



UPPSALA  
UNIVERSITET

UPTEC W 18 025

Examensarbete 30 hp  
Juni 2018

# Undersökning av ny fältmätningssmetod för bullerskyddsskärmar med avseende på ljudabsorption

---

Emelie Roth

## REFERAT

### Undersökning av ny fältmätningmetod för bullerskyddsskärmar med avseende på ljudabsorption

*Emelie Roth*

För att undersöka bullerskyddsskärmars akustiska prestanda med avseende på ljudabsorption mäts idag absorptionen inomhus i laboratorier. Detta är oftast inte lämpligt eftersom bullerskyddsskärmar används utomhus, där ett annat ljudfält råder. Således introducerades en ny mätstandard år 2016 för att kunna undersöka ljudabsorptionen i fält, med benämningen SS-EN 1793-5:2016. Metoden innebär att ljudreflektionen uppmäts, där ljudabsorptionen sedan kan erhållas eftersom de är varandras komplement. Mätmetoden tillämpades på tre bullerskyddsskärmar för att identifiera för- och nackdelar med metoden, analysera skillnader i ljudabsorption mellan olika typer av bullerskyddsskärmar samt för att jämföra ljudabsorptionen mellan fält- och laborationsmätningar. Det sistnämnda eftersom tidigare studier har visat att ljudabsorptionen generellt överskattas vid laborationsmätningar i jämförelse med fältmätningar (CEDR, 2017).

Metoden var praktiskt genomförbar och fördelarna är att mätmetoden är mer representativ än laborationsmätningar för bullerskyddsskärmar där direkt ljudfält råder samt att metoden möjliggör undersökning av ljudabsorptionens förändring över tid. Nackdelar som påvisades var att metoden är tidskrävande, att skärmens ljudisolering även behöver mätas för att få reda på den fullständiga ljudabsorptionen, att det saknas tydliga specifikationer för hur mätdata för bullerskyddsskärmar som är < 4 m höga ska analyseras samt att låga frekvenser blir ogiltiga för skärmar som har en höjd < 4 m.

De tre mätobjekten som undersöktes var en skärm i laminerat härdat glas i närheten av Fridhemsplan i Stockholm, en skärm i sträckmetall beklädd med vegetation intill Lidingövägen i Stockholm samt en skärm i Knivsta som består av sektioner i aluminium respektive akrylglas. Glasskärmen vid Fridhemsplan var generellt mest reflekterande, följt av akrylglassektionen i Knivsta. Aluminiumsektionen i Knivsta och den vegetationsbeklädda metallskärmen vid Lidingövägen var mest absorberande. Skillnaderna mellan skärmarna berodde på att de består av olika material som var olika reflekterande respektive absorberande.

För aluminiumsektionen i Knivsta utfördes en jämförelse mellan ljudabsorptionen som tidigare hade uppmätts i laboratorium och ljudabsorptionen som uppmättes i fält. Sektionen uppvisade mer ljudabsorption vid mätning i laboratorium än vid mätning i fält. Detta ansågs främst bero på att ljudfälten skiljer sig mellan laboratorium och fält.

Nyckelord: Buller, bullerskyddsskärmar, ljudabsorption, ljudreflektion, EN 1793-5

*Institutionen för geovetenskaper, Luft- vatten och landskapslära, Uppsala universitet, Villavägen 16, SE-75236 Uppsala, Sverige. ISSN 1401-5765.*

## **ABSTRACT**

### **Evaluation of a new method for determining the sound absorption of noise barriers in situ**

*Emelie Roth*

The sound absorption of a noise barrier is one parameter that can be measured to determine the acoustic performance of the barrier. Usually the sound absorption is tested indoors in laboratories but this method is not ideal since the sound field in the laboratory is different from the sound field outdoors. Therefore, a new method has been introduced, where the sound absorption can be obtained by measuring the sound reflection of the noise barrier in situ. The method is described in the European standard EN 1793-5, which was implemented on three different noise barriers in Sweden. The main purpose was to identify advantages and disadvantages with the standard, analyze differences in sound absorption between different types of barriers, and to compare laboratory results with the ones obtained in situ. Previous research has showed that the laboratory method is overestimating the sound absorption compared to the method in situ, and more studies are needed to investigate this further (CEDR, 2017).

Advantages with the method were that the method is more representative than laboratory measurements for direct sound fields, and that the long term performance for the sound absorption can be checked. Disadvantages with the method were that the method is time consuming, that the sound insulation of the barrier also needs to be measured to get the final sound absorption, that the instructions does not include clear details about how to handle the measured data for noise barriers that have heights less than 4 m, and that barriers with heights less than 4 m gets unvalid values in low frequencies.

The studied noise barriers were a barrier made of glass close to Fridhemsplan in Stockholm, a barrier made of metal and vegetation next to the road Lidingövägen in Stockholm, and a barrier close to the railway station in Knivsta with elements that consisted of both aluminium and acrylic. The barrier made of glass at Fridhemsplan was most reflective, followed by the acrylic element in Knivsta. The barrier made of metal and vegetation next to Lidingövägen and the element of aluminium in Knivsta was most absorptive. The main reason for the differences between the barriers was that they were made of different materials that had different sound absorptive and sound reflective properties.

Sound absorption data measured by a company on behalf of the manufacturer were available for the element made of aluminium in Knivsta. The comparison between this data and the data that were measured in situ showed higher sound absorption obtained in the laboratory than in situ. The main reason for this was that the sound fields are different.

Key words: Noise pollution, noise barriers, sound absorption, sound reflection, EN 1793-5

*Department of Earth Sciences, Program for Air, Water and Landscape Science, Uppsala university, Villavägen 16, SE-75236 Uppsala, Sweden. ISSN 1401-5765.*

## FÖRORD

Detta examensarbete avslutar fem års studier på civilingenjörsprogrammet i miljö- och vattenteknik vid Uppsala universitet och Sveriges lantbruksuniversitet. Arbetet har utförts hos Structor Akustik i Stockholm där Kristoffer Fristedt har varit handledare. Ämnesgranskare har varit Johan Arnqvist på Institutionen för geovetenskaper vid Uppsala universitet.

Jag vill rikta ett stort tack till min handledare Kristoffer och min ämnesgranskare Johan som har hjälpt mig att kunna utföra detta arbete. Jag vill även tacka Monica Waaranperä som är bullerspecialist på Trafikverket för att du ställde upp på en telefonintervju som gav mig värdefulla kunskaper om mätstandardens användning idag. Dessutom vill jag tacka Johan Sjölander på Stockholms sjukhem, Janne Sundberg på Knivsta kommun och Sven-Erik Norin på JVAB för att ni hjälpte oss att kunna utföra mätningarna. Ett tack riktas även till ATA som bidrog med laborationsmätningar samt till Andrea Sjöberg, som tidigare var examensarbetare hos Structor Akustik, för att ditt arbete underlättade mitt. Jag vill även tacka min sambo Lukas för att han hjälpte till att skapa figurer i Adobe Illustrator. Störst tack vill jag rikta till medarbetare Stefan Dimitrijevic på Structor Akustik som varit delaktig vid alla mätningar, utan din insats hade examensarbetet inte varit möjligt.

I would also like to thank Massimo Garai, Andreas Fuchs, and Jean-Pierre Clairbois for answering questions about the standard. Your help contributed a lot to my understanding regarding the meaning of the subtraction technique, the placement and width of the Adrienne-windows, and the reason for the interest in correlation formulas.

Slutligen vill jag även rikta ett tack till alla kollegor på Structor Akustik som fick mig att känna mig välkommen att vara en del i team:et. Jag ser framemot att bli det på riktigt i höst.

Emelie Roth  
Uppsala, 2018

Copyright © Emelie Roth, Institutionen för geovetenskaper, Luft- vatten- och landskapslära, Uppsala universitet  
UPTEC W 18 025, ISSN 1401-5765  
Digitalt publicerad vid Institutionen för geovetenskaper, Uppsala Universitet,  
Uppsala 2018.

## POPULÄRVETENSKAPLIG SAMMANFATTNING

Bullerskyddsskärmar är benämningen för det som i folkmun kallas för bullerplank. En bullerskyddsskärm placeras intill trafikerade vägar och järnvägar för att förhindra att det oönskade ljudet som trafiken ger upphov till sprids i samhället. Önskat ljud är således definitionen för buller. Hur bra en bullerskyddsskärm reducerar buller kan bland annat undersökas genom att mäta dess ljudreflektion eller ljudabsorption. Ljudreflektion är det ljud som reflekteras mot skärmen, det vill säga det ljud som studsar tillbaka mot trafiken där ljudet ursprungligen kom ifrån, eftersom bullerskyddsskärmen fungerar som ett hinder för ljudet. Ljudabsorption är i sin tur det ljud som absorberas när det träffar skärmen, det vill säga det ljud som upphör på grund av att ljudet möter skärmen. Genom att mäta en bullerskyddsskärms ljudreflektion kan ljudabsorptionen fås fram och vice versa. Det ska dock tilläggas att vid mätning av ljudabsorptionen hos bullerskyddsskärmar så inkluderas även det ljud som går igenom skärmen, vilket kallas för ljudtransmission. För att få reda på hur mycket ljud som tar sig igenom skärmen behöver även skärmens ljudisolering mätas. Detta innebär att en skärm som har uppmätts ha hög ljudabsorption inte behöver vara så absorberande som den verkar, eftersom även ljudet som kan ta sig igenom skärmen inkluderas.

För att undersöka ljudabsorptionen hos bullerskyddsskärmar idag mäter testcenter skärmarnas ljudabsorption inomhus i laboratorier, vilket utförs enligt instruktioner i en standard. Men nu har en ny standard framtagits som innebär att ljudabsorptionen kan erhållas genom att mäta ljudreflektionen utomhus i fält. Denna metod anses vara mer representativ att använda sig av eftersom verkliga förhållanden råder i fält. Inom en snar framtid förväntas även fältmätningmetoden att bli den standard som måste följas för att undersöka bullerskyddsskärmars ljudabsorption. Syftet med projektet var att testa denna nya mätmetod, identifiera för- och nackdelar med metoden, jämföra ljudabsorptionen mellan olika typer av bullerskyddsskärmar samt jämföra ljudabsorptionen mellan fält- och laborationsmätningar.

Bullerskyddsskärmar består av element som är förankrade till varandra genom pelare. Elementen kan bestå av olika material, där element i metall, trä eller glas är vanliga. I projektet undersöktes tre olika bullerskyddsskärmar där mätning av ljudreflektionen utfördes framför ett eller flera element hos skärmen. Den första bullerskyddsskärmen som undersöktes var placerad intill en bilväg vid Fridhemsplan i Stockholm och bestod av element i glas. Den andra skärmen var placerad intill Lidingövägen i Stockholm där elementen bestod av metall som var fyllda med vegetation. Den tredje skärmen hade både element i akrylglas och element i aluminium och var placerad intill järnvägen i Knivsta. Glasskärmen vid Fridhemsplan var mest reflekterande, följt av glaselementet i Knivsta. Mest absorberande var metallskärmen med vegetation vid Lidingövägen och därefter elementet i aluminium i Knivsta. Tidigare ljudisoleringmätningar visade dock att mer ljud tog sig igenom skärmen vid Lidingövägen än vad det gjorde för elementet i aluminium i Knivsta, vilket innebar att den bättre absorptionen som uppvisades för skärmen vid Lidingövägen troligen innebar att mer ljud tog sig igenom skärmen. Detta visar att det är viktigt att mäta både ljudabsorptionen och ljudisoleringen för att undersöka bullerskyddsskärmars förmåga att reducera ljud. Skillnaderna i ljudreflektion och ljudabsorption hos bullerskyddsskärmarna berodde på materialskillnaderna mellan

skärmarna där materialen var olika reflekterande respektive absorberande.

Ljudabsorptionen för de element som bestod av aluminium för bullerskyddsskärmen i Knivsta hade tidigare mätts i laboratorium av ett företag på uppdrag av tillverkaren av skärmen. Dessa laborationsvärden för ljudabsorptionen jämfördes med resultaten för ljudabsorptionen som uppmättes i fält. Laborationsmätningarna för ljudabsorptionen visade mer ljudabsorption än vid jämförelse med fältmätningarna. Detta ansågs framförallt bero på att det är skilda förhållanden mellan laboratorium och fält, eftersom mätningar i laboratorier innebär att ljudabsorptionen mäts inomhus där det finns väggar som ljudet kan reflekteras mot, vilket inte finns utomhus.

Fördelarna med metoden är att mätningarna i fält bättre representerar verkligheten samt att metoden innebär att det går att undersöka ljudabsorptionen hos skärmen efter en längre tid. Detta innebär till exempel att det går att få reda på om ljudabsorptionen har förändrats hos skärmen flera år efter att den har utplacerats. Nackdelar med metoden var att det tar lång tid att utvärdera den mätdata som samlas in, att skärmens ljudisolering också behöver mätas för att få reda på den fullständiga ljudabsorptionen, att det endast finns lite information kring hur mätdata för bullerskyddsskärmar som är mindre än 4 m höga ska analyseras samt att låga frekvenser blir ogiltiga för bullerskyddsskärmar som har en höjd mindre än 4 m.

## ORDLISTA

Mätstandard SS-EN 1793-5:2016 är källa till nedanstående definitioner om inget annat anges (Swedish Standards Institute, 2016).

<b>Adrienne-fönster</b>	<i>Eng.: Adrienne temporal window.</i> Ett tidsfönster som behövs för att filtrera signalerna. Tidsfönstret har en förutbestämd form.
$\alpha$	Absorptionskoefficient som uppmäts enligt EN 1793-1. Antar värden mellan 0 och 1, där 1 innebär full ljudabsorption och 0 innebär full ljudreflektion [-]. Dock innefattas även ljudtransmission i denna koefficient (Fuchs & Möser, 2013). Därmed behöver även skärmens ljudisolering undersökas (det ljud som tar sig igenom skärmen) för att få reda på den fullständiga ljudabsorptionen.
<b>Bullerskydds-skärm</b>	Fungerar bullerreducerande genom att vara ett hinder mellan mottagare och källa. Ingår i benämningen <i>Noise Reducing Device (NRD)</i> , vilket är ett samlingsnamn för bullerreducerande anordningar som placeras intill vägar och järnvägar för att minska trafikbuller (CEDR, 2014). Benämns även som enbart <i>skärm</i> i rapporten.
<b>CEN</b>	<i>Comité Européen de Normalisation - European Committee for Standardization.</i> En europeisk organisation som arbetar med standardisering.
<b>CEN-TC 226/WG6</b>	<i>Technical Committee 226 Road Equipment/Working Group 6 Anti Noise Devices.</i> En teknisk kommitté inom CEN som har framtagit standarderna i EN 1793-serien.
$C_{dir,k}(\Delta f_j)$	Korrektionsfaktor för ljudkällans riktning vid mikrofon $k$ ( $k = 1, \dots, 9$ ) [-].
$d_k$	Ljudbanelängdsskillnad [m] mellan den högsta amplituden hos det direkta ljudet och den högsta amplituden hos det reflekterade ljudet, för signalen som uppmäts framför bullerskyddsskärmen, där $k$ är mikrofonnumret ( $k=1, \dots, 9$ ). Kan beräknas om till tidsfördröjning genom användning av ljudets hastighet $c$ .
$d_{k,5}$	Ljudbanelängdsskillnad [m] mellan den högsta amplituden hos det direkta ljudet för mikrofon nummer 5 och den högsta amplituden hos det direkta ljudet för mikrofon $k$ (där $k = 1, \dots, 9$ , $k \neq 5$ ). Kan beräknas om till tidsfördröjning genom användning av ljudets hastighet $c$ .

<b>Diffust ljudfält</b>	När det reflekterade ljudet dominerar över det direkta ljudet, det vill säga det ljud som reflekteras mot ytor dominerar över det direkta ljud som skickas ut av sändaren (Wallin m.fl., 2010). Benämns även efterklangsfält (Andersson, 1998).
<b>Direkt ljudfält</b>	När det infallande direkta ljudet som skickas ut av en sändare dominerar över det reflekterade (Wallin m.fl., 2010).
$DL_{\alpha}$	<i>Eng.: Single-number rating of sound absorption.</i> Sammanvägt värde [dB] för en bullerskyddsskärm för att kunna kvalificera den med avseende på ljudabsorption/ljudreflektion. Går mellan 0-20 dB där 0 dB innebär full ljudreflektion och 20 dB full ljudabsorption (Garai & Guidorzi, 2008). Beräknas genom $\alpha$ .
$DL_{RI}$	<i>Eng.: Single-number rating of sound reflection.</i> Sammanvägt värde [dB] för en bullerskyddsskärm för att kunna kvalificera den med avseende på ljudreflektion/ljudabsorption. Går mellan 0-20 dB där 0 dB innebär full ljudreflektion och 20 dB full ljudabsorption (Garai & Guidorzi, 2008). Beräknas genom $RI$ .
<b>Efterklangstid</b>	Den tid det tar för ett ljud som har avbrutits att upphöra helt, på grund av att reflektioner finns kvar (Andersson, 1998).
<b>Element</b>	En bullerskyddsskärm består av ett flertal element, som är sammansatta till varandra och marken genom pelare.
<b>EN</b>	Europeisk standard.
<b>EN 1793-serien</b>	En mätserie som innehåller 6 olika europeiska standarder för mätning av ljudabsorption/ljudreflektion, ljudisolering och diffraktion i diffust respektive direkt ljudfält.
<b>Impulssvar</b>	En utsignal från ett system där insignalen är en Dirac-funktion, vilket är en matematisk idealisering av en signal som är mycket kort i tiden.
<b>Interferens</b>	Interferens mellan ljudvågor innebär att ljudvågor överlagras och antingen dämpar eller förstärker varandra (NE, u.å.a).
<b>Ljudabsorption</b>	Ljudvågor kan absorberas när de möter en yta, vilket innebär att ljudenergin gradvis överförs till värme som dämpar ljudet (NE, u.å.b). Vid mätning av ljudabsorptionen hos bullerskyddsskärmar ingår dock även ljudtransmissionen i den uppmätta absorptionskoefficienten (se förklaring vid $\alpha$ ).



<b>Ljudreflektion</b>	När ljudvågor möter en yta kan de infallande ljudvågorna reflekteras mot ytan, vilket innebär att ljudvågorna ändrar sina riktningar och sprids.
<b>NRD</b>	<i>Eng.: Noise Reducing Device.</i> En bullerreducerande anordning som placeras intill vägar och järnvägar för att minska trafikbuller. Bullerskyddsskärmar ingår i denna benämning (CEDR, 2014).
<b>Pelare</b>	Håller ihop bullerskyddsskärmars element.
<b>Resonans</b>	Återljud som skapas på grund av att något som oscillerar eller vibrerar ger upphov till att något annat börjar svänga i takt med det förstnämnda (NE, u.å.c).
<b>RI</b>	Reflektionsindex som uppmäts enligt EN 1793-5. Antar värden mellan 0 och 1, där 1 innebär full ljudreflektion och 0 dB full ljudabsorption [-].
<b><math>R_{sub}</math></b>	Reduktionsfaktor [dB] som beskriver subtraktionsteknikens effektivitet. Behöver vara >10 dB för att subtraktionen ska kunna betraktas som tillräcklig.
<b>Signal-brusförhållande</b>	<i>Eng.: Signal-to-noise ratio.</i> Beskriver förhållandet mellan signalens styrka och bakgrundsljudets styrka (Oxford University Press, 2016).
<b>SS</b>	Svensk standard.
<b>SS-EN</b>	Svensk standard som består av den europeiska originalstandard. Således är den svenska standarden författad på engelska.
<b>Stående vågor</b>	Stående vågor är ljudvågor som består av noder och bukar som inte förflyttar sig längs med tidsaxeln, där partikelhastigheten hos ljudet är 0 vid noder och maximal vid bukar. Stående vågor uppstår vid frekvenser då infallande och reflekterande ljudvågor interfererar (Wallin m.fl., 2010).
<b>Subtraktions-teknik</b>	Utförs för att identifiera utseendet hos den direkta ljudkomponenten. Innebär att signalen som mäts i frifält subtraheras från signalen som mäts framför bullerskyddsskärmen. Detta leder till att enbart reflektionen mot bullerskyddsskärmen återstår och det direkta ljudet elimineras.
<b>Tersband</b>	En tredjedels oktavband. En vanlig uppdelning av frekvensskalan (Andersson, 1998).

# Innehållsförteckning

<b>Referat</b>	<b>I</b>
<b>Abstract</b>	<b>II</b>
<b>Förord</b>	<b>III</b>
<b>Populärvetenskaplig sammanfattning</b>	<b>IV</b>
<b>Ordlista</b>	<b>VI</b>
<b>1 Inledning</b>	<b>1</b>
1.1 Syfte . . . . .	1
<b>2 Teori</b>	<b>2</b>
2.1 Ljudutbredning . . . . .	2
2.1.1 Omgivningsbuller . . . . .	4
2.1.2 Meteorologisk inverkan . . . . .	5
2.1.3 Ljudabsorption och ljudreflektion . . . . .	6
2.1.4 Bullerskyddsskärmar . . . . .	7
2.2 Mätstandard SS-EN 1793-5:2016 . . . . .	9
2.2.1 Mätstandardens användning idag . . . . .	10
2.2.2 Generell princip . . . . .	11
2.2.3 Jämförelse mellan fältmätningar och laborationsmätningar . . . . .	13
2.2.4 Matematiska definitioner för ljudabsorption och ljudreflektion . . . . .	14
<b>3 Metod</b>	<b>18</b>
3.1 Mätutrustning . . . . .	18
3.2 Mätprocedur enligt mätstandard SS-EN 1793-5:2016 . . . . .	19
3.2.1 Avvikelser från mätstandard . . . . .	20
3.3 Mätobjekt . . . . .	21
3.3.1 Bullerskyddsskärm intill Drottningholmsvägen vid Fridhemsplan . . . . .	21
3.3.2 Bullerskyddsskärm intill Lidingövägen vid Östermalms IP . . . . .	23
3.3.3 Bullerskyddsskärm i närheten av järnvägsstationen i Knivsta . . . . .	25
3.3.4 Laborationsdata för ljudabsorption . . . . .	26
3.4 Bearbetning av mätdata genom signalanalys . . . . .	27
3.4.1 Bearbetning i EASERA . . . . .	27
3.4.2 Bearbetning i MATLAB . . . . .	28
3.4.3 Bearbetning i Microsoft Excel . . . . .	33
3.4.4 Begränsning för låga frekvenser . . . . .	33
3.4.5 Beräkningar . . . . .	33
<b>4 Resultat</b>	<b>42</b>
4.1 Reflektionsindex och sammanvägda värden . . . . .	42
4.1.1 Jämförelse av sammanvägda värden med olika spektrum . . . . .	43
4.2 Jämförelse mellan fält- och laborationsmätningar . . . . .	44
4.3 Signal-brusförhållande . . . . .	45

<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>47</b>
5.1	Jämförelse mellan fältmätningar för olika typer av bullerskyddsskärmar . . .	47
5.1.1	Signal-brusförhållande . . . . .	49
5.1.2	Beräknade värden och jämförelse med och utan $C_{dir,k}(\Delta f_j)$ . . .	49
5.2	Jämförelse av exciteringssignal . . . . .	50
5.3	Jämförelse av $DL_{RI}$ mellan olika spektrum . . . . .	50
5.4	Jämförelse mellan fält- och laborationsmätningar . . . . .	51
5.5	Felkällor . . . . .	52
5.6	Fördelar och nackdelar med mätmetoden . . . . .	53
<b>6</b>	<b>Slutsatser</b>	<b>55</b>
<b>7</b>	<b>Referenser</b>	<b>56</b>
	<b>Appendix A - Beräknade värden för <math>R_{sub}</math>, <math>d_{k,5}</math> &amp; <math>C_{dir,k}(\Delta f_j)</math></b>	<b>61</b>
	<b>Appendix B - <math>RI</math> och <math>DL_{RI}</math> med och utan <math>C_{dir,k}(\Delta f_j)</math></b>	<b>63</b>
	<b>Appendix C - Jämförelse av exciteringssignal</b>	<b>65</b>
	<b>Appendix D - Enskilda <math>RI</math>-värden</b>	<b>66</b>
	<b>Appendix E - Mätutrustning: fotografier och specifikationer</b>	<b>72</b>

# 1 INLEDNING

Buller definieras som ett icke önskvärt ljud och är ett av de största miljöproblemen i dagens samhälle (Andersson, 1998). Långvarig exponering av buller kan leda till ett flertal olika hälsoproblem, bland annat stress, sömnsvårigheter, tinnitus samt hjärt- och kärlsjukdomar (Murphy & King, 2014). En vanligt förekommande metod för att reducera buller i samhället är användning av bullerskyddsskärmar intill vägar och spårbunden trafik. I många fall vid framtagning av bullerskyddsskärmar utförs laborationstester för att undersöka skärmarnas förmåga att reducera ljud, men oftast undersöks inte de akustiska egenskaperna när skärmarna väl har placerats i fält. För att kunna säkerhetsställa att ljudreduceringen fungerar som tidigare undersökt samt för att få reda på hur de akustiska egenskaperna hos skärmarna förändras med tiden är det viktigt att kunna utföra mätningar i fält. Detta både direkt efter utplacering av skärmarna samt ett par år senare (CEDR, 2017). Dessutom återspeglar laborationsförhållandena oftast inte verkligheten, vilket innebär att det finns ett behov av att kunna utföra mätningar direkt i fält (Clarbois m.fl., 2010). För tillfället utförs oftast inga mätningar i fält för att kontrollera bullerskyddsskärmars akustiska produkttegenskaper, men det kommer att bli vanligare i framtiden. Detta eftersom det nu finns nya fältmätningmetoder för bullerskyddsskärmar, där ljudisolering, ljudreflektion och diffraktion kan uppmätas (Swedish Standards Institute, 2016).

