

FASADERS STØYISOLERING MOT VEGTRAFIKKSTØY

Knut Haugen

Master i kommunikasjonsteknologi

Oppgaven levert: Januar 2007

Hovedveileder: Arild Brekke, IET

Biveileder(e): Sigmund Olafsen, Brekke og Strand Akustikk

Oppgavetekst

Fasaders støyisolering mot vegtrafikk beregnes av de fleste konsulenter og utbyggere ved hjelp av Byggforsk "Håndbok 47 - Isolering mot utendørs støy". Denne er basert på standardiserte støyspektra fra trafikk og laboratiemålte data for reduksjonstall for vinduer, veggfelt og ventiler. Beregninger og data for vegtrafikkstøy i Håndbok 47 baserer seg på bruk av ett-tallsbetegnelsen $R_w + C_{tr}$. Oppgaven går ut på å undersøke hvor realistisk det er å benytte laboratiemålte data i beregninger som dette, og i hvilken grad ett-talls karakteristikken gir en tilstrekkelig dekkende beskrivelse av den aktuelle situasjonen som beregnes

Målte felldata i database ved Brekke og Strand Akustikk vil være tilgjengelig. I tillegg vil det være aktuelt å gjøre supplerende feltmålinger. Det skal også gjøres teoretiske beregninger av lydisolering for laboratorie- og felldataene. Spesiell oppmerksomhet vies identifisering av problematiske frekvensområder i lydisolasjonskurvene i forhold til vegtrafikkstøyspekteret. Hovedvekt legges på undersøkelser av lavfrekvensforhold og hvorvidt "diper" i lydisolasjonskurvene er de samme ved feltmålinger som ved laboratiemålinger.

Oppgaven gitt: 04. september 2006

Hovedveileder: Arild Brekke, IET

Sammendrag

Støy fra vegtrafikk er et omfangsrikt miljøproblem som berører mange mennesker. Boligfortetting i bynære størk og trafikkvekst medfører at antallet som bor i støyutsatte områder øker. God lyddemping i fasaden er et viktig tiltak for å begrense støyplagen.

Nøyaktige beregninger av lydisolasjon er nødvendig i prosjektering av nybygg og for å bestemme innendørs støynivå i eksisterende bygninger. Beregninger av støyisolering gjøres i dag ved hjelp av Byggforsk - *Håndbok 47 - Isolering mot utendørs støy*. Denne benytter seg av ett-tallsbetegnelsen $R_w + C_{tr}$ som er reduksjonstallet til et bygningselement korrigert for vegtrafikk som støykilde.

Gjennom arbeidet med oppgaven har det kommet frem at bruken av ett-tallsverdier ikke alltid vil gi en tilstrekkelig beskrivelse av den aktuelle støysituasjonen. Gjennom teoretiske beregninger og eksperimentelle etterprøvinger med feltmålinger blir det vist at man med god sikkerhet kan estimere topper og dipper i utendørs støyspektrum og lydisolasjonskurven. Ved å presentere resultatene på spektrumsform vises det i oppgaven at man slik kan hente betraktelig mer informasjon om hvordan lydisolasjonen vil oppleves enn om man kun har en ett-tallsverdi å forholde seg til.

Det er gjennomført en analyse av 13 nivå-differansemålinger hvor beregnede og avleste verdier fra isolasjonskurvene viser at vinduets lydisolerende egenskaper kan være avgjørende for en fasades totale lydisolasjon. Det er også gjennomført intensitetsmålinger av vindu i forhold til veggfelt som viser at vinduet har en høyere lydtransmisjonen i frekvenser over 100 Hz.

For vinduer vises det at det er antall glass, tykkelsen på glassene og avstanden mellom glassene som har størst innflytelse på lydisolasjonen. Svært karakteristisk for glassvinduer er en distinkt reduksjon i lydisolasjonen i frekvensområder rundt dobbeltveggresonansen. Dobbelveggresonansen inntreffer gjerne i frekvensområdet 100 - 250 Hz og er gitt av glassets flatemasse (tykkelse multiplisert med tetthet) og kan beregnes ved hjelp av denne likningen:

$$f_0 = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_0(m_1 + m_2)}{m_1 m_2 d}} \approx 60 \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2 d}} \quad (1)$$

Det er vist god sammenheng mellom teoretiske utregninger av dobbeltveggresonansen og målte resultater fra feltmålinger.

For bygninger hvor det settes høye krav til lydisolasjon er det vanlig å utbedre vinduene ved å øke flatemassen ved å bruke tykkere glass eller ved å bruke laminerte glass samtidig som man øker hulrommet mellom glassene. I oppgaven vises at en slik fremgangsmåte vil kunne ha uheldige konsekvenser dersom dobbeltveggresonansen sammenfaller med topper i utendørs støyspektrum.

Med bakgrunn i analytiske beregningsmodeller for lydisolasjon blir det presentert et verktøy som kan brukes til å estimere en fasades lydisolasjon basert på flere delelementer samtidig som man på en enkel måte kan detektere kritiske frekvensområder med lav lydisolering.

Forord

Oppgaven er utført høsten 2006 som siste del av studiet ved Institutt for elektronikk og telekommunikasjon ved Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet, NTNU, med studieretning signalbehandling og kommunikasjon. Oppgavens tema er akustikk og lydisolasjon og omhandler fasaders lydisolasjon med hensyn på støy fra vegtrafikk. Faglærer har vært Arild Brekke og veileder har vært Sigmund Olafsen.

En stor takk til alle i Brekke og Strand Akustikk for å ha lagt til rette for at jeg kunne jobbe i deres lokaler, og for hyggelig samvær og gode råd underveis. En spesiell takk til veileder Sigmund Olafsen som med smittende entusiasme har vært til stor hjelp under hele arbeidet.

Innhold

1	Innledning	1
1.1	Bakgrunn og motivasjon	1
1.2	Problemstilling og begrensninger	2
1.3	Disposisjon av rapporten	2
2	Støy	4
2.1	Støyens innvirkning på mennesker	4
2.2	Lovverk og retningslinjer mot støy	4
2.2.1	Retningslinje for behandling av støy i arealplanlegging, T-1442	5
2.2.2	Teknisk forskrift og NS 8175:2005	5
2.2.3	Forurensningsforskriftens kapittel 5 Støy	6
2.3	Vegtrafikkstøy	6
3	Fasaders lydisolering	10
3.1	Boligpris og støy	10
3.2	Bolig og støyreducerende tiltak	10
3.3	Fasaders elementvise oppbygning	11
3.3.1	Vegg	11
3.3.2	Vindu	12
3.3.3	Ytterdør	14
3.3.4	Ventilasjon	14
4	Teori	15
4.1	Måling av fasadeisolasjon	15
4.1.1	Reduksjonstall	15
4.1.2	Nivådifferanse	16
4.1.3	Beregning med flere elementer	16
4.2	Ett-tallskarakteristikker av lydisolering	17
4.3	Beregningsmodeller for lydtransmisjon	19
4.3.1	Glassvindu, referanser og materialparametre	20
4.3.2	Enkeltpaneler	20
4.3.3	Dobbelpaneler	23
4.3.4	Trippelpaneler	27

4.3.5	Modal analyse	27
4.3.6	Rommets innvirkning på lydisolasjonen	30
4.4	Veiekurver	32
5	Metode	34
5.1	Håndbok 47	34
5.2	Programvare til utregning av lydisolasjon	35
5.3	Forslag til analytisk-empirisk beregningsmodell	35
5.3.1	Bakgrunn	35
5.3.2	I bruk	36
6	Resultater	39
6.1	Analyse av fasadeisolasjonsmålinger	39
6.2	Intensitetsmåling av fasadeelementer	39
6.3	Fasadeisolasjonsmålinger	41
6.3.1	Måling 1: Hyttevegg	42
6.3.2	Måling 2: De nye Grønlandskvartalene	45
6.4	Vibrasjonsmålinger	45
7	Diskusjon	48
7.1	Kommentarer til resultatene	48
7.2	Dagens metode, Håndbok 47	48
7.2.1	Dagens metode i praksis	49
7.2.2	Om bruk av ett-talls karakteristikken	49
7.2.3	Om bruk av laboratoriemålte data for reduksjonstall	50
7.3	Tiltak for utbedring av lydisolasjon i vindu	50
7.4	Bruk av veiekurver	51
7.5	Bruk av foreslått beregningsmetode	51
7.5.1	Feilkilder	51
8	Konklusjon	53
9	Arbeid videre	55
9.1	Videre arbeid	55
9.2	Auralisering og lyttetester	56
9.3	Utvidelse og utvikling av programvare	56
	References	60
A	Tiltak for å redusere vegtrafikkstøy	61
B	Målinger	63
B.1	Intensitetsmålinger	63
B.2	Vibrasjonsmålinger/målinger	64
B.2.1	Beskrivelse av målingen	64
B.3	Fasadeisolasjonsmålinger	65

B.4 Lydopptak	66
C Kildekode	69

Figurer

1.1	Fordeling av støyplageindeks (SPI) fra forskjellige støykilder (tall fra 2003)	1
1.2	Disposisjon av arbeidet	3
2.1	Støykilder på kjøretøy	7
2.2	Frekvensspekter, vegtrafikk 20m fra mottaker med hastighet 60-70 km/t. 11 målinger	8
2.3	Støynivå fra motor- og dekkstøy	9
2.4	Senterfrekvens av motorstøy	9
3.1	Faktorer som virker inn på lydisolasjon i fasade	12
3.2	Lydoverføring gjennom vindu	13
4.1	Feltmålt nivåddifferanse med forskyvet og opprinnelig referansekurve, $D'w = 36dB$	18
4.2	Lydspektre for beregning av omgjøringstall	19
4.3	Reduksjonstallet for enkeltpanel	21
4.4	Grensefrekvens av glass med forskjellig tykkelse	22
4.5	Målte og beregnede verdier av reduksjonstall for glass av ulike tykkelser	24
4.6	Reduksjonstall beregnet med forenklet metode og <i>Insul</i>	25
4.7	Dobbeltveggresonans for to-lags isolèrvindu	26
4.8	Dobbeltveggresonans for to-lags isolèrvindu med laminert glass på en side	27
4.9	Målt og beregnet reduksjonstall for dobbeltpanel	28
4.10	Målt og beregnet reduksjonstall for dobbeltpanel	29
4.11	Modfordeling i 1/3 oktavbånd for glass med tykkelse 4mm og sider 1.48m og 1.25m	30
4.12	Modfordeling i 1/3 oktavbånd for rommoder i rom med dimensjoner 6,2 m, 4,1 m og 2,5 m	31
4.13	Phonkurver etter ISO 226	32
4.14	Korreksjonskurver for A- og C-veiing	33
5.1	Utsnitt av skjerm bilde av foreslått metode, beregninger	37
5.2	Utsnitt av skjerm bilde av foreslått metode, resultater	38
6.1	Måling av intensitet fra vegg- og vinduselement	41
6.2	Lydtryknivåddifferanse hyttevegg, åpen og lukket luftespalte	42

6.3	Fouriertransformasjon av lydsignal i MATLAB, tidsmidlet over hele perioden	43
6.4	Fouriertransformasjon av lydsignal i MATLAB, utsnitt	44
6.5	Fouriertransformasjon av lydsignal i Adobe Audition, utsnitt	44
6.6	Lydtrykknivådifferanse boligblokk, umøblert soverom, $D'_{ls,2m,w} = 48$. . .	45
6.7	Lydtrykknivådifferanse boligblokk, umøblert oppholdsrom / kjøkken, $D'_{ls,2m,w} = 45$	46
6.8	Vibrasjonsmåling av vinduets akselerasjon	47
A.1	Tiltak for å redusere trafikkstøy	62
B.1	Frekvensrespons av lydkort M-audio, Firewire Solo	64
B.2	Vindu i hyttevegg, detalj av spalteventil	65
B.3	Plantegning av leilighet med utringet vinduene, De nye Grønlandskvartalene	66
B.4	Vindustegning, De nye Grønlandskvartalene	67
B.5	Reduksjonstall vegg, De nye Grønlandskvartalene	68

Tabeller

2.1	Grenseverdier for innendørs lydnivå i nybygg mot utendørs støy i bolig/kontor i henhold til NS 8175 klasse C	6
2.2	Grenseverdier for innendørs lydnivå i eksisterende boliger mot utendørs støy i henhold til forurensningsforskriften	6
3.1	Boligprisreduksjon som følge av økt støybelastning på 1 dBA	11
4.1	Eksempel på vanlige reduksjonstallsverdier av elementer i fasade	17
4.2	Ett-tallsverdier for luftlyd fasadeisolasjon, fra ISO 171-1	17
4.3	Materialparametre for glass fra ulike kilder	20
4.4	Grensefrekvens for enkle og laminerte glass av samme tykkelse (etter Ford)	21
4.5	Fundamentale plateresonansen for glass, tykkelse 4mm	30
4.6	Modeeksitasjon av doble paneler	30
5.1	Notasjon lagt inn i foreslått metode	36
6.1	Analyse av feltmålte data fra StairWay	40
6.2	43
B.1	Måleutstyr, intensitetsmåling	63
B.2	Måleutstyr, vibrasjonssmålinger	64
B.3	Måleutstyr, fasadeisolasjonsmålinger	65
B.4	Måleutstyr, lydopptak	67

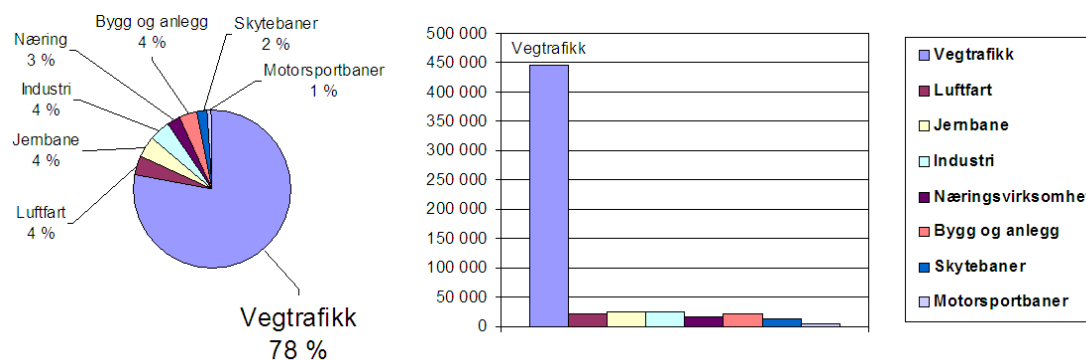
Kapittel 1

Innledning

1.1 Bakgrunn og motivasjon

Tatt i betraktning det store antallet mennesker som bor i støyutsatte områder, representerer støy et av de mest omfattende miljøprobleme i Norge. Fortetting av boliger i bynære strøk, boligbygging på støyutsatte områder i tillegg til økt vegtrafikk tilsier at større fokus bør rettes mot å redusere støyplagen i og rundt boenheter. I løpet av siste halvdel av 1900-tallet kom støyproblemet stadig mer i fokus og lover og forskrifter ble innført for å begrense støyplagen blant folk.

Tall fra *Statistisk Sentralbyrå, SSB [1]*, viser at vegtrafikk er den desidert største kilden til støyplager i Norge og utgjør rundt 80% av kartlagt støyplage i 2003. Figur 1.1 fra gir en oversikt over hvordan støyplagen fordeler seg på ulike støyklider i 2003.



Figur 1.1: Fordeling av støyplageindeks (SPI) fra forskjellige støykilder (tall fra 2003)

Støyutredelser med kartlegging av utendørs støy nivåer og beregning av lydisolasjon er nødvendig for å unngå unødig støyplage. Støyutredelser bør inngå ved forandringer i støysituasjon; være seg i prosjekteringen av nye bygg, restaurering av eksisterende bygg eller ved omlegging eller utvidelse av infrastruktur. Presise lydisolasjonsberegninger gir mulighet til å dimensjonere bygningskonstruksjonen for maksimering av lydisolasjon mot

utendørs støyspektrum.

1.2 Problemstilling og begrensninger

Fasaders støyisolering mot vegtrafikk beregnes av de fleste akustikkonsulenter og utbyggere ved hjelp av Byggforsk *Håndbok 47-Isolering mot utendørs støy*. Håndbok 47 baserer seg på standardiserte støyspektra fra trafikk og laboratoriemålte data for reduksjonstall for vinduer, veggfelt og ventiler. Beregninger og data i håndbok 47 baserer seg på bruk av ett-tallsbenevnelsen $R_w + C_{tr}$. Oppgaven tar for seg hvorvidt denne ett-tallsverdien gir en tilstrekkelig dekkende beskrivelse av lydisolasjonen og hvorvidt en kan bruke laboratoriemålte data i beregninger som dette.

Målte felldata i database ved *Brekke og Strand Akustikk*, supplerende feltmålinger og tilgjengelig litteratur tas i bruk for å identifisere årsaker til svake lydisolerende frekvensområder i lydisolasjonskurvene.

Det teoretiske grunnlaget med matematiske beregninger for lydisolasjon brukes videre til å forutse problematiske frekvensområder i forhold til kunnskaper om utendørs vegtrafikkstøyspektrum. Hovedvekt legges på undersøkelser av lavfrekvensforhold og hvorvidt teorien stemmer overens med målinger. Spesiell oppmerksomhet vies vindu som svakt lydisolerende element ofte vil være nedre begrensende for en fasades totale lydisolasjonen.

Oppgaven begrenses til å fokusere på fasadeisolasjon av boenheter.

1.3 Disposisjon av rapporten

Figur 1.2 viser hvordan arbeidet med oppgaven har blitt løst for å finne problematiske frekvensområder i fasadeisolasjonsspekteret mot vegtrafikkstøyspekteret.

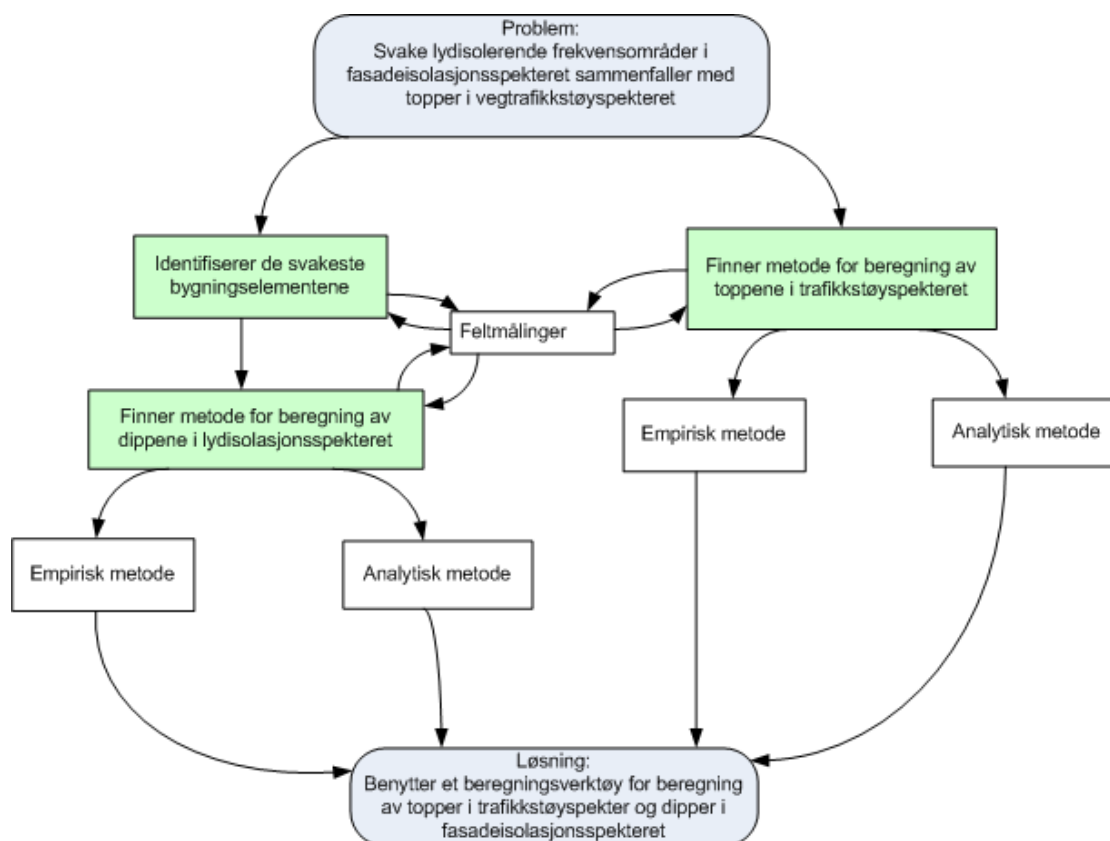
Rapporten som presenteres innledes med et kapittel der støyproblemet utgreies; hvordan støyen virker inn på mennesker og hvilke impliserte myndighetsinstanser og eksisterende lovverk og retningslinjer som er knyttet til støy.

Støy fra vegtrafikk analyseres og det skisseres en oversikt over hvilke alternativer som finnes for begrensning av vegtrafikkstøy.

Det er fasadeisolasjon som støyreducerende tiltak som er hovedfokuset i rapporten. De mest signifikante bygningselementene som inngår i en fasade blir beskrevet utfra deres akustiske egenskaper, og vindu vektlegges sterkest.

Det teoretiske grunnlaget for beregning av lydisolasjon skisseres opp. Kjente analytiske modeller for lydtransmisjonsberegninger gjennom forskjellige typer paneler presenteres og det gis numeriske eksempler for vanlige verdier av glassvinduer.

De forskjellige metodene som brukes i lydisolasjonsberegningene i Håndbok 47 blir lagt frem sammen med en oversikt over tilgjengelig software som brukes i forbindelse med disse. Det presenteres også et nytt program for *Microsoft - Windows* som implementerer kjente beregningsmodeller for lydisolasjon. Programmet presenterer resultatene på spektral form og er ment som et verktøy til å forutse eventuelle problematiske frekvensområder i fasadeisolasjonen i forhold til kjente toppe i vegtrafikkstøyspekteret.



Figur 1.2: Disposisjon av arbeidet

Det har blitt foretatt feltnmålinger for å se på hvilke faktorer som innvirker på lydisolasjon og for å understøtte antagelser som har blitt gjort. Det har blitt utført intensitetsmålinger for å se på hvilke elementer som transmitterer mest lydenergi gjennom en fasade. I tillegg har fasadeisolasjon blitt målt med lydtryknivåmålinger utendørs foran fasaden og innendørs i lukket rom. Tilgjengelige måledata fra databasen *StairWay* [2] ved *Brekke og Strand Akustikk* har blitt analysert og det pekes på hvilke frekvensområder i lydisolasjonskurvene som kan forårsake problemer i forhold til trafikstøy. Disse funnene sammenlignes så med teoretiske beregninger for dobbeltveggresonans, modeek-sitasjon og grensefrekvens. Det er også foretatt smalbandsanalyse av lydtryknivå i form av *Fouriertransformasjon* og vibrasjonsmålinger med måleverktøyet *WinMLS*.

Kapittel 2

Støy

2.1 Støyens innvirkning på mennesker

Støy påvirker mennesker på ulike måter og forskjellige mennesker vil ha ulike oppfatninger om hva de vil karakterisere som støy. I tillegg til at støy i ekstreme tilfeller kan være direkte årsak til hørselskader, virker støy forstyrrende på konsentrasjon, hvile og søvn. Stor støybelastning kan påvirke den generelle helsetilstanden og innvirke på utvikling av sykdom. Spesielt kan stressnivået øke dersom en har vært utsatt for støy over lengre perioder. Høyt stressnivå er en ofte medvirkende årsak til andre helseplager som høyt blodtrykk, muskelspenninger og muskelsmerter.

Søvnforstyrrelser på grunn av støy kan på kort sikt få konsekvenser som nedsatt yteevne og konsentrasjonsvansker dagen etter. Søvnforstyrrelser over lang tid vil ofte føre til økt stressnivå. I undervisningssituasjoner kan støy føre til konsentrasjonsvansker, økt uro og nedsatt innlæringsevne. På arbeidsplasser med stor støybelastning er det påvist at arbeidstakere har høyere langtidssykefravær enn andre.

Stortinget ved miljøverndepartementet har et uttalt miljømål om å redusere støyplagen med 25 % innen 2010 i forhold til 1999 (Miljøverndepartementet [3]). For å følge utviklingen i forhold til dette målet har *Statistisk sentralbyrå, SSB* innført enheten støyplageindeks (SPI). SPI ble utviklet for å kunne sammenligne støyplage fra ulike kilder og beregnes for hver kilde separat. Støyplageindeksen utledes fra spørreundersøkelser der folk rangerer i hvor stor grad de opplever støyplage fra ulike kilder. Vegtrafikk står for den absolutt mest utbredte støykilden og sto for nesten 80 prosent av kartlagt støyplage i 2003 (se figur 1.1). I 2003 var nesten 1,4 millioner mennesker i Norge utsatt for støy fra veitrafikk over 55 dBA (tall fra SSB [1]).

