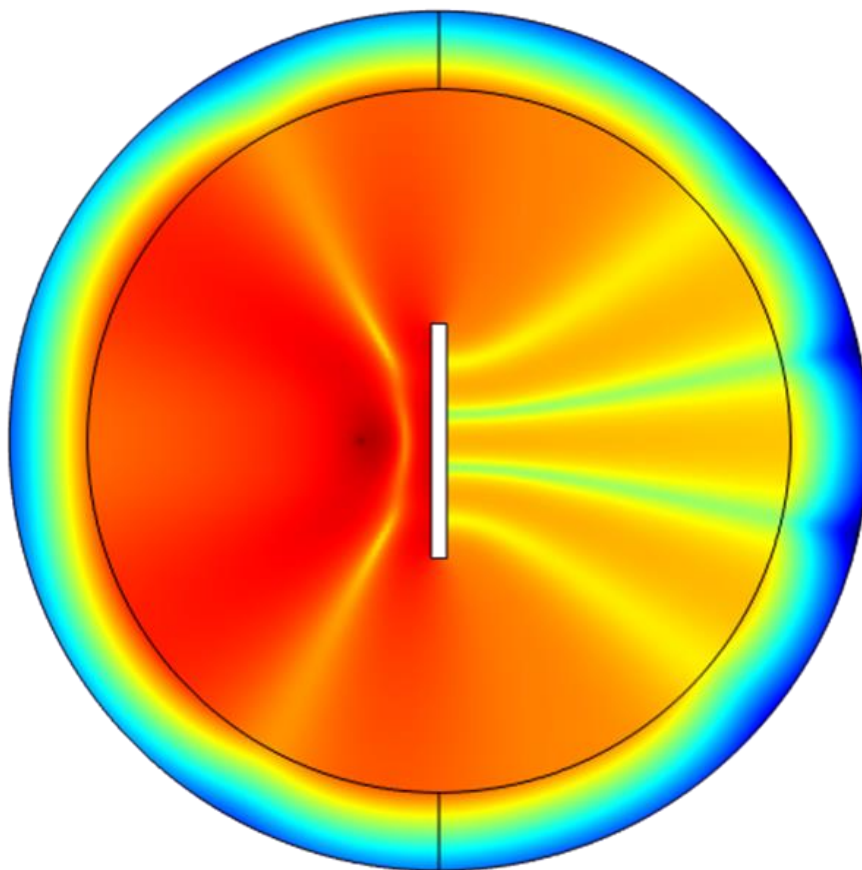




SINTEF



Rapport

Diffraksjonsmodell for overbygg på skytebanestandplass – Håndtering av absorberende flater

Forfatter(e):

Viggo Henriksen, Herold Olsen, Peter Svensson

Rapportnummer:

2023:00213 - Åpen

Oppdragsgiver:

Forsvarsbygg

Rapport

Diffraksjonsmodell for overbygg på skytebanestandplass – Håndtering av absorberende flater

EMNEORD

Akustikk, diffraksjon,
kildemodell, skytestøy

VERSJON

1.0

DATO

2023-02-10

FORFATTER(E)

Viggo Henriksen, Herold Olsen, Peter Svensson

OPPDRAGSGIVER(E)

Forsvarsbygg

OPPDRAGSGIVERS REFERANSE

Øystein Valdem

PROSJEKTNUMMER

102028169

ANTALL SIDER

15

SAMMENDRAG

En metode har blitt presentert for å beregne utstrålt lyd fra en lydkilde i et skytehus, modellert som en bygning med et rom, og store åpninger. Metoden er en utvidet kantdiffraksjonsmetode som kombinerer en kantdiffraksjonsmetode, som er gyldig for harde overflater, med en sekundærkildemetode slik at overflater med absorbentmaterialer kan håndteres. Metoden har blitt verifisert via sammenligning med en referansem metode, FEM implementert i COMSOL. Som verifikasjonsobjekt ble et eneste veggelement med en tynn impedansstripe brukt. I COMSOL ble en 2D-modell brukt, og med den utvidete kantdiffraksjonsmetoden ble en 2D-ekvivalent 3D-modell brukt. Beregningene ble sammenlignet i nærfeltet og fjernfeltet, og avvikene mellom resultatene var tilfredsstillende små; typisk innenfor ± 1 dB for frekvenser mellom 50 Hz og 1 kHz. Noen større avvik kunne konstateres, men disse skyldes sannsynligvis at litt krevende beregningsinnstillinger trengs for å simulere 2D-ekvivalente tilfeller i 3D.

UTARBEIDET AV

Viggo Henriksen

SIGNATUR

KONTROLLERT AV

Herold Olsen

SIGNATUR

GODKJENT AV

Stian Husevik Stavland

SIGNATUR

Historikk

VERSJON	DATO	VERSJONSBEKRIVELSE
1.0	2023-02-10	Endelig versjon

Innholdsfortegnelse

1	Innledning.....	4
2	Håndtering av absorberende flater i diffraksjonsmodell	4
3	Verifikasjon	6
3.1	Referanseløsning.....	6
3.2	Impedansrepresentasjon	6
3.3	Situasjon 1 – Impedansfelt i en hard vegg med uendelig utstrekning.....	7
3.4	Situasjon 2 - Impedansfelt i veggelement.....	9
4	Andre betraktninger	11
5	Sammendrag.....	13
	Referanser	13

BILAG/VEDLEGG

Klikk eller trykk her for å skrive inn tekst.

1 Innledning

Skytebanehus eller standplassoverbygg, hvor skyttere skyter fra en standplass med overbygning og vegger bak og på sidene, har stor innvirkning på avstrålt støy i fjernfeltet, spesielt bakover. Standplassoverbygg kan ha ulike utforminger. Den enkleste utformingen har bare tak og vegger bak og på sidene, men mer avanserte utforminger finnes, med fremstikk både over og på sidene av hver enkelt skytter. Fremstikkene reduserer lydavstrålingen i mange retninger, men medfører typisk en økt støybelastning på skytterne. Bruk av akustisk absorberende materialer på veggene er derfor viktig.

Dempningen som gis av standplassoverbygg med ulike utforminger blir vanligvis målt for å komme fram til korreksjonsfaktorer som kan benyttes ved beregning av støy fra skytebaner. Slike målinger er tidkrevende og kostbare og har også, ifølge Forsvarsbygg, vist seg å kunne gi tvetydige resultater. Målsetningen for dette prosjektet er derfor å utarbeide en modell som kan beregne dempningen som standplassoverbygg gir, slik at dette kan inkluderes i eksisterende beregningsverktøy for støy fra skytebaner. En slik modell vil i større grad enn målinger kunne gi generaliserbare resultater, frikoblet fra de lokale bakke- og terrengforhold. En slik modell vil også ha andre anvendelser enn standplassoverbygg. Et par slike eksempler er støyskjermer og balkonger.