## 1.1 SYFTE

Syftet med detta examensarbete är att praktiskt undersöka en ny fältmätningmetod för bullerskyddsskärmar med avseende på ljudreflektion (SS-EN 1793-5:2016), för att kunna analysera ljudabsorptionen hos skärmarna. När mätningar utförs i fält mäts ljudreflektionen istället för ljudabsorptionen eftersom det är mycket lämpligare (Garai, 1993). Resultat från tidigare mätningar enligt denna metod har visat att laborationsmätningar generellt överskattar ljudabsorptionen i jämförelse med fältmätningar och således är det intressant att analysera vad detta kan bero på. Fältmätningmetoden förväntas även inom en snar framtid att vara den standard som måste tillämpas för att mäta ljudabsorptionen hos bullerskyddsskärmar där direkt ljudfält råder, som oftast är fallet utomhus, vilket indikerar vikten av att utvärdera denna mätmetod (CEDR, 2017). Projektet kommer att utgå ifrån följande frågeställningar:

- Är den nya mätmetoden för bullerskyddsskärmar med avseende på ljudreflektion (SS-EN 1793-5:2016) praktiskt genomförbar? Vilka fördelar respektive nackdelar finns?
- Hur skiljer sig ljudabsorptionen som uppmätts genom användning av den nya fältmätningmetoden mellan olika typer av bullerskyddsskärmar? Vad kan vara orsaker till skillnader?
- Hur väl stämmer uppmätta värden för ljudabsorption från fältmätningar och laborationsförsök överens? Vad kan avvikelser bero på?

## 2 TEORI

### 2.1 LJUDUTBREDNING

Ljud är mekaniska elastiska vågor som genereras från en ljudkälla. Vågorna är tryckvariationer och kallas för ljudvågor. Sträckan som en ljudvåg rör sig under en komplett vågrörelse har benämningen våglängd  $\lambda$  [m] och bestäms av ljudets utbredningshastighet  $c$  [m/s] dividerat med frekvensen  $f$  [Hz] (Andersson, 1998, Wallin m.fl., 2010). Ljudets utbredningshastighet i luft kan beräknas enligt

$$c = 20,05\sqrt{(1 + 0,61q)T} \quad (1)$$

där  $c$  är ljudets hastighet vid den givna temperaturen i m/s,  $q$  den specifika fuktigheten i g/kg och  $T$  temperaturen i K. Ljudhastigheten är snabbare i fuktig luft än i torr, vilket dock bara får en inverkan vid höga temperaturer. Exempel på ljudhastighetens variation mellan olika temperaturer samt mellan torr och fuktig luft visas i tabell 1 (Larsson, 1990).

**Tabell 1:** Ljudets hastighet vid olika temperaturer för torr respektive fuktig luft.  $q_{max}$  är den specifika fuktigheten när vattenångan i luften når mättnad.  $q_{max}$  är 0 för  $c_{torr}$  medan den anges i parentes efter  $c_{fukt}$  (Larsson, 1990).

Temperatur	$c_{torr}$ [m/s]	$c_{fukt}$ [m/s] ( $q_{max}$ [g/kg])
30	349,1	352,0 (27,6)
20	343,3	344,8 (14,9)
10	337,4	338,2 (7,70)
0	331,4	331,8 (3,80)
-10	325,2	325,4 (1,80)
-20	319,0	319,1 (0,800)
-30	312,6	312,7 (0,300)

En människa kan generellt höra ljud mellan frekvenserna 20-20 000 Hz (Murphy & King, 2014). Frekvenser under 20 Hz kallas för infraljud och frekvenser över 20 000 Hz kallas för ultraljud. Olika ljudkällor har olika frekvensfördelning, där vissa typer är mer lågfrekventa och vissa är mer högfrekventa. Ljudvågors frekvensfördelning kan visas grafiskt genom ett frekvensspektrum, som visar vågornas amplitud vid respektive frekvens. För att kunna studera frekvenser måste först en omvandling från tidsdomänen till frekvensdomänen ske, genom användning av Fourieranalys. Detta eftersom ljudvågor endast kan uppmätas i tidsdomänen. Vid frekvensanalysen används olika metoder för att kunna studera signalens utbredning längs frekvensaxeln, där *Fast Fourier Transform* och digital filtrering är de vanligaste metoderna. De olika filtren som används är lågpassfilter, högpassfilter, bandpassfilter samt bandstoppfilter där namnen indikerar vilken effekt de har på frekvensspektrumet hos signalen. Exempelvis släpper ett lågpassfilter igenom låga frekvenser och dämpar de högre (Wallin m.fl., 2010). För att enkelt visa hela frekvensskalan delas frekvenserna in i så kallade oktavband, vilket innebär att frekvenserna grupperas. Vanligtvis används 1/3-oktavband där varje oktav innehåller tre band vilket ger möjlighet till en detaljrik analys (Murphy & King, 2014). De tre banden består av en undre frekvensgräns, en mittfrekvens samt en övre

frekvensgräns. Den övre frekvensgränsen dividerat med den undre frekvensgränsen är  $\sqrt[3]{2}/1$ . En annan benämning för 1/3-oktavband är tersband (Andersson, 1998). Tersbanden benämns efter dess mittfrekvenser och uppdelningen av dessa visas i tabell 2 (Murphy & King, 2014).

**Tabell 2:** Uppdelningen av tersband som består av undre frekvensgräns, mittfrekvens samt övre frekvensgräns. Tersbanden benämns efter mittfrekvenserna (Murphy & King, 2014).

Undre frekvensgräns [Hz]	Mittfrekvens [Hz]	Övre frekvensgräns [Hz]
44,7	50	56,2
56,2	63	70,8
70,8	80	89,1
89,1	100	112
112	125	141
121	160	178
178	200	224
224	250	282
282	315	355
355	400	447
447	500	562
562	630	708
708	800	891
891	1000	1122
1122	1250	1413
1413	1600	1778
1778	2000	2239
2239	2500	2818
2818	3150	3548
3548	4000	4467
4467	5000	5623
5623	6300	7079
7079	8000	8913
8913	10 000	11 220
11 220	12 500	14 130
14 130	16 000	17 780
17 780	20 000	22 390

Ljud uttrycks vanligen genom ljudtryck, ljudeffekt och/eller ljudintensitet. Eftersom alla dessa storheter varierar inom ett stort intervall uttrycks vanligen ljudnivåer genom decibelskalan, vilket är en logaritmisk skala. Generellt definieras decibelskalan som

$$10 \cdot \log_{10} \frac{X}{X_0} \quad (2)$$

där  $X$  är den mätta storheten och  $X_0$  är ett referensvärde som har samma enhet som den mätta storheten. I internationell standard inom akustiken definieras referensvärdena för ljudtryck, ljudeffekt och ljudintensitet till  $20\mu$  Pa, 1 pW respektive 1 pW/m<sup>2</sup>. Det logaritmerade förhållandet mellan  $X$  och  $X_0$  som nämnt ovan (ekvation 2) benämns

ljudtrycksnivå ( $L_p$ ) för ljudtryck, ljudeffektnivå ( $L_w$ ) för ljudeffekt samt ljudintensitetsnivå ( $L_I$ ) för ljudintensitet. Både  $L_p$ ,  $L_w$  och  $L_I$  anges i decibel [dB], där en parentes tilläggs efter dB för att visa vilken storhet som avses (Andersson, 1998). Vid addering av flera ljudkällor kan inte decibelnivåerna adderas direkt, utan de behöver beräknas logaritmiskt enligt

$$L_{TOT} = 10 \cdot \lg \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}} \quad (3)$$

där  $L_{TOT}$  är den totala ljudtrycksnivån i dB,  $L_i$  är ljudtrycksnivån från ljudkälla  $i$  i dB och  $n$  är antalet ljudkällor. För två lika starka ljud som är oberoende av varandra blir exempelvis ljudnivån 3 dB högre. Vid större skillnader mellan ett ljud och ett annat blir skillnaden mindre, vilket innebär att störst vikt läggs vid det starkaste ljudet (Larsson, 1990, Andersson, 1998).

Decibelskalan återspeglar människans sätt att uppfatta ljud vilket innebär att skalan är mycket användbar. Minsta hörbara ljud för en människa ligger vid 0 dB och smärtgränsen ligger vid 130 dB. Vid ideala förhållanden kan en människa uppfatta en förändring av ljud om ljudet är  $\geq 1$  dB. Vid mätning av buller kan olika vägningsfilter användas för att få den bästa samstämmigheten mellan det uppmätta bullret och människans uppfattning av bullret (Wallin m.fl., 2010). Ett vägningsfilter väger frekvensspektrumet inom det hörbara området och återger resultatet i dB, där vägningen ser olika ut beroende på vilket filter som används. Vägningen innebär att vissa frekvenser dämpas, vilket är anpassat till människoörats hörkaraktistik (Andersson, 1998). I många fall används A-filter [dBA], men fler filter finns tillgängliga, som B-, C- och D-filter (Wallin m.fl., 2010).

### 2.1.1 Omgivningsbuller

Omgivningsbuller definieras enligt Europaparlamentet som oönskat ljud som uppkommer från järnvägstrafik, vägtrafik, flygtrafik samt industriella verksamheter (EUR-Lex, 2002). Verksamheter som genererar buller klassas som miljöfarlig verksamhet och ska därmed följa lagarna i Miljöbalken (Miljöbalken, 1998). Verksamhetsutövaren som driver en miljöfarlig verksamhet har ett ansvar i form av undersökningsskyldighet. Detta innebär exempelvis att om det uppkommer klagomål gällande buller från verksamheten kan utövaren behöva utföra mätningar för att kontrollera bullernivåerna (Naturvårdsverket, 2017). Förutom regleringar enligt Miljöbalken regleras även omgivningsbuller av enskilda lagar (Larsson, 1990). Det ska dock noteras att det i många fall handlar om riktlinjer när det gäller buller, istället för lagar. Naturvårdsverket samordnar omgivningsbuller nationellt och har ansvar för tillsynsvägledning enligt Miljöbalken samt vägleder hur den ska tillämpas. Även kommuner har ett ansvar gällande buller tillsammans med ett flertal olika centrala myndigheter, beroende på tillämpning. Boverket har ett planeringsansvar och arbetar med uppföljning av målen i miljö kvalitetsmålet *God bebyggd miljö*, som är miljö kvalitetsmålet där buller ingår (Naturvårdsverket, 2017).

Riksdagen har definierat miljömålet *God bebyggd miljö* enligt följande: ”Städer, tätorter och annan bebyggd miljö ska utgöra en god och hälsosam livsmiljö samt medverka till

en god regional och global miljö. [...]” (Miljömål, 2016). Det finns även en miljö kvalitetsnorm för omgivningsbuller som enligt riksdagen innebär att det ska ”[...] eftersträvas att omgivningsbuller inte medför skadliga effekter på människors hälsa” (Sveriges Riksdag, 2004). Med dagens förtätning av städer blir buller alltmer förekommande vilket innebär att det är viktigt att utföra både förebyggande arbete samt vidta åtgärder för befintlig bullrande verksamheter (Miljömål, 2016).

### **Uppkomst av omgivningsbuller från väg- och järnvägstrafik**

Vägtrafikbuller uppkommer från fordonens motorer och avgassystem samt från däckens kontakt med vägbanan. Generellt bullrar tunga fordon mer än lätta. Bränsletypen är en faktor som inverkar på motorljudet, där hybrid- och eldrivna fordon låter mindre än fordon som drivs på diesel, bensin eller etanol. Vid låga hastigheter dominerar motor- och avgasljud, medan bullret som uppkommer på grund av däckens kontakt med vägbanan dominerar vid högre hastigheter. För tunga fordon ligger gränsen mellan vilket buller som dominerar ungefär runt hastigheten 50-70 km/h medan den ligger ungefär runt 30-50 km/h för lätta fordon. Vilken typ av däck samt vägbanans beläggningsyta är val som har stor betydelse för hur hög ljudnivån blir. Vid dubbdäcksanvändning krävs det att vägen tillförs en beläggning som har större kornstorlek än vanligt, vilket bidrar till ett ökat buller. Vilket körsätt fordonsföraren utövar är ytterligare en faktor som påverkar bullernivån, där en ojämn körstil bullrar mer än en jämn (Trafikverket, 2017a).

Buller från järnvägstrafik uppkommer från ett flertal olika källor, bland annat från fordonens motorer, kontakt mellan fordonens hjul och räls, fordonens aerodynamiska egenskaper, fordonens bromssystem samt fordonens växelsystem. Fler inverkan faktorer är antal tågagnar, tåglängd, typ av tåg och hastighet. Det dominerande bullret när tåget har en hastighet mellan 30-300 km/h är det så kallade rullningsljudet, som uppkommer på grund av kontakten mellan tågets hjul och rälsen. Hur högt rullningsljudet blir beror framförallt på ytornas ojämnheter. När tåget har en hastighet mindre än 30 km/h dominerar ljudet från motorn och vid hastigheter över 300 km/h dominerar det aerodynamiska ljudet (Trafikverket, 2017b).

#### **2.1.2 Meteorologisk inverkan**

Det finns ett flertal olika meteorologiska fenomen som påverkar ljudutbredning, där framförallt refraktion, turbulens och atmosfärisk absorption har en signifikant påverkan på utbredningen (Öhlund & Larsson, 2015). Tidigare studier har visat att meteorologiska fenomen har en inverkan på ljudets utbredning redan vid 25 m från källan (Larsson, 1991).

Refraktion orsakas av vertikala temperatur- och vindhastighetsgradienter som leder till att ljudvågor böjs av. Vid medvind, när vinden blåser från källan till mottagaren, böjs ljudvågor av nedåt. Även när temperaturen ökar med höjden sker nedåtböjning av ljudvågor. När vinden blåser från mottagaren till källan, det vill säga vid motvind, böjs ljudvågor av uppåt. Detta sker även när temperaturen minskar med höjden (Öhlund & Larsson, 2015). En minskning av temperaturen med höjden kallas för instabil skiktning medan en temperaturökning med höjden kallas för stabil skiktning. Instabil skiktning är vanligt under dagtid och sommar, medan stabil skiktning är vanligt under nattetid och



vinter (Larsson, 1990).

Turbulens kan beskrivas som tredimensionella virvlar med ett stokastiskt beteende som inverkar på ljudets utbredning i det atmosfäriska gränsskiktet (Larsson, 1990, Öhlund & Larsson, 2015). Turbulensen skapar fluktuationer i ljudvågornas fas och amplitud och sprider ljudet i olika riktningar (Öhlund & Larsson, 2015). Turbulensen beror både på vind- och temperaturförändringar samt markens utformning och är som starkast under dagtid (SMHI, 2009).

Ytterligare ett meteorologiskt fenomen som inverkar på ljudets utbredning är atmosfärisk absorption. Detta fenomen innebär att ljudvågor förlorar energi när de breder ut sig i luft. Detta sker vid kompression och expansion av luft, som leder till friktionsförluster (Larsson, 1990). Den atmosfäriska absorptionen beror av ljudets frekvens, temperatur, lufttryck samt luftfuktighet (Murphy & King, 2014).

### 2.1.3 Ljudabsorption och ljudreflektion

Förutom att ljudvågor kan absorberas genom atmosfärisk absorption, när ljudvågorna rör sig genom luft, kan absorption även ske när ljudvågorna möter en yta. Absorption av ljudvågor på grund av uppkomsten av en yta innebär att energin gradvis överförs till värme som leder till en dämpning av ljudet (NE, u.å.b). Ytan kan exempelvis vara mark när ljudvågor breder ut sig utomhus eller väggar och möbler när ljudet breder ut sig inomhus (Larsson, 1990, Andersson, 1998). Ytorna som dämpar ljudvågorna kallas vanligen för absorberare, där de som är porösa eller ojämna är bäst på att absorbera ljudvågor (NE, u.å.b). Vid placering av absorberande material intill en vägg kommer den absorberande prestandan att bero på materialets tjocklek och ljudets frekvens. Maximal absorption erhålls vid den frekvens som är densamma som en kvarts våglängd från väggen eftersom detta är ekvivalent med partikelhastighetens maximum hos luften. Denna frekvens kan beräknas enligt

$$f \geq \frac{c}{4d} \quad (4)$$

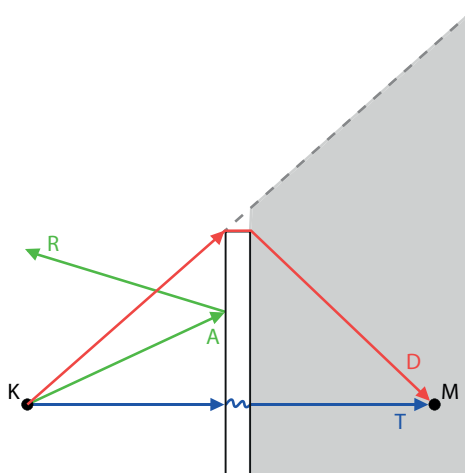
där  $f$  är frekvensen där maximal absorption sker [Hz],  $c$  ljudets hastighet i luft [m/s] och  $d$  materialets tjocklek [m]. Det går även att placera det absorberande materialet på avståndet  $\lambda/4$  från väggen för att erhålla maximal absorption för en önskvärd frekvens. Om det absorberande materialet är poröst beror absorptionsförmågan även på porositeten hos materialet. Ibland behöver absorberare skyddas, där perforerad metall är ett vanligt ytskydd. Metallen påverkar inte absorptionsförmågan i låga frekvenser eftersom dessa böjs in emot ytan, men höga frekvenser kan påverkas eftersom de har svårare att böjas in mot den absorberande ytan. Själva böjningen kallas för diffraktion, vilket är ett fenomen som beskrivs ytterligare i nästa avsnitt (Andersson, 1998).

När ljudvågor når en yta kan de även reflekteras mot ytan, vilket innebär att de infallande ljudvågorna ändrar sina riktningar, vilka i många fall är teoretiskt förutsägbara (Wallin m.fl., 2010). Huruvida ljudvågor absorberas eller reflekteras när de möter en yta beror till stor del på ytans egenskaper (Murphy & King, 2014). Ett exempel på en yta som ljudvågor både kan reflekteras och absorberas mot är bullerskyddsskärmar, som används för att reducera buller i samhället (QUIESST, 2012a).

### 2.1.4 Bullerskyddsskärmar

En bullerskyddsskärm ingår i benämningen *Noise Reducing Device (NRD)*, som är ett samlingsnamn för bullerreducerande anordningar som placeras intill bilvägar och järnväg för att minska trafikbuller. Detta genom att vara ett hinder för de genererade ljudvågorna som uppkommer från trafiken. Bullerskyddsskärmar består oftast av både akustiska och strukturella element, där de akustiska elementen innefattar ljudisolering, ljuddiffraktion och/eller ljudabsorption. De strukturella elementen finns för att stödja och hålla de akustiska elementen på plats (QUIESST, 2012a, CEDR, 2014).

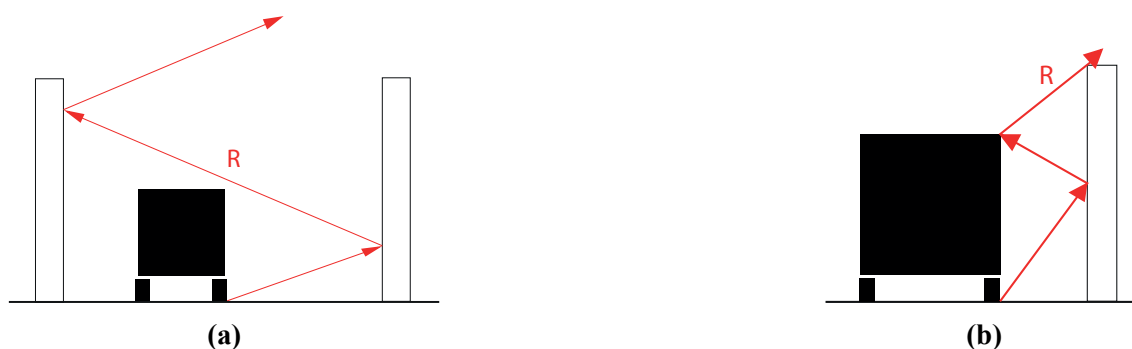
En bullerskyddsskärm akustiska prestanda påverkas av de olika fenomenen ljuddiffraktion, ljudtransmission, ljudreflektion och ljudabsorption. Ljuddiffraktion uppstår på grund av att ljudvågor böjs när de möter toppen och sidoändarna av bullerskyddsskärmen, vilket medför att ljudvågorna hamnar i området bakom skärmen, det så kallade skuggområdet. Detta innebär att ljudet som diffrakteras kan nå mottagaren på andra sidan skärmen. Ljudtransmission är det ljud som kan ta sig igenom skärmen, där det största läckaget oftast sker vid gränssytor, exempelvis mellan ett element och en pelare. Ljudabsorption är det ljud som absorberas i materialet i bullerskyddsskärmen och ljudreflektion innefattar ljudvågorna som reflekteras mot skärmen. De olika fenomenen illustreras i figur 1 (CEDR, 2014).



**Figur 1:** En ljudvåg som rör sig från en källa (K) till en mottagare (M) där en bullerskyddsskärm verkar som ett hinder för ljudvågens utbredning. De akustiska fenomenen som ljudvågen påverkas av på grund av uppkomsten av bullerskyddsskärmen är ljudabsorption (A), ljudreflektion (R), ljudtransmission (T) samt diffraktion (D). Området bakom skärmen i grått kallas för skuggområdet. Bilden är ej skalenlig.

För att en bullerskyddsskärm ska reducera ljud så bra som möjligt bör ljudtransmissionen vara liten genom god ljudisolering, ljuddiffraktionen kan påverkas genom en bra planering gällande skärmens dimensioner och utformning och ljudreflektionen kan minskas genom att förändra skärmens form och lutning eller genom att addera absorberande material till skärmen. När bullerskyddsskärmar används på båda sidor av en väg förhindrar absorberande material att multipla reflektioner uppstår mellan skärmarna (CEDR, 2014). Detta är även fallet för multipla reflektioner som kan uppstå

på grund av ljud som först reflekteras mot skärmen som i sin tur sedan reflekteras mot fordonen på vägen. Två exempel på detta illustreras i figur 2 (Cox & D'Antonio, 2009).