2.2 Lovverk og retningslinjer mot støy

Det er en rekke lover, forskrifter og retningslinjer som regulerer støy fra ulike kilder. Hovedaktørene i saker som omhandler vegtraffikstøy og bolig er kommunen, fylkesmannen, Statens forurensningstilsyn (SFT) og Statens vegvesen. Det er kommunen som er ansvarlig ved planlegging og behandling i arealplanlegging av enkeltsaker etter *Plan*

og bygningsloven (PBL) [4] og retningslinje for behandling av støy i arealplanlegging (T-1442) [5]. Sistnevnte ligger til grunn ved ny bebyggelse, nye vegger, omlegging av vegger etc. Fylkesmannens miljøvernnavdeling er statens fagmyndighet for støy i hvert enkelt fylke i forhold til *forurensningsforskriftens kapittel 5 om støy* (forurensningsloven) eller ved brudd på retningslinje T-1442. Statens forurensningstilsyn (SFT) er fagansvarlig direktorat under Miljøverndepartementet, og jobber med utvikling og formidling av støyreglementet. Blant SFTs publikasjoner finner vi veiledere til regleverket [6], [7] og [8]. Statens vegvesen er anleggseier for riks- og europaveger, og er dermed ansvarlig for kartlegging og gjennomføring av støytiltak for den største delen av det støyutsatte vegnettet. Vegvesenet har myndighet i forhold til vegloven og vegtrafikkloven som inkluderer støykrav til kjøretøyer, bildekk, etc. Statens Bygningstekniske etat under Kommunal- og regionaldepartementet er øverste myndighet og forfatter byggforskriftene som innrettes etter ovenforstående retningslinjer.

2.2.1 Retningslinje for behandling av støy i arealplanlegging, T-1442

Retningslinjen fra Miljøverndepartementet [5] angir anbefalte grenseverdier for utendørs støy fra vei ved planlegging av ny bebyggelse.

Grenseverdiene for uteplass må være tilfredsstillende for et nærområde i tilknytning til bygningen som er avsatt og egnet til opphold og rekreasjonsformål. For etablering av ny støyende virksomhet og bygging av boliger, sykehus, pleieinstitusjoner, fritidsboliger, skoler og barnehager er anbefalt grense for vegtrafikkstøy på uteplass og utenfor rom for støyfølsom bruk gitt som $L_{den} \leq 55dB$ og $L_{5AF} \leq 70dB$ ¹. Støygrensene er frittfeltverdier. Grenseverdiene er angitt som L_{den} som er A-veit 4.4 ekvivalent støynivå for dag-kveld-natt (day-evening-night, den) med 10 dB / 5dB tillegg på natt / kveld for utjevning av økt sensitivitet for støy om natten. Tidspunktene for de ulike periodene er dag: 07-19, kveld: 19-23 og natt: 23-07. Standarden skisserer fremgangsmåte for støykartlegging og kriterierammer for fargekoding av områder til denne. Retningslinjene angir grenser hvor inntil 10 % av befolkningen fremdeles vil kunne være plaget av støy. Det anbefalte minimum for når disse kartene bør revideres er ved en økning i ekvivalent støynivå på 3dBA eller mer.

2.2.2 Teknisk forskrift og NS 8175:2005

Teknisk forskrift 1997 (TEK'97) [9] etter *Plan og bygningsloven (PBL)* [4] henviser til norsk standard NS 8175 *Lydforhold i bygninger. Lydklasser for ulike bygningstyper* for dokumentering av tallfestede grenseverdier. Standarden definerer fire lydklasser der A tilsvarer lydmessing spesielt gode forhold mens lydklasse D angir grenseverdier der en stor andel av personer kan forventes å bli forstyrret av støy. Klasse C angir verdier for nye bygninger. Klasse C i NS 8175 er definert som den lydteknisk svakeste standarden man kan bygge etter, med forventning at 20 % av de berørte personer i boliger kan bli forstyrret av lyd og støy.

¹ L_{5AF} er det A-veide lydnivået som overskrides av 5 % av hendelsene i løpet av en nærmere angitt periode, dvs et statistisk maksimalnivå i forhold til antall hendelser.

Type bruksrom	Målestørrelse	Krav NS 8175
Oppholds- og soverom i bolig	$L_{A,ekv,24t}$	≤ 30 dB
Oppholds- og soverom i bolig	$L_{A,maks,natt(23-07)}$	≤ 45 dB
I kontorer	$L_{A,ekv,8t}$	≤ 40 dB

Tabell 2.1: Grenseverdier for innendørs lydnivå i nybygg mot utendørs støy i bolig/kontor i henhold til NS 8175 klasse C

Tabell 2.1 gir en oversikt over grenseverdier angitt i klasse C for innendørs lydnivåer fra utendørs lydkilder som f.eks. trafikkstøy:

2.2.3 Forurensningsforskriftens kapittel 5 Støy

For eksisterende boliger gjelder ikke like strenge miljønormer som for nybygning. *Forurensningslovens kapittel 5* [10] omhandler støyproblemer og legger føringer for kartlegging, handlingsplaner og tiltaksgrenser med tilhørende tidsfrister for når disse skal være overholdt. Til 1 januar 2005 ble det gjennomført tiltak på boliger der døgnekvivalenten, $L_{pAeq,24h}$, overskred 42 dB. Tiltaksgrensen skal være overholdt fra og med 1 januar 2005. I lovgivningen forpliktet anleggseier innen 30. juni 2007 til å kartlegge og tiltaksutrede boliger der innendørs støynivå overskrider 35dB $L_{pAeq,24h}$. Tabell 2.2 viser en oversikt over gjeldende grenseverdier for kartlegging og tiltaksgrenser for eksisterende boligbygning. Kartleggingen anbefales å oppdateres hvert femte år og inkluderer alle eksisterende

Krav til	Målestørrelse	Krav	Tidsfrist
Tiltak	$L_{A,ekv,24t}$	≥ 42 dB	1. januar 2005
Kartlegging	$L_{A,ekv,24t}$	≥ 35 dB	30. juni 2007

Tabell 2.2: Grenseverdier for innendørs lydnivå i eksisterende boliger mot utendørs støy i henhold til forurensningsforskriften

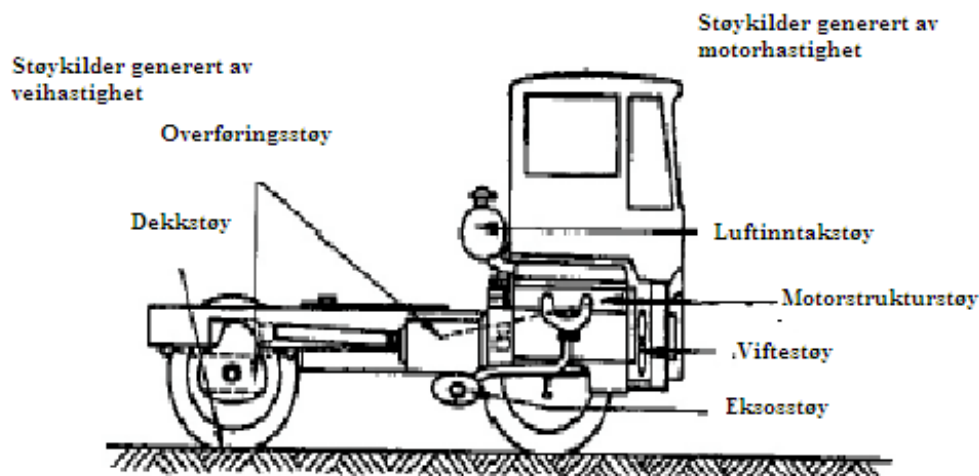
helårsboliger, barnehager, utdanningsinstitusjoner og helseinstitusjoner.

2.3 Vegtrafikkstøy

For å kunne redusere støyplagen er det viktig med kunnskap om lydutstrålingen fra den aktuelle støykilden og hvordan lyden brer seg på stedet. Lydutbredelsen fra støykilde til mottaker varierer med flere forhold som avstand mellom kilde og mottaker, kildespektre, terrengutforming, markdempning, skjemingsforhold, refleksjoner, etc.

Et kjøretøy kan inneholde mange forskjellige støykilder. Figur 2.1 viser noen eksempler på forskjellige støykildene fra et kjøretøy.

Som vist i figur 2.1 kan lydutstrålingen fra kjøretøy deles opp i støy generert av det rullende dekket mot vegbanen og støy generert av drivverket (motor, girboks, ven-



Figur 2.1: Støykilder på kjøretøy

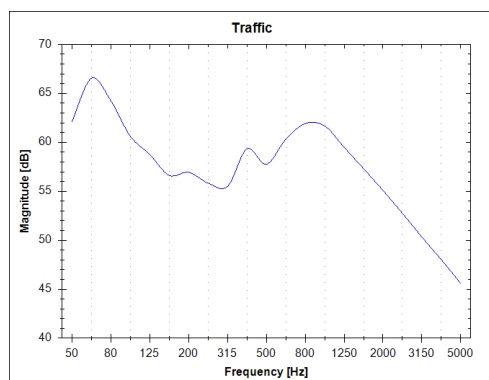
tilasjon og eksosanlegg). I et vegtrafikkstøyspekter vises begge komponenter som to distinkte frekvenstopper. Dekkstøyen vil sentreres i frekvensbåndene rundt 1000 Hz, mens motorstøyen vil være mer lavfrekvent med topp i frekvensbåndene rundt 63 - 80 Hz. I tillegg kommer ekstra støybidrag fra bruk av piggdekk, kjøring på vått underlag og støy fra installerte lydanlegg, noe som kan være et betydelig støyproblem på visse sentrumsnære strekninger rundt om i landet.

Figur 4.6 viser samme frekvensspekter av vegtrafikkstøy målt 20 meter fra veg og med hastighet 60-70 km/t i A-veid og uveid form. Måingene er hentet fra *StairWay* og viser middelveidien av 11 ulike målinger.

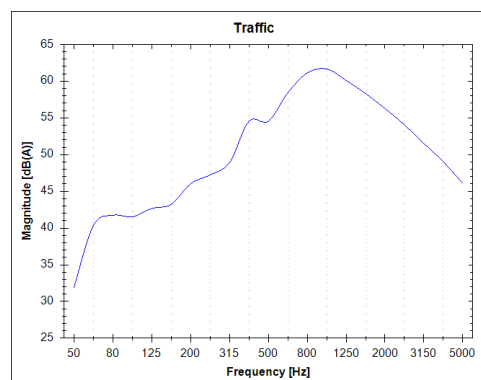
I det uveide trafikkstøyspekteret i figur 4.6 vises motorstøyen som en betydelig frekvenskomponent sentrert i 1/3-oktavbåndet ved 63 Hz. Etter A-veing vil dekkstøyen stå for omtrent 70 % av det totale støynivået. Figur 2.3 viser eksempel på hvordan forholdet mellom de to A-veide støykomponentene og det totale støynivået vil variere med kjøretøyets hastighet. Figuren er basert på et lignende eksempel fra et intervju med Sandberg [11]. Figuren viser hvordan dekkstøyen vil dominere ved hastigheter over 60-70 km/t. Variasjonene i støyen fra drivverket varierer som følge av girveksling.

Flere kilder påviser en sammenheng mellom den lavfrekvente toppen fra motorstøy og omdreiningshastigheten til motoren (f.eks. Cirillo [12]). T. Killengreen [13] viser at man med rimelig god sikkerhet kan forutse i hvilket frekvensområde toppen havne i, gitt at man har kunnskap om antall sylindre og omdreiningshastigheten til motoren. Formel 2.1 gir grunntonen til bensinmotor, der opm er turtall i antall omdreininger per minutt og x er antall sylindre.

$$f_0 = \left(\frac{opm}{2}x\right)/60 \quad (2.1)$$



(a) Uveid frekvensspekter



(b) A-veid frekvensspekter

Figur 2.2: Frekvensspekter, vegtrafikk 20m fra mottaker med hastighet 60-70 km/t. 11 målinger

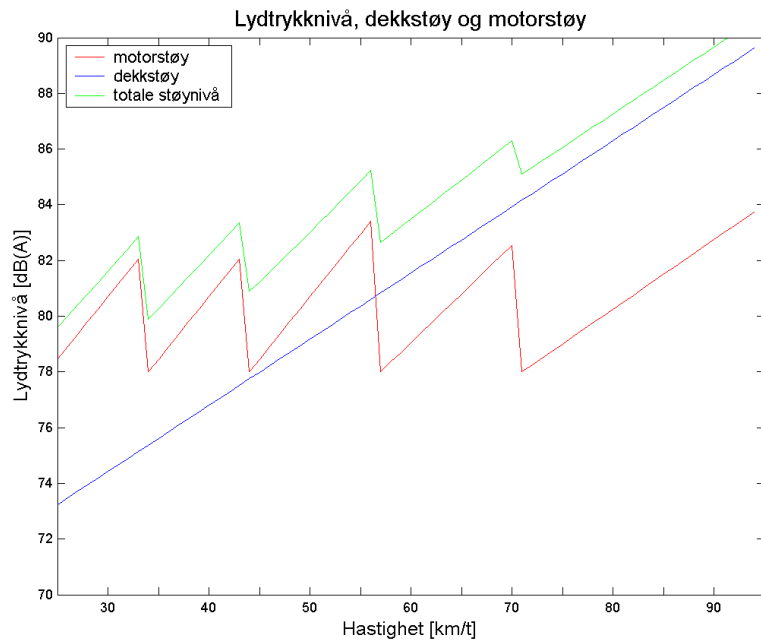
Killengreen viser videre til at bilparken i Norge for lette kjøretøyer² har overvekt av bensinmotorer med fire sylindre med et betydelig innslag av dieselmotorer. Figur 2.4 viser hvordan motorens grunntone beveger seg i frekvens som funksjon av turtallet ved vanlig kjøring³ for motorer med 4-,6- og 8-sylindre. For økende innslag lette kjøretøy med dieselmotor og tunge kjøretøyer, der det er mer vanlig med 6 eller 8 sylindre, vil frekvenstoppen til motorstøyen smøres utover frekvensplanet.

Med bakgrunn i lingning 2.1 vil en økning i turtallet føre til at senterfrekvensen for motorstøyen stiger i frekvens. Det finnes flere trafikksituasjoner som gir akselerering og medførende økning i turtall:

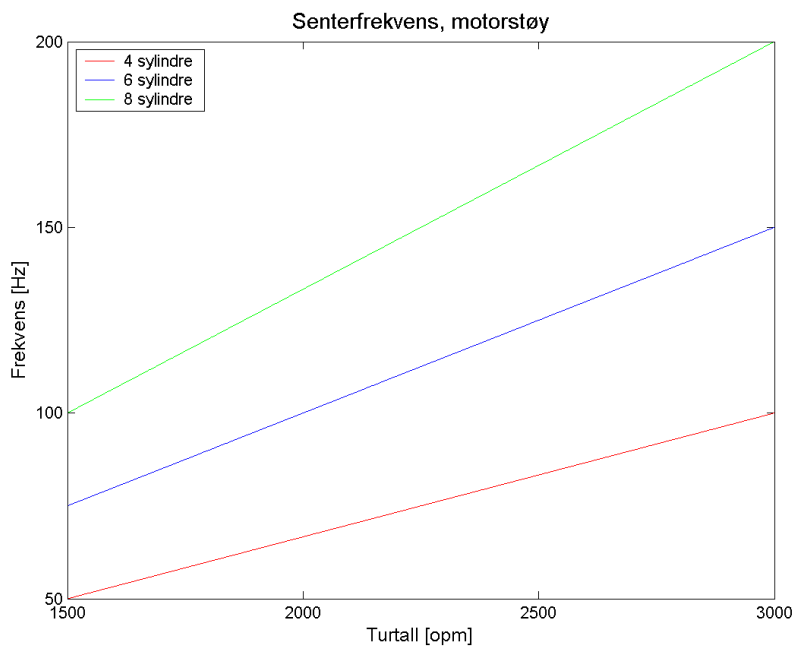
- Nedbremsning med påfølgende akselerasjon:
 - Vegkryss
 - Rundkjøring
- Helning i terrenget
- Fartsdumper

²Alle kjøretøy med totalvekt under 3,5 tonn regnes som *lette* kjøretøy

³vanlig kjøring tilsvarer turtall rundt 2000-2500 for lette kjøretøy



Figur 2.3: Støynivå fra motor- og dekkstøy



Figur 2.4: Senterfrekvens av motorstøy

Kapittel 3

Fasaders lydisolering

Det kan være nyttig å skille mellom forskjellige bygningstyper i forbindelse med vurdering av lydisolasjonen i fasader. Boliger, kontor- og næringsbygg, helseinstitusjoner, undervisningslokaler, musikkstudioer, konsertsaler og operahus har alle forskjellige behov for hva som vil være tilfredsstillende lydisolasjon mot utendørs støy og som det gjelder forskjellige krav i forhold til lovverket. Mest oppmerksomheten er viet støy i boliger og boenheter fra vegtrafikk. Oppgaven videre kommer i hovedsak til å konsentrere seg om støyproblemer i forbindelse med lydisolering av boligbebyggelse med muligheter for direkte begrepsoverføring til andre bygningstyper og bruk.

3.1 Boligpris og støy

Samtidig som høye støynivåer i boligen kan føre til dårligere helsetilstand og nedsatt trivsel i boligen synker også boligens økonomiske verdi. *Transportøkonomisk institutt* har funnet at priser på selveierbolig reduseres med ca 0,5 prosent når støynivået ved husfasaden øker med en desibel [14]. Denne sammenhengen er funnet ved sammenligning av boligprisen på to identiske leiligheter med ulik støybelastning. Vegvesenet har foretatt en lignende undersøkelse der de ser på sammenhengen mellom boligpriser og utendørs støynivå for et stort antall boliger (4500 eneboliger og 6500 boligenheter i tomanssboliger) [15]. Det oppgis at det ikke er funnet noen sammenhenger mellom prisnivå og utendørs støynivåer under 55 dBA eller over 70dBA. Tallene fra tabell 3.1 viser den prosentvise endringen i boligpris for tre ulinke boligtyper i forskjellige områder ved en økning i støynivå på 1 dBA i intervallet 55-70 dBA. Lav markedsverdi er i denne undersøkelsen anslått å være en pris under 1.5 / 2 millioner kroner (undersøkelsen ble foretatt i 2004).

3.2 Bolig og støyreduserende tiltak

Frem mot tiltaksfristen ved inngangen til 2005 ble det utført støyreduserende tiltak på en rekke boliger i regi av Statens vegvesen. I forbindelse med gjennomføringen av disse

Markedsverdi	Område	Prisreduksjon [%]
Høy	Alle	0,78
Lav	Tettbygd	0,30
Lav	Spredtbygd	1,06

Tabell 3.1: Boligprisreduksjon som følge av økt støybelastning på 1 dBA

tiltakene har Transportøkonomisk institutt gjort en før- og etterundersøkelse [16] med en kontrollgruppe av beboere i denne tiltaksgruppen. I tiltaksgruppen ble det innendørs støynivået redusert med i gjennomsnitt 7 dB. Vegvesenet har som krav at det innendørs støynivået skal bringes ned til under 35 dBA etter tiltak dersom det ikke er arkitektoniske, økonomiske eller spesielle krav til verving som umuliggjør dette. Undersøkelsen viser at andelen meget plagede ble redusert fra 40 til 15 prosent etter tiltak ¹. I førsituasjonen rapporterte rundt 38 % innsvningsproblemer som de mente skyldes støynivået. Dette ble redusert til 19 % etter isoleringstiltak. Se forøvrig tillegg A for en oversikt over støyreducerende tiltak for å redusere trafikkstøy i bolig.

3.3 Fasaders elementvise oppbygning

Lydisolering av fasader er et komplisert tema og avhenger av en rekke ulike variable. Figur 3.1 viser noen av parameterene som virker inn på lydisolasjonen til en fasade.

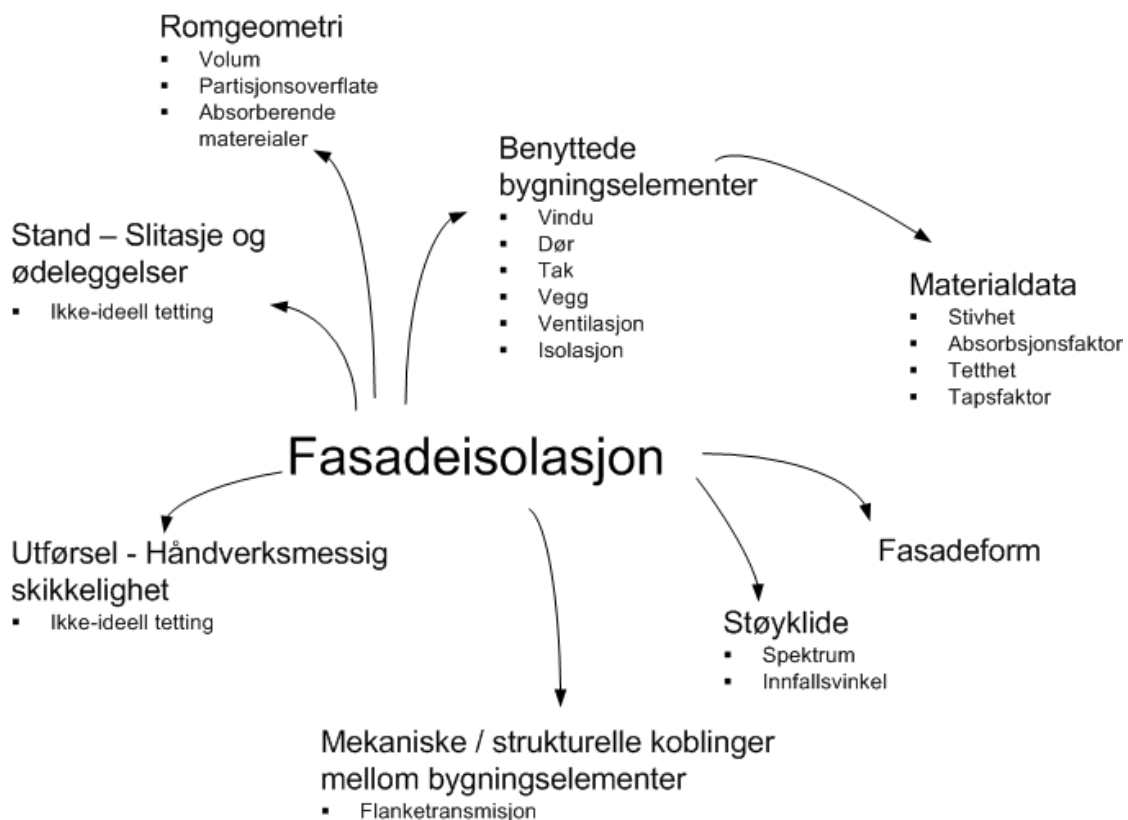
Med støyhendelser utenfor en bolig overføres lyden i ulik grad gjennom alle elementene i fasaden. Den totale lydisolasjonen til fasaden vil alltid begrenses av det svakeste lydisolerende elementet. Det kan derfor være nyttig å se på hvilke parametre som styrer lydisolasjonen gjennom veggfelt, vindu og ventilasjon. Takfelt er ikke medregnet.

3.3.1 Vegg

Faktorer som reduserer lydoverføring gjennom yttervegg (etter Håndbok 47):

- Økende flatemasse
- Større hulromsavstand
- Bedre tetting
- Bedre isolasjon, bedre absorberende materiale i hulrommet
- Færre strukturelle forbindelser mellom veggflatene (stendere)

¹For lydklasse C i grenseverdiforskriften NS 8175, som definerer minstekravene til nybygning antas det at inntil 20 % av berørte personer i boliger kan forvevntes å bli forstyrret av lyd og støy.



Figur 3.1: Faktorer som virker inn på lydisolasjon i fasade

Det skilles mellom lette og tunge veggkonstruksjoner. I norske boligere av lett treverk-konstruksjoner er det vanlig med yttervegg bestående av bindingsverk eller laftet tømmer eller en blanding av disse. For boliger av eldre type kan det være vanskelig å bestemme hvilken type isolasjon som er brukt, dersom det i det hele tatt finnes noen. I bybebyggelse med boligblokker og bygårder er det vanligst med tunge bygningskonstruksjoner av betong eller mur. Se forøvrig Byggforskseriens detaljblad 523.422 [17] *Lydisolasjonsegenskapene til yttervegger* eller Håndbok 47 [18].