Modellen som ble valgt som et utgangspunkt, er en kantdiffraksjonsmodell (ED) utviklet av Professor Peter Svensson, ved NTNU [1][2]. Peter Svensson deltar i prosjektet sammen med SINTEF og arbeider med utvidelse og tilpasning av kantdiffraksjonsmodellen. Kantdiffraksjonsmodellen er nøyaktig og ganske effektiv når det kommer til å beregne spredning fra harde objekter. Den er også godt egnet til å kobles til geometriske modeller for lydutbredelse. Det eksisterer også andre modeller som kunne ha vært benyttet (FEM, FDTD og BEM), men de er tyngre beregningsmessig og egner seg til dels dårlig til å koble til geometriske lydutbredelsesmodeller. For at kantdiffraksjonsmodellen skulle kunne benyttes til å modellere standplassoverbygg, måtte modellen utvides slik at den også håndterer absorberende flater. En metode med sekundære lydkilder for å representere absorberende flater (se avsnitt **Error! Reference source not found.**) er derfor implementert og testet. Dette arbeidet utgjør modul 1 i prosjektet og er beskrevet i denne rapporten. Det vil også bli skrevet en vitenskapelig publikasjon basert på dette arbeidet. Modul 2 er en opsjon i prosjektet som fordrer resultater fra modul 1 som viser at den utvidete kantdiffraksjonsmodellen er anvendbar til å beregne det spredte lydfeltet rundt standplassoverbygg med tilstrekkelig nøyaktighet. Modul 2 innbefatter en kilderepresentasjon og en implementering av modellen, som kan produsere kildedata som kan inkluderes i MilNoise. Arbeidet med modul 2 vil eventuelt starte tidlig i 2023 og skal være avsluttet innen 1. mai 2023.

I avsnitt **Error! Reference source not found.** i denne rapporten beskrives metoden med sekundære lydkilder som skal representere absorberende flater. I avsnitt 3 beskrives verifikasjonen av den utvidede kantdiffraksjonsmodellen gjennom sammenligning med resultater fra Finite Element Modelling (FEM) i COMSOL¹.

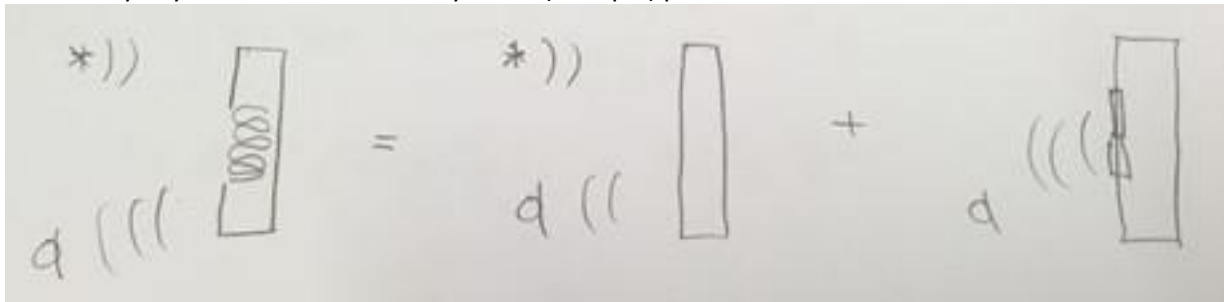
2 Håndtering av absorberende flater i diffraksjonsmodell

Absorberende flater blir representert med sekundære lydkilder (stempel) og da beregnes det spredte lydfeltet som:

$$p_{total} = p_{primary} + p_{secondary} \quad 2-1$$

¹ <https://www.comsol.com/>

Hvor $p_{primary}$ er det reflekterte lydtrykket fra en hard flate eller hardt objekt og $p_{secondary}$ er det avstrålte lydtrykket fra en sekundær lydkilde (stempel) på den absorberende flaten.



Figur 1: Illustrasjon av hvordan en absorberende flate i et hardt objekt erstattes med en kombinasjon av et hardt objekt og et hardt objekt med vibrerende stempler med tilpassede vibrasjonshastigheter.

Vibrasjonshastigheten til N sekundære lydkilder kan samles i en vektor, $\mathbf{u}_{secondary\ sources}$, og disse verdiene kan beregnes ved å sørge for at de oppfyller den ønskede impedansen på den absorberende flaten. Dette kan formuleres ved en matriseligning

$$\mathbf{p}_{at\ rigid\ secondary\ source} = (\mathbf{Z}_{front} + \mathbf{Z}_{desired}) \cdot \mathbf{u}_{secondary\ source} \quad 2-2$$

Hvor

- $\mathbf{p}_{at\ rigid\ secondary\ source}$ er en vektor med lydtrykksamplitudene ved de N sekundære lydkildene når de betraktes som harde, gitt av primærlydkilden, og disse lydtrykksamplitudene kan altså beregnes med metoden for harde flater
- $\mathbf{Z}_{front}$ er en matrise av størrelse (N,N) og representerer kryssresponsene fra alle sekundære kilder til alle andre sekundære kilder, når objektet er hardt
- $\mathbf{Z}_{desired}$ er en matrise, også av størrelse (N,N) , med den ønskede impedansen, som kan være et lokalt reagerende² eller et ikke-lokalt reagerende materiale. Hvis materialet modelleres som lokalt reagerende er denne impedansmatrisen helt enkelt en diagonalmatrise med den ønskete impedansverdien. For et ikke-lokalt reagerende materiale må verdiene i denne matrisen beregnes med en beregningsmetode som kan håndtere volumer som er fylt med absorbentmateriale, f. eks. FEM.
- $\mathbf{u}_{secondary\ source}$ er en vektor med N ukjente, som løses ved å inverttere matrisen $(\mathbf{Z}_{front} + \mathbf{Z}_{desired})$

Når $\mathbf{u}_{secondary\ source}$ er funnet, beregnes avstrålingen, $p_{secondary}$, med en metode for harde flater.

Denne beregningsmetoden krever altså at man innfører et antall, N , sekundærkilder i form av stempler, vanligvis rektangulære. Størrelsen på disse stemplene må velges slik at sidelengden har et forhold til den korteste bølgelengden man ønsker å studere. Det er ikke en enkel sammenheng som sier hvor mange elementer som trengs per bølgelengde da beregningene med kantdiffraksjonsmetoden kombinerer tre metoder som har forskjellige krav³. I ligning 2-2 kommer størrelsen på matrisene å øke med kvadratet av N , og beregningen av de N^2 verdiene i matrisen $\mathbf{Z}_{front}$ (og evt i $\mathbf{Z}_{desired}$, hvis man velger å studere ikke-lokalt reagerende materialer) vil være en signifikant del av beregningstiden for denne metoden. Det kan også

² I et lokalt reagerende materiale er inngangsimpedansen uavhengig av lydets innfallsvinkel. Lyden i et punkt på materialets overflate er dermed ikke avhengig av lyden i andre nære punkter på overflaten. Antagelse om lokalt reagerende materiale er en forenkling som ofte benyttes.

