



UPPSALA
UNIVERSITET

UPTEC W 24015

Examensarbete 30 hp

Juni 2024

Ljudisolering i fokus

En studie om uppdatering av schabloner för
bullerskyddsåtgärder

Astor Gulz



UPPSALA
UNIVERSITET

Soundproofing in Focus: A Study on Updating Templates for Noise Protection Measures

Astor Gulz

Abstract

This report analyses the sound insulation capabilities of double-glazed windows and fresh air vents. It identifies potential limitations in existing calculation methods and templates used to describe their sound insulation. The study combines measurements and theoretical calculations to evaluate the accuracy of these templates and the overall gap between theory and real-world performance.

The results show discrepancies between calculated and measured sound insulation, especially at higher frequencies regarding double-glazed windows, likely due to poor sealing and quality. Furthermore, the results suggest that the difference between opened and closed fresh air vents significantly affects sound insulation, with a measured sound level difference of $D_{nT,w}$ 14 dB for open vents. A new template to accommodate open ventilation scenarios at 14 dB $D_{nT,w}$ is suggested. Additionally, the report discusses the practical implications of gathering many different variations of window constructions in one template, which can lead to templates with poor accuracy. It also highlights the importance of accurate sound insulation templates and points out how misinterpretation can affect health and well-being. The conclusion highlights that variations in the sound insulation of double-glazed windows and deviations from calculated values should be considered when planning for soundproofing.

Keywords: Acoustics, sound insulation, noise, double-glazed windows, air vents.

Department of Earth Sciences, Air, Water and Landscape Science, Uppsala University (UU), Villavägen 16, SE-752 36, Uppsala, Sweden.

Teknisk-naturvetenskapliga fakulteten

Uppsala universitet, Utgivningsort Uppsala

Handledare: Henrik Naglitsch & Louise Lumsén Ämnesgranskare: Johan Arnqvist

Examinator: Antonio Segalini

Referat

Ljudisolering i fokus: en studie om uppdatering av schabloner för buller-skyddsåtgärder

Astor Gulz

I denna studie undersöks ljudisoleringsförmågan hos tvåglasfönster och vädringsluckor för att utreda potentiella begränsningar i de befintliga beräkningsmetoder och schabloner som används för att beskriva deras ljudisolering. Studien kombinerar ljudisoleringsmätningar och teoretiska beräkningar för att utvärdera schablonerna och den övergripande skillnaden mellan teoretiska beräkningar och verkligheten.

Resultatet visar att det finns diskrepanser mellan beräknad och uppmätt ljudisolering, framförallt i högre frekvenser gällande tvåglasfönster, vilket troligen är en konsekvens av dålig tätning. Vidare visar resultaten att skillnaden mellan öppna och stängda vädringsluckor har en signifikant påverkan på ljudisoleringen, med en uppmätt ljudnivåskillnad ($D_{nT,w}$) på 14 dB när luckorna är öppna. Det rekommenderas att införa 14 dB $D_{nT,w}$ som en ny schablon för att ta hänsyn till vädringsluckor när de är öppna.

Rapporten diskuterar också praktiska konsekvenser av att samla många olika typer av fönsterkonstruktioner i en och samma mall, vilket kan resultera i schabloner med låg noggrannhet för en större mängd fönster. Resultaten visar betydelsen av korrekta bedömningar av ljudisoleringen för bostäder i närhet av storskaliga infrastrukturprojekt, för att säkerställa att alla som har rätt till dem, får rätt åtgärder.

Vidare diskuteras den potentiella påverkan som en felaktig tolkning av schabloner kan ha på personers välmående ifall de utsätts för buller som en konsekvens av fel åtgärd. Studien framhäver vikten av att beakta spridningen i ljudisoleringsförmågan hos tvåglasfönster, tillsammans med avvikelsen från beräknade resultat, vid beslut om åtgärder. Avslutningsvis rekommenderar rapporten fortsatt forskning och utveckling för att förbättra förståelsen och förutsägelsen av ljudisolering i byggnadselement, för att säkerställa högre precision och effektivitet i framtida byggprojekt.

Nyckelord: Akustik, ljudisolering, buller, tvåglasfönster, vädringsluckor.

Institutionen för geovetenskaper, Luft-, vatten- och landskapslära, Uppsala Universitet (UU), Villavägen 16, SE-752 36, Uppsala, Sverige.

Förord

Med denna rapport avslutar jag mina studier på civilingenjörsprogrammet i miljö- och vattenteknik vid Uppsalas universitet (UU) och Sverige lantbruksuniversitet (SLU). Arbetet omfattar 30 högskolepoäng och har genomförts i samarbete med Sweco i Uppsala under handledning av Henrik Naglitsch och Louise Lumsén. Johan Arnqvist vid Uppsala universitet har varit ämnesgranskare.

Först och främst vill jag rikta ett stort tack till mina handledare Henrik Naglitsch och Louise Lumsén på Sweco. Det har varit helt suveränt att bli stöttad av er genom det här arbetet. Jag vill även tacka hela teamet på Sweco Akustik Uppsala för att ni fick mig att känna mig så välkommen.

Ett särskilt tack till min ämnesgranskare Johan Arnqvist för insiktsfull feedback som har varit till stor hjälp för att forma rapporten. Jag vill också rikta ett stort tack till Saga Hävermark, vars stöttning var avgörande för att få projektet i rullning.

Jag vill även tacka alla husägare som med rätt typ av fönster och vädringsluckor öppnade sina hem och lät mig dundra ljud mot sina fasader.

Avslutningsvis vill jag tacka min familj och självklart alla härliga kursare och vänner som jag har haft äran att spendera mina fem studieår i Uppsala med. Ni har verkligen gjort min studietid minnesvärd.

Astor Gulz

Uppsala, juni 2024

Populärvetenskaplig sammanfattning

Ljudisolering i fokus: en studie om uppdatering av schabloner för bullerskyddsåtgärder

Astor Gulz

I takt med ökad urbanisering ökar bullerrelaterade problem för hälsa och välbefinnande. Att utsättas för höga och kontinuerliga bullernivåer kan till exempel göra att man blir mer stressad, sover sämre eller får svårare att lära sig nya saker. En vanlig strategi för att bekämpa buller är att genomföra utredningar för behov av fasadnära bullerskyddsåtgärder genom att inventera byggnaders allmänna skick, fasadtyper, fönster och ventiler. Fasadnära åtgärder syftar till att förbättra byggnaders isolering mot ljud som uppstår i runtomkring en byggnad genom att byta ut ett fönster eller en ventil. Det typ av ljud som man brukar isolera emot kallas samhällsbuller och det kan vara ljud som uppstår av en närliggande väg, ett tåg, en industri, eller något annat som ger ifrån sig buller. För att genomföra en sådan bedömning krävs förståelse för ljudkällan, vilka byggnader som påverkas samt vilka material som byggnaden består av och hur väl de isolerar ljud. Men hur kan vi vara säkra på att de åtgärder vi vidtar faktiskt fungerar? Det här examensarbetet har fokuserat på att utvärdera beräkningsschabloner som används för att avgöra vilken ljudisolering tvåglasfönster och vädringsluckor faktiskt har. De saknas nämligen kunskap om hur väl de isolerar mot ljud.

I de fall där en bullerutredning är av det större slaget, och i ett tidigt skede, exempelvis då en ny väg eller järnväg ska byggas, så kan schablonmetoder ge snabba och kostnadseffektiva resultat. Schablonmetoder utgörs av förenklade beräkningsmetoder som ofta bygger på antaganden och schablonvärden är ofta framtagna genom mätningar. Inom ramen för detta projekt undersöktes schablonvärden för ljudisolering hos väggar, fönster och ventiler, som under många år har arbetats fram i ett projekt kallat Fasadprojektet. Projektet syftade till att ta fram schablonvärden för att säkerställa att rätt bullerskyddsåtgärder på byggnader vidtas och får avsedd effekt, och nu behöver de göras ännu lite noggrannare eftersom man har sett att schablonvärden som används för just tvåglasfönster och vädringsluckor kanske är överskattade.

Genom att kombinera fältmätningar och matematiska simuleringar har den här studien undersökt hur väl de befintliga beräkningsschablonerna avbildar ljudisoleringen i verkligheten. För att göra detta var det nödvändigt att förstå de grundläggande principerna för ljud och ljudisolering och undersöka olika akustiska begrepp och teorier för att få den bakgrundsinformation som krävdes för att tolka resultatet. Metoden utgick ifrån en nationell mätstandard för hur fasadisolering bör göras, och innebar att en högtalare placerades med 45° vinkel mot en fasad för att sedan spela ett starkt ljud som mättes med mikrofon utanpå fasaden och inuti huset. Efter all data hade samlats in från mätningarna bearbetades den genom flera beräkningssteg som resulterade i ensiffervärden som beskrev ljudisoleringen hos mätobjekten.

Resultatet visade att spridningen i ljudisolering hos tvåglasfönster är svår att fånga i ett ensiffervärde. Till exempel spelar fönstrens skick och tätningslisternas kvalitet en viktig roll för ljudisoleringen. Fönster i sämre skick gör att mer högfrekvent ljud kan släppas igenom. Slutsatserna om tvåglasfönster var att spridningen i ljudisolering måste tas hänsyn till vid beslut om åtgärder, så att alla som har rätt till förbättrad ljudisolering verkligen får det. För vädringsluckor gjordes mät-

ningar med både öppen och stängd lucka, och resultaten visade att skillnaden är stor, med öppen lucka som släpper igenom mycket ljud. En rekommendation som kom av studien är att införa ett nytt schablonvärde på $D_{nT,w}$ 14 dB för att avspegla vädringsluckors ljudisoleringsförmåga när de är öppna, vilket ju är nödvändigt för att de ska fylla sin funktion.

Resultaten från fältmätningarna jämfördes även mot matematiska simuleringarna av ljudisolering för tvåglasfönster där det visade att de befintliga beräkningsmetoderna inte alltid stämde överens med verkligheten. Modellerna överskattade ljudisoleringen i det högre frekvensområdet vilket ledde till överskattade schablonvärden.

Sammanfattningsvis visar arbetet att det finns utrymme för förbättringar av de befintliga schablonerna och beräkningsmetoderna för ljudisolering. Genom att ta hänsyn till variationer hos fasadelement kan det sin tur kan leda till byggnader och infrastrukturer som är effektivare på att isolera ljud. Detta bidrar till att minska bullerexponeringen och skapar en mer hälsosam och trivsamt miljö för alla.

Ordlista

Buller - Önskat ljud som kan uppfattas som störande eller vara skadligt.

Efterklangstid - Tiden det tar för ett ljud att minska 60 dB efter att en ljudkälla helt har upphört att låta.

Fasadelement - En del i en fasad, exempelvis en dörr, ett fönster eller en ventil.

Ljudabsorption - Olika material och objekt kan absorbera ljud, vilket minskar ljudreflektioner och därmed ljudnivå i ett utrymme.

Ljudisolering - Åtgärder som syftar till att minska ljudöverföring från ett utrymme till ett annat, eller mellan utsidan och insidan i en byggnad.

Mottagarrum - Vid fasadisoleringsmätning benämns rummet innanför fasaden som mottagarrum.

Resonans - Ett fenomen där ett objekt eller system sätts i svängning (vibrerar) av ljudvågor vid en viss frekvens.

SIS - Swedish Standards Institute.

Sändarrum - Vid fasadisoleringsmätning benämns utomhus, utanpå fasad, som sändarrum.

Tonalt ljud - Ljud som har en tydlig ton eller uppsättning toner, i motsats till brus som innehåller många olika frekvenser och som inte uppfattas innehålla någon specifik ton.

Transmission - Överföringen av ljud genom ett material eller medium.

Symbollista

L [dB] = Ljudnivå

L_s [dB] = Medelljudnivå som projiceras utomhus på fasad, också kallat sändarrum.

L_R [dB] = Medelljudnivå i ett mottagarrum.

W [J/s] = Ljudenergi.

R [dB] = Beräknat ljudreduktionstal.

R'_{45° [dB] = Uppmätt ljudreduktionstal vid mätning.

R'_w [dB] = Vägt ljudreduktionstal efter mätning.

S [m^2] = Ett fasadelements ytarea.

T [s] = Efterklangstid.

A_s [m^2] = Absorptionsyta.

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund och problembeskrivning	1
1.2	Bullerärenden kopplade till stora infrastrukturprojekt	1
1.3	Syfte & projektmål	2
1.4	Frågeställningar	2
1.5	Delmål	2
2	Teori	3
2.1	Akustikens grunder	3
2.1.1	Ljud i siffror	4
2.1.2	Visuell representation av ljud	5
2.1.3	Interferens	7
2.1.4	Efterklangstid	8
2.1.5	Akustisk impedans	8
2.2	Byggnadsakustik	9
2.2.1	Ljudisolering & ljudreduktionstal	9
2.2.2	Ytterligare mått på ljudreduktion	11
2.2.3	Ljudreduktionstal anpassad efter olika ljudkällor	11
2.2.4	Fasadisolering	12
2.2.5	Tvåglasfönster	13
2.2.6	Vädringsluckor	14
2.3	Tidigare studier	14
2.3.1	Hur beräkningsschabloner används i projekt	15
2.4	Beräkningsmetoder för tvåglasfönsters ljudisolering	15
2.4.1	INSUL	16
3	Metoder & material	17
3.1	Fältmätning	17
3.1.1	Genomförande	17
3.2	Teoretiska beräkningar och INSUL	18
4	Resultat	20

4.1	Tvåglasfönster	20
4.2	Teoretiska beräkningar för tvåglasfönster i INSUL	23
4.3	Vädringsluckor	24
5	Diskussion	25
5.1	Schabloners noggrannhet	25
5.1.1	Tvåglasfönster	25
5.1.2	Teoretiska beräkningar i INSUL	27
5.1.3	Vädringsluckor	28
5.2	Praktiska tillämpningar	28
6	Slutsats	29
7	Referenser	30
8	Bilagor	

1 Inledning

I detta kapitel ges en bakgrund till projektet, inklusive de frågeställningar som projektet avser att besvara. Vidare presenteras även en noggrannare uppdelning av projektets mål i form av delmål.

