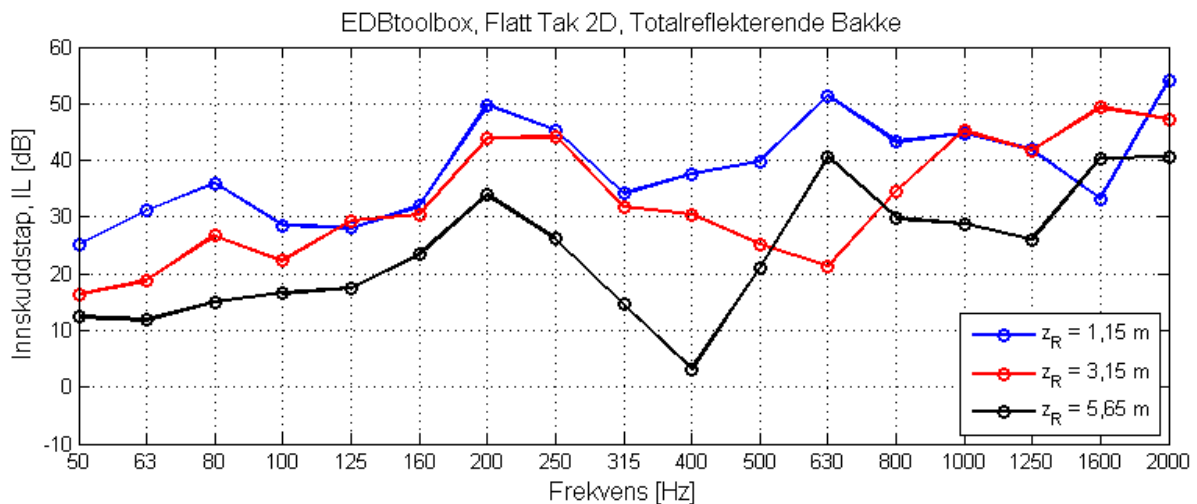
4.1.3 Frekvensavhengighet for innskuddstap, reflekterende bakke rundt bygning

Tidligere i dette kapittelet har det kun vært presentert resultater for bygningsmodeller som er plassert på et totalabsorberende underlag for å kunne isolere den diffrakterte lyden rundt bygningen fra andre refleksjoner. Det er i dette avsnittet valgt å gjøre tilsvarende beregninger for en bygningsmodell med flatt tak plassert på et totalreflekterende underlag. Dette for å gi en pekepinn på hvor mye innskuddstapet maksimalt kan bli endret grunnet refleksjoner fra bakken. I praktiske tilfeller har underlaget bygningen er plassert på en refleksjonsfaktor som ligger et sted mellom disse to ytterpunktene.

Frekvensavhengigheten til innskuddstapet er først undersøkt for tre punkter med ulik avstand z_R fra bakken ved bakfasaden til bygningen med flatt tak. Som i avsnitt 4.1.1 er dette utført i både COMSOL og med EDBtoolbox, og dette resulterer i de to figurene under:

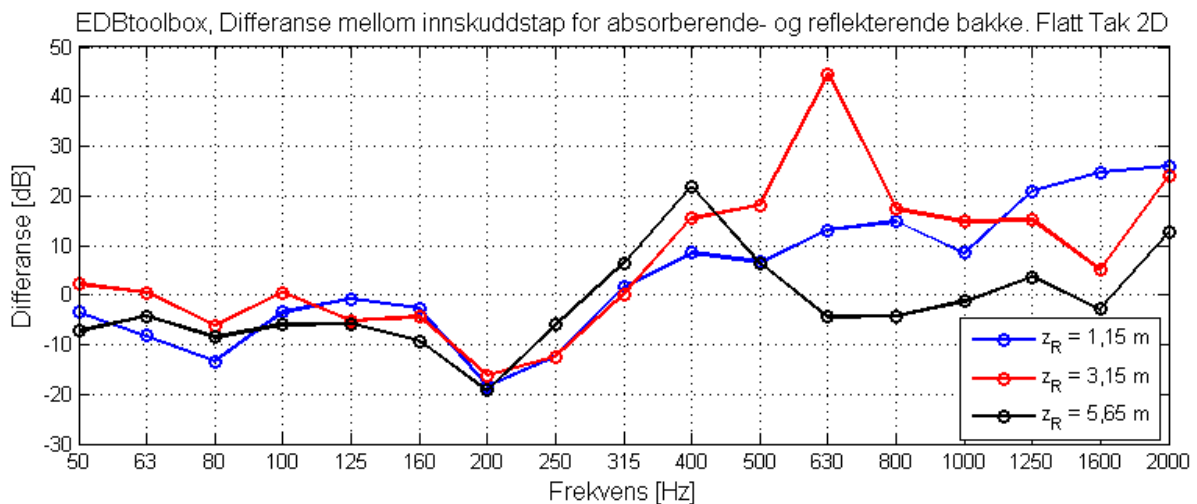


Figur 4.14: Innskuddstap som funksjon av frekvens for tre punkter på bakfasaden av en bygning med flatt tak plassert på en reflekterende flate. Beregnet i COMSOL.



Figur 4.15: Innskuddstap som funksjon av frekvens for tre punkter på bakfasaden av en bygning med flatt tak plassert på en totalreflekterende flate. Beregnet med EDBtoolbox.

De to metodene gir meget like frekvensresponsen med kun noen små avvik. Responsene i dette tilfellet har ikke en jevn økning med frekvens som bygningen plassert på en totalabsorberende bakke. For å kunne studere hvordan innskuddstapet for bygningsmodellen med flatt tak blir påvirket av den reflekterende bakken, er differansen mellom kurvene for absorberende bakke i figur 4.10 og kurvene for reflekterende bakke i figur 4.15 beregnet. Disse differansene er presentert i figuren under, der innskuddstapet med absorberende bakke er benyttet som referanse:



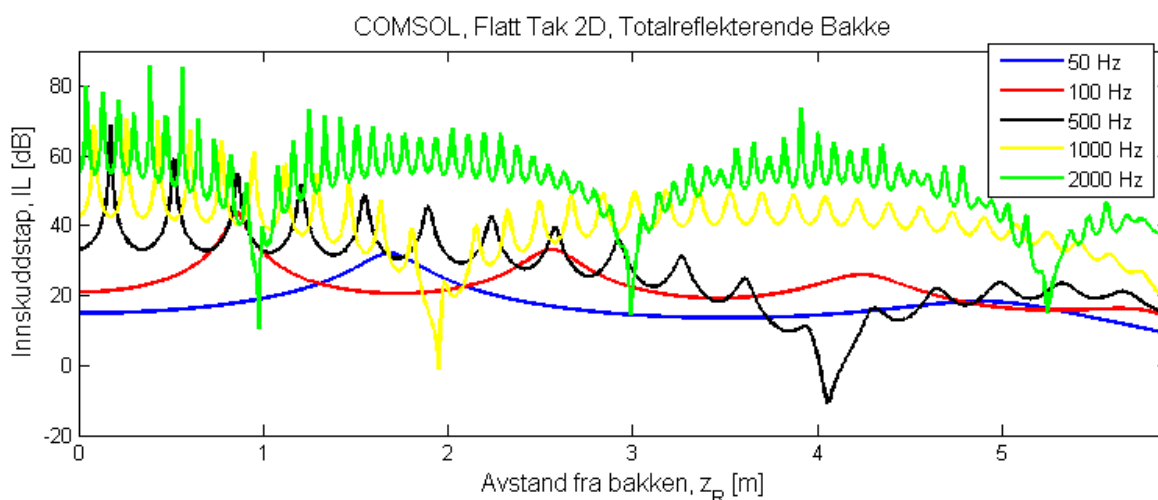
Figur 4.16: Differanse mellom absorberende og reflekterende bakke for innskuddstap som funksjon av frekvens. Beregnet for tre punkter på bakfasaden av en todimensjonal bygning med flatt tak. Beregnet med EDBtoolbox.

For frekvenser under ca 315 Hz går det fram fra denne figuren at tilfellet med den reflekterende bakken gir generelt et lavere innskuddstap i alle mottakerposisjoner enn tilfellet med den absorberende bakken, da differansen i figuren er negativ i dette området. For frekvenser

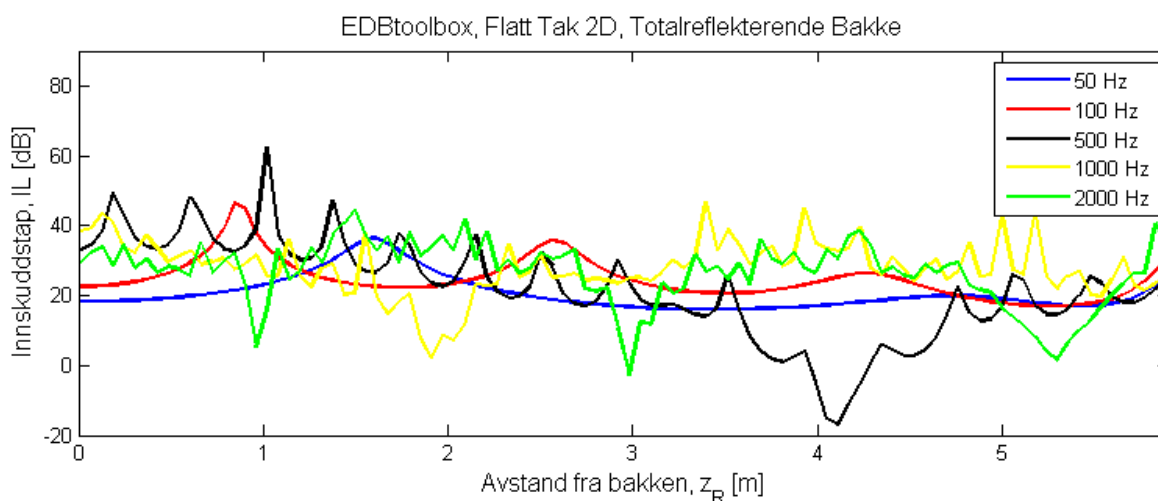
høyere enn denne skaper det totalreflekterende underlaget større forskjeller fra det absorberende tilfellet. Disse forskjellene varierer mye med frekvens, og grunnet positiv differanse ser man at den reflekterende bakken gir generelt et noe lavere innskuddstap.

4.1.4 Avstandsavhengighet for innskuddstap, reflekterende bakke rundt bygning

Det ble gjort beregninger av innskuddstapet for bygningsmodellen med flatt tak er avstanden z_R varieres, der det i dette tilfellet var benyttet et totalreflekterende underlag. Dette resulterte i figurene 4.17 og 4.18.

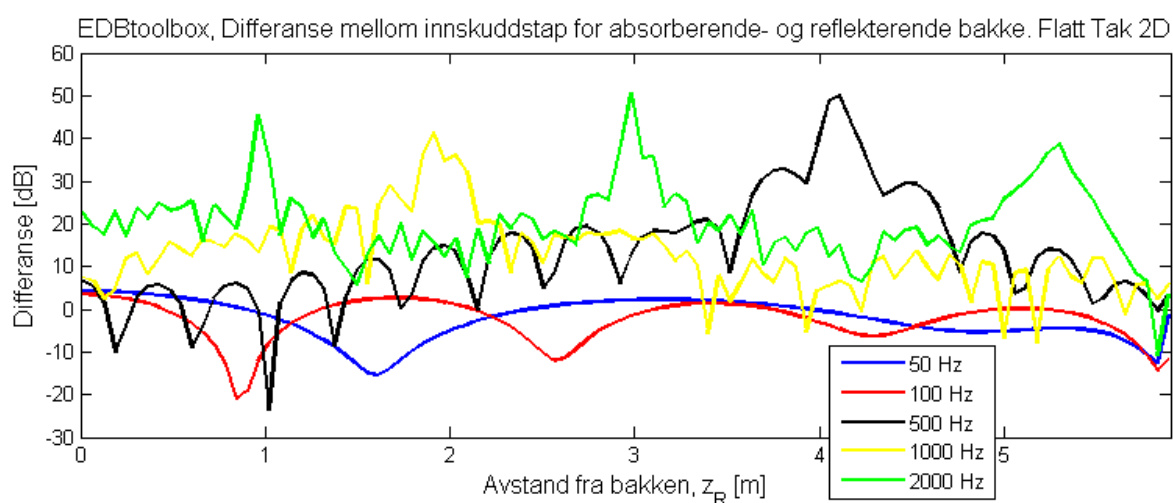


Figur 4.17: Innskuddstap som funksjon av avstand langs bakfasade til en modell av en bygning med flatt tak plassert på en totalreflekterende flate. Beregnet for ulike frekvenser i COMSOL.



Figur 4.18: Innskuddstap som funksjon av avstand langs bakfasade til en modell av en bygning med flatt tak plassert på en totalreflekterende flate. Beregnet for ulike frekvenser med EDBtoolbox.

Som observert i forrige avsnitt har det totalreflekterende underlaget stor innvirkning på innskuddstapet. Kurvene er ikke lenger er glatte og avtar ikke tydelig med økende avstand fra bakken. Innskuddstapet varierer mye fra et punkt til et annet, og hyppigheten til variasjoner øker med frekvensen. Ser at det er noen forskjeller mellom resultatene fra COMSOL og resultatene fra EDBtoolbox, og at forskjellene for de høyeste frekvensene 1 kHz til 2 kHz er størst. For måleposisjonene rundt 4 m over bakken har innskuddstapet for 500 Hz negative verdier, noe som impliserer at det forekommer høyere lydtrykksnivåer i disse punktene dersom bygningen er der enn om den ikke er der. Det er altså en forsterkning av lydtrykksnivået i disse punktene for denne frekvensen dersom bakken er totalreflekterende. Differansene mellom innskuddstapene for absorberende og reflekterende bakke for bygningsmodell med flatt tak er presentert i figuren under, og er beregnet med resultatene fra EDBtoolbox. Her er differansen beregnet som $IL_{\text{absorberende}} - IL_{\text{reflekterende}}$.



Figur 4.19: Differanse mellom absorberende og reflekterende bakke for innskuddstap som funksjon av avstand z_R . Beregnet med EDBtoolbox for en todimensjonal bygning med flatt tak.

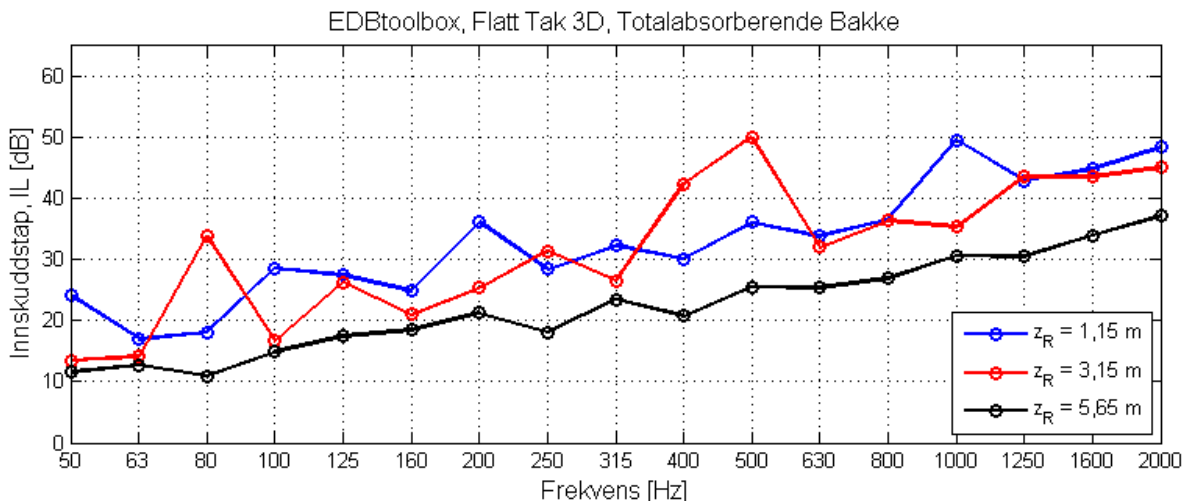
Figuren viser at differansene for de høyere frekvensene har en positiv verdi, noe som impliserer at det reflekterende underlaget gir et lavere innskuddstap enn det absorberende underlaget. Det er lavest differanse mellom for de laveste frekvensene. Det er også store variasjoner i kurvene langs de ulike mottakerposisjonene, grunnet formen til kurvene for det totalreflekterende tilfellet.

4.2 Tredimensjonal modell av bygning

Etter å ha gjort undersøkelser av innskuddstapet ved den bakre fasaden i to dimensjoner, ble tilsvarende undersøkelser gjort for en bygningsmodell i tre dimensjoner. I det tredimensjonale tilfellet er også lyden som brer seg rundt sidene av bygningen inkludert. Beregningene i dette avsnittet ble gjort ved hjelp av verktøykassen EDBtoolbox i MATLAB.

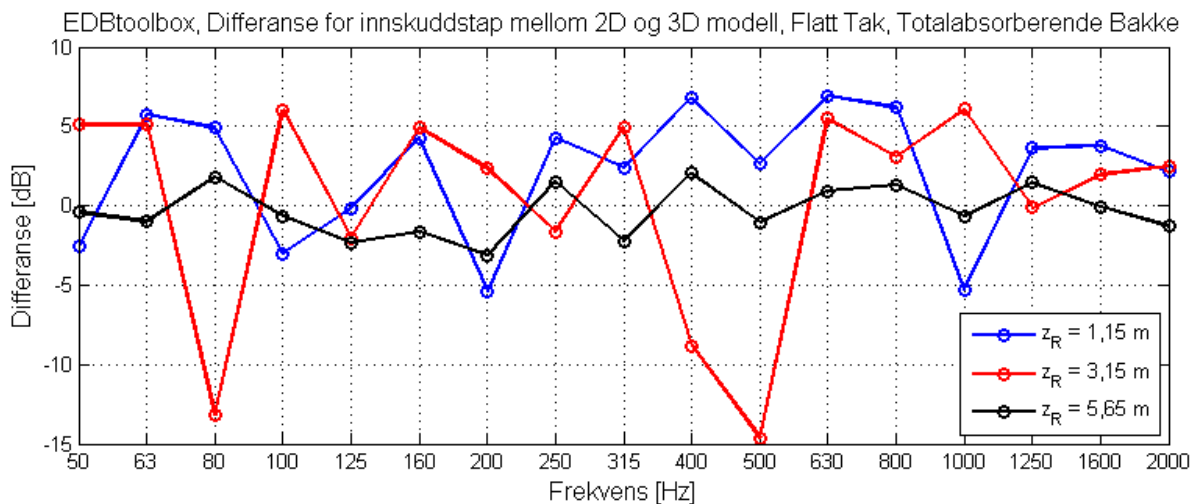
4.2.1 Frekvensavhengighet for innskuddstap, absorberende bakke rundt bygning

I dette avsnittet er innskuddstapet for bygningsmodellen plassert på en totalabsorberende bakke undersøkt som en funksjon av frekvens. Dette tilfellet ble først undersøkt for enkeltfrekvenser med EDBtoolbox og er presentert i figuren under:



Figur 4.20: Innskuddstap som funksjon av frekvens beregnet med EDBtoolbox for tre punkter på bakfasade til en modell av en bygning med flatt tak.