**Figur 2:** När bullerskyddsskärmar tillsätts absorberande material minskas skapandet av multipla reflektioner ( $R$ ) som kan uppstå när det finns bullerskyddsskärmar på båda sidor vägen (a) samt mot fordonet själv (b). Bilderna är ej skalenliga.

Vid tillförsel av absorberande material till skärmen minskar de multipla reflektionerna, vilket innebär att bullerskyddsskärmen blir mer effektiv på att reducera ljud. Vanligtvis är det den sidan av skärmen som är riktad mot vägen som har tillförts absorberande material, men det finns även skärmar som är absorberande på bägge sidor (CEDR, 2014). Ytterligare faktorer som är viktiga för att bullerskyddsskärmen ska vara effektiv är att siktlinjen mellan sändare och mottagare bryts vid uppföring av skärmen, att skärmen är tät, att skärmen är tillräckligt hög och bred samt att den är stabil (Trafikverket, 2004).

Var placeringen av bullerskyddsskärmen mellan källan och mottagaren sker är också en faktor som inverkar mycket på hur bra ljudreduceringen blir, där det är effektivast att placera skärmen så nära källan som möjligt. Bullerskyddsskärmar är mest effektiva för medel- och högfrekvent ljud, vilket har att göra med att lågfrekvent ljud har längre våglängd än högfrekvent ljud. Detta innebär att det lågfrekventa ljudet har lättare att ta sig över eller runt en bullerskyddsskärm. Detta kan följaktligen bli problematiskt för vägar med mycket tung trafik, som ofta emitterar mycket lågfrekvent ljud (CEDR, 2017).

Även icke akustiska egenskaper hos bullerskyddsskärmar är viktiga för att skärmarna ska fungera optimalt. Detta innefattar exempelvis att skärmen behöver skapas utifrån material som inte ger ljusreflektion som kan störa fordonsförare. Även miljön kan påverkas om skärmarna stänger inne luftföroreningar, vilket de kan göra om skärmarna helt eller delvis täcker vägarna. Estetiska aspekter spelar också en roll, där bullerskyddsskärmen måste passa in i dess lokala miljö. Estetiska aspekter involverar även hur bullerskyddsskärmen uppfattas psykiskt av både mottagaren och sändaren av ljudet. Både hastighet, avståndet till skärmen, skärmens höjd samt skärmens yta spelar roll för hur uppfattningen blir. Beroende på miljön väljs skärmen att dominera i landskapet, eller smälta in. Varje bullerskyddsskärm behöver anpassas individuellt till dess specifika plats, där både akustiska och icke-akustiska egenskaper bör tas till hänsyn för att få en så effektiv skärm som möjligt (CEDR, 2017).

Vanliga typer av bullerskyddsskärmar består av material som trä, metall, betong, tegel, glas eller plast. Även vegetationsklädda skärmar finns, där vegetationen vanligen blandas med olika typer av material (CEDR, 2014). Generellt sett är bullerskyddsskärmar i trä och betong akustiskt reflekterande medan skärmar som innehåller porösa material som mineralfiber eller skum är akustiskt absorberande. I många fall består dock bullerskyddsskärmar av flera olika material för att öka dess akustiska prestanda, och på så sätt kan till exempel material som generellt sett är reflekterande bli mer absorberande. Det är även vanligt att många bullerskyddsskärmar innehåller transparenta sektioner, vilket både kan bero på estetisk design och säkerhet (Kotzen & English 1999). Det transparenta materialet består för det mesta av glas, akryl, plexiglas eller skivor av polykarbonater (Kotzen & English 1999, CEDR, 2017). Dessa material är reflekterande men varierar ofta med absorberande material (Kotzen & English 1999, Lee m.fl., 2015). Valet av bullerskyddsskärm influeras av ett flertal olika faktorer, där kostnad, underhåll, varaktighet, miljöaspekter, akustisk prestanda samt estetik är exempel på faktorer som tas i hänsyn (Kotzen & English 1999, CEDR, 2017).

## 2.2 MÄTSTANDARD SS-EN 1793-5:2016

Mätstandard SS-EN 1793-5:2016 är en europeisk standard som är implementerad i 33 länder i Europa (Swedish Standards Institute, 2016). Mätmetoden som standarden beskriver uppkom under sent 90-tal genom *the Adrienne European Project* och har sedan dess utvecklats mycket, framförallt genom *the QUIESST Project* vilket ledde till att mätmetoden blev en standard som fastställdes år 2016. Innan dess var metoden en teknisk specifikation och inte en standard (Garai & Guidorzi, 2015, Swedish Standards Institute, 2016, CEDR, 2017). Standarden är framtagen av en teknisk kommitté inom CEN, som har benämningen CEN-TC 226/WG 6. Den nya mätstandardens möjliggör att ljudreflektionen hos bullerskyddsskärmar kan bestämmas för verkliga förhållanden och inte enbart i laboratorier. Metoden kan användas för fyra olika ändamål (Swedish Standards Institute, 2016):

- Bestämning av ljudreflektionen hos bullerskyddsskärmar som ska installeras längs vägar, exempelvis genom användning av en testsektion av skärmar
- För att bestämma ljudreflektionen hos befintliga bullerskyddsskärmar
- Verifiering och jämförelse av tidigare uppmätt ljudreflektion hos bullerskyddsskärmar som har utförts i laboratorier
- Evaluering om hur ljudreflektionen hos bullerskyddsskärmar har förändrats med tid

Mätstandardens användningsområde är således redan befintliga *NRD* eller *NRD* som ska installeras för att reducera buller som uppkommer från vägtrafik. Det är dock specificerat i standarden att den kan användas för andra ändamål, där exemplet som ges i standarden är att den kan användas för *NRD* som ska installeras nära industriområden. Vid användning för andra ändamål ska dock ett lämpligt spektrum användas vid beräkning av resultaten, istället för det normaliserade trafikbullerspektrumet (Swedish Standards Institute, 2016).

### 2.2.1 Mätstandardens användning idag

Standard SS-EN 1793-5 är en del av serien EN 1793 som innehåller sex olika mätstandarder som kan utföras i laboratorier respektive i fält för att fastställa olika akustiska egenskaper hos *NRD*. Serien EN 1793 är i sin tur reglerad av den harmoniserade produktstandarden EN 14388 som behandlar alla produktspecifikationer hos *NRD* (CEDR, 2014). En harmoniserad europeisk standard innehåller bland annat definitioner av krav som ställs på produkter, deklarerings- och efterfrågan (European Commission, 2018). Standard EN 14388 innefattar reglering kring standarder som testar *NRD*:s specifikationer som exempelvis skärmarnas motståndskraft mot belastningar, säkerhets- och miljökrav, bedömning av långsiktiga akustiska och icke akustiska egenskaper, ljusreflektion samt hållbarhet (Swedish Standards Institute, 2015). Sedan år 2013 är det obligatoriskt för tillverkare att CE-märka de *NRD*-produkter som omfattas av harmoniserade produktstandarder (CEDR, 2017). CE står för *Conformité Européenne* vilket innebär att produkten uppfyller EU direktiven, det vill säga att produkten uppfyller de miljö-, hälso-, och säkerhetskrav som EU ställer på produkten (Swedish Standards Institute, u.å.a). För att en *NRD* ska få en CE-märkning behöver dock bara några egenskaper ha uppfyllt kraven (Waarnerä, 2018).

Den harmoniserade produktstandarden EN 14388 som reglerar standard EN 1793-5 revideras ungefär vart 10:e år. Den senaste uppdateringen antogs och fastställdes år 2015. Dock publicerades inte produktstandarden i Europeiska unionens officiella tidning, vilket är en publikation som publiceras dagligen av EU på alla medlemsländers språk och innefattar lagstiftning samt upplysningar och meddelanden (EUR-Lex, u.å., Waarnerä, 2018). Varför produktstandard EN 14388:2015 inte publicerades berodde bland annat på administrativa formaliteter och innebär att det idag inte går att CE-märka *NRD* enligt EN 14388:2015, utan det är fortfarande den tidigare versionen som används, som fastställdes år 2005 (EN 14388:2005). EN 14388:2015 har dock blivit omröstad igen efter att den har uppdaterats ytterligare och förväntas publiceras år 2018 eller i början av år 2019. Detta innebär att det för tillfället inte går att CE-märka *NRD* enligt EN 1793-5, eftersom denna standard inte ingår i EN 14388:2005, men det förväntas kunna ske inom en snar framtid (Waarnerä, 2018).

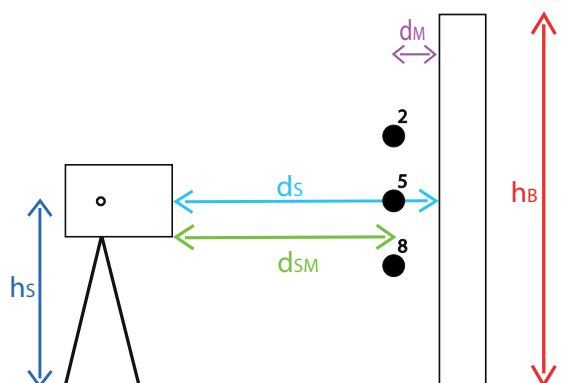
Inom EU används byggproduktförordningen som innebär att produkter ska deklarerats enligt deras produktstandarder, vilket innefattar CE-märkning (Boverket 2018). Offentliga inköpare måste köpa produkter som omfattas av byggproduktförordningen. I Sverige är Trafikverket en offentlig inköpare som ställer krav på utrustning för all statlig infrastruktur gällande trafik i Sverige, som exempelvis vägar och järnvägar. Kraven som efterfrågas för CE-märkning finns i Trafikverkets mallar för upphandling. Även kommuner kan ställa särskilda krav för CE-märkning hos produkter. Eftersom EN 14388:2015 som reglerar fältmätningstandarderna inte är antagen kan inte Trafikverket eller kommuner för närvarande ställa krav på att akustiska egenskaper hos *NRD* ska testas enligt fältmätningmetoderna i EN 1793-serien, vilket dock kan komma att ändras så fort en ny uppdatering av EN 14388 publiceras (Waarnerä, 2018).

Även om EN 14388:2015 inte är publicerad i EU:s officiella tidning kan länder ändå välja

att implementera standarderna och ställa krav efter dem, enligt ländernas egna lagar och direktiv. Detta har bland annat hänt i Flandern i Belgien, där den flamländska regeringen ställer kravet att för *NRD* som uppförs av Flanderns motsvarighet till Trafikverket ska fältmätningstandarderna för ljudabsorption (EN 1793-5) och ljudisolering (EN 1793-6) utföras, där direkta ljudförhållanden råder (Buytaert m.fl., 2017).

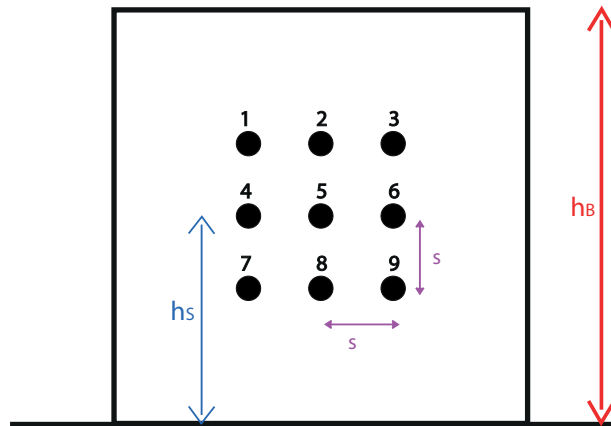
### 2.2.2 Generell princip

Mätning av ljudreflektionen hos bullerskyddsskärmar i fält enligt mätstandard SS-EN 1793-5:2016 utförs framför en bullerskyddsskärm vid den sidan av skärmen som är riktad mot källan till bullret. Metoden innebär att en högtalare samt ett metallrutnät med 9 mikrofoner placeras framför bullerskyddsskärmen, där högtalaren utsänder ett ljud som reflekteras mot skärmen, vilket innebär att skärmens reflektion kan uppmätas. Metallrutnätet med 9 mikrofoner placeras 0,25 m ( $d_M$ ) framför bullerskyddsskärmen, där metallrutnätet är vertikalt och består av 3 rader, där 3 mikrofoner är placerade på varje rad med det ortogonala avståndet 0,4 m mellan mikrofonerna. Den mittersta mikrofonen i metallrutnätet, mikrofon nummer 5 (se figur 4), placeras vid referenshöjden  $h_S$ , där  $h_S$  är hälften av höjden på bullerskyddsskärmen,  $h_B/2$ . Högtalaren placeras 1,5 m ( $d_S$ ) framför bullerskyddsskärmen riktad mot mikrofon nummer 5, på referenshöjd  $h_S$ . Avståndet mellan högtalaren och metallrutnätet med mikrofonerna är 1,25 m ( $d_{SM}$ ). En förenklad illustration av mätuppställningen med tillhörande avstånd visas i figur 3.



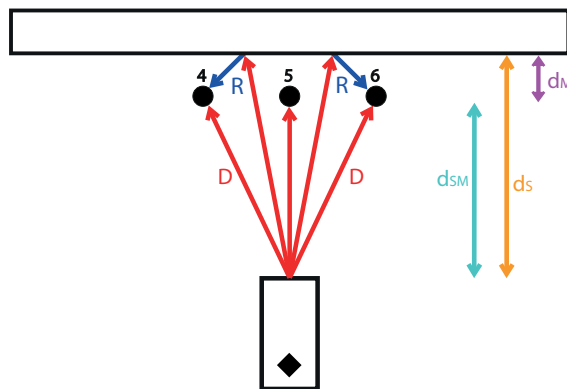
**Figur 3:** Mätuppställning framför bullerskyddsskärmen, sett från sidan. Mikrofonerna som visas är mittenraden (vertikalt) och är numrerade i bilden. Högtalaren placeras på avstånd  $d_S$  från skärmen ( $d_S=1,5$  m) och på referenshöjden  $h_S$ , vilket är hälften av höjden hos bullerskyddsskärmen,  $h_B/2$ . Metallrutnätet med de nio mikrofonerna placeras 0,25 m ( $d_M$ ) från skärmen, med mikrofon nummer 5 på referenshöjd  $h_S$ . Avståndet mellan högtalarens framsida och metallrutnätet med mikrofonerna är 1,25 m ( $d_{SM}$ ). Mitten på högtalarens membran ska vara riktad mot mikrofon nummer 5. Bilden är ej skalenlig.

Mikrofonernas position när de är placerade framför bullerskyddsskärmen visas i figur 4.



**Figur 4:** De nio mikrofonernas position framför bullerskyddsskärmen, där  $s$  är det ortogonala avståndet mellan mikrofonerna (0,4 m). Mikrofon nummer 5 är placerad på referenshöjd  $h_S$ , vilket är hälften av höjden hos skärmen,  $h_B/2$ . Bilden är ej skalendig.

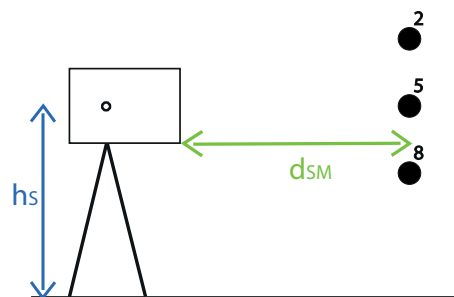
Högtalaren utsänder en signal, som uppmäts av de nio mikrofonerna i metallrutnätet. De nio mikrofonerna uppmäter både det direkta ljudet som kommer från högtalaren samt det ljudet som reflekteras mot bullerskyddsskärmen, vilket urskiljs i figur 5.



**Figur 5:** Bild sedd ovanifrån där mikrofonerna i mittenraden visas. Högtalaren utsänder ett direkt ljud ( $D$ ) som uppmäts av mikrofonerna och som även reflekteras mot skärmen och når mikrofonerna ( $R$ ). I figuren visas hur det reflekterade ljudet ( $R$ ) når mikrofon 4 och mikrofon 6. Avstånd  $d_M$  är avståndet mellan mikrofonerna och bullerskyddsskärmen (0,25 m),  $d_S$  avståndet mellan skärmen och högtalaren (1,5 m) och  $d_{SM}$  avståndet mellan mikrofonerna och högtalaren (1,25 m). Bilden är ej skalendig.

För att identifiera utseendet hos det direkta ljudet utförs även en frifältsmätning. Vid frifältsmätningen placeras metallrutnätet med mikrofonerna i ett fritt fält i närheten av bullerskyddsskärmen, med samma avstånd från högtalaren som tidigare. Högtalaren placeras även på samma referenshöjd,  $h_S$ . I frifältsmätningen mäts enbart det direkta ljudet från högtalaren vilket innebär att denna mätning kan jämföras med mätningen framför skärmen för att identifiera utseendet hos det direkta ljudet. Detta innebär att det reflekterade ljudet kan urskiljas ur impulssvaret för mätningen som utförs framför bullerskyddsskärmen genom att utföra en subtraktionsteknik som eliminerar det direkta

ljudet, vilket kommer att förklaras närmre under avsnitt 3.4.2. En förenklad figur över uppställningen för frifältsmätningen visas i figur 6.



**Figur 6:** Mätuppställningen för mätningen i fritt fält, sett från sidan. Det är mittersta raden hos mikrofonerna som visas. Högtalaren och metallrutnätet placeras i fritt fält i närheten av bullerskyddsskärmen. Mikrofon nummer 5 och högtalaren placeras på referenshöjd  $h_s$  och mitten av högtalarens membran riktas mot mikrofon nummer 5. Avståndet mellan högtalaren och metallrutnätet med mikrofoner är  $d_{SM}$  (1,25 m). Bilden är ej skalendig.

### 2.2.3 Jämförelse mellan fältsmätningar och laborationsmätningar

Mätstandard SS-EN 1793-1 beskriver en metod som utförs i laboratorier för att fastställa absorptionen hos bullerskyddsskärmar. Den nya fältsmätningstandarden, SS-EN 1793-5:2016, för att undersöka reflektionen hos bullerskyddsskärmar möjliggör en jämförelse mellan absorptionen och reflektionen i laboratorie och i fält (Swedish Standards Institute, 2016). Tidigare studier har visat att det finns en svag korrelation mellan mätningar i laboratorier och i fält, där laborationsmätningarna generellt överskattar absorptionen. Det ska dock noteras att en direkt jämförelse inte kan utföras vilket framförallt har att göra med att ljudfältet vid laborationsmätningarna är diffust medan ljudfältet vid fältsmätningarna är direkt, vilket innebär att förutsättningarna skiljer sig (Garai & Guidorzi, 2008, CEDR, 2017). I ett direkt ljudfält är det det infallande direkta ljudet som dominerar, medan det i ett diffust ljudfält är det reflekterande ljudet som dominerar (Wallin m.fl., 2010). I ett diffust ljudfält kommer ljudet att nå skärmen från alla riktningar, på grund av reflektionerna som sker mot rummets väggar (QUIESST, 2012a). Det diffusa ljudfältet som uppstår på grund av reflektionerna kallas även för efterklangsfält (Andersson, 1998). Trots att ljudfälten skiljer sig mellan fält- och laborationsmätningar finns både ett stort intresse och ett behov av att utföra ytterligare studier kring hur de förhåller sig till varandra (CEDR, 2017).

Eftersom mätmetoden i laboratorier innebär att ett diffust ljudfält tillämpas, som generellt inte är förhållanden som råder i verkligheten (förutom i tunnlar, djupa vallar eller vid vägar som är täckta på något sätt), kommer fältsmätningmetoden inom en snar framtid att vara den standard som måste följas för att undersöka ljudabsorptionen hos bullerskyddsskärmar där direkt ljudfält råder, vilket oftast är fallet utomhus. Detta innebär att det är viktigt att testa denna mätmetod (CEDR, 2017, CEDR, 2014). År 2017 kom en uppdaterad version av mätstandarden som utförs i laboratorier, SS-EN



1793-1:2017, där det specificeras att den enbart är tillämplar för diffusa ljudfält (Swedish Standards Institute, 2017). Såldes är det nu specificerat att laborationsmetoden gäller för diffusa ljudfält, och fältmätningssmetoden gäller för direkta ljudfält (Swedish Standards Institute, 2016, Swedish Standards Institute, 2017). Dock har standard EN 14388 som reglerar EN 1793-serien ännu inte hunnit uppdateras gällande detta, men snart förväntas en ny version finnas tillgänglig (Swedish Standards Institute, 2015, Waaranperä, 2018).

Genom *the QUIESST Project* utvecklades en databas, som har sammanställt flertalet av de laborationsmätningar och fältmätningar som hittills har utförts enligt metoderna i EN 1793-serien. Databasen har utvecklats för att underlätta för alla aktörer inom akustikbranschen genom att ge en överblick över tillgängliga *NRD* och dess akustiska prestanda. På grund av sekretess är databasen uppdelad i en intern del och en publik del. Databasen har samlat mest data från bullerskyddsskärmar i material av betong, metall eller trä, men även fler skärmar innefattas, som bland annat transparenta och vegetationsbeklädda skärmar. Databasen har givit möjligheten till att ta fram korrelationsformler mellan fält- och laborationsmätningar, för att kunna studera överensstämmelsen mellan dem, vilket har intresserat många forskare (QUIESST, 2012b). En av anledningarna till det stora intresset beror troligtvis på en rädsla hos tillverkare att redan framtagna bullerskyddsskärmar ska få en annan klassificering än tidigare när de mäts enligt fältmetoden och därmed efterfrågas korrelationsformler för att få mer kännedom kring detta. En annan anledning är troligen att akustiker anser att de har mer kunskap och erfarenheter kring akustiken inomhus och dess relaterade signalanalys, än vad de har för fältmätningarna, vilket innebär att de vill kunna studera korrelationen (Garai, 2018).

#### 2.2.4 Matematiska definitioner för ljudabsorption och ljudreflektion

När en infallande ljudvåg möter en yta verkar ytan som ett hinder och ljudvågens sammanlagda ljudeffekt,  $P_i$ , uppdelas i fyra komponenter enligt

$$P_i = P_r + P_t + P_a + P_s \quad (5)$$

där  $P_r$  är den reflekterande komponenten,  $P_t$  den transmitterade komponenten,  $P_a$  den absorberande komponenten och  $P_s$  komponenten som leds vidare som stömljud (ljud som utbreder sig i stommen). Absorptionskoefficienten,  $\alpha$ , hos ytan definieras sedan enligt följande samband

$$\alpha = \frac{P_a + P_t + P_s}{P_i} = \frac{P_i - P_r}{P_i} = 1 - \rho \quad (6)$$

där  $\rho$  är ljudeffektens reflektionskoefficient (Fuchs & Möser, 2013). I mätstandarderna utnyttjas detta samband, som innebär att absorptionen och reflektionen är varandras komplement. I samband med standarderna används benämningen reflektionsindex,  $RI$ , istället för  $\rho$  och ekvation 6 får istället följande utseende:

$$RI = 1 - \alpha \quad (7)$$

där  $RI$  är ett mått på reflektionen [-] och  $\alpha$  är ett mått på absorptionen [-].  $RI$  och  $\alpha$  går mellan 0 och 1 där  $RI=1$  i ekvation 7 innebär full reflektion och  $RI=0$  innebär full absorption. Dock inkluderar full absorption i detta fall även transmitterat ljud och ljud

som leds vidare som stomljud (ekvation 6). För att kunna få reda på hur mycket som absorberas är det därmed även viktigt att mäta bullerskyddsskärmens ljudisolering, eftersom en hög absorptionskoefficient kan betyda att ljudet går rakt igenom skärmen. I mätmetoden för laborationsmätningarna (SS-EN 1793-1) mäts  $\alpha$  medan det är  $RI$  som mäts i fältmätningarna (SS-EN 1793-5). För att jämföra dessa används således ekvation 7 (Tronchin, 2013, Conter & Wehr, 2015, Swedish Standards Institute, 2016). Det ska dock noteras att  $RI$  och  $\alpha$  inte är uppmätta på samma sätt, vilket innebär att ekvation 7 är en förenkling av relationen mellan  $RI$  och  $\alpha$ , vilket bör noteras vid användning av den (Garai & Guidorzi, 2008). Detta eftersom  $\alpha$  är uppmätt inomhus i ett efterklangsrum där efterklangstid och areor utnyttjas, medan  $RI$  är uppmätt utomhus i fält (Swedish Standards Institute, 2003, Swedish Standards Institute, 2016, Swedish Standards Institute, 2017).