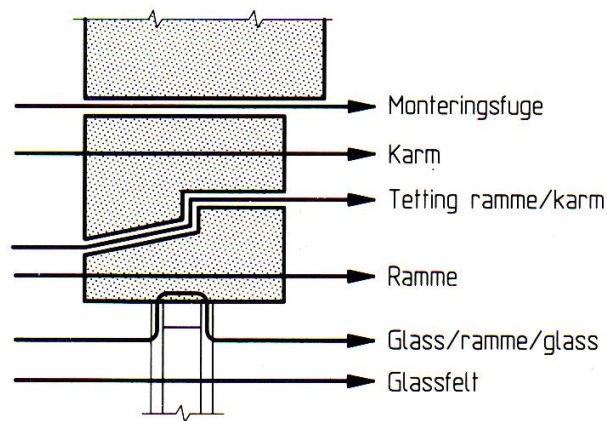
3.3.2 Vindu

Faktorer som påvirker lydoverføring gjennom vindu:

- Tykkelse på glassene
- Hulromsavstand

- Tetting mellom ramme og karm
- Tetting mellom vegg og karm
- Gassfylling, absorberende materiale i hulrommet
- Forbindelser mellom glassruteflatene
- Bruk av laminerte glass
- Nisje-effekter, hvordan karmen er innsatt i vegg
- Demping, hvordan vinduet er innsatt i rammen, bruk av sprosser

Figur 3.2 er hentet fra Byggforskseriens detaljblad 533.109 [19] *Lydisolasjonsegenskapene til vinduer* og viser hvordan lyden overføres gjennom vindu, ramme og karm. De vanligste



Figur 3.2: Lydoverføring gjennom vindu

vindustypene som brukes i norske boliger er inn- eller utadslående lukkevinduer for enkel ventilasjon og rengjøring. Lydoverføringen gjennom vinduet er derfor ofte dominert av dårlig lydisolering i luftlekkasjoner rundt de åpningsbare delene. Bruken medfører slitasje og ødeleggelser som sammen med forvitring av tettelisten kan føre til lekkasjer.

Oftest er vinduet det svakest lydisolerende elementet i en fasade. Vanlige vinduer har som oftest et lavere reduksjonstall enn veggelementet det er festet i (se f. eks NBIs datasamling *Lydisolerende konstruksjoner* [20] der vanlige ytterveggkonstruksjoner av tre er målt til vektet reduksjonstall, R_w , fra 35 opptil 60 dB, mens de fleste vinduene har reduksjonstall under 40 dB. Boliger langs veger er ofte plassert slik at en boligside vender ut mot veg og vindusprosenten i forhold til veggfelt i denne støyutsatte veggside er i mange tilfeller høy.

3.3.3 Ytterdør

Når det gjelder dører i yttervegg gjelder mange av de samme parametre som for vanlig veggelement. Mest kritisk er det å sørge for god tetting rundt dørkantene for å hindre lekkasjer. Ofte leder ytterdøra inn til et inngangsparti / gang som helt eller delvis er adskilt fra resten av rommene i huset. Mer støyømfintlige rom som soverom, oppholdsrom og kjøkken vil derfor i mindre grad påvirkes av lydgjennomgang i ytterdør.

3.3.4 Ventilasjon

Ventilasjon sikrer tilfredsstillende luftkvalitet og begrenser luftfuktigheten i bygningen. Det finnes en rekke forskjellige ventilasjonsformer fra klaffeventiler med udempede hull rett gjennom veggen til balanserte ventilasjonssystemer med mekanisk innblåsning og avtrekk gjennom lydabsorberende luftekanal. I eldre hus er det vanlig med enkle klaffeventiler med plastrør gjennom veggen med en luke på innsiden som kan åpnes og lukkes. Senere har det blitt vanlig med friskluftstilførsel gjennom spalteventiler i vinduskarm. Lydoverføringen gjennom udempede ventiler er frekvensavhengig og bestemmes av størrelsen på åpningen. Åpne ventilasjonskanaler fører til en drastisk reduksjon i lydisolasjonen i midlere til høyere frekvenser. Det A-veide vegtrafikkstøyspekteret har mest energi i dette frekvensområdet, med en topp i 1/3-oktavbåndene rundt 1000 Hz. Plasseringen av ventiler bør derfor være på hussider der støybelastningen ikke er så stor.

Kapittel 4

Teori

4.1 Måling av fasadeisolasjon

I forbindelse med vurdering av fasadeisolasjon benyttes lydtrykknivådifferansen (D) og lydreduksjonstall (R). Nivådifferansen benyttes for å beskrive lydisolasjonsevnen til den totale fasadepartisjonen, mens reduksjonstallet benyttes til å beskrive enkeltelementer.

4.1.1 Reduksjonstall

Lydreduksjonstallet, R (eng. sound reduction index eller transmission loss), er en laboratoriemålt størrelse som er gitt av transmisjonskoeffisienten, τ , som er forholdet mellom lydeffekten W_1 som stråler på bygningsdelen og lydeffekten W_2 som overføres gjennom bygningsdelen etter likning 4.1.

$$R = 10 \log\left(\frac{1}{\tau}\right) = 10 \log\left(\frac{W_1}{W_2}\right) dB \quad (4.1)$$

Feltmålt lydreduksjonstall, eller tilsynelatende (eng. apparent) reduksjonstall R' , tar i tillegg hensyn til lydeffekten W_3 som stråler fra flankerende bygningsdeler eller andre bygningsdeler:

$$R' = 10 \log\left(\frac{W_1}{W_2 + W_3}\right) dB \quad (4.2)$$

I ISO-standardene defineres de feltmålte reduksjonstallene R'_{45° og $R'_{tr,s}$. Med A-veide lydtrykknivåer, trafikkstøy som støykilde og mikrofonen utendørs plassert direkte på bygningsflaten (som er referansepunktet i Håndbok 47) beregnes $R'_{A,tr}$ etter likning 4.3.

$$R'_{A,tr} = L_{A,eq,ute} - L_{A,eq,inne} + 10 \log \frac{S}{A} dB - 3 dB \quad (4.3)$$

der $L_{A,eq,ute}$ er det A-veide ekvivalente lydtrykknivået på bygningsflaten inklusive refleksjoner og $L_{A,eq,inne}$ er det A-veide ekvivalente lydtrykknivået i mottakerrommet. Ekvivalent lydabsorpsjonsareal, A , bestemmes fra Sabines formel:

$$A = \frac{0,16V}{T_{60}} \quad (4.4)$$

der V er mottagerrommets volum og T_{60} er mottagerrommets etterklangstid.

Ved å løse likning 4.3 med hensyn på innevinvået $L_{A,eq,inne}$ kan man finne innenivået dersom detaljer om romgeometri og etterklangstid er kjent:

$$L_{A,eq,inne} = L_{A,eq,ute} - R'_{A,tr} + 10\log\frac{S}{A}dB - 3dB \quad (4.5)$$

Ved å sette inn for Sabines formel og samtidig sette $R'_{A,tr} \approx R_{A,tr} = R_w + C_x$, der C_x er korreksjonsfaktor for den aktuelle støyspektrumsformen, beregnes innendørs støynivå ved linkning 4.6.

$$L_{A,eq,inne} = L_{A,eq,ute} - (R_w + C_x) + 10\log\frac{S}{S_0} + 10\log\frac{T}{T_0} - 10\log\frac{V}{V_0}dB - 3dB \quad (4.6)$$

der $T_0 = 0.5s$, $S_0 = 10m^2$ og $V_0 = 31m^3$ er definert som normalbetingelsene.

4.1.2 Nivådifferanse

I ISO 140-5 innføres lydtryknivådifferansen, D , som med betegnelsen D_{2m} er differansen mellom utendørs lydtryknivå 2m foran fasaden, $L_{ute,2m}$, lydtryknivået L_{inne} midlet over flere mikrofonposisjoner i mottakerrommet etter likning 4.7.

$$D_{2m} = L_{inne} - L_{ute,2m} \quad (4.7)$$

Den standardiserte lydtryknivådifferansen, $D_{2m,nT}$, relateres til mottakerrommets referanseetterklangstid, T , med normalverdi $T_0 = 0,5s$ som vist i likning 4.8.

$$D_{2m,nT} = D_{2m} + 10\log\left(\frac{T}{T_0}\right)dB \quad (4.8)$$

Den normaliserte lydtryknivådifferansen, $D_{2m,n}$, er relatert til mottakerrommets referanseabsorpsjonsareal, A , med normalverdi $A_0 = 10m^2$ etter 4.9.

$$D_{2m,n} = D_{2m} - 10\log\left(\frac{A}{A_0}\right)dB \quad (4.9)$$

Feltmålte resultater tilføyes apostrof og en ekstra indeks for spesifisering av lydkilde. For trafikkstøy brukes da betegnelsen $D'_{tr,2m}$ mens for høyttaler, (eng. loudspeaker), brukes $D'_{ls,2m}$.

4.1.3 Beregning med flere elementer

For å beregne lydisolasjonen i fasader med flere elementer følges formel 4.10 der elementene midles logaritmisk etter hvor stor overflate, $S_{element}$, de har i forhold til veggens totale overflate, S_{total} .

$$R_{res} = 10\log\left[\frac{S_{total}}{S_{vegg} * 10^{-R_{vegg}/10} + S_{vindu} * 10^{-R_{vindu}/10} + S_{ventil} * 10^{-R_{ventil}/10}}\right] \quad (4.10)$$

Som nevnt i kapittel 3.3 vil den totale lydisolasjonsevnen til en fasade være nedre begrenset av det svakeste elementet som inngår i partisjonen. Fordi elementene midles logaritmisk vil det elementet med lavest reduksjonstall ha større innvirkning enn om reduksjontallet skulle regnes som rene forholdstall. Dette kan illustreres med et eksempel med vanlige reduksjonstallsverdier. Med verdier som i tabell 4.1 blir det samlede reduksjonstallet:

$$R_{res} = 10 \log \left[\frac{12}{10 * 10^{-34/10} + 2 * 10^{-26/10}} \right] = 31.2 \text{ dB} \quad (4.11)$$

Til sammenligning hadde man fått $R_{res} = \frac{10}{12} * 34 + \frac{2}{12} * 26 = 32.7 \text{ dB}$ med ren forholdregning.

Element	Beskrivelse	Reduksjonstall $[R_w + C_{tr}]$	Netto areal $[m^2]$
Vegg	Isolert, 10 cm lettvegg	34	10
Vindu	Enkeltrams 4/12/4	26	2

Tabell 4.1: Eksempel på vanlige reduksjonstallsverdier av elementer i fasade

4.2 Ett-tallskarakteristikker av lydisolering

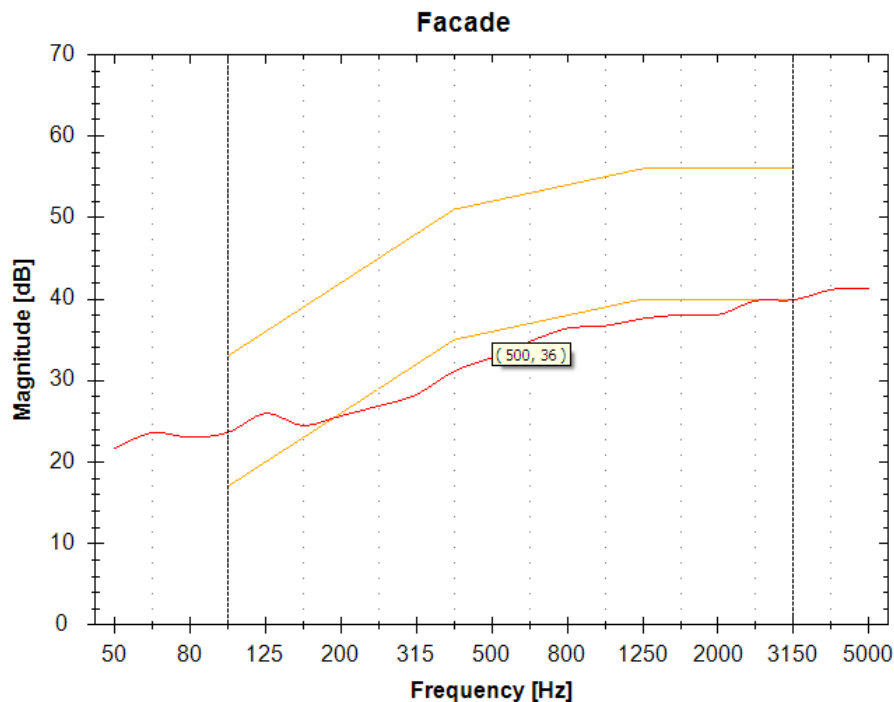
I forbindelse med krav til forskrifter, i produktbeskrivelser av bygningselementer, i prosjektering av nybygging etc, er det hensiktsmessig med en enkel og lettfattelig måte å karakterisere de lydisolerende egenskapene. Det er derfor vanlig å bruke ett tall fremfor en hel frekvenskurve ved beskrivelse av lydisolering. ISO 171-1 [21] defineres prosedyren for bestemmelse av ett-tallskarakteristikken i form av veid reduksjonstall og veid nivå-differanse. Tabell 4.2 viser aktuell notasjon i forbindelse med fasadeisolasjon definert i ISO 140-5.

Ett-tallsverdi	Betegnelsen	Støykilde	Element
$R'_{45^\circ, w}$	Veid feltmålt lydreduksjonstall	Høytaler	Bygningselement
$R'_{tr, w}$	Veid feltmålt lydreduksjonstall	Trafikk	Hele yttervegg
$D'_{ls, 2m, nT, w}$	Veid standardisert nivå-differanse	Høytaler	Hele yttervegg
$D'_{tr, 2m, nT, w}$	Veid standardisert nivå-differanse	Trafikk	Hele yttervegg

Tabell 4.2: Ett-tallsverdier for luftlyd fasadeisolasjon, fra ISO 171-1

Reduksjonstall og nivå-differanse bestemmes i 1/3- eller 1/1-oktavnband i frekvensområdet 100-3150 Hz eller i utvidet frekvensområde 50-5000 Hz. Beregningen av ett-tallsverdiene gjøres ved å sammenligne de målte verdiene i frekvensband med en referansekurve som er definert i ISO 717-1. For å finne den veide ett-tallsverdien forskyves referansekurven med 1 dB til summen av de negative avvik mellom denne og målte

verdier er ≤ 32 dB. Referansekurvens verdi ved 500Hz etter forskyvning er den veide ett-tallsverdien. Figur 4.1 viser middelverdien av feltmålt nivåforskjell D'_{2m} av i alt 18 målinger av samme fasadetype (lett trevegg isolert med mineralull og vindu av dobbeltglass uten noen form for ventilasjon). Mikrofonen på utsiden av fasaden er plassert i fasadeplanet inkludert fasaderefleksjon (+ 3 dB). Den originale og forskyvede referansekurven er også plottet sammen med nivåforskjellen. Verdien av referansekurven ved 500Hz er den veide nivåforskjellen som i dette tilfellet gir $D'w = 36dB$ (summen av negative avvik er i dette tilfellet 25,8 dB med maksimalt avvik 3,9 dB ved 400 Hz).

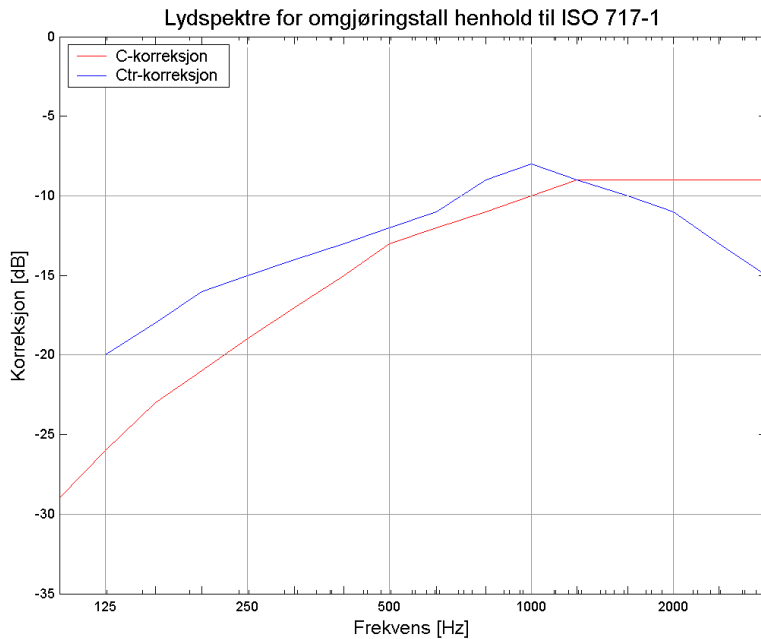


Figur 4.1: Feltmålt nivåforskjell med forskyvet og opprinnelig referansekurve, $D'w = 36dB$

ISO-metoden definerer en måte å modifisere den veide ett-tallsverdien til å ta hensyn til ulike støykilder ved å addere et omgjøringsstall C_i . Omgjøringsstallet C brukes for utsendt støy i midlere og høye frekvenser (rosa støy) og C_{tr} for utsendt støy i lavere og midlere frekvensområde (vegtrafikk i by, 50 km/t). For vegtrafikk brukes seks lydspektre C_1 til C_6 , der $C_2 = C_{tr}$, også kalt *standard vegtrafikkstøy*. Figur 4.2 viser lydspektre for omgjøringsstallene $C_{(100-3150)}$ og $C_{tr,(100-3150)}$.

Til beregning av C og C_{tr} i forbindelse med reduksjonstallene $R_w + C$ og $R_w + C_{tr}$ defineres:

$$C = -10 \log \sum_{i=1}^N 10^{(L_{i,1} - R_i)/10} - R_w \quad (4.12)$$



Figur 4.2: Lydspektre for beregning av omgjøringstall

$$C_{tr} = -10 \log \sum_{i=1}^N 10^{(L_{i,2} - R_i)/10} - R_w \quad (4.13)$$

der $L_{i,1}$ og $L_{i,2}$ er spektrumskorreksjonen fra figur 4.2. For nivååfferansene $D_w + C$ og $D_w + C_{tr}$ gjelder samme fremgangsmåte. Når det gjelder bruken av omgjøringstall velges den spektrumskorrigeringen hvis støyspekter ligner mest på den aktuelle støykilden. Til beregninger av innendørs støynivå fra vegtrafikkstøy så bør beregningene baseres på omgjøringstallet for vegtrafikk ($R_w + C_{tr}$ eller $D_{nT,w} + C_{tr}$). For eksempelet i figur 4.1 gis lydnivååfferansen med spektrumskorreksjonene som:

$$C_{tr}; C_{(50-5000)}; C_{tr(50-5000)} = 36(-1; -3; 0; -4)dB$$

4.3 Beregningsmodeller for lydtransmisjon

Det finnes rikelig med litteratur som omhandler matematiske modeller for beregning av lydisolasjonen til de forskjellige bygningsdelene i en vegg. Studier i lydisolasjon blir vanligvis foretatt eksperimentelt i laboratorier (ekko-fritt / halv-ekko-fritt) med felles skillevegg der man setter inn konstruksjonen som skal testes. En slik fremgangsmåte gjør det mulig å isolere noen få frie variable og deretter dedusere og/eller verifisere de matematiske modellene etter variasjon av variablene. Det finnes få artikler som inkluderer utregninger med faktiske verdier eller reell kildekode som er brukt. Ofte virker parametre å være skjønnsmessig modifisert til å passe de eksperimentelle verdiene uten at dette

nødvendigvis er opplyst.

Selv om beregningsmodellene som regel er forenklinger som gir idealiserte verdier, er det nyttig å se på hvilke parametere som har innvirkning på lydisolasjonen. I dette delkapittelet presenteres en oversikt over noen kjente matematiske modeller som brukes i forbindelse med lydisolasjonsberegninger. Størst vekt er lagt på beregning av resonansområder i tillegg til analytiske reduksjonstallsberegninger. Teorien er basert på klassiske modeller for utregninger av svingninger i tynne plater. Til illustrasjon er det gitt numeriske eksempler med vanlige verdier for glassvinduer.

4.3.1 Glassvindu, referanser og materialparametre

Glassvinduer har vært gjenstand for mye oppmerksomhet på grunn av dets svake lydisolerende egenskaper. Studier av lydisoleringsevnen til glassvinduer er blant annet gjort av J. Marsh [22], [23] og [24]. Senere har lydisolasjon av enkle, doble og triple ruter blitt studert av J. D. Quirt [25] og [26] og av Tadeu og Mateus [27].

Forskjellige kilder bruker forskjellige materialparametre i beregninger med glass. Tabell 4.3 viser en oversikt over hvilke materialparametre som brukes i et utvalg av forskjellige lærebøker.

Kilde	Densitet [kg/m^3]	E-modul [$10^9 Pa$]	Poissons tall	Tapsfaktor [$\eta_{int} 10^{-3}$]
Vigran [28]	2500	60	-	0,6 - 2,0
Kinsler og Frey [29] (Pyrex)	2300	62	0,24	-
Bies og Hansen [30]	2500	67,6	-	0,6 - 2,0
Bies og Hansen [30] (Pyrex)	2300	62,0	0,24	0,6 - 2,0

Tabell 4.3: Materialparametre for glass fra ulike kilder

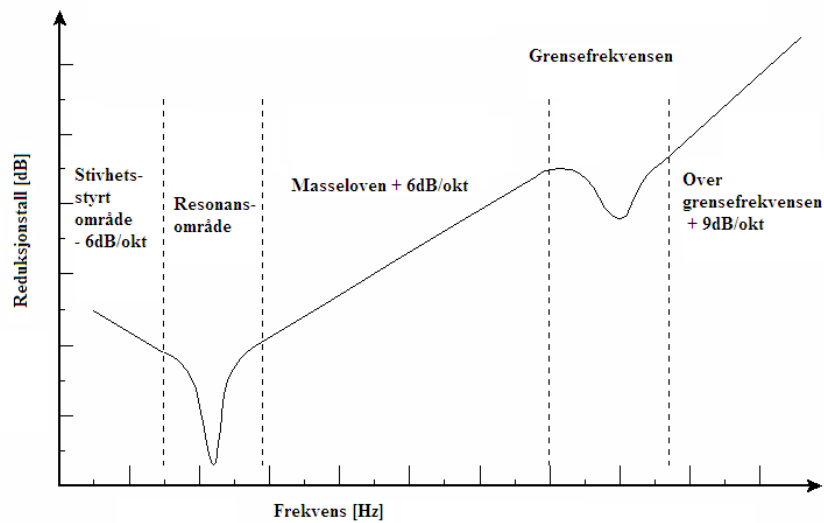
Tapsfaktor, η , vil variere stort etter konstruksjon og innspenning. Tabell 4.3 gir kun den indre tapsfaktoren η_{int} til laboratoriemålt glass.

4.3.2 Enkeltpaneler

For et enkeltpanel kan det generelle frekvensforløpet til reduksjonstallet deles opp i flere frekvensområder som vist i figur 4.3.

For frekvenser under den første plateresonansen vil reduksjonstallet til platen være styrt av platens bøyestivhet og avta med 6 dB per oktav. Plateresonansene til panelet utregnes etter formel 4.22

Grensefrekvensen, den kritiske frekvensen eller koincidensfrekvensen forekommer når bølgelengden i innfallende lydbølger sammenfaller med platebølgelengden (sportilpassning). Over denne frekvensen vil transmisjonen gjennom platen være bestemt av resonant overføring. Likningen for beregning av grensefrekvensen er vist i likning 4.14, der h



Figur 4.3: Reduksjonstallet for enkeltpanel

er tykkelsen på platen, ν er Poissons tall og E er platens E-modul.

$$f_c = \frac{c^2}{1.81h} \sqrt{\frac{\delta(1-\nu^2)}{E}} \quad (4.14)$$

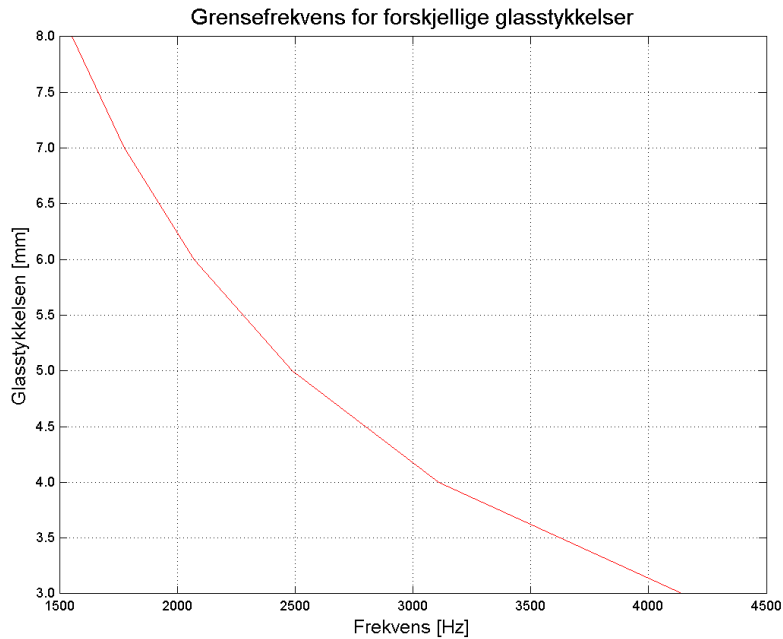
Figur 4.4 viser hvordan grensefrekvensen avtar med tykkere glass. For laminerte glass vil grensefrekvensen inntre omkring grensefrekvensen for hvert av enkeltglassene (etter R. D. Ford [31]). Tabell 4.4 viser sammenligning av grensefrekvensen for enkeltglass og laminat av to enkeltglass av samme tykkelse med 1 mm polymethylmethacrylate. Dersom glassene som inngår i laminatet har forskjellig glasstykkelse vil grensefrekvensen

Konstruksjon [mm]	Grensefrekvens [Hz]	Konstruksjon [mm]	Grensefrekvens [Hz]
3	4145	3+1Lam+3	4260
4	3109	4+1Lam+4	3075
5	2487	5+1Lam+5	2272

Tabell 4.4: Grensefrekvens for enkle og laminerte glass av samme tykkelse (etter Ford)

til glassene inntre ved forskjellige frekvenser og reduksjonen i lydisolasjonen blir mindre tydelig.