³ De tre metodene er speilkildemetoden for spekulære refleksjoner, første-ordens diffraksjon, og høyere-ordens diffraksjon. Resultatene fra disse tre metodene adderes til et meget nøyaktig sluttresultat.

konstateres at jo større andel av den totale overflaten som dekkes av absorberer, jo større blir også verdien på N . Omvendt, hvis en stor andel av den totale overflaten kan betraktes som hard, så er denne beregningsmetoden gunstig.

Metoden med å bruke sekundærkilder som eksiteres av lydtrykket ved en midlertidig hard overflate er en velkjent metode som har blitt brukt for å studere Helmholtz-resonatorer, enten enkle [3] eller i rom [4]; såkalte Head-related transfer functions [5], rom av forskjellige dimensjoner [6], og åpninger i tynne vegger [7]. Kombinasjonen av kantdiffraksjonsmetoden og sekundærkildemetoden vil bli beskrevet i en kommende tidsskriftsartikkel.

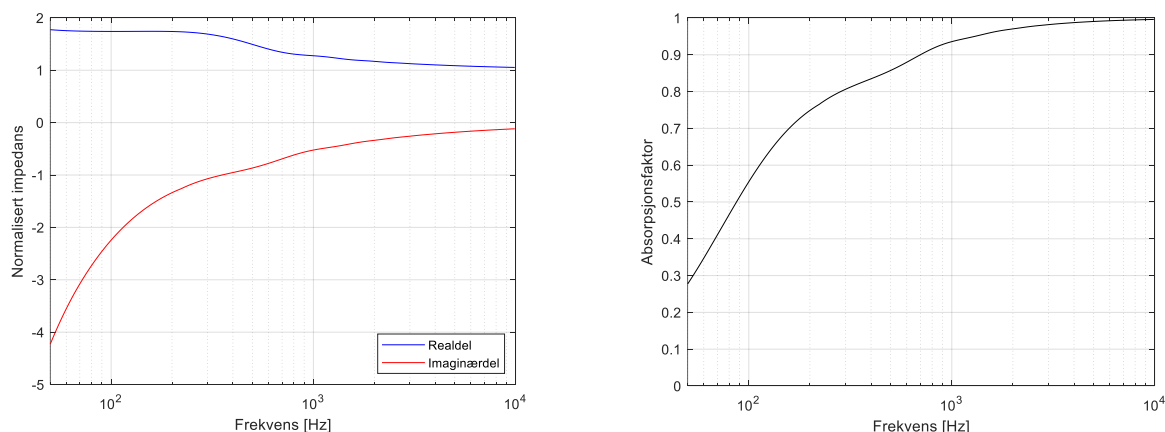
3 Verifikasjon

3.1 Referanseløsning

For å verifisere den utvidete kantdiffraksjonsmodellen, har resultatene for to referansesituasjoner blitt sammenlignet med resultater fra beregninger med FEM i COMSOL. På grunn av behovet for relativt store beregningsområder og høye frekvenser, så ville 3D simuleringer i COMSOL ha blitt alt for tunge å kjøre, selv på en kraftig stasjonær PC. Det ble derfor besluttet å kjøre simuleringene i 2D i COMSOL og motsvarende 2D-ekvivalente simuleringer (i 3D) i den utvidete kantdiffraksjonsmodellen. 2D-ekvivalente simuleringer i 3D betyr ideelt sett at man forlenger beregningsområdet, i den dimensjonen som skal ekskluderes, til uendelig lengde. Dette er naturlig nok ikke mulig og isteden må man finne ut hvor langt beregningsområde som kreves for å få god nok nøyaktighet. Dette medfører uansett i de fleste tilfeller tyngre beregninger i kantdiffraksjonsmodellen enn i typiske 3D oppsett, men det vil allikevel være mer gjennomførbart enn tilsvarende 3D simuleringer i COMSOL.

3.2 Impedansrepresentasjon

Som nevnt i avsnitt 2, så vil metoden med sekundærkilder fungere både for lokalt reagerende og ikke-lokalt reagerende materialer. I denne verifikasjonen ble bare lokalt reagerende materiale benyttet. Impedansen som ble benyttet, tilsvarte 20 cm tykk mineralull montert ved en hard vegg. Den komplekse impedansen til 20 cm mineralull ble beregnet ved hjelp av programmet NorFLAG⁴. Normalisert inngangsimpedans og absorpsjonsfaktor er vist i Figur 2. Det kan noteres at antakelsen om lokalt reagerende materiale blir gjort på samme måte i referanseløsningen (COMSOL) og i den utvidete kantdiffraksjonsmetoden.

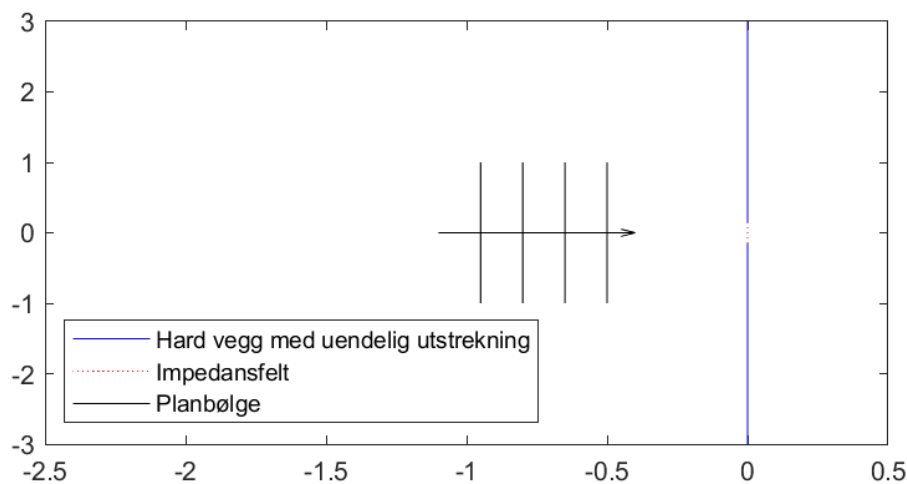


Figur 2: Normalisert (med p_c) inngangsimpedans (venstre) og absorpsjonsfaktor (høyre) for 20 cm mineralull som er montert ved en hard vegg.