Ser at innskuddstapet i dette tilfellet ikke øker like jevnt i frekvens som tilsvarende beregning i to dimensjoner, men at det også her generelt er et høyere innskuddstap for høyere frekvenser enn for lavere frekvenser. Det går også frem av figuren at det er mindre variasjoner på frekvenskurven for punktet nærmest kanten på bygningens tak, der $z_R = 5,65$ m. Innskuddstapet i dette tredimensjonale tilfellet for de tre punktene ligger mellom ca 10 dB og 50 dB for alle frekvenser, som også er tilfellet for det todimensjonale tilfellet i figur 4.4. For å enklere kunne betrakte forskjellene mellom det todimensjonale og det tredimensjonale tilfellet er differansene mellom frekvensresponsene til innskuddstapet beregnet og presentert i figur 4.21 på neste side. Her er differansen beregnet som $IL_{2D} - IL_{3D}$.

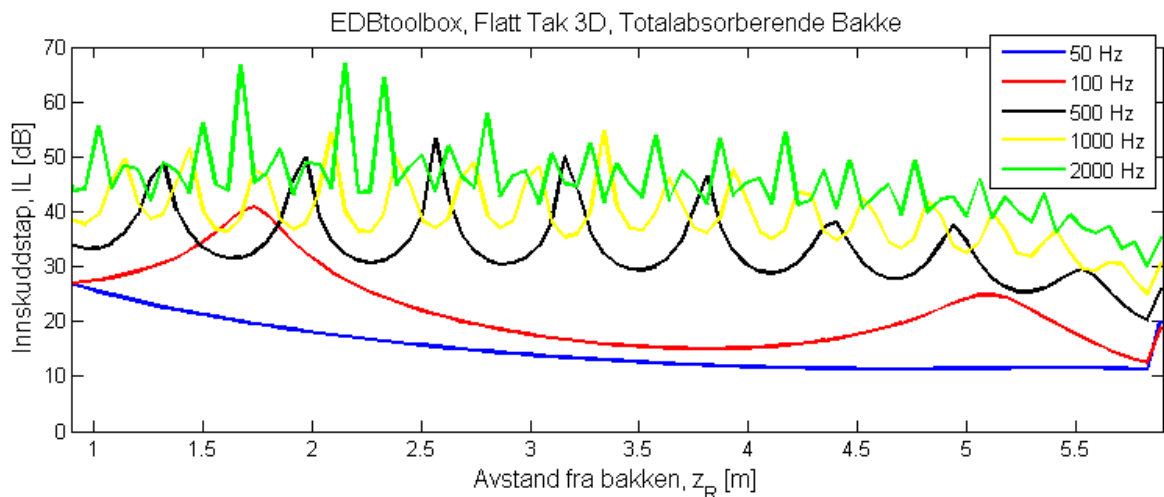


Figur 4.21: Differanse mellom innskuddstap for todimensjonal og tredimensjonal modell som funksjon av frekvens. Beregnet med EDBtoolbox for tre punkter på bakfasade til en modell av en bygning med flatt tak, plassert på absorberende underlag.

Ser av denne figuren at differansene generelt ligger innenfor ± 5 dB med noen unntak, og at det er hyppige variasjoner mellom de ulike frekvensene. Frekvensresponsen i punktet der $z_R = 5,65$ m er det minst variasjoner langs kurven, som viser at det for punkter nærmest taket er minst forskjell i innskuddstapet mellom det to og tredimensjonal tilfellet.

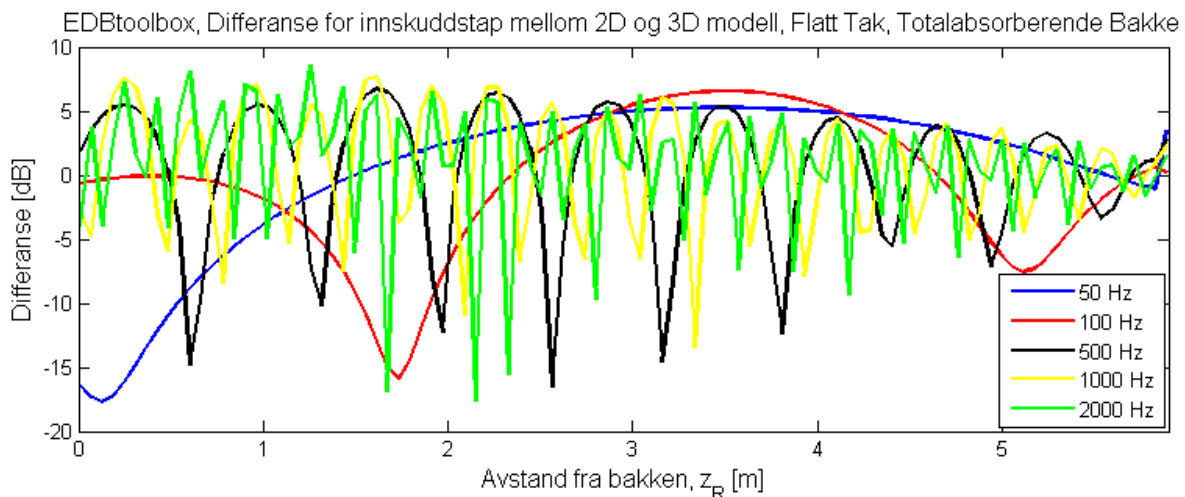
4.2.2 Avstandsavhengighet for innskuddstap, absorberende bakke rundt bygning

Det ble i det tredimensjonale tilfellet også utført de samme beregningene av innskuddstap med varierende avstander z_R som i det todimensjonale tilfellet i avsnitt 4.1. Beregningene utført ved hjelp av EDBtoolbox er presentert i figur 4.22 på neste side.



Figur 4.22: Innskuddstap som funksjon av avstand fra bakken langs bakfasade til en modell av en bygning med flatt tak. Beregnet for ulike frekvenser med EDBtoolbox.

Ser av figuren over at innskuddstapet for den tredimensjonale modellen også reduseres noe med økende avstander z_R fra bakken. Innskuddstapet er også her lavere jo nærmere en kommer kanten på taket. Kurvene i dette tilfellet har store variasjoner med toppe som forekommer med en tilsynelatende periodisitet, der det er hurtigere variasjoner for de høyere frekvensene enn for de lavere. Differansen mellom innskuddstapene som funksjon av z_R for det todimensjonale og det tredimensjonale tilfellet er vist i figur 4.23. Her er differansen beregnet som $IL_{2D} - IL_{3D}$.

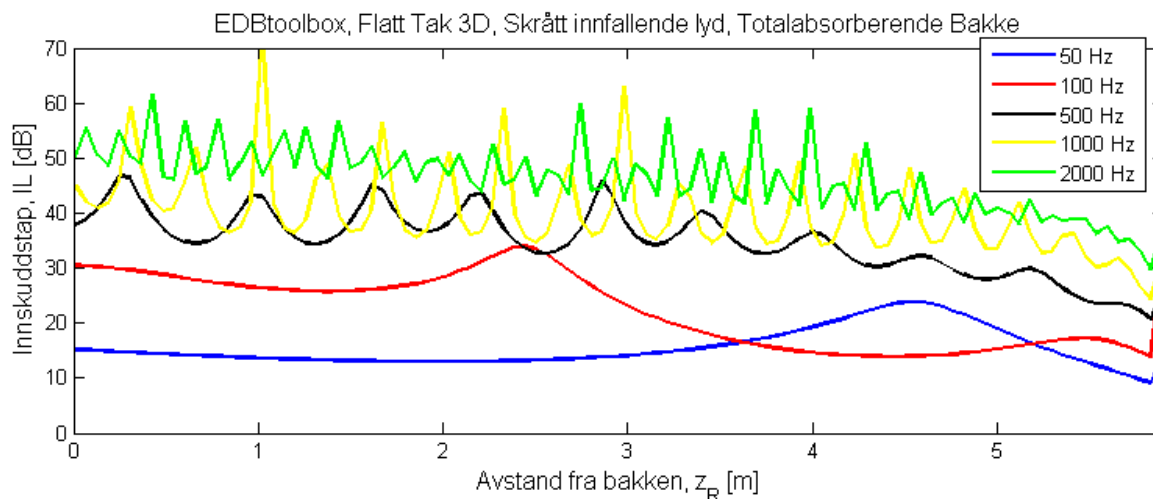


Figur 4.23: Differanse mellom innskuddstap for todimensjonal og tredimensjonal modell som funksjon av avstand z_R . Beregnet med EDBtoolbox for en modell av en bygning med flatt tak, plassert på absorberende underlag.

Observerer at differansen er minst for de høyeste verdiene av z_R , og at det er hyppige periodiske variasjoner langs kurvene som kan relateres til formen på kurvene for innskuddstapet

i figur 4.22. Differansene for de undersøkte frekvensene ligger i området mellom -17,7 dB og 8,6 dB for alle mottakerposisjoner.

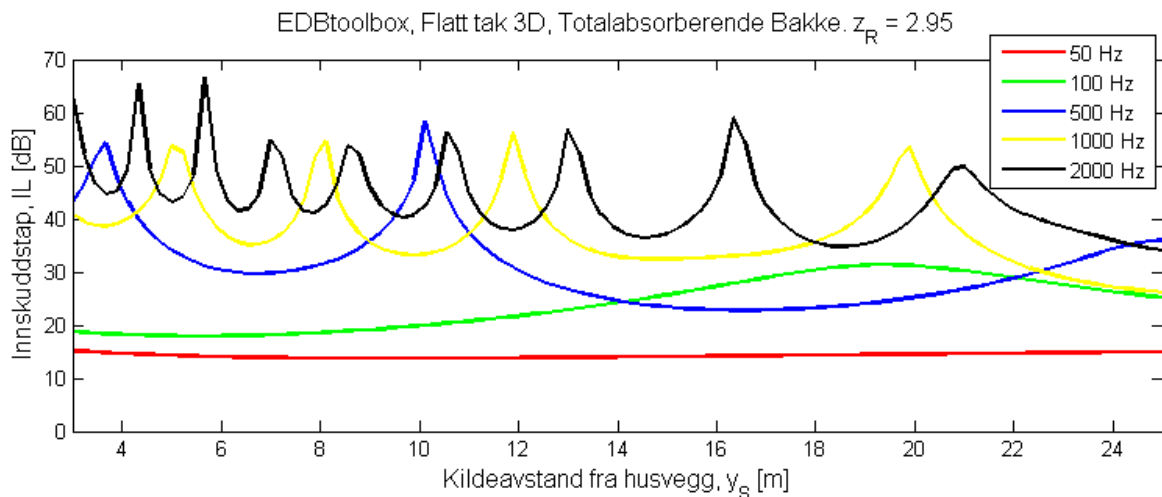
Innskuddstapet ble deretter beregnet med EDBtoolbox som funksjon av z_R , der mottakerens avstand fra midten av bygningen var $x_R = 4$ m slik at kilde og mottaker står skrått i forhold til bygningen. Figur 4.24 viser dette resultatet.



Figur 4.24: Innskuddstap som funksjon av avstand langs bakfasade til en modell av en bygning med flatt tak, der kilde og mottaker ikke er plassert på linje. Beregnet med EDBtoolbox for ulike frekvenser.

Disse beregningene med skrått innfallende lyd ble utført for å undersøke hvilken forskjell dette utgjør på innskuddstapet, med hovedfokus på om de periodiske toppene på kurvene som ble observert i det tredimensjonale tilfellet flyttes eller endres. Fra figuren går det tydelig frem at toppene på de ulike kurvene har lignende periodisitet som i figur 4.22, men at de er forflyttet. Formen på disse toppene har også blitt endret noe i formen.

Til slutt i dette avsnittet presenteres innskuddstapet i et fast punkt på bygningsmodellens bakfasade i figur 4.25 på neste side, der kildens avstand fra veggen på forsiden av bygningen y_S varieres. Dette er utført på tilsvarende måte som i det todimensjonale tilfellet.

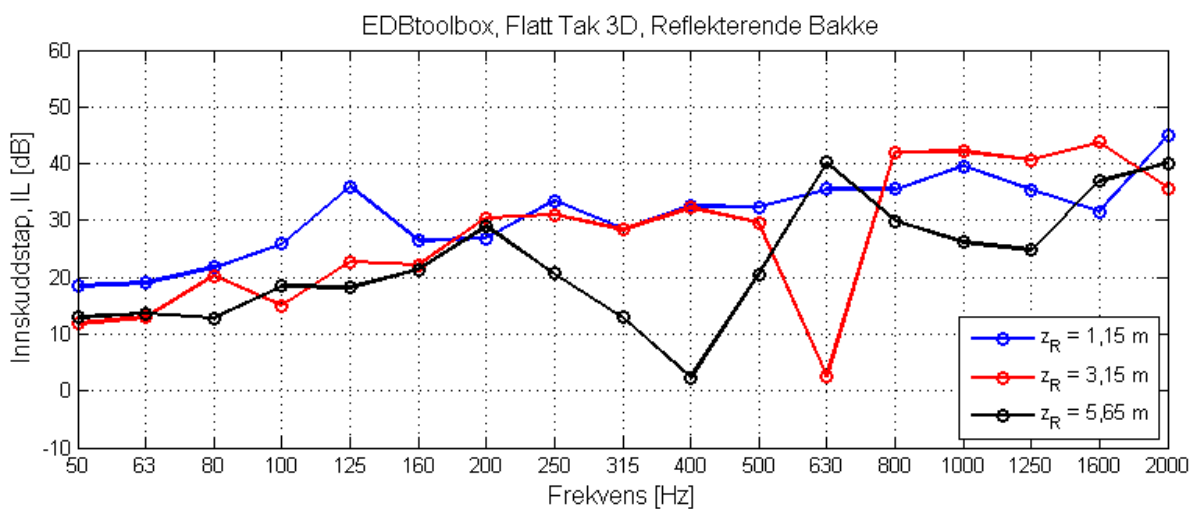


Figur 4.25: Innskuddstap som funksjon av kildeavstand fra vegg for en modell av en bygning med flatt tak. Beregnet med EDBtoolbox for ulike frekvenser.

Her har også innskuddstapet store variasjoner mellom de ulike kildeposisjonene som avviker fra resultatet for den todimensjonale bygningsmodellen.

4.2.3 Frekvensavhengighet for innskuddstap, reflekterende bakke rundt bygning

Det siste som ble undersøkt i denne studien var innskuddstapet for en tredimensjonal bygningsmodell med flatt tak plassert på en totalreflekterende bakke. Beregningene er utført med EDBtoolbox og frekvensresponsen til innskuddstapet i punktene er vist i figur 4.26 for de tre punktene med forskjellig høyder z_R .

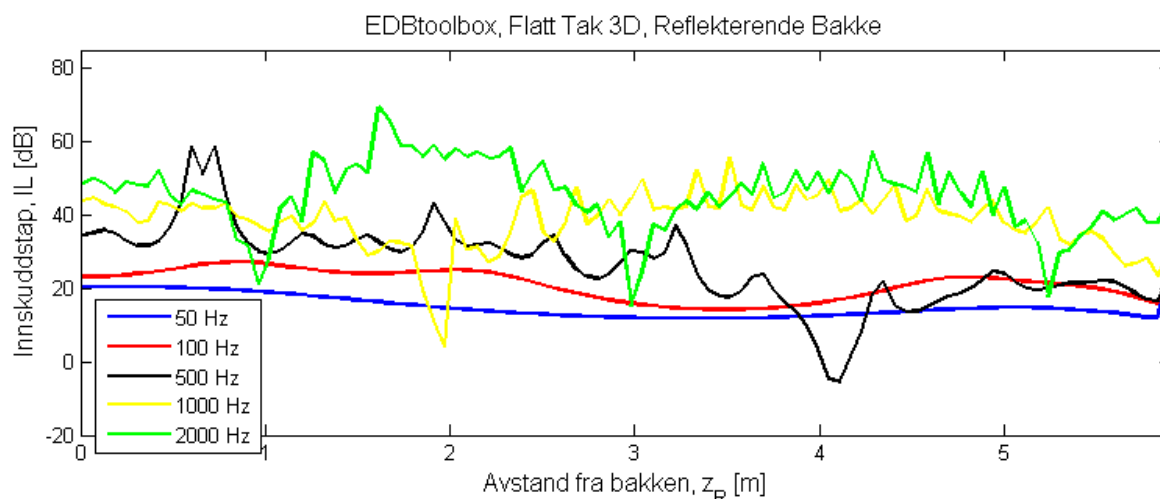


Figur 4.26: Innskuddstap som funksjon av frekvens for tre punkter på bakfasaden av en bygning med flatt tak plassert på en totalreflekterende flate. Beregnet med EDBtoolbox.

Fra denne figuren kan det observeres at innskuddstapet for alle mottakerposisjonene øker med frekvens, noe som ikke var så tydelig for den todimensjonale tilfellet i figur 4.15. Som for den todimensjonale modellen med reflekterende bakke i figur 4.15 er det her to spesielt tydelige bunnpunkter på kurvene. Disse inntreffer ved 400 Hz for punktet 5,65 m over bakken, og for 630 Hz i punktet 3,15 m over bakken.

4.2.4 Avstandsavhengighet for innskuddstap, reflekterende bakke rundt bygning

Innskuddstapet som funksjon av z_R for bygningsmodellen med flatt tak plassert på en totalreflekterende bakke ble også undersøkt. Disse beregningene er som tidligere utført for en stasjonær kilde ved hjelp av EDBtoolbox. Figur 4.27 viser resultatet fra disse beregningene.



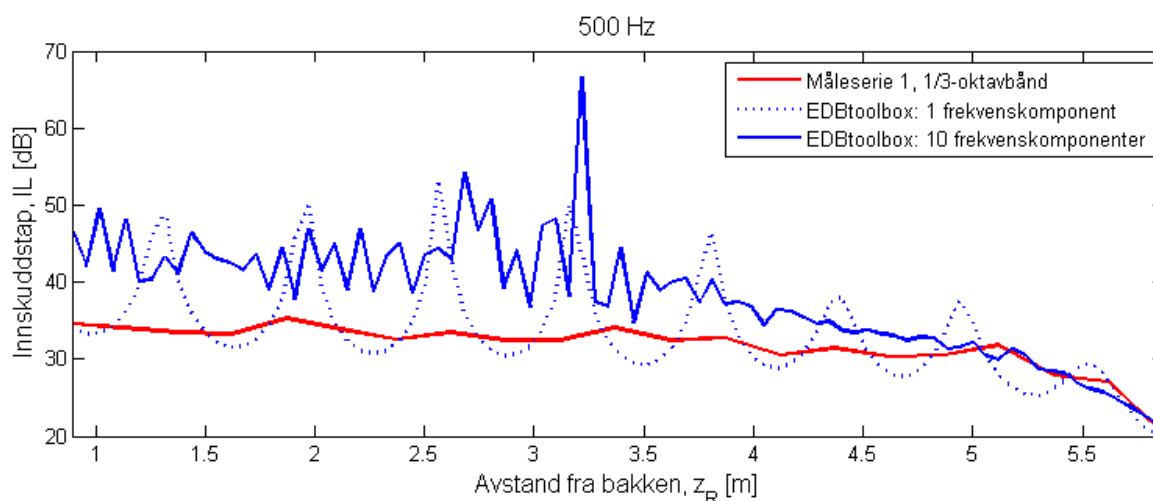
Figur 4.27: Innskuddstap som funksjon av avstand fra bakken langs bakfasade til en modell av en bygning med flatt tak. Beregnet med EDBtoolbox med bygning på totalreflekterende flate.