1.1 Bakgrund och problembeskrivning

I takt med att urbaniseringen ökar världen över, med en ständigt expanderade bil- och tågflotta, har bullernivåer i våra livsmiljöer ökat mycket (European Enviroment Agency 2021). Hänninen et al. (2014) klassificerar i sin studie buller, inte bara som en miljöförorening, utan som ett betydande miljörelaterat hälsoproblem. Exponering av höga och kontinuerliga bullernivåer har förenats med en rad negativa hälsoeffekter, inklusive ökad risk för hjärt-kärlsjukdomar, stressrelaterade tillstånd, samt problem med inlärning och koncentration (Basner & McGuire 2018; Hänninen et al. 2014).

Kniffin et al. (2020) belyser även hur störande ljud i hemmet kan påverka arbetsprestation och leda till ökade stressnivåer till följd av det. Buller i hemmamiljö är ett flerbottnat problem där ljudisoleringen behöver vara anpassad för flera olika ljudkällor och tider på dygnet. I Sverige har alla rätt att inte bli utsatta för skadliga eller störande ljudnivåer i sin vistelsemiljö. Enligt kapitel 4.4.4 i Proposition 1996/97:53 har regeringen föreslagit att "riktvärden på 30 dBA ekvivalent ljudnivå inomhus och 45 dBA maxnivå inomhus nattetid för trafikbuller ska normalt inte ska överskridas vid nybyggnation eller väsentlig ombyggnad av trafikinfrastruktur." Dessa värden går i linje med folkhälsomyndighetens riktvärden som gäller för buller inomhus, i sovrum och rum för dagligt umgänge. Råden och propositionen gäller även för undervisningslokaler och vårdlokaler. Om det framgår av en utredning att ljudnivån i en bostad överstiger riktvärdena så finns många åtgärder man kan göra, på fasader, fönster eller ventiler som minskar ljudnivån inne i bostaden. Dessa åtgärder beror på vad den dominerande ljudkällan är men kan innefatta byte eller renovering av befintlig fasad eller fasadelement.

Tabell 1: Riktvärden från FHM för ljudnivå inomhus (Folkhälsomyndigheten 2014)

Maximalt ljud [dBA]	Ekvivalent ljudnivå [dBA]	Ljud med hörbara tonkomponenter eller musik [dB]
45	30	25

1.2 Bullerärenden kopplade till stora infrastrukturprojekt

De miljömässiga konsekvenserna som kommer av storskaliga infrastrukturprojekt är betydande, och det är viktigt att utbyggnaden av våra städer inte medför att människor eller miljö påverkas negativt. Hållbar stadsutveckling är ett mål som omfattas av agenda 2030 och det innebär en gemensam strävan mot att bygga och planera för hållbar infrastruktur, transport (FN 2024). För att minska påverkan av buller kan bullerskyddsåtgärder föreskrivas byggnader. Trafikverket är exempelvis ansvariga för att anpassa åtgärder när de projekterar för nybyggnation eller förändring av befintlig bil- eller järnväg. Åtgärder kan innefatta byte av fönster, tilläggsrutor, åtgärder på ventiler, konstruktion av nya bullerskärmar eller lokala skärmar (Trafikverket 2024).

I bullerärenden görs utredningar som inkluderar akustiska mätningar och modellberäkningar

för att bestämma ljudnivåerna vid byggnaders fasader. När en åtgärd ska fastställas används schablonvärden: ensiffervärden som beskriver hur mycket en fasad eller ett fasadelement isolerar mot ljud. Eftersom verkliga omständigheter varierar i stor grad har Trafikverket tillsammans med flera akustikkonsulter utfört ett utvecklingsprojekt där schablonvärden har tagits fram för en stor samling fasadtyper och fasadelement (Olofsson et al. 2015). Projektet syftade till att ta fram schablonvärden för att säkerställa att rätt bullerskyddsåtgärder på byggnader vidtas och får avsedd effekt. På senare tid har det visat sig finnas en diskrepans mellan schablonvärden för tvåglasfönster och stängda vädringsluckor som presenteras i Fasadprojektet och mätningar av dem fält.

1.3 Syfte & projektmål

Syftet med detta examensarbete är att uppdatera beräkningsschabloner som används för att beräkna ljudisolering hos tvåglasfönster och vädringsluckor inom ramen för projekt kopplade till Trafikverket. Målet är att dessa schabloner ska kunna användas med förvisning om att de överensstämmer med verkligheten i framtida projekt där tvåglasfönster eller vädringsluckor påträffas. För att bidra till en bättre förståelse för schablonernas trovärdighet görs mätningar som vägs mot teoretiska beräkningar av ljudisoleringen hos tvåglasfönster. Till sist undersöks om det går att kvantifiera osäkerheter i de beräkningsmetoder som inkluderar schabloner.

1.4 Frågeställningar

1. Är de beräkningsschabloner som för nuvarande används för att bestämma ljudisoleringen hos tvåglasfönster och vädringsluckor bristfälliga?
2. Hur ställer sig teoretiska beräkningar av ljudisolering hos tvåglasfönster mot mätningar av dem?
3. Går det att kvantifiera en generell osäkerhet i ljudnivåer som beräknats med schabloner?

1.5 Delmål

För att underlätta för ett smidigt genomförande av projektet har några delmål (DM) tagits fram:

- DM1: Utföra ljudisoleringsmätningar på husobjekt utrustade med tvåglasfönster och vädringsluckor. Dessa ska utföras enligt mätstandarden SS EN ISO 16283-3:2016.
- DM2: Anpassa en befintlig matematisk modell för att simulera ljudisolering hos tvåglasfönster, med avsikt att identifiera och kvantifiera osäkerheter mellan teoretiska värden och uppmätta värden.
- DM3: Bedöma effektiviteten hos befintliga schabloner genom att analysera och utvärdera insamlad data från genomförda mätningar och simuleringar. Om schablonerna som finns tillgängliga idag visar sig vara bristfälliga ska de revideras och uppdateras baserat på den nya datan.
- DM4: Baserat på resultaten, identifiera möjligheter att välja rätt åtgärder vid rätt behov.

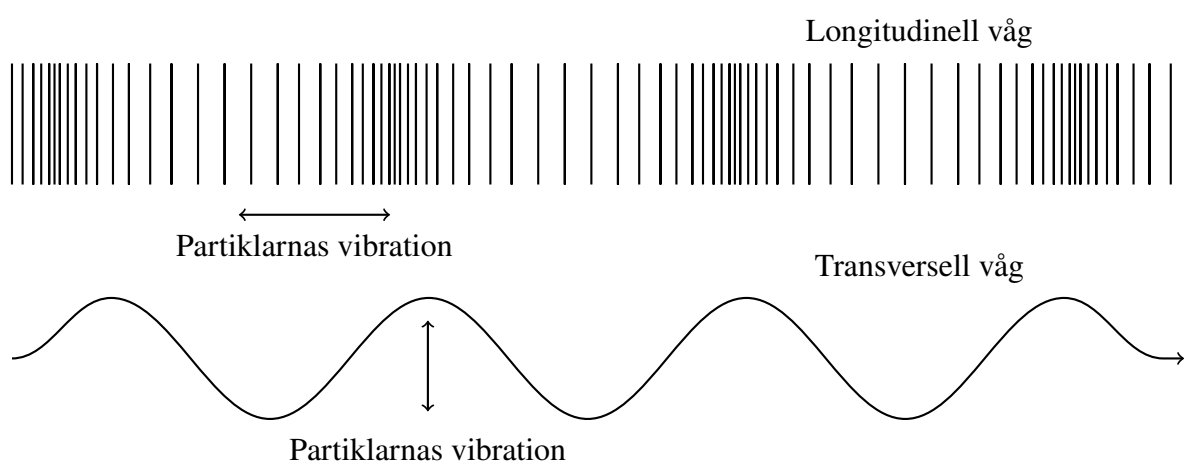
2 Teori

I följande kapitel beskrivs de grundläggande akustiska begreppen och teorierna som ligger till grund för rapportens metod och analys. Kapitlet inleds med en översikt över vad ljud är, hur det mäts, och hur det upplevs. Detta följs av en diskussion kring ljudisolering och slutligen presenteras en bakgrund till rapportens metodval, vilket inkluderar både praktiska mätningar och teoretiska beräkningar.

2.1 Akustikens grunder

Akustik är vetenskapen om ljud (Nationalencyklopedin 2024). Den mest grundläggande form av ljud är det vi hör, och det definieras av tryckförändringar som oscillerar i luften i frekvenser mellan 20 och 20 000 Hz. Begreppet ljud är egentligen större och sträcker sig utanför detta intervall. Exempelvis infraljud och ultraljud, som är under, respektive över, det hörbara intervallet (Åkerlöf 2001). I den här rapporten är det det hörbara ljud som är intressant.

En välkänd analogi för ljudets utbredning är den som liknar hur vattenvågor sprider sig på en stilla sjö när en sten träffar ytan, och att ljudvågor som sprider sig i atmosfären efter samma nedslag skulle likna dessa (Nilsson et al. 2005; Åkerlöf 2001). Men i och med att vi inte kan se ljudvågorna uppstår det lätt ett missförstånd när endast analogin med vattnets ytvågor används. Ljudvågor kan nämligen anta flera former: longitudinella och transversella, se Figur 1. I luft kan endast longitudinalvågor förekomma och de uppstår genom att störningar går igenom luften i form av tryckvågor i samma riktning som ljudets utbredningsriktning. Transversalvågor uppstår i kombination med longitudinalvågor om ljudet istället passerar genom ett fast medium, exempelvis en fasadvägg med en viss skjuvhållfasthet. Då skapar ljudet en vibration i materialet som får partiklarna att rör sig vinkelrätt mot ljudets utbredningsriktning (Nilsson et al. 2005).

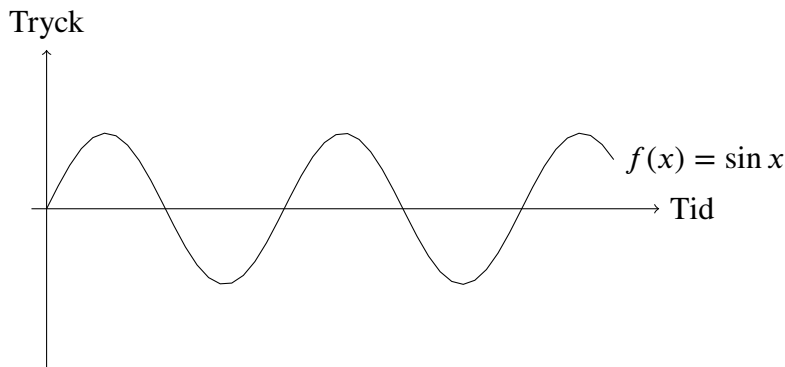


Figur 1: Skillnad på longitudinell och transversell våg.

Ljudets hastighet kan också variera beroende på vilket medium det färdas genom. I luft rör sig ljudet med en hastighet på 343 m/s när temperaturen är 20°C. Hastigheten är temperaturberoende; vilket för ljud innebär att det transporteras snabbare i varmare luft på grund av minskad luftdensitet och att molekylerna i luften rör sig snabbare. I fasta material, som trä eller metall, är

ljudets hastighet högre än i luft. I betong kan ljudet exempelvis uppnå hastigheter på 3000 m/s (Nilsson et al. 2005).

Med vår hörsel uppfattar vi när tryckförändringarna som genereras av att ljud når örat. I örat omvandlas tryckvågorna till vibrationer som skickas till hjärnan via nervsignaler. Det som vi uppfattar som mörk tonalitet är då ljudet består av långsamma tryckväxlingar och ljusare, eller mer diskanta toner, uppkommer av snabbare tryckväxlingar. Genom att i ett diagram lägga in tryckväxlingar mot tiden visualiseras tryckförändringar som en svängning. I Figur 2 presenteras en enskild ljudvåg där en hel svängning bestäms av periodtiden T . Ljudvågen har en frekvens f som utmärker hur snabbt tryckväxlingarna sker per sekund, och beräknas genom $f = \frac{1}{T}$, och har enheten Hertz [Hz] (Nilsson et al. 2005).



Figur 2: En sinusvåg som representerar en enkel ljudvåg, där tryck varierar över tid.