I båda mätmetoderna beräknas även så kallade *Single-number rating* för absorptionen respektive reflektionen för att enkelt kunna utföra en jämförelse mellan olika typer av bullerskyddsskärmar respektive mellan laborationsmätningar och fältmätningar. Dessa är sammanvägda värden som även indikerar bullerskyddsskärmens prestanda. För absorptionen som uppmäts genom laborationer beräknas *Single-number rating of sound absorption*, vilket benämns  $DL_\alpha$  och för reflektionen som uppmäts genom fältmätningar beräknas *Single-number rating of sound reflection*,  $DL_{RI}$ .  $DL_\alpha$  och  $DL_{RI}$  ger ett generellt värde för absorptionen respektive reflektionen i dB som gäller för hela skärmen. Både  $DL_\alpha$  och  $DL_{RI}$  är liknande index som går mellan 0-20 dB och kan jämföras, där 20 dB står för full absorption och 0 dB full reflektion. Det ska dock noteras även här att eftersom  $DL_\alpha$  och  $DL_{RI}$  är beräknade utifrån  $\alpha$  respektive  $RI$  så är storheterna uppmätta på olika sätt, där förhållandena skiljer sig (Garai & Guidorzi, 2008).

I tidigare versioner av standarden för mätmetoden i laboratorier, SS-EN 1793-1, fanns en skala för  $DL_\alpha$  som användes när det fanns ett behov av att kategorisera  $DL_\alpha$  efter den absorberande prestandan. Denna kategorisering visas i tabell 3, där A0 innebär minst absorption och A5 innebär mest absorption (Swedish Standards Institute, 2012). I den senaste uppdateringen av laborationsstandarderna är denna kategorisering dock borttagen eftersom mätosäkerheten hos  $DL_\alpha$  kunde leda till att  $DL_\alpha$  flyttades till undre kategorier vilket inte var önskvärt (Swedish Standards Institute, 2017).

**Tabell 3:** Tidigare kategorisering av  $DL_\alpha$  som fanns given i mätstandarderna för bestämning av absorptionen i laboratorier, från den näst senaste uppdateringen, SS-EN 1793-1:2012 (Swedish Standards Institute, 2012).

Kategori	$DL_\alpha$ [dB]
A0	-
A1	<4
A2	4-7
A3	8-11
A4	12-15
A5	>15

I Flandern i Belgien ställer den flamländska regeringen kravet att för *NRD* där diffusa ljudfält råder ska  $DL_\alpha \geq 10$  dB och för *NRD* där direkta ljudfält råder ska  $DL_{RI} \geq 5$  dB (Buytaert m.fl., 2017).

För att få ett mer detaljerat resultat än bara sammanvägda värden från mätningarna i fält samt mätningarna i laboratorier ( $DL_{RI}$  respektive  $DL_\alpha$ ) används även  $\alpha$  respektive *RI* eftersom dessa får ett värde för varje tersband vilket ger möjligheter till djupare analys av resultaten (Garai & Guidorzi, 2008, CEDR, 2017). Definitionen för *RI* som en funktion av frekvens i tersband enligt fältmätningstandarden (SS-EN 1793-5:2016) är (Swedish Standards Institute, 2016):

$$RI_j = \frac{i}{n_j} \sum_{k=1}^{n_j} \left[ \frac{\int_{\Delta f_j} |F[h_{r,k}(t) \cdot w_{r,k}(t)]|^2 df}{\int_{\Delta f_j} |F[h_{i,k}(t) \cdot w_{i,k}(t)]|^2 df} \cdot C_{geo,k} \cdot C_{dir,k}(\Delta f_j) \cdot C_{gain,k}(\Delta f_g) \right] \quad (8)$$

där

$h_{i,k}(t)$	=	infallande referenskomponenten i impulssvaret från frifältsmätningen vid mikrofon $k$ [-]
$h_{r,k}(t)$	=	reflekerande komponenten i impulssvaret från mätningen framför bullerskyddsskärmen vid mikrofon $k$ [-]
$w_{i,k}(t)$	=	tidsfönstret, <i>Adrienne temporal window</i> , för den infallande referenskomponenten i impulssvaret från frifältsmätningen vid mikrofon $k$ [-]
$w_{r,k}(t)$	=	tidsfönstret, <i>Adrienne temporal window</i> , för den reflekterande komponenten i impulssvaret från mätningen framför bullerskyddsskärmen vid mikrofon $k$ [-]
$F$	=	Fouriertransform [-]
$j$	=	index av frekvensen i tersband (mellan 100-5000 Hz) [-]
$\Delta f_j$	=	bredden av den $j$ :te frekvensen i tersband [Hz]
$k$	=	mikrofonnummer, där $k=1,\dots,9$ [-]
$n_j$	=	antalet mikrofonpositioner som ska medelbildas (9 stycken) [-]
$C_{geo,k}$	=	Korrektionsfaktor för geometrisk divergens vid mikrofon $k$ [-]
$C_{dir,k}(\Delta f_j)$	=	Korrektionsfaktor för ljudkällans riktning vid mikrofon $k$ [-]
$C_{gain,k}(\Delta f_g)$	=	Korrektionsfaktor som tar hänsyn till förstärkarens inställningar i högtalaren samt känslighetsinställningarna hos mikrofonerna [-]
$\Delta f_g$	=	frekvensskalan som innefattar frekvenserna i tersband mellan 500-2000 Hz [Hz]

Mer information om respektive variabel i ekvation 8 finns under avsnitt 3.4.

$DL_{RI}$  definieras enligt mätstandarden för fältmetoden (SS-EN 1793-5:2016) som

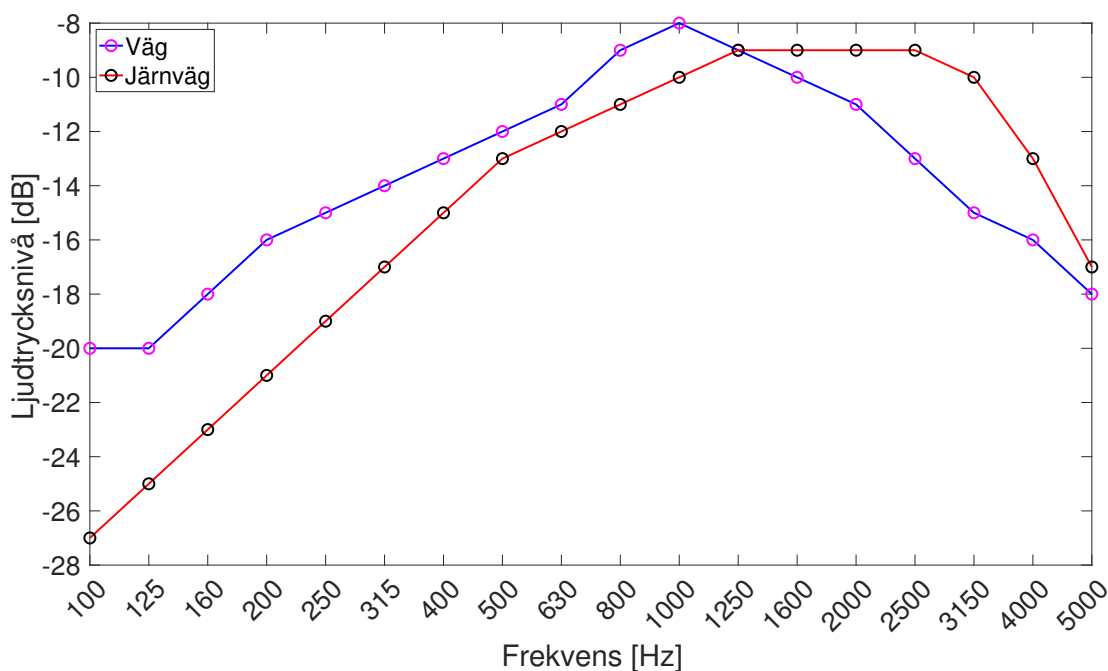
(Swedish Standards Institute, 2016):

$$DL_{RI} = -10 \cdot \lg \left[ \frac{\sum_{i=m}^{18} RI_i \cdot 10^{0,1L_i}}{\sum_{i=m}^{18} 10^{0,1L_i}} \right] \quad (9)$$

där

- $RI$  = reflektionsindex [-]
- $m$  = numret på den lägsta pålitliga frekvensen i tersband [-]
- $L$  = A-vägd ljudtrycksnivå från det normaliserade trafikbullerspektrumet, som definierat i EN 1793-3, i det  $i$ :te tersbandet [dB]

Vid användning av fältmätningmetoden för att bestämma  $DL_{RI}$  för bullerskyddsskärmar som redan är eller ska uppföras på grund av buller från andra verksamheter än från vägtrafik ska ett lämpligt spektrum användas istället för det normaliserade trafikbullerspektrumet. Då en av bullerskyddsskärmarna som undersöktes i detta projekt är placerad intill järnväg användes även det normaliserade spektrumet för järnvägsbuller, som är definierat i standard 16272-3-2:2014 (Swedish Standards Institute, 2014). Det normaliserade trafikbullerspektrumet samt det normaliserade spektrumet för järnvägsbuller visas i figur 7.



**Figur 7:** Normaliserat trafikbullerspektrum (väg) respektive det normaliserade spektrumet för järnvägsbuller (järnväg) i tersband som behövs för att beräkna sammanvägda värden för NRD:s akustiska prestanda vid väg respektive järnväg. Ljudtrycksnivån är relativ A-vägd ljudtrycksnivå i dB (Swedish Standards Institute, 1997, Swedish Standards Institute, 2014).

Ytterligare information om respektive variabel i ekvation 9 finns under avsnitt 3.4.

### 3 METOD

Mätningarna utfördes enligt instruktionerna i mätstandard SS-EN 1793-5:2016 i största möjliga mån. Avvikelser från standarden finns beskrivna i avsnittet.

En intervju utfördes 2018-04-17 med Monica Waaranperä som är bullerspecialist på Trafikverket. Waaranperä sitter med i den tekniska kommittén, CEN-TC 226/WG6, som har tagit fram standarden. Intervjun utfördes för att få mer bakgrund om mätstandardens användning idag, vilket har använts under avsnitt 2.2.

#### 3.1 MÄTUTRUSTNING

Mätutrustningen bestod av följande:

- Högtalare Mackie SRM150 med tillhörande ställning och kabel
- Datasamlingsenheten Roland STUDIO CAPTURE med tillhörande kabel
- Ett rutnät i metall med 9 hållare för mikrofoner
- 9 mikrofoner NTI Audio M4261 med tillhörande kablar
- Bilbatteri med tillhörande kablar
- Strömomvandlare
- Dator med programvaran EASERA för att kunna generera ett impulssvar
- Förlängningssladdar, tumstock, ihopfällbart bord m.m.

Fotografier på vissa av de ingående komponenterna som mätutrustningen bestod av samt specifikationer finns i *Appendix E*. Vid varje mättillfälle kopplades mätutrustningen samman och placerades framför bullerskyddsskärmen enligt specifikationerna som angavs i mätstandarden. Detta finns beskrivet under avsnitt 2.2.2. Ett exempel på hur mätupställningen såg ut vid en av mätplatserna visas i figur 8.



**Figur 8:** Mätupställningen framför ett av elementen hos bullerskyddsskärmen intill Lidingövägen.

### 3.2 MÄTPROCEDUR ENLIGT MÄTSTANDARD SS-EN 1793-5:2016

Mätstandard SS-EN 1793-5:2016 avser mätning av ljudreflektionen hos bullerskyddsskärmar vid direkta ljudförhållanden och kan inte användas för diffusa ljudfält. Detta innebär att mätstandarden inte är applicerbar för exempelvis bullerskyddsskärmar längs vägar i tunnlar, djupa vallar eller när vägen är delvis täckt. Specifikationer för detta finns i standarden, men dessa har inte behövt tagits i åsyn i detta projekt då sådana förhållanden inte rådde på någon av mätplatserna.

Mätresultaten ska enligt standarden redovisas i tersband mellan 100-5000 Hz. För att resultaten ska vara giltiga över hela frekvensskalan och för att bullerskyddsskärmen ska kunna kvalificeras med ett  $DL_{RI}$  så behöver bullerskyddsskärmen ha en storlek på minst 4x4 m. Om detta inte uppfylls ska det tydligt angivas i resultatrapporten och det ska specificeras vilken begränsad frekvensskala som resultaten är giltiga för.

Mätförfarandet består av två mätningar, där den ena är en mätning framför bullerskyddsskärmen och den andra är en frifältsmätning i närheten av skärmen. Beroende på bullerskyddsskärmens utformning krävs olika antal referenspositioner för mittenmikrofonen (mikrofon nummer 5) för mätningen framför bullerskyddsskärmen. För en helt platt homogen bullerskyddsskärm behövs bara en mätning framför ett av elementen hos bullerskyddsskärmen. Mikrofon nummer 5 placeras på referenshöjd  $h_s$  så nära mitten som möjligt av bullerskyddsskärmen (med lika avstånd till respektive pelare). Om bullerskyddsskärmen inte är helt platt och/eller inte är homogen krävs fler referenspositioner, vilka är specificerade i standarden. Vid mättillfället ska lufttemperaturen vara mellan 0-40 °C, vindhastigheten  $\leq 5$  m/s och bullerskyddsskärmen ska vara torr och ha en yttemperatur mellan 0-70 °C.

Det första som utfördes vid varje mättillfälle var att mäta bullerskyddsskärmens dimensioner för att kunna bestämma referenshöjden  $h_s$ . Även anteckningar för hur torr skärmen var noterades. Data för temperatur och vindhastighet hämtades i efterhand från SMHI:s meteorologiska mätstationer, vilket beskrivs ytterligare under avsnitt 3.3. Mätutrustningen ställdes sedan upp enligt beskrivningen i avsnitt 2.2.2 (se även figur 8), där alla avstånd mättes med hjälp av laserpekare och tumstock. Efter kontrollering av att all utrustning var rätt placerad och ansluten genererades exciteringssignalen ESS (valet var mellan MLS, *Maximum Length Sequence* och ESS, *Exponential Sine Sweep*, där båda är accepterade enligt standarden), inspelningstiden 5.5. ms och samplingshastigheten  $f_s$  96k Hz (med krav  $f_s \geq 46$  k Hz) i programvaran EASERA. Input till EASERA var datainsamlingsenheten Roland som de nio mikrofonerna var kopplade till genom flerkanaler. Vid ett av mättillfällena utfördes mätningar både med ESS respektive MLS som exciteringssignal för att undersöka om valet av signal påverkade resultaten.

Innan mätningarna påbörjades så kontrollerades det att amplituderna hos signalerna som utsändes för varje kanal låg inom ett visst intervall för att säkerhetsställa att signalen fungerade som den skulle. Sedan kunde mätningen starta genom att generera ett impulssvar i EASERA. För varje referensposition kontrollerades först högtalarens position relativt till mikrofonernas position genom att studera tidsfördröjningen mellan den första direkta ljudkomponenten som når mikrofon  $k$  (där  $k=1,\dots,9 \neq 5$ ) och den första

direkta ljudkomponenten som når mikrofon 5. Tidsfördröjningarna räknas sedan om till ljudbanelängdsskillnader som jämförs med tabellvärden. Om dessa inte infaller inom rätt spann så måste högtalarens position justeras tills rätt värden nås. Vid varje mättillfälle genererades ett impulssvar tills rätt position uppnåddes. För mikrofon nummer 9 kunde dock inte ljudbanelängdsskillnaden hamna inom rätt intervall för någon av mätningarna, vilket var fallet för samtliga mättillfällen. Det testades även att byta mikrofon, kabel respektive kanalingång för mikrofon nummer 9 utan att rätt ljudbanelängdsskillnad kunde uppnås.

Vid ett av mättillfällena uppmättes även korrektionsfaktorn för ljudkällans riktning vid respektive mikrofon, vilken benämns  $C_{dir,k}(\Delta f_j)$ . Denna mätning utfördes i frifält och innebar att alla mikrofoner vinklades ett visst avstånd från sin ursprungsposition. På så sätt hamnar mikrofonerna i ett annat plan som motsvarar ljudets väg för det direkta ljud som kommer reflekteras mot skärmen och sedan nå respektive mikrofon. Denna mätning utfördes enbart en gång eftersom det antas i standarden att ljudkällans riktningsmönster inte ändras, vilket innebär att det räcker att utföra endast en mätning. Standarden rekommenderar att  $C_{dir,k}(\Delta f_j)$  bör mätas ungefär en gång per år för att säkerhetsställa att riktningsmönstren inte har ändrats. Mer om  $C_{dir,k}(\Delta f_j)$  och hur faktorn beräknas hittas under avsnitt 3.4.5.

Kalibrering behövde inte utföras innan mätningarna då mätproceduren är baserad på effektspektrum från signaler som har framställts ur impulssvar, som mäts med samma utrustning på samma plats under samma förhållanden. Däremot testades signalen innan mätningarna utfördes för att kontrollera att alla mikrofonkanaler fungerade som dem förväntades göra, vilket är beskrivet ovan.

### 3.2.1 Avvikelser från mätstandard

Innan mätningarna påbörjas ska även mikrofonernas position i förhållande till bullerskyddsskärmen kontrolleras genom att placera en tunn reflekterande platta (storlek 1,6x1,6 m) bakom mikrofonerna. Ett impulssvar ska sedan genereras och tidsfördröjningen mellan den första direkta ljudkomponenten och den första reflekterade ljudkomponenten som når mikrofon  $k$  (där  $k=1,\dots,9$ ) ska studeras för att sedan räknas om till ljudbanelängdsskillnader som ska jämföras med tabellvärden. Om inte värdena infaller i det givna intervallet ska mikrofonernas position korrigeras. Då en tunn reflekterande platta inte fanns att tillgå blev det inte praktiskt genomförbart att utföra denna positionskontrollering, eftersom det var för svårt att urskilja var på tidsaxeln reflektionen inträffade i impulsvaret när kontrolleringen utfördes framför bullerskyddsskärmarna. Både kontrolleringen av mikrofonernas positioner relativt bullerskyddsskärmen samt högtalarens position relativt mikrofonerna är mycket tidskrävande på plats och kan undkommas om utrustningen är designad för att garantera rätt positioner, vilket dock inte var fallet för utrustningen som användes i detta projekt.

Ytterligare en kontroll som ska utföras innan mätningarna kan påbörjas är att beräkna radien av den maximerade arean hos bullerskyddsskärmen. Mellan mikrofonerna och närliggande objekt måste avståndet vara minst den beräknade maximala radien. Detta för att garantera att inga reflekterande objekt är för nära utrustningen som kan påverka

resultaten. Detta moment kunde inte utföras då beräkningen av radien kräver bredden på *the Adrienne temporal window*, som inte fås förrän mätdata har bearbetats om skärmarna är mindre än 4x4 m, vilket var fallet för mätobjekten som undersöktes. I efterhand konstaterades det dock att det hade varit ganska enkelt att utföra en uppskattning av radien med en hög säkerhetsmarginal. Istället gjordes enbart en visuell bedömning, där det observerades att det inte fanns några närliggande objekt inom de närmsta metrarna från skärmarna som undersöktes, vilket ansågs vara tillräckligt.

### **3.3 MÄTOBJEKT**

Mätobjekten som undersöktes valdes eftersom tidigare examensarbetare Sjöberg (Sjöberg, 2018) hade utfört mätningar på dessa skärmar enligt mätstandard 1793-6:2012 som undersöker ljudisoleringen hos bullerskyddsskärmar. Således fanns ett intresse hos Structor Akustik att erhålla resultat för fler parametrar för samma skärmar. Skärmarna ansågs även vara lämpliga då ett av mätobjekten, vid Fridhemsplan, antogs vara en reflekterande skärm, medan de andra skärmarna, vid Lidingövägen och Knivsta, antogs vara absorberande. En reflekterande skärm ansågs vara ett bra första mätobjekt eftersom en tydlig reflekterande komponent förväntades kunna urskiljas i mätdata, vilket skulle kunna underlätta vid bearbetningen av mätdata för de absorberande skärmarna, eftersom den absorberande komponenten förmodades vara svårare att urskilja.

De meteorologiska förhållandena lufttemperatur och vindhastighet som rådde under mättillfällena hämtades i efterhand från SMHI:s närmast belägna meteorologiska mätstationer. För mättillfällena vid Fridhemsplan och Lidingövägen användes mätstationerna Stockholm och Stockholm A med klimatnummer 98210 respektive 98230 som är belägna vid Sveavägen i Vasastan i Stockholm. För mättillfället i Knivsta användes mätstationen Stockholm-Arlanda med klimatnummer 97400 som är placerad vid Arlanda strax utanför Märsta. Vid samtliga mätstationer mäts lufttemperatur på 2 m höjd och vindhastighet på 10 m höjd (SMHI, u.å.). Mätstationerna som användes ligger inte exakt på platserna, utan i närheten, vilket innebär att mätplatserna har antagits ha liknande meteorologiska förhållanden.

Information gällande mätobjektens specifikationer som beskrivs i följande avsnitt har framförallt erhållits genom planritningar över bullerskyddsskärmarna samt tillhörande informationsblad, men information har även fått från kontaktpersoner som har kunskap om skärmarna. Skärmelementens dimensioner som är givna i tabell 4, 5 och 6 är egna observationer som har mätts på plats.

#### **3.3.1 Bullerskyddsskärm intill Drottningholmsvägen vid Fridhemsplan**

Vid Stockholms sjukhem och Sverigefinska skolan i Stockholm intill Drottningholmsvägen i närheten av Fridhemsplan är en transparent bullerskyddsskärm belägen sedan år 2014. Skärmens geografiska placering visas i figur 9.





**Figur 9:** Bullerskyddsskärmens ungefärliga geografiska placering intill Drottningholmsvägen vid Stockholms Sjukhem och Sverigefinska skolan i Stockholm, vilka är belägna vid Fridhemsplan. Bullerskyddsskärmens placering är markerad som en röd linje och Drottningholmsvägen är markerad i blå text. ©Lantmäteriet.

Skärmen består av element i laminerat härdat glas som är fästa i aluminiumprofiler och pelare i varmförzinkat stål. Grundläggningen består av betongfundament förutom i närheten av stora träd där grundläggningen består av stålfundament. Skärmens höjd varierar längs med elementen, men ligger approximativt mellan 2-3 m. Totala längden för bullerskyddsskärmens finns inte angiven i planritningen men uppskattas vara > 100 m. Mätningen utfördes 2018-04-10 på det element som ansågs ha minst reflekterande objekt i närheten. En sammanställning av bullerskyddsskärmens specifikationer samt information gällande mättillfället finns i tabell 4. Skärmen bedömdes vara helt torr under mättillfället.

**Tabell 4:** Sammanställande information om bullerskyddsskärmens specifikationer och om själva mättillfället.

<b>Information bullerskyddsskärm Fridhemsplan</b>	
Material element:	Laminerat härdat glas 12 mm fäst i aluminiumprofiler
Material pelare:	Varmförzinkade stålstolpar 160 mm
Dimensioner:	H: 2,5 m, B: 1,9 m (för uppmätt element) fäst i 0,25 m högt betongfundament
$h_S$ vid mätningen	1,5 m
Tillverkare:	Ekströms glas/Frijo
Uppförd:	År 2014
Mätdatum:	2018-04-10
Lufttemperatur:	ca. 5-7 °C
Vindhastighet:	ca. 3-4 m/s

Ett fotografi av bullerskyddsskärmens högtalaren och metallrutnätet med mikrofonerna monterad framför visas i figur 10.