I frekvensområdet mellom plateresonansen og grensefrekvensen vil reduksjonstallet bestemmes av platens flatemasse (tetthet multiplisert med tykkelse) etter masse-loven.



Figur 4.4: Grensefrekvens av glass med forskjellig tykkelse

Under grensefrekvensen vil den resonante overføringen være neglisjerbar i forhold til ikke-resonant (tvungen) overføring. Masseloven er gitt av:

$$R = 10 \log \left[1 + \left(\frac{\pi f M \cos \theta}{\rho_0 c} \right)^2 \right] dB \quad (4.15)$$

der M er flatemassen, f er frekvens, θ er innfallsvinkel og ρ_0 og c er henholdsvis tetthet og lydhastighet i luft. Med innsatte verdier for lydutbredelse i luft med $c = 340 \text{ m/s}$ og $\rho = 1.21 \text{ kg/m}^3$ og antatt diffust lydinnfall kan masseloven 4.15 skrives som likning 4.16.

$$R = 20 \log(Mf) - 42.4 \text{ dB} \quad (4.16)$$

Fra likning 4.16 ser vi at en dobling i enten flatemasse eller frekvens vil gi en økning i reduksjonstall på 6 dB. For målinger i praksis vises det til god sammenheng mellom beregnede og feltmålte verdier dersom man antar innfallsvinkel opptil ca $\theta = 78^\circ$. I forhold til diffust innfall vil man da få en ekstra korreksjon med -5,5 dB (etter Bies og Hansen [30]). Masseloven for feltmålinger kan derfor skrives som:

$$R = 20 \log(Mf) - 47,8 \text{ dB} \quad (4.17)$$

For frekvenser over grensefrekvensen, vil reduksjonstallet øke med 9 dB/okt etter likning 4.18:

$$R = 20 \log \left[1 + \left(\frac{\pi f M}{\rho_0 c} \right)^2 \right] + 10 \log \left(\frac{2 \eta f}{\pi f_c} \right) dB \quad (4.18)$$

der η er tapsfaktoren til panelet. Det er tapsfaktoren som avgjør i hvilken grad grensefrekvensen vil være tydelig i fasadespekteret.

Trass i at en økning av tykkelsen på glasset øker flatemassen og dermed også reduksjonstallet etter masseloven, vil reduksjonen av lydisoleringen i frekvensområdet rundt sportilpassningen kunne forhindre en økning i det veide reduksjonstallet.

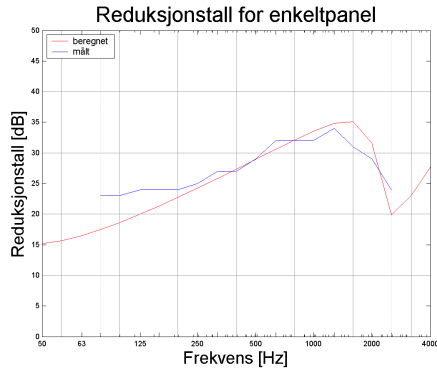
Grensefrekvensen fører til en kraftig reduksjon i lydisolasjonen og en distinkt reduksjon allerede i et par 1/3-oktavnånder lavere enn grensefrekvensens. Fra måleforsøk vises en god tilnærming til hvordan reduksjonstallet avtar mot grensefrekvensen ved å sette frekvensområdet for masseloven gyldig fra plateresonansfrekvensen til $\frac{f_c}{2}$.

En samlet versjon av beregningsuttrykk er standardisert i ISO-standard 12354-1 [32]. Standarden inkluderer i tillegg strålingsfaktor. Ved å justere tapsfaktor til formen på de målte verdiene kan man med denne beregningsmetoden få gode tilnærminger. Figur 4.5 viser en oversikt over tre forskjellige tykkelser av enkeltglass sammen med beregnede verdier ved hjelp av forenklet metode (masseloven som i likning 4.17 og likning 4.18) og standard 12354-1. MATLAB-kode til implementering av 12354-1 er hentet fra J. Cambridge [33]. I beregningene for forenklet metode er punktene fra $\frac{f_c}{2}$ til grensefrekvensen f_c interpolert med et tredjegradsuttrykk utledet fra funksjonsverdiene i $\frac{f_c}{2}$ og f_c . Målte verdier er hentet fra NBIs datasamling [20]. Sideflatene av det målte vinduet er ikke kjent utenom en kommentar i Håndbok 47 som nevner at *Målinger av vinduer blir vanligvis gjennomført med karmål (bredde og høyde) på 1,1 til 1,2 m*. Sideflatene av beregnet vindu er derfor satt kvadratisk lik 1.15 m. Materialparametre er satt etter Vigran (se avsnitt 4.3.1).

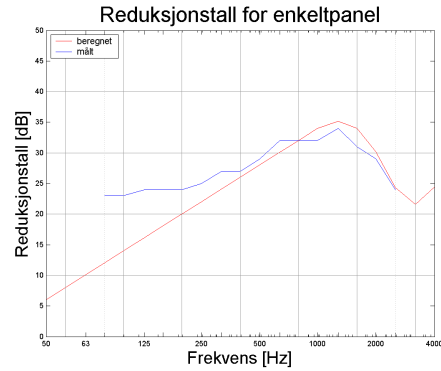
For beregningene i figur 4.5 er tapsfaktor justert etter tilpassning til målte verdier. Til sammenligning kan det refereres til R. D. Ford [31] som regner med $\eta = 0.137, 0.051$ og 0.053 ved grensefrekvensen for laminatglassene med henholdsvis 3,4 og 6 mm tykkelse fra tabell 4.4. Størst innvirkning vil tapsfaktoren ha ved grensefrekvensen der en lavere tapsfaktor vil bety en kraftigere reduksjon i lydisoleringsevnen. Det kan også observeres at beregningsmetoden underestimerer reduksjonstallet for frekvenser lavere enn 500 Hz. Til sammenligning er det tatt med et eksempel for beregnet reduksjonstallskurve for 9,5 mm enkeltglass med beregningsverktøyet *Insul* som viser samme tendens til underestimering ved lavere frekvenser.

4.3.3 Dobbelpaneler

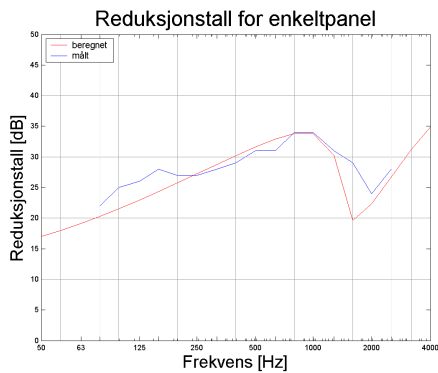
Karakteristisk for konstruksjoner av doble paneler er *dobbeltveggresonansen* eller *hulromsresonansen* (eng. mass-air-mass resonance) som fører til en klar svekkelse av lydisolasjonen rundt dette frekvensområdet. Ved dobbeltveggresonansen kan konstruksjonen modelleres som to masser forbundet av en fjær. Det er luften i hulrommet som tilsvarer fjæren, og fjærstivheten er gitt ved $k = \frac{\rho_0 c^2}{d(\cos\theta)^2}$, der d er avstanden mellom overflatene og θ er innfallsvinkelen av en plan bølge inn på konstruksjonen. Antas diffust lydinnfall og ser bort fra stivhet og demping av panelene kan man bestemme resonansfrekvensen med innsatte verdier for lydshastighet og lufttetthet ved temperatur, $T = 20^\circ C$ med



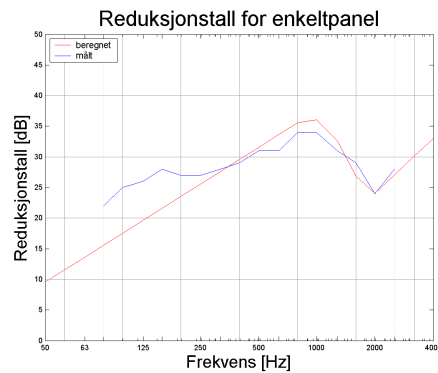
(a) 4 mm glasstykkelse, målt og beregnet fra ISO 12354-1 med $\eta = 0.01$



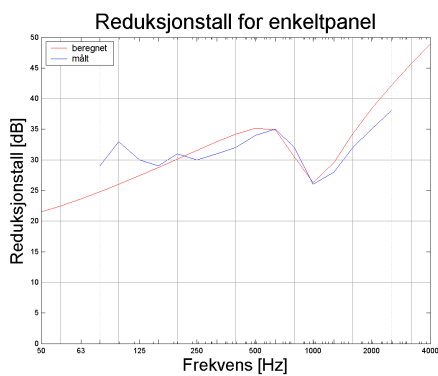
(b) 4 mm glasstykkelse, målt og beregnet fra foreklet beregningsmetode med $\eta = 0.007$



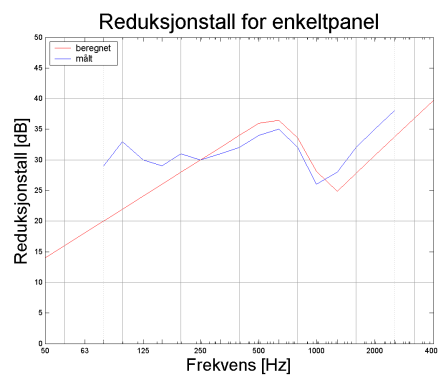
(c) 6 mm glasstykkelse, målt og beregnet fra ISO 12354-1 med $\eta = 0.015$



(d) 6 mm glasstykkelse, målt og beregnet fra foreklet beregningsmetode med $\eta = 0.015$

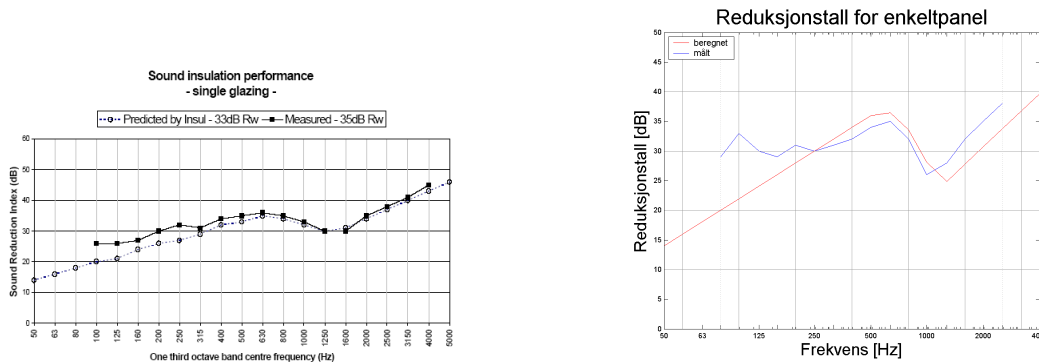


(e) 10 mm glasstykkelse, målt og beregnet fra ISO 12354-1 med $\eta = 0.045$



(f) 10 mm glasstykkelse, målt og beregnet fra foreklet beregningsmetode med $\eta = 0.015$

Figur 4.5: Målte og beregnede verdier av reduksjonstall for glass av ulike tykkelser



(a) Beregnet reduksjonstall med *Insul*, 9,5 mm enkeltglass

(b) Beregnet reduksjonstall med forenklet metode, 10 mm enkeltglass

Figur 4.6: Reduksjonstall beregnet med forenklet metode og *Insul*

ligning 4.19:

$$f_0 = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_0(m_1 + m_2)}{m_1 m_2 d}} \approx 60 \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2 d}} \quad (4.19)$$

De fleste henvisningene i litteraturen siterer likningen 4.19 til beregninger av dobbeltveggresonansen. I håndboka til Bies og Hansen [30] tilføres i tillegg en empirisk konstant 1,8, introdusert av Sharp på 70-tallet, i rotuttrykket til å korrigere for at panelenes *effektive masse* er mindre enn deres egentlige masse. Denne korreksjonen skal gjelde for dobbeltpaneler som er store i forhold til hulromsavstanden. Dobbeltveggresonansen blir da forskøvet med $\sqrt{(1,8)}f_0 = 1.3416f_0$. I videre utregninger benyttes likning 4.19 da denne er observert til å passe godt i sammenligning med målinger, men det kan være verdt å merke seg at likningen snarere vil gi et underestimat enn et overestimat av dobbeltveggfrekvensen.

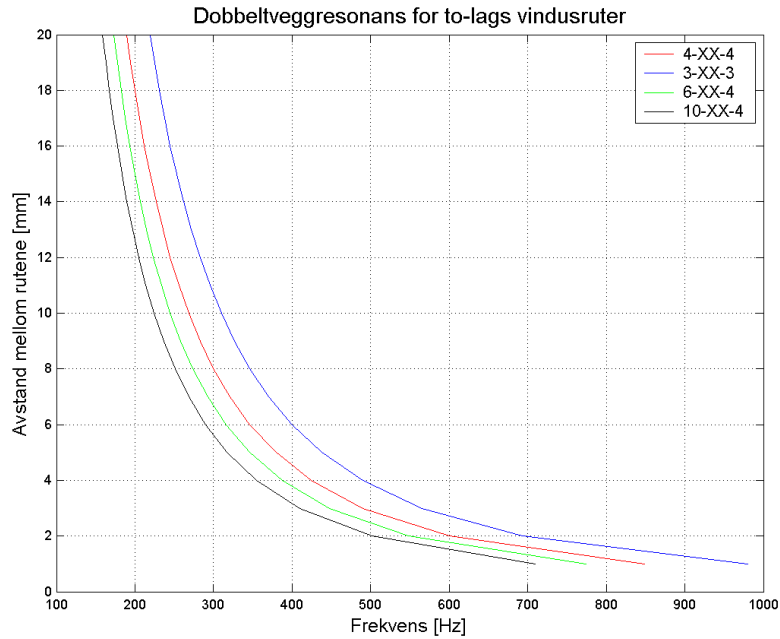
Figur 4.7 viser en skisse over hvor dobbeltveggresonansen vil havne for forskjellige to-lags isol rvinduer etter ligning 4.19. Vinduene er beskrevet med tykkelsen av panelene og mellomrommet mellom panelene i millimeter på formen: *panel1 – hulrom – panel2*. Hulrom i dobbeltkonstruksjoner av vindusglass fylles ofte av argon uten at dette har noen spesiell innvirkning på lydisolasjonsevnen i forhold til luft (Argon har materialparametre som ligner luft).

Figur 4.8 viser dobbeltveggresonansen for to-lags isol rvinduer med laminat på en side. Laminatglasset er gitt i millimeter som *panel1/laminat/panel2*. Laminatlag har her antatt tetthet $\delta = 2000\text{kg}/\text{m}^3$.

Ved å plassere et absorberende materiale i hulrommet mellom panelflatene forbedres lydisoleringen. I veggfelt vil hulrommet stort sett være fylt av absorbenter som mineralull eller glassvatt og dippen ved dobbeltveggfrekvensen blir mindre tydelig.

Ved lave frekvenser vil begge panelene svinge som et enkelt panel med masse $m_{tot} = m_1 + m_2$ og følge masseloven etter likning 4.15.

For frekvenser over dobbeltveggresonansen vil reduksjonstallet stige med 18 dB/ok-



Figur 4.7: Dobbeltveggresonans for to-lags isolèrvindu

tav frem til koinsidensfrekvensen. Over koinsidensfrekvensen avtar økningen noe og man regner en stigning i reduksjonstall på 12 dB/oktav [28].

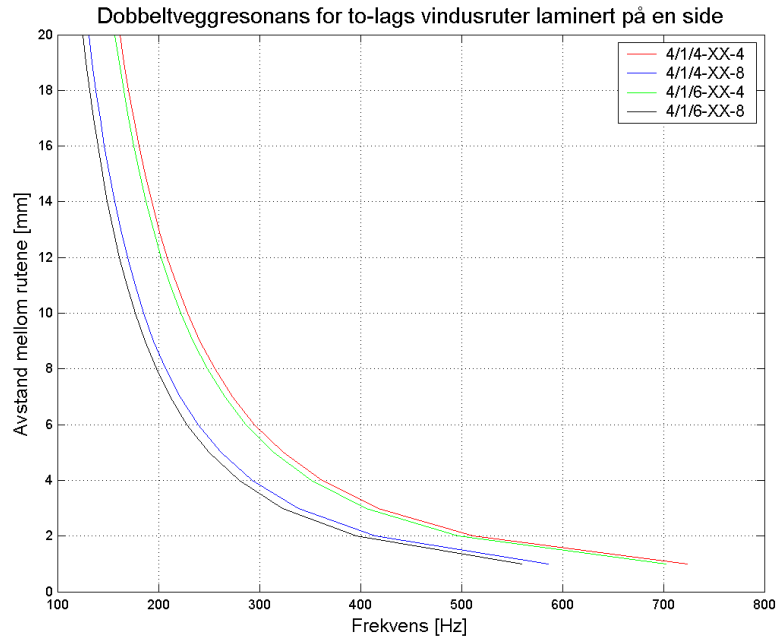
For plater med forskjellig tykkelse blir dippen ved grensefrekvensen mindre tydelig i forhold til plater med samme tykkelse der grensefrekvensen intrer på samme sted.

Den samlede beregningsmodellen er gyldig dersom hulrommet er fylt med en absorbent og vist i likning 4.20 (etter Sharp, 1978).

$$R = \begin{cases} 20\log[(m_1 + m_2)f - 47, 8] & f < 2f_0/3 \\ R_1 + R_2 + 20\log(fd) - 29 & f_0 < f < f_c \\ R_1 + R_2 - 29^1 & f > f_c \end{cases} \quad (4.20)$$

Modellen er implementert i MATLAB, se tillegg C. Figur 4.9 viser beregnet og målt reduksjonstall av en dobbel glassvindu med konstruksjon 6-12-6. Målte verdier er hentet fra NBIs datasamling [20]. Plataet mellom $2f_0/3$ til f_0 er interpolert med tredjegradsuttrykk og hver av enkeltsidene, R_1 og R_2 er funnet ved hjelp av det foreklede uttrykket utledet i kapittel 4.3.2. Sideflatene i beregnet vinduspanel er kvadratisk med 1,5. Materialparametre som i avsnitt 4.3.1. Sideflatene av det målte vinduet er ikke nøyaktig kjent utenom en kommentar i Håndbok 47 som nevner at *Målinger av vinduer blir vanligvis gjennomført med karmål (bredde og høyde) på 1,1 til 1,2 m*. Hulrommet mellom rutene er luft og tapsfaktoren er satt $\eta = 0,05$.

Fra figur 4.9 vises at beregnede reduksjontallet stiger langt raskere enn målte verdiene i området med økning på 18 dB/okt. For vinduer uten absorbent i hulrommet mellom



Figur 4.8: Dobbeltveggresonans for to-lags isolervindu med laminert glass på en side

glassene vil reduksjonstallet avta til 12 dB/okt mot grensefrekvensen i dette området. Figur 4.10 viser samme målte og beregnede verdier med en reduksjon til 12 dB/okt i stigningstallet etter $\frac{f_c}{5}$.

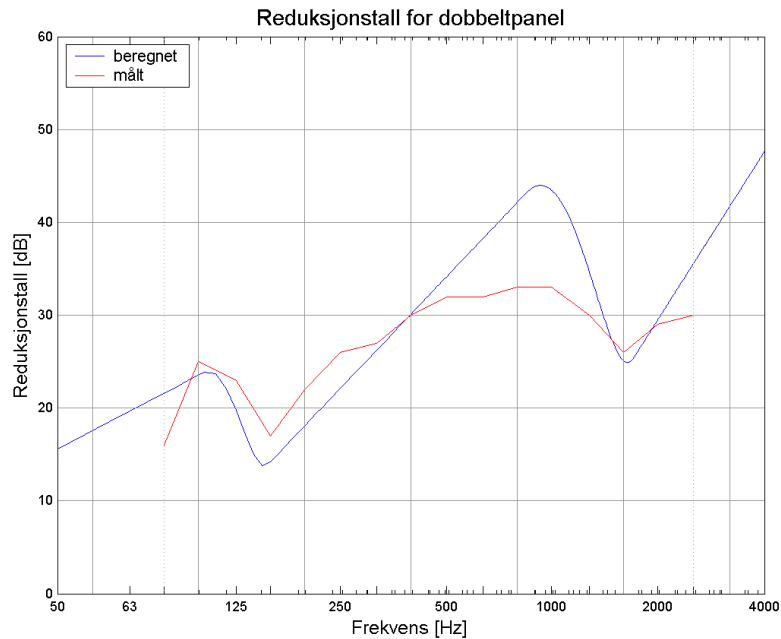
4.3.4 Trippelpaneler

Man får ikke nevneverdig forbedring i lydisolasjonen ved å bruke triple vindusglass. Man får derimot en liten gevinst i termisk isolasjon med noe mindre varmetap i forhold til standard dobbel isolerglass. Resonansfrekvensen kan beregnes ved å utvide formel 4.19 til å gjelde tre paneler der m_1 er flatemassen av det ytterste panelet mens d_1 og d_2 er mellomrommet mellom panelene etter A. Brekke [34]:

$$f_0 = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_0(m_1 + m_3)}{m_1 m_3 (d_1 + d_2)}} \approx 60 \sqrt{\frac{m_1 + m_3}{m_1 m_3 (d_1 + d_2)}} \quad (4.21)$$

4.3.5 Modal analyse

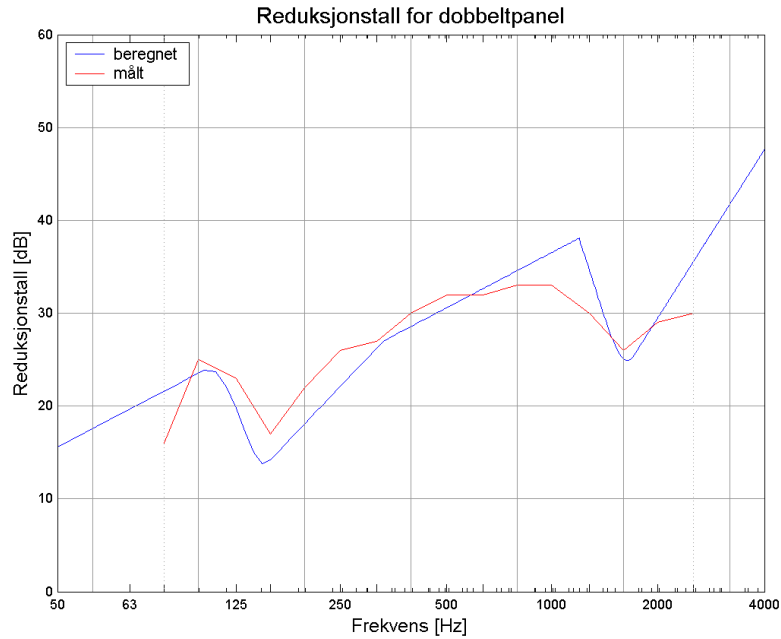
Lydutstrålingen fra en plate som er satt i svingning avhenger av platens dimensjoner. For tynne plater som vindusglass vil svingeformen avhenge av de resonante modi eller egenmodi. Hvilke modi som deltar i vinduets svingebevegelse er en kombinasjon av de modi med frekvenser innen frekvensområdet til den påtrykte støyen.



Figur 4.9: Målt og beregnet reduksjonstall for dobbeltpanel

En stor del av litteraturen som finnes i forbindelse med modal analyse av glassruter er gjort i sammenheng med aktiv støykontroll. O. E. Kaiser [35] gir en sammenfatning av litteratur og studier som omhandler aktiv støykontroll av doble glassruter. Flere kilder deriblant i ovenfornevnte Kaiser, Moez, Sofiene, Lotfi og Mohamed [36] og Trevathan og Pearse [37] viser til best resultater ved å forsøke å styre den første fundamentale platemoden. Denne moden vises å være dominerende i forhold til høyere ordens modi.