Dette resultatet har ikke uventet likheter med både tilfellet med tredimensjonal bygning og absorberende bakke, og tilfellet med todimensjonal bygning med reflekterende bakke. Likt for alle tilfellene er at frekvenskurvene har store variasjoner mellom de ulike mottakerposisjonene. Dette tilfellet skiller seg ut fra tidligere resultater ved at disse kurvene ikke har like tydelige periodiske variasjoner, og at det kommer tydeligere frem at innskuddstapet øker med frekvens.

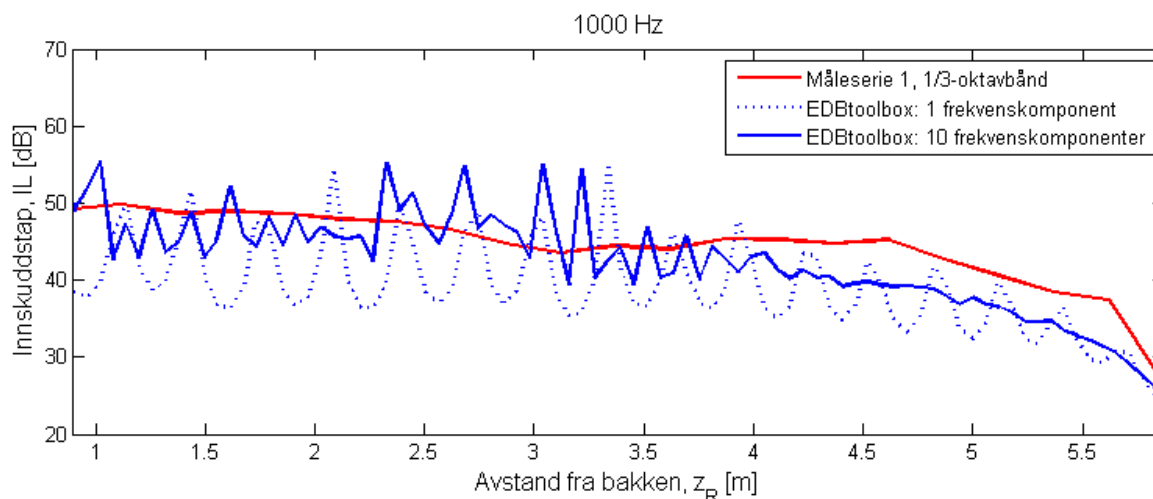
4.2.5 Enkeltfrekvenser sammenlignet med 1/3-oktavgbånd

Resultatene fra simuleringene ble som nevnt tidligere kun beregnet for enkeltfrekvenser. Disse simulerte kurvene for innskuddstapet har vist seg å ha store variasjoner mellom de ulike frekvensene og måleposisjonene dersom en inkluderer refleksjoner eller flere lydster.

De målte resultatene ble beregnet for 1/3-oktavbåndsverdier. Dette ga kurver uten så store variasjoner. Det gjøres derfor en antakelse om at dersom en tar middelveiden til innskuddstapet for et antall enkeltfrekvenser innefor et område som tilsvarer et oktavbånd, kan det da fås en approksimasjon til oktavbåndsverdiene der variasjonene reduseres. For å undersøke denne antakelsen ble det gjort beregninger med EDBtoolbox for 10 enkeltfrekvenser innefor 1/3-oktavbåndene med senterfrekvensene 500 Hz og 1000 Hz. Det ble deretter tatt middelveidi på energiform av innskuddstapet for disse frekvensene.



Figur 4.28: Innskuddstap som funksjon av avstand fra bakken for bygning med flatt tak. Sammenligning mellom beregninger med EDBtoolbox og måleserie 1 for 500 Hz.



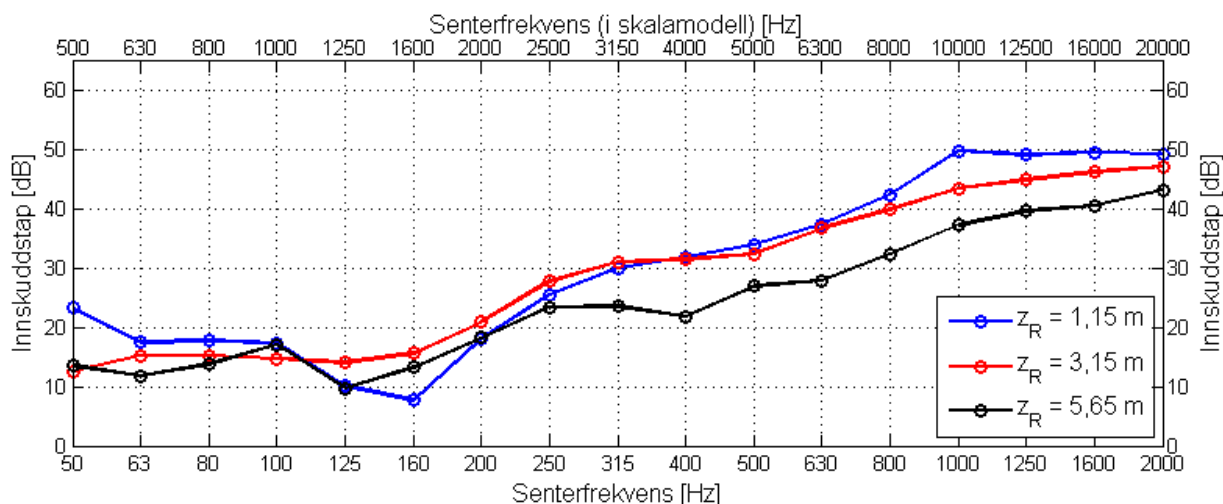
Figur 4.29: Innskuddstap som funksjon av avstand fra bakken for bygning med flatt tak. Sammenligning mellom beregninger med EDBtoolbox og måleserie 1 for 1000 Hz.

Figur 4.28 viser en sammenligning mellom de målte og simulerte kurvene for innskuddstapet som funksjon av mottakeravstand z_R . De simulerte innskuddstapene er plottet både som en enkeltfrekvens med verdien 500 Hz, og som en middelveidi av 10 enkeltfrekvenser innefor 1/3-oktavbåndet med tilsvarende senterfrekvens. Disse 10 frekvenskomponentene er

valgt med en lineær avstand innenfor frekvensintervallet mellom 446 Hz og 560 Hz, som er grensefrekvensene til dette oktavbåndet. Figur 4.29 viser samme type beregninger utført for 1 kHz båndet, der de 10 frekvensene er i frekvensintervallet 892 Hz til 1121 Hz. Det ser ut til at en midling av flere frekvenskomponenter gir glattere kurver som ligner mer på kurvene med 1/3-oktavbåndsverdier, og at det ved en slik midling vil være en reduksjon av de hyppige variasjonene på kurven.

4.3 Målinger i skalamodell

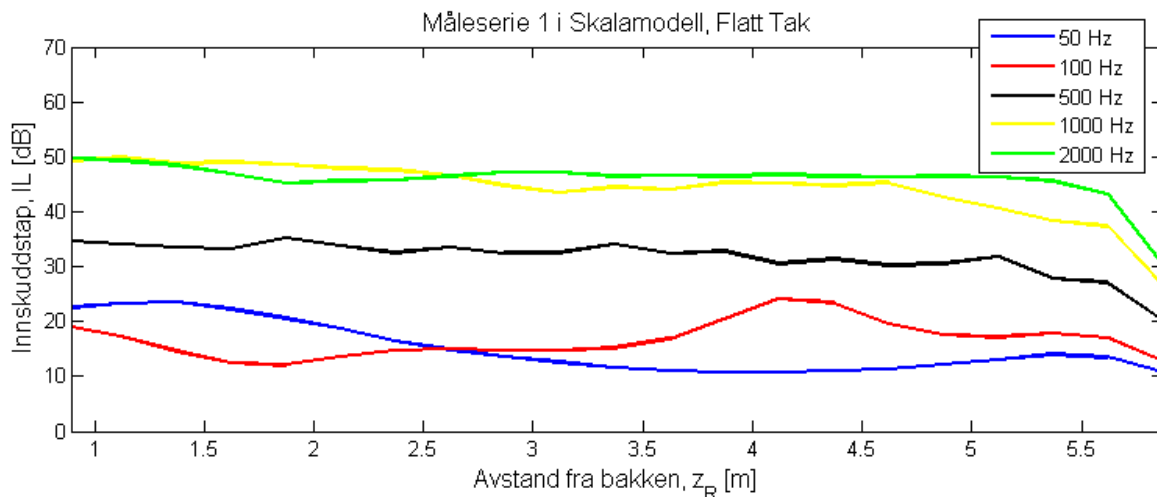
Innskuddstapet for tilsvarende bygningsmodell som den benyttet til de tredimensjonale beregningene ble målt i skalamodellen, der resultatet er presentert som funksjon av frekvens i figur 4.30. Merk at disse praktiske resultatene er oppgitt i 1/3-oktavbånd, som gjør at de ikke er direkte sammenlignbare med de simulerte resultatene i figur 4.20.



Figur 4.30: Innskuddstap som funksjon av frekvens målt i skalamodell for tre punkter på bakfasade til en modell av en bygning med flatt tak.

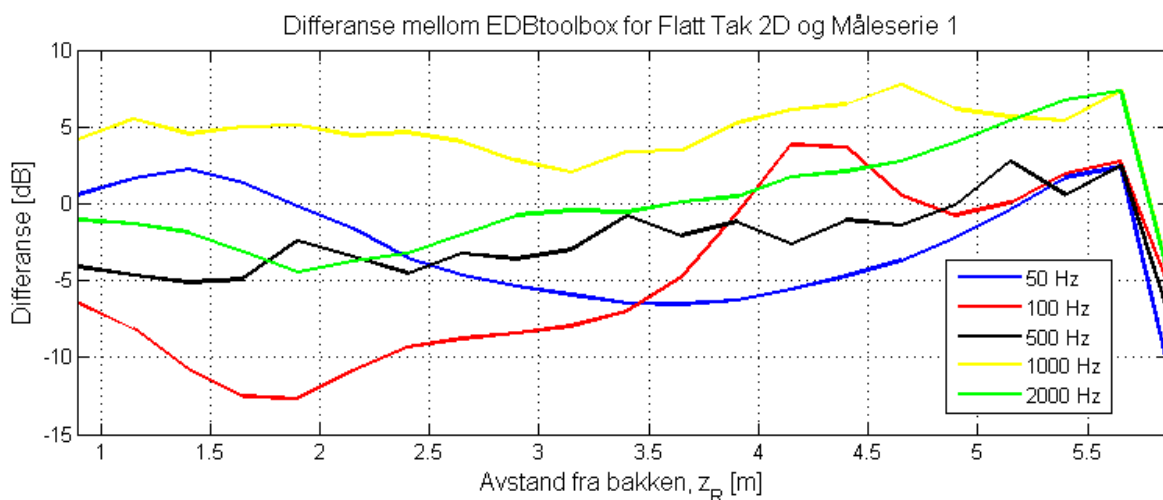
Observerer fra figuren over at den målte frekvensresponsen for innskuddstapet for alle mot-takerposisjoner også øker med frekvens, og at responsen i dette tilfellet er jevnere enn det teoretiske resultatet i figur 4.21. Verdiene her ligger også innenfor ca 10 - 50 dB, som resultatet fra EDBtoolbox. En egenskap ved kurvene er at alle har et lokalt bunnpunkt i frekvensområdet 125 Hz - 160 Hz, noe som ikke er tilfellet for de simulerte kurvene.

Innskuddstapet som funksjon av z_R ble også undersøkt i praksis i skalamodellen. Dette innskuddstapet er presentert i 1/3-oktavbåndsverdier i figur 4.31 på neste side.



Figur 4.31: Innskuddstap som funksjon av avstand fra bakken langs bakfasade til en modell av en bygning med flatt tak. Målt i skalamodell i 1/3-oktavgbånd.

Det er også her en reduksjon av innskuddstapet for økende avstand fra bakken, der reduksjonen er størst nær taket til bygningsmodellen. Dette er tilsvarende som for de simulerte resultatene. I dette praktiske tilfellet følger innskuddstapet jevnere linjer med færre top- per enn i det simulerte tilfellet, men det må igjen påpekes at det i dette tilfellet er snakk om 1/3-oktavgbåndsverdier og ikke enkeltfrekvenser. Disse målte kurvene er mer like det todimensjonale simulerte tilfellet enn det tredimensjonale simulerte tilfellet. Figur 4.32 viser differansen mellom det målte innskuddstapet fra måleserie 1 og simulert resultat med EDBtoolbox for todimensjonal bygningsmodell (figur 4.10). Merk at de målte verdiene er beregnet for 1/3-oktavgbånd og at de simulerte er beregnet for enkeltfrekvenser. Differansene ligger mellom -12,7 dB og +4,7 dB. For tilsvarende sammenligning mellom måleserie 1 og tredimensjonal modell i EDBtoolbox der differansene er større, se figur B.6 i vedlegget.



Figur 4.32: Differanse for innskuddstap mellom måleserie 1 og EDBtoolbox for todimensjonal bygning med flatt tak.

5 | Diskusjon

I dette kapittelet er de viktigste resultatene fra kapittel 4 diskutert med tanke på å komme frem til en konklusjon på oppgavens problemstilling. Det er lagt størst vekt på resultatene fra bygningsmodellen med flatt tak som er plassert på en totalabsorberende flate, da dette er det enkleste tilfellet. Hovedvekten ligger også på resultatene beregnet med EDBtoolbox. Det skal også diskuteres omkring effektene av å introdusere en totalreflekterende flate under bygningsmodellen, og hvordan et skrått tak på bygningen påvirker resultatene.

5.1 Generelt om metodene som er benyttet

Bygningsmodellens lengde er i alle beregninger med EDBtoolbox satt til å være 15 m, der forskjellene mellom den todimensjonale og den tredimensjonale bygningsmodellen er at de korte endesidene enten er totalabsorberende eller totalreflekterende. I det todimensjonale tilfellet er dette kun en approksimasjon til en uendelig lang bygning, da hele lengden til kanten bidrar til diffraksjon og ikke bare den direkte og korteste avstanden mellom kilde og mottaker rundt kantene.

Kildene som er benyttet i de ulike metodene i denne oppgaven skal ideelt være like og så nært perfekte punktkilder som mulig. Dette er den enkleste og mest generelle formen for en lydkilde, og vil bli benyttet da det er forsøkt å finne så generelle sammenhenger som mulig. Kilden som ble benyttet til beregningene i COMSOL er ikke en slik punktkilde siden beregningene er utført i to dimensjoner. Dette medfører at punktkilden som er benyttet i denne modellen tilsvarer en uendelig linjekilde i tre dimensjoner. For målingene i skalamodellen er det benyttet en høyttaler, og i praksis vil det ikke være mulig å få konstruert en perfekt rundstrålende punktkilde. Men grunnet høyttalerens plassering i forhold til bygningsmodellen er det kun lyd mellom -53° og 53° ut fra høyttaleren som bestråler modellen. Ved å betrakte figur D.2 i vedlegg D ser man at responsen for de valgte frekvensene maksimalt avviker 8 dB fra en omnidireksjonal respons. Simuleringene ved bruk av EDBtoolbox gjør beregninger med en perfekt punktkilde med ideell omnidireksjonal respons, da de benytter seg av analytiske uttrykk for kilden. Disse forskjellene for kildene kan bidra til å gi avvik mellom resultatene fra de ulike metodene.

Både COMSOL og EDBtoolbox er metoder som krever at en benytter henholdsvis mange nok elementer eller mange nok punkter for å få nøyaktige beregninger. I denne oppgaven er denne oppløsningen satt til å være rundt minimumskravet for den høyeste frekvensen som er benyttet, 2 kHz, noe som kan innføre noen unøyaktigheter for de høyeste frekvensene.

Dette kommer spesielt frem i figur 4.9 for absorberende bakke i COMSOL, der kurven for 2 kHz kan være noe mer ujevn enn for de andre frekvensene. Dette kan være en indikasjon av en oppløsning som er på grensen av hva som er tilstrekkelig. En annen feilkilde for beregningene i COMSOL er det sirkulære perfekt tilpassede laget (*PML*) som ble konstruert rundt bygningsmodellen, se figur 3.2, som skal hindre refleksjoner fra domenets ytre grenser. Det er ikke garantert at dette laget er perfekt absorberende og hindrer alle refleksjoner.

Det ble funnet at EDBtoolbox konsekvent estimerer et høyere innskuddstap enn COMSOL for alle frekvenser og mottakerposisjoner. Dette kan mest sannsynlig skyldes forskjellene i kildene som er benyttet i disse to modellene. Mottakerposisjonene i COMSOL er 0,0 cm fra fasaden mens de i EDBtoolbox-modellen er 7,42 cm fra fasaden. Men som diskutert tidligere i dette kapittelet har denne avstanden liten innvirkning på resultatene, og kan neglisjeres i denne sammenhengen. Det største avviket mellom de to metodene skjer ved 2 kHz. Dette kan mest sannsynlig relateres til oppløsningen benyttet i beregningene som i begge metoder er på grensen til hva som er akseptabelt for denne frekvensen.

Det ble i figur 4.2 gjort undersøkelser av forskjellene mellom innskuddstapet som funksjon av frekvens for de ulike metodene for bygningsmodellen med flatt tak, beregnet for et punkt $z_R = 3,15$ m over bakken. Innskuddstapet ble først beregnet for EDBtoolbox og benyttet som en referanse. Det ble funnet at det ikke var så store forskjeller mellom de to enkle beregningsmetodene Mæekawa og ISO 9613-2, noe som er fornuftig da disse bygger på samme prinsipp ved bruk av Fresnels nummer. Innskuddstapet for disse to metodene ga derimot et avvik fra EDBtoolbox som økte med frekvensen, der dette avviket var opp mot 15 dB for de høyeste frekvensene som ble undersøkt. Avviket mellom COMSOL og EDBtoolbox ikke kun ca 1,5 dB og var tilnærmet konstant for alle frekvenser, som mest sannsynlig kan relateres til kilden som ble benyttet og at det i EDBtoolbox kun er benyttet en approksimasjon til en todimensjonal bygningsmodell. Det antas at de simulerte resultatene stemmer mest med virkeligheten, da dette er metoder som har større grad av kompleksitet enn de to andre forenklete beregningsmetodene som er undersøkt.

Det er i alle resultatene beregnet ved EDBtoolbox for innskuddstapet som funksjon av z_R , som for eksempel i figur 4.10, funnet at innskuddstapet plutselig øker for de største verdiene for z_R . Dette er ikke et fysisk fenomen, men en konsekvens av at beregningene med denne verktøykassen som innfører feil dersom det forsøkes å gjøre beregninger i punkter som ligger i eller i nærheten av et av planene i geometrien som benyttes. Resultatene beregnet fra simuleringene i COMSOL har ikke denne plutselige økningen nær kanten, og det antas at dette er det som er korrekt fysisk oppførsel.

For tredimensjonale beregninger er EDBtoolbox mest hensiktsmessig å bruke, da kompleksiteten for elementmetoden i COMSOL blir for høy og antall elementer blir for høyt for beregninger i størrelsesordenen som i denne oppgaven. Det er derfor her lagt vekt på EDBtoolbox, i tillegg til at denne er benyttet til beregninger for både to og tredimensjonale modeller.

5.2 Todimensjonal modell av bygning

For undersøkelsene gjort av en todimensjonal bygningsmodell, som skal tilsvare lange rekkehus eller lignende, ble det benyttet både COMSOL og EDBtoolbox.