2.1.1 Ljud i siffror

Ljudets frekvensintervall spelar roll för hur vi uppfattar tonalitet. Ett ljud som består av en större ansamling höga frekvenser uppfattas som ljusare medan ett ljud med mer låga frekvenser är mörkare. För att bestämma ljudets styrka väljer man att beräkna ett kvadratisk medelvärde av trycket $\tilde{p}$ inom ett intervall $T_1 < t < T_2$, se ekvation 1. Detta för att trycket växlar tecken och tidsmedelvärdet skulle bli noll om man mäter det rakt av. Tilde-notationen över $\tilde{p}$ indikerar att trycket är en approximation (Nilsson et al. 2005).

$$\tilde{p} = \sqrt{\frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} [p(t)]^2 dt} \quad [Pa] \quad (1)$$

Men, det är opraktiskt att skapa en grafisk presentation av ljudnivån (L) i enheten Pa eftersom omfånget tryckvariationer som örat kan uppfatta är så stort, från 10 μ Pa till 60 Pa. Därför utnyttjas istället en logaritmisk skala som är definierad i decibel [dB] enligt

$$L = 10 \log_{10} \left(\frac{\tilde{p}^2}{p_{ref}^2} \right) \quad [dB], \quad (2)$$

där p_{ref} är ett referensvärde som sätts till 20 μ Pa efter den minsta tryckförändringen som örat kan uppfatta omkring 1000 Hz. dB-skalans presenteras ofta mellan 0 - 120 dB för att täcka det

mänskliga örats hela hörbara intervall, från den lägsta till den högsta ljudnivån som kan uppfattas utan att orsaka smärta eller skada (Nilsson et al. 2005).

Att höja en ljudnivå med 10 dB motsvarar en tiodubbling av ljudets intensitet men upplevs endast som en fördubbling av ljudstyrkan. För att summera ljud från olika ljudkällor L_1 till L_x används följande ekvation

$$L = 10 \log_{10} \left(\sum_{i=1}^x 10^{\frac{L_i}{10}} \right) \quad [dB]. \quad (3)$$

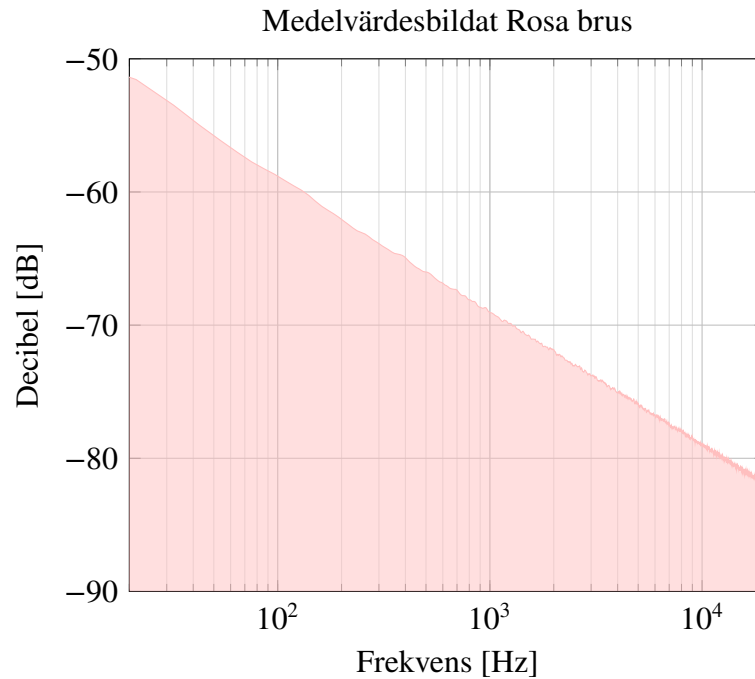
För att subtrahera ljudnivåer, som vanligen utnyttjas i de fall då justering för bakgrundsljud behövs, används:

$$L = 10 \log_{10} \left(10^{\frac{L_m}{10}} - 10^{\frac{L_b}{10}} \right) \quad [dB], \quad (4)$$

där är L_m den uppmätta ljudnivån och L_b den uppmätta bakgrundsnivån (Swedish Standards Institute 2016; Åkerlöf 2001).

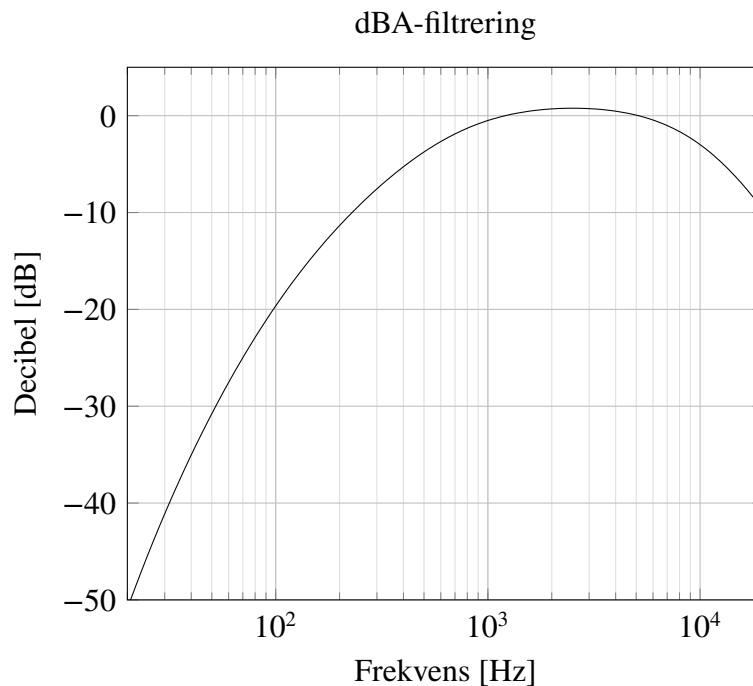
2.1.2 Visuell representation av ljud

Att visualisera ljud går att göra med hjälp av frekvensanalys där frekvens placeras på x-axeln inom intervallet 20-20 000 Hz och ljudnivån (dB) på y-axeln. Detta låter oss se sammansättningen av ljud genom dess deltoners (frekvensers) styrka (Åkerlöf 2001). Ett ljud som har visualiserats med den här tekniken visas i Figur 3. Det är ett rosa brus, som täcker hela det hörbara spektrumet och liknar ljudet av ett vattenfall när det spelas ur en högtalare. För rosa brus avtar energin med ungefär 3 dB per oktav till skillnad från exempelvis vitt brus som har lika mycket energi vid alla frekvensnivåer. Rosa brus används för mätningar i denna studie för att mäta isoleringsförmågan av fönster och vädringsluckor.



Figur 3: Frekvensanalys av medelvärdesbildat rosa brus. Används som referens för ljudisoleringsmätning av fönster och vädringsluckor i denna studie.

Det finns många olika filtreringstekniker som används för att dämpa ljud eller för att få information om vad ett ljud har för frekvensinnehåll. Exempelvis, för att efterlikna det mänskliga örats känslighet för olika frekvenser, använder man sig av A-vägningen, ett filter som man lägger på ett ljudspektrogram, vilket efter summering resulterar i ett ensiffrigt värde med enheten dBA. Eftersom det mänskliga örat inte är lika känsligt för låga och mycket höga frekvenser, som det är för frekvenser i det mellersta registret, är A-vägningen designad för att imitera detta. I Figur 4 illustreras detta filter som är som mest förstärkt mellan 500 Hz och 6 kHz, vilket är det intervall som det mänskliga örat är mest känsligt (Åkerlöf 2001).



Figur 4: A-Vägning, en filtreringsteknik som efterliknar det mänskliga örats känslighet för olika frekvenser genom att applicera ett filter på ett ljudspektrum.

Det finns ofta även ett stort intresse för att dela upp ett frekvensspektrum i olika sektioner för att noggrannare kunna analysera delar av ett ljud. Detta kallas bandpassfiltrering och innebär att man lägger på ett bandpassfilter som endast släpper igenom ljud som ligger mellan två frekvenser. De två vanligaste formerna av bandpassfiltrering är över oktavband och tersband (1/3 oktavband). Genom att välja centreringsfrekvenser varpå filtreringen läggs kan man få en ett dBA-värde per band. Nedan visas de internationellt standardiserade centralfrekvenser, de i fet stil anger oktavband och resten plus de för oktavband används för tersbandsfiltrering (Kleiner 2008).

← ..160 200 **250** 315 400 **500** 630 800 **1000** 1250 1600.. →

Tersbandsfiltrering underlättar även visualisering av ett frekvensspektrum genom att göra en medelvärdesbildning av ljudnivåerna inom varje band. Det är dock viktigt att notera att tersbandsfiltrering innebär en viss kompromiss i form av förlorad upplösning. Eftersom varje tersband täcker ett bredare frekvensområde kan detaljerade variationer inom dessa band missas (Åkerlöf 2001).

2.1.3 Interferens

Interferens är ett fenomen som kan inträffa när två eller fler ljudvågor möts i ett medium. Det är ett relativt ovanligt scenario i bullersammanhang men kan till exempel uppstå när identiska signaler spelas från flera högtalare eller när ett ljud, som reflekterats mot en hård yta såsom en byggnadsfasad, möter det inkommande ljudet på ett visst avstånd från fasaden. När dessa två signaler möts, och om de har exakt samma ljudnivå och ligger i fas, kan ett av två scenarion uppstå. Antingen ligger ljudtryckens svängningar helt i fas som ger upphov till att båda signalerna

samverkar och signalernas ljudnivåer summeras och dubblas, vilket kallas *konstruktiv interferens*. Det andra alternativet är att ljudtrycken är fasvända i relation till varandra, vilket innebär att ljudtryckens toppar respektive dalar möts, som resulterar i kancellering av ljudnivåerna, detta kallas *destruktiv interferens*. Sedan finns även alla varianter däremellan: fasförskjutningar mellan källor av olika styrkor då ljuden ökar eller minskar lite upp eller ner. Då kallas det för partiell interferens (Nilsson et al. 2005).

Vid ljudmätningar är det viktigt att ha interferens i åtanke. Framförallt när man väljer placering av den mikrofon som ska mäta ljudnivån framför stora husobjekt med hårda ytor, eftersom det då kan uppstå interferens när ljudet reflekteras mot fasaden. Om mikrofonen skulle placeras inom ett avstånd mellan $0m < 5m$ från fasaden kan reflektionerna orsaka att det direkta och det reflekterade ljudet interfererar på ett sätt som är svårt att förutsäga och justera för i efterhand eftersom ljudnivån där blir högre än vad det är vid fasaden. Därför är det säkrast att placera mikrofonen alldeles intill fasaden. Då vet man att resultatet som mikrofonen fångar upp är precis 6 dB starkare än det inkommande ljudet i och med att mikrofonen också tar upp reflektion i fasaden. Då kan 6 dB subtraheras från mätningen för att få fram ljudnivån vid fasaden (Åkerlöf 2001).

2.1.4 Efterklangstid

Efterklang uppstår när ljudvågor reflekteras mellan ytor, såsom väggar och inredningsobjekt, i ett rum. Detta får ljudet att dröja kvar även efter att ljudkällan upphört. För att kvantifiera detta används efterklangstiden T_{60} , som innebär den tid det tar för ljudnivån att minska 60 dB från det att ljudkällan tystnat. Om antagande om att ljudet sprids diffust gäller, vilket innebär att ljuder är jämt fördelat över rumsvolymen och reflekteras likformigt i alla riktningar, och då följer Sabines ekvation

$$T_{60} = \frac{0.161V}{A_s}, \quad (5)$$

där V är rummets volym och A_s är den totala absorptionen i rummet uttryckt som summan av alla ytornas absorptionsförmåga samt luftens absorption, och 0.161 är en experimentellt framtagen konstant med avseende på konsertsalars efterklang på tidigt 1900-tal (Nilsson et al. 2005). Approximationen har analyserats på senare tid och de har visats stämma till inom ungefär $\pm 10\%$ precision efter den föreslagna kalibreringen (Prawda et al. 2022).

Det är viktigt att ha i åtanke att ljudets spridning i verkliga rum ofta avviker från det ideala diffusa på grund av variationer i inredning och materialval. Detta påverkar både absorption och ljudreflektion, vilket innebär att efterklangstiden kan variera beroende på var i rummet man står (Kleiner 2008).

2.1.5 Akustisk impedans

Akustisk impedans Z_A är ett mått på det motstånd som ljudvågor möter när de rör sig i ett medium. När en ljudvåg träffar exempelvis en fasad reflekteras en del av vågen, och resterande del av vågen transmittas genom fasaden. Reflektionen uppstår som en konsekvens av att luften och fasaden har olika impedans. I det här fallet har fasaden högre impedans vilket bidrar till att

fasaden har en isolerande förmåga. Ekvation 6 visar hur impedansen beror på mediets densitet ρ och ljudets hastighet c . För att detta ska gälla behöver vi anta att ljudet är på tillräckligt långt avstånd från ljudkällan, och då kan det liknas med en plan våg (Kleiner 2008).

$$Z_A = \rho c \quad (6)$$

Beroende på vad impedansskillnaden är mellan två medium blir ljudisoleringen och reflektionen annorlunda. När en infallande ljudvåg möter ett medium med högre impedans transmitteras endast en liten del av ljudet medan resten reflekteras. Skillnaden påverkas även av vinkeln med vilken ljudet infaller och därmed reflekteras och transmitteras från.

2.2 Byggnadsakustik

Ljudtyper som byggnadsakustiken hanterar delas vanligen upp i två kategorier: luftburet och strukturburet ljud. Den här studien fokuserar på det luftburna ljudet som från luften transmitteras genom väggar, fönster och ventiler. Strukturburen ljudöverföring är ljud som rör sig från källan till mottagaren genom en mekanisk väg. Ljud från exempelvis en hiss, någon som klampar i en trappa eller ett VVS-system (Kleiner 2008).