**Figur 10:** Det uppmätta elementen hos bullerskyddsskärmen vid Fridhemsplan, med högtalaren och metallrutnätet med mikrofonerna monterade på sina positioner framför skärmen.

### 3.3.2 Bullerskyddsskärm intill Lidingövägen vid Östermalms IP

Vid Östermalms IP intill Lidingövägen uppförde Stockholms stad en så kallad grön bullerskyddsskärm år 2016 för att minska bullernivån på idrottsplatsen (Stockholms stad, 2018). Skärmens geografiska position illustreras i figur 11.



**Figur 11:** Bullerskyddsskärmens ungefärliga geografiska placering intill Lidingövägen vid Östermalms IP i Stockholm. Bullerskyddsskärmen är markerad som en röd linje och Lidingövägen är markerad i blå text. ©Lantmäteriet.

Bullerskyddsskärmen är egenkonstruerad av Stockholms stad och består av en blandning av sträckmetall i rosttrögt stål varvat med växter. Bland annat består skärmen av växter som stensöta, blodnäva, rödfibbla, sandnejlika och silververonika. Skärmen har även sektioner med LED-belysning. Den totala längden på skärmen är ungefär 160 m och elementens höjd är 2 m (Stockholms stad, 2018). Mätförfarandet skedde 2018-04-14 på två skärmelement då elementen inte var homogena. Mätning på elementen med LED-belysning utfördes ej. Sammanställande information kring skärmens specifikationer och kring själva mättillfället visas i tabell 5. Skärmen upplevdes vara torr på ytan men förmodades kunna vara fuktig inuti.

**Tabell 5:** Information gällande bullerskyddsskärmens specifikationer samt mättillfället.

<b>Information bullerskyddsskärm Lidingövägen</b>	
Material:	Sträckmetall i rosttrögt stål varvat med växter och LED-belysning
Dimensioner:	H: 2 m, B: 1,15 m (för uppmätta element) med 0,6 m hög botten i rosttrögt stål
$h_S$ vid mätningen	1,6 m
Tillverkare:	Egenkonstruerad av Stockholms stad
Uppförd:	År 2016
Mätdatum:	2018-04-14
Lufttemperatur:	ca. 12-15 °C
Vindhastighet:	ca. 3 m/s

De två skärmelementen som uppmättes visas i figur 12.



(a)



(b)

**Figur 12:** De två skärmelementen som uppmättes vid Lidingövägen. Elementet i (a) benämns skärmelement 1 och elementen i (b) benämns skärmelement 2.

Då skärmelement 2 (se figur 12) hade mycket utstickande vegetation placerades metallrutnätet med mikrofonerna på ett avstånd av 0,25 m från den mest utstickande delen av skärmen då detta är givet i standarden.

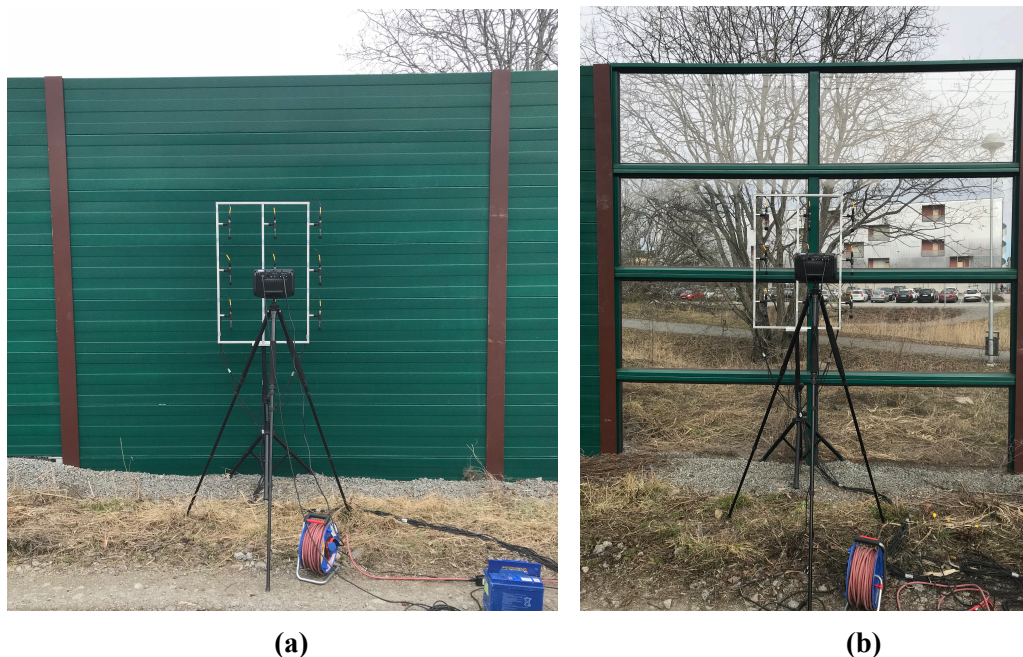
### 3.3.3 Bullerskyddsskärm i närheten av järnvägsstationen i Knivsta

Bullerskyddsskärmen i Knivsta är placerad intill järnvägen i närheten av Knivsta station och har en totallängd på ungefär 720 m. Dess placering visas i figur 13.



**Figur 13:** Bullerskyddsskärmens ungefärliga geografiska placering i närheten av järnvägsstationen i Knivsta. Bullerskyddsskärmen är markerad som en röd linje och Knivsta station är markerad med en blå ring. ©Lantmäteriet.

Skärmen är uppdelad i två olika typer av sektioner, där den ena består av aluminium och den andra av akrylglas. Delen av aluminium är färgad grön och är belagd med polyesterpulver och fylld med mineralull. Dess frontpanel är perforerad. Sidan hos aluminiumsektionen som är riktad mot tågrälsen uppges vara högabsorberande enligt standard EN 1793-1. Detta innebär att sektionen tidigare är testad i laboratorium, vilket har utförts av ett företag år 2010 på uppdrag av tillverkaren Forster. Sektionen är även CE-märkt enligt EN 14388:2005. Sektionen som består av akrylglas är transparent men har även ett ramsystem av aluminiumprofiler. Akrylglas-sektionen uppges vara reflekterande enligt EN 1793-1 och även denna sektion är CE-märkt enligt EN 14388:2005. Den totala skärmen består av betydligt fler aluminiumsektioner än akrylassektioner, vilka visas i figur 14.



**Figur 14:** Bullerskyddsskärmen intill järnvägen i Knivsta som består av element i perforerad aluminium belagd med mineralull och polyesterpulver (a) samt akrylglas (b).

Mätningen utfördes 2018-04-19 på två skärmelement för aluminiumsektionen och ett skärmelement för akrylglasssektionen. Information kring skärmens specifikationer samt om mättillfället ges i tabell 6. Båda sektionerna hos skärmen bedömdes vara torra, dock kan det inte uteslutas att det kan ha funnits fukt i mineralullen hos aluminiumsektionen.

**Tabell 6:** En sammanställning av information om bullerskyddsskärmens specifikationer samt om mättillfället.

<b>Information bullerskyddsskärm Knivsta</b>	
Material sektion 1:	Polyesterpulverbelagd aluminium fylld med 40 mm tjock mineralull
Material sektion 2:	Akrylglas 15 mm fäst i aluminiumprofiler
Dimensioner:	H: 3,75 m, B: 3,85 m (för samtliga uppmätta element)
$h_s$ vid mätningen	1,88 m
Tillverkare:	ATA, genom Forster
Uppförd:	År 2014
Mätdatum:	2018-04-19
Lufttemperatur:	ca. 16-18 °C
Vindhastighet:	ca. 2-3 m/s

### 3.3.4 Laborationsdata för ljudabsorption

För bullerskyddsskärmarna intill Drottningholmsvägen vid Fridhemsplan och intill Lidingövägen vid Östermalms IP har inga laborationstester utförts innan uppförandet av skärmarna. För bullerskyddsskärmen intill järnvägen i Knivsta har aluminiumsektionen tidigare testas i laboratorium enligt mätstandard EN 1793-1, vilket har utförts av ett företag på uppdrag av tillverkaren Forster, som är underleverantör till ATA.

Laborationsresultat från testerna har erhållits från ATA, som har levererat skärmen till Knivsta kommun. Laborationsdata för akrylglassektionen har däremot inte kunnat erhållas (sektionen som uppgavs vara reflekterande). Vid beräkningen av  $DL_{\alpha}$  som utfördes vid laborationstestet av aluminiumsektionen hade det normaliserade trafikbullerspektrumet använts. Resultaten för laborationsmätningarna för aluminiumsektionen redovisas under avsnitt 4.2 i samband med resultaten från fältmätningen.

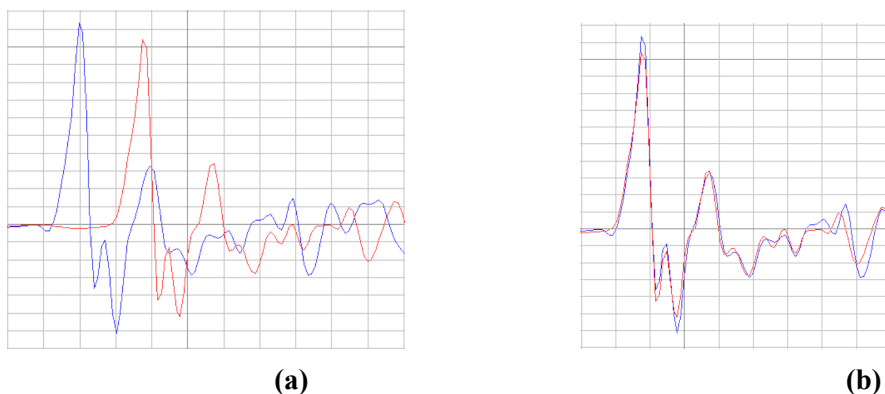
### **3.4 BEARBETNING AV MÄTDATA GENOM SIGNALANALYS**

Under varje mätning sparades alla mätfiler direkt i programvaran EASERA. I denna programvara kunde varje mätning från respektive mikrofon visualiseras med signalens amplitud på y-axeln (i [Pa]) och tid (i [s]) på x-axeln. För att vidare kunna bearbeta mätdata enligt specifikationerna i standarden sparades filerna för varje referensposition i en wav-fil som kunde importeras till programvaran MATLAB, där större delen av bearbetningen utfördes. Den slutgiltiga bearbetningen, vilket inkluderade beräkningen av  $RI$  och  $DL_{RI}$ , genomfördes i programvaran Microsoft Excel. I detta avsnitt kommer först bearbetningen för huvuddelen av komponenterna som ingår i  $RI$  att beskrivas, vilket representerar bearbetningen av signalerna från mätningen som utfördes framför bullerskyddsskärmen och mätningen i frifält. Detta är huvudparten av signalanalysen. Beräkningar för resterande komponenter i  $RI$  samt beräkningar för andra faktorer som behövdes beskrivs sedan separat, under avsnitt 3.4.5.

#### **3.4.1 Bearbetning i EASERA**

För varje referensposition utfördes ett flertal mätningar för att kontrollera högtalarens position i förhållande till mikrofonerna samt för att säkerhetsställa att mätningarna hade gått korrekt till. Därmed började mätevalueringen med att studera de mätningar som hade utförts för samma referensposition där högtalarens position var korrekt. Inga större avvikelser kunde urskiljas mellan dessa mätningar och således valdes en av mätfilerna för varje referensposition för den fortsatta bearbetningen.

Innan filerna importerades till MATLAB från EASERA justerades frifältsmätningarna genom att flytta signalerna på tidsaxeln. Signalerna från frifältsmätningarna för respektive mikrofon justerades manuellt så att dess högsta amplitud placerades på samma ställe som den högsta amplituden för signalerna från mätningarna framför bullerskyddsskärmen. Detta för att senare kunna utföra subtraktionstekniken, där signalen från frifältsmätningen skulle subtraheras från signalen från mätningen framför skärmen. Ett exempel på hur en signal från en frifältsmätning justerades till att överensstämma med en signal som är uppmätt framför bullerskyddsskärmen visas i figur 15.



**Figur 15:** Förstoring av ett impulssvar kring de högsta amplituderna för det direkta ljudet för två signaler som uppmätts av mikrofon 5, där signalen i blått är signalen som mätts i frifält och signalen i rött är signalen som mätts framför bullerskyddsskärmen. I (a) visas signalerna innan frifältssignalen (i blått) justerats i tidsdomänen och i (b) visas hur frifältssignalen (i blått) har justerats till att överensstämma med den högsta amplituden hos signalen som mätts framför bullerskyddsskärmen (i rött).

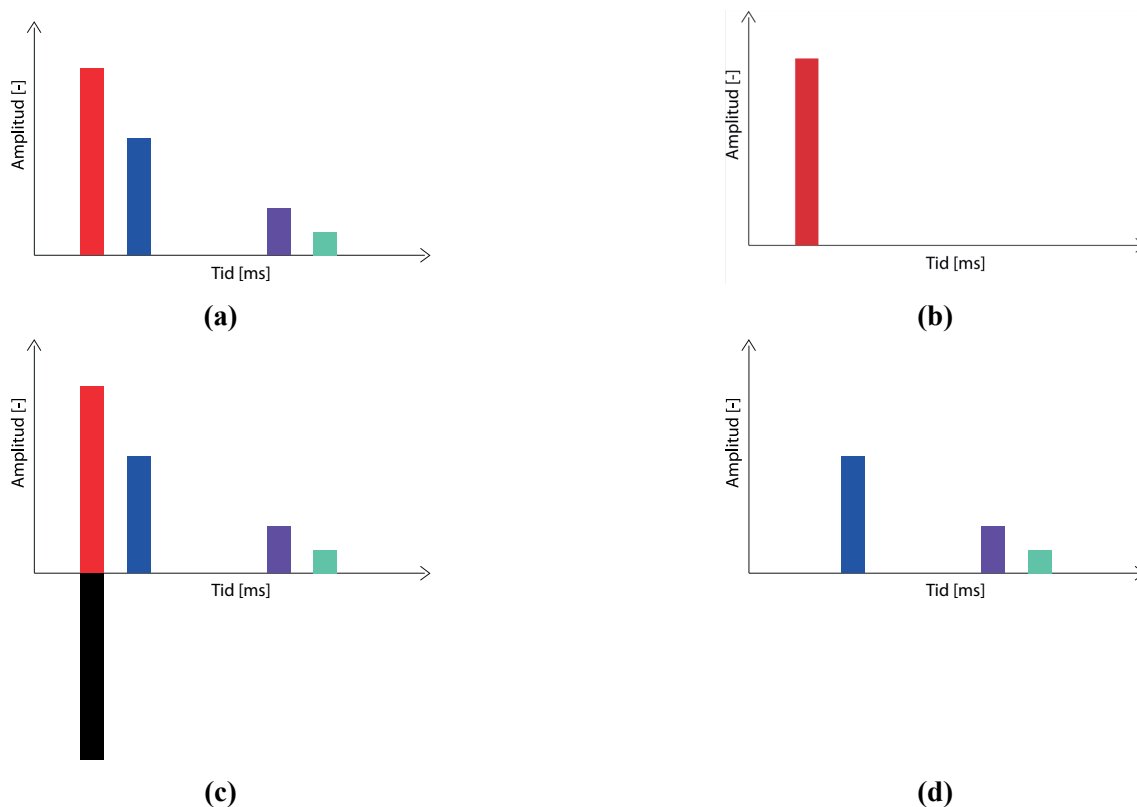
### 3.4.2 Bearbetning i MATLAB

I MATLAB behövde signalerna först denormaliseras genom att multiplicera varje signal med den högsta amplituden från respektive mätning, vilket tidigare hade noterats i EASERA. För att kunna utföra subtraktionstekniken behövde signalen från frifältsmätningen först skiftas i frekvensdomänen. Detta eftersom en justering enbart i tidsdomänen inte är tillräckligt, då signalen är frekvensberoende. Varför ett skifte överhuvudtaget behöver göras beror på att subtraktionen kräver att högtalarens och metallrutnätets relativa positioner är konstanta. Därmed behöver de vara helt lika för mätningen i frifält och mätningen framför bullerskyddsskärmen. Detta är svårt eftersom terrängen ofta är oregelbunden och när utrustningen flyttas mellan att vara placerad framför skärmen och i frifält finns inga garantier att positioner inte har förändrats (Swedish Standards Institute, 2016).

För att skifta frifältssignalen i frekvensdomänen transformerades frifältssignalen för respektive mikrofon genom användning av *Fast Fourier Transform*, över samplingshastigheten  $f_s$ . Transformen multiplicerades sedan med faktorn  $e^{i2\pi fn\Delta\tau}$ , där  $f$  är frekvensaxeln,  $n$  antal skiftade steg och  $\Delta\tau$  stegförändringen i frekvensdomänen, som skulle vara  $\frac{1}{50}$  av  $\Delta t$ , där  $\Delta t$  är stegförändringen i tidsdomänen ( $\frac{1}{f_s}$ ). Antal skiftade steg  $n$  var  $\pm 100$ . För att hitta vilket  $n$  som ger det bästa skiftet beräknades skillnaderna i kvadrat kring den maximala amplituden av signalen mellan impulssvaret för signalen som mätts i frifält och impulssvaret för signalen som mätts framför skärmen. Summan av dessa beräknades sedan, där det  $n$  som gav den minsta summan var det  $n$  som valdes för att utföra skiftet. Efter att fouriertransformen multiplicerats med faktorn  $e^{i2\pi fn\Delta\tau}$ , med det  $n$  som gav den minsta summan, utfördes en inverstransform vilket innebar att den skiftade frifältssignalen transformerades tillbaka till tidsdomänen (Swedish Standards Institute, 2016). Skiftet av frifältssignalen i frekvensdomänen kan sammanfattas genom

$$h_{i,k,skiftad}(t) = F^{-1}[F[h_{i,k}(t)] \cdot e^{i2\pi fn\Delta\tau}] \quad (10)$$

där  $h_{i,k,skiftad}(t)$  är den skiftade frifältssignalen (i frekvensdomänen) för mikrofon  $k$ ,  $F$  fouriertransform,  $h_{i,k}(t)$  frifältssignalen innan skiftet i frekvensdomänen för mikrofon  $k$  och  $e^{i2\pi f n \Delta\tau}$  den skiftande faktorn som är beskriven ovan (Garai & Guidorzi, 2013). När detta skifte hade utförts justerades även frifältssignalens amplitud så att den överensstämde med amplituden hos signalen som uppmätts framför bullerskyddsskärmen. Efter detta subtraherades den skiftade och amplitudjusterade frifältssignalen ( $h_{i,k,skiftad}(t)$  i ekvation 10) från signalen som hade uppmätts framför skärmen. Detta utfördes för samtliga nio mikrofoner för respektive referensposition. Subtraktionen innebär att den direkta komponenten i impulssvaret från mätningen som mätts framför skärmen elimineras och enbart den reflekterande komponenten återstår, som benämns  $h_{r,k}(t)$  i ekvation 8 (Swedish Standards Institute, 2016). Denna subtraktion behöver utföras för att identifiera utseendet hos den direkta ljudkomponenten, vilket fås genom frifältsmätningen, eftersom det direkta och reflekterade ljud som uppmätts framför bullerskyddsskärmen kommer att överlappa (Behler m.fl., 2012). Subtraktionsteknikens princip visas även visuellt i figur 16 (Swedish Standards Institute, 2016).



**Figur 16:** Förenklad illustration av subtraktionsteknikens princip som behöver användas vid beräkningen av  $RI$  (ekvation 8). I (a) visas impulssvaret från mätningen som mäts framför skärmen, där den röda stapeln är det direkta ljudet och den blå stapeln är det reflekterade ljudet. Den lila och gröna stapeln är markreflektion och eventuella andra reflektioner. I (b) visas impulssvaret från mätningen i frifält, där den röda stapeln också visar det direkta ljudet. Subtraktionstekniken innebär sedan att (b) subtraheras från (a), vilket visas i (c), där det direkta ljudet från (b) är markerat i svart. I (d) visas det som återstår efter subtraktionen, det vill säga den reflekterande komponenten samt markreflektion och andra eventuella reflektioner. Bilderna är ej skalnliga.



Subtraktionens effektivitet undersöks sedan genom att beräkna reduktionsfaktorn  $R_{sub}$  som definieras enligt (Swedish Standards Institute, 2016):

$$R_{sub} = 10 \lg \left[ \frac{\int_{t_{p,k}-0,5ms}^{t_{p,k}+0,5ms} |h_{i,k,FF}(t)|^2 dt}{\int_{t_{p,k}-0,5ms}^{t_{p,k}+0,5ms} |h_{i,k,RES}(t)|^2 dt} \right] \quad (11)$$

där

- $h_{i,k,FF}$  = infallande referenskomponenten i impulssvaret från frifältsmätningen vid mikrofon  $k$  (innan subtraktionen utförts)
- $h_{i,k,RES}$  = den resterande komponenten i impulssvaret från mätningen framför bullerskyddsskärmen vid mikrofon  $k$  (efter subtraktionen)
- $t_{pk}$  = tidpunkten där den första och högsta amplituden hos den infallande komponenten hos impulssvaret är lokaliserad, vid mikrofon  $k$  (innan subtraktionen)
- $k$  = mikrofonnummer, där  $k = 1, \dots, 9$

$R_{sub}$  beräknas i dB och innebär att subtraktionens effektivitet fås genom att beräkna decibelnivåminskningen hos det direkta ljudet, vilket utförs genom att jämföra energin  $\pm 0,5$  ms runt den direkta komponentens högsta amplitud före och efter subtraktionen. Om  $R_{sub} < 10$  dB är subtraktionen inte tillräckligt bra (Swedish Standards Institute, 2016).