5.2.1 Absorberende bakke

Det ble for den approksimerte modellen i EDBtoolbox funnet i figur 4.8 at mottakerens avstand fra bakfasaden y_R ikke er av så stor betydning. Det er kun funnet små reduksjoner i innskuddstapet for de ulike frekvenskurvene dersom denne avstanden kun avviker noen centimeter fra 0,0 m. Dette er bare tilfellet for den todimensjonale modellen med totalabsorberende bakke. I de andre beregningene for to dimensjoner er mottakerne plassert med en avstand y_R på 0,0 cm eller 7,42 cm fra fasaden for henholdsvis COMSOL og EDBtoolbox. På bakgrunn av denne figuren kan så små avstandsforskjeller antas å være små nok til at forskjellene dette medfører for innskuddstapet kan neglisjeres. Fra denne undersøkelsen er det funnet at en avstand på 7,42 cm fra veggen utgjør en maksimal forskjell på 0,05 dB på innskuddstapet sammenlignet med en avstand på 0,0 m fra veggen i det aktuelle frekvensområdet.

Det ble for de todimensjonale modellene med flatt tak i figur 4.4 og 4.3 observert at innskuddstapet er jevnt økende med frekvens, noe som også går igjen for alle de ulike metodene for beregning av støyskjerming. Dette skyldes at diffraksjon er et fenomen som er mer betydelig for lave frekvenser, og at ved høyere frekvenser der bølgelengdene er små i forhold til geometrien kan de akustiske bølgeene bli betraktes som rette stråler som ikke avbøyes rundt kanter. Dette medfører at mindre av lyden når baksiden av bygningen for høye frekvenser, som igjen medfører et høyere innskuddstap. Formen på innskuddstapets frekvensrespons endrer seg ikke mye med hvilket punkt det er beregnet i, selv om verdiene for innskuddstapet øker. Kurvene for innskuddstap som funksjon av frekvens ble funnet til å være lavest for alle frekvenser for punktet nærmest taket, og øker dersom en betrakter punkter nærmere bakken.

Innskuddstapet i figurene 4.9 og 4.10 som funksjon av vertikal z_R avstand langs bygningens bakfasade viser hvordan innskuddstapet endres med denne avstanden. Det ble både for COMSOL og EDBtoolbox funnet at innskuddstapet minker dersom en kommer nærmere bygningens tak. Denne reduksjonen i innskuddstapet for posisjoner nær taket skyldes at lydtryknivået i de samme posisjonene øker tilsvarende. Dette kan forklares med at en da beveger seg nærmere en av kantene lyden blir diffraktert rundt, og dersom en betrakter denne kanten som en sekundær lydkilde i henhold til teorien om diffraksjon i avsnitt 2.1.2 er dette et fornuftig resultat.

Beregningene for en bygningsmodell med skrått tak med dimensjonene fra figur 3.1 viste at det skrå taket ga noe høyere innskuddstap enn tilsvarende modell med flatt tak. Ved å betrakte kurvene i figur 4.12 for innskuddstapet som funksjon av z_R for skrått tak, observeres det at det også reduseres på tilsvarende måte som for flatt tak dersom denne avstanden øker. Dette er igjen på grunn av at man nærmer seg den sekundære kilden som kanten kan betraktes som. Dette skyldes at det i dette tilfellet er innført enda en kant som gir

diffraksjon, som gjør at lyden nå må diffrakteres rundt tre kanter i stedet for to. Differansen i figuren 4.7 viser at den øker med frekvens, som impliserer at innføring av flere kanter gir en differanse som er økende med frekvens. Dette kan forklares med at diffraksjonen rundt kanter er frekvensavhengig og at det er liten grad av diffraksjon for høyere frekvenser. Differansen i figur 4.13 viser at innskuddstapet som funksjon av avstand for skrått tak ga høyere verdier enn flatt tak for alle punkter og frekvenser.

Figur 4.11 som viser innskuddstapet som funksjon av økende kildeavstand y_S fra bygningen med flatt tak viser at innskuddstapet reduseres med økende avstand. Dette kommer av at lydtrykksnivået i fritt felt $L_{p,\text{fritt}}$ minker med $1/r$ og at $L_{p,\text{skjerm}}$ har ganske uendrede verdier for de ulike kildeposisjonene. Dette er en konsekvens av at den innfallende lyden treffer takkanten med en vinkel relativt til bakken som reduseres når kildens avstand fra bygningen øker. Lyden treffer altså mer og mer parallelt med takflaten dersom denne avstanden øker.

Disse resultatene er kun beregnet for enkeltfrekvenser, men da kurvene for innskuddstapet som funksjon av z_R for de forskjellige enkeltfrekvensene har en form som ikke endres så mye dersom frekvensen endres, kan det derfor antas at resultatene i dette tilfellet ville vært meget like om de hadde blitt beregnet i 1/3-oktavnåbånd. Denne argumentasjonen er ikke gyldig for tilfellet med reflekterende bakke eller for den tredimensjonale modellen, da dette gir store variasjoner i kurvene. Disse tilfellene er diskutert i de neste avsnittene.

5.2.2 Reflekterende bakke

Beregningene av innskuddstapet for bygningsmodellen med flatt tak plassert på en totalreflekterende flate viste at dette ga et resultat som var meget ulikt tilfellet med en absorberende flate. Frekvensresponsene til innskuddstapet for de tre ulike punktene langs midten av bakfasaden i figurene 4.14 og 4.15 viste at responsenes form var svært avhengige av mottakerens posisjon. Selv om det ikke er like tydelig som for tilfellet med absorberende bakke, ser det ut til at punktet nærmest taket ga det laveste innskuddstapet. Dette kan skyldes at man i dette tilfellet er nærme en kant som kan betraktes som en sekundær kilde, som også diskutert i forrige avsnitt.

De store forskjellene fra det totalabsorberende tilfellet skyldes at lyden reflekteres fra bakken og interfererer med lyden som kommer direkte fra kanten på taket. Dette skaper tilsynelatende både konstruktiv og destruktiv interferens med tydelige topp og bunnpunkter på kurvene.

Da det ble gjort beregninger av innskuddstapet i punktene med varierende avstand z_R fra bakken som vist i figur 4.17 og 4.10, ble det funnet at dette også ga kurver med hyppige variasjoner mellom de ulike mottakerposisjonene. Det forekom tydelige topp og bunnpunkter som ble tettere dersom frekvensen økte. Noen av de mest synlige bunnpunktene oppstår for eksempel ved 500 Hz i punktene rundt $z_R = 4,1$ m over bakken. Disse er en konsekvens av lydtrykksnivået for fritt felt $L_{p,\text{fritt}}$ som får et bunnpunkt i denne mottakerposisjonen, grunnet destruktiv interferens mellom den direkte lyden og lyden reflektert fra det totalreflekterende underlaget. De andre tilsynelatende periodiske topp- og bunnpunktene skyldes karakteristikkene for lydtrykksnivået bak bygningen som også skyldes interferens. Da det for både COMSOL og EDBtoolbox ble benyttet enkeltfrekvenser, vil effekten av interferensen

være meget tydelig da interferens er knyttet til faseforskjeller mellom ulike lydbidrag med samme frekvens. Topp- og bunnpunktene vil oppstå dersom lyden i et punkt er en sum av flere bidrag med som har 0° eller 180° faseforskjell. Faseforskjellene antas å komme fra veiforskjellen mellom den reflekterte lyden fra bakken og lyden direkte fra taket, men det har ikke lyktes i å finne noen sammenhenger mellom disse avstandene og bølgelengdene som kan bekrefte dette. Det tyder på at det er et mer sammensatt problem enn direkte en konsekvens av veiforskjeller. Effektene av interferens kan tenkes å reduseres dersom en hadde gjort en midling av flere frekvenser. Disse ulike frekvenskurvene har topper og bunnpunkter på forskjellige steder, slik at en midlig vil kunne glatte kurvene. Dette vil bli diskutert i detalj innledningsvis i avsnitt 5.3.

Differansen mellom det absorberende og det reflekterende tilfellet for bakken ligger for alle frekvenser og punkter mellom ca -35 dB og $+51$ dB, som indikerer at det blir store usikkerheter i innskuddstapet ved innføring av den reflekterende bakken. I et praktisk tilfelle vil bakken hverken være totalreflekterende eller totalabsorberende, men ha en refleksjonsfaktor som ligger et sted mellom disse to ekstreme tilfellene. Forskjellen mellom det teoretiske tilfellet i to dimensjoner med absorberende bakke og et praktisk tilfelle vil mest sannsynlig ikke være så stort, både fordi en mindre andel av lyden vil bli reflektert og gir lavere topper.

5.3 Tredimensjonal modell av bygning

For den tredimensjonale bygningen, der lydutbredelsen langs bakfasaden hadde opphav i både diffraksjon rundt både tak og rundt vegger, ble EDBtoolbox benyttet.

5.3.1 Absorberende bakke

Det kommer frem av figur 4.20 for innskuddstapet som funksjon av frekvens beregnet med EDBtoolbox for flatt tak at det er en økning med frekvens som sett i det todimensjonale tilfellet. I dette tredimensjonale tilfellet er denne økningen derimot ikke like jevn. Differansen som funksjon av frekvens mellom det to og det tredimensjonale tilfellet i figur 4.21 viser at avvikene ligger mellom -15 dB og $+7$ dB, der majoriteten av punktene ligger innenfor ± 5 dB. Disse avvikene fra de rette linjene i det todimensjonale tilfellet kan skyldes interferens mellom bidragene fra de tre mulige lydstiene. For konstruktiv interferens tilsvarer dette et helt antall bølgelengder, og for destruktiv tilsvarer dette et antall halve bølgelengder for den aktuelle frekvensen. Dette skaper da topp- og bunnpunkter i lydtrykksnivået bak bygningsmodellen og dermed bunn- og topppunkter i innskuddstapet.

For innskuddstapets frekvensrespons beregnet med EDBtoolbox i figur 4.20 er det tydelig at mottakerposisjonen som ligger nærmest taket har en respons som ligner mest på den i det todimensjonale tilfellet. Dette kan være på grunn av at en i denne posisjonen tilfellet er nær den sekundære kantkilden, og at lyden som kommer derfra dominerer det totale lydtrykksnivået. Dette er mer likt som for den todimensjonale modellen der det kun er lyd fra taket som bidrar til lyden på baksiden av bygningsmodellen. Innskuddstapet burde i dette tredimensjonale tilfellet vært noe lavere enn for det todimensjonale, da det er flere lydster

som bidrar til lydutbredelsen og at lydtrykksnivået på baksiden av bygningen følgelig skal være høyere. Dette kommer ikke så tydelig frem av resultatene grunnet de store variasjonene langs kurvene som oppstår på grunn av interferens.

Ved å betrakte innskuddstapet som funksjon av avstand i det tredimensjonale tilfellet i figur 4.22, kom det frem at disse kurvene avviker mye fra de tilsvarende todimensjonale resultatene igjen grunnet interferens. Figuren som viser differansen som funksjon av z_R mellom det todimensjonale og det tredimensjonale tilfellet 4.23, viser også at det er store avvik mellom disse to tilfellene. Differansene for de ulike frekvensene er som tidligere diskutert minst for avstandene $z_R \geq 5$ m der mottakerposisjonene er nærmest kanten på taket.

Periodisiteten til variasjonene til kurvene som funksjon av z_R i det tredimensjonale tilfellet forekommer mer hyppig for høyere frekvenser enn for lave, som kan indikere at de kan være avhengige av bølgelengdene til lyden. Det ble observert i figur 4.24 at om tilsvarende beregninger ble utført for et tilfelle der mottakerposisjonene flyttes slik at kilde og mottakerne ikke lenger er plassert på midten av bygningen, vil disse frekvensavhengige toppene på kurvene oppstå for andre z_R . Dette styrker antakelsen om at det er interferens på grunn av veiforskjeller som skaper disse variasjonene. Det er heller ikke i dette tilfellet lykkes i å finne direkte sammenhenger mellom veiforskjeller for de direkte lydstiene og bølgelengdene, som indikere at den antatte interferensen kan være et mer sammensatt problem. Det er derfor gjort undersøkelser om hvorvidt fasen til lyden endres når lyden diffraktes rundt en kant, for å se om dette gjør at det ikke finnes en direkte sammenheng mellom bølgelengder og veiforskjeller. Det ble funnet at fasen ikke endres mye når lyden går rundt en kant, så dette er ikke en faktor som spiller inn (se figur A.1 i vedlegg A). I følge [15, s. 3683] bidrar hele kanten til diffraksjon, og ikke kun punktet på kanten som gir kortest vei mellom kilde og mottaker. Dette gjør det umulig å predikere toppene ved å betrakte rene veiforskjeller.

Dersom kildens avstand fra bygningen ble variert fra 3 m til 25 m som for den todimensjonale modellen, kom det frem av de tredimensjonale simuleringene at dette også ga et innskuddstap som reduseres noe med økende kildeavstand. Det kommer derimot ikke like tydelig frem her, grunnet variasjonene som oppstår på kurvene grunnet interferens. De periodiske topp- og bunnpunktene som også dukket opp på disse kurvene i det tredimensjonale tilfellet gir også her en stor usikkerhet.

5.3.2 Reflekterende bakke

Frekvensresponsen til innskuddstapet for bygningen med flatt tak i figur 4.26 viste også her at innskuddstapet tydelig økte med frekvens. En forskjell mellom dette tilfellet og tilsvarende tilfelle i to dimensjoner, er at det her er en tydeligere økning av innskuddstapet med frekvens. Dette kan være fordi den diffrakterte lyden rundt de tre lydstiene her er dominerende over den reflekterte lyden fra bakken i det totale lydtrykksnivået. Denne antakelsen styrkes av tidligere resultater som har vist at den diffrakterte lyden rundt kanter gir denne karakteristikken der innskuddstapet tydelig øker med frekvens.

Innskuddstapet som funksjon av z_R i figur 4.27 varierer også mye mellom mottakerposisjonene, men her har ikke variasjonene like tydelig periodisitet som i det todimensjonale tilfellet. Lyden i mottakerposisjonene i dette tilfellet består av bidrag fra kantene fra både tak og vegger, samt reflektert lyd fra bakken. Dette gjør at variasjonene på disse kurvene

ikke er like periodiske som for de tilfellene som tidligere er studert, fordi summen av alle bidragene her gir mer tilfeldige utslag på kurvene. Det er tydelige likheter mellom kurvene i dette tredimensjonale tilfellet og det todimensjonale tilfellet, der flere tydelige bunnpunkter er lokalisert ved de samme mottakerposisjonene som for eksempel for 500 Hz ved $z_R \approx 4,1m$. Dette skyldes at lydtrykksnivåene fra et totalreflekterende underlag uten bygningsmodellen til stede er de samme i begge tilfellene. Det er bunnpunktene for dette lydtrykksnivået som også medfører de tydelige bunnpunktene for innskuddstapet.

5.4 Verifisering av resultater ved målinger i skalamodell

Målingene i skalamodellen ble utført slik at de skulle samsvare mest mulig med det simulerte tilfellet med EDBtoolbox, der det ble benyttet absorberende bakke rundt bygningsmodellen. Absorbentene som ble benyttet i målingene har for frekvensbånd under 630 Hz en absorpsjonskoeffisient som antas å være $\alpha_2 < 1$, som avviker fra det totalabsorberende tilfellet. Det antas at den effektive absorpsjonen er mindre enn hva som er oppgitt for det tilsvarende produktet, på grunn av de harde platene som lå under disse absorbentene. Det kan også ha kommet noe lyd under bygningsmodellen da ikke hele gulvet var dekket med plater og absorbenter. Andre faktorer som kan skape avvik mellom det simulerte og det praktiske tilfellet er at det kan ha forekommet små unøyaktigheter ved plasseringen av mikrofonene og høyttaleren i forhold til skalamodellen av bygningen, samt ikke ideelle effekter fra måleutstyret.

Målinger i skalamodellen er i hovedsak benyttet til verifisering av de teoretiske simuleringene. Ved sammenligning av resultatene fra disse to metodene må det gjøres oppmerksom på at de praktiske resultatene er oppgitt som 1/3-oktavbåndsverdier og de simulerte resultatene er oppgitt som verdier for enkeltfrekvenser. For interferens mellom de ulike bidragene for lyden i mottakerposisjonene, vil dette mest sannsynlig være mer tydelig for beregningene utført for enkeltfrekvenser enn for 1/3-oktavbånd. Resultatene i figur 4.28, viser at kurvene for innskuddstapet som en middelvei av 10 ulike frekvenskomponenter ikke lenger har så tydelige periodiske topp- og bunnpunkter. Formen på denne kurven ligner mer kurven som er målt i 1/3-oktavbånd, enn kurven for enkeltfrekvensen. Ser likevel at det er noen avvik, som at den målte kurven ligger litt under den beregnede for 500 Hz. Dette kan også skyldes ikke-ideelle forhold under de praktiske målingene.

Den målte frekvensresponsen til innskuddstapet i figur 4.30 er noe jevnere enn den beregnet i EDBtoolbox. Dette kan skyldes at disse verdiene er beregnet i 1/3-oktavbånd, noe som nevnt tidligere kan jevne ut de største interferens-skapte variasjonene som oppstår for enkeltfrekvenser. Noen av variasjonene på de målte kurvene, som for eksempel bunnpunktet for 160 Hz for mottakerposisjonen 1,15 m over bakken, skyldes tilsvarende bunnpunkt for lydtrykksnivået uten modellen til stede (dette går tydelig frem av figur B.3 i vedlegget). Dette kan muligens skyldes at målingene ble utført der bygningsmodellen ble plassert på et underlag bestående av harde treplater og skumabsorbenter, som ikke gir en total absorpsjon som ideelt er ønskelig. Dette kan være opphavet til uønskede refleksjoner av lyden som igjen bidrar til interferens. De målte kurvene som funksjon av z_R i figur 4.31 viser seg også å være

jevnere enn de simulerte.

Sammenligninger mellom de målte kurvene og både de tilsvarende to og tredimensjonale simuleringene viser at de målte resultatene er mest like resultatene i de todimensjonale simuleringene. Grunnen til at det ble så store avvik fra den tredimensjonale modellen var de mange topp og bunnpunktene langs disse kurvene som en følge av interferens, noe som ikke er så tydelig for de målte 1/3-oktavbåndskurvene.

5.5 Parametrisk fremstilling av kurver

Det ble funnet forslag til matematiske formuleringer for innskuddstapet som funksjon av frekvens og vertikal mottakeravstand fra bakken z_R langs bakfasaden, eller kildeavstand y_S fra bygningens forside. Disse ligningene er presentert i (E.1) og (E.2) i vedlegg E.1. Disse er ingen generell beskrivelse av støyskjermproblemet, men de gir approksimasjoner til problemet undersøkt i denne oppgaven. Disse uttrykkene er kun gyldige for frekvenser mellom 50 Hz og 2 kHz og for rektangulære kuber med tilsvarende dimensjoner. Det er også forsøkt å finne et generelt uttrykk for innskuddstapet for bygningen av dimensjonene som er benyttet i denne studien, som inkluderer både frekvens f , kildens avstand fra bygningen y_S og mottakerens avstand fra bakken z_R . Det var ikke mulig å finne en enkel sammenheng mellom disse parameterne på bakgrunn av dataen generert i denne oppgaven. Se vedlegg E.2 for flere detaljer.