2.2.1 Ljudisolering & ljudreduktionstal

För att kvantifiera effekten av en ljudisolering används begreppet ljudnivåskillnad som innebär skillnaden i ljudnivå mellan två sidor av en isolerande barriär. När en ljudvåg stöter på ett nytt medium innebär skillnaden medierna emellan, gällande deras elasticitet, densitet och massa att en del av ljudvågen reflekteras och en del transmitteras till det nya mediet. För att sätta ett mått på ljudreduktionen hos en isolerande barriär används ljudreduktionstalet R . Det anger hur väl barriären reducerar ljudnivå och uttrycks i decibel. Reduktionstalet skrivs som

$$R = 10 \log_{10} \frac{W_s}{W_t} \quad [dB], \quad (7)$$

där W_s står för den infallande ljudenergin mot barriären, och W_t är den ljudenergi som transmittteras genom barriären (Nilsson et al. 2005).

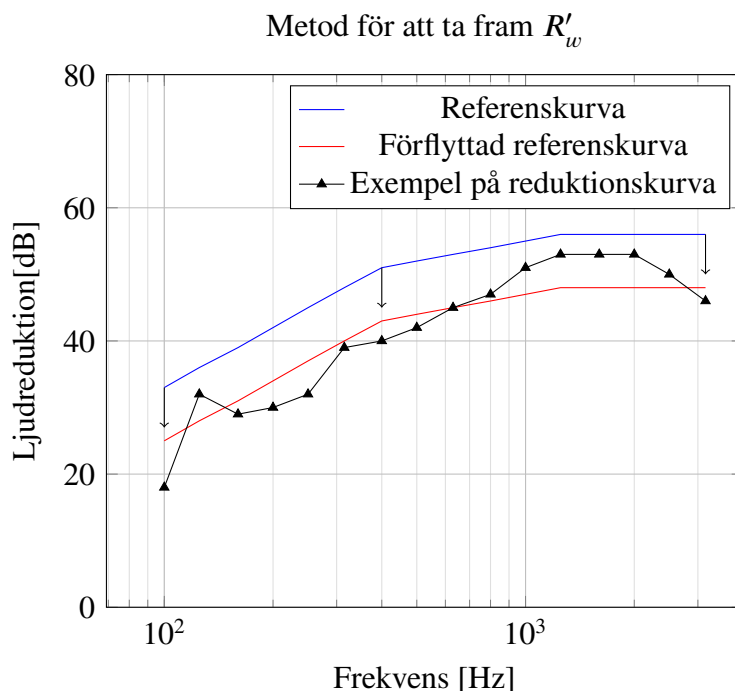
Vid fältmätning av ljudisolering av en fasad eller ett fasadelement används ljudreduktionen R'_{45° och följande ekvation:

$$R'_{45^\circ} = L_s - L_r + 10 \log_{10} \left(\frac{S}{A_s} \right) - 1.5 \quad [dB]. \quad (8)$$

R'_{45° -värdet avser reduktionen per tersband, och L_s är den uppmätta ljudtrycksnivån i sändarrummet, vilket inom ramen för detta projekt är utomhus vid fasad. L_r är ljudtrycksnivån inne i mottagarrummet, vilket motsvarar rummet innanför fasaden. S är arean på fasadelementet, och A_s är absorptionsarean i mottagarrummet. S och A_s introduceras för att korrigera för det ljud som absorberas i mottagarrummet, för att endast barriärens ljudisolering ska redoviseras. 1.5 dB subtraheras för att ta hänsyn till interferensen som uppstår av att mikrofonen

placeras intill fasad och fångar upp reflekterade ljud såväl som infallande. Anledningen till att det är 1.5 dB och inte 6 dB som subtraheras, vilket nämndes i avsnitt 2.1.3, är för att det ljudet infaller med 45°graders vinkel mot fasaden vilket leder till att mindre av ljudet interfererar (Olofsson et al. 2015; Swedish Standards Institute 2016).

När man, efter en mätning och beräkningar enligt ekvation 8, har erhållit R'_{45° -värden i varje tersband så bör man för att utvärdera resultatet omvandla dem till ett ensiffervärde. Detta för att kunna göra en enkel helhetsredovisning av ett elementets ljudisoleringsförmåga. Genom att använda referenskurvan i Figur 5 som redovisas i ISO 717-1 kan ett vägt reduktionstal R'_w framtas för hela elementets ljudreduktion. Metoden går ut på att referenskurvan, som representerar det genomsnittliga ljudtrycket genom en konstruktion vid olika frekvenser, justeras uppåt eller nedåt i steg om 1 dB mot den uppmätta R'_{45° -kurvan tills det att summan av negativa avvikelser från referenskurvan till den uppmätta är så stor som möjlig, men inte mer än 32,0 dB (Swedish Standards Institute 2020). När referenskurvan är justerad beräknas R'_w genom att ta 52 + antal decibel som kurvan har förflyttats vilket bör subtraheras ifall kurvan är flyttad nedåt (Kleiner 2008).



Figur 5: Här illustreras metoden för att beräkna R'_w , ett ensiffervärde som representerar ljudisoleringsförmågan hos ett element.

Orsaken till att R'_w är ett medel över tersband som sträcker sig mellan 100 Hz och 3150 Hz, och inte hela det hörbara intervallet, är för att osäkerheten som introduceras för mätningar på lägre frekvenser blir för stor. De högre frekvenserna lyckas sällan tränga igenom en fasad så de behöver ej ingå i R'_w (Kleiner 2008).

2.2.2 Ytterligare mått på ljudreduktion

Ett annat sätt att redovisa ljudisolering är genom att beräkna nivåskillnaden mellan sändar- och mottagningsrummet enligt följande:

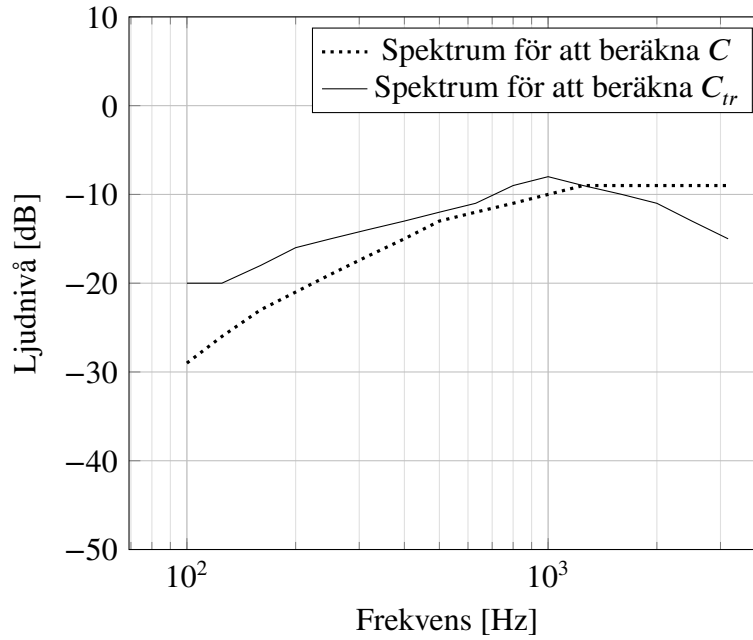
$$D_{nT} = L_s - L_r + \log_{10} \left(\frac{T}{T_0} \right) \quad [dB] \quad (9)$$

där D_{nT} betecknas som den standardiserade nivåskillnaden, med T_0 satt till 0,5 sekunder för bostäder och T den uppmätta efterklangens i mottagningsrummet (Swedish Standards Institute 2020). L_s är ljudtrycksnivån i sändarrummet och L_r är ljudtrycksnivån i mottagarrummet. Detta är ett mer praktiskt mått än reduktionstalet R då det är lättare att mäta och tar hänsyn till efterklangstiden direkt i beräkningen, medan R fokuserar mer på frekvensspecifik dämpning av ljudet.

$D_{nT,w}$ är den vägda ljudnivåskillnaden mellan 100 Hz och 3150 Hz och "nT" i $D_{nT,w}$ står för just normalisering av efterklang, vilket möjliggör för jämförelse av resultat med olika efterklang. I den här studien antas en halv sekunds efterklangstid för att kunna jämföra mot Fasadprojektet som redovisar ljudreduktionen i $D_{n,e,w}$, vilket är en generalisering för rumsstorlekar på 10 m². I detta projekt kommer $D_{nT,w}$ att likställas med Fasadprojektets redovisning av vädringsluckor i $D_{n,e,w}$ eftersom skillnaden mellan $D_{nT,w}$ och $D_{n,e,w}$ i normala rum vanligtvis är liten (Olofsson et al. 2015; Swedish Standards Institute 2020).

2.2.3 Ljudreduktionstal anpassad efter olika ljudkällor

Ljud från olika källor, exempelvis tåg eller bil, består i varierande sammansättning av lågfrekvent och högfrekvent ljud. Därför har man tagit fram anpassningstermerna C och C_{ir} för att redovisa hur effektiv ljudisoleringen är beroende av ljudkällan. C justerar R'_w -värdet hos ett fasadelement mot ljud med framstående höga frekvenser, exempelvis tågtrafik. C_{ir} är en justering mot ljud med större andel lågfrekvent ljud som uppkommer av exempelvis långsamtgående trafik i en innerstadsmiljö. För att ta fram anpassningstermerna utgår man ifrån A-vägda ljudspektrum för tåg och biltrafik som presenteras i Figur 6. Spektrumen har en upplösning i tersband.



Figur 6: Ljudnivåspektrum som används för att beräkna adaptionstermerna C och C_{tr} i tersband (Swedish Standards Institute 2020).

För att räkna fram reduktionstalen, som vanligen redovisas som $R'_w + C$ och $R'_w + C_{tr}$ används ekvation 10 - 11. Ekvation 10 beräknar först ljudnivåindex X_{Aj} , som representerar den anpassning som görs efter bil- eller tågspeltrum j . Beräkningen tar hänsyn till ljudnivå $L_{i,j}$ och ljudreduktion R'_i i terband i , från 100 Hz till 3150 Hz.

$$X_{Aj} = -10 \log_{10} \sum_{i=1}^x 10^{\frac{L_{i,j} - R'_i}{10}} \quad [dB] \quad (10)$$

Sedan presenteras reduktionstalet enligt följande uppställning (Swedish Standards Institute 2020):

$$X_{Aj} = R'_w + C_j \quad [dB], \quad (11)$$

2.2.4 Fasadisolering

Fasaders förmåga att isolera ljud varierar i stor grad beroende på fasadens material och design. För att skapa bra förutsättningar för mätningarna inom detta projekt är fasader med hög isoleringsförmåga att föredra. Detta för att kunna utgå ifrån att fasaden isolerar tillräckligt bra, så att det mätbara ljudet domineras av genomsläpp från fönster eller vädringsluckor och inte fasad. I Tabell 2 redovisas några vanliga fasadtyper och deras uppskattade ljudreduktionstal. Den enkla träväggen påträffas ofta i väl underhållna trähus från tidigt 1900-tal, men även stugor och villor från 1970-1980. Medelbra trävägg innebär att träfasaden är välisolerad, ofta med gips på insidan av väggen, alternativt isolerad plank- eller timmervägg. För en tilläggsisolerad trävägg är väggkonstruktionen väl isolerad. Fasader konstruerade i lättbetong uppnår en tjocklek mellan 300 -

400 mm. Tegelfasader har en tjocklek på 250-350 mm, och tunga fasader kan antingen bestå av betong med tilläggisolerering eller vara en homogen tegelvägg i tjocklek 400 mm - uppåt.

Tabell 2: En uppskattning av R'_w -värden som illustrerar hur ljudreduktionen är beroende av fasadtyp, efter Fasadprojektet (Olofsson et al. 2015)

Fasadmaterial	R'_w [dB]	$R'_w + C$ [dB]	$R'_w + C_{tr}$ [dB]
Enkel trävägg	38	37	33
Medelbra trävägg	44	43	39
Tilläggsisolerad trävägg	50	48	43
Lättbetong	44	43	39
Tegelfasad	50	49	45
Stenfasad	55	54	50

De mest grundläggande principerna för ljudisolering är sambanden mellan materialens massa, elasticitet och densitet för att beskriva dess förmåga att blockera ljud. Tunga material som betong och tegel har bra ljudisoleringsförmåga tack vare deras stora massa, låga elasticitet och höga densitet. Vid användandet av material som har mindre massa finns många typer av flerskiktsskonstruktioner där man kombinerar material med olika akustiska egenskaper som isolerar mot ett brett spektrum av frekvenser (Olofsson et al. 2015).

2.2.5 Tvåglasfönster

Kopplade tvåglasfönster består av två separata fönsterrutor som är placerade intill varandra med en luftspalt mellan dem. Runtomkring glasen finns fönstrets båge och karm, som håller glasen på plats. Bågen är den rörliga delen i vilken fönstret är monterad i och som möjliggör för öppning och stängning av fönstret. Karmen är monterad i väggen och för att minska ljudläckage tillsätter man även tätningslister runt hela fönstret och mellan alla rörliga delar. Drevning är den process som isolerar mellan fönster och vägg. De faktorer som påverkar ljudisoleringen hos tvåglasfönster inkluderar:

- **Tjocklek på glaset:** Tjockare glas har mer massa vilket innebär att det kan dämpa ljudvågor bättre än tunnare glas. Vanligen har tvåglasfönster en glastjocklek på 2-3 mm.
- **Luftspalt:** Avståndet mellan glasrutorna fungerar som en extra barriär för ljud och förhindrar en direkt överföring av ljudvågor mellan de två glasrutorna. Luftspaltens tjocklek uppgår oftast till omkring 30-50mm.
- **Fönsterbågens material:** Tvåglasfönsters båge utgörs ofta av trä och ljudtransmissionen påverkas av trätjockleken samt ramens skick.
- **Fönsterfogar:** Tätning och fogarnas skick spelar stor roll för ljudläckage. Äldre fönster kan ha uttorkade tätningslister som skapar läckage mellan fönsterkarm och båge. Då är det främst diskant ljud som tränger igenom de torkade listerna.