För att beräkna RI enligt ekvation 8 användes signalen för den reflekterande komponenten som återstod efter subtraktionen,  $h_{r,k}(t)$ , samt den ursprungliga signalen från frifältsmätningen,  $h_{i,k}(t)$ , det vill säga signalen från frifältsmätningen som inte hade skiftats i frekvensdomänen. Enligt ekvation 8 skulle  $h_{r,k}(t)$  och  $h_{i,k}(t)$  multipliceras med varsitt tidsfönster för respektive mikrofon, som benämns  $w_{r,k}(t)$  respektive  $w_{i,k}(t)$  i ekvation 8. Tidsfönstren filtrerar signalerna och kallas för *Adrienne temporal window*. Adrienne-fönstren utformas på så sätt att de första 0,5 ms har en form av ett Blackman-Harris fönster, en platt del i mitten och tillslut en del till höger som också har en form av ett Blackman-Harris fönster. Fördelningen mellan den platta delen i mitten av Adrienne-fönstret och den högra delen skulle vara 7/3. Ett Blackman-Harris fönster av längd  $T_{W,BH}$  beräknas enligt

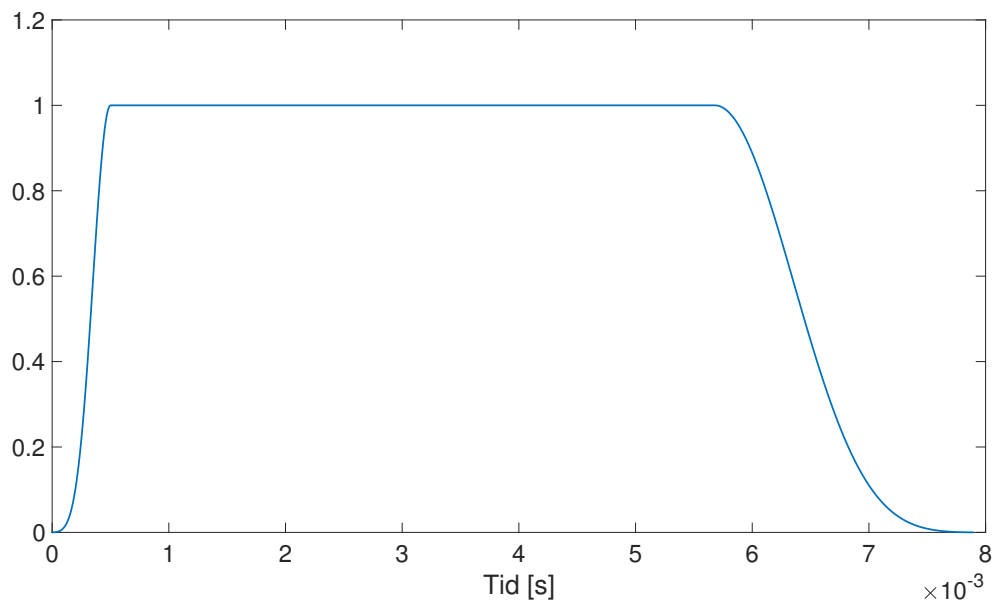
$$w(t) = a_0 - a_1 \cos\left(\frac{2\pi t}{T_{W,BH}}\right) + a_2 \cos\left(\frac{4\pi t}{T_{W,BH}}\right) - a_3 \cos\left(\frac{6\pi t}{T_{W,BH}}\right) \quad (12)$$

där

- $a_0 = 0,35875$   
 $a_1 = 0,48829$   
 $a_2 = 0,14128$   
 $a_3 = 0,01168$

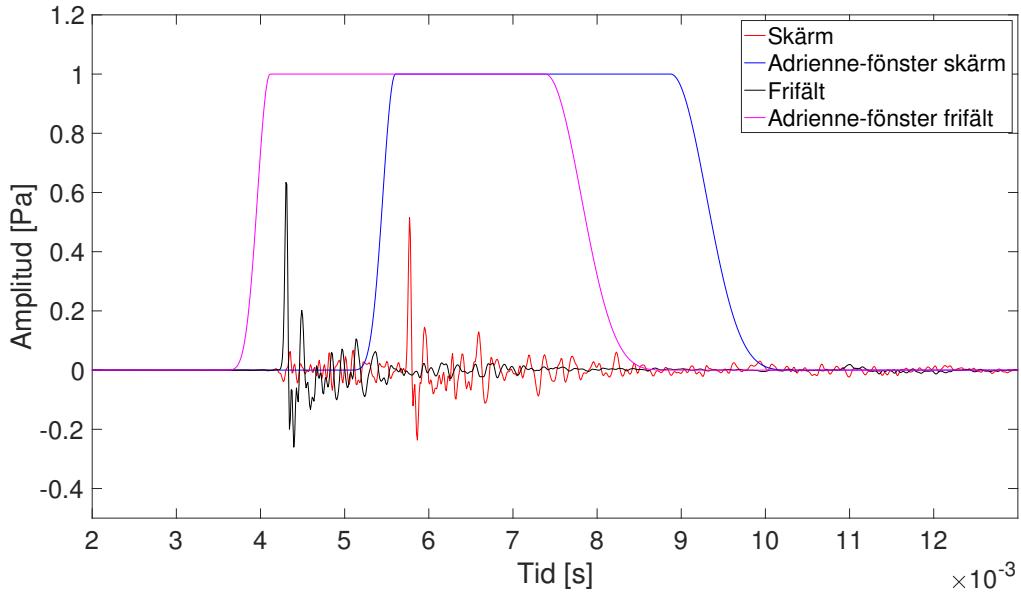
och  $0 \leq t \leq T_{W,BH}$ . Adrienne-fönstrets form implementerades i MATLAB med hjälp av ovanstående ekvation (ekvation 12). Ett standard-Adrienne-fönster har en totallängd på

7,9 ms och används för bullerskyddsskärmar som är  $\geq 4$  m höga. För bullerskyddsskärmar med en höjd  $\leq 4$  m kommer bredden av Adrienne-fönstret att behöva vara mindre än dess standardlängd, för att exkludera markreflektionen. Hur Adrienne-fönstret med standardlängden ser ut visualiseras i figur 17 (Swedish Standards Institute, 2016).



**Figur 17:** *Formen hos ett Adrienne-fönster med en standardlängd på 7,9 ms.*

För signalen som mätts framför bullerskyddsskärmen, och som genomgått subtraktionstekniken, skulle Adrienne-fönstret starta sin platta del 0,2 ms framför den maximala amplituden hos den reflekterande komponenten och avslutas innan markreflektionen. För Adrienne-fönstret för signalen som mätts i frifält skulle dess platta del starta 0,2 ms framför den maximala amplituden hos den direkta komponenten och också avslutas innan markreflektionen. Adrienne-fönstren skulle ha samma längd för signalen som mätts i frifält och för signalen som mätts framför skärmen, vilket innebar att bredden bestämdes av signalen som mätts framför skärmen (Swedish Standards Institute, 2016). Ett exempel på hur Adrienne-fönstren placerades för de båda signalerna för mikrofon 5 vid ett av mättillfällena visas i figur 18.



**Figur 18:** Signalerna som uppmättes för mikrofon nummer 5 för skärmen vid Fridhemsplan. Signalen som mättes i frifält är markerad i svart och signalen som mättes framför skärmen är markerad i rött (som genomgått subtraktionen). Respektive Adrienne-fönster visas även där Adrienne-fönstret för frifältssignalen är markerad i lila och signalen som uppmättes framför skärmen är markerad i blått. Den svarta toppen är direktljudet i frifält och den röda toppen är reflektionen som sker mot skärmen.

Adrienne-fönstrens start för signalerna som mätts i frifält valdes genom att notera var på tidsaxeln de maximala amplituderna inträffade för de direkta komponenterna. För de reflekterande komponenterna, från signalerna som hade mätts framför skärmen, användes teoretiska beräkningar för var den reflekterande komponenten borde hamna i förhållande till dess direkta ljudkomponent, vilket fanns givet i standarden (beskrivning kring detta finns under avsnitt 3.4.5 och är givet i tabell 9). Det ska noteras att denna beräkning är beroende av ljudets hastighet  $c$ , som beräknades genom användning av luftens temperatur vid varje mättillfälle (ekvation 1, där  $q$  sattes till 0 då information om luftfuktigheten inte fanns att tillgå). Luftens temperatur vid mättillfällena är givna i intervall i tabell 4-6, och ett medelvärde av temperaturen för varje intervall beräknades och användes för att beräkna respektive  $c$ . Avslut hos Adrienne-fönstren valdes genom att beräkna var markreflektionen teoretiskt förväntades inträffa, vilket beskrivs under avsnitt 3.4.5.

Adrienne-fönstren multiplicerades sedan med respektive signaler för varje mikrofon, vilket är ekvivalent med  $h_{r,k}(t) \cdot w_{r,k}(t)$  respektive  $h_{i,k}(t) \cdot w_{i,k}(t)$  i ekvation 8. Dessa kvadratiserades och fouriertransformerades sedan vilket är samma sak som signalernas energi. Efter detta utfördes integrering i respektive tersband från 100-5000 Hz (tersbanden visas i tabell 2). Det som utfördes i ekvation 8 var således

$$\frac{\int_{\Delta f_j} |F [h_{r,k}(t) \cdot w_{r,k}(t)]|^2 df}{\int_{\Delta f_j} |F [h_{i,k}(t) \cdot w_{i,k}(t)]|^2 df} \quad (13)$$

Korrektionsfaktorn  $C_{dir,k}(\Delta f_j)$  som ingår i ekvation 8 beräknades även i MATLAB, hur detta gick till beskrivs under avsnitt 3.4.5.

### 3.4.3 Bearbetning i Microsoft Excel

Den slutgiltiga beräkningen av  $RI$  enligt ekvation 8 samt beräkningen av  $DL_{RI}$  utfördes i Microsoft Excel. Beräkningarna för korrektionsfaktorerna som ingick i ekvationen för att beräkna  $RI$  (ekvation 8) finns förklarade i avsnitt 3.4.5. För beräkningen av  $DL_{RI}$ , enligt ekvation 9 behövdes  $L_i$ , vilket är den A-vägda ljudtrycksnivån från det normaliserade trafikbullerspektrumet, som definierat i EN 1793-3. För mätobjekten i Knivsta användes även  $L_i$  från det normaliserade spektrumet för järnvägsbuller, som definierat i standard 16272-3-2:2014 (se figur 7).

För bullerskyddsskärmen vid Lidingövägen uppmättes två skärmelement och således beräknades ett medelvärde av  $RI$  och  $DL_{RI}$  för detta mätobjekt. För bullerskyddsskärmen i Knivsta beräknades också medelvärden av  $RI$  och  $DL_{RI}$  eftersom två skärmelement för aluminiumsektionen hade uppmätts. I Knivsta hade också ett skärmelement för akrylglassektionen uppmätts, men eftersom denna sektion bestod av ett helt annat material än aluminiumsektionen så behandlades akrylglassektionen och aluminiumsektionen separat. För bullerskyddsskärmen i Knivsta utfördes en jämförelse mellan  $DL_{RI}$  för de olika sektionerna när det normaliserade trafikbullerspektrumet respektive det normaliserade spektrumet för järnvägsbuller användes, för att analysera eventuella skillnader vid användning av olika spektrum. Om  $RI$  översteg 1 sattes värdet till 0,99, eftersom det är specificerat i standarden att  $RI$  får vara max 0,99 vid beräkningen av  $DL_{RI}$ .

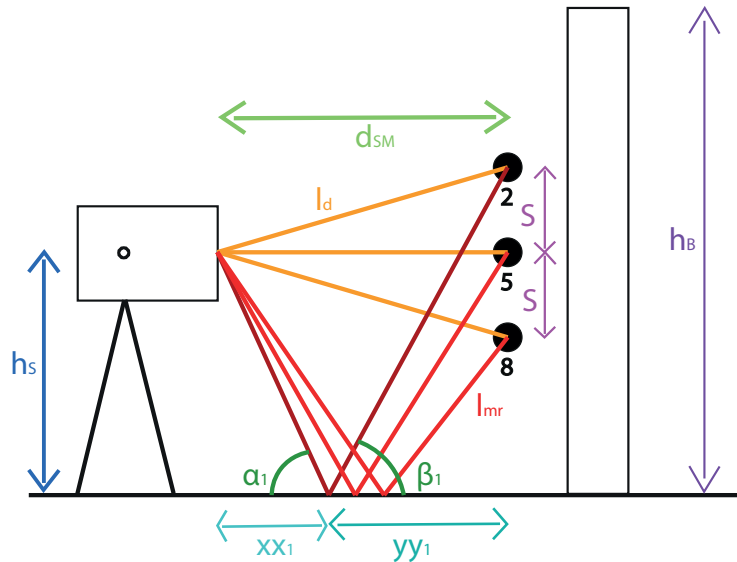
### 3.4.4 Begränsning för låga frekvenser

Begränsningen för låga frekvenser,  $f_{min}$ , beror på bredden av Adrienne-fönstret, vilket i sin tur beror på de minsta dimensionerna hos bullerskyddsskärmen (höjden eller längden, beroende på vilken parameter som är minst). Inom Adrienne-fönstret ska inte markreflektionen eller diffraktionen som uppstår på grund av skärmens kanter ingå, utan de ska lämnas utanför. Vanligtvis är bullerskyddsskärmars längd större än dess höjd, vilket innebär att den kritiska komponenten för  $f_{min}$  är höjden av skärmen.  $f_{min}$  beräknades i MATLAB genom användning av det Adrienne-fönster som hade minst längd, vilket motsvarar bredden hos Adrienne-fönstren för mikrofonerna i den undre raden (mikrofon 7-9) eftersom markreflektionen når dessa mikrofoner fortast (se avsnitt 3.4.5). Detta Adrienne-fönster fouriertransformerades genom användning av *Fast Fourier Transform* och  $f_{min}$  hittades där energin nådde sitt första minimum. Frekvenser under  $f_{min}$  är inte giltiga och kan enbart visas för information. Det beräknade  $f_{min}$  för respektive mätplats jämfördes med tersbanden i tabell 2 för att hitta det giltiga frekvensområdet.

### 3.4.5 Beräkningar

#### Markreflektion

I figur 19 visas det direkta ljudets väg från högtalaren till mikrofonerna ( $l_d$ ) samt vägen för det ljud som först reflekteras mot marken innan det når mikrofonerna ( $l_{mr}$ ).



**Figur 19:** Avstånd och vinklar som användes för att teoretiskt beräkna när markreflektionen förväntades inträffa. Bilden är sedd från sidan där mikrofonernas vertikala mittenrad visas. Ljud som utsänds från högtalaren och direkt når mikrofonerna benämns  $l_d$  och ljud som först reflekteras mot marken innan det når mikrofonerna benämns  $l_{mr}$ . Den vinröda linjen står för markreflektionen som når mikrofon 2. Till denna är vinklarna  $\alpha_1$  respektive  $\beta_1$  markerade samt respektive avstånd  $xx_1$  och  $yy_1$  där  $xx_1$  är det horisontella avståndet mellan högtalaren och punkten där markreflektionen inträffar och  $yy_1$  är det horisontella avståndet mellan punkten där markreflektionen inträffar och mikrofonens position.  $h_s$  är hälften av höjden av skärmen ( $h_B/2$ ),  $s$  avståndet mellan mikrofonerna (0,4 m) samt  $d_{SM}$  avståndet mellan högtalarens framsida och mikrofonerna (1,25 m). Bilden är ej skalendig.

Från figur 19 ovan kan samband för avståndet för det direkta ljudet respektive det markreflektade ljudet fås fram. Det direkta ljudet från högtalaren till mikrofon 2, 5 respektive 8 benämns  $l_{d,1}$ ,  $l_{d,2}$  respektive  $l_{d,3}$ , där siffrorna indikerar raden i metallrutnätet. Dessa avstånd kan beräknas enligt

$$l_{d,1} = \sqrt{d_S^2 + s^2} \quad (14)$$

$$l_{d,2} = d_S \quad (15)$$

$$l_{d,3} = \sqrt{d_S^2 + s^2} \quad (16)$$

där  $d_S$  är det horisontella avståndet i m mellan högtalarens framsida och mikrofon nummer 5 i metallrutnätet (1,25 m) och  $s$  är det ortogonala avståndet i m mellan mikrofonerna (0,4 m). Ljudet som reflekteras mot marken och sedan når mikrofon nummer 2, 5 respektive 8 benämns  $l_{mr,1}$ ,  $l_{mr,2}$  respektive  $l_{mr,3}$  (figur 19). Även här indikerar siffrorna vilken rad

respektive mikrofon är placerad i. Dessa avstånd kan beräknas enligt

$$l_{mr,1} = \sqrt{h_S^2 + xx_1^2} + \sqrt{(h_S + s)^2 + yy_1^2} \quad (17)$$

$$l_{mr,2} = \sqrt{h_S^2 + xx_2^2} + \sqrt{h_S^2 + yy_2^2} \quad (18)$$

$$l_{mr,3} = \sqrt{h_S^2 + xx_3^2} + \sqrt{(h_S - s)^2 + yy_2^2} \quad (19)$$

där  $h_S$  är hälften av höjden på bullerskyddsskärmen,  $xx_1$ - $xx_3$  är de horisontella avstånden mellan högtalarens framsida och respektive punkt där markreflektionen inträffar och  $yy_1$ - $yy_3$  är de horisontella avstånden mellan respektive punkt där markreflektionen inträffar och mikrofonernas position. I figur 19 är  $xx_1$  och  $yy_1$  markerade för markreflektionen som tillhör mikrofon nummer 8. Avstånden  $xx_1$ - $xx_3$  och  $yy_1$ - $yy_3$  kan beräknas genom användning av vinklar, där  $\alpha_1$  och  $\beta_1$  ges som exempel i figur 19 för markreflektionen som tillhör mikrofon nummer 8. Avstånden kan beräknas enligt ekvationerna 20-25:

$$xx_1 = \frac{d_S \cdot h_S}{2h_S + s} \quad (20)$$

$$xx_2 = \frac{d_S \cdot h_S}{2h_S} \quad (21)$$

$$xx_3 = \frac{d_S \cdot h_S}{2h_S - s} \quad (22)$$

$$yy_1 = d_S - xx_1 \quad (23)$$

$$yy_2 = d_S - xx_2 \quad (24)$$

$$yy_3 = d_S - xx_1 \quad (25)$$

där  $d_S$  är avståndet mellan högtalarens framsida och mikrofon nummer 5 (1,25 m),  $h_S$  hälften av höjden hos bullerskyddsskärmen och  $s$  det ortogonala avståndet mellan mikrofonerna (0,4 m). Sedan kan tidsfördröjningen mellan det direkta ljudet och det markreflekterade ljudet beräknas för mikrofon nummer 2, 5 respektive 8 enligt

$$t_f = \frac{l_{mr} - l_d}{c} \quad (26)$$

där  $t_f$  är tidsfördröjningen i s,  $l_{mr}$  avståndet i m för markreflektionerna som är beskrivna i ekvationerna 17-19,  $l_d$  avståndet i m för det direkta ljudet som visas i ekvationerna 14-16 och  $c$  är ljudets hastighet i luft i m/s. Därmed beräknades  $t_f$  för mikrofon 2, 5 respektive 8 ( $t_{f,1}$ ,  $t_{f,2}$  och  $t_{f,3}$ ) som sedan kunde användas för att beräkna den förväntade markreflektionen. Detta för att bestämma slutet på respektive Adrienne-fönster, vilket beskrivs i avsnitt 3.4.2.  $t_{f,1}$ ,  $t_{f,2}$  och  $t_{f,3}$  användes för alla mikrofonerna i respektive rad i

metallrutnätet.  $c$  beräknades genom användning av ekvation 1 ( $q$  sattes till 0 på grund av att information om luftfuktigheten saknades) där medelvärdet av den rådande lufttemperaturen vid respektive mätplats användes.

### Korrektionsfaktorer

I beräkningen av  $RI$ , som är definierad i ekvation 8, ingår korrektionsfaktorer för geometrisk divergens ( $C_{geo,k}$ ), för ljudkällans riktning ( $C_{dir,k}(\Delta f_j)$ ) samt för förstärkarens inställningar i högtalaren och känslighetsinställningarna hos mikrofonerna ( $C_{gain,k}(\Delta f_g)$ ).  $C_{geo,k}$  finns given i standarden och är listad i tabell 7.

**Tabell 7:** Korrektionsfaktorn för geometrisk divergens,  $C_{geo,k}$ , för respektive mikrofon  $k$  ( $k=1,\dots,9$ ) (Swedish Standards Institute, 2016).

$k$	$C_{geo,k}$ [-]
1	1,80
2	1,87
3	1,80
4	1,87
5	1,96
6	1,87
7	1,80
8	1,87
9	1,80

$C_{dir,k}(\Delta f_j)$ , mättes i frifält vid ett av mättillfällena och innebar att alla mikrofonerna utom mikrofon nummer 5 vinklades ett visst avstånd bakåt från sin ursprungsposition. De horisontella avstånden som respektive mikrofon vinklades bakåt är listade i tabell 8.

**Tabell 8:** De horisontella avstånd som respektive mikrofon  $k$  vinklades bakåt från sin ursprungsposition vid en frifältsmätning för att kunna beräkna  $C_{dir,k}(\Delta f_j)$  (Swedish Standards Institute, 2016).

$k$	Avstånd [m]
1	0,056
2	0,029
3	0,056
4	0,029
5	0,000
6	0,029
7	0,056
8	0,029
9	0,056

$C_{dir,k}(\Delta f_j)$  kunde sedan beräknas med hjälp av den ursprungliga signalen som mätts i

frifält. Beräkningen utfördes i MATLAB enligt (Swedish Standards Institute, 2016):

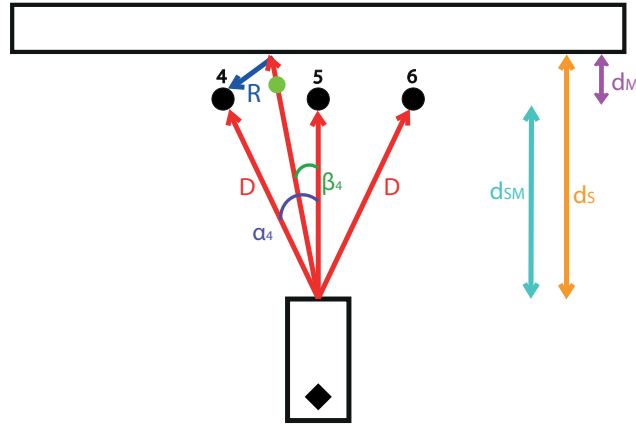
$$C_{dir,k}(\Delta f_j) = \frac{\int_{\Delta f_j} |F [h_{i,k}(t, \alpha_k) \cdot w_{i,k}(t)]|^2 df}{\int_{\Delta f_j} |F [h_{i,k}(t, \beta_k) \cdot w_{i,k}(t)]|^2 df} \quad (27)$$

där

- $\alpha_k$  = vinkeln mellan linjen som kopplar samman centrum av högtalarens framsida till mikrofon nummer 5 och linjen som kopplar samman centrum av högtalarens framsida till mikrofon  $k$  [-]
- $\beta_k$  = vinkeln mellan linjen som kopplar samman centrum av högtalarens framsida till mikrofon nummer 5 och linjen som kopplar samman centrum av högtalarens framsida till den spegelvända reflektionsbanan till mikrofon  $k$  [-]
- $h_{i,k}(t, \alpha_k)$  = infallande referenskomponenten i impulssvaret från frifältsmätningen vid mikrofon  $k$  [-]
- $h_{i,k}(t, \beta_k)$  = infallande referenskomponenten i impulssvaret från frifältsmätningen vid en punkt på den spegelvända reflektionsbanan för mikrofon  $k$  och på ett avstånd  $d_{i,k}$  från centrum av högtalarens framsida [-]
- $w_{i,k}(t)$  = tidsfönstret, *Adrienne temporal window*, för den infallande referenskomponenten i impulssvaret från frifältsmätningen vid mikrofon  $k$  [-]
- $F$  = Fouriertransform [-]
- $j$  = index av frekvensen i tersband (mellan 100-5000 Hz) [-]
- $\Delta f_j$  = bredden av den  $j$ :te frekvensen i tersband [-]
- $k$  = mikrofonnummer, där  $k=1, \dots, 9$

Adrienne-fönstren i ekvation 27 startade 0,2 ms framför de direkta ljudkomponenterna och avslutades innan markreflektionerna, likt beräkningen för *RI* (se ekvation 8 och avsnitt 3.4.2). Vinklarna  $\alpha_k$  och  $\beta_k$  i ekvation 27 illustreras för mikrofon nummer 4 i figur 20. Korrektionsfaktorn  $C_{dir,k}(\Delta f_j)$  beräknades bara en gång eftersom det antas i standarden att ljudkällans riktningsmönster inte ändras, vilket innebär att det räcker med endast en beräkning för varje tersband. Således användes samma  $C_{dir,k}(\Delta f_j)$  för alla beräkningar av *RI* för de olika bullerskyddsskärmarna som undersöktes (Swedish Standards Institute, 2016). Dock var det svårt att vinkla mikrofonerna exakt de horisontella avstånden som visas i tabell 8 vilket gjorde att  $C_{dir,k}(\Delta f_j)$  upplevdes vara en osäker faktor, och därmed beräknades även *RI* för samtliga mätobjekten utan  $C_{dir,k}(\Delta f_j)$  för att kunna utföra en jämförelse av resultaten med och utan  $C_{dir,k}(\Delta f_j)$ .





**Figur 20:** Bild sedd ovanifrån där högtalaren utsänder ett direkt ljud ( $D$ ) som når mikrofonerna och som även når bullerskyddsskärmen. Det direkta ljudet som når bullerskyddsskärmen reflekteras mot skärmen ( $R$ ) och når mikrofon nummer 4. Vinkeln mellan det direkta ljudets bana för mikrofon nummer 5 och det direkta ljudets bana för mikrofon nummer 4 benämns  $\alpha_4$ . Vinkeln mellan det direkta ljudets bana för mikrofon nummer 5 och vinkeln för det direkta ljudets bana som sedan kommer reflekteras mot skärmen och nå mikrofon nummer 4 benämns  $\beta_4$ . Den gröna pricken representerar det ställe där mikrofon nummer 4 vinklas till för att beräkna  $C_{dir}$  för den mikrofonen. Bilden är ej skalenlig.