⁴ https://web2.norsonic.com/product_single/norflag/

3.3 Situasjon 1 – Impedansfelt i en hard vegg med uendelig utstrekning

Den første referansesituasjonen, hvor resultater fra den utvidete kantdiffraksjonsmodellen ble sammenlignet med resultater fra FEM, var for et impedansfelt med høyde 0.3 meter, montert i en hard vegg med uendelig utstrekning (se illustrasjon i Figur 3). Når en uendelig vegg brukes så vil ikke diffraksjonsbidraget bli evaluert, men sekundærkildemetoden vil testes. Impedansen som er angitt i seksjon 3.2 ble benyttet for impedansfeltet. En planbølge med normalt innfall mot veggen ble benyttet som lydkilde i denne situasjonen.



Figur 3: Illustrasjon av beregningsoppsett i 2D snitt.

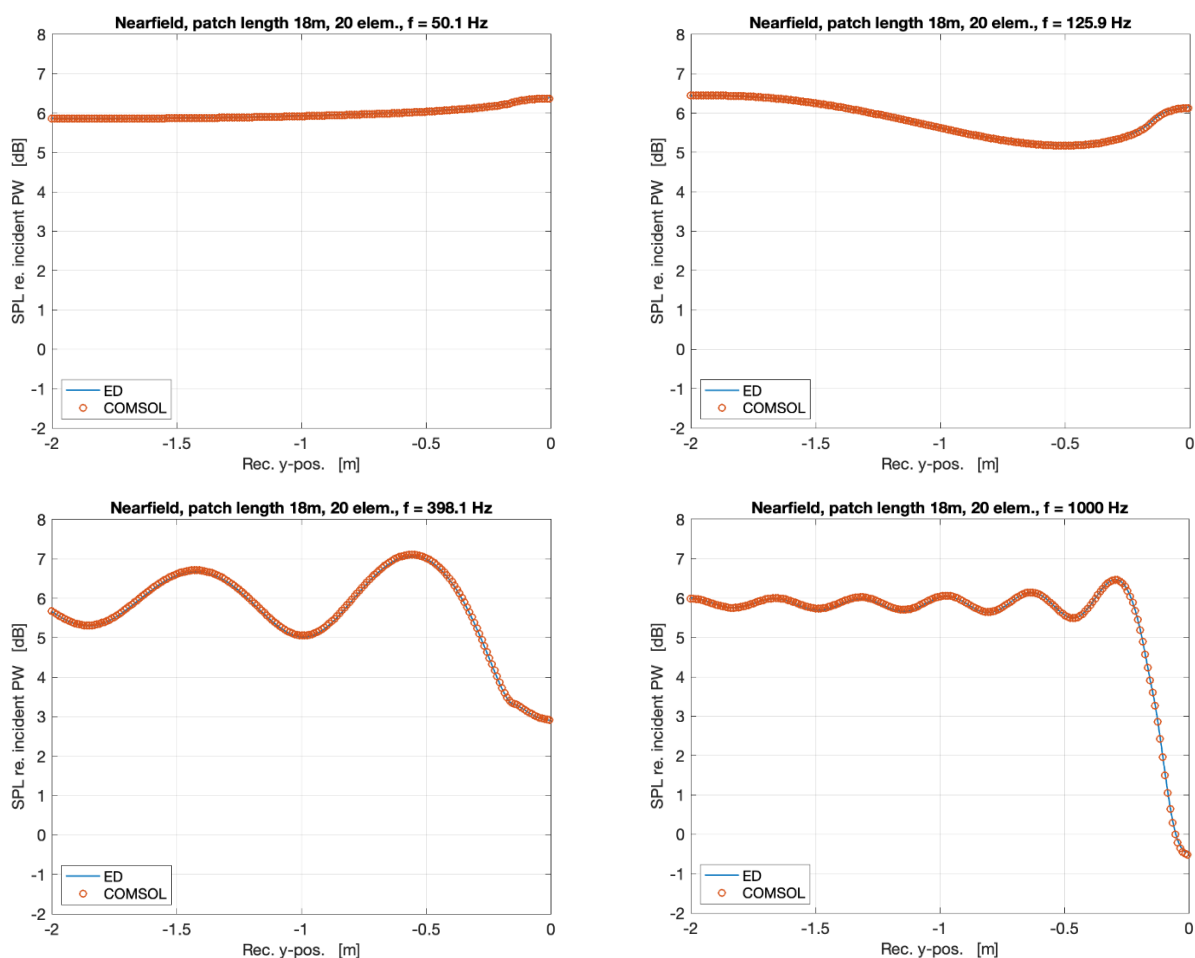
Mottakerpunkter ble plassert i henholdsvis 1 og 2 cm avstand fra veggen og ut til og med to meter ut til hver side for impedansfeltets midtpunkt. Hensikten med dette oppsettet er å sammenligne lydtrykket, partikkelhastigheten, og impedansen i lydfeltet nærme overflaten fra den utvidede kantdiffraksjons/sekundærkilde-modellen (ED) med resultatene fra referanseløsningen (FEM). I ED-modellen blir impedansfeltet delt inn i N striper, som vil fungere som stempelkilder. Disse stemplene vil altså ha en høyde på $0.3\text{m}/N$ og en lengde i den tredje dimensjonen på 9 m (frekvenser over 125 Hz) eller 18 m (frekvenser under 125 Hz). Beregninger ble gjort med forskjellige verdier på N .

I Figur 4 vises beregnet lydtrykk 1.5 cm fra veggen, fra 2 meter på ene siden av impedansfeltet («Rec y-pos = -2m») til midten av impedansfeltet («Rec y-pos = 0m»), for fire frekvenser, beregnet med FEM (COMSOL) og den utvidede kantdiffraksjonsmodellen (ED). Lydtrykksnivået i dB er relativt innfallende planbølgenivå. Lydtrykksnivået er for øvrig basert på (den komplekse) middelveiden mellom lydtrykksamplitudene i 1cm avstand og 2 cm avstand, hvilket effektivt sett tilsvarer lydtrykksamplituden i 1.5 cm avstand.