- **Drevning:** Material som drevningen är utförd med. Här ingår en drevningsremsa, botteningslist och fogmassa. Ljudisoleringsförmågan kan även försämrats med tiden för alla komponenter i drevningen (Olofsson et al. 2015).

2.2.6 Vädringsluckor

För att skapa luftcirkulation i ett hus, vilket är viktigt för att motverka att fuktig luft tar sig in i väggar och sprider mögel, brukar ventiler monteras i fasaden. Syftet är att låta det lägre lufttrycket inne i huset suga in luft i huset genom de öppna ventilerna. Det finns många olika utformningar på väggventiler men i denna studie ska ljudisoleringsförmågan hos vädringsluckor som redovisas i Figur 7 utvärderas.



(a) Utvändig vädringslucka.



(b) Invändig vädringslucka.

Figur 7: Bilder på vädringsluckor som bedöms i denna studie. Luckan kan öppnas separat från fönstret (egen bild).

2.3 Tidigare studier

Under 2014 drev Trafikverket utvecklingsprojektet Fasadprojektet för att skapa underlag avseende fasadåtgärder som bullerskydd. Projekteringen av fasadåtgärder blir lätt rörig eftersom det finns stor variation i huskonstruktioner med många typer av fasader och fasadelement. Därför finns det nytta i att ha en stor databank med schabloner som gäller för specifika samt standardiserade fall som man stöter på i fält. I fasadprojektet redovisas schabloner för ljudreduktionen för tvåglasfönster som $R'_w + C = 28$ dB och $R'_w + C_{tr} = 23$ dB. Kring dessa har det uppstått en diskussion om deras precision efter att mätningar har visat en diskrepans i hur väl tvåglasfönster isolerar mot ljud (Olofsson et al. 2015).

Detsamma gäller odämpade väggventiler även kallade vädringsluckor som är monterade i fönster. När dessa är öppna, vilket är nödvändigt för att de ska fylla sin funktion att ventileras, saknas

data på hur mycket ljud de släpper igenom. I Fasadprojektet redovisas $D_{n,e,w} + C = 32$ dB och $D_{n,e,w} + C_{tr} = 32$ dB (Olofsson et al. 2015). I den här studien kommer $D_{nT,w}$ att redovisas istället för $D_{n,e,w}$ eftersom mätningarna är gjorda med hänsyn till mottagarrummets efterklangstid och inte endast rummets storlek.

2.3.1 Hur beräkningsschabloner används i projekt

När Trafikverket projekterar för att bygga nya eller rusta upp gamla bil- eller järnvägar ansvarar Trafikverket för att undersöka vilken påverkan byggnationen kommer att ha på omkringliggande miljö. En av aspekterna där är ljudmiljö, och för att undersöka detta utförs oftast en bullermoddellering som resulterar i vilken ljudnivå som byggnationen kommer att innebära, framme vid husfasaden. Beräkningsschablonen används sedan för att avgöra hur mycket av det ljudet som fasaden släpper igenom. Om det framgår att ljudnivåerna inomhus överstiger riktvärden som är uppsatta av folkhälsomyndigheten så är Trafikverket ansvariga att anpassa åtgärder (se Tabell 1). Dessa åtgärder kan innebära byte av fönster, ventiler eller fasader (Trafikverket 2024).

2.4 Beräkningsmetoder för tvåglasfönsters ljudisolering

Den teoretiska metoden som används för att beräkna överföringsförlusten genom tvåglasfönster innebär att man delar upp frekvensområdet i olika intervall. Ljudisoleringen inom dessa intervall beskrivs av två matematiska funktioner på vardera sida om luftspaltens fundamentala resonansfrekvens f_0 . Under resonansfrekvensen kommer båda glaspanelerna vibrera i fas vilket innebär att de kommer att bete sig som en enkelpanel och överföringsförlusten är satt att öka med 6 dB/oktav. Ovanför resonansfrekvensen kommer luften mellan glaspanelerna fungera som en extra isolering genom att ljudet stöter på impedansen från första glaspanelen, luften mellan, andra glaspanelen och luften på andra sidan och överförlusten blir ungefär det dubbla: 12 dB/oktav (Kleiner 2008).

Det är alltså relevant att hitta resonansfrekvensen. För följande beräkningar antas masslagen gälla samt att det inte finns några mekaniska kopplingar glasskivorna emellan där strukturburet ljud kan överföras. Koincidens innebär att ljudvågor i två olika medium hamnar i fas, vilket kan uppträda då ljud infaller med en vinkel mot en konstruktion som är i fas med ljudvågen i det mediet. Det intervall som kallas koincidensintervall (där kan det förkomma en försämrad ljudisolering), förekommer i fallet för tvåglasfönster ovan 3150 Hz. Därför ingår de inte i beräkningarna, de ligger utanför det undersökta intervallet om 100-3150 Hz. Om fönstrets paneler är fria, med luft emellan, är den fundamentala resonansfrekvensen f_0 för luftspalten för vinkelrätt infallande ljud

$$f_0 = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_0}{d} \left(\frac{1}{m_1''} + \frac{1}{m_2''} \right)}, \quad (12)$$

där c_0 är ljudets hastighet, ρ_0 luftens densitet, m_1'' och m_2'' är massan per area för glasskivorna och d är luftspaltens tjocklek (Kleiner 2008).

2.4.1 INSUL

INSUL är ett beräkningsprogram som används för att beräkna ljudreduktionen för enkel- eller dubbelpaneler. Det tar hänsyn till parametrar som panelernas tjocklek, material och avståndet mellan dem. Programmet beräknar ljudreduktionen i tre regioner över ett frekvensspektrum mellan 50 - 5000 Hz.

I den första regionen, som sträcker sig från 50 Hz till resonansfrekvensen f_0 för luftspalten, appliceras masslagen där ljudreduktionen antas öka med 6 dB per oktav. I den andra regionen, som är ovanför resonansfrekvensen, förväntas ljudreduktionen i INSUL öka med 18 dB per oktav eftersom de två panelerna fungerar som fjädrar som är frikopplade från varandra vilket inte togs hänsyn till ovan. Denna frikoppling resulterar i en mer effektiv dämpning av ljudvågorna. I den tredje regionen, där luftspalten mellan panelerna blir större än våglängden hos ljudet, blir ljudreduktionen som orsakas av luftspalten lite mindre och antas öka med 12 dB per oktav (INSUL 2024).

3 Metoder & material

I det här kapitlet presenteras de metoder som utgör grunden för de insamlade data som studiens resultat bygger på. Studien använder sig främst av kvantitativa data som har samlats in genom akustiska fältmätningar. Dessutom inkluderas beräkningar för tvåglasfönsters ljudisoleringsförmåga baserade på litteratur som beskrivs i kapitel 2.

3.1 Fältmätning

Fältmätningar utfördes på fem byggnader i Uppsala och Sala med fasader konstruerade i material med hög akustisk isoleringsförmåga (se kapitel 2.2.4). Detta innebär att ljudinträngningen primärt sker genom fönstren vilket är en förutsättning för att kvantitativt kunna beskriva isoleringsförmågan hos enbart fönstren. I alla byggnader uppmättes dimensionsmått på mottagarummets volym, fönstrens yta, glastjocklek, luftspalt samt högtalarens avstånd och vinkel till fasaden. Alla mätningar utfördes i enlighet med mätstandarden angiven i ISO 16283-3 (Swedish Standards Institute 2016). Efterbearbetning av den insamlade datan och beräkning av ljudreduktionstal med anpassningstermer gjordes utefter metoden beskriven i ISO 717-1 (Swedish Standards Institute 2020).

3.1.1 Genomförande

Mätningarna genomfördes med Norsonics Nor145, en standardiserad och högkvalitativ ljudmätare ämnad för akustiska mätningar. För att säkerställa korrekta mätningar kalibrerades ljudmätaren före och efter varje mättillfälle. Högtalaren var en Behringer av typen Eurolive b212.

Sändarrum (mätning utomhus på fasad)

Mätningarna initierades med att högtalaren placerades utomhus, på minst 5 meters avstånd från fasaden, riktad mot den med en infallsvinkel på 45°. Genom att rikta högtalaren med vinkel mot fasaden skapas ett mer diffust ljudfält och ljudvågorna sprids jämnare över fasadytan. Beroende på vilken våning fönstret var på fanns två möjliga sätt att uppnå korrekt vinkel, antingen stående högtalare med vinkel mot första våningen eller liggandes med vinkel upp mot andra våningen. Sedan genomfördes tre mätningar utanpå fasad och dessa medelvärdesbildades för att få med olika positioner på fasaden. Under mätningarna spelades ett rosa brus (se Figur 3) upp ur högtalaren med en ljudtrycksnivå på ungefär 100 dBA vid källan, och mätningar utfördes under 30 sekunders period. Det utfördes tre mätningar utanpå fasad där mikrofonen placerades till vänster om fönster, på mittersta fönsterkarmen och på fasad till höger om fönster. De tre mätningarna medelvärdesbildades för att få med de olika mikrofonpositionerna på fasaden. För att möjliggöra för mikrofonen att komma så nära fasaden som möjligt och minimera risken för interferens användes en halv vindboll som monterades på mikrofonen. Vindbollen fungerade som ett filter för turbulens som uppstod av vinden.

Mottagarrum (mätning inomhus)

I mottagarrummet, som i det här fallet är rummet inne i lägenheten/huset, mättes först bakgrunds-ljudet med stängda fönster. Med bakgrundsljud menas annat ljud än det som ska studeras, till exempel kunde det förekomma ljud från intilliggande vägar eller fåglar. Dessa ljud behövde justeras för i efterhand för att avskilja isoleringsförmågan från fönstren som kommer av det rosa

bruset.

Efter mätning av bakgrundsljudet spelades rosa brus upp ur högtalaren igen med fönstren stängda. En person stod centrerad i rummet med ljudmätaren i handen. Under 30 sekunder, med ljudet spelandes mot fasaden, rörde personen långsamt mätaren runt i rummet för att mäta så stor del av volymen som möjligt för att jämna ut variationer i rummet. Mätaren rörde inte närmare än 0,5 meter från väggar, tak eller objekt i rummet, för att den inte skulle ta upp reflektion från ytorna. Personen kunde heller inte ha prassliga kläder eller råka stöta till något eftersom ljudmätaren var väldigt känslig.

Mätningarna för tvåglasfönster och vädringsluckor skiljde sig inte mer åt än att för vädringsluckorna krävdes två mätningar i mottagarrummet, en med öppen, och en med stängd ventil.

Efterklangstid

Efterklangstiden mäts för att ta hänsyn till ljudets uppehållstid i mottagarrummet. Den beror på rummets volym men också inredning och materialval. Ett rum med kala väggar och sparsam inredning innebär en längre efterklangstid medan ett rum med mjuka detaljer och exempelvis bokhyllor minskar efterklangstiden eftersom mer ljud absorberas i inredningen. För att mäta efterklangstiden placerades en högtalare i ett hörn i mottagarrummet, och ett rosa brus spelades upp under 5 sekunder med ett ljudtryck över 95 dB vid källan för att sedan stängas av så att efterklangen kunde mätas. Mätningen utfördes 3 till 6 gånger i olika platser i rummet för att få med rummets variation. Mätaren hölls helt stilla för varje mätning och fick heller inte hållas på ett närmare avstånd än 0,5 meter från väggar eller objekt under denna mätning för att minska påverkan av interferens.

Databearbetning

Vid mätningarna erhöles ljudnivåer i tersband utomhus på fasad, inomhus med stängda fönster, bakgrundsnivå inomhus och efterklangstid inomhus. Med detta kunde ljudreduktionen R'_{45° beräknas i varje tersband enligt ekvation 8. Det vägda reduktionstalet R'_{w} togs fram genom att använda metoden i avsnitt 2.2.1. Gällande vädringsluckan erhöles liknande data som sedan genom ekvation 9 räknade fram $D_{nT,w}$.

För att bestämma anpassningstermerna C och C_{tr} användes information från trafikbullerspektrum, vilka illustreras i Figur 6. Anpassningstermerna beräknades enligt ekvation 10-11, där motsvarande spektrum användes för att bestämma de relevanta värdena för C och C_{tr} . Genom att inkludera dessa anpassningstermer i beräkningen erhöles ensiffervärden för bedömning av den totala ljudisoleringen av ljud från den trafiktyp som ska studeras i det specifika projektet.

3.2 Teoretiska beräkningar och INSUL

För att bestämma resonansfrekvensen, f_0 , för luftspalten mellan glasrutorna användes ekvation 12. Variationen hos mätobjekten togs med i beräkningarna genom att använda avståndet mellan glasen och glasrutornas tjocklek. Dessa mättes i fält med hjälp av en glasmätare. Glasets densitet antogs vara $2,500 \text{ kg/m}^3$, vilket är typiskt för fönsterglas. Ljudhastigheten i luft antogs vara 343 m/s , som vid rumstemperatur, och luftdensiteten $1,2 \text{ kg/m}^3$.