Kaiser viser til at det ikke er fullstendig klart hvilke randbetingelser som gjelder i beregninger av svingninger til vindu innsatt i ramme. I litteraturen brukes både beregninger som baserer seg på at vinduets sidekanter er fritt opplaget (enkelt understøttet, fritt innspent) (eng. simply supported) og beregninger med sidekanter fastholdt (eng. clamped) i rammen. For plater som er fritt opplagret vil platen ligge på en kant der den kan men rotere fritt i transversal retning. For fast innspenning kan platen verken bevege seg eller rotere. Virkeligheten vil antagelig være en mellomting mellom de to grensebetingelsene, med variasjoner ettersom hvor godt glasset er festet i karmen (Quirt [25]). Mest utbredt er det likevel å bruke grensebetingelsene for fritt innspenning (som brukt i Tadeu og Mateus [27] og som gjør at man får et langt enklere uttrykk enn ved å bruke fastholdt innspenning. Den klassiske formelen for enkelt opplagret rektangulær plate gir plateresonansfrekvensene etter formel 4.22, der n og m er bølgetallene, m_1 er



Figur 4.10: Målt og beregnet reduksjonstall for dobbeltpanel

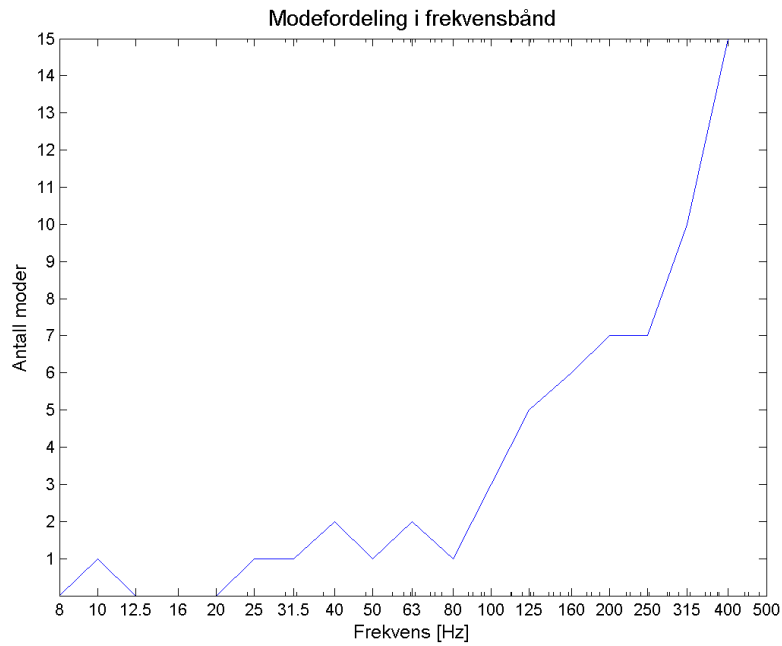
flatemasse, v er poissons tall, E er E-modul og a og b er sidelengden på platen.

$$f_{nm} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{Eh^3}{12m_1(1-v^2)}} \left[\left(\frac{n}{a}\right)^2 + \left(\frac{m}{b}\right)^2 \right] \quad (4.22)$$

Hvor stor dippen blir ved plateresonansen bestemmes av dempningsgraden av panelet og er svært vanskelig å estimere (Tadeu og Mateus [27]).

Det kan være nyttig å se på hvilke frekvensbånd modene vil havne i, slik at det kan være mulig å gjenkjenne disse. Figur 4.11 viser hvordan de første modene fordeler seg i 1/3-oktavnåbånd med senterfrekvens i 10Hz til 200Hz for en glassrute med tykkelse 4 mm og sider 1,48 m og 1,25 m. Den første fundamentale platemoden, (1,1)-moden, er i dette tilfellet på $f = 10.2$ Hz som vist i figur 4.11. Av figuren vises også at antallet modi i 1/3-oktavnåbånd øker drastisk rundt 200-300 Hz. Figur 6.2 viser en liten oversikt over hvilke frekvenser den fundamentale platemoden får ved forskjellige vindusdimensjoner.

Når det gjelder doble paneler vil en modeeksitasjon av panelene kobles via materien i hulrommet. Modeeksitasjonen av de to panelene kan slik grupperes etter tabell 4.6. Hvordan materien i hulrommet kobler panelene er en komplisert mekanisme men Moez, Sofiene, Lotfi og Mohamed [36] viser til at det vil være de odde-odde modeformer som eksiteres sterkest ved lave frekvenser. For eksempelet fra figur 4.11 intrer de odde modene etter (1,1) = 10.9 Hz, (2,2) = 43.8 Hz, (3,3) = 98,5 Hz. Innføres andre typer vinduskonstruksjoner (for eksempel innvendig varevindu og sprosset yttervindu) vil situasjonen ytterligere kompliseres.



Figur 4.11: Modfordeling i 1/3 oktavnband for glass med tykkelse 4mm og sider 1.48m og 1.25m

Dimensjoner [m]	Resonans frekvens [Hz]	1/3 oktavnband [Hz]
0,5 * 0,5	74,5	80
0,5 * 1	46,5	50
1 * 1	18,6	20
2 * 1	11,6	12,5

Tabell 4.5: Fundamentale plateresonansen for glass, tykkelse 4mm

Modeeksitasjon	Innvirkning på materie i hulrom
I fase	Nei
I motsatt fase	Ja

Tabell 4.6: Modeeksitasjon av doble paneler

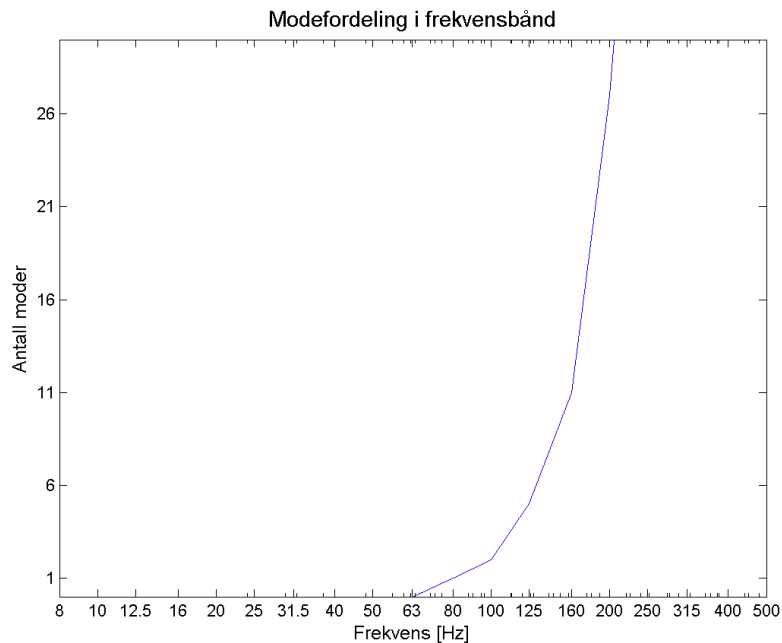
4.3.6 Rommets innvirkning på lydisolasjonen

Modeeksitasjonen av lydfeltet i rektangulære rom er som en dimensjonsutvidelse av formelen til modeeksitasjonen for tynne paneler og man finner senterfrekvensen til rom-

modene ved hjelp av formel som vist i formel 4.23:

$$f_{nm} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n}{a}\right)^2 + \left(\frac{m}{b}\right)^2 + \left(\frac{o}{b}\right)^2} \quad (4.23)$$

Figur 4.12 viser modefordelingen av rommoder i rektangulært rom med dimensjoner 6,2 m, 4,1 m og 2,5 m.



Figur 4.12: Modefordeling i 1/3 oktavnband for rommoder i rom med dimensjoner 6,2 m, 4,1 m og 2,5 m

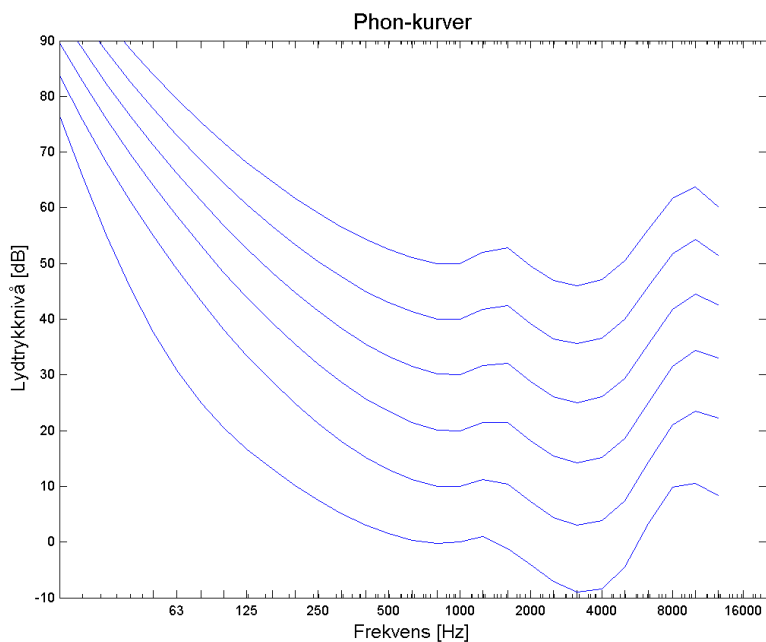
Schröderfrekvensen er satt som den nedre frekvensgrensen som begrenser frekvensområdet som kan betegnes som diffust felt. Under denne frekvensen forekommer modene med så stor avstand at lydfeltet ikke kan regnes som diffust. Schröderfrekvensen er gitt av:

$$f \geq 2000 \sqrt{\frac{T}{V}} \quad (4.24)$$

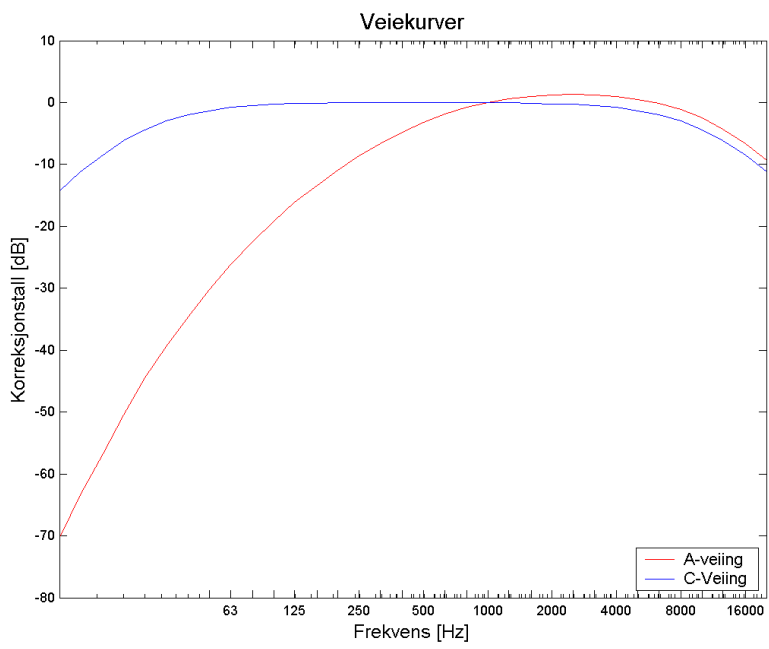
For eksempelet i figur 4.12 vil Schröderfrekvensen inntre ved 137,4 Hz for et godt dempet rom med etterklangstid 0,3, mens for etterklangstid lik 0,5 og 1,5 vil den inntre på henholdsvis 177,4 og 307,27 Hz. Tadeu og Mateus [27] viser hvordan rommodene kan detekteres i spektrumet for reduksjonstallet.

4.4 Veiekurver

Figuren 4.13 viser seks såkalte *likelydskurver* eller *phon-kurver* (eng. equal-loudness contours) generert etter ISO 226:2003 [38]. 1 phon er definert som $1dB$ ved 1 kHz og kurvene i figuren viser seks phonnivåer fra 0 til 50 med skrittstørrelse på 10 nivå. Likelydskurvene er basert på forskning utført av H.Fletcher og W.A.Munson på tidlig 1900-tallet og senere modifisert noe. Kurvene viser for hvilket lydtryknivå en rentone først detekteres av hørselen. Hørselen kan sammenlignes med et båndpassfilter som demper lave og høye frekvenser. For å kompensere for hvordan hørselen oppfatter lyden korrigeres spektrumsformen med veiekurver. For A-veiing får man en kraftig dempning i lavfrekvente området, mens C-veiingen gir høyere verdier for lyder med større lavfrekvensinnhold. Figur 4.14 viser korreksjonskurvene for A- og C-veiing.



Figur 4.13: Phonkurver etter ISO 226



Figur 4.14: Korreksjonskurver for A- og C-veing

Kapittel 5

Metode

5.1 Håndbok 47

Norsk byggforskningsinstitutt (NBI, Byggforsk) utga i 1999 *Håndbok 47 - Isolering mot utendørs støy* [18]. Håndboken presenterer to beregningsmodeller for lydisolering mot utendørs støy sammen med en samling av lydreduksjonstall for yttervegger, vinduer, ventiler og takelementer. Til lydreduksjonstallene følger det med en tabell med korreksjonstall for ulike støykilder for seks veg, fly og tog/bane.

Beregningsmodellene som forklares i håndboken er:

1. Beregning av innenivå
2. Beregning av krav til konstruksjon

Den første beregningsmodellen brukes til å finne innendørs lydnivå ut fra ut fra ligning 4.6. Beregningsmodellen krever kunnskap om delementenes reduksjonstall mot den aktuelle støykilden, utvendig støynivå, i tillegg til geometriske detaljer og etterklangstid i motakerrommet. SFTs *veileder til grenseverdiforskriften* [6] og *veileder til forurensningsforskriften* [8] viser til Håndbok 47 som anbefalt metode til å finne innendørs støynivå, $L_{A,ekv,24t}$, i forhold til grenseverdiene i lovverket. Ved beregning av innendørs støynivået forutsettes lukkede vinduer og ventiler. Gjennomføringer av fasadeisolasjonsmålinger er både tidskrevende og dyrt, og det foretas målinger kun i enkelte tilfeller der det er stor usikkerhet rundt oppbygningen av bygningskonstruksjonen og der det er fare for overskridelse av grenseverdiene. Beregninger av innendørsnivåer baserer seg gjerne på innspeksjon av bygningskonstruksjonen og elementenes reduksjonstall bestemmes så fra tilgjengelige kilder.

Den andre beregningsmodellen som beskrives i Håndbok 47 er til å bestemme hvilke krav som må settes til delementer dersom tillatt innendørsnivå er kjent. Ved å gjennomføre beregninger i prosjekteringsfasen kan en sikre at grenseverdiene i tabell 2.1 ikke overskrides.

De data som danner grunnlaget for begge beregningene kan skaffes fra leverandør, artikler, eller fra datasamlingen i Håndbok 47. Håndboken baserer sin datasamling på

bruken av ett-talls karakteristikkene $R_w + C_{tr}$ for vegg og vindu og $D_{n,w}$ uten C-korreksjon for ventil. Håndboken oppgir korreksjonsverdier for støy fra forskjellige situasjoner av vegtrafikkstøy, flystøy eller støy fra skinnegående trafikk. For vegtrafikkstøy har håndbokens datasamling seks ulike korreksjonsverdier for forskjellige trafikksituasjoner.

Forfatterene av Håndbok 47 oppgir beregningsnøyaktigheten til å være innenfor ± 2 dB i forhold til målte verdier. Andre undersøkelser som har blitt gjennomført for å sjekke nøyaktigheten til Håndbok 47, deriblant av E. Falch [39], viser derimot til et gjennomsnittlig avvik på ± 3 dB for nyere bygninger og et noe større avvik opp mot 5 dB for eldre bygg. S. Olafsen [40] viser også at beregninger kan avvike med opptil 10-12 dB fra måleresultater.

Beregningsmodellene som presenteres i Håndbok 47 finnes implementert i ulike utgaver deriblant som regneark i Excel. SINTEFs *NB-Støy* [41] implementerer Håndbok 39 (forløperen til Håndbok 47) til utregninger av innendørs støynivå med valgt *detaljert* fasadedempning.

5.2 Programvare til utregning av lydisolasjon

Det finnes en rekke programvare som benyttes i sammenheng med vegtrafikkstøy og fasadedempning. For å beregne utendørs støynivå med høy nøyaktighet baseres beregningene på *Nordisk Beregningsmetode for Vegtrafikkstøy av 1996*. Denne beregningsmodellen er implementert i flere beregningsverktøy; fra NB-Støy til større programvareverktøy som *SoundPlan*, *NovaPoint*, *CADNA* og *Immis*. For mindre nøyaktige oversiktsberegninger brukes en forenklet metode med beregningsverktøyet VSTØY. Til nøyaktige beregninger av vegtrafikk behøves opplysninger om antall kjøretøypasseringer (måles i årsdøgntrafikk - ÅDT), hastighet, veggradient og tungtrafikkprosent i tillegg til terreng- og bygningsdata. Til beregningene korrigeres årsdøgntrafikk etter trafikkprognose 10 år frem i tid for å ta høyde for fremtidig trafikkvekst.

Til beregninger av lydisolasjon finnes flere beregningsverktøy som *Insul*, *Bastian* og *WinFLAG*, som alle beregner det samlede reduksjonstallet til en skillepartisjon bygget opp av flere delelementer.

5.3 Forslag til analytisk-empirisk beregningsmodell

I dette kapittelet legges frem et forslag til analytisk-empirisk beregningverktøy for detektering av kritiske resonanser i fasadeisolasjonsspekteret med hensyn til topper i vegtrafikkstøyspekteret. Programmet er ment å gi en alternativ versjon til den tradisjonelle bruken av ett-tallsverdier ved å presentere den totale lydisoleringen, utendørs trafikkstøy og det innendørs støynivået på spektral form.

5.3.1 Bakgrunn

Programmet er skrevet i C# for integrering med programvare laget til databasen *Stairway* [2] ved Brekke og Strand Akustikk. Stairway inneholder et stort antall fasadeiso-

lasjonsmålinger fra en rekke ulike konstruksjoner og et stort antall målinger av utendørs trafikkstøy. Programmet kalt *H47* krever *.NET 2.0* som må installeres i forkant av installasjon av programmet. Ved å bruke installasjonsfilen som følger med rapporten vil dette gjøres automatisk.

Det er også laget en alternativ beregningsmetode uavhengig av Stairway som baserer seg på laboratoriemålte reduksjonstallsdata av veggfelt og ventiler sammen med generiske matematiske beregninger (som vist i kapittel 4.3) av reduksjonstall for ulike typer vinduer. Beregning av innendørs støynivå gjøres etter beregningsmodell 1 i Håndbok 47, og presenteres spektralt sammen med utendørs trafikkstøy og totale lydisolasjonsdata. Ett-tallsverdier for utendørs støynivå i fasadeplanet, det veide totale lydreduksjonstallet med C-korreksjoner og A-veid innendørs ekvivalentnivå regnes også ut.

Det er implementert mulighet til å sammenligne resultater på tvers av benevnelser fordi forskjeller kilder ofte benytter forskjellig notasjon på verdiene som oppgis. Tabell 5.1 viser hvilke benevnelser som kan velges i visningen av fasadeisolasjonsspekteret.

Beskrivelse	Notasjon
Tilsynelatende lydreduksjonstall	R'
Nivåforskjell	D
Normalisert nivåforskjell	$D_{2m,n}$
Standardisert nivåforskjell	D_{nT}
Standardisert fasade nivåforskjell	$D_{nT,2m}$

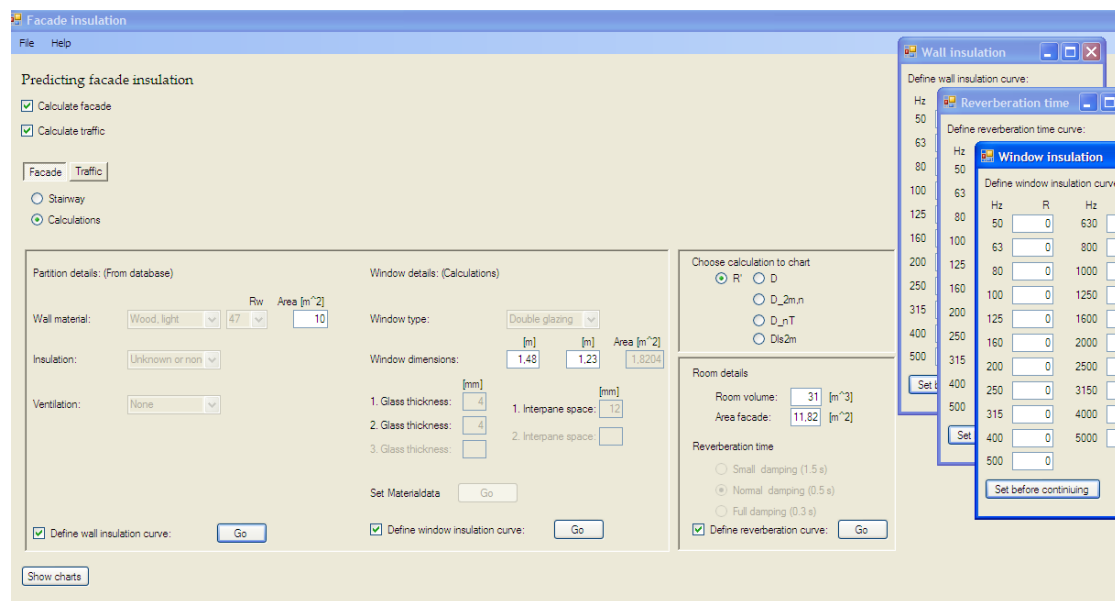
Tabell 5.1: Notasjon lagt inn i foreslått metode

5.3.2 I bruk

Det første man velger i åpningsvinduet (vist i figur 5.1) er hvilke funksjonskurver som skal vises. Man kan velge å vise trafikurve og fasadeisolasjonskurve for seg. Ved å velge begge kurver gis mulighet til å regne ut innendørs støynivå.

Integrasjon med databasen StairWay gjør det mulig å hente nivådifferanse for et sett av parametere når programmet er tilknyttet denne. I versjonen som leveres med denne rapporten legges kun med resultater fra spørringen som genereres av standardinnstillingene. Velges beregninger (*Calculations*) vil man kunne velge mellom reduksjonstall for veggfelt, isolasjon og ventilasjon. For vindusberegninger benyttes teoretiske matematiske modeller. Fra nedrullsboksene i beregningsvinduet er det foreløpig kun differensiert mellom tre ulike veggfelt og et fåtall av ventilasjonstyper på grunn av vanskeligheter med å skaffe til veie tilstrekkelige reduksjonstallsdata. Det er derfor lagt inn mulighet til å definere reduksjonstall for veggfelt selv.

Til korrigerende verdiene etter det aktuelle mottakerrommet som skal vurderes er det nødvendig å sette korrekte romdimensjoner der beregningene krever dette. Det er valgt å skille mellom etterklangstid på 0,3 s for møblert dempet soverom/oppholdsrom, 0,5 s som er definert som normalverdi i Håndbok 47 i tillegg til 1,5 s for umøblerte rom.



Figur 5.1: Utsnitt av skjermbilde av foreslått metode, beregninger

Dersom spektrumsverdiene av etterklangstiden er tilgjengelig kan også denne defineres manuelt.

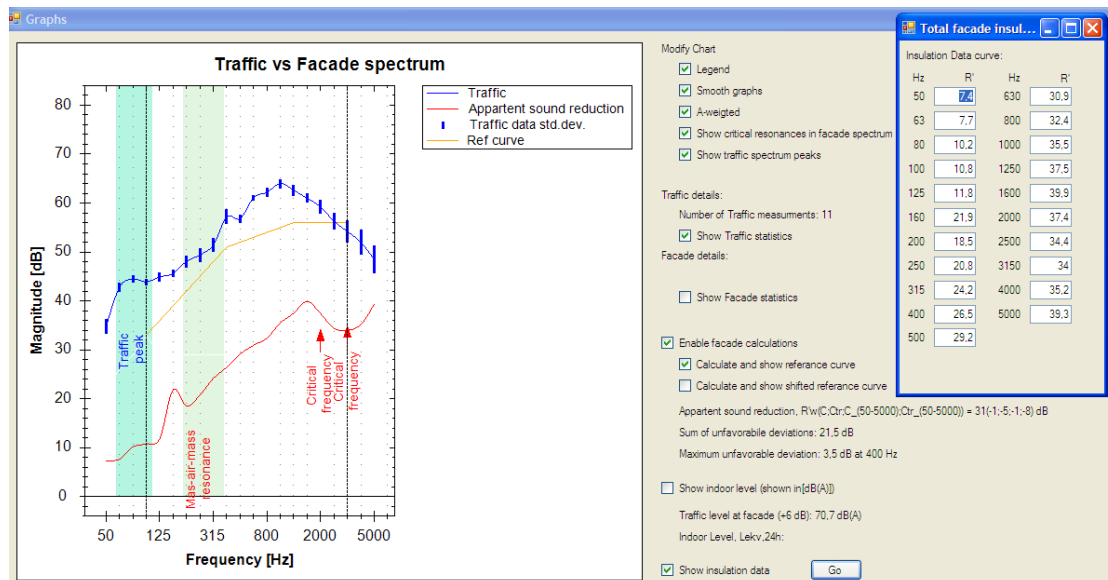
For trafikkdata er det mulig å velge mellom utendørs spektrum fra StairWay, glattet støyspekter fra Håndbok 47 eller man kan definere spektrum selv. Valg av glattet spektrum fra Håndbok 47 krever at kurven normaliseres til frittfelt utenivå. Valg av egendefinert utendørs støykurve krever at man sjekker av om kurven er A-veiet samt skriver inn refleksjonstillegg som målingen inkluderer.