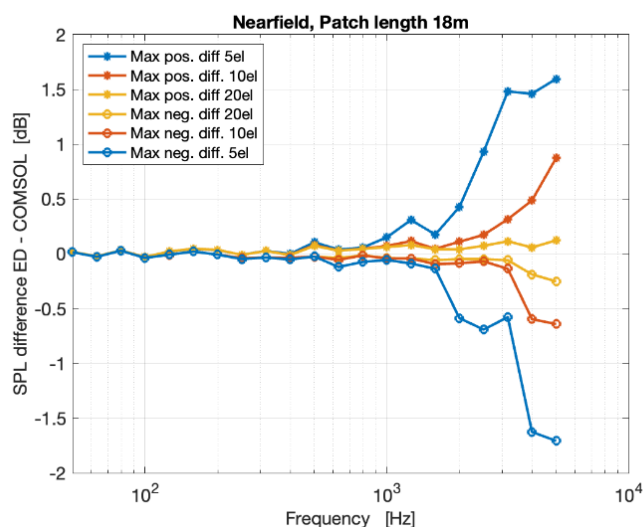
Resultatene viser at forskjellen i resultatene mellom FEM og kantdiffraksjonsmodellen er små, men at den øker med økende frekvens, når antall elementer per bølgelengde blir færre. I Figur 5 vises maksimums- og minimumsdifferansen som funksjon av frekvens for 5, 10 og 20 elementer fordelt over impedansstripen, dvs elementstørrelser på hhv. 60mm, 30mm og 15 mm. Den konsistent økende nøyaktigheten ved høye frekvenser når elementstørrelsen minsker verifiserer at sekundærkildemetoden fungerer som forventet. Det kan konstateres et lite avvik ved lave frekvenser ($\approx \pm 0.1$ dB) som ikke forsvinner når antall element øker. Forklaringen er sannsynligvis at den lange (18m), men ikke uendelig lange, impedansstripen vil gi små interferenseffekter som forventes å forsvinne dersom lengden på stripen økes.

Det kan også konstateres at den smale impedansstripen, som begynner i «Rec y-pos» = 0.15 m, påvirker lydtrykket i nærfeltet rundt Rec y-pos = 0m, men at man ser en ganske skarp overgang først ved 1 kHz.

Generelt varierer lydtrykksnivået rundt +6 dB, hvilket er den verdi som ville gjelde ved en helt hard overflate.



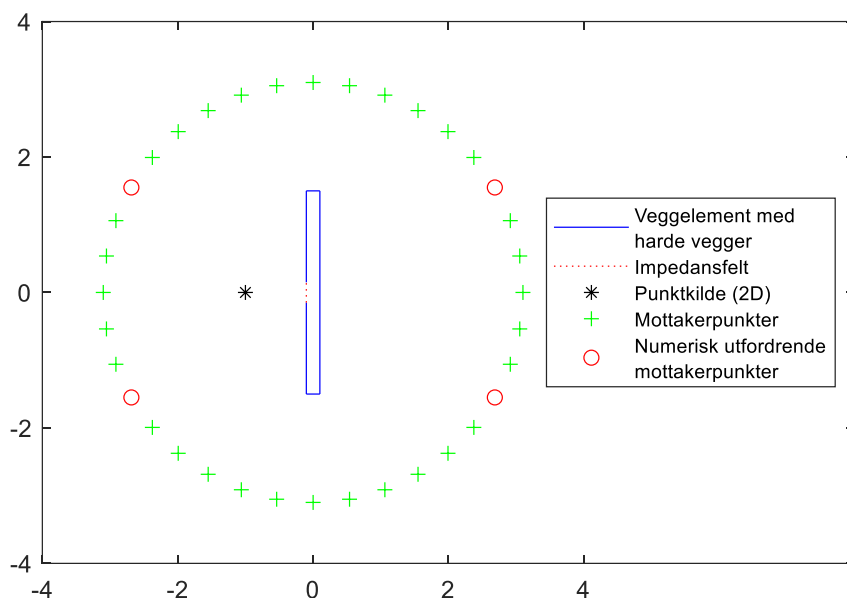
Figur 4: Lydtrykksnivå i 1.5 cm avstand fra vegg med 20 elementer ved impedansflaten, dvs 15mm høye elementer. Lydtrykksnivået er relativt til innfallende fritt feltsnivå.



Figur 5: Maksimalt avvik som funksjon av frekvens og for tre ulike elementstørrelser.

3.4 Situasjon 2 - Impedansfelt i veggelement

Den andre referansesituasjonen, hvor resultater fra den utvidede kantdiffraksjonsmodellen ble sammenlignet med resultater fra FEM, var for det samme impedansfeltet som i situasjon 1, med høyde 0.3 meter, montert i et hardt veggelement med høyde 3 meter og tykkelse 0.2 meter (se illustrasjon i Figur 6). Impedansen som er angitt i seksjon 3.2 ble benyttet for impedansfeltet. En punktkilde (2D)/linjekilde (3D), i avstand 0.9 meter fra veggelementets overflate og rett ut for senter av impedansfeltet, ble benyttet som lydkilde.



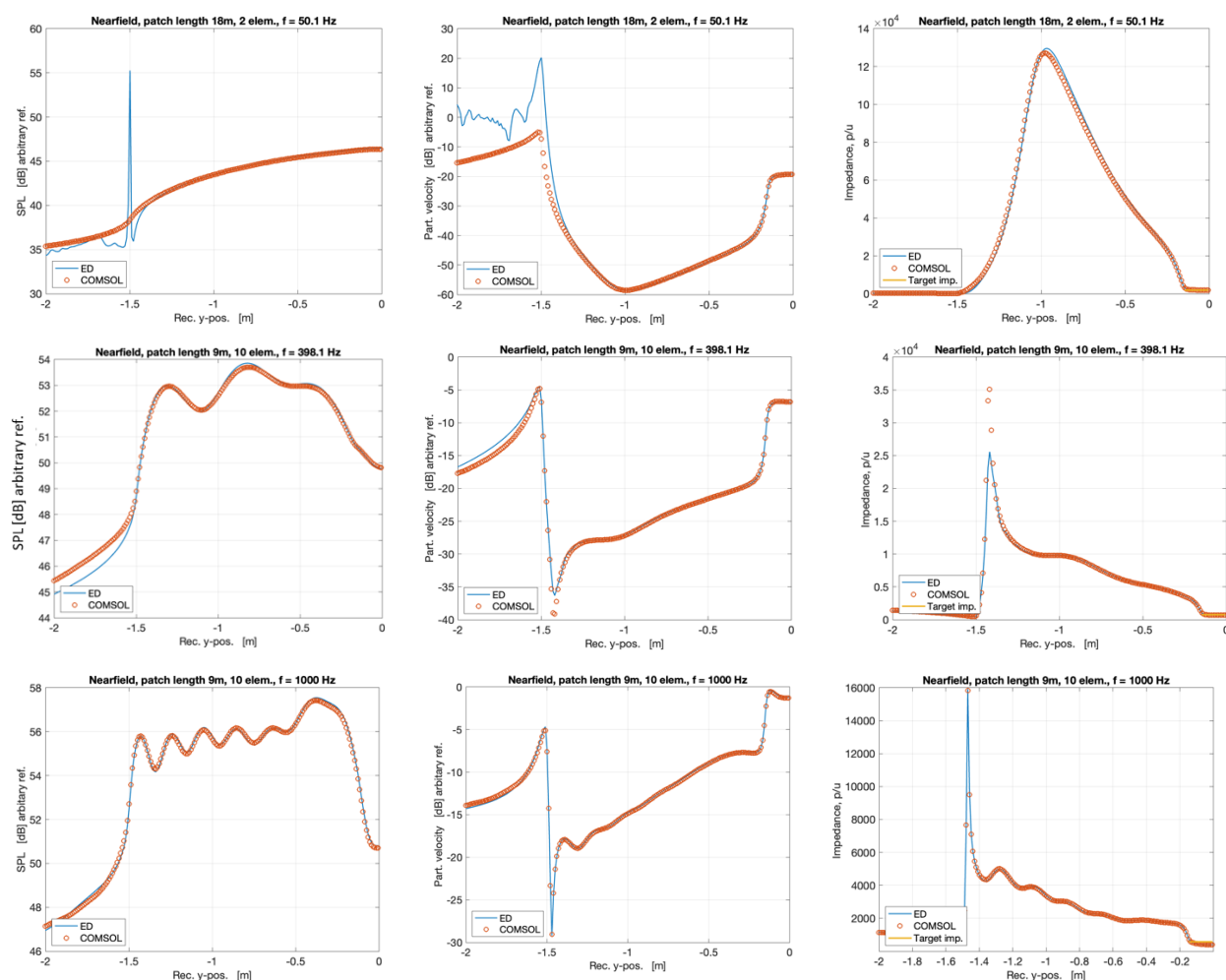
Figur 6: Illustrasjon av beregningsoppsett i 2D snitt.