Beräkningarna i INSUL tar hänsyn till antal glasrutor, deras tjocklek, luftspannet mellan dem,

rumsvolymen och efterklngen i mottagarrummet. Beräkningen utfördes för parametrar som uppmättes vid varje mättillfälle. När beräkningarna genomfördes så beslutades om att de data som kom av mätningstillfälle B fick utebli. Detta för att dimensionerna för mätningarna A och B var så pass lika att de hade gett samma resultat.

4 Resultat

I detta kapitel redovisas resultat från mätningar som används för att bedöma effektiviteten hos beräkningsschabloner för tvåglasfönster och vädringsluckor. Här jämförs även teoretiska beräkningar och simuleringar med mätresultat för att illustrera schablonernas noggrannheter och brister.

4.1 Tvåglasfönster

I tabell 3 redovisas dimensionella mått för varje mätningstillfälle A-E. Objekten valdes efter fasadmaterial, fönsterkonstruktionens yta och fönstrets skick. Mätning A, B och C utfördes på lägenheter på andra våningen i stenhus byggda 1925-1930. Högtalaren var riktad upp emot fönstren, vilket uppnåddes genom att placera högtalaren liggandes på sidan på marken, 5 meter från fasaden rakt nedanför fönstret (se Bilaga 8). Marken var snöbelagd under dessa mätningar och vid mätning A och B var det minusgrader. För mätning C var det plusgrader och dimma utvecklades till duggregn under mätningstillfället. Fasaden upplevdes inte vara fuktig eller blöt vid någon av mätningarna. Det fanns en variation i fönsterkarmarnas och tätningslisternas skick.

Mätning D och E utfördes på tegel respektive trähus byggda på 1970-talet, med orginalfönster på första våningen. Under dessa mätningar var fasaderna torra, men under mätning E började det duggregna. Vid mätning D fanns spaltventiler ovan fönster och längst sidokarmen som täcktes med modeller för att minimera ljudgenomträngning genom dem (se Bilaga 8). Fönstret vid mätning E upplevdes vara mest tätt av alla konstruktioner som mättes.

I tabell 3 beskrivs även hur den fundamentala resonansfrekvensen förhåller till luftspalten och glasskivornas tjocklek, vilket agerar som avdelare mellan två beräkningsregioner i INSUL nedan. Resonansfrekvensen är framtagen enligt ekvation 12.

Tabell 3: Dimensionella mått som är uppmätta vid varje mätillfälle. V är mottagarummets volym, S är fönsterkonstruktionens yta, GS är antal glasskivor, GT är glasskivornas tjocklek, LS är luftspaltens tjocklek. Med finns även den fundamentala resonansfrekvensen f_0 beräknad enligt dimensionella mått för mätobjekten A-D

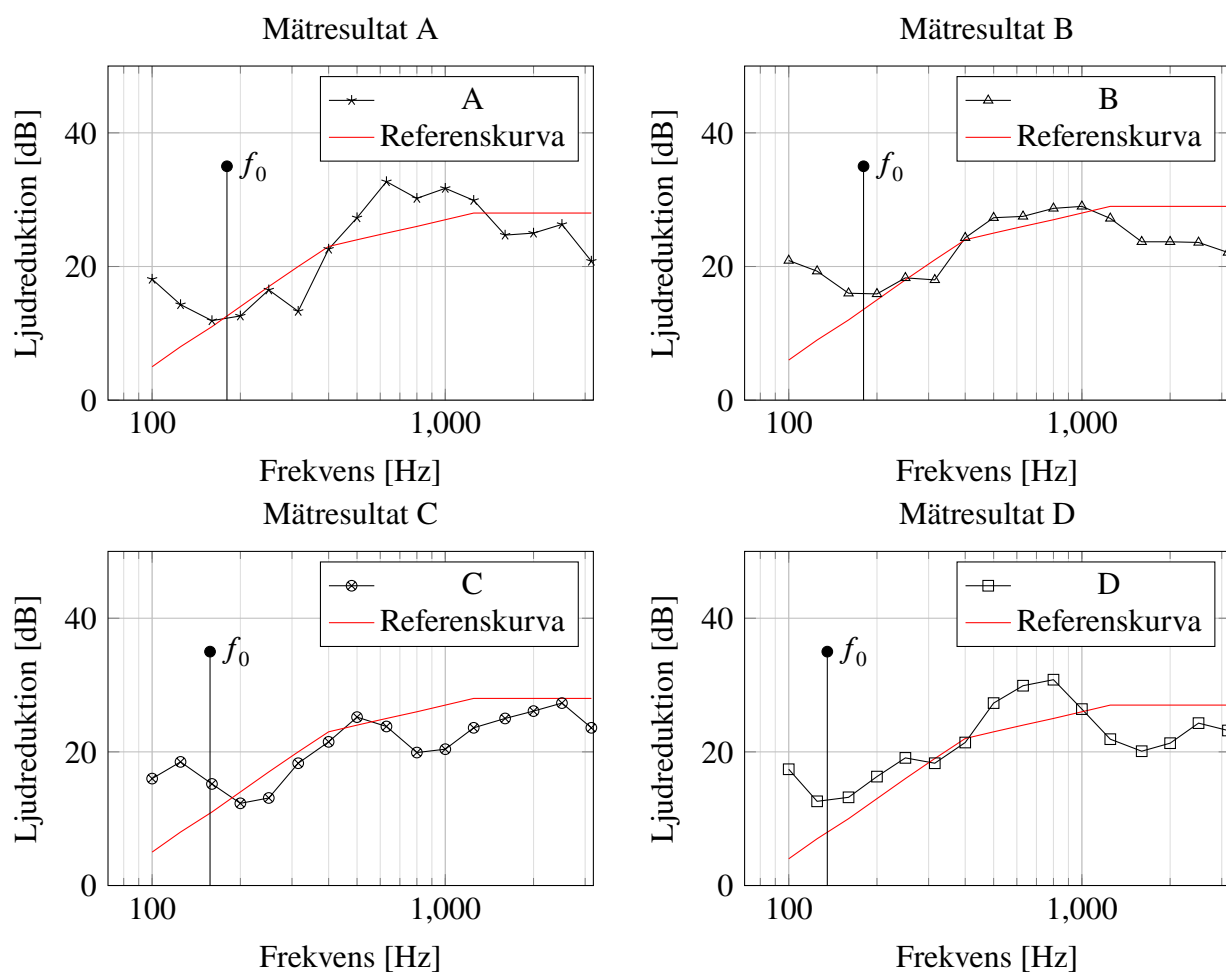
Mätobjekt	Fasadmaterial	V [m ³]	S [m ²]	$GT_{innerruta}$ [mm]	$GT_{ytterruta}$ [mm]	LS [mm]	f_0 [Hz]
A	Sten	69.7	3.5	2	2	44	180
B	Sten	29.2	3.8	2	2	44	180
C	Sten	43.0	1.8	2	3	48	158
D	Tegel	39.8	1.7	3	3	52	135
E	Medelbra trävägg	16.9	1.31	3	3	50	138

I följande tabell finns den resulterade ljudreduktionen för varje mätobjekt och även justering för C och C_{tr} . Framtagandet av ljudreduktionstalen är genomförd enligt ekvation 10 och 11, och justering för olika ljudkällor är gjord enligt referensnivåer i avsnitt 2.2.1.

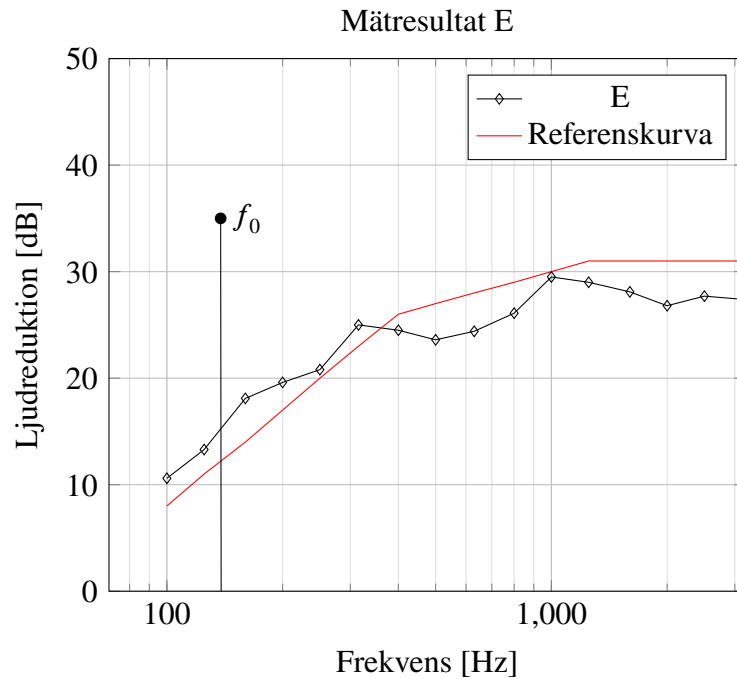
Tabell 4: Ensiffervärden för fönsterisolering för alla mätobjekt A-E, och korrigering efter C och C_{tr} som är beräknat genom anpassning efter referenskurvor för bil- och tågtrafik

Mätobjekt	R'_w [dB]	$R'_w + C$ [dB]	$R'_w + C_{tr}$ [dB]
A	24	23	21
B	25	24	23
C	23	22	20
D	23	22	22
E	27	26	24

Figur 8 och 9 visar ljudreduktionen i tersband för mätning A-E. Inkluderat är även den referenskurva som användes för att ta fram det vägda reduktionstalet R'_w enligt anvisning i avsnitt 2.2.1, och den beräknade resonansfrekvensen f_0 för luftspalterna enligt ekvation 12. Referenskurvan är inte speciellt framtaget att följa ljudreduktionen för tvåglasfönster utan används som en industristandard för att redovisa R'_w -värdet så att det är jämförbart med andra konstruktioner.

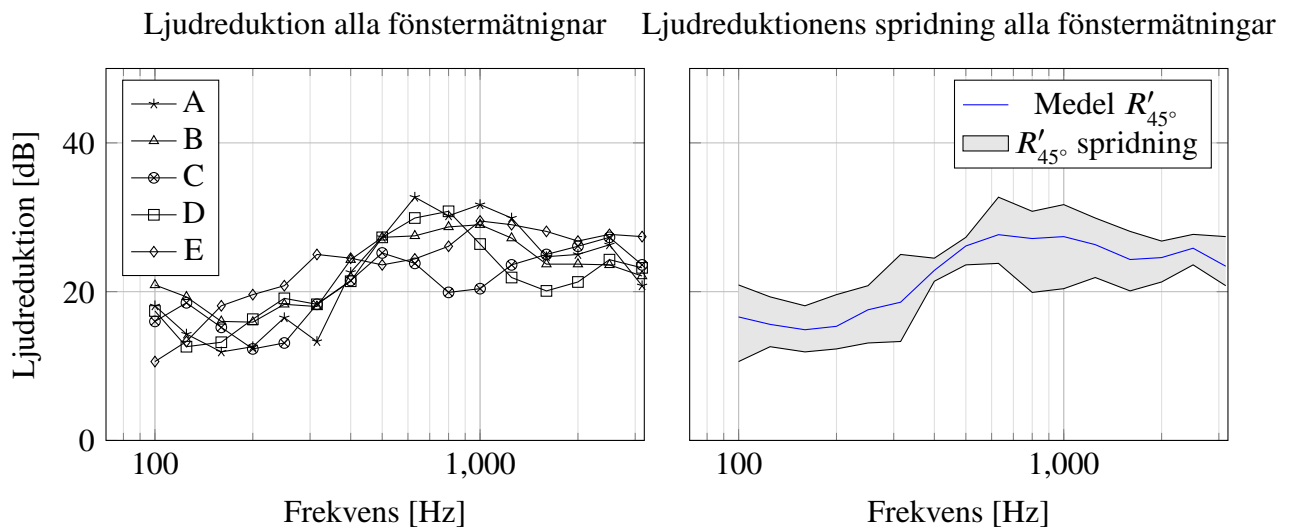


Figur 8: Ljudreduktionen i tersband för mätning A-D tillsammans med den använda referenskurvan för att beräkna det vägda reduktionstalet R'_w , och den beräknade resonansfrekvensen f_0 .



Figur 9: Ljudreduktionen i tersband för mätning E tillsammans med den använda referenskurvan för att beräkna det vägsda reduktionstalet R'_{w} , och den beräknade resonansfrekvensen f_0 .