5.6 Videre arbeid

Undersøkelsene i denne oppgaven har rom for forbedringer. Begrensninger i programvare gjorde også at mer omfattende beregninger enn det som er utført her ikke er mulig med tilgjengelig maskinvare. Noen av beregningene i denne oppgaven, som for eksempel den tredimensjonale bygningen på en reflekterende bakke, tangerte kapasiteten til tilgjengelig maskinvare. Det kunne vært interessant å også utføre beregningene i 1/3-oktavbånd eller som en midlig av flere enkeltfrekvenser, som er nyttig for å lettere kunne benytte resultatene til praktiske formål. Beregningene i COMSOL kunne også ha blitt konvertert til 2,5D slik at de tilsvarer resultatene fra EDBtoolbox i henhold til [19], slik at resultatene mest sannsynlig ville ha blitt likere.

Denne oppgaven kan gi opphav til mye videre arbeid innenfor samme fagområde. Dette er på grunn av at denne oppgaven omfatter et bredt område innen akustikk, og derfor måtte begrenses til problemstillingen som er formulert innledningsvis i denne rapporten. Forslag til videre arbeid knyttet til problemstillingen i denne oppgaven kan være:

- Kartleggig av hvordan andre dimensjoner på bygningsmodellen påvirker innskuddstapet, der bygningens bredde, høyde eller lengde kan varieres. Et interessant problem kunne vært å undersøke hvor lang bygningen må være for å kunne approksimeres som todimensjonal, og ved hvilken lengde grensen mellom den todimensjonale og tredimensjonale modellen forekommer.
- Beregning av innskuddstapet på baksiden av bygningen med flere andre kombinasjoner av kilde- og mottakerposisjoner, for å videre finne sammenhenger mellom innskuddstap, frekvens og ulike avstander.
- Modellering av både bakken og bygningens vegger med impedanser som er nærliggende hva som er tilfellet i praksis, da det i denne oppgaven kun er gjort undersøkelser med totalreflekterende eller totalabsorberende overflater
- Å inkludere refleksjoner fra nærliggende objekter i beregningene, noe som for eksempel kan være bygninger eller andre objekter, eller hvordan innvirkningen fra refleksjoner fra blant annet balkonger vil påvirke resultatene
- Inkludering av meteorologiske faktorer i beregningene, for å få enda mer realistiske resultater.
- Tilsvarende undersøkelser som i denne oppgaven med andre beregningsmetoder som Nord 2000 [18], der en kunne fått beregninger i to dimensjoner i 1/3-oktavbånd.

6 | Konklusjon

Konklusjonen på problemstillingen i denne oppgaven er i hovedsak basert på beregningene ved hjelp av verktøykassen EDBtoolbox i MATLAB. Dette er fordi denne beregningsmetoden er benyttet til beregninger i tre dimensjoner, noe som gjør at en kan simulere mer realistiske tilfeller enn med COMSOL i kun to dimensjoner. Grunnet beregningskompleksitet er det funnet at EDBtoolbox er mest anvendelig for problemer i størrelsesorden som i denne oppgaven. Ved å gjøre beregninger av innskuddstapet på baksiden av en todimensjonal bygning med flatt tak plassert på en totalabsorberende bakke er det funnet ut at dette tapet ikke endres mye dersom mottakerposisjonens avstand fra fasaden varieres. Det er funnet at innskuddstapet minker noe med økende avstand y_R fra fasaden der differansen i innskuddstapet for avstandsforskjeller for y_R på centimeternivå er neglisjerbare. Det er funnet at innskuddstapet på baksiden av bygningen for den tredimensjonale modellen eller for modellen med en reflekterende bakke er meget sensitivt for mottakerposisjonen, fordi det her oppstår interferens fordi lydtrykksnivået på denne siden er en sum av bidrag fra flere lydster. Det er også her ganske liten forskjell i innskuddstapet dersom avstandsforskjellene for y_R er på centimeternivå. Det er i begge innskuddstapet for de høyeste frekvensene som er mest sensitivt til disse avstandsforskjellene.

Et annet signifikant funn i oppgaven er at innskuddstapet nær bakfasaden til en bygning, som generelt er funnet til å ligge mellom 10 dB og 50 dB i det aktuelle frekvensområdet, også reduseres dersom mottakerposisjonens avstand fra bakken z_R øker. Dette er en karakteristikk som er gyldig både for den todimensjonale modellen såvel som den tredimensjonale. Grunnen til dette kan konkluderes med å være at dersom mottakerposisjonen flyttes nærmere kanten på taket, vil man da også komme nærmere den sekundære lydilden som denne kanten kan betraktes som. Innskuddstapet reduseres også raskere jo nærmere mottakerposisjonen er takkanten. Denne reduksjonen har opphav fra lydtrykksnivået langs bygningsfasaden som også øker dersom mottakerposisjonen flyttes nærmere kanten på taket. Lydtrykksnivået i fritt felt for de samme posisjonene har ikke en like stor endring med mottakerposisjonen. Dette impliserer altså at det er lydtrykksnivået langs fasaden som bestemmer innskuddstapets reduksjon.

Det er i denne studien funnet at innskuddstapet reduseres dersom avstanden mellom kilde og mottaker øker, der dette ble observert ved å beregne innskuddstapet for mange kildeposisjoner med varierende avstand y_S fra bygningsmodellens fasade. Denne reduksjonen av innskuddstapet er i hovedsak er en konsekvens av at referanselydtrykksnivået uten bygningen til stede også reduseres med avstanden grunnet faktoren $1/r$. Lydtrykksnivået på baksiden av bygningen er funnet til å endres i mindre grad for de undersøkte kildeposisjonene, og har følgelig en mindre innvirkning på innskuddstapet.

Ved å gjøre beregninger på en tredimensjonal bygningsmodell med flatt tak, der det også inkluderes diffraktert lyd rundt veggflatene, ble det funnet at dette introduserer interferens mellom lydbølgene fra de ulike lydstiene. Dette medfører at det for enkeltfrekvenser, som det her ble benyttet, ikke er mulig å finne en god matematisk representasjon av disse kurvene. Ut i fra disse kurvene kan det kun konkluderes med at det for tredimensjonale tilfeller blir et avvik fra kurvene for de todimensjonale resultatene. For de undersøkte mottakerposisjonene ligger avviket på mellom -38,0 dB og 8,6 dB. Dette interferensfenomenet er mer tydelig for de simulerte resultatene enn for måleresultatene, da det i simuleringene ble benyttet enkeltfrekvenser og det i måleresultatene ble benyttet 1/3-oktavbånd. Dette er på grunn av at oktavbåndsverdiene består av alle frekvenser innenfor en gitt båndbredde, noe som fører til en glatting av kurvene. Midlingene av verdiene for 10 enkeltfrekvenser ga glattere kurver som kunne gi en indikasjon på at det er derfor 1/3-oktavbåndskurvene for målingene er glattere.

På bakgrunn av beregningene for den todimensjonale bygningen med skrått tak, der man innfører en ekstra kant som lyden må diffrakteres rundt, ble det funnet at denne ekstra kanten medfører et konsekvent høyere innskuddstap for alle frekvenser. Dette er et fornuftig resultat, med tanke på at lyden da både får lengre vei og at den ekstra kanten også bidrar til en økt skjermende effekt. Denne ekstra kanten på det skrå taket medfører en frekvensrespons for innskuddstapet som øker brattere med frekvens enn for det flate taket. Dette kommer av at de høye frekvensene diffrakteres i mindre grad enn de lave. På grunn av dette øker altså innskuddstapet raskere med frekvensen om det innføres flere kanter som lyden må diffrakteres rundt.

Da bygningsmodellen ble plassert på en totalreflekterende bakke, ble det funnet at dette også vil introdusere interferens mellom lyd med opphav direkte fra takkanten og reflektert lyd fra bakken. Dette skaper store variasjoner for kurvene for innskuddstapet, som igjen gjør det vanskelig å finne en god matematisk representasjon av disse. Disse variasjonene bidrar til å skape en usikkerhet for innskuddstapet fra tilfeller der bakken ikke er totalabsorberende. For tilfellet som ble undersøkt i denne oppgaven var avviket mellom absorberende og reflekterende bakke mellom -35 dB og +51 dB for det todimensjonale tilfellet, og mellom -26 dB og +44 dB for det tredimensjonale tilfellet. Det kan antas at disse avvikene er noe mindre for 1/3-oktavbånd fordi disse kurvene er noe glattere enn kurvene for enkeltfrekvenser. Verdiene for avvikene er kun gyldige for den aktuelle modellen og de benyttede mottakerposisjonene, men disse høye verdiene kan indikere at reflekterende underlag gir store utslag i resultatene. Verdiene indikerer også at den reflekterende bakken gir mindre i avvik for den korte tredimensjonale bygningsmodellen, enn for den todimensjonale modellen som tilsvarer en uendelig lang bygningsmodell. Det kan altså konkluderes med at toppene på de ulike kurvene for innskuddstapet ikke kan predikeres ut i fra lydets gangveiforskjeller. Dette er fordi den diffrakterte lyden på baksiden av bygningsmodellen har opphav fra alle punkter på de aktuelle kantene, og ikke kun punkter på kantene som gis av den korteste veien mellom kilde og mottaker.

Skalamodellmålingene som i hovedsak ble benyttet til verifisering av de teoretiske resultatene for innskuddstapet som funksjon av z_R . Disse kunne bekrefte at innskuddstapet var lavest i mottakerposisjonene nærmest taket. Det praktiske resultatet lå nærmest resultatet for den todimensjonale modellen beregnet med EDBtoolbox, fordi den tredimensjonale ga store avvik grunnet toppene som ble konkludert med at skyldes interferens.

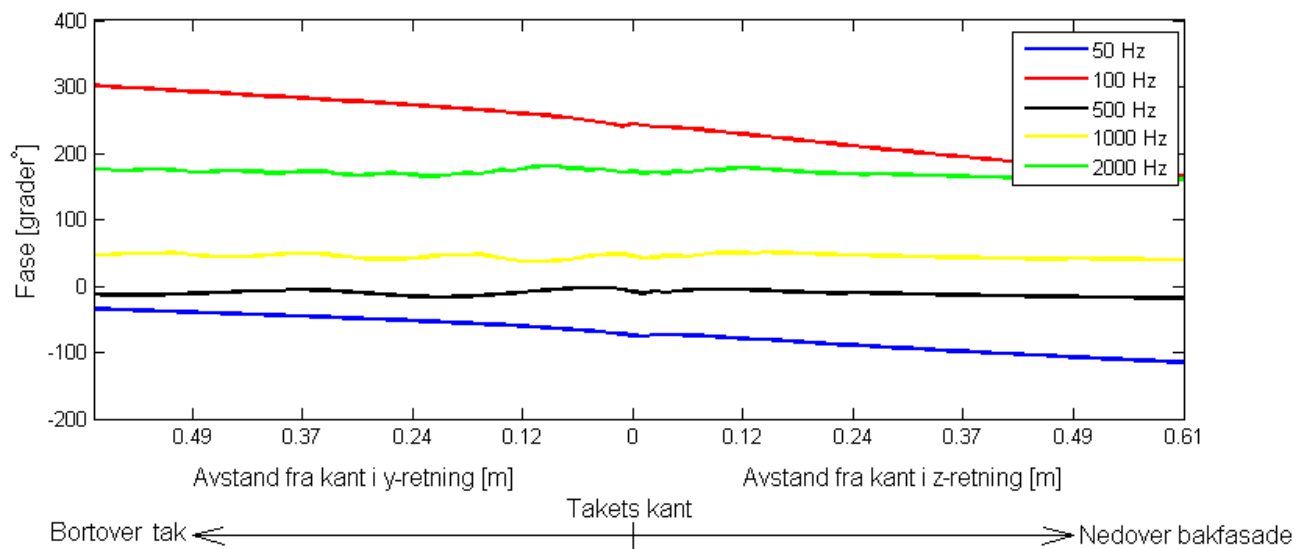
7 | Bibliografi

- [1] L. E. Kinsler, et al., *Foundamentals of Acoustics*, Fourth edition, John Wiley & Sons Inc., New Jersey, 2000.
- [2] H. Kuttruff, *Room Acoustics*, Fifth Edition, Institut für Technische Akustik, Technische Hochschule Aachen, Aachen, Germany, Spon Press, 2009.
- [3] J.B. Moreland, R.F. Minto, *An example of in-plant noise reduction with an acoustical barrier*, Applied Acoustics, Volume 9, Issue 3, July 1976.
- [4] Z. Maekawa, *Noise reduction by screens*, Applied Acoustics, Volume 1, 157-173, 1968.
- [5] COMSOL 4.3, *Introduction to the Acoustics Module*, May 2012.
- [6] P. Svensson, *Edge diffraction toolbox, Version EDB2toolbox*, <http://www.iet.ntnu.no/~svensson/software/#EDGE>, hentet 02.06.2014.
- [7] H. G. Jonasson, S. Storeheier, *Nord 2000. New Nordic Prediction Method for Road Traffic Noise*, SP Rapport 2001:10, Acoustics, Borås 2001.
- [8] U. J. Kurze, G. S. Anderson, *Sound Attenuation by Barriers*, Applied Acoustics, Volume 4, 35-53, 1971.
- [9] M. J. Crocker, *Handbook of Noise and Vibration Control*, John Wiley & Sons Inc., New Jersey, 2007.
- [10] International Standard, *ISO 9613-2: Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 2: General method of calculation*, First edition 1996-12-15.
- [11] T. D. Rossing, et al., *Springer Handbook of Acoustics*, First edition, Springer, LLC New York, June 2007.
- [12] U. R. Kristiansen, E. M. Vigen, *Computational Methods in Acoustics*, Department of Electronics and Telecommunications, NTNU, 2011.
- [13] U. P. Svensson, P. T. Calamia, S. Nakanishi, *Frequency-domain edge diffraction for finite and infinite edges*, Acta Acustica 95, pp. 568-572, 2009.
- [14] U. P. Svensson, R. I. Fred, J. Vanderkooy, *An analytic secondary source model of edge diffraction impulse responses*, J. Acoust. Soc. Am. 106, pp. 2331-2344, 1999.
- [15] U. P. Svensson, A. Asheim, *An integral equation formulation for the diffraction from convex plates and polyhedra*, J. Acoust. Soc. Am. 133, pp. 3681-3691 2013.

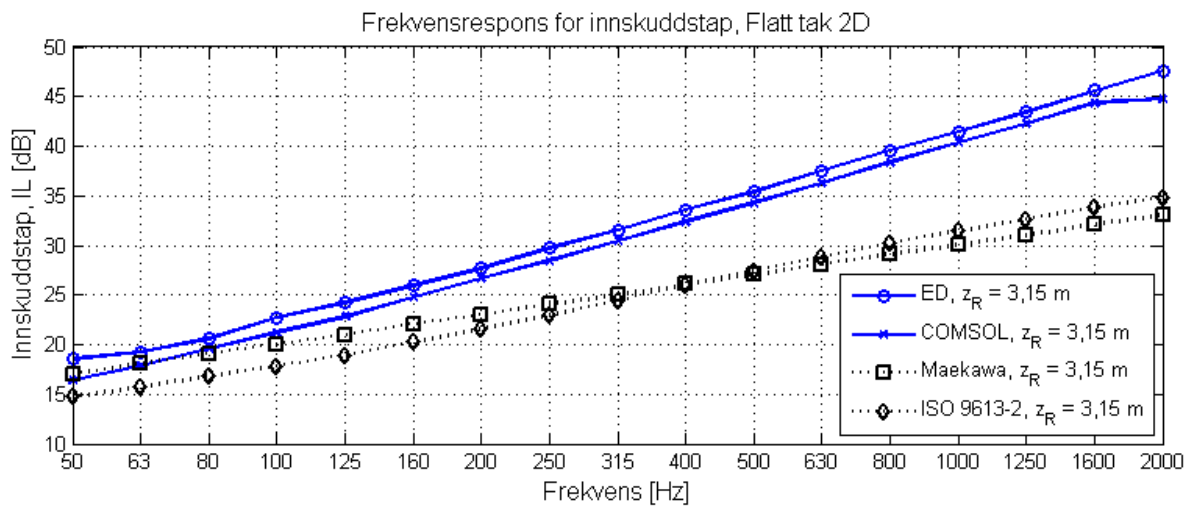
- [16] MATLAB, Curve Fitting Toolbox, *Fit curve or surface to data*, <http://www.mathworks.se/help/curvefit/fit.html>, hentet 30.05.2014.
- [17] Riverbank Acoustical Laboratories, *Report: Auralex 2" Studiofoam Wedges*, <http://www.auralex.com/testdata/test/2wedge.pdf>, March 1993, hentet 04.06.2014.
- [18] DELTA, Danish Electronics, Light & Acoustics, Report, *Nord2000. Comprehensive Outdoor Sound Propagation Model. Part 1: Propagation in an Atmosphere without Significant Refraction*, Denmark, December 2001.
- [19] D. Duhamel, *Efficient Calculation of the Three-Dimensional Sound Pressure Field around a Noise Barrier*, *Journal of Sound and Vibration*, 197(5), 547-571, 1996.

A | Simuleringer

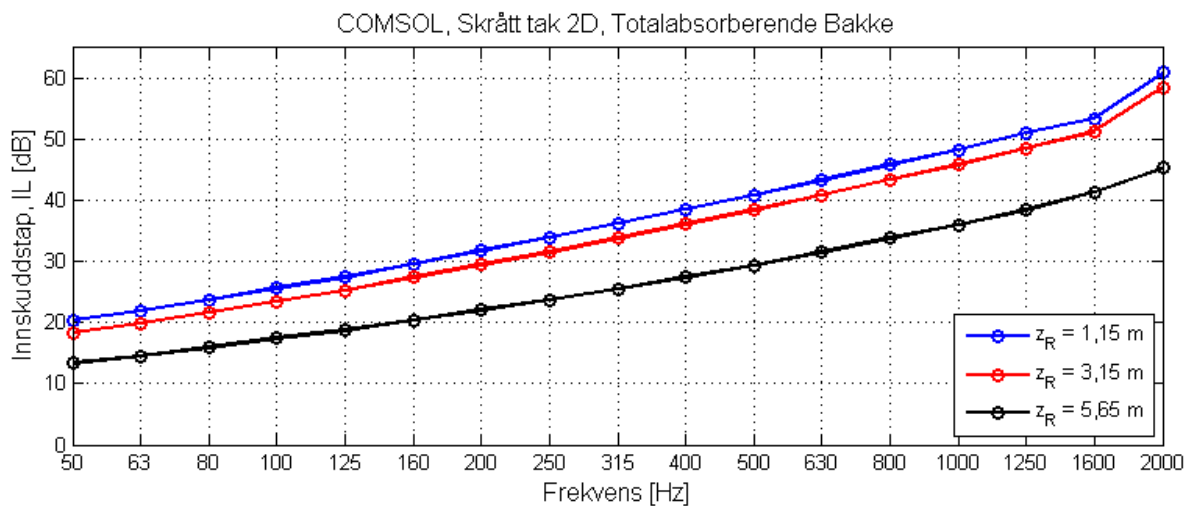
A.1 Todimensjonal modell av bygning



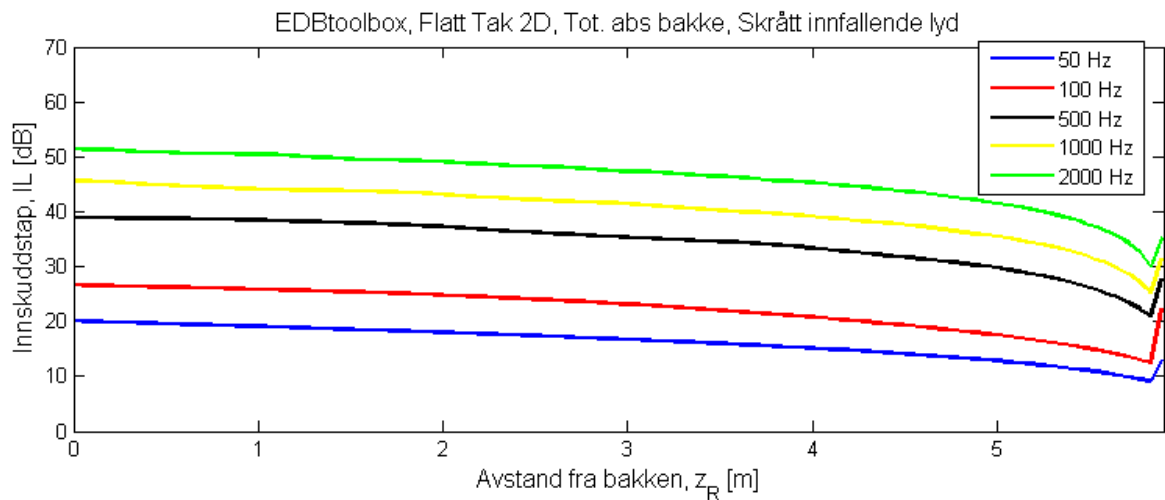
Figur A.1: Fasen til lydtrykket beregnet i mottakerposisjoner rundt kanten taket og den bakre fasaden danner. Beregnet for en todimensjonal bygning med flatt tak.