For å slippe å legge inn verdier på nytt finnes det mulighet for lagre og åpne data som tekstfil fra verktøylinja.

Etter at isolasjon- og trafikkdata er satt, kan man generere kurvene ved å åpne grafvinduet (vist i figur 5.2). I grafvinduet kan man:

- Modifisere utseende på kurvene:
 - Fjerne legend
 - Glatte kurvene
 - A-veie kurvene
 - Vise kritiske resonanser på fasadeisolasjonskurven
 - Vise lavfrekvent frekvenstopp
- Statistikk:
 - Vise standardavviket for trafikkdata fra StairWay
 - Vise standardavviket for fasadedata fra StairWay

- Beregne veid ett-tallsverdi av fasadeisolasjonsspekter med C-korreksjoner
- Beregne innendørs A-veid ekvivalent støynivå



Figur 5.2: Utsnitt av skjermbilde av foreslått metode, resultater

Kapittel 6

Resultater

6.1 Analyse av fasadeisolasjonsmålinger

Det er foretatt en analyse av nivå-differansespektra for å identifisere svake frekvensområder og årsakene til disse. Det er sett på 13 nivå-differansmålinger for 10 ulike boliger langs Rv35 gjennom Jevnaker mot Roa. Målingene ble utført i 2002 i forbindelse med en utredning av innendørs støynivå i boliger i Oppland fylke. For å få nøyaktig informasjon om vindusdetaljer, ble det gjort ettermålinger av vinduskonstruksjon og beboerne ble forespurt om de hadde gjort noen forandringer med vinduene siden 2002. Tabell 6.1 inneholder avleste verdier fra målingene og beregnede verdier for grenseverdi og dobbeltveggresonans.

Fra tabell 6.1 kan det observeres at det er god samsvar mellom avleste og beregnede verdier for dobbeltveggresonansen. I flere spektra synes dobbeltveggresonansen tydelig med en distinkt reduksjon lydisolasjonen. Når det gjelder avlesning av grensefrekvensen er det noe mer problematisk fordi kurven svekkes allerede i noen 1/3-oktavbånd tidligere. Panelresonansen henviser til den første fundamentale (1-1)-modeeksitasjonen av innvendig glassrute.

6.2 Intensitetsmåling av fasadeelementer

For å understøtte antagelsen om at glassvinduet er det svakeste lydisolerende elementet i en fasade, ble det foretatt lydintensitetsmålinger av vindu- og veggelement i en fasade. Se tillegg B.1 for en mer detaljert beskrivelse av intensitetsmålingene. Måleresultatene er vist i figur 6.1.

Det kan observeres at for frekvenser over 100 Hz vil lydenergien som transmitteres gjennom vinduet ligge rundt 10 dB høyere enn hva som transmitteres gjennom veggen. I 100 Hz-1/3-oktavbåndet er det veggelementet som transmitterer mest energi og under 100 Hz er det det liten eller ingen betydelig differanse mellom de elementene. Trass i problemer med å oppfylle kravene til målegylldighet (se tillegg B.1) gir disse resultatene et godt esimat over hvordan energitransmisjonen gjennom partisjonen fordeler seg mellom elementene.

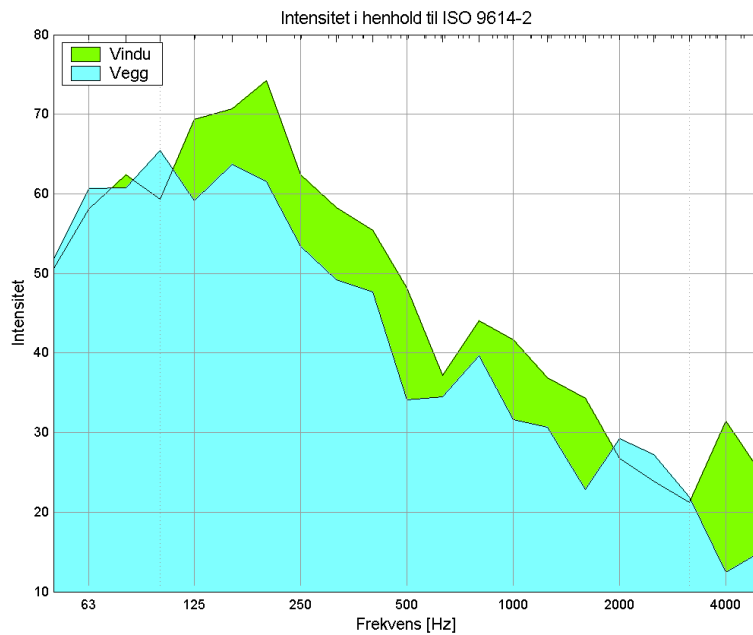
Navn	Vindusbeskrivelse	Konstruksjon [mm-mm-mm]	(a*b) ^a	Avlest	Beregnet	Avlest	Beregnet	Panelresonans
R051-01-d1	Dobbeltvindu	3-12-3	(140*120)	4000	4145	250	282,8	8,9
R051-01-d2	Dobbeltvindu	3-12-3	(130*120)	NA ^b	4145	250	282,8	11,98
R051-02-d1	To separerte rammer	3-55-3	(70*120)	NA ^c	4145	160	132,1	19,1
R051-02-d2	To separerte rammer	3-55-3	(70*120)	4145	4000	160	132,1	19,1
R051-04-d1	Dobbeltvindu	3-12-3	(140*120)	4145	4000	200/250	282,8	8,9
R051-04-d2	Dobbeltvindu	3-12-3	(140*120)	4145	4000	200/250	282,8	8,9
R051-05-d1	Dobbeltvindu	4-12-4	(150*130)	3150	3109,1	250	245	9,7
R051-06-d1	Dobbeltvindu	4-12-4	(150*130)	4000	3109,1	250	245	9,7
R051-07-d1	To separerte rammer	4-55-4	(33*115)	4000	3109,1	125	114,4	92,6
R051-08-d1	Dobbeltvindu	4-12-4	(95*125)	NA	3109,1	NA	245	16,3
R051-09-d1	Dobbeltvindu	4-12-4	(130*120)	3150	3109,1	250	245	16,3
R051-10-d1	Dobbeltvindu	3-16-3	(130*120)	NA	4145	315	282,8	11,98
R051-11-d1	Dobbeltvindu	4-12-4	(100*80)	NA	3109,1	250	245	14,5

Tabell 6.1: Analyse av feltmålte data fra StairWay

^adimensjonene på glassruta i mm

^bhull i veggens maskerer grensefrekvens

^cingen synlig grensefrekvens



Figur 6.1: Måling av intensitet fra vegg- og vinduselement

Vinduet som ble målt besto av to koblede glass av 4 mm med hulrom på 50 mm. Etter formel 4.19 med innsatt $2500\text{kg}/\text{m}^3 * 0.004\text{m} = 10\text{kg}/\text{m}^2$ blir dobbeltveggresonansen 120 Hz og kan observeres som energitoppen i 1/3-oktavbåndene i 125 Hz.

$$f_0 = 60 * \sqrt{\frac{(m_1 + m_2)}{m_1 m_2 d}} = 60 \sqrt{\frac{(10 + 10)}{10 * 10 * 0,05}} = 120,0 \quad (6.1)$$

Ved å ta høyde for korreksjon for at den *effektive massen* er lavere enn massen får man dobbeltveggresonansen ved 160 Hz, som samsvarer bra i dette tilfellet.

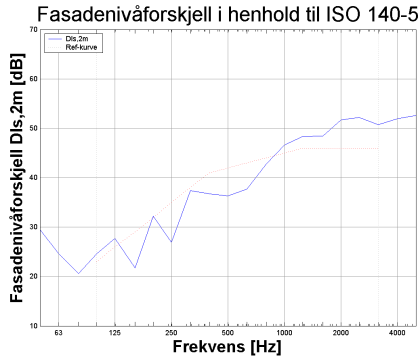
$$f_0 = 60 * \sqrt{\frac{1.8 * (m_1 + m_2)}{m_1 m_2 d}} = 60 \sqrt{\frac{1.8 * (10 + 10)}{10 * 10 * 0,05}} = 161,0 \quad (6.2)$$

Den mer høyfrekvente toppen kan tilskrives vinduets grensefrekvens:

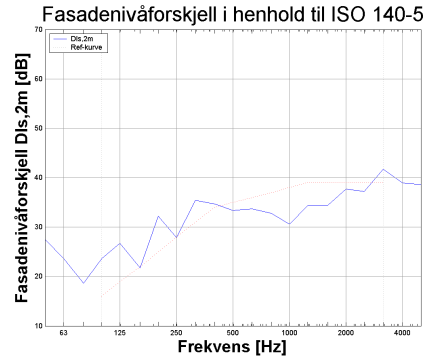
$$f_c = \frac{c^2}{1.81h} \sqrt{\frac{\delta(1 - v^2)}{E}} = \frac{c^2}{1.81 * 0,004} \sqrt{\frac{\delta(1 - v^2)}{E}} = 3109.1\text{Hz} \quad (6.3)$$

6.3 Fasadeisolasjonsmålinger

Det har blitt foretatt to fasadeisolasjonsmålinger i henhold til fremgangsmetoden i ISO 140-5. Ved den ene målingen ble det også gjort lydopptak og fouriertransformasjon av



(a) Lydtrykknivåforskjell hyttevegg, lukket luftespalte



(b) Lydtrykknivåforskjell hyttevegg, åpen luftespalte

Figur 6.2: Lydtrykknivåforskjell hyttevegg, åpen og lukket luftespalte

signalet i mottakerrommet for å forsøke å identifisere rom- eller vindusmoder i lydspekteret.

6.3.1 Måling 1: Hyttevegg

Målingen ble utført i et lite soverom med sideflater 2 m, 2,15 m, og 2 m. Ytterveggen besto av bindingsverk med innvendig panel og utlektet utvendig kledning. Vinduskonstruksjonen var et horisontalt delt dobbeltglass (4-12[Ar]-4) med sidekanter av 70 mm * 46 mm. Ventilasjonen var en spalteventil på 215 * 15 mm øverst i vinduskarmen (se også tillegg B.3).

Det ble målt lydtrykknivåforskjell med åpen og lukket ventil. Figur 6.2(a) viser den standardiserte lydtrykknivåforskjellen med lukket ventil mens 6.2(b) viser den standardiserte nivåforskjellen med spalteventilen i åpen posisjon. En sammenligning av de to figurene viser en klar reduksjon i lydisolasjonen i midlere og høyere frekvenser (fra omkring 800 Hz) med åpen ventil. For lavere frekvenser under 800 Hz er nivåforskjellen den samme. Med lukket ventil ble den veide nivåforskjellen $D'_{ls,2m,w} = 42$ mens den for åpen ventil ble målt til $D'_{ls,2m,w} = 38$.

Fra figurene i 6.2 vises dobbeltveggresonansen i 250 Hz 1/3-oktavbåndet noe som sammenfaller bra med utregnet verdi for (4-12-4)-vinduer lik 245 Hz:

$$f_0 = 60 * \sqrt{\frac{(m_1 + m_2)}{m_1 m_2 d}} = 60 \sqrt{\frac{(10 + 10)}{10 * 10 * 0,016}} = 245,0 \quad (6.4)$$

Grensefrekvensen synes i 3150 Hz-båndet i nivåforskjellkurven med lukket ventil, men er maskert av lydgjennomgangen gjennom ventilen i kurven med åpen ventil (se likning 6.3).

Lydopptak

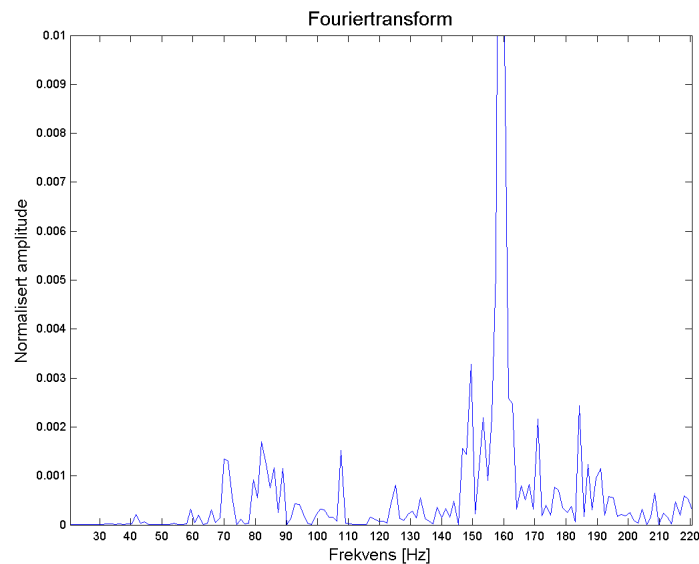
Teorien tilsier at avstanden mellom modeeksitasjonene i glasset ved lave frekvenser er så stor at det skulle være mulig å identifisere de individuelle modi. For å kunne identifisere modene ble det utført lydopptak og Fouriertransformasjon av lydopptaket for flere mikrofonposisjoner.

Tabell 6.2 viser hvilken frekvens modeeksitasjonen ble beregnet til for glasspanelet og rommet.

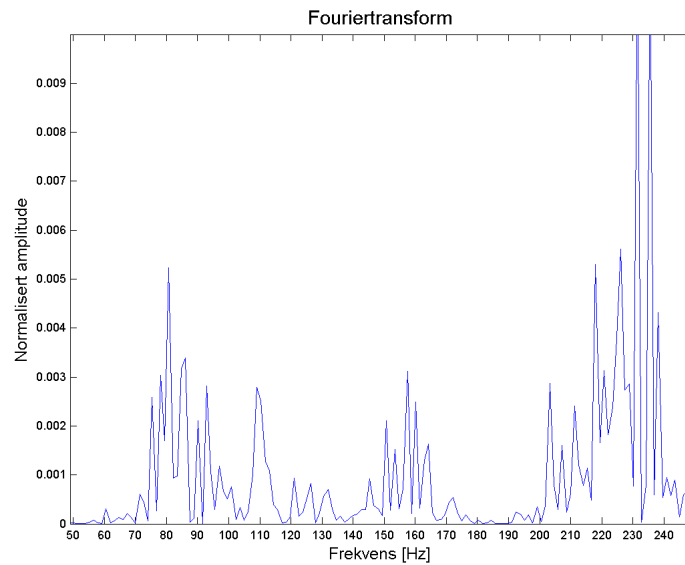
Modeform, glasset	Frekvens [Hz]	Modeform, rommet	Frekvens, [Hz]
(1,1)	63,0	(1,1,1)	147,22
(2,1)	120,0	(2,1,1)	208,2
(1,2)	195,1	(1,2,1)	208,2
(2,2)	252,1	(1,1,2)	208,2
(3,1)	215,1	(2,1,2)	255,0
(3,2)	347,1	(2,2,2)	255,0

Tabell 6.2:

Figur 6.3 viser 32768-punkts Fouriertransform i MATLAB av det tidsmidlet lydsignalet med mikrofonen plassert midt i rommet. Av figuren kan det observeres en topp rundt 160Hz, noe som ikke samsvarer med utregningene av modedefrekvensene. Figur 6.4 et utsnitt av lydopptaket og denne gang vises frekvenstoppen rundt 80 og 200 Hz.

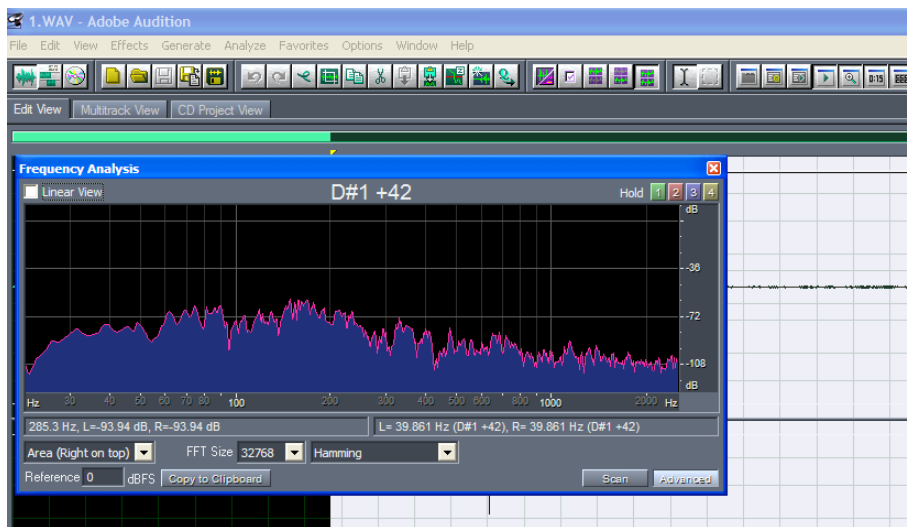


Figur 6.3: Fouriertransformasjon av lydsignal i MATLAB, tidsmidlet over hele perioden



Figur 6.4: Fouriertransformasjon av lydsignal i MATLAB, utsnitt

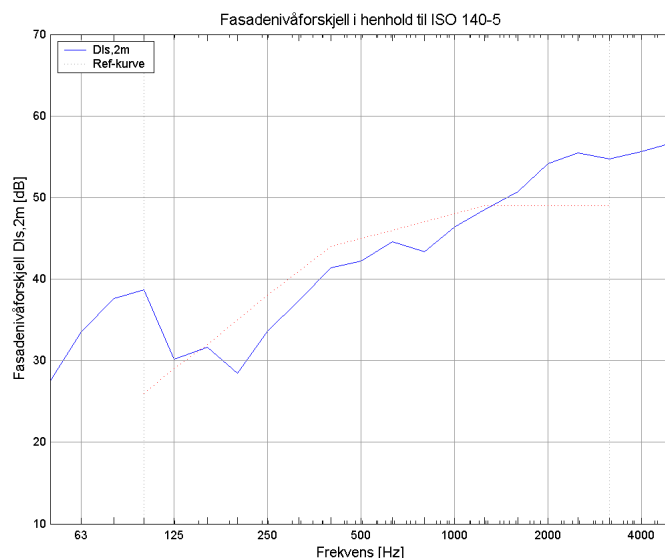
Adobe Audition er en lydeditor med mulighet for frekvensanalyse med fouriertransformen. Ved å ta forskjellige utsnitt av lydfilen kan det observeres høye lydnivå i frekvensområdet fra 60 til 200 Hz. Topper og dipper i frekvensspektert varierte stort, og gjør detektering av individuelle modeeksitasjoner vanskelig.



Figur 6.5: Fouriertransformasjon av lydsignal i Adobe Audition, utsnitt

6.3.2 Måling 2: De nye Grønlandskvartalene

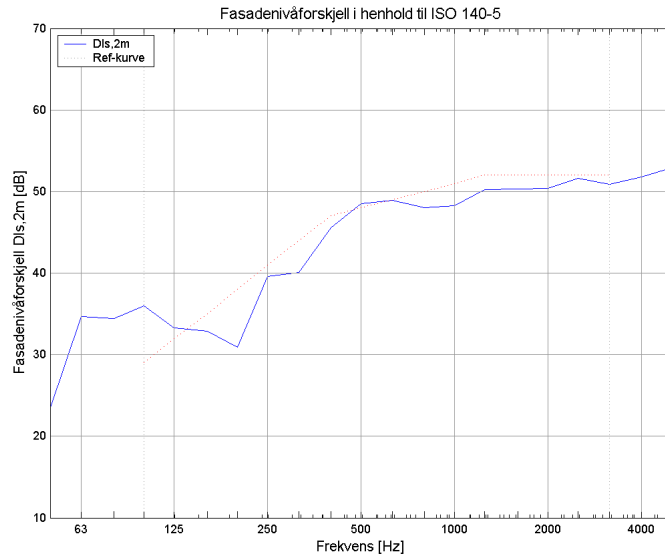
Den andre fasadeisolasjonsmålingen ble utført i forbindelse med et byggingen av *De nye Grønlandskvartalene* i Oslo. Rommene som ble målt var et lite soverom på $7m^2$ og et kombinert oppholdsrom / kjøkken på $70m^2$. Ytterveggen var oppbygd av *STO* pussystem (se tillegg B.3) og doble 4-16-4 isolèrvinduer. Figurene 6.6 og 6.7 viser den standardiserte lydtrykknivådifferansen for begge målingene. Dobbeltveggresonansen i vinduene kan sees i frekvensbåndet rundt 200 Hz (beregnet 212 Hz) og grensefrekvensen synes med en liten reduksjon rundt 3150 Hz (beregnet 3109 Hz). Det kan også være verdt å merke seg at det minste rommet målte veid standardisert nivådifferanse lik 48 dB mens det større rommet målte 3 dB mindre, i godt samsvar med formel 4.6. Etterklangstida var også noe større i det store rommet hhv 2,7 s mot 2,4. De relativt sett høye etterklangstidene kan sees i sammenheng med at rommene var umøblerte.



Figur 6.6: Lydtrykknivådifferanse boligblokk, umøblert soverom, $D'_{ls,2m,w} = 48$

6.4 Vibrasjonsmålinger

Det ble også utført vibrasjonsmålinger for å identifisere eksitasjonen av vindusmodene med accelerometer festet på glasset på det samme vinduet som i intensitetsmålingen. Målingene ble utført med lydkort og måleverktøyet *WinMLS* (se også tillegg B.2 for ytterligere måledetaljer). Figur 6.8 viser akselerasjonen i $\frac{m}{s^2}$ for frekvensspektet 20 - 500 Hz. Accelerometeret er festet midt på vindusglasset, der den første panelresonansen

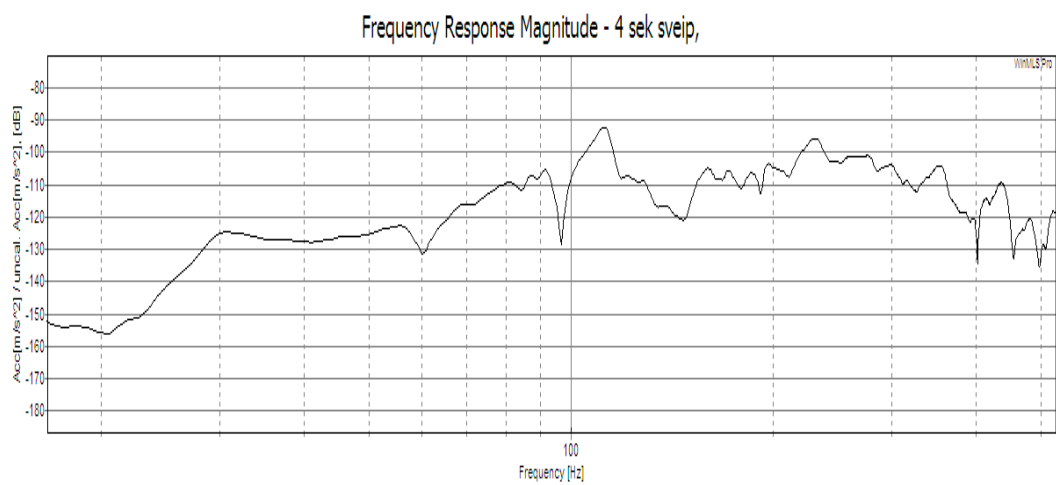


Figur 6.7: Lydtrykknivådifferanse boligblokk, umøblert oppholdsrom / kjøkken, $D'_{ls,2m,w} = 45$

skulle være mest synlige. Den første modeneksitasjonen er gitt ved formel 4.22:

$$f_{nm} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{Eh^3}{12m_1(1-v^2)}} \left[\left(\frac{1}{0,7}\right)^2 + \left(\frac{1}{0,44}\right)^2 \right] = 67.1 \quad (6.5)$$

Fra figur 6.8 vises ingen distinkte topper rundt den beregnede modedefrekvensen som kan tilskrives. Derimot kan det observeres en topp rett over 100 Hz, noe som kan være (2,1)-moden som har modedefrekvens lik 120 Hz. Årsaker til at de beregnede modeeksitasjonene ikke er synlige i frekvensspekteret kan for eksempel være dempningen av glasset i vindusrammen eller koblinger mellom vindusrutene (det ytre glasset var et sprosset vindu).