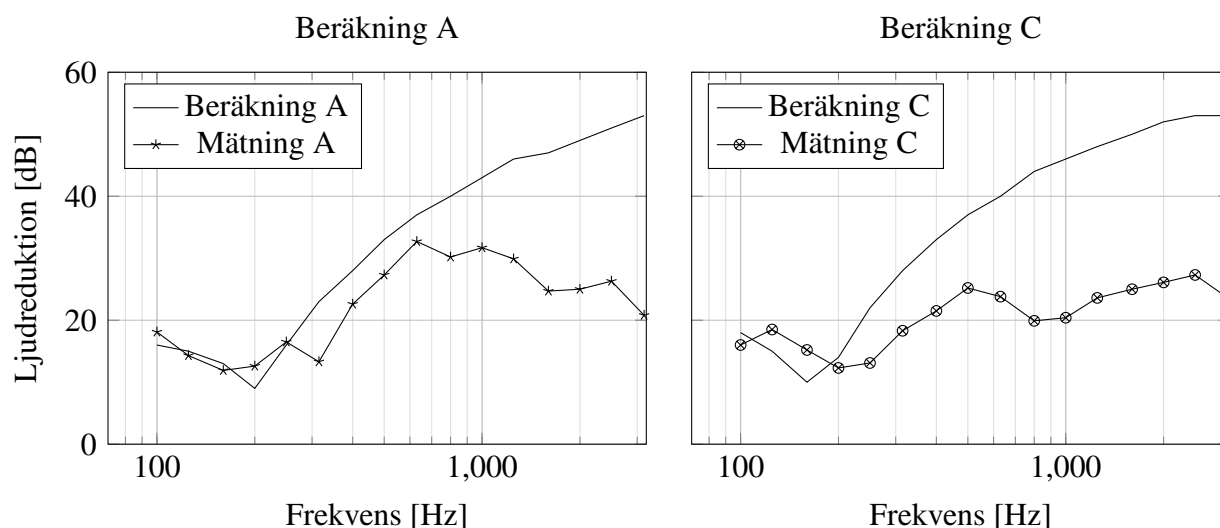
Figur 10 redovisar en helhetsbild över ljudreduktionen för alla mätningar av tvåglasfönster. Det går att se att ljudreduktionen generellt följer samma mönster för alla mätningar. Den största variationen ligger omkring 600-1200 Hz och mätning C har en stor dipp i det intervallet.



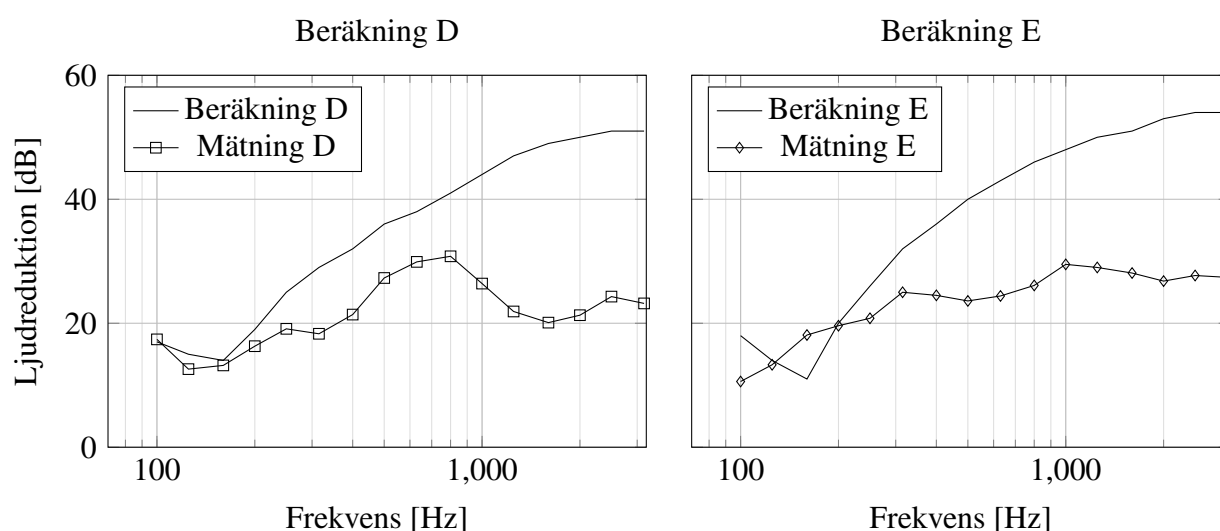
Figur 10: Den vänstra grafen visar ljudreduktionen i tersband för mätning A-E och spridningen av resultaten. Den högra visar spridningen mellan max- och minvärdena och den medelvärdesbildade ljudreduktionen för alla mätningar.

4.2 Teoretiska beräkningar för tvåglasfönster i INSUL

För fyra olika mättillfällen, A, C, D och E, har simuleringar utförts i INSUL. Mättillfället B har uteslutits då dimensionerna för A och B anses vara tillräckligt lika. I Figur 11 och 12 presenteras skillnaderna mellan teoretiskt beräknade ljudreduktionskurvor och de faktiska mätningarna för objekt med samma dimensioner.



Figur 11: Den vänstra grafen visar ljudreduktionen i tersband för mätning A och motsvarande beräkningen i INSUL med samma parametervärden som redovisas i Tabell 3. Den högra visar mätning C och motsvarande beräkningen i INSUL.



Figur 12: Den vänstra grafen visar ljudreduktionen i tersband för mätning D och motsvarande beräkningen i INSUL med samma parametervärden som redovisas i Tabell 3. Den högra visar mätning E och motsvarande beräkningen i INSUL.

Tabell 5 sammanfattar ensiffigvärdena för beräknade resultat av fönsterisoleringen med hjälp av INSUL samt fasadisoleringen för olika mätobjekt, betecknade som Beräkning och Mätning, A, C, D och E.

Tabell 5: Ensiffervärden för de beräknade resultaten för fönsterisoleringen i INSUL och fasadisoleringen för alla mätobjekt A, C, D och E. Med är även korrigering efter C och C_{tr} som är efter anpassning med referenskurvor för bil- och tågtrafik

Mätobjekt	R'_w [dB]	$R'_w + C$ [dB]	$R'_w + C_{tr}$ [dB]
Beräkning A	30	27	22
Mätning A	24	23	21
Beräkning C	34	30	25
Mätning C	23	22	20
Beräkning D	36	33	28
Mätning D	23	22	22
Beräkning E	37	32	27
Mätning E	27	26	24

4.3 Vädringsluckor

Mätningen för vädringsluckan utfördes på ett hus med medelbra trävägg enligt samma metod som för tvåglasfönstren. I det här fallet gjordes en mätning med stängd ventil och sedan en med öppen ventil. Efterklangsmätning gjordes endast en gång och antogs vara samma för den andra mätsekvensen.

Tabell 6: Mätning utfördes med stängd och öppen ventil, V är mottagarrummets volym och $D_{nT,w}$ är ljudnivåskillnaden justerad efter C och C_{tr}

Vädringslucka	Fasadmaterial	V [m ³]	$D_{nT,w} + C$ [dB]	$D_{nT,w} + C_{tr}$ [dB]
Stängd	Medelbra trävägg	16.9	33	31
Öppen	Medelbra trävägg	16.9	14	14

5 Diskussion

I kapitlet nedan diskuteras eventuella begränsningar i metoden, utvärdering av resultaten och generella faktorer som påverkar isolering relaterade till framtagning av schabloner för tvåglasfönster och vädringsluckor. Fortsatt diskuteras den praktiska tillämpning av resultaten, hur resultaten relaterar till hållbar stadsutveckling, och framtida forskning inom ämnet.

5.1 Schabloners noggrannhet

I projekt som har för avsikt att förändra bil- eller järnvägar är det viktigt att schablonerna som ska användas som underlag för åtgärdsbestämmelser återspeglar verkligheten så bra som möjligt. De resultat som presenteras i den här rapporten belyser olika brister i befintliga beräkningsschabloner för både tvåglasfönster och vädringsluckor. De nuvarande schablonerna, som ofta används för att förutspå ljudisoleringen, tenderar att vara otillräckliga när de jämförs med faktiska mätningar. Det framgår av resultaten att tvåglasfönster är ett bredare begrepp än man tidigare har utgått ifrån och innefattar en stor variation av fönsterkonstruktioner och fönsterskick som påverkar ljudisoleringen olika mycket. Gällande vädringsluckor så är det viktigt att ta hänsyn till att de endast fyller sin funktion om de är öppna vilket resultatet visar är då ordentligt mycket ljud transmitterar igenom.

Figur 10 visar att spridningen i dB för ljudisoleringen hos tvåglasfönster enligt mätresultaten varierar mellan 20 dB och 30 dB över 600 Hz, vilket indikerar en variation som inte ingår i schabloner när de redovisas som ensiffervärden. Dessa avvikelser kan resultera i att ljudisoleringen, när de beräknas med schabloner, överskattas i det högre frekvenserna och mer ljud transmitteras än vad som beräknats. För att sätta detta i relation till riktvärden, kan en avvikelse på 10 dB uppfattas som en fördubbling av ljudnivån och hus som ligger nära riktvärden kan förlora rätten till åtgärd när det egentligen är väldigt lägligt, om detta inte tas i beaktande. En felaktig bedömning av ljudisoleringen kan leda till att personer lever i miljöer där riktvärden överskrids, vilket i sin tur kan påverka deras hälsa och välbefinnande. Därför är det relevant att åtminstone öka kunskapen kring skillnader i isoleringskapacitet hos olika fasadelement. Det skulle inte bara gynna infrastrukturprojekt kopplade till Trafikverket genom att säkerställa en samlad förståelse kring riktlinjer för buller utan också gynna samhället genom en förhöjd standard som bidrar till mer hälsosamma livsmiljöer

5.1.1 Tvåglasfönster

För att besvara frågan om hur väl beräkningsschabloner för ljudisoleringsförmågan hos tvåglasfönster stämmer med verkligheten så har fem ljudisoleringsmätningar utförts. Målet har varit att välja fönster som kan representera den naturliga variationen hos tvåglasfönster i Sverige. Tabell 3 visar att det fanns en diskrepans i konstruktionsår, skick, och dimensioner gällande glastjocklek och luftspalt hos fönstren. Mätningarna har utförts enligt standard ISO 1683-3 (Swedish Standards Institute 2016). Mätningarna genomfördes utan några stora avvikelser från standarden, och i Figur 8 - 9 ser vi resultatet av varje mätning där ljudreduktionen är redovisad i tersband.

Utförandet visade att det finns vissa experimentella begränsningar när det gäller att empiriskt fastställa schabloner för ljudisolering, såsom varierande miljövariabler: fönstrens skick och dimensioner. För de låga frekvenserna följer mätresultaten de teoretiska beräkningarna (INSUL),

men över 800 Hz visar mätningarna på betydligt sämre dämpning än vad man förväntar sig. En viktig faktor som bidrar till sämre ljudreduktion vid höga frekvenser är dåligt underhållna tätningslister, eller åldrade fönster som på grund av deras konstruktion inte går att stänga helt; vilket leder till att diskant ljud lättare tränger igenom. Den största variationen som uppmärksammades går att se i Figur 10 där ljudreduktionen i intervallet 600 - 1200 Hz har relativt stor spridning fönstren emellan. Att fånga denna variation i en schablon som skall redovisas som ett ensiffervärde är svår eftersom miljövariablerna för fönstren varierar. Mätningar A-C utfördes på stenhus med fönster från tidigt 1900-tal. Dessa var utrustade med fönsterhasp som visserligen spänner fönstret på plats både på den övre och nedre delen av fönstret, men de kan lätt tappa i effektivitet med tiden. Gällande tätningslisterna så verkade deras kvalitet ha delvis försämrats vid mätning A-D, vilket troligtvis spelar roll i den observerade försämringen hos ljudreduktionen i de högre frekvenserna. Vid mätning E så var tätningslisterna i bättre skick samt att fönstren var de nyaste bland alla mätobjekt, från 1970-tal, vilket rimligen bidrog en mindre flackare kurva (se Figur 8 - 9).

Det observerades också en spridning i de lägre frekvenserna, 100-300 Hz, i vilket intervall den resonans som uppstår i luftspalten återfinns. I Figur 8 - 9 ingår en teoretiskt framtagna resonansfrekvens utpekad som f_0 . Denna är inte en exakt översättning av den resonans som uppstår i verkligheten, men det ger en bra indikation på var resonansen sker. Eftersom resultatet är redovisat i tersband, som är en medelvärdesbildning av ljudreduktionen mellan två frekvenser, så kommer upplösningen inte vara god nog för att se den exakta frekvens då resonans uppstår i luftspalten. Men vi bör se att resonansfrekvensen hamnar ungefär där ljudreduktionen är som lägst eftersom resonans innebär en högre ljudenergi tränger igenom, vilket stämmer överens i figurerna. I och med att resonansen bidrar till en dipp i ljudreduktionen vid olika frekvenser för olika fönster så är det en bidragande faktor till spridningen. Den största avvikelser från resonansfrekvensen finns hos mätning C i Figur 8. Det går troligen att koppla till att fönstrets ram vid mätning C var i sämre skick (se Bilaga 8).

Vidare visar tabell 4 ljudisoleringen som ensiffervärden där det är intressant att lägga märke till spridningen i $R'_w + C$, vilket lägger större vikt vid högfrekvent ljud (se Figur 6). Skillnaden mellan mätresultaten och de schablonvärden som redovisades i Fasadprojektet är påtaglig, framförallt $R'_w + C$. Av resultatet framgår det att det fönster som isolerar sämst har ett $R'_w + C$ på 23 dB, medan det i Fasadprojektet rapporterades om $R'_w + C$ 28 dB (se avsnitt 2.3). Inom ramen för detta projekt så går det inte att med tillräcklig noggrannhet avgränsa en uppdatering av de nuvarande schablonvärdena, eftersom spridningen hos mätningarna är så pass stor. Det går i linje med förväntan som fanns på projektet: att det är svårt att samla alla rörliga parametrar hos en äldre fönstertyp i en schablon. Det som framgår är att det är ljudisoleringen av diskant ljud ($R'_w + C$) som överskattas mest. Det är alltså relevant att vid åtgärdsbestämning av hus som utsätts för mer diskant ljud, från exempelvis tåg eller större bilvägar, utföra en noggrannare bedömning av ljudreduktionen om ljudnivån är nära riktvärden. Detta kan med fördel initieras med en kontroll av tätningslister och ramens skick eftersom dessa bidrar till förbättrad ljudisolering av diskant ljud. Eftersom Trafikverket inte har ansvar för underhåll av privatpersoners fönster, kan det vara en rekommendation från Trafikverket till de vars fönster är i dåligt skick att åtgärda dem så att ljudnivåerna inte överskrider de angivna riktvärdena.