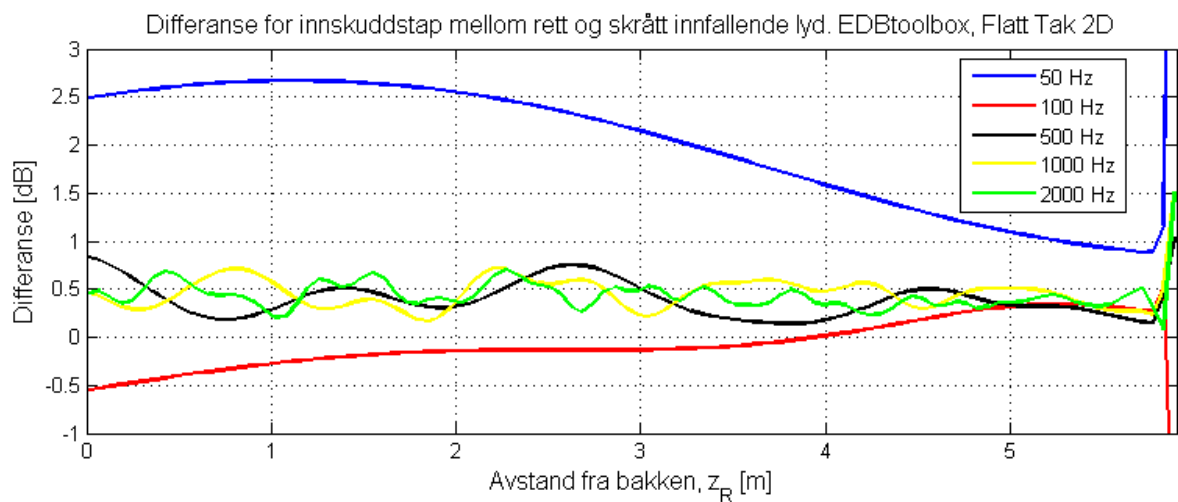
Figur A.2: Innskuddstap for ulike beregningsmetoder for innskuddstap som funksjon av frekvens, for todimensjonal bygning med flatt tak. Sammenligning av beregningsmetodene i COMSOL, EDBtoolbox, Maekawa og ISO 9613-2.



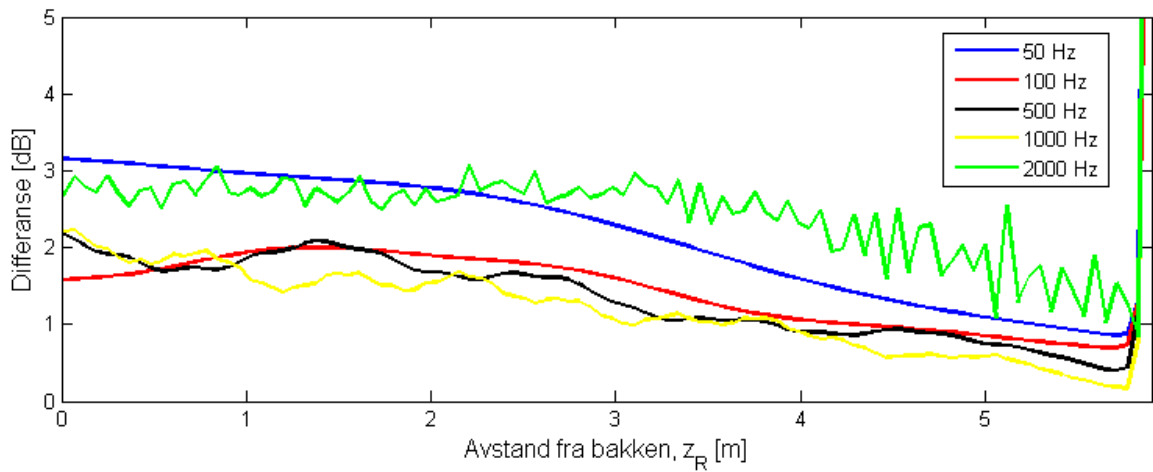
Figur A.3: Innskuddstap som funksjon av frekvens beregnet i COMSOL for tre punkter på bakfasaden av bygning med skrått tak.



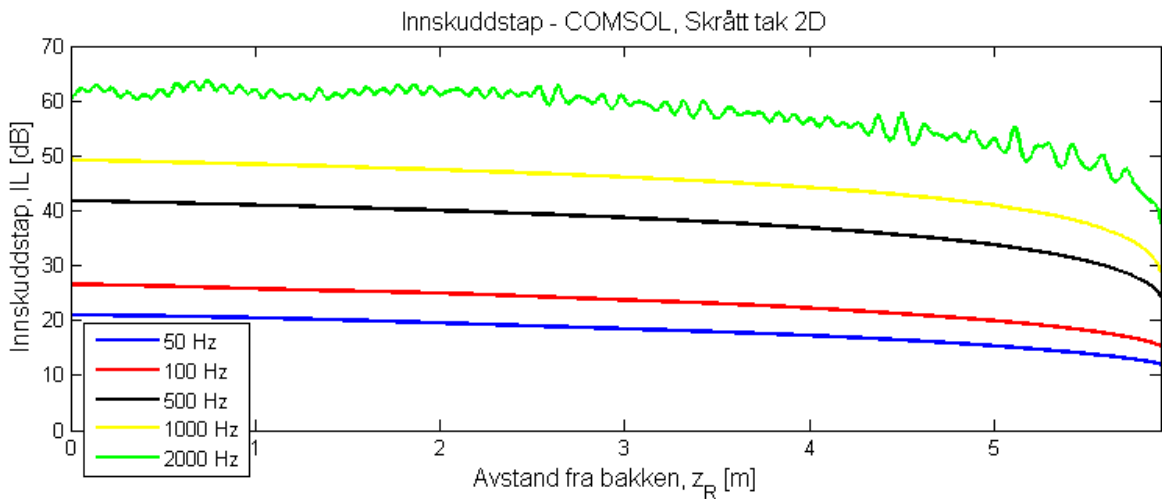
Figur A.4: Innskuddstap som funksjon av avstand langs bakfasade til en modell av en bygning med flatt tak, der kilde og mottaker ikke er plassert på linje. Beregnet med EDBtoolbox for ulike frekvenser.



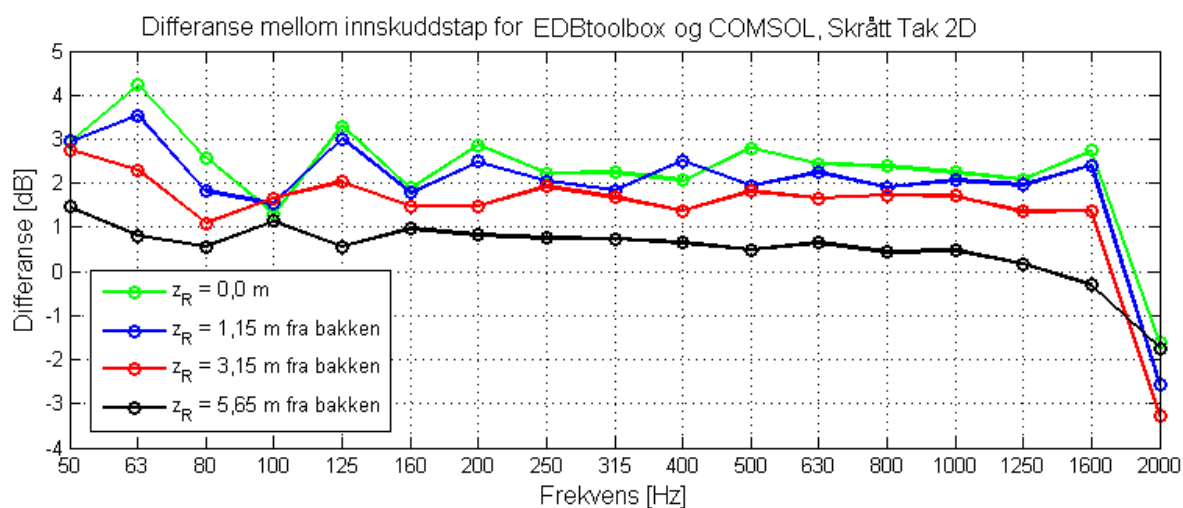
Figur A.5: Differanse mellom innskuddstap for rett og skrått innfallende lyd. Differanse som funksjon av avstand langs bakfasade til en modell av en bygning med flatt tak. Beregnet med EDBtoolbox for ulike frekvenser.



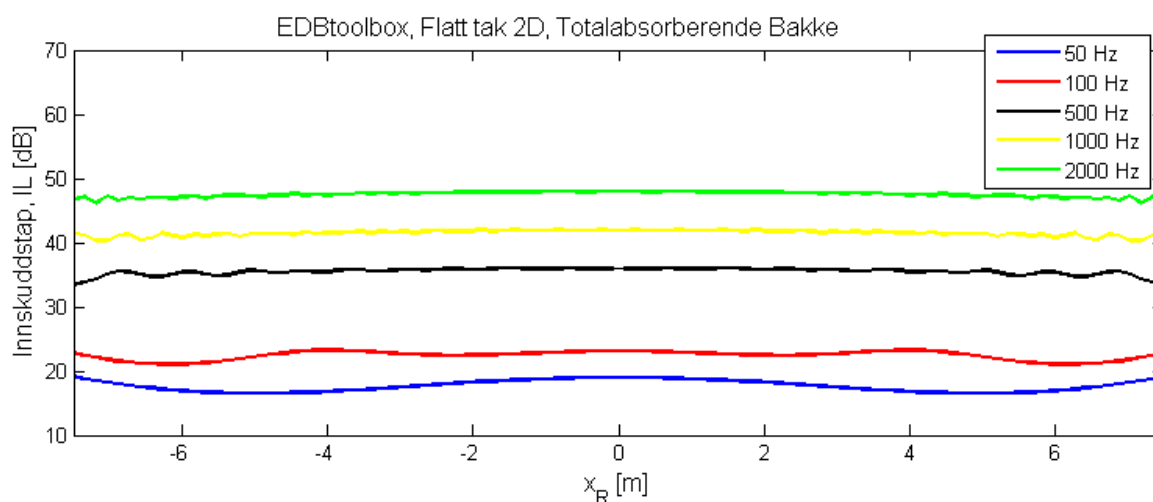
Figur A.6: Differanse mellom innskuddstap for COMSOL og EDBtoolbox. Beregnet som funksjon av avstand langs bakfasade til en modell av en bygning med flatt tak, der kilde og mottaker ikke er plassert på linje.



Figur A.7: Innskuddstap som funksjon av avstand langs bakfasade til en modell av en bygning med skrått tak. Beregnet i COMSOL for ulike frekvenser.

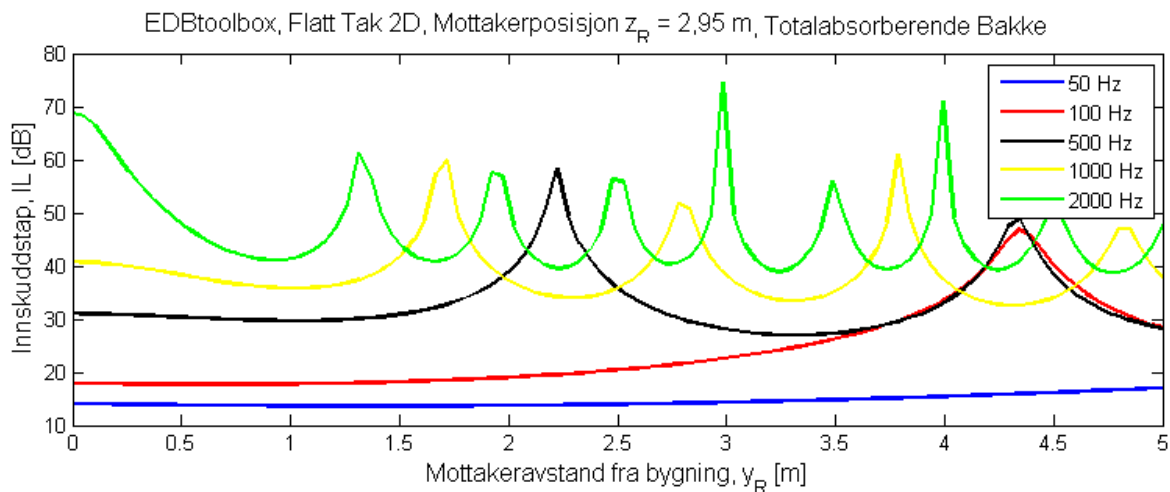


Figur A.8: Differanse mellom innskuddstap beregnet i COMSOL og EDBtoolbox. Frekvensrespons i utvalgte punkter for todimensjonal bygningsmodell med skrått tak.

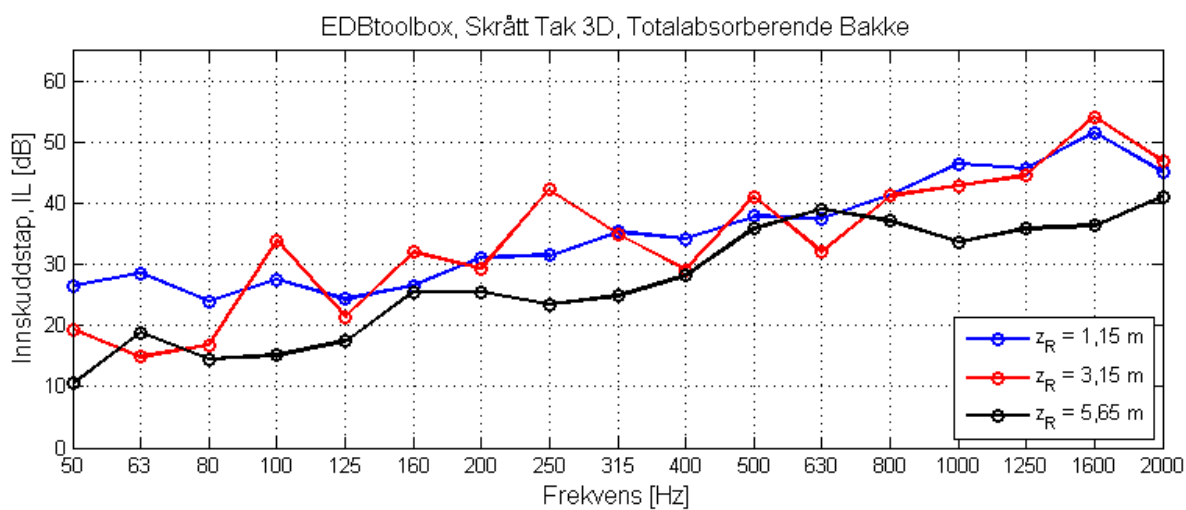


Figur A.9: Innskuddstap som funksjon av avstand x_R på tvers av baksiden av den todimensjonale bygningsmodellen med flatt tak. Beregnet med EDBtoolbox for ulike frekvenser, der $z_R = 2,95$ m.

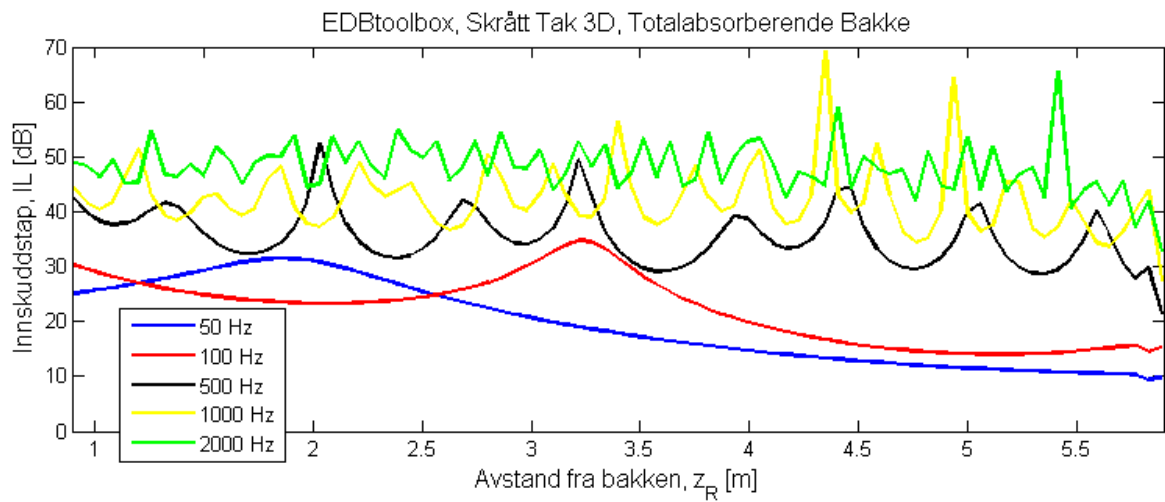
A.2 Tredimensjonal modell av bygning



Figur A.10: Innskuddstap som funksjon av avstanden y_R fra veggen på baksiden av den tredimensjonale bygningsmodellen med flatt tak. Beregnet med EDBtoolbox for ulike frekvenser, der $z_R = 2,95$ m.