I et første trinn ble nærfeltet studert, på lignende måte som i situasjon 1. Mottakerpunkter ble plassert i henholdsvis 1 og 2 cm avstand fra veggelementet og ut til og med to meter ut til hver side for impedansfeltets midtpunkt. Hensikten med dette oppsettet er som i situasjon 1 å sammenligne lydfeltet nærme overflaten fra den utvidede kantdiffraksjonsmodellen og fra referanseløsningen (FEM), men nå med diffraksjonsbidrag fra kantene. Det er da også mulig å beregne impedansen i lydfeltet nær overflaten, hvilket skal være likt den spesifiserte impedansen, like foran impedansstripen. I et andre trinn ble det plassert mottakerpunkter på en sirkel med radius 3.1 meter (se Figur 6: Illustrasjon av beregningsoppsett i 2D snitt. Figur 6), med sentrum i veggelementets midtpunkt. Hensikten med disse mottakerpunktene er å sammenligne det spredte lydfeltet fra den utvidede kantdiffraksjonsmodellen og fra referanseløsningen (FEM).

I figur 7 vises resultatene for det første trinnet, lydtrykksnivå (med en tilfeldig nivåreferanse), partikkelhastighet (i retningen normalt ut fra veggen) uttrykt i dB for en tilfeldig nivåreferanse, og impedansen, for tre forskjellige frekvenser, som funksjon av y-posisjon for mottakerpunkt, nært overflaten. Det er en tilfeldig valgt primærkildeamplitude men de to metodene er skalert til å gi sammenligningsbare resultat. For den laveste frekvensen, 50 Hz, ble et 18 m langt impedansfelt brukt, men for de høyere frekvensene ble et 9 m langt impedansfelt brukt. Videre ble det 30 cm høye impedansfeltet

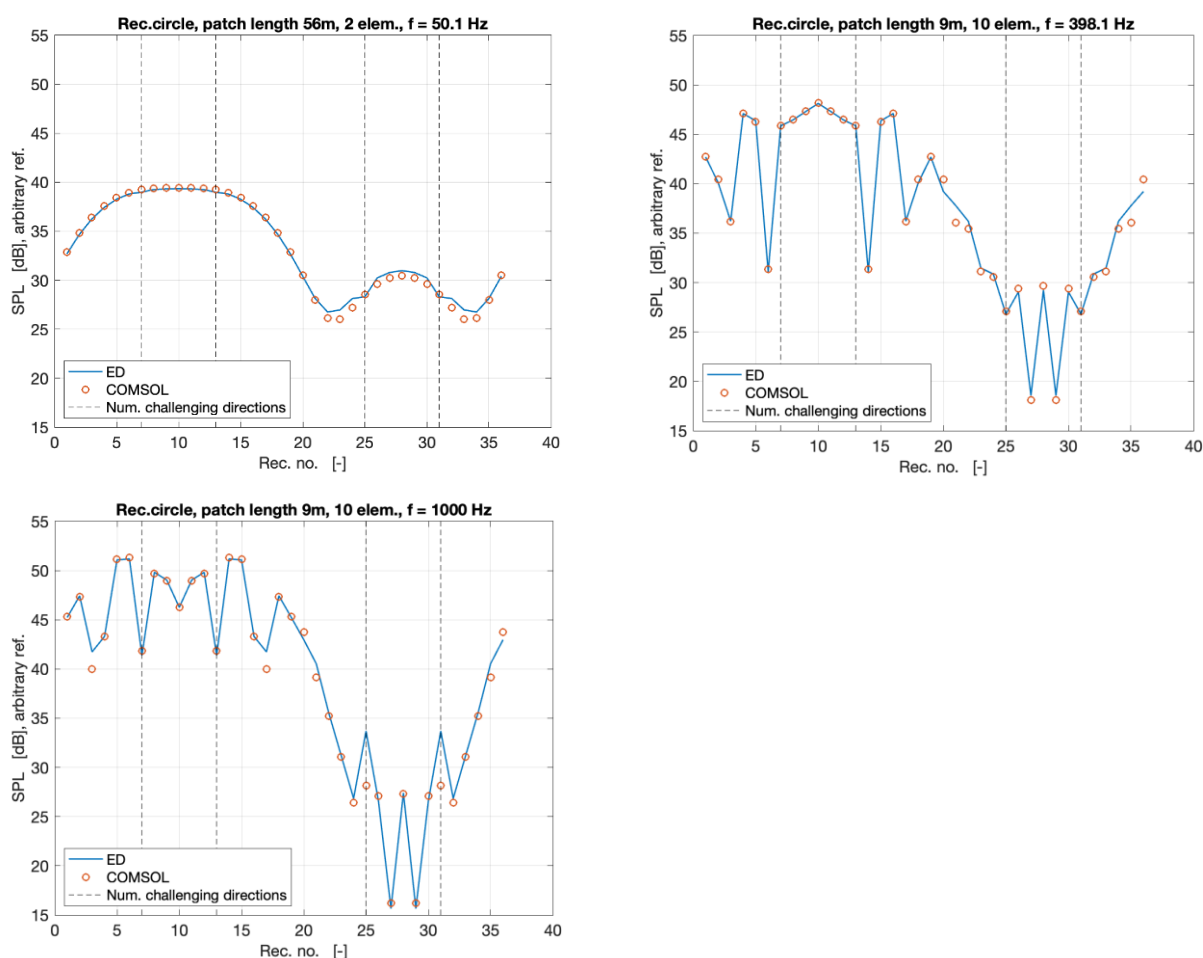
delt inn i 2 elementer for 50 Hz og 10 elementer for de to høyere frekvensene. Til sist ble det brukt en diffraksjonsorden på 12 for 50 Hz men kun diffraksjonsorden 1 for 400 Hz og 1000 Hz.