Korrektionsfaktorn  $C_{gain,k}(\Delta f_g)$  tar hänsyn till förstärkarens inställningar i högtalaren samt känslighetsinställningarna hos varje mikrofon vid förflyttningen från mätning framför bullerskyddsskärmen till frifältsmätning och vice versa, om någon ändring görs. Definitionen av  $C_{gain,k}(\Delta f_g)$  återfinnes i standarden, men har valts att inte beräknas i detta projekt eftersom inställningarna inte ändrades och ansågs således inte påverka mätningarna. Därmed antogs  $C_{gain,k}(\Delta f_g)$  vara 1 i ekvation 8.

### Kontrollering av mätutrustningens positioner

Högtalarens position i förhållande till mikrofonernas position kontrollerades vid varje mätning och beräknades även i efterhand vid bearbetningen av mätdata. Kontrolleringen utfördes genom att beräkna tidsfördröjningen mellan toppen av ljudkomponenten för det direkta ljudet som nådde mikrofon  $k$  (där  $k=1,..,9 \neq 5$ ) och toppen av den direkta ljudkomponenten för mikrofon nummer 5. Detta utfördes både för signalen från frifältsmätningen och för signalen från mätningen framför bullerskyddsskärmen. Tidsfördröjningen beräknades sedan om till ljudbanelängdsskillnader enligt

$$\Delta d_{k,5} = c \cdot \Delta t_{k,5} \quad (28)$$

där  $\Delta d_{k,5}$  är ljudbanelängdsskillnaden i m för mikrofon  $k$  (där  $k=1,..,9 \neq 5$ ),  $c$  ljudets hastighet i luft i m/s och  $\Delta t_{k,5}$  tidsfördröjningen i s för mikrofon  $k$  (där  $k=1,..,9 \neq 5$ ).  $\Delta d_{k,5}$  för varje mikrofon jämfördes sedan med de angivna tabellvärdena för  $\Delta d_{k,5}$  som visas i tabell 9.  $c$  beräknades från medelvärdet av den rådande lufttemperaturen vid respektive mättillfälle, enligt ekvation 1 (där  $q$  sattes till 0, eftersom ingen information om luftfuktigheten fanns att tillgå).

Som nämnt under avsnitt 3.2.1 kontrollerades inte mikrofonernas position i förhållande till bullerskyddsskärmen, eftersom detta inte var praktiskt genomförbart på plats då den reflekterande komponenten var för svår att urskilja. Tabellvärdena som var givna i standarden för denna kontrollering var ljudbanelängdsskillnaderna mellan toppen för ljudkomponenten av det direkta ljudet och toppen för ljudkomponenten av det reflekterade ljudet för signalen som uppmättes framför bullerskyddsskärmen. Dessa räknades om till till tidsfördröjningar enligt

$$\Delta t_k = \frac{\Delta d_k}{c} \quad (29)$$

där  $\Delta t_k$  är tidsfördröjningen i s för mikrofon  $k$  (där  $k = 1, \dots, 9$ ),  $\Delta d_k$  ljudbanelängdsskillnaden för mikrofon  $k$  i m (där  $k = 1, \dots, 9$ ) och  $c$  ljudets hastighet i luft i m/s. Även här beräknades  $c$  från medelvärdet av den rådande lufttemperaturen vid respektive mättillfälle, enligt ekvation 1. Tidsfördröjningarna,  $\Delta t_k$ , användes sedan för att identifiera de reflekterande komponenterna vid bearbetningen av mätdata, vid placeringen av Adrienne-fönstrens start. De givna ljudbanelängdsskillnaderna  $\Delta d_k$  som användes för att beräkna tidsfördröjningarna finns i tabell 9.

**Tabell 9:** Givna värden för ljudbanelängdsskillnaderna  $\Delta d_{k,5}$  och  $\Delta d_k$  för kontrollering av högtalarens respektive mikrofonernas positioner. Den accepterade toleransen  $\epsilon$  är given i parentes och  $k$  är mikrofonnumret (Swedish Standards Institute, 2016).

$k$	$d_{k5}(\epsilon_k)$ [m]	$d_k(\epsilon_k)$ [m]
1	0,122 ( $\pm 0,025$ )	0,467 ( $\pm 0,025$ )
2	0,062 ( $\pm 0,025$ )	0,483 ( $\pm 0,025$ )
3	0,122 ( $\pm 0,025$ )	0,467 ( $\pm 0,025$ )
4	0,062 ( $\pm 0,025$ )	0,483 ( $\pm 0,025$ )
5	0,000 ( $\pm 0,025$ )	0,500 ( $\pm 0,025$ )
6	0,062 ( $\pm 0,025$ )	0,483 ( $\pm 0,025$ )
7	0,122 ( $\pm 0,025$ )	0,467 ( $\pm 0,025$ )
8	0,062 ( $\pm 0,025$ )	0,483 ( $\pm 0,025$ )
9	0,122 ( $\pm 0,025$ )	0,467 ( $\pm 0,025$ )

### Signal-brusförhållande

Signal-brusförhållande beskriver förhållandet mellan signalens styrka och bakgrundsljudets styrka. Signal-brusförhållandet är viktigt att beräkna för att säkerhetsställa att signalen som högtalaren utsänder och bakgrundsnivån på platsen inte har för lika decibelnivåer, så att inte bakgrundsnivån påverkar mätresultaten (Oxford University Press, 2016). Enligt standarden bör signal-brusförhållandet vara  $> 10$  dB över tersbanden för mätresultaten (Swedish Standards Institute, 2016).

Signal-brusförhållandet beräknades både för mätningen i frifält och mätningen framför skärmen. Detta utfördes genom att först placera ett Adrienne-fönster efter markreflektionen för de respektive signalerna, eftersom denna del av det uppmätta ljudet antogs vara ekvivalent med bakgrundsnivåerna på platsen. Det studerades noga att det inte förekom reflektioner från andra objekt inom intervallet där Adrienne-fönstret

placerades. Sedan beräknades energierna för bakgrundsnivån genom att fouriertransformera och kvadratisera signalerna för varje mikrofon. Dessa signaler integrerades i respektive tersband för den giltiga frekvensskalan. Slutgiltiga beräkningen för signal-brusförhållandet utfördes för varje mikrofon  $k$  för både mätningen i frifält och mätningen framför skärmen enligt

$$SNR_k = 10 \cdot \lg \left[ \sum_{\Delta f_j} \left( \frac{\int_{\Delta f_j} |F[h_{x,k} \cdot w_{x,k}]|^2}{\int_{\Delta f_j} |F[h_{x,k} \cdot w_{b,k}]|^2} \right) \right] \quad (30)$$

där  $SNR_k$  är signal-brusförhållandet för mikrofon  $k$  i dB,  $\Delta f_j$  det giltiga frekvensintervallet,  $h_{x,k}$  är  $h_{i,k}$  respektive  $h_{r,k}$  som är beskrivna i ekvation 8 (beroende på om det var frifält eller mätning framför skärmen som signal-brusförhållandet beräknades för),  $w_{x,k}$  är  $w_{i,k}$  respektive  $w_{r,k}$  som också är beskrivna i ekvation 8 och  $w_{b,k}$  är bakgrundsnivåns Adrienne-fönster (Garai & Guidorzi, 2013).

### Mätosäkerhet

Standarden specificerar att det inte finns någon lämplig analytisk modell för att beräkna mätosäkerheten för resultaten, utan istället används standardavvikelsen för reproducerbarhet,  $S_{R,j}$ , som indikator för den kombinerade mätosäkerheten för  $RI$  och  $DL_{RI}$ . Genom *the QUIESST Project* uppmättes  $S_{R,j}$  i varje tersband, vilka är givna i tabell 10.

**Tabell 10:** Standardavvikelsen för reproducerbarhet av  $RI$  ( $S_{R,j}$ ) i varje tersband som används för att uppskatta den kombinerade mätosäkerheten för  $RI$  och  $DL_{RI}$  (Swedish Standards Institute, 2016).

Tersband [Hz]	$S_{R,j}$		
	Median	Låg	Hög
100	0,27	0,23	0,32
125	0,14	0,12	0,18
160	0,09	0,08	0,12
200	0,11	0,09	0,14
250	0,10	0,09	0,13
315	0,10	0,09	0,13
400	0,10	0,08	0,12
500	0,09	0,08	0,12
630	0,11	0,09	0,14
800	0,12	0,11	0,15
1000	0,10	0,09	0,13
1250	0,12	0,10	0,15
1600	0,14	0,12	0,16
2000	0,13	0,11	0,15
2500	0,13	0,11	0,15
3150	0,14	0,12	0,17
4000	0,17	0,15	0,20
5000	0,19	0,16	0,23
$DL_{RI}$ [dB]	0,68	0,54	0,81

$S_{R,j}$  är en uppskattning av den kombinerade mätosäkerheten  $u_j$  och reflektionsindex  $RI_j$  i varje tersband enligt

$$S_{R,j} = u(RI_j) = u_j \quad (31)$$

Ekvation 31 kan sedan användas för att beräkna den expanderande mätosäkerheten  $U_j$ , som är definierad i intervallet

$$[RI_j - U_j, RI_j + U_j] \quad (32)$$

$U_j$  beräknas i sin tur enligt

$$U_j = k_p \cdot u_j \quad (33)$$

där  $k_p$  är en *coverage factor* och  $u_j$  den kombinerade mätosäkerheten som är definierad i ekvation 31. I standarden ges exemplet att använda en konfidensgrad på 95% vilket innebär  $k_p=1,96$  för en Gaussisk fördelning, vilket följaktligen har använts (Swedish Standards Institute, 2016).

Det är noterat i standarden att beräkningarna för mätosäkerheten behöver utvecklas mer, så att enskilda komponenters osäkerhet kan analyseras. Tills mer kunskap finns används  $S_{R,j}$  för att åtminstone kunna få en uppfattning om resultatens osäkerhet (Swedish Standards Institute, 2016).

## 4 RESULTAT

I följande avsnitt har det normaliserade trafikbullerspektrumet använts för beräkningen av  $DL_{RI}$ , om inget annat anges. För de beräknade konfidensintervallen för  $DL_{RI}$  användes de högsta värdena för  $S_{R,j}$  (tabell 10) eftersom detta anges som exempel i standarden.

Resultaten för beräkningarna av  $R_{sub}$ ,  $d_{k,5}$  och  $C_{dir,k}(\Delta f_j)$  redovisas i *Appendix A*. Samtliga  $R_{sub}$  uppvisade värden  $> 10$  dB. De beräknade värdena för  $d_{k,5}$  jämfördes med tabell 9 där samtliga värden låg inom det givna intervallet förutom värdena för mikrofon nummer 9, där värdena var lägre än det givna intervallet, vilket gällde för samtliga mätningar.  $C_{dir,k}(\Delta f_j)$  hade ett utstickande värde för mikrofon nummer 8 vid 5000 Hz (*Appendix A*).

Resultaten för  $RI$  respektive  $DL_{RI}$  med och utan  $C_{dir,k}$  redovisas i *Appendix B* eftersom inga större avvikelser kunde urskiljas. Vid jämförelse av resultaten för  $RI$  och  $DL_{RI}$  när olika exciteringssignaler användes (ESS respektive MLS) för bullerskyddsskärmen i Knivsta kunde inte heller några särskilda avvikelser ses och således återfinns resultaten för detta i *Appendix C*.

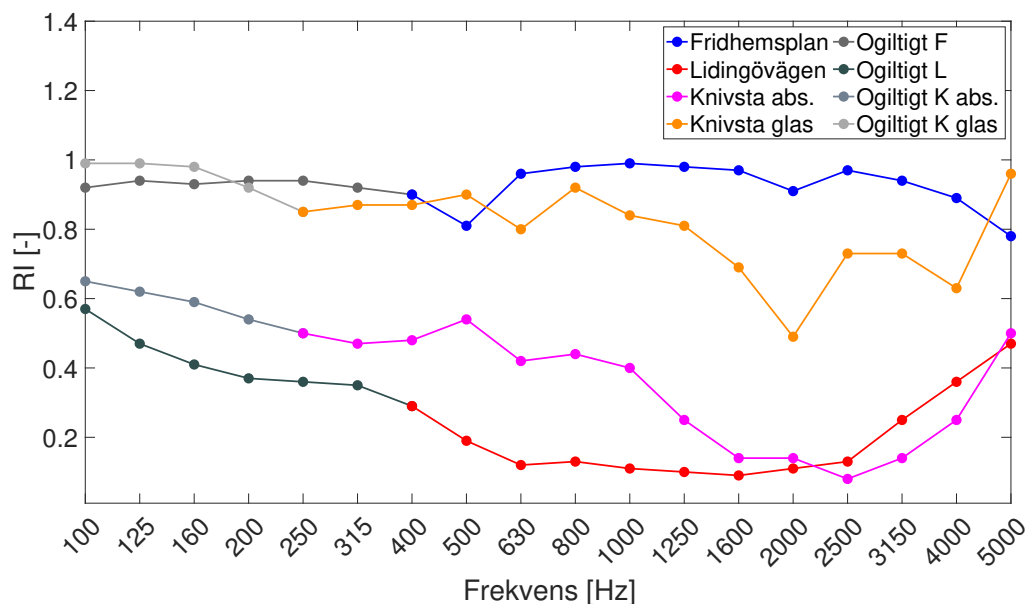
### 4.1 REFLEKTIONSINDEX OCH SAMMANVÄGDA VÄRDEN

Den minsta bredden på Adrienne-fönstren för respektive mätplats tillsammans med begränsningen av låga frekvenser ( $f_{min}$ ) som respektive bredd medförde visas i tabell 11. Även vilket giltigt frekvensintervall som  $f_{min}$  innebar för respektive mätplats visas i tabellen. Den minsta Adrienne-fönsterbredden erhöles från mätningen vid Fridhemsplan och den längsta bredden erhöles från mätningen i Knivsta. Även om mätningen vid Lidingövägen hade en större Adrienne-fönsterbredd än för mätningen vid Fridhemsplan så blev det giltiga frekvensområdet detsamma på grund av tersbandens uppdelning (se tabell 2).

**Tabell 11:** Minsta Adrienne-fönsterbredd, begränsningen för låga frekvenser ( $f_{min}$ ) och giltigt frekvensområde för respektive mätplats.

Mätobjekt	Adrienne-fönsterbredd [ms]	$f_{min}$ [Hz]	Giltiga frekvenser [Hz]
Fridhemsplan	4,0	338	400-5000
Lidingövägen	4,4	298	400-5000
Knivsta	5,9	221	250-5000

I figur 21 illustreras  $RI$  i tersband för varje mätplats. Bullerskyddsskärmen vid Fridhemsplan visar generellt högst  $RI$ -värden över tersbanden, följt av akrylglassektionen i Knivsta (Knivsta glas i figuren). Generellt lägst  $RI$ -värden över tersbanden visas för bullerskyddsskärmen vid Lidingövägen. Aluminiumsektionen i Knivsta (Knivsta abs. i figuren) visar lägre  $RI$ -värden än bullerskyddsskärmen vid Lidingövägen för tersbanden 2500-4000 Hz.



**Figur 21:** *RI i tersband för samtliga mätplatser. Knivsta abs. står för Knivsta absorberande och är aluminiumsektionen för bullerskyddsskärmen i Knivsta och Knivsta glas är akrylglassektionen för bullerskyddsskärmen i Knivsta. Ogiltiga frekvensområden för respektive mätplats markeras i olika grå.*

$DL_{RI}$  för varje mätplats visas i tabell 12. För sektionerna i Knivsta har även  $DL_{RI}$  för samma giltiga frekvensintervall som Fridhemsplan och Lidingövägen utförts för bättre jämförelse. Lägst  $DL_{RI}$  uppvisas för Fridhemsplan följt av glassektionen i Knivsta. Lidingövägen visar högst  $DL_{RI}$  och aluminiumsektionen i Knivsta (Knivsta abs. sektion) har näst högst  $DL_{RI}$ .

**Tabell 12:**  *$DL_{RI}$  för samtliga mätobjekt med tillhörande konfidensintervall. Knivsta abs. sektion är aluminiumsektionen och Knivsta glassektion är akrylglassektionen.  $DL_{RI}$  för Knivsta redovisas både från 250 respektive 400 Hz.*

Mätobjekt	Frekvensint. [Hz]	$DL_{RI}$ [dB]	95% konf.int. $DL_{RI}$ [dB]
Fridhemsplan	400-5000	0,233	[0,00, 1,82]
Lidingövägen	400-5000	8,46	[6,87, 10,1]
Knivsta abs. sektion	250-5000	4,81	[3,22, 6,40]
Knivsta abs. sektion	400-5000	4,97	[3,38, 6,56]
Knivsta glassektion	250-5000	1,01	[0,00, 2,60]
Knivsta glassektion	400-5000	1,03	[0,00, 2,62]

Enskilda  $RI$ -värden i tersband för alla mikrofonpositioner för samtliga skärmar redovisas i Appendix D.

#### 4.1.1 Jämförelse av sammanvägda värden med olika spektrum

En jämförelse mellan  $DL_{RI}$  där det normaliserade trafikbullerspektrumet respektive det normaliserade spektrumet för järnvägsbuller användes för aluminiumsektionen samt för akrylglassektionen i Knivsta ses i tabell 13.  $DL_{RI}$  blev högre med mellan 0,19-0,23 när

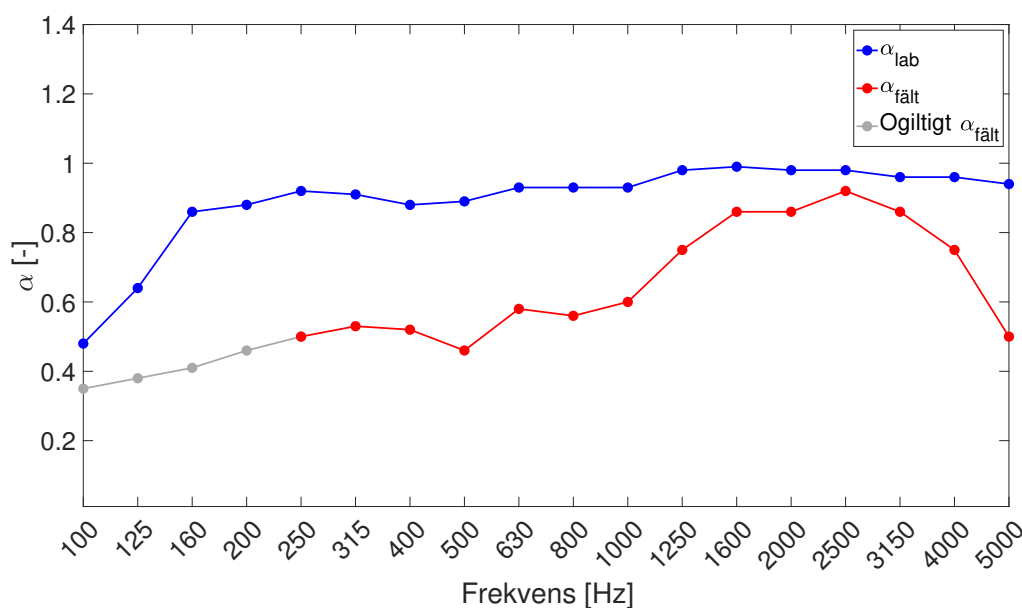
det normaliserade spektrumet för järnvägsbuller användes än när det normaliserade trafikbullerspektrumet användes.

**Tabell 13:**  $DL_{RI}$  för aluminiumsektionen ( $K_{abs}$ ) och glassektionen ( $K_{glas}$ ) i Knivsta när det normaliserade trafikbullerspektrumet respektive det normaliserade spektrumet för järnvägstrafik användes vid beräkningarna.

Mätobjekt	Frekvensint. [Hz]	$DL_{RI}$ [dB]	95% konf. int. $DL_{RI}$ [dB]
K abs. vägtrafik	250-5000	4,81	[3,22, 6,40]
K abs. järnväg	250-5000	5,00	[3,41, 6,59]
K glas vägtrafik	250-5000	1,01	[0,00 2,60]
K glas järnväg	250-5000	1,24	[0,00, 2,83]

## 4.2 JÄMFÖRELSE MELLAN FÄLT- OCH LABORATIONSMÄTNINGAR

En jämförelse av absorptionskoefficienten i tersband för aluminiumsektionen i Knivsta som uppmätts i laboratorium (som utförts av ett företag på uppdrag av tillverkaren) samt i fält illustreras i figur 22. Observera att det är absorptionskoefficienten  $\alpha$  som visas i figuren, istället för reflektionsindexet  $RI$ .  $\alpha$  som uppmätts i laboratorium är markerad som  $\alpha_{lab}$  och  $\alpha$  som uppmätts i fält markeras  $\alpha_{fält}$  (där  $\alpha_{fält}$  har beräknats från  $RI$ , se ekvation 7).  $\alpha_{lab}$  är högre än  $\alpha_{fält}$  för samtliga tersband. Minst skillnad urskiljs vid frekvensen 2500 Hz.  $\alpha_{lab}$  och  $\alpha_{fält}$  har ett liknande utseende, men efter frekvensen 2500 Hz sjunker  $\alpha_{fält}$ , vilket  $\alpha_{lab}$  inte gör.



**Figur 22:** En jämförelse av absorptionskoefficienten som tidigare uppmätts i laboratorium,  $\alpha_{lab}$ , respektive absorptionskoefficienten som uppmätts i fält,  $\alpha_{fält}$ . Det ska noteras att  $\alpha_{fält}$  har beräknats utifrån  $RI$  (ekvation 7).

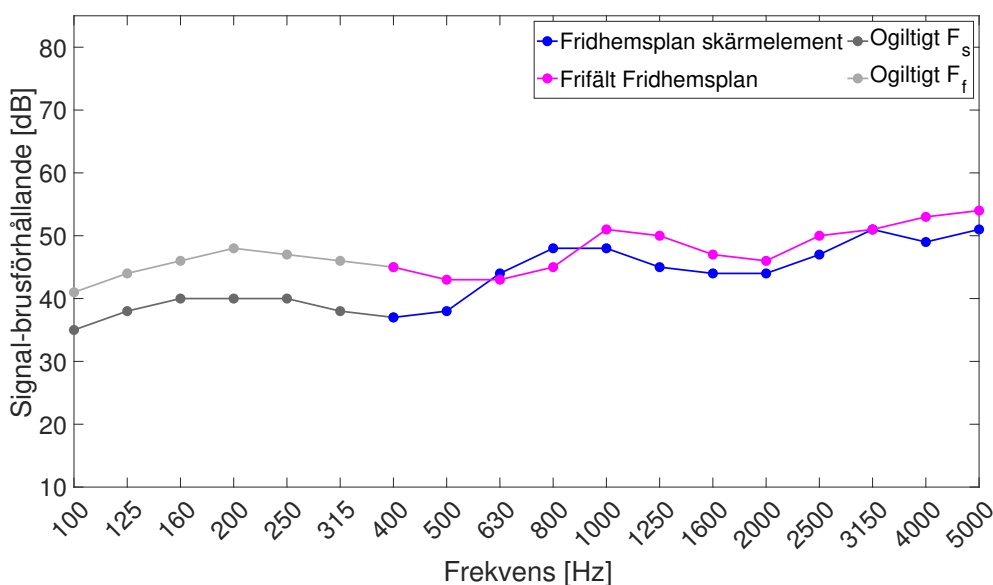
En jämförelse mellan  $DL_{RI}$  och  $DL_{\alpha}$  för aluminiumsektionen i Knivsta redovisas i tabell 14. Eftersom  $DL_{RI}$  är giltig från 250 Hz visas  $DL_{\alpha}$  också från 250 Hz, för att kunna utföra en bättre jämförelse. Skillnaden mellan  $DL_{RI}$  och  $DL_{\alpha}$  är stor, där  $DL_{\alpha}$  är mer än dubbelt så stor som  $DL_{RI}$ , oavsett frekvensintervall.