Det är viktigt att ta hänsyn till att osäkerheten och spridningen som visas i och med mätningarna

kan ha direkt påverkan på människors hälsa och välbefinnande. Om ljudisoleringen överskattas kan människor utsättas för högre bullernivåer än vad som är rekommenderat, vilket kan leda till sömnstörningar, stress och andra hälsoproblem (Hänninen et al. 2014). En underskattning av ljudisoleringen kan å andra sidan leda till att onödiga och kostsamma åtgärder vidtas. Enligt riktlinjer från Världshälsoorganisationen (WHO) kan långvarig exponering för buller över 55 dB dagtid och 40 dB nattetid öka risken för hjärt- och kärlsjukdomar (World Health Organization 2018). Därför är det viktigt att schabloner tar hänsyn till spridningen för att säkerställa att bullernivåerna hålls inom säkra gränser och att människor inte utsätts för skadliga ljudnivåer i sina hem.

5.1.2 Teoretiska beräkningar i INSUL

INSUL beräknar ljudreduktionen i olika frekvensområden genom att dela upp frekvensspektrumet i olika intervall och anpassa på dem olika matematiska funktioner för ljudets transmission och reflektion. Beräkningarna som utfördes på fönster inom ramen för detta projekt hade samma dimensioner som de som uppmättes i fält (se tabell 3). Skillnaden mellan verklig ljudreduktion och beräknad är i det här fallet att INSUL endast tar hänsyn till den yta som utgörs av glas. I verkligheten består ju fönster av karm, fogar och drevning, som också kan transmitta ljud.

De teoretiska beräkningarna resulterade i reduktionskurvor som indikerar att tvåglasfönstren bör ha låg ljudreduktion vid låga frekvenser och att ljudreduktionen är bättre för diskant ljud (se Figur 11 och 12). Resonansfrekvensen markerar den frekvens där luftspalten mellan glasrutorna i ett fönster är som mest mottaglig för att vibrera i resonans, vilket kan öka ljud-genomsläppligheten vid just den frekvensen. Denna frekvens går att identifiera tydligt för alla beräkningar genom att se till den dipp som överensstämmer med de resonansfrekvenser som redovisas i tabell 3. Beräkningen av resonansfrekvensen tar endast hänsyn till luftspalten och inkluderar inte andra möjliga resonansfenomen eller förluster associerade med glasrutorna själva.

Resonansfrekvensen agerar som en vändpunkt i beräkningen och efter den stiger ljudreduktionen med ungefär 6dB/oktav. I Figur 11 och 12 ser ljudreduktionen ut att bara bli bättre och bättre för höga frekvenser. Ljudreduktionen uppnår nivåer över 50 dB, vilket är långt ifrån vad mätningarna visade. Gällande resonansfrekvensen går den att identifiera i mätresultaten, men eftersom resultaten är redovisade i tersband går det bara att se på ett ungefär vart resonansen uppstår och inte den exakta frekvensen. Upplösningen för de teoretiska beräkningarna är bättre och därför blir det en tydlig avvikelse i kurvorna där resonansfrekvensen uppstår. Återigen är mätningarna medelvärdesbildande över terser vilket gör det svårt att utpeka den exakta resonansen för luftspalten mellan fönstren.

Den mest insiktsfulla skillnaden mellan mätning och beräkning är den som visar sig i det högre frekvensområdet, över 800 Hz. Man bör ha i åtanke att ljudreduktionen i verkligheten blir lägre än vad som beräknas i INSUL. Denna överskattning av ljudisoleringsförmågan spiller även över på ensiffervärdena $R'_w + C$ och $R'_{w'} + C_{tr}$ som visas i tabell 5. Det är ju ofta dessa som man tar hänsyn till vid bestämmande om åtgärd, och skillnaden uppnår förhållandesvis höga nivåer, framförallt för $R'_w + C$ som lägger större vikt vid höga frekvenser.

5.1.3 Vädringsluckor

Syftet med vädringsluckor är att ventileras, och deras funktion beror på huruvida de är öppna eller ej. Därför finns det ett intresse av att veta hur väl de isolerar mot ljud när de är öppna. Hittills har den indikation som använts för att avgöra hur mycket ljud vädringsluckor släpper igenom troligen varit framtagen efter stängda. För denna mätning utnyttjades ljudnivåskillnaden $D_{nT,w}$ med stängd och öppen ventil för att se ljudnivåskillnaden av stängd och öppen ventil. I tabell 6 kan vi jämföra $D_{n,e,w}$ 32 dB för stängd ventil och mätningen som visade $D_{nT,w}$ 14 dB med öppen ventil. Det är ingen skillnad mellan C och C_{tr} för att ventilen i princip släpper igenom allt ljud när den är öppen, vilket är viktigt att ta hänsyn till när man ska bestämma åtgärd, eftersom de behöver vara öppna för att fylla sin funktion.

5.2 Praktiska tillämpningar

Utifrån de insikter som presenterats ovan föreslås några praktiska tillämpningar och åtgärder som kan adressera bristerna i de befintliga schablonerna. För det första skulle fler mätningar och mer datainsamling gällande variationen hos tvåglasfönster ha gett en ännu bättre förståelse som återspeglar verkliga förhållanden mer noggrant än vad denna studie åstadkom. Men, med den information som har framkommit från mätningar och simuleringar går det att framhäva vikten av att se till tvåglasfönsters skick och ålder vid åtgärdsbestämning om ett hus ligger nära riktvärdet för buller. Fasadprojektet utgör en bra grund för en samlad förståelse kring fasadåtgärder som bullerskydd men kan i vissa avseenden behöva stärkas med mer data.

För det andra skulle utvecklingen av nya och bättre teoretiska modeller vara betydelsefull för att bättre förutsäga ljudisoleringen hos olika typer av fönster och ventiler, och se till hur de påverkas av att vara monterade på fasad under en längre period. Genom att interagera faktorer som material runtom glasrutorna, konstruktionssätt och miljöförhållanden finns en möjlighet att skapa ännu mer precisa beräkningsverktyg.

6 Slutsats

Resultaten visar att det finns vissa begränsningar i de nuvarande schablonerna för tvåglasfönster och vädringsluckor och att de inte nödvändigtvis återspeglar verkligheten tillräckligt väl. Nedan sammanfattas slutsatserna från rapporten i punktform:

1. Begränsande faktorer gällande schabloner för tvåglasfönster: Eftersom det finns en stor variation i fönstertyper och skick, samlas mycket variation i en schablon. Det är därför relevant att undersöka konstruktionsskick och tätningslisters skick för tvåglasfönster vid åtgärdsbedömning då dessa kan påverka ljudisoleringsförmågan hos fönstren.
2. Förslag om att införa schablon för vädringsluckor för att bättre återspegla deras öppna stadiet: resultaten visade att vädringsluckor släpper igenom mycket ljud när de är öppna, vilket är nödvändigt för deras ventilationsfunktion. Därför rekommenderas, baserat på resultaten, att införa en schablon på $D_{nT,w}$ 14 dB för öppna vädringsluckor.
3. Angående de teoretiska beräkningarna av ljudisolering: Det är uppenbart att de modeller som används för att simulera ljudisoleringen av tvåglasfönster tenderar att överskatta deras förmåga att isolera mot diskant ljud. Detta bör tas hänsyn till vid åtgärdsbestämmelse som utgår ifrån endast simuleringar.

Slutligen, med tanke på att denna rapport inte analyserar osäkerheter i de beräknade ljudnivåerna med schabloner, finns det en tydlig möjlighet att vidare utforska detta område för att förbättra noggrannheten och tillförlitligheten hos sådana beräkningar. Framtida forskning inom detta område kan optimera användningen av schabloner eller beräkningsprogram för att säkerställa att de ger korrekta bedömningar av ljudisoleringen i olika sammanhang genom att ta hänsyn till flera variabler. Genom att adressera dessa brister och kontinuerligt arbeta med att förbättra beräkningsmetoderna för ljudisolering kan vi säkerställa att framtida infrastrukturprojekt inte bara uppfyller lagstadgade krav utan också bidrar till en positiv och hållbar utveckling av våra städer.

7 Referenser

- Basner, M. & McGuire, S. (2018). WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review on Environmental Noise and Effects on Sleep. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 15.3. ISSN: 1660-4601. DOI: <https://doi.org/10.1289/ehp.1206154>.
- European Environment Agency (2021). *Buller är ett stort problem, både för människors hälsa och miljön*, s. 8. <https://www.eea.europa.eu/publications/environmental-noise-in-europe>.
- FN (2024). *Agenda 2030 för hållbar utveckling*. <https://www.regeringen.se/regeringens-politik/globala-malen-och-agenda-2030/> [2024-03-18].
- Folkhälsomyndigheten (2014). *Folkhälsomyndighetens almänna råd om buller inomhus*, s. 8. <https://www.folkhalsomyndigheten.se/contentassets/66c03ed04e244b92a9165705ef3ac3c2/fohmfs-2014-13.pdf>.
- Hänninen, O., Knol, A. B., Jantunen, M., Lim, T.-A., Conrad, A., Rappolder, M., Carrer, P., Fanetti, A.-C., Kim, R., Buekers, J., Torfs, R., Iavarone, I., Classen, T., Hornberg, C. & EBoDE Working Group, O. C. M. the (2014). Environmental burden of Disease in Europe: Assessing Nine Risk Factors in Six Countries. *Environmental Health Perspectives* 122. DOI: <https://doi.org/10.1289/ehp.120615>.
- INSUL (2024). *INSUL Tech info*. <https://www.insul.co.nz/tech-info/> [2024-04-19].
- Kleiner, M. (2008). *Audio Technology & Acoustics*. 2. utg. J Ross Publishing.
- Kniffin, K. M., Narayanan, J., Anseel, F., Antonakis, J., Ashford, S. P. & Bakker, A. B. (2020). COVID-19 and the workplace: Implications, Issues, and Insights for Future Research and Action. *American Psychological Association*. DOI: 10.1037/amp0000716.
- Nationalencyklopedin (2024). *Akustik*. <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/akustik> [2024-02-01].
- Nilsson, E., Johansson, A., Brunskog, J., Sjökvist, L. & Holmberg, D. (2005). *Grundläggande Akustik*. 3. utg. John Ericssons väg 1 Lund: Lund Universitet.
- Olofsson, K., Nielsen, K., Pettersson, P., Naglitsch, H. & Fred, R. (2015). *Fasadåtgärder som bullerskydd*. ISBN: 978-91-7725-966-4.
- Prawda, K., Schlecht, S. J. & Välimäki, V. (aug. 2022). Calibrating the Sabine and Eyring formulas. *The Journal of the Acoustical Society of America* 152.2, ss. 1158–1169. ISSN: 0001-4966. DOI: 10.1121/10.0013575. eprint: https://pubs.aip.org/asa/jasa/article-pdf/152/2/1158/16527739/1158_1_online.pdf. <https://doi.org/10.1121/10.0013575>.
- Swedish Standards Institute (2016). *Byggakustik - Fältmätning av ljudisolering i byggnader och hos byggnadselement - Del 3: Fasad ljudisolering, SS-EN ISO 16283-3*.
- Swedish Standards Institute (2020). *Byggakustik - Fältmätning av ljudisolering i byggnader och hos byggnadselement - Del 3: Fasad ljudisolering, SS-EN ISO 717-1*.
- Trafikverket (2024). *Bulleråtgärder längs väg och järnväg*. <https://www.trafikverket.se/resa-och-trafik/underhall/bulleratgarder-langs-vag-och-jarnvag/> [2024-03-18].
- World Health Organization (2018). *Environmental Noise Guidelines for the Europe Region*, s. 150. <https://www.who.int/europe/publications/i/item/9789289053563>.
- Åkerlöf, L. (2001). *Byggnadsakustik*. 1. utg. AB Svensk Byggtjänst: Ingemansson.

8 Bilagor

I Figur 13 - 17 redovisas bilder från alla mättillfällen. Här illustreras utseendet på alla tvåglas-fönster samt mätuppställning vid varje mätning.



(a) Mätning A Fönster.



(b) Mätning A Uppställning.

Figur 13: (a) visar fönstret för mätning A, medan figur (b) visar uppställningen där högtalaren är placerad liggande för att spela ljud upp till andra våningen med en vinkel på 45 grader.



(a) Mätning B fönster.



(b) Mätning B uppställning med högtalare.

Figur 14: (a) visar fönstret för mätning B, medan figur (b) visar uppställningen där högtalaren är placerad liggande för att spela ljud upp till andra våningen med en vinkel på 45 grader.



(a) Mätning C fönster.



(b) Mätning C uppställning med högtalare.

Figur 15: (a) visar fönstret för mätning C, medan figur (b) visar uppställningen där högtalaren är placerad liggande för att spela ljud upp till andra våningen med en vinkel på 45 grader.



(a) Mätning D fönster.



(b) Mätning D uppställning med högtalare.

Figur 16: (a) visar fönstret för mätning D och (b) visar uppställningen där högtalaren är placerad stående med en vinkel på 45° .



(a) Mätning E fönster.



(b) Mätning E uppställning med högtalare.

Figur 17: (a) visar fönstret för mätning E och (b) visar uppställningen där högtalaren är placerad stående med en vinkel på 45° .