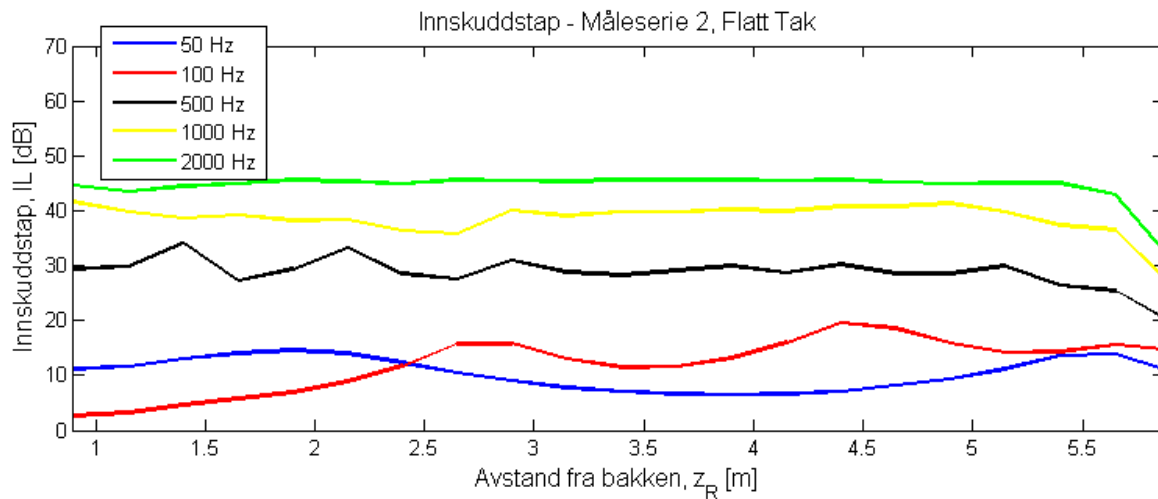
Figur A.11: Innskuddstap som funksjon av avstand frekvens for den tredimensjonale bygningsmodellen med skrått tak. Beregnet med EDBtoolbox for punkter med ulike høyder z_R



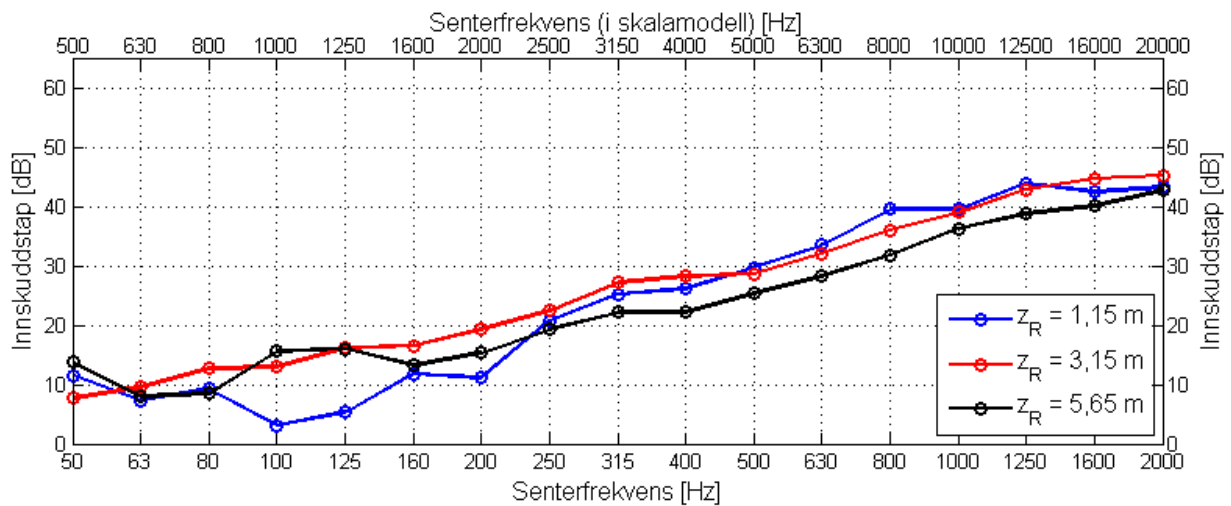
Figur A.12: Innskuddstap som funksjon av avstand z_R oppover langs baksiden av den tredimensjonale bygningsmodellen med skrått tak. Beregnet med EDBtoolbox for ulike frekvenser.

B | Målinger i skalamodell

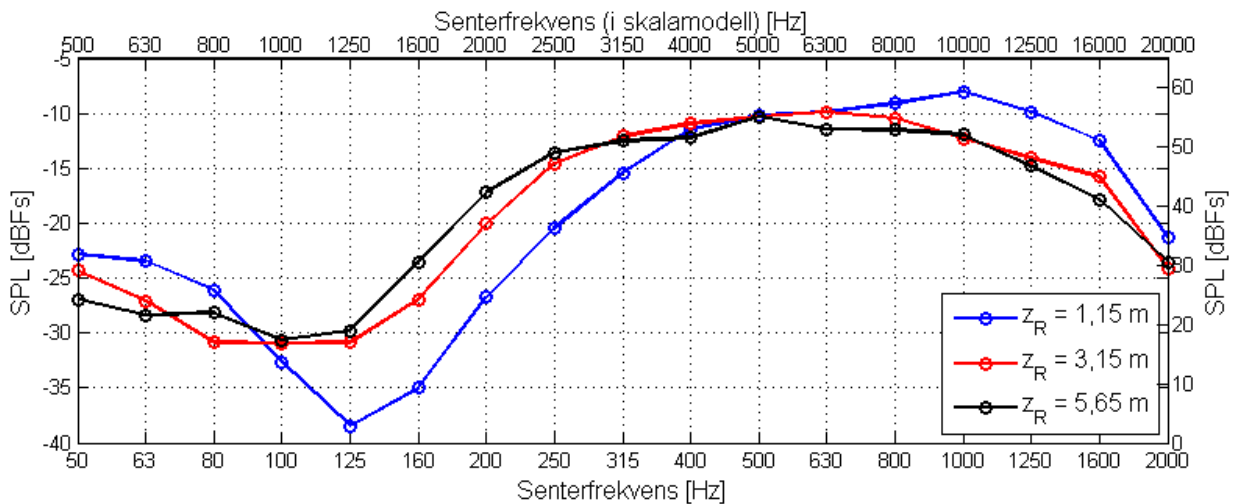
B.1 Måleresultater



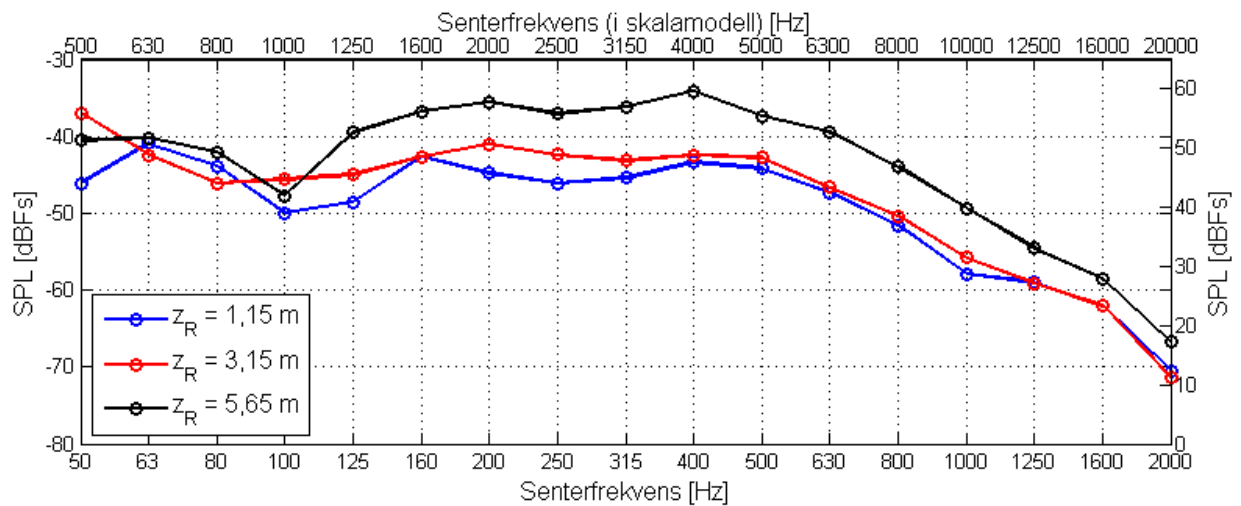
Figur B.1: Måleserie 2: Innskuddstap som funksjon av avstand langs bakfasade til en modell av en bygning for ulike frekvenser. I dette tilfellet ble det ikke benyttet harde finerplater under absorberende matter på gulvet.



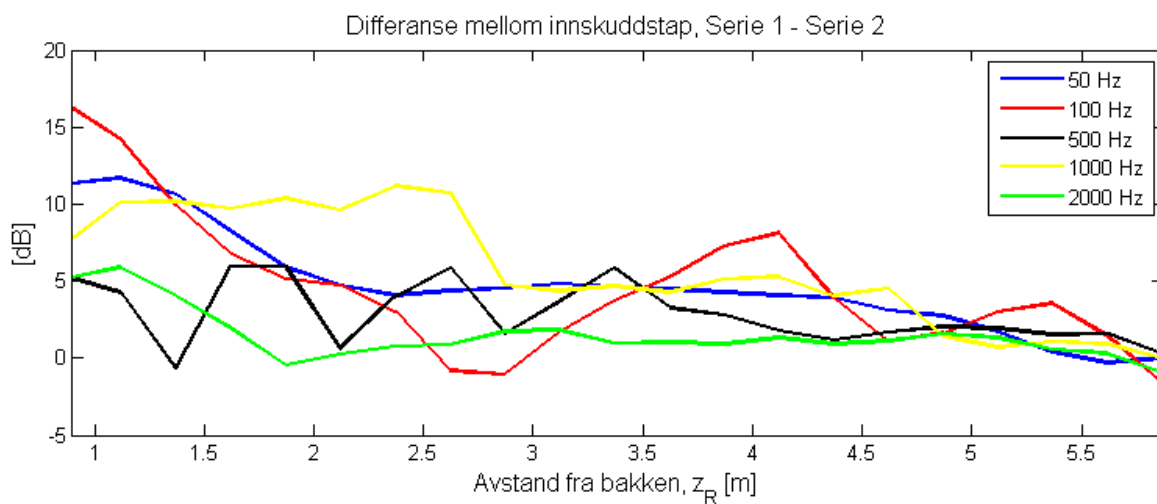
Figur B.2: Måleserie 2: Innskuddstap som funksjon av frekvens for tre punkter på bakfasade til en modell av en bygning. I dette tilfellet ble det ikke benyttet harde finerplater under absorberende matter på gulvet.



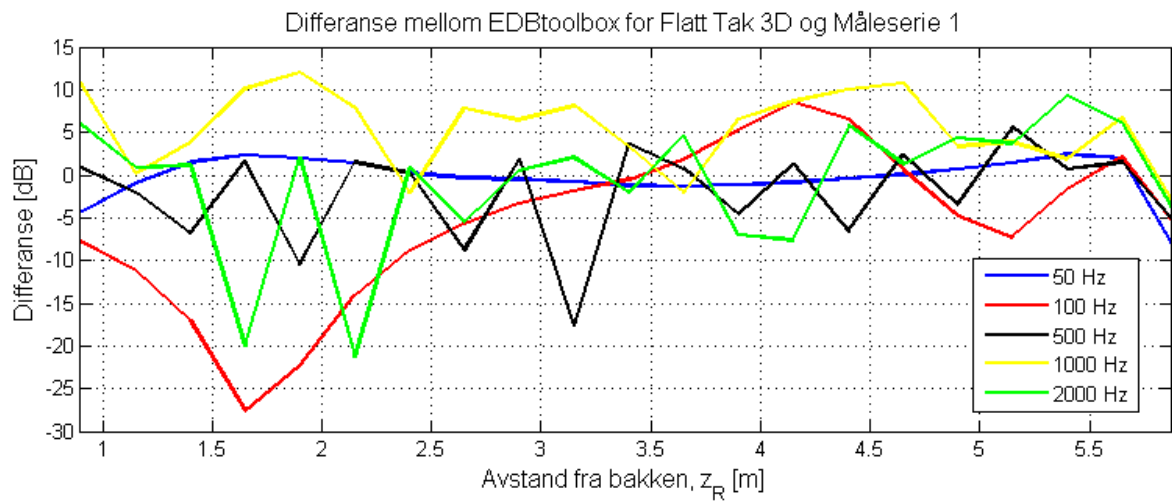
Figur B.3: Måleserie 1: Lydtrykksnivå i tilfellet uten bygningen til stede, oppgitt i dB relativt til maksimalt inngangsnivå for opptaksutstyret kalibrert til 94 dB ved 1 kHz.



Figur B.4: Måleserie 1: Lydtrykksnivå i tilfellet med bygningen til stede, oppgitt i dB relativt til maksimalt inngangsnivå for opptaksutstyret kalibrert til 94 dB ved 1 kHz.



Figur B.5: Differanse i innskuddstap mellom måleserie 1 og måleserie 2. Måleserie 2 er subtrahert fra måleserie 1.



Figur B.6: Differanse for innskuddstap mellom måleserie 1 og EDBtoolbox for tredimensjonal bygning med flatt tak.

B.2 Måleutstyr

Tabell B.1 viser en komplett oversikt over alle instrumenter som ble benyttet i de praktiske målingene i skalamodellen:

Tabell B.1: Utstysrliste

Produsent	Modell	NTNU- nr	Serienummer
Morset Sound Development	WinMLS 2004 professional level 7	-	-
Shure	FP23, forforsterker og strømforsyning til mikrofon	CB-4110	100203266002
Quad	50E, effektforsterker	CB-2013	8341
Brüel & Kjær	Type 4231, kalibrator	NC-2019	2115409
BSWA	1/2" Frittfeltmikrofon modell 216	-	4501153
BSWA	Mikrofon forforsterker modell 4000	-	-
NTNU	Høytaler med AuraSound 2" element type NSW2-326-8A	-	-
Bosch	PLR 30, avstandsmåler	RL-4001	887514578

C | Beregninger i MATLAB

Kode for beregning av innskuddstap i henhold til Maekawa og ISO 9613-2, beregnet for en kilde og mottakerposisjon:

```
1 % Maekawa 2D:
2 c = 344;
3 f = [50 63 80 100 125 160 200 250 315
4       400 500 630 800 1000 1250 1600 2000];
5 lambda = c./f;
6 a = 1:17;
7
8 S = [0 9 0.55]; % Kilde
9 O = [0 -3.3742 12.3179]; % Skjæringspunkt
10 R = [0 -3.3742 3.15]; % Mottaker
11 % Beregning av de ulike lydstiene:
12 SO = sqrt((S(1)-O(1))^2 + (S(2)-O(2))^2 + (S(3)-O(3))^2);
13 SR = sqrt((S(1)-R(1))^2 + (S(2)-R(2))^2 + (S(2)-R(2))^2);
14 OR = sqrt((O(1)-R(1))^2 + (O(2)-R(2))^2 + (O(3)-R(3))^2);
15 N = (2./lambda)*(SO + OR - SR);
16 % Innskuddstap for Maekawa:
17 IL_Maekawa = 5 + 20*log10((sqrt(2*pi*N))./(tanh(sqrt(2*pi*N))));
18
19
20 % ISO 9613-2 2D:
21 c = 343;
22 f = [50 63 80 100 125 160 200 250 315 400 500 630 800 1000 ...
23       1250 1600 2000];
24 lambda = c./f;
25 A = 1:17;
26 O1 = [0 3.3 5.9]; % Takkant nær kilden
27 O2 = [0 -3.3 5.9]; % Takkant nær mottaker
28 e = O1(2) - O2(2); % Bygningens bredde
29 source = [0 9 0.55]; % Kilde
30
31 % Mottakere:
32 num_receivers = 1;
33 receivers(:,3) = [0 -3.3742 3.1500]; % Mottaker
34
35 a = zeros(1,num_receivers);
36 dss = zeros(1,num_receivers);
37 d = zeros(1,num_receivers);
38 z = zeros(1,num_receivers);
39 dsr = zeros(1,num_receivers);
```

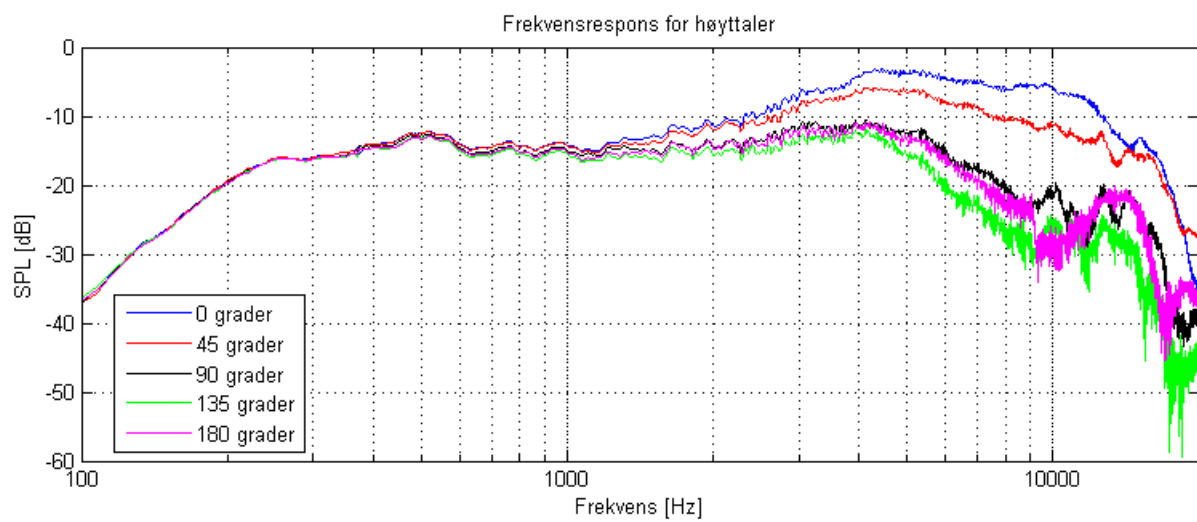
```

39 Adiv = zeros(1,num_receivers);
40 Abar = zeros(length(f),num_receivers);
41 Atot = zeros(length(f),num_receivers);
42
43 for i = 1:num_receivers
44     a(i) = abs(source(1) - receivers(i,1));
45     d(i) = sqrt((source(1) - receivers(i,1))^2 + (source(2) - ...
46         receivers(i,2))^2 + (source(3) - receivers(i,3))^2);
47     dss(i) = sqrt((O1(1) - source(1))^2 + (O1(2) - source(2))^2 + ...
48         (O1(3) - source(3))^2);
49     dsr(i) = sqrt((O2(1) - receivers(i,1))^2 + (O2(2) - ...
50         receivers(i,2))^2 + (O2(3) - receivers(i,3))^2);
51     z(i) = sqrt((dss(i) + dsr(i) + e)^2 + a(i)^2) - d(i);
52     Atot(:,i) = 10*log10(3 + ...
53         (40./lambda).*(1+(5/e).*lambda).^2)./(1/3 + ...
54         (5/e).*lambda).^2)*z(i));
55 end
56 % Innskuddstap for ISO 9613-2:
57 IL_ISO = Atot;