Figur 6.8: Vibrasjonsmåling av vinduets accelerasjon

Kapittel 7

Diskusjon

7.1 Kommentarer til resultatene

Intensitetsmålingene viser at vinduet overfører mer lydenergi enn veggfelt i frekvenser over 100 Hz i lette treveggkonstruksjoner. For frekvenser under 100 Hz er lydgjennomgangen gjennom veggfeltet det samme som gjennom vinduet. Dersom man skulle kunne stoppe energitransmisjon gjennom vinduet vil en halvering av lydenergien i mottakerrommet derfor høyst gi en reduksjon på 3 dB i disse frekvensene.

Fra analysen av nivåforskjellene vises en distinkt reduksjon i lydisolasjonen i frekvensområdet rundt dobbeltveggresonansen til vinduskonstruksjonen for flere av fasadeisolasjonsmålingene. Også grensefrekvensen er synlig med en reduksjon i lydisolasjonen allerede et par 1/3-oktavnånder lavere enn 1/3-oktavnånder som inneholder grensefrekvensen.

Når det gjelder modeeksitasjonen av glass- og rommoder er detekteringen av disse vanskelig med feltmålinger. I laboratorium vil forholdene derimot kunne åpne for identifikasjon av disse i frekvensspektret, som vist i Tadeu og Mateus [27]. For vanlige vinduer med små variasjoner av størrelse rundt 1 * 1 m vil de dominerende modi havne under 50 Hz og være så lavfrekvente at lydtransmisjonen via disse får mindre betydning i et A-veid spektrum.

7.2 Dagens metode, Håndbok 47

Det store mangfoldet av forskjellige fasadekonstruksjoner gjør det i praksis umulig å lage en fullstendig database til beregninger av lydisolasjon. Store variasjoner i utførelse og stand bidrar til ytterligere variasjoner. Håndbok 47 presenterer en enkel og hurtig metode for evaluering av lydisolasjon mot utendørs støy basert på befaring av konstruksjon og støysituasjon. SFTs forslag til endring av forurensningsforskriftens kapittel 5 Støy [42] og B. Heggøy [43] gir begge en evaluering av metodikken i Håndbok 47. En sammenfatning av de positive sidene ved bruken av Håndbok 47 inkluderer:

- Tilgjengelighet, felles metodikk
- Enkelhet, lett å bruke

- Økonomisk, tidsbesparende i forhold til målinger

Av negative sider ved bruken av metodikken i håndbok 47 pekes det på:

- Lav reproduserbarhet, forskjellige personer bedømmer konstruksjon og korreksjoner ulikt
- Ett-tallskararakteristikken gir en lite dekkende beskrivelse av situasjonen
- Bruken av laboratoriemålte verdier avviker fra reelle verider i felt

7.2.1 Dagens metode i praksis

Det kan vanskelig å bestemme konstruksjonsdetaljer i fasaden på bakgrunn av en kort befarings. I beregningene forutsettes lukkede vinduer og ventiler. Ofte vil den faktiske støynivået derfor være høyere med åpen ventilasjon. Av hensyn til beboerne bør det derfor fokuseres på å unngå overestimering av lydisolasjonen og legges inn tilstrekkelig store sikkerhetsmarginer i beregningene.

Som vist i kapittel 4.3 har vinduskonstruksjonen stor betydning for lydisolasjonen. En bør derfor finne nøyaktig detaljinformasjon om vindene som inngår i beregningene. Viktig informasjon i forbindelse med vurderingen av vinduene bør inkludere:

- Antall glass
- Dimensjonene på vindusrutene
- Tykkelse på rutene
- Hulromsavstanden mellom rutene

Det er ofte vanskelig å se lekkasjer / sprekker rundt vinduet ved befarings. Lekkasjer kan påvises ved å måle spektrumsform eller lytte til lydgjennomgangen på stedet.

7.2.2 Om bruk av ett-tallskararakteristikken

Ett-tallskararakteristikken av lydisolering svarer et behov for en enkel metode å vurdere lydisolasjon. Ved å bruke ett enkelt tall istedenfor fullt spektrum mister man informasjon som er inneholdt i spektrumsformen. Omgjøring til ett-tallsverdi er en irreversibel operasjon og uten korreksjonstall er informasjon om spektrumsform tapt. Bruken av korreksjonstall er derfor nyttig for å gi en viss idè om energifordelingen etter frekvens.

Veid reduksjonstall R_w defineres innenfor frekvensområdet fra 100 til 3150 Hz. Som vist i kapittel 2.3 inneholder vegtrafikkstøy en stor del lavfrekvent støy, spesielt i 1/3-oktavbåndene mellom 63 til 80 Hz. For vegtrafikkstøy bør det anbefales å bruke lydreduksjonstall i utvidet frekvensområde med korreksjonstall som på formen:

$R_w(C;Ctr;Ctr_{50-5000};Ctr_{50-5000})$. Når støykilden ikke er standard vegtrafikk (bytrafikk 50 km/t) bør annet korreksjonstall brukes. Det kan derimot være problematisk å bedømme hvor forskjellig en støykilde skal være fra en annen til at man bør bruke den andre støykildens korreksjonsfaktor.

Moreno [44] viser at formen til referansekurven for utregning av veide ett-tallsverdier har stor innvirkning på de endelige ett-tallsverdiene. Referansekurven ble opprinnelig utformet basert på masseloven, A-veiekurven og lydisoleringen for en 250 mm pusset teglvegg. Eksempelvis kan en vegg med høy lydisolering i lavere frekvenser med dårlig isolering i høyere frekvenser ha likt reduksjontall som en vegg med dårlig isolasjon ved lave frekvenser og god i høyere frekvenser. Forskjellige isolasjonskurver kan altså få samme ett-tallsverdi men oppleves totalt forskjellig.

Når det gjelder vinduer så har dipene i spekteret stor innflytelse på ett-tallsverdien. For koblede vinduer med stor avstand mellom glassrutene kan man få dobbeltveggresonansen ned under 100 Hz. Slik vil man oppnå høy R_w -verdi og innfri krav i forskriftene selv om lydisolasjonen mot trafikkstøy kan oppleves som dårlig.

En ett-tallsbeskrivelse av et skille medfører vanskeligheter med å bestemme konstruksjon og materialbruk. Ved å presentere lydisolasjonen på spektral form vil man gjennom spektrumsanalyse identifisere problematiske frekvensområder og gjennomføre tiltak der lydisolasjon er svakest. Eksempelvis kan man bruke laminert glass for å redusere dippen ved koinsidens ved å bruke laminert glass i vindu.

Det kan også være verdt å nevne at dagens muligheter med stadig økende informasjonsflyt gjør det enkelt å formidle større datamengder enn hva som var mulig tidligere. Eksisterende programvare produserer grafiske fremstillinger ved enkle grep uten å legge nevneverdig beslag på kapasitet.

7.2.3 Om bruk av laboratoriemålte data for reduksjonstall

Målinger av elementers lydisolering utføres i laboratorier under tilnærmet ideelle forhold. For målinger av vinduer i laboratorium brukes tunge vegger i resten av skillepartisjonen der man setter inn vinduet. Slik kan man sikre at flanketransmisjonen blir neglisjerbar i forhold til lydoverføringen gjennom vinduet. I laboratorium vil man også kunne sikre utførelsen med korrekt innsettingsmetode og god tetting. Lydisolasjon i felt blir ofte minst 3-4 dB lavere enn lydisolasjon i laboratorium. I beregninger som baserer seg på laboratoriemålte verdier er det derfor viktig av dette oppgis og det bør opplyses om at man for en praktisk situasjon ikke vil oppnå like gode lydreduksjon som i et laboratorium. I felt vil kvaliteten på lydisolasjonen avhenge av håndverkernes kunnskaper om lydisolering og nøyaktige utførelse etter anvisningene fra leverandøren.

Selv om laboratoriemålingene er utført i tilnærmet ideelle forhold vil måleresultatene variere mellom ulike laboratorier avhengig av testlaboratoriernes egenskaper.

7.3 Tiltak for utbedring av lydisolasjon i vindu

Som nevnt i kapittel 3.3.2 kan disse faktorene ha positiv innvirkning på lydisolasjonen i vindu:

- Øke tykkelsen på vindusglassene
- Øke hulromsavstanden mellom rutene

- Sikre tetting mellom elementene
- Bruke laminatglass

Dårlig tettingen mellom elementene og gjennom ventilasjon kan være ødeleggende for lydisolasjonen. I forhold til trafikkstøy vil god tetting av luftlekkasjer gi bedre lydisolasjon mot dekkstøyen. For den mer lavfrekvente motorstøyen kan tiltak som å øke tykkelsen på glassene og en økning av hulromsavstanden føre til en dårligere lydisolasjon dersom motorstøyen sammenfaller med dobbeltveggresonansen i vindet. Det vil samtidig være en *trade-off* i å redusere virkningen av koinsidens ved grensefrekvensen ved å bruke laminatvinduer i forhold til en økning i flatemasse som også senker dobbeltveggresonansen i frekvens.

I situasjoner som krever lav høy lydisolasjon bør det for hvert tilfelle vurderes hvilke tiltak som skal gjøres ut fra den faktiske utendørs støysituasjonen.

7.4 Bruk av veiekurver

Dårligere lydisolasjon i lavere frekvenser på grunn av en senkning av dobbeltveggresonansen etter tiltak kan føre til støyplage hos beboere. Fordi ytterveggen demper høye frekvenser bedre enn lave frekvenser vil *restlyden* i mottakerrommet bli dominert av lave frekvenser som derfor kan virke ekstra forstyrrende selv med høye reduksjonstall og lave dBA-vedier. En kan si at A-veing *undervurderer* en støyplage i de lave frekvenser. I situasjoner med høy andel lavfrekvent støy kan det derfor være hensiktsmessig å oppgi verdier også med C-veing

7.5 Bruk av foreslått beregningsmetode

Ved å presentere veredene på spektrumsform kan man lese mer informasjon enn om man bare har en ett-tallsverdi og forholde seg til. Man kan lettere identifisere svakheter i lydisolasjonen og forutse eventuelle problemer i fasadeisolasjonsspekteret i forhold til det faktiske utendørs støyspekteret.

De teoretiske modellene som er brukt i beregningsmetoden er utledet for ideelle forhold og er kraftige forenklinger av den reelle situasjonen. Resultatene kan allikevel være nyttige fordi man får en veiledende idè om hvilke mekanismer som er bestemmende for lydisoleringen. Spesielt nyttig kan det være å få illustrert hvor det kan de kritiske resonansene vil oppstå.

7.5.1 Feilkilder

Nedenfor gis en oversikt over de mest signifikante feilkildene i forbindelse med bruk av programmet som er lagt ved rapporten:

- Innverdier må være på riktig format. Eksempelvis må det brukes komma istedenfor punktum i desimaltall

- Beregningene gjort med forenklede modeller
- Veggfelt gis med laboratoriemålte data i beregningene. I feltsituasjon vil reduksjonstallet være lavere
- Ikke tatt hensyn til bakgrunnsnivåer
- Gjelder bare for èn veggside. Vil gi lavere innendørsnivå for mottakerrom med flere støyutsatte sider
- Beregningene kun for enkel fasadeform
- Beregningene regnes kun med presisjon på 1/3-oktavbånd

Kapittel 8

Konklusjon

Feltmålinger av fasadeisolasjon viser ofte en kraftig reduksjon i lydisolasjonen ved frekvenser fra 100 - 250 Hz. Gjennom sammenligninger av teoretiske modeller for lydisolasjon og analyse av feltmålinger blir det påvist at denne reduksjonen i isolasjonskurvene ofte skyldes dobbeltveggresonansen i vinduet. Dobbeltveggresonansen inntreffer ved 250 Hz for vanlige isolèrglasskonstruksjoner med 4 mm glass og 12 mm hulromsdybde. Ved å øke flatemassen til vindusglassene med å øke tykkelsen på glassene eller øke hulromsavstanden synker dobbeltveggresonansen ned mot lavere frekvenser. Til å underbygge at dobbeltveggresonansen er årsaken til svekkelsen i isolasjonskurven har det blitt gjennomført fasadeisolasjonsmålinger etter ISO-standard 140-5. Disse har vist god samsvar med de estimerte verdiene.

I tillegg til en svekkelse av lydisolasjon rundt dobbeltveggresonansen er det påvist at grensefrekvensen til vinduet også kan ha dimensjonerende betydning på den totale lydisolasjonen. Grensefrekvensen oppstår rundt 3100 Hz for 4 mm glass og avtar med økende tykkelse på glassene. Ved bruk av laminert glass vil grensefrekvensen intre for hvert av enkeltglassene.

Ikke-ideell tetting og luftlekkasjer har blitt påvist å senke lydisolasjonen radikalt. Målinger med spalteventil i åpen og lukket posisjon viser store forskjeller i nivåforskjellen.

Vibrasjonsmålinger og spektrumsanalyse med fouriertransformering av lydsignal er gjennomført for å detektere modeeksitasjoner i glassene. Disse målingene viser at modene er vanskelige å identifisere i en feltsituasjon og at andre parametere som dempningen i innspenning av glasset i rammen eller koblinger via hulrommet gjør estimeringen vanskelig. For vanlige vinduer med dimensjoner på omkring rundt 1 m ganget 1 m og vanlige tykkelse rundt 4 mm vil den første egenmoden havne i underkant av 20 Hz og transmisjon via denne vil ha mindre betydning for det A-veide lydtryknivået.

Dagens beregningsmetode med Håndbok 47 medfører usikkerhetsmomenter med valg av konstruksjon og valg av utendørs støyform. Ved å basere seg på ett-tallsverdier kan viktig informasjon som er inneholdt i spektrumsformen til isolasjonskurven elimineres. Det innføres derfor et forslag til beregningsmetode som presenterer resultatene på spektral form. Beregningsmodellen kan brukes til å estimere en fasades totale lydisolasjon og samtidig identifisere problematiske frekvensområder i forhold til utendørs støyspektrum.

Ved å basere seg på laboratoriemålte verdier i beregningsmodellene i Håndbok 47 tar man ikke i betraktning flanketransmisjonen eller den store variasjonen av utførsel og stand som bygningsselementene faktisk har i felt. Dette er med på øke usikkerheten og det bør skilles klart mellom faktiske forventede lydisolasjonsverdier og beregninger gjort med laboratorieverdier.

Kapittel 9

Arbeid videre

9.1 Videre arbeid

Det er et behov for en datasamling av spektrumsformen til laboratoriemålte reduksjonsstallsverdier av forskjellige elementer. Et videre arbeid kunne bestått i å samle inn data til en slik database. En slik datasamling bør inkludere frekvenser ned til 50 Hz og opp til 5000 Hz. Også flere verdier for eldre elementer hadde vært nyttig, også til beregninger med ett-tallsverdier. Spesielt interessant kunne det vært å finne nøyaktige reduksjonsstallsverdier av forskjellige typer ventilasjon som spalteventiler, klaffeventiler i tillegg til mer moderate ventilasjonstyper.

Andre aspekt som åpner for videre arbeid rundt temaet er gitt nedenfor:

- Målinger av den faktiske dempningen av vindusglass i felt kunne bidratt til større nøyaktighet spesielt for å sette riktig tapsfaktor i beregningene.
- Flere feltnålinger av eldre vinduer for å undersøke hvordan slitasje og forvitring innvirker på lydisolasjonen
- Gjøre en undersøkelse av hvordan den håndverksmessige utførelsen varierer med tanke på forskjeller i lydisolasjon
- Se nærmere på det innbyrdes amplitudeforholdet mellom de forskjellige modene i et panel
- Kontakte flere leverandører og for å se på hvilke vindustyper som finnes tilgjengelig på markedet i dag, og foreta en kost/nytte vurdering av disse i forhold til forskjellige støysituasjoner
- Gjøre en psykoakustisk undersøkelse av sammenhengen mellom det veide reduksjonstallet og *opplevd* lydisolasjon for ulike støysituasjoner

9.2 Auralisering og lyttetester

Til å kunne vurdere hvorvidt bruken av ett-tallsverdier gir et tilstrekkelig godt bilde av en støysituasjon er hørselen den beste dommer. Det kunne derfor vært interessant å gjennomført en undersøkelse for hvordan en gruppe personer opplever lydisolasjone. Spesielt interessant hadde det vært å undersøke om hvorvidt en opplevd bedring i lydisolasjon tilsvarer økende verdier av det veide reduksjonstallet.

For å vurdere hvordan ulike bygningskonstruksjoner vil høres ut kan lages en auralisering av lydisolasjonen til ulike konstruksjoner mot lydopptak av utendørs støyspektra.

9.3 Utvidelse og utvikling av programvare

Dersom den foreslåtte metoden skal brukes i praksis kreves en rekke forbedringer og utvidelser av programmet. Nedenfor er gitt en liste over prioriterte oppgaver i forbindelse med videre utvikling av programmet:

- Bedre brukergrensesnittet
- Gjøre programmet mer robust for feiltasting (Programmet slik det er i dag kan kreve restart bl.a. ved gjentatte utregninger av innendørs ekvivalentnivå)
- Legge inn flere verdier for veggfelt, isolasjon og ventiler
- Utbedre beregningsmodeller etter tilgjengelige teori
- Eksportere isolasjonskurve til en equaliser eller filter for auralisering av lydopptak eller syntetisert lyd
- Legge inn mulighet for flere veggflater og forskjellige fasadeformer
- Legge inn mulighet for flere vinduer

Bibliografi

- [1] SSB Statistisk Sentralbyrå. Ssb magasinet. <http://www.ssb.no/vis/magasinet/miljo/art-2005-08-25-01.html>, 2005.
- [2] Sigmund Olafsen. Stairway - a new approach to modelling of physical or perceived noise. *Euronoise 2006*.
- [3] Miljøverndepartementet. St.prp. nr.1 (2005-2006). del ii, omtale av miljøverndepartementets mål og verkemiddel. 13 resultatområde 7: Klimaendringer, luftforurening og støy. <http://www.dep.no/md/norsk/dok/regpubl/stprp/022001-030016/hov014-bn.html>, 2005.
- [4] Miljøverndepartementet. Plan- og bygningslov. *LOV 1985-06-14 nr. 77 med senere endringer*.
- [5] Miljøverndepartementet. Retningslinje for behandling av støy i arealplanlegging (t-1442).
- [6] Statens forurensningstilsyn SFT. Veileder til forskrift om grenseverdier for lokal luftforurensning og støy. *TA-1556*, 1998.
- [7] Statens forurensningstilsyn SFT. Veileder til miljøverndepartementets retningslinje for behandling av støy i arealplanlegging (t-1442). *TA-2115*, 1998.
- [8] Statens forurensningstilsyn SFT. Veileder til forurensningsforskriftens kapittel 5 om støy. *TA-2207/2006*, 2006.
- [9] Kommunal-og regionaldepartementet Statens bygningstekniske etat. Forskrift om krav til byggverk og produkter til byggverk. *Tekniske forskrifter til plan- og bygningsloven*, 2001.
- [10] Forskrift om begrensnig av forurensning (forurensningsforskriften). kapittel 5. støy - kartlegging, handlingsplaner og tiltaksgrenser for eksisterende virksomhet. <http://lov.no/for/sf/md/td-20040601-0931-008.html>, 2005.
- [11] Sofie Hebrand. Research profiles, tyre and road noise: Dr. ulf sandberg. <http://www.chalmers.se/HyperText/Prof-E/SandbergUlf-E.html>.
- [12] Ettore Cirillo. *Acustica Applicata*. McGraw-Hill Libri Italia srl, 1997.

- [13] Tore Killengreen. Støyspekter fra veitrafikk - gir glattede standardspektra et riktig bilde? *Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, NTNU*, 2006.
- [14] Transportøkonomisk institutt. Boligpriser - effekter av veitrafikkbelastning og lokalisering. *TØI rapport 351*, 1997.
- [15] Statens Vegvesen. Boligpriser og nærføringsulemper - verdireduksjon på grunn av nærføringsulemper fra veg. *Teknisk Rapport*, 2004.
- [16] Transportøkonomisk institutt. Trafikkstøy i boliger - virkninger av fasadeisoleringsiltak etter grenseverdiforskriften. *TØI rapport 836, elektronisk format*, 2006.
- [17] NBI Byggforsk. Lydisolasjonsegenskaper til lyttervegger. *523.422*, 2005.
- [18] Anders Homb og Sigurd Hveem. *NBI Håndbok 47 - Isolering mot utendørs støy. Beregningsmetode og datasamling*. Norges byggforskningsinstitutt, 1999.
- [19] NBI Byggforsk. Lydisolasjonsegenskaper til vinduer. *533.109*, 2005.
- [20] Sigurd Hveem og Svein Strøm Anders Homb. *NBI Anvisning 28 - Lydisolerende konstruksjoner, datasamling og beregningsmetode*. Norges byggforskningsinstitutt, 1983.
- [21] Standard Norge. Ns-en iso 717-1 lydforhold i bygninger. del 1: Vurdering av luftlydisolasjon. 1997.
- [22] Jacqueline A. Marsh. The airborne sound insulation of glass: Part 1. *Applied acoustics*, 4:55–70, 1971.
- [23] Jacqueline A. Marsh. The airborne sound insulation of glass: Part 2. *Applied acoustics*, 4:131–154, 1971.
- [24] Jacqueline A. Marsh. The airborne sound insulation of glass: Part 3. *Applied acoustics*, 4:175–191, 1971.
- [25] J.D. Quirt. Sound transmission through windows i. single and double glazing. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 72, 1982.
- [26] J.D. Quirt. Sound transmission through windows ii. double and triple glazing. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 74, 1983.
- [27] Diego M.R. Mateus Antônio J. B. Tadeu. Sound transmission through single, double and triple glazing. experimental evaluation. *Applied acoustics*, 62:307–325, 2001.
- [28] Tor Erik Vigran. *Bygningsakustikk - et grunnlag*. Tapir, akademisk forlag, 2002.
- [29] Austin R. Frey Lawrence E. Kinsler. *Fundamentals of acoustics*. John Wiley and sons Inc, fourth edition edition, 2000.

- [30] David A.Bies og Colin H.Hansen. *Engineering Noise Control*. Spon Press, third edition edition, 2003.
- [31] R.D. Ford. Predicting the sound reduction index of laminated glass. *Applied acoustics*, 43:49–55, 1994.
- [32] Standard Norge. Ns-en iso 12354-1. lydforhold i bygninger. beregning av akustisk ytelse i bygninger basert på bygningsdelers ytelse. del 3: Luftlydisolasjon mot mellom rom. 2000.
- [33] Jason Esan Cambridge. An evaluation of various sound insulation programs and their use in the design of silent rooms. *Master's thesis, Chalmers University of Technology*, 2006.
- [34] Arild Brekke. Calculation methods for the transmission loss of single, double and triple partitions. *Applied acoustics*, 14:225–240, 1981.
- [35] Oliver Erwin Kaiser. Active control of sound transmission through a double wall structure. *Swiss Federal Institute of Technology, ETH*, 2001.
- [36] Hammami Lotfi Haddar Mohamed Rabdennadher Moez, Fenina Sofiene. Double glazing vibroacoustic behaviour. *Electronic journal <http://webcenter.ru/eeaa/e-jta/>*, 6, 2005.
- [37] John R. Pearse Jeremy W. Trevathan. Resonant and non-resonant sound transmission through a finite panel. *Building acoustics*, 13:13–22, 2006.
- [38] International Standard Organisation ISO. Iso 226:2003. normal equal-loudness-level contours. 2003.
- [39] Edvard Falch. Handbook 47 - control measurements of calculated facade sound insulations. *BNAM 2004*.
- [40] Sigmund Olafsen. An empirical way to calculate indoor noise from road traffic. *Euronoise 2003*.
- [41] Veg-og transportplanlegging SINTEF Teknologi og samfunn. Nb-støy, manual. <http://www.sintef.no/upload/Nbstoy>, 2005.
- [42] Statens forurensningstilsyn SFT. Forslag til: Foreskrift om endring av forskrift om begrensning av forurensning (forurensningsforskriften) av 1.juni 2004. kapittel 5 støy. *Konsekvensutredning*, 2004.
- [43] Bernt Heggøy. Handbook 47 - a practical tool for estimation of facade insulation. *BNAM 2004*.
- [44] Antonio Moreno. Factors influencing db(a) ratings for sound insulation: Incident noise spectrum and shape of the transmission loss curve. *Journal of Sound and Vibration*, 92:337–348, 1984.