I figur 7 kan man observere et typisk avvik med kantdiffraksjonsmetoden for mottakerposisjoner som er meget nært kanten på boksen, rundt $y = -1.5\text{m}$. Det er spesielt ved 50 Hz at dette kan sees. Hvis en ønsker nøyaktige resultater veldig nært kanter på spredende objekter så må man øke beregningspresisjonen, og det er ikke gjort her. I øvrig er samsvaret mellom kantdiffraksjonsresultatene og COMSOL resultatene meget godt. Impedansresultatene viser at mellom $y = -0.15\text{m}$ og $y = 0\text{m}$ er lydfeltsimpedansen meget nært den ønskede/spesifiserte impedansen. Mellom $y = -1.5\text{m}$ og $y = -0.15\text{m}$ har impedansen en høy verdi. Umiddelbart ved veggene burde impedansen vært uendelig høy, men resultatene her viser lydfeltet 1.5 cm fra veggene, hvilket gjør at impedansen ikke kan være uendelig høy. Også ved frekvensen 1000 Hz er det meget godt samsvar mellom resultatene med de to metodene, selv med kun diffraksjonsorden 1.



Figur 7: Lydtrykksnivå, partikkelhastighet og impedans i 1.5 cm avstand fra veggene for 3 forskjellige frekvenser (50 Hz, 398 Hz, 1000 Hz). Impedansflaten var 18 m lang og diskretisert med 2 elementer (for 50 Hz) eller 9m lang og diskretisert med 10 elementer (for de høyere frekvensene). For 50 Hz bruktes en diffraksjonsorden på 12, for 398 Hz og 1000 Hz bruktes diffraksjonsorden 1.

I det andre trinnet ble så lydtrykket beregnet i 36 mikrofonsposisjoner rundt boksen, som kan sees i figur 6⁵. For nærfeltet, med resultatene som ble presentert i figur 7, trengtes ikke mer enn diffraksjonsorden 1 for å nå god nøyaktighet ved de høyere frekvensene. Det kan noteres at det er nødvendig med høyere diffraksjonsorden for å kunne beregne det spredte lyden i alle retninger. Figur 8 viser lydtrykksnivå (igjen med en tilfeldig valgt referanseverdi) beregnet med FEM (COMSOL) og den utvidete diffraksjonsmetoden, for de samme frekvensene som i nærfeltet (figur 7). For resultatene i figur 8 ble det brukt en diffraksjonsorden på 8. Impedansfeltet var nå 56 m langt og delt inn i 2 felt (50 Hz) eller 9 m langt og delt inn i 10 felt (398 Hz og 1000 Hz). I figur 8 markeres også fire mottakerposisjoner som er numerisk mer utfordrende fordi de ligger veldig nært boksens «forlengede plan». Dette er en kjent utfordring for diffraksjonsmetoden og kan løses med en litt annen versjon av metoden, som dog ikke er brukt her [8]. I enkelte posisjoner som ikke tilhører de kjente utfordrende posisjonene kan det noteres avvik på noen få dB. Det kan trenge noe mer finjustering av beregnings parameterne for disse posisjonene.



Figur 8: Lydtrykksnivå i en sirkel rundt boksen med et impedansfelt, som vises i figur 6, for tre frekvenser (50 Hz, 398 Hz, 1000 Hz).

⁵ Mottakerposisjon 1 er rett opp og deretter økende nummerering mot klokken, slik at mottakerposisjon 10 eksempelvis er rett til venstre.

4 Andre betraktninger

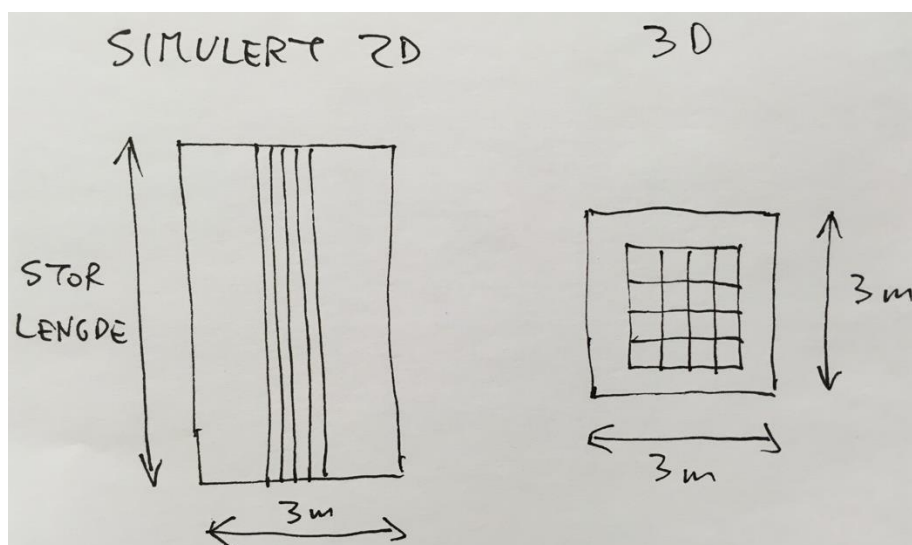
Som nevnt over er de presenterte resultatene å betrakte som spesialtilfeller for den utvidete kantdiffraksjons-modellen, illustrert til venstre i figur 9. Videreutviklingen av metoden vil håndtere virkelige 3D-objekter, som vist til høyre i figur 9. Antall delement ved impedansoverflatene påvirker beregningstiden betraktelig. Som vist i figur 5, så vil elementstørrelsen påvirkes av frekvensen, og for lave frekvenser trengs færre elementer enn for høye frekvenser.

Det valgte objektet er en tynn boks, som en type veggelement, med 20 cm tykkelse. I verifikasjons-simuleringene ble boksen modellert nettopp som en boks med 20 cm tykkelse, men det vil med kantdiffraksjonsmetoden være mye mer beregningseffektivt å modellere boksen som uendelig tynn. En slik tynnplate-antakelse vil gi meget små forskjeller fra de nøyaktige resultatene, men vil være mer effektivt.