```

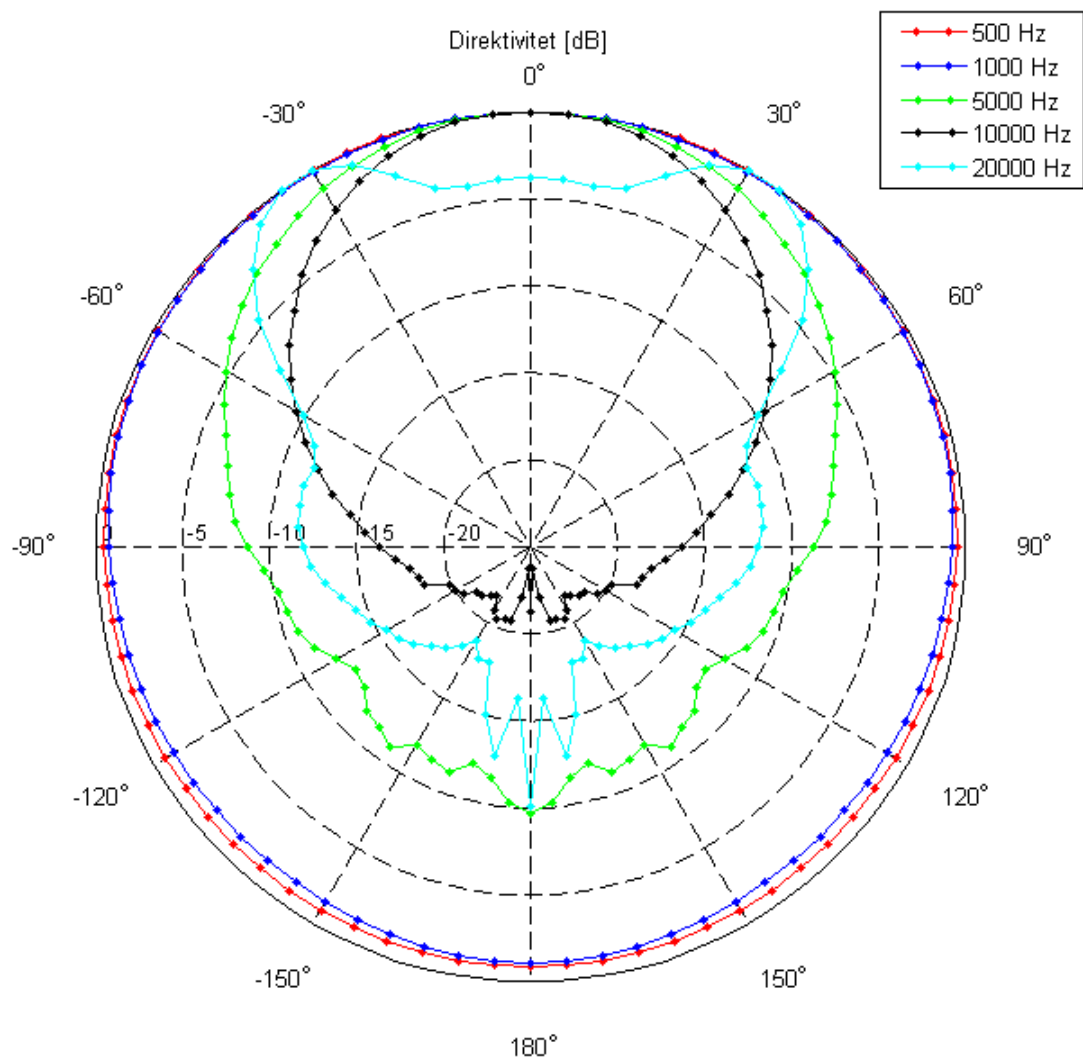
D | Høyttalerkarakteristikk

D.1 Frekvensrespons for høyttaler



Figur D.1: Frekvensrespons for høyttaler benyttet i målinger for ulike vinkler.

D.2 Direktivitet for høyttaler



Figur D.2: Direktivitet for høyttaler benyttet i målinger for ulike frekvenser. Verdiene er plottet fra normaliserte 1/3-oktavbåndsverdier.

E | Matematisk representasjon av kurver

E.1 Innskuddstap som funksjon av frekvens og avstand

E.1.1 Matematisk representasjon

På bakgrunn av resultatene tidligere i dette kapittelet er det forsøkt å gi generelle matematiske uttrykk for de ulike kurvene som beskriver innskuddstapet både som funksjon av frekvens og ulike kilde- og mottakerposisjoner. Det er kun i det todimensjonale tilfellet med totalabsorberende bakke at kurvene er enkle nok til å kunne uttrykkes matematisk. Det er ved hjelp av verktøykassen *Curve Fitting Toolbox* i MATLAB [16] funnet et uttrykk for innskuddstapet for en bygning med flatt tak på en absorberende bakke som funksjon av frekvens f og mottakeravstand fra bakken z . Dette uttrykket for innskuddstapet $IL(z,f)$ er presentert i ligning (E.1). Uttrykket er kun gyldig for $50\text{Hz} \geq f \geq 2000\text{Hz}$, og $0\text{m} \geq z \geq 5,9\text{m}$.

$$IL(z,f) = p_{00} + p_{10}z + p_{01}f + p_{20}z^2 + p_{11}zf + p_{02}f^2 + p_{30}z^3 + p_{21}z^2f + p_{12}zf^2 + p_{03}f^3 \quad [\text{dB}] \quad (\text{E.1})$$

Verdiene for koeffisientene i dette uttrykket er presentert i tabell E.1, der også 95% konfidensintervallet disse verdiene ligger innenfor er presentert som et mål på usikkerheten.

Tabell E.1: Koeffisientene i ligning (E.1) med tilhørende 95% konfidensintervall.

Koeffisient	Verdi	95% konfidensintervall
p_{00}	21,99	(21,73, 22,26)
p_{10}	-2.256	(-2,552, -1,961)
p_{01}	0,05414	(0,05328, 0,05501)
p_{20}	0,6624	(0,551, 0,738)
p_{11}	$-1,64 \times 10^{-5}$	(-0,0002699, 0,0002371)
p_{02}	$-3,863 \times 10^{-5}$	($-3,956 \times 10^{-5}$, $-3,77 \times 10^{-5}$)
p_{30}	-0.1184	(-0,1309, -0,1059)
p_{21}	-0.0001161	($-14,85 \times 10^{-5}$, $-8,367 \times 10^{-5}$)
p_{12}	2.641×10^{-7}	($1,74 \times 10^{-7}$, $3,542 \times 10^{-7}$)
p_{03}	9.518×10^{-9}	($9,216 \times 10^{-9}$, $9,821 \times 10^{-9}$)

Det er på tilsvarende måte funnet en funksjon for innskuddstapet som en funksjon av både kildens avstand fra bygningen y og frekvensen f . Ligning (E.2) viser denne funksjonen. Uttrykket er kun gyldig for $50\text{Hz} \geq f \geq 2000\text{Hz}$, og $3\text{m} \geq y \geq 25\text{m}$.

$$IL(y,f) = k_{00} + k_{10}y + k_{01}f + k_{20}y^2 + k_{11}yf + k_{02}f^2 + k_{21}y^2f + k_{12}yf^2 + k_{03}f^3 \quad [\text{dB}] \quad (\text{E.2})$$

Verdiene for de ulike koeffisientene i ligning (E.2) er presentert i tabell E.2, der også de tilhørende 95% konfidensintervallene er presentert.

Tabell E.2: Koeffisientene i ligning (E.2) med tilhørende 95% konfidensintervall.

Koeffisient	Verdi	95% konfidensintervall
k_{00}	21,73	(21,43, 22,02)
k_{10}	-0,7111	(-0,7541, -0,6681)
k_{01}	0,05349	(0,05266, 0,05432)
k_{20}	0,01501	(0,01353, 0,01649)
k_{11}	-0,0003833	(-0,0004473, -0,0003193)
k_{02}	$-3,594 \times 10^{-5}$	$(-3,673 \times 10^{-5}, -3,514 \times 10^{-5})$
k_{21}	$6,937 \times 10^{-7}$	$(-1,162 \times 10^{-6}, 2,549 \times 10^{-6})$
k_{12}	$1,333 \times 10^{-7}$	$(1,136 \times 10^{-7}, 1,53 \times 10^{-7})$
k_{03}	$8,525 \times 10^{-9}$	$(8,272 \times 10^{-9}, 8,777 \times 10^{-9})$

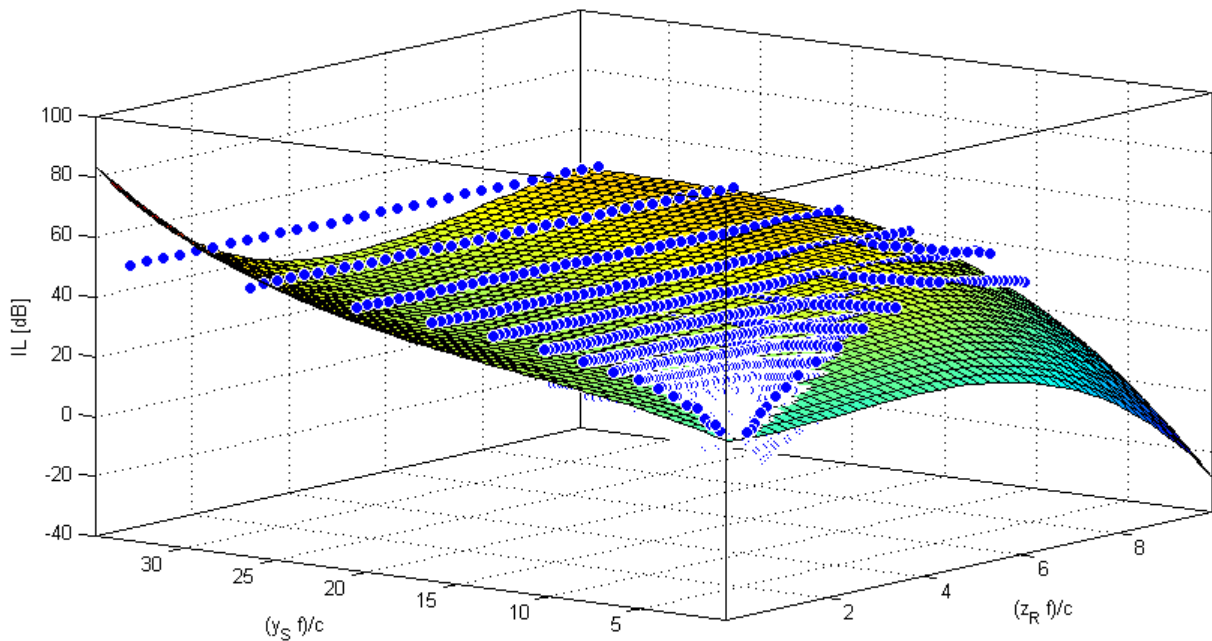
Disse uttrykkene er utledet for bygningsmodellen med dimensjonene som er oppgitt i figur 3.1 innledningsvis i kapittel 3, og er ingen generelle uttrykk som gjelder for alle tilfeller. Detaljene i utregningene av disse ligningene kan studeres i det påfølgende avsnittet med MATLAB-kode. Det er også forsøkt å finne en ligning på tilsvarende måte som uttrykker innskuddstapet som funksjon av både kildeavstanden y og mottakeravstanden z i tillegg til frekvensen f . Dette viste seg å ikke gi noen gode resultater for datasettene i denne oppgaven, noe som kan studeres videre i vedlegg E.2.

E.1.2 MATLAB-kode

```
1 % Beregning av polynom for innskuddstapet ved hjelp av fit()
2
3 % Henter inn data for innskuddstapet for varierende mottakerposisjoner:
4 load( IL_VarReceiver );
5 % z-posisjonene til mottakerposisjonene:
6 z_pos = linspace(0.01, 5.89, 100).;
7 % Frekvenser dette er beregnet for:
8 f = [50 63 80 100 125 160 200 250 315 400 500 630 800 1000 1250 1600 ...
      2000];
9
10 N1 = 98; % Utelater de to siste posisjonene
11 % Oppretter nye endimensjonale vektorer for variablene x, y, z, der
12 % x = Mottakerposisjonens høyde over bakken (z_R)
13 % y = Frekvens
14 % z = Innskuddstapet IL
15 x = zeros(1,17*N1);
16 y = zeros(1,17*N1);
17 z = zeros(1,17*N1);
18 for j = 1:17;
19     k = (j-1)*N1;
20     for i = 1:N1
21         z(k+i) = IL_VarReceiver(j,i);
22         x(k+i) = z_pos(i);
23         y(k+i) = f(j);
24     end
25 end
26 x = x. ;
27 y = y. ;
28 z = z. ;
29 % Benytter variablene x, y, z for å utlede et 3. grads polynom:
30 sf = fit([x,y],z, poly33 )
```

E.2 Innskuddstap som funksjon av både frekvens og kilde- og mottakerposisjon

Det er forsøkt å finne et uttrykk for innskuddstapet som funksjon av både frekvensen f , kildeavstand fra bygning y_S og mottakeravstand fra den bakre fasaden z_R . Dette er gjort på tilsvarende måte som i E.1, men da med de to aksene $(y_S f)/c$ og $(z_R f)/c$. Det ble da forsøkt å finne en funksjon for overflaten som dette resulterte i også ved hjelp av funksjonen `fit()` i MATLAB. Som figur E.1 viser, passer den estimerte flaten lite godt med verdiene som er vist som blå punkter.



Figur E.1: Forsøk på å finne et polynom som beskriver innskuddstapet som funksjon av både frekvens og kilde- og mottakerposisjoner.

F | Beregninger med EDBtoolbox

F.1 Konfigurasjonsfil for beregning av innskuddstap

F.1.1 Bygningsmodell med totalabsorberende bakke

```
1 % Setupfil for EdgeDiffraction toolbox for MATLAB
2 % Av Peter Svensson, modifisert av Vegard Wøllo
3
4 global FSAMP CAIR RHOAIR SHOWTEXT
5 FSAMP = 48000; CAIR = 344; RHOAIR = 1.21;
6 SHOWTEXT = 1;
7 Filepath = /EdgeDiffraction/
8 AbsorberendeBakke/FlattTak/Data-Fraktkasse15m_LinjeOppover/ ;
9 Filestem = mfilename;
10
11 % Input file
12 CADfile = /EdgeDiffraction/
13 AbsorberendeBakke/FlattTak/Kasse_15m.cad ;
14
15 % Calculation parameters
16 EDcalcmethod = n ;
17 directsound = 1;
18 specorder = 3; % irrelevant
19 difforder = 3; % irrelevant
20 elemsize = [1 0.71 0.71 0.35]; % irrelevant
21 nedgesubs = 2; % irrelevant
22 calcpaths = 1;
23 calcirs = 0;
24 calctfs = 1;
25 calcinteq = 1;
26 calcinteq_souterms = 1;
27 calcinteq_edgeterms = 1;
28 calcinteq_propagate = 1;
29 inteq_solmethod = 5;
30 inteq_niter = 20;
31 inteq_ngauss = 174;
32 inteq_discretizationtype = 2;
33 frequencies = [50 63 80 100 125 160 200 250 315
34               400 500 630 800 1000 1250 1600 2000];
35 open_or_closed_model = closed ;
36 int_or_ext_model = ext ;
```

```

37
38 % Sources and receivers
39 sources = [0 9 0.55];
40
41 antall_pos = 100; % Antall mottakere
42 nedre_z = 0.01;
43 ovre_z = 5.89;
44 z_pos = linspace(nedre_z, ovre_z, antall_pos).;
45 x_pos = 0;
46 y_pos = -3.3742;
47 receivers = zeros(antall_pos,3); % Vektor med mottakere
48 receivers(:,1) = x_pos;
49 receivers(:,2) = y_pos;
50 receivers(:,3) = z_pos;
51
52 % Extra parameters
53 skipcorners = 1000000; Rstart = 0; saveindividualdiffirs = [1 0];
54
55 % Beregning av innskuddstap (IL)
56 doplot=1;
57
58 if exist( doplot ) == 1
59     if doplot == 1
60         nreceivers = size(receivers,1);
61         nsources = size(sources,1);
62         p_tot = zeros(length(frequencies),nreceivers);
63         for j = 1:nreceivers
64             kildenr = int2str(j);
65             B = [];
66             for ii = 1:nsources
67                 II = int2str(ii);
68                 eval([ load ,Filepath,Filestem, _ ,II, _ ,kildenr, _tf.mat ])
69                 eval([ load ...
70                     ,Filepath,Filestem, _ ,II, _ ,kildenr, _tfinteq.mat ])
71                 B = [tfdirect tfgeom tfdiff(:,1) tfinteqdiff];
72                 p_onesource = cumsum(B(:,1:end).) .;
73                 p_onesource = p_onesource(:,end);
74                 if ii == 1
75                     p_allsources = p_onesource;
76                 else
77                     p_allsources = p_allsources + p_onesource;
78                 end
79             end
80             distances = EDBcalcdist(sources, receivers);
81             % Beregner fritt felts verdi pref:
82             pref = 1/distances(j)*exp(-1i*2*pi*frequencies / CAIR*distances(j));
83             % Beregner innskuddstapet:
84             p_tot_relative = pref./p_allsources;
85             p_tot(:,j) = p_tot_relative; % Innskuddstap for trykket
86         end
87     end
88 end

```

F.1.2 Bygningsmodell med totalabsorberende bakke

Ved beregning for bygningsmodellen plassert på en totalreflekterende bakke, må kodelinjene fra 63 til 85 i F.1.1 byttes ut med følgende kode:

```
1 for j = 1:nreceivers
2     kildenr = int2str(j);
3     B = [];
4     for ii = 1:nsources
5         II = int2str(ii);
6         eval([ load ,Filepath,Filestem, _ ,II, _ ,kildenr, _tf.mat ])
7         eval([ load ...
8             ,Filepath,Filestem, _ ,II, _ ,kildenr, _tfinteq.mat ])
9         B = [tfdirect tfgeom tfdiff(:,1) tfinteqdiff];
10        p_onesource = cumsum(B(:,1:end).) . . ;
11        p_onesource = p_onesource(:,end);
12
13        if ii == 1
14            p_allsources = p_onesource;
15        else
16            p_allsources = p_allsources + p_onesource;
17        end
18    end
19    distances = EDBcalcdist(sources,receivers);
20    pref = ...
21        1/distances(1,j)*exp(-1i*2*pi*frequencies / CAIR*distances(1,j)) ...
22        + 1/distances(2,j)*exp(-1i*2*pi*frequencies / CAIR*distances(2,j));
23    p_tot_relative = pref./p_allsources;
24    p_tot(:,j) = p_tot_relative;
25 end
```

F.2 Eksempel på fil som definerer en bygningsmodell

```
% .cad-fil for geometri brukt i beregninger med EDBtoolbox.  
% Todimensjonal bygningsmodell med flatt tak
```

```
%CORNERS
```

```
1 -7.5 -3.3 0  
2 7.5 -3.3 0  
3 7.5 3.3 0  
4 -7.5 3.3 0  
5 -7.5 -3.3 5.9  
6 7.5 -3.3 5.9  
7 7.5 3.3 5.9  
8 -7.5 3.3 5.9
```

```
%PLANES
```

```
1 / /TOTABS
```

```
1 4 3 2
```

```
2 / /RIGID
```

```
5 6 7 8
```

```
3 / /RIGID
```

```
1 2 6 5
```

```
4 / /RIGID
```

```
3 4 8 7
```

```
5 / /TOTABS
```

```
2 3 7 6
```

```
6 / /TOTABS
```

```
1 5 8 4
```

```
%SOURCES
```

```
0 OMNI:SDO
```

```
0.0000000 0.0000000 0.0001000
```

```
0.0000000 0.0000000 0.0000000
```

```
85.0 88.0 91.0 94.0 97.0 100.0
```

```
%RECEIVERS
```

```
1 0.0000000 0.0000000 10.0000000
```

```
%EOF
```