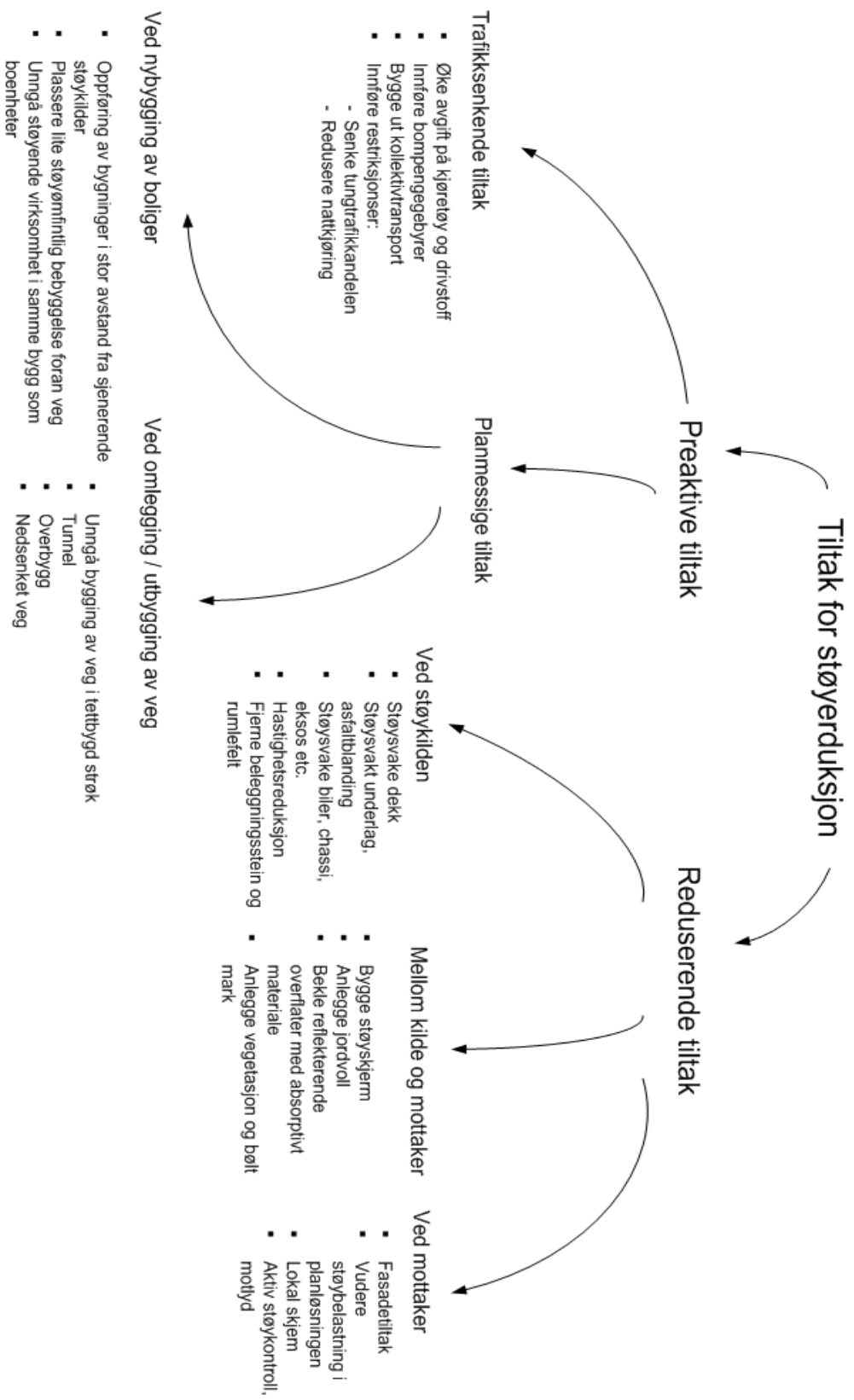
- [45] Statens forurensningstilsyn SFT. Mulige tiltak for å redusere støy. framskrivninger til 2010 og oppsummering på tvers av kilder. *SFT-rapport 1714*, 2000.
- [46] Statens Vegvesen. Fasadeisolering mot støy. *Håndbok 248*, 2005.

Tillegg A

Tiltak for å redusere vegtrafikkstøy

Figur A.1 viser en skisse over tiltak som kan tas i bruk for reduisering av støy i boliger.

En oversikt over virkningene og kostnadene av ulike støyreduserende tiltak finnes blant annet i SFTs publikasjon *Mulige tiltak for å redusere støy, Framskrivninger til 2010 og oppsummering på tvers av kilder* [45] eller i Statens vegvesens *Håndbok 248: Fasadeisolering mot støy* [46].



Figur A.1: Tiltak for å redusere trafikkstøy

Tillegg B

Målinger

B.1 Intensitetsmålinger

Kjedelige detaljene i målingene, ekstra figurer med mer

Måleutstyr:

Instrument	Serienummer
Bruel and Kjaer Intensity Probe, Type 1683	2262135
Bruel and Kjaer 2260 Investigator	1894146
Norsonic Power amplifier 260	NA
Norsonic høyttaler	NA

Tabell B.1: Måleutstyr, intensitetsmåling

Beskrivelse av målinger:

Til målinger med intensitetsmetoden benyttes en spesiell intensitetsprobe med to mikrofoner som er kalibrert for fasefeil i forhold til hverandre.

Målingene ble utført i henhold til ISO 9614-2, sveipemetoden, med en intensitetsprobe bestående av to mikrofoner med 12 mm mikrofonavstand. Som støykilde ble det brukt høyttaler med utstrålt rosa støy. For å sikre gyldige resultater ble målingene vurdert ut fra kravene i standarden. Spesielt kravet om å begrense trykk-intensitetsindikator, p-I-indeks $F_{pI} = L_p - L_I$, til under 10 dB var vanskelig å oppnå. Selv med økt sveipelinjetetthet og forsøk på å redusere etterklangen ved å tilføre absorberende overflater (tepper og dyner på gulv) ble ikke kravet oppnådd i alle frekvenser. I høyere frekvensområder ved måling av veggfelt kom p-I-indeksen F_{pI} opp over 15 dB.

Vinduet som ble studert besto av glass i separerte karmen, med yttervindu delt opp med sprosser og med helt innervindu. Sveipet ble utført på glassoverflaten til vindusruta.

Veggen var en lett trevegg av bindingsverk med innvendigpanel og utlektet kledning på utsiden.

B.2 Vibrasjonsmålingermålinger

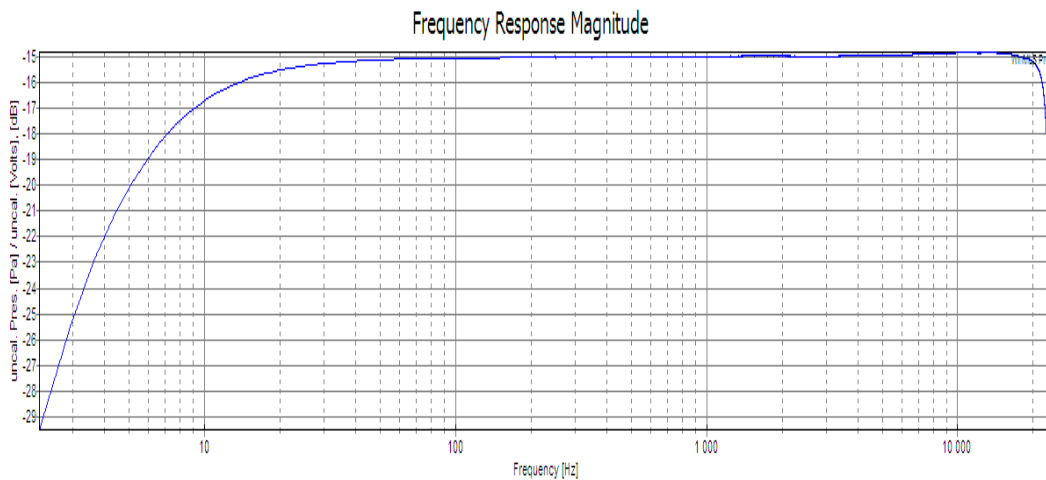
Måleutstyr:

Instrument	Serienummer
Bruel and Kjaer Accelerometer	NA
Bruel and Kjaer Calibrator exciter, Type 4294	NA
Norsonic Power amplifier 260	NA
Norsonic høyttaler	NA
Laptop med installert WinMLW, versjon 1.06	NA
Lydkort M-audio, Firewire Solo	NA

Tabell B.2: Måleutstyr, vibrasjonssmålinger

B.2.1 Beskrivelse av målingen

Vibrasjonsmålingene ble utført med accelerometer festet direkte på vindusglasset. Vinduet var det samme som for intensitetsmålingene. Responsen fra accelerometeret ble kalibrert med Bruel og Kjaer signal generator. Utsendt støy var en sveipet sinus på 4 s generert av måleprogrammet WinMLS. Lydkortets frekvensrespons ble målt og viser god nøyaktighet ned til omkring 20 Hz (som vist i figur B.1).



Figur B.1: Frekvensrespons av lydkort M-audio, Firewire Solo

B.3 Fasadeisolasjonsmålinger

Måleutstyr:

Instrument	Serienummer
Bruel and Kjaer microphone	2049047
Bruel and Kjaer Calibrator	NA
Norsonic 118	NA
Norsonic Power amplifler 260	NA
Norsonic høyttaler	NA

Tabell B.3: Måleutstyr, fasadeisolasjonsmålinger

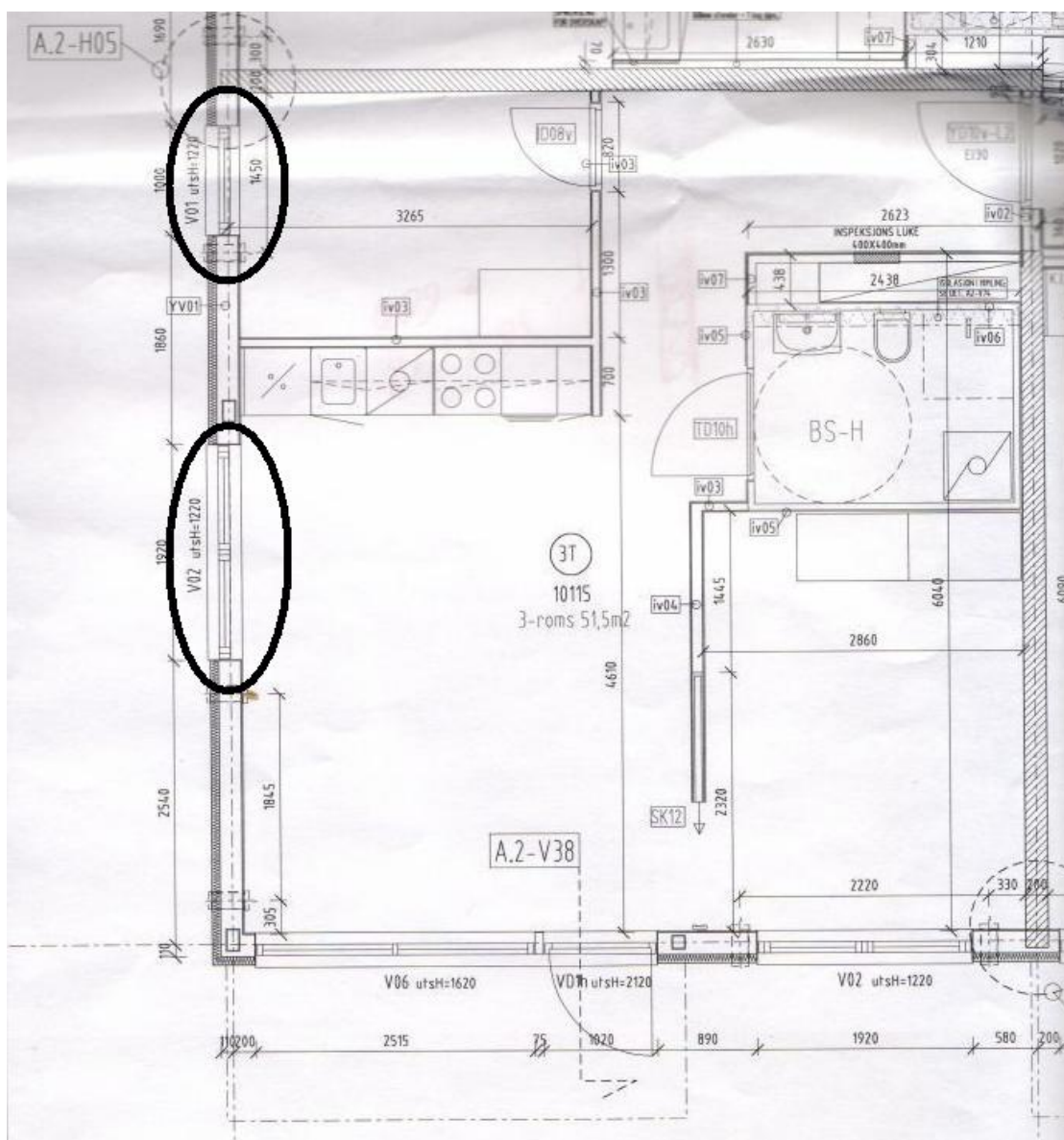
Beskrivelse av målingen:

Fulgte anvisningene i ISO 140-5. Måleresultatene presenteres som standardisert lydtrykknivå-differanse $D'_{ls,2m}$. Figur B.2 viser detalj av spalteventil i vindusramme.



Figur B.2: Vindu i hyttevegg, detalj av spalteventil

Ta med figur for nivå et sted og nivå et annet sted. Bilder. Figur for etterklangstid også kanskje?



Figur B.3: Plantegning av leilighet med utringet vinduene, De nye Grønlandskvartalene

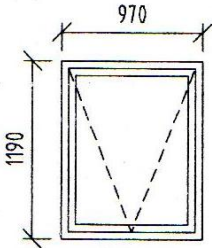
B.4 Lydopptak

Måleutstyr:

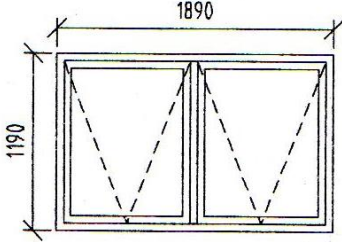
Beskrivelse av målingen:

Plasserte mikrofon midt i rommet, tok opp lydsignalet fulgte ingenting

TYPE	SLAGRETNING UTADSLÆNDE	VINDU PR. ETASJE:
V01	STØRRELSE 970 X 1190	1.ETG: 3 stk.
ANTALL	23	2.ETG: 4 stk.
		3.ETG: 4 stk.
		4.ETG: 4 stk.
		5.ETG: 4 stk.
		6.ETG: 4 stk.
		7.ETG:
		8.ETG:
VINDU NUMMER		
KARM/RAMME	MATERIALE	
	BEHANDLING	
	MALT NCS S-2502-Y	
	NOT FOR UTFORING	
	SPOR FOR BESLAG	
GLASS	TYPE	
UTFORING	MATERIALE	
	BEHANDLING	
	MALT HVIT	
UTSTYR	ÅPNER	
KRAV	BRANN	
	LYD	
DIVERSE		



TYPE	SLAGRETNING UTADSLÆNDE	VINDU PR. ETASJE:
V02	STØRRELSE 1890 X 1190	1.ETG: 9 stk.
ANTALL	79	2.ETG: 11 stk.
		3.ETG: 11 stk.
		4.ETG: 11 stk.
		5.ETG: 11 stk.
		6.ETG: 11 stk.
		7.ETG: 6 stk.
		8.ETG: 9 stk.
VINDU NUMMER		
KARM/RAMME	MATERIALE	
	BEHANDLING	
	MALT NCS S-2502-Y	
	NOT FOR UTFORING	
	SPOR FOR BESLAG	
GLASS	TYPE	
UTFORING	MATERIALE	
	BEHANDLING	
	MALT HVIT	
UTSTYR	ÅPNER	
KRAV	BRANN	
	LYD	
DIVERSE		



Figur B.4: Vindustegning, De nye Grønlandskvartalene

Instrument	Serienummer
Bruel and Kjaer microphone, Type 4370	2049047
Bruel and Kjaer Calibrator	NA
Norsonic 121	NA
Norsonic Power amplifier 260	NA
Norsonic høyttaler	NA

Tabell B.4: Måleutstyr, lydopptak

2004 11:56
 04/2004 08:48
 18. APR. 2004 8:51

OLE K RINGNES KONTOR → 24126441
 +47 22 87 00 00
 63846109
 STU NORGE AS

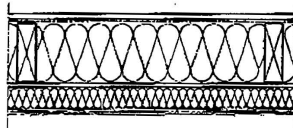
HU 111 0012

Nr. 3123 S. 11
 denne typen!



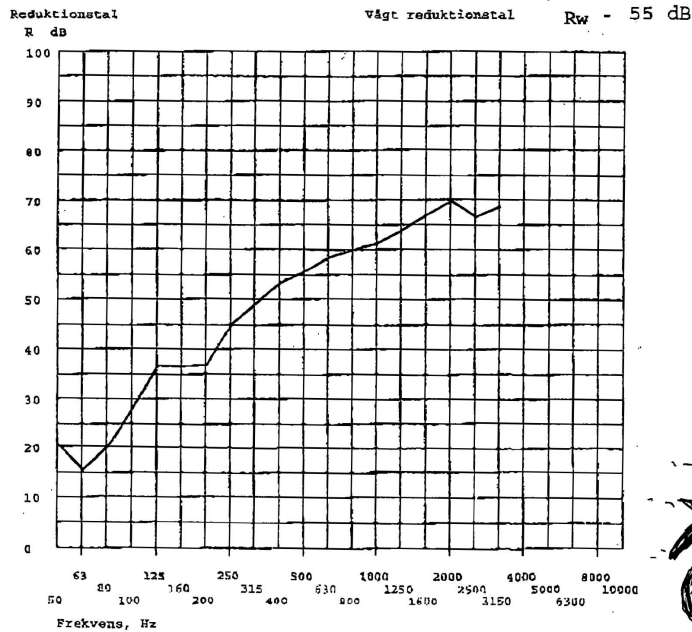
LUFTLUDDISOLERING		S-10285-A06	
Sto Scandinavia AB		1996-01-23	
Fasadelement		ANO	
MÅTPLATS	Ingemanssons Ljudlaboratorium	S-RUM	m3
ANSL. KONSIR.		M-RUM	55.0 m3
		YTA	2.8 m2
KRAV/MÅLSÄTTNING		VIKT	kg/m2
Frekvens Hz	50 63 80 100 125 160 200 250 315 400 500 630 800 1000 1250 1600 2000 2500 3150		
R db	20.6 15.4 20.1 28.1 36.7 36.6 37 45.1 49.1 53.4 55.7 58.4 59.9 61.5 64 67.1 69.8 66.7 68.7		
Efterklangstid s	.74 .68 .52 .77 1.05 1.06 1.35 1.7 1.39 1.31 1.35 1.16 1.06 .97 .94 .87 .93 .82 .76		

Skiljekonstruktion :



- 13 mm GIPS
- 0.2 mm PLASTFOLIE
- 45x145 mm TRÆREGEL/
- 145 mm STENULL. VOLYMMVKT 30 kg/m³
- 9 mm GNI
- STO BYGGKLISTER S, 5 kg/m²
- STO RENOVERINGSBOARD 17 mm
- STO SYSTEMPUTS S, 7 kg/m²
- STO GLASFIBERVÅV M, 1.1 m²/m²
- STO PRIMER, 0.3 kg/m²
- STOLIT K2 (handlagt) 3 kg/m²

Fallvärde Rw = 61 dB
 ref yta 10m²



Figur B.5: Reduksjonstall vegg, De nye Grønlandskvartalene

Tillegg C

Kildekode

Listing C.1: MATLAB-kode til beregning av reduksjonstall for enkle paneler

```
% Materialparametre , hentet fra Vigrans "Bygningsakustikk – Et grunnlag"
c = 344;
d = 1.21;
dg = 2500;
E = 60*10^(9);
p = 0.3;
nloss = 0.01; % tapsfaktor , tilpasses til målte verdier

% Vindusdimensjoner
ma = 1.15; % side 1
mb = 1.15; % side 2
h = 0.004; % tykkelse
m = h * dg ; % flatemasse

% Regner ut koinsidensfrekvensen :
fc = ((c^2 )/ (1.81*h))*sqrt((dg*(1-p^2)) / E)

% Regner ut første plateresonansen :
fnm = pi/2 * sqrt((E*h^2) /
((12*dg) * (1-p^2))) * ((1/ma)^2 + (1/mb)^2 )

for n=1:length(f)
    S(n) = 20*LOG10((pi*f(n)*m)/(d*c)) - 5.5; % masseloven
    P(n) = 20*LOG10((pi*f(n)*m)/(d*c)) +
    10 *log10((2*nloss*f(n)) / (pi*fc)) - 5.5; % over grensefrekvensen
end

for n=1:length(f)
    if f(n) < fnm % stivhetsstyrt
        R(n) = -20*LOG10((pi*f(n)*m)/(d*c)) +
        20*LOG10((pi*fnm*m)/(d*c)) - 5.5;
    elseif f(n) < fc/2 % masseloven
        R(n) = 20*LOG10((pi*f(n)*m)/(d*c)) - 5.5;
    else f(n) > fc % over grensefrekvensen
        R(n) = 20*LOG10((pi*f(n)*m)/(d*c)) +
```

```

                                10 *log10((2*nloss*f(n)) / (pi*fc));
    end
end

AA = 20.0/(f(n1)*log(10));           % den deriverte
BB = 20.0/(f(n2)*log(10)) + 10.0/(log(10)*f(n2)); % den deriverte

[ad bd cd dd] = Interpol(f(n1),S(n1),f(n2),P(n2),AA,BB);% interpolasjon

for n=1:length(f)
    if f(n) > fc/2 & f(n) < fc      % platå
        R(n) = ad*(f(n))^3 + bd*(f(n))^2 + cd*(f(n))+dd; % i3.gradslikning
    end
end
end

```

Listing C.2: MATLAB-kode til beregning av reduksjonstall for doble paneler

```

% Materialparametre , hentet fra Vigrans "Bygningsakustikk – Et grunnlag"
c = 344;
d = 1.21;
dg = 2500;
E = 60*10^(9);
p = 0.3;
nloss = 0.7;

% Vindusdimensjoner
% rute 1:
m1a = 1.48;      % side 1
m1b = 1.25;      % side 2
h = 0.004;      % tykkelse
m1 = h * dg ;   % flatemasse

% rute 2:
m2a = 1.48;      % side 1
m2b = 1.25;      % side 2
h2 = 0.004;     % tykkelse
m2 = h2 * d ;

s = 0.012;      % hulromsavstand

%Regner ut dobbeltveggresonansen:
f0 = 60* sqrt((m1+m2)/(m1*m2*s))

%Regner ut koinsidensfrekvensen:
fc = ((c^2) / (1.81*h1))*sqrt((dg*(1-p^2)) / E)

R1 = predsingle(m1,h1,m1a,m1b,nloss , f) % enkeltpanel
R2 = predsingle(m2,h2,m2a,m2b,nloss , f) % enkeltpanel

n1 = 1
n2 = 1

for n=1:length(f)

```

```

    if f(n) < 2*f0/3                                % stivhetsstyrt
        R(n) = 20*LOG10((pi*f(n)*(m1+m2))/(d*c)) - 5.5;
        n1 = n;
    elseif f(n) < fc                                % under grensefrekvensen
        R(n) = R1(n) + R2(n) - 29;
        if n > 1 & (f(n-1) < f0);
            n2 = n
        end
    elseif f(n) > fc                                % over grensefrekvensen
        R(n) = R1(n) + R2(n) - 29;
    end
end

for n=1:length(f)
    S(n) = 20*LOG10((pi*f(n)*(m1+m2))/(d*c)) - 5.5;
    P(n) = R1(n) + R2(n) - 29;
end

AA = 20.0/(f(n1)*log(10));                          % deriverte
BB = 2 * 20.0/(f(n1)*log(10));                      %deriverte

[ad bd cd dd] = Interpol(f(n1),S(n1),f(n2),P(n2),AA,BB);

for n=1:length(f)
    if f(n) > 2*f0/3 & f(n) < f0                    % platå
        R(n) = ad*(f(n)^3) + bd*(f(n)^2) + cd*f(n) + dd;
    end
end
end

```

Listing C.3: MATLAB-kode til interpolering av funksjonsuttrykk

```

function [aaa, bbb, ccc, ddd] = Interpol(xx1,yy1,xx2,yy2,mm,nn)
A = ([xx1^3 xx1^2 xx1 1;
     xx2^3 xx2^2 xx2 1;
     3*xx1^2 2*xx1^1 1 0;
     3*xx2^2 2*xx2^1 1 0]);

B = transpose([yy1 yy2 mm nn]);
C = (A^(-1))*B;

aaa = C(1);
bbb = C(2);
ccc = C(3);
ddd = C(4);

return

```