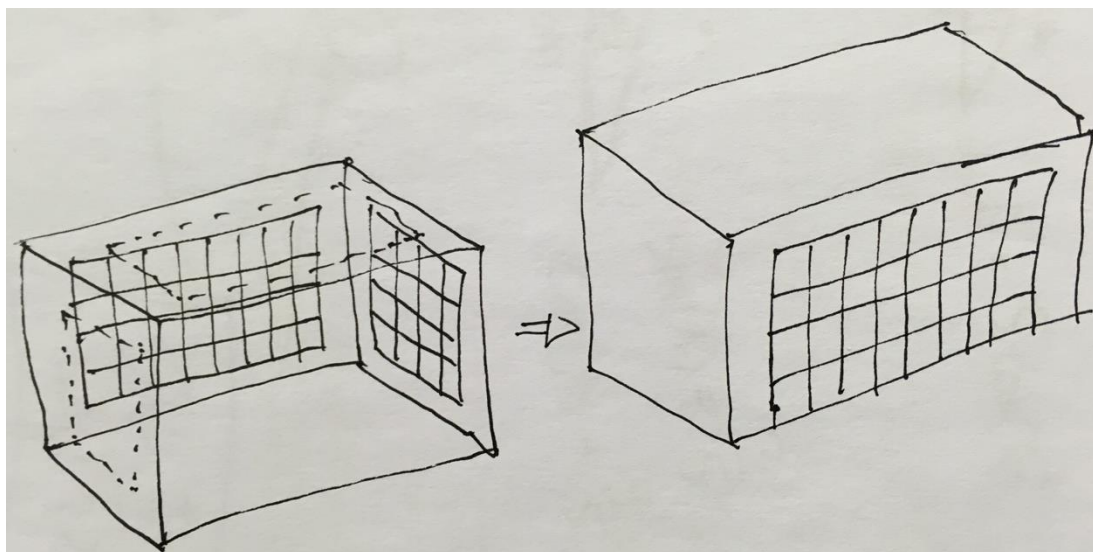
Når flere veggelement kobles sammen til et skytehus kan det illustreres som i venstre del av figur 10. Det åpne rommet kan utad representeres med en hard boks med sekundærkilder i åpningen, se til høyre i figur 10. For situasjonen til høyre vil sekundærkildene «oppleve» den utvendige siden som en hard boks, og den innvendige siden som et rom med delvis absorberende vegger og delvis harde vegger. Dette rommet kan i sin tur modelleres med kjente uttrykk for et rektangulært rom med harde vegger og sekundærkilder hvor det trengs [4]. Det vil altså bli en sekundærkildemodellering i to trinn.

For den utvendige modellen, til høyre i figur 10, kan altså sluttresultatet beregnes: utstrålt lyd i alle retninger. Det kan noteres at hvis lydkildene er inne i rommet vil utstrålt lyd være gitt av kun sekundærkildebidragene. Sekundærkildene vil være plassert på den harde eksteriørboksen av samme form som skytehuset, og utstrålingen beregnes med hensyn tatt til diffraksjonen rundt huset.

Ytterligere en lydtransmisjonsmekanisme kan håndteres separat: transmisjon via vibrasjoner i veggelementene. Disse lydbidragene kan beregnes med vanlige metoder for lydtransmisjon gjennom store veggelementer, f.eks. med programvaren NorFlag [9]. Situasjonen her er litt mer kompleks enn vanlige tilfeller i bygningsakustikk da rommet ikke har et diffust lydfelt. Lydkilden betraktes som en punktkilde og bidraget kan estimeres som et direktelydsbidrag med forskjellige transmisjonsvinkler gjennom veggen til de utvendige retningene. Transmisjonen via vibrasjoner i veggen kan adderes ukorrelerert til bidragene som beregnes med den utvidete kantdiffraksjonsmodellen.



Figur 9: Verifikasjonssituasjonene er «simulert 2D», illustrert til venstre. Virkelige 3D-fall vil isteden fungere som vist til høyre.



Figur 10: Et skytehus, forenklet illustrert til venstre, kan eksteriørt representeres som til høyre, med sekundærkilder i åpningen.

5 Sammendrag

En metode har blitt presentert for å beregne utstrålt lyd fra en lydkilde i et skytehus, modellert som en bygning med et rom, og store åpninger. Metoden er en utvidet kantdiffraksjonsmetode som kombinerer en kantdiffraksjonsmetode, som er gyldig for harde overflater, med en sekundærkildemetode slik at overflater med absorbentmaterialer kan håndteres. Metoden har blitt verifisert via sammenligning med en referansem metode, FEM implementert i COMSOL. Som verifikasjonsobjekt ble et eneste veggelement med en tynn impedansstripe brukt. I COMSOL ble en 2D-modell brukt, og med den utvidete kantdiffraksjonsmetoden ble en 2D-ekvivalent 3D-modell brukt. Beregningene ble sammenlignet i nærfeltet og fjernfeltet, og avvikene mellom resultatene var tilfredsstillende små; typisk innenfor ± 1 dB for frekvenser mellom 50 Hz og 1 kHz. Noen større avvik kunne konstateres, men disse skyldes sannsynligvis at litt krevende beregningsinnstillinger trenges for å simulere 2D-ekvivalente fall i 3D.

Referanser

- [1] A. Asheim, U. P. Svensson, "An integral equation formulation for the diffraction from convex plates and polyhedra," J. Acoust. Soc. Am. 133, pp. 3681-3691 (2013).
- [2] U. P. Svensson, "Edge diffraction toolbox," <https://github.com/upsvensson/Edge-diffraction-Matlab-toolbox> (2022).
- [3] C. Zwikker, C. W. Kosten. Sound absorbing materials. Elsevier publishing company, 1949.
- [4] P. Sjösten, U. P. Svensson, B. Kolbrek, and K. B. Evensen: "The effect of Helmholtz resonators on the acoustic room response," Proc. of BNAM 2016, Stockholm, 20-22 June, (2016).

- [5] D. Hammershøi, H. Møller: "Sound transmission to and within the human ear canal," J. Acoust. Soc. Am. 100, pp. 408-427 (1996).
- [6] G. Pavic, L. Du: "Modelling of multi-connected acoustical spaces by the surface impedance approach," Proc. Internoise 2016, (2016).
- [7] U. P. Svensson, S. Sohrabi, "Modeling sound transmission through apertures with diffraction," Proc. Internoise 2022, (2022).
- [8] S. R. Martin, U. P. Svensson, J. Slechta, and J. O. Smith: "Modeling sound scattering using a combination of the edge source integral equation and the boundary element method," J. Acoust. Soc. Am. 144, pp. 131-141 (2018).
- [9] https://web2.norsonic.com/product_single/norflag/