**Tabell 14:**  $DL_{RI}$  och  $DL_{\alpha}$  för aluminiumsektionen i Knivsta med tillhörande konfidensintervall.  $DL_{RI}$  är beräknad för Knivsta fält och  $DL_{\alpha}$  är beräknad för Knivsta lab.

Mätobjekt	Frekvensint. [Hz]	$DL_{RI/\alpha}$ [dB]	95% konf. int. $DL_{RI/\alpha}$ [dB]
Knivsta fält	250-5000	4,81	[3,22, 6,40]
Knivsta lab.	250-5000	12,6	[11,0, 14,2]
Knivsta lab.	100-5000	12,0	[10,4, 13,6]

### 4.3 SIGNAL-BRUSFÖRHÅLLANDE

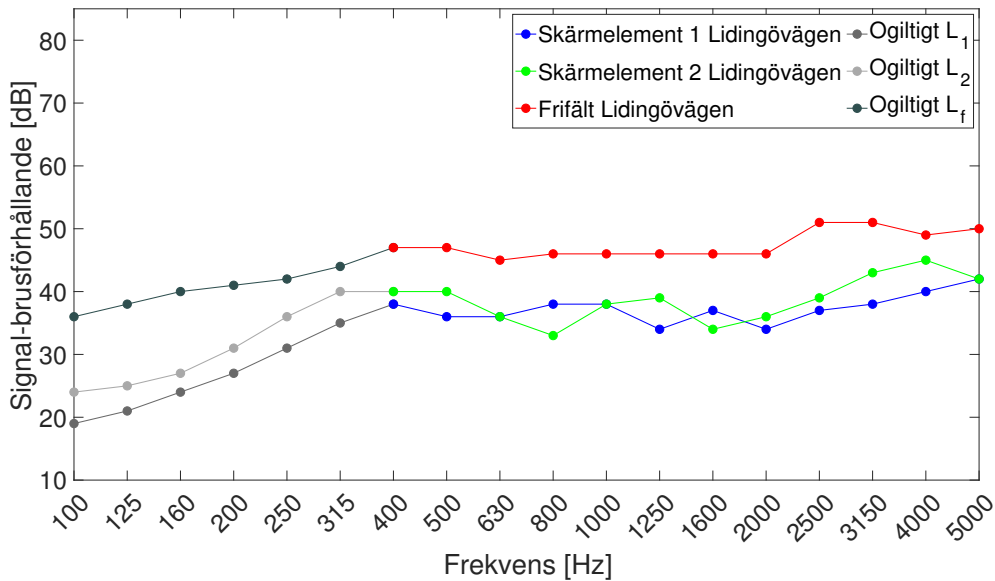
Signal-brusförhållandet i tersband för mätningen vid Fridhemsplan för skärmelementet samt för mätningen i frifält illustreras i figur 23. Båda mätningarna visar på ett signal-brusförhållande  $> 10$  dB i samtliga tersband.



**Figur 23:** Signal-brusförhållande för mätningen vid Fridhemsplan för mätningen framför skärmelementet samt mätningen i frifält.

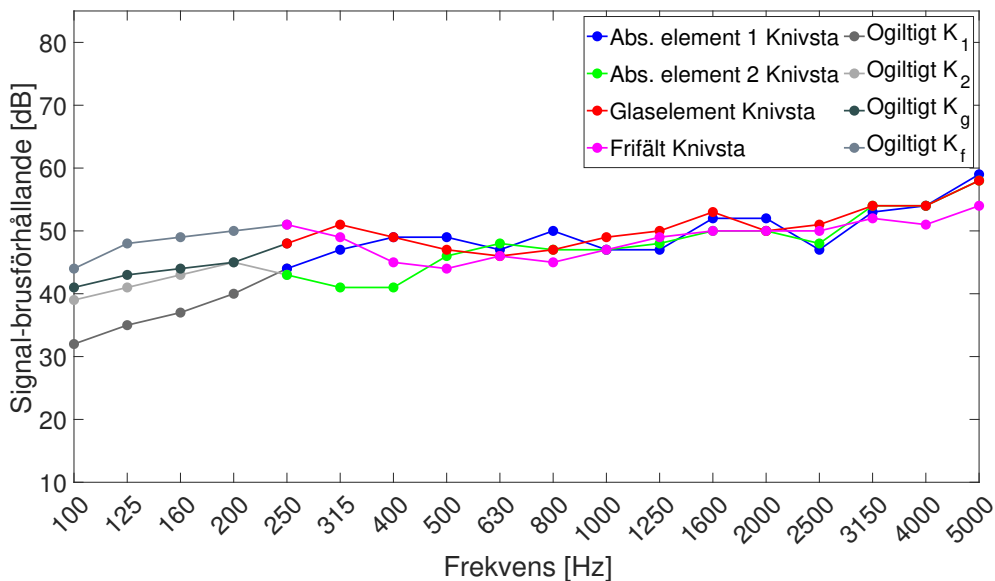
För Lidingövägen redovisas signal-brusförhållandet för mätningarna som utfördes för de båda skärmelementen, samt mätningen i frifält i figur 24. Även här är signal-brusförhållandet  $> 10$  dB för alla tersband.





**Figur 24:** Signal-brusförhållande för mätningarna som utfördes framför de två skärmelementen samt mätningen som utfördes i frifält vid Lidingövägen.

I figur 25 ses signal-brusförhållandet för mätningarna som utfördes framför skärmelementen i Knivsta, samt mätningen som utfördes i frifält. Likt signal-brusförhållandena vid Fridhemsplan och Lidingövägen är signal-brusförhållandena för Knivsta också > 10 dB.



**Figur 25:** Signal-brusförhållande i tersband för samtliga element som uppmättes i Knivsta samt för mätningen i frifält i Knivsta. Abs. element 1 och 2 är aluminiumsektionen och glaselement är akrylglassektionen.

Vid jämförelse av samtliga signal-brusförhållanden för mätningarna vid Fridhemsplan, Lidingövägen och Knivsta (figur 23-25) är signal-brusförhållandet för skärmelementen vid Lidingövägen lite lägre än skärmelementen för övriga mätobjekt.

## 5 DISKUSSION

### 5.1 JÄMFÖRELSE MELLAN FÄLTMÄTNINGAR FÖR OLIKA TYPER AV BULLERSKYDDSSKÄRMAR

Bullerskyddsskärmen vid Fridhemsplan hade höga  $RI$ -värden där samtliga  $RI > 0,8$ , vilket innebär att skärmen är reflekterande (figur 21). Eftersom skärmen består av materialet laminerat härdat glas var detta förväntat eftersom glas är ett reflekterande material. Akrylglassektionen i Knivsta visade näst högst  $RI$ -värden där alla tersband utom 1600-4000 Hz uppvisade  $RI > 0,8$  (figur 21). Därmed är skärmen överlag mer reflekterande än absorberande, vilket också var förväntat eftersom akrylglas är ett reflekterande material. Till skillnad från skärmen vid Fridhemsplan bestod akrylglassektionen även av ett ramsystem med aluminiumprofiler, vilket skulle kunna vara en förklaring till varför utseendet hos  $RI$ -kurvorna skiljer sig, trots att båda skärmarna är gjorda av glas. Vid mätningen av akrylglassektionen placerades metallrutnätet med mikrofonerna 0,25 m ( $d_M$ ) från akrylglaset, men eftersom elementet hade ett utstickande ramsystem skulle metallrutnätet ha placerats 0,25 m från den utstickande delen. Detta missades under mätningen och innebär att reflektionen sker tidigare än vad den ska göra enligt standarden, vilket kan ha påverkat resultaten. Adrienne-fönstret skulle manuellt ha behövt placerats tidigare på tidsaxeln för att inte reflektionen skulle dämpas. Att reflektionen även sker innan den ska göra på grund av att avståndet blir för nära skärmen avviker även från standarden, vilket skulle kunna vara en anledning till varför resultatet ser ut som det gör.

I en studie utförd av Garai & Guidorzi (Garai & Guidorzi, 2008) undersöktes en skärm i akrylglas som hade ett ramsystem i metall där  $RI$ -värdena också uppvisade fluktuationer mellan tersbanden. Fluktuationerna uppges uppstå på grund av att det sker reflektioner mot ramsystemet samt resonans hos akrylglaset när det utsätts för ett direkt ljudfält. Detta skulle således också kunna vara en förklaring till varför både  $RI$ -värdena för akrylglassektionen i Knivsta samt glasskärmen vid Fridhemsplan uppvisar fluktuationer mellan tersbanden, eftersom det fanns ett ramsystem på elementet i Knivsta och elementet vid Fridhemsplan var förankrat till utstickande pelare i stål som var placerade nära mikrofonerna. Fluktuationer över tersbanden för reflekterande skärmar visas även i en studie som genomförts genom *the QUIESST Project* (QUIESST, 2012c) samt en studie utförd av Guidorzi m.fl. (Guidorzi m.fl., 2012).

För de båda reflekterande skärmarna blev  $RI > 1$  för flertalet av tersbanden. I en studie utförd av Conter m.fl. (Conter m.fl., 2007) anges orsaken till att  $RI$  kan anta värden  $> 1$  vara interferenseffekter. I ytterligare studie som genomfördes av Garai & Guidorzi (Garai & Guidorzi, 2000) förklaras det att  $RI$  kan bli  $> 1$  för reflekterande eller icke platta skärmar på grund av  $RI$ :s definition. I en annan studie utförd av Guidorzi m.fl. (Guidorzi m.fl., 2012) uppges det att det är problematiskt att mäta reflekterande skärmar enligt fältmätningssmetoden vilket anses ha att göra med stående vågor mellan skärmens yta och ljudkällan samt på grund av beräkningssskäl.

Bullerskyddsskärmen intill Lidingövägen visade generellt minst  $RI$ -värden över tersbanden, följt av aluminiumsektionen i Knivsta, där skärmarna överlag var mer absorberande än reflekterande.  $RI$ -kurvorna för båda skärmarna har högre värden i låga

frekvenser, lägre i mitten och sedan högre igen för höga frekvenser (figur 21). Det förväntade resultatet var att de lägre frekvenserna skulle ha högre  $RI$ -värden och att dessa sedan skulle minska, eftersom lägre frekvenser har lättare att ta sig över eller runt en bullerskyddsskärm än vad högre frekvenser har, på grund av dess längre våglängd. För aluminiumsektionen i Knivsta visas bäst absorption vid 2500 Hz och sedan ökar  $RI$ -värdet. Denna frekvens skulle kunna vara densamma som frekvensen där maximal absorption erhålls (se ekvation 4). Mineralullen uppgavs ha en tjocklek på 0,04 m och med hjälp av den rådande temperaturen för att beräkna ljudets hastighet blir frekvensen där den maximala absorptionen borde uppstå  $\geq 2135$  Hz. Detta korresponderar inte helt med 2500 Hz utan ligger i närheten, men det ska även observeras att tersbandet 2500 Hz motsvarar en undre frekvensgräns på 2239 Hz, vilket är närmre (se tabell 2). Mineralullen var dock inte var placerad på utsidan av skärmen, utan på insidan, och således kan någon annan dimension också inverka (se avsnitt 2.1.3). För Lidingövägen visas inget tydligt tersband där absorptionen är maximal, utan den är ungefär densamma mellan 630-2500 Hz. För denna skärm finns det tyvärr inte heller vetskap om skärmens fyllningsmaterial. Att  $RI$  ökar i tersbanden efter 2500 Hz både för aluminiumsektionen i Knivsta och skärmen vid Lidingövägen skulle kunna bero på att maximal absorption har uppnåtts och att metalldelarna på skärmarna kan börja spela stor roll, vilket ger mer reflektion eftersom höga frekvenser har svårare att böja in mot de absorberande materialen.

En uppgång av  $RI$ -värden för frekvenser  $> 2000$  Hz visas även i en studie av Garai och Guidorzi (Garai & Guidorzi, 2008) där en skärm i metall som var fylld med mineralull undersöktes. En mindre uppgång av  $RI$  i höga frekvenser erhöles även vid en studie som genomfördes genom *the QUIESST Project* (QUIESST, 2012c), där metallskärmar evaluerades. I ytterligare en studie av Garai och Guidorzi (Guidorzi & Garai, 2013) visades också en ökning av  $RI$  i högre frekvenser för absorberande skärmar. Därmed har liknande resultat erhållits tidigare. I alla dessa tre nämnda studier förekommer även fluktuationer generellt mellan tersbanden, vilket även är fallet för aluminiumsektionen i Knivsta och skärmen vid Lidingövägen.  $RI$ -värden i de låga frekvenserna är svåra att analysera eftersom de är ogiltiga och det finns följaktligen ingen vetskap om dessa är över- eller underskattade.

Skärmen vid Lidingövägen uppvisades överlag att vara mer absorberande än aluminiumsektionen i Knivsta. Det ska dock noteras att eftersom ljudtransmission och ljud som kan alstras i strukturen hos skärmen inkluderas i absorptionskoefficienten (se ekvation 6) behöver inte detta innebära att skärmen vid Lidingövägen var mer absorberande än aluminiumsektionen i Knivsta. För en sådan analys skulle även ljudisoleringen behöva tas till hänsyn (med antagandet att ljudet som leds vidare som stomljud är litet). För även om  $RI$  var mindre för skärmen vid Lidingövägen (mer absorption) behöver ljudet inte absorberas i skärmen utan det kan ta sig igenom skärmen via transmission (se ekvation 6 och figur 1). I Sjöbergs examensarbete (Sjöberg, 2018) undersöktes ljudisoleringen för samma skärmar och där blev det sammanvägda värdet för luftburet ljudisoleringsindex,  $DL_{SI,E}$ , 26 dB för 400-5000 Hz för Lidingövägen. Aluminiumsektionen i Knivsta kunde inte uppmätas vid Sjöbergs mättillfälle (Sjöberg, 2018) men utfördes av Stefan Dimitrijevic på Structor Akustik vid samma

mättillfälle som ljudreflektionsmätningarna i detta projekt utfördes.  $DL_{SI,E}$  för aluminiumsektionen beräknades sedan till 38 dB för 400-5000 Hz (opublicerat material). Ett högre  $DL_{SI,E}$  innebär bättre ljudisolering (mindre ljudtransmission). Detta indikerar att även om Lidingövägen ser ut att vara mer absorberande än aluminiumsektionen i Knivsta så tar sig troligtvis mer ljud igenom skärmen, då ljudisoleringen som uppmättes är sämre.

Vid jämförelse av  $DL_{RI}$  mellan skärmarna hade skärmen vid Fridhemsplan ett  $DL_{RI}$  på 0,233 dB, akrylglassektionen i Knivsta 1,03 dB, aluminiumsektionen i Knivsta 4,97 dB och skärmen vid Lidingövägen 8,46 dB (för samma frekvensområde). I tidigare studier erhöles  $DL_{RI}$  mellan 6-8 för aluminiumskärmar i en studie av Buytaert m.fl. (Buytaert m.fl., 2017), ett  $DL_{RI}$  på 7 dB för en metallskärm med mineralull i en studie av Garai & Guidorzi (Garai & Guidorzi, 2008),  $DL_{RI}$  mellan 3-7 dB för olika typer av skärmar i en studie av Conter & Wehr (Conter & Wehr, 2015) samt  $DL_{RI}$  mellan 6-10 dB för metallskärmar och mellan 0-8 dB för andra skärmar (så som gröna skärmar eller glasskärmar) i en studie utförd i *the QUIESST Project* (QUIESST, 2012c). Således ligger de erhållna  $DL_{RI}$  för samtliga skärmar inom de intervall som resultaten från tidigare undersökningar gjort.

Absorptionen skiljer sig mellan skärmarna för att de består av olika material, som är mer eller mindre absorberande. En ytterligare analys som hade varit intressant hade varit att undersöka absorptionen hos mer likvärdiga absorberande skärmar, för att studera vad eventuella skillnader inom likvärdiga material kan bero på. Det fanns tyvärr inte utrymme för en sådan evaluering i detta projekt.

### 5.1.1 Signal-brusförhållande

Signal-brusförhållandet var  $> 10$  dB för alla tersband för samtliga mätningar vilket innebär att bakgrundsnivån på platserna inte inverkade på mätresultaten. Signal-brusförhållandet vid Lidingövägen var något lägre än för de andra mätplatserna vilket ansågs rimligt eftersom platsen upplevdes ha mer förbipasserande fordon än de andra platserna under mättillfällena.

### 5.1.2 Beräknade värden och jämförelse med och utan $C_{dir,k}(\Delta f_j)$

$R_{sub}$  var  $> 10$  dB för alla mätningar, vilket betyder att subtraktionerna var tillräckligt bra för alla mätningar (*Appendix A*, tabell A1).  $R_{sub}$  låg mellan 12,7-47,5 dB vilket ligger inom samma intervall som i en studie utförd av Guidorzi m.fl. (Guidorzi m.fl., 2012), där intervallet för  $R_{sub}$  var ungefär 10-50 dB.

$d_{k,5}$  föll inom de teoretiska tabellvärdena för alla mikrofoner utom nummer 9, där värdena var något lägre än tabellvärdena (*Appendix A*, tabell A2). Detta innebär att reflektionen skedde något tidigare än förväntat för denna mikrofon. Då det testades att byta mikrofon, kabel respektive kanalingång utan förändrat resultat antogs detta bero på högtalaren. Eftersom  $d_{k,5}$  för mikrofon 9 dock hamnade inom liknande intervall för alla mätningar ansågs detta inte vara något större problem.

$d_k$  kunde inte beräknas på plats då reflektionen var för svår att urskilja utan användning

av en reflekterande platta. Istället användes  $d_k$  för att identifiera reflektionen vid signalanalysen. Detta skulle kunna ses som en felkälla då det inte utfördes någon kontrollering av  $d_k$  under mätningarna, men det ska tilläggas att varje impulssvar studerades grafiskt, för att kontrollera att reflektionen var med i Adrienne-fönstren. Adrienne-fönstren startar även 0,7 ms innan reflektionen för att garantera att reflektionen hamnar inom fönstret. För alla mätningar utom akrylglassektionen i Knivsta hamnade all reflektion inom Adrienne-fönstren. Som nämnt tidigare dämpades en del av reflektionen för akrylglassektionen i Knivsta då mätutrustningen inte placerades korrekt och reflektionen inträffade för tidigt.

$C_{dir,k}(\Delta f_j)$  hade ett utstickande värde på 2,63 för mikrofon nummer 8 vid 5000 Hz. Resterande värden låg mellan 0,58-1,57 (*Appendix A*, tabell A3). I en studie som gjordes av Guidorzi & Garai (Garai & Guidorzi, 2013) var  $C_{dir,k}(\Delta f_j)$  mellan 0,8-1,1, vilket är ett mindre intervall än vad som erhöles i detta projekt (även om majoriteten låg inom detta intervall). Detta var dock för en annan typ av högtalare. Då  $C_{dir,k}(\Delta f_j)$  var svår att mäta ansågs parametern osäker och således beräknades  $RI$  och  $DL_{RI}$  även utan  $C_{dir,k}(\Delta f_j)$  för att se hur faktorn påverkade resultaten (*Appendix B*). Vid jämförelse av resultaten för  $RI$  och  $DL_{RI}$  för alla skärmar med eller utan  $C_{dir,k}(\Delta f_j)$  (*Appendix B*) uppvisades inga större skillnader. Det mest avvikande värdet var för tersbandet 400 Hz för skärmen vid Fridhemsplan då  $RI$  låg på 0,9 med  $C_{dir,k}(\Delta f_j)$  och på 0,8 utan  $C_{dir,k}(\Delta f_j)$ . Övriga tersband för samtliga skärmar uppvisade mindre skillnader än så, och för vissa tersband ingen skillnad alls.  $DL_{RI}$  blev mellan 0,032 - 0,27 dB högre med  $C_{dir,k}(\Delta f_j)$  än utan. Därmed ansågs  $C_{dir,k}(\Delta f_j)$  inte ha någon större inverkan på resultaten, vilket även var fallet i en studie av Guidorzi & Garai (Guidorzi & Garai, 2011) där det visas att ljudkällans riktning har en mycket liten inverkan på  $RI$  och  $DL_{RI}$ .

## 5.2 JÄMFÖRELSE AV EXCITERINGSSIGNAL

För bullerskyddsskärmen i Knivsta testades både exciteringssignalen ESS och MLS (enbart ESS användes för alla andra mätningar), för att kunna analysera om valet av exciteringssignal påverkade resultaten (*Appendix C*). Överlag visades inga större avvikelser mellan signalerna. När exciteringssignalen MLS användes blev  $DL_{RI}$  mellan 0,01 - 0,05 dB större, vilket är mycket små skillnader. Enligt en studie som utfördes av Tronchin (Tronchin, 2013) är ESS att föredra framför MLS eftersom MLS kan ge problem på grund av olinjäriteter och tidsvariationer hos högtalare och mikrofoner. I en studie av Garai & Guidorzi (Garai & Guidorzi, 2015) anses ESS vara fördelaktigare än MLS vid mätningar under kritiska förhållanden eftersom ESS har bättre dynamik för detta samt kan stå emot tidsvariationer som turbulensen i luften kan skapa. Studien nämner dock att det även finns förhållanden då MLS är att föredra. I detta projekt upplevdes enbart små skillnader och valet av exciteringssignal ansågs därmed inte ha inverkat på resultaten i någon större utsträckning.

## 5.3 JÄMFÖRELSE AV $DL_{RI}$ MELLAN OLIKA SPEKTRUM

$DL_{RI}$  blev högre med 0,19-0,23 dB när det normaliserade spektrumet för järnväg användes istället för när det normaliserade trafikbullerspektrumet användes, för bullerskyddsskärmen i Knivsta, vilket innebär att skillnaderna inte var så stora. Conter &

Wehr har också utfört en studie (Conter & Wehr, 2015) där de båda spektrumen användes, där  $DL_{RI}$  blev mellan 0,2-1,4 dB högre när spektrumet för järnvägsbuller användes. När trafikbullerspektrumet och spektrumet för järnvägsbuller studeras kan det urskiljas att vägtrafik emitterar mest ljud mellan 800-2500 Hz medan järnvägstrafik emitterar mest ljud mellan 1250-2500 Hz (figur 7). När detta jämförs med  $RI$ -kurvans utseende för aluminiumsektionen i Knivsta (figur 21) överensstämmer kurvan bättre med spektrumet för järnvägsbuller då bäst absorption erhålls mellan 2000-3150 Hz vilket delvis ingår i intervallet där järnvägstrafik utsänder mest buller.

Det finns även standarder för undersökning av akustiska egenskaper hos bullerskyddsskärmar som är placerade intill järnväg, för mätningar både i fält och laboratorier. Denna standardserie heter EN-16272. För mätning av ljudabsorption i fält för bullerskyddsskärmar för järnvägstrafik finns dock ingen standard, utan för tillfället enbart en teknisk specifikation med benämningen CEN/TS 16272-5 (Swedish Standards Institute, u.å.b). För att utvärdera hur bra bullerskyddsskärmen i Knivsta är med avseende på ljudabsorption är troligtvis denna metod bättre att tillämpa eftersom skärmen är placerad intill järnväg. Detta var dock inte syftet i detta projekt och således har det inte studerats hur denna metod går till. Ljudabsorptionen som hade uppmätts i laboratorium för aluminiumsektionen i Knivsta hade dessutom utförts genom EN 1793-1, det vill säga för bullerskyddsskärmar som ska placeras intill vägar.

#### 5.4 JÄMFÖRELSE MELLAN FÄLT- OCH LABORATIONSMÄTNINGAR

Vid jämförelse mellan resultaten i laboratorium och fält för aluminiumsektionen i Knivsta visade  $\alpha_{\text{fält}}$  lägre absorption än  $\alpha_{\text{lab}}$  för samtliga tersband, där minst avvikelse erhöles vid 2500 Hz (figur 22). Efter 2500 Hz blir absorptionen lägre för  $\alpha_{\text{fält}}$ , vilket inte sker för  $\alpha_{\text{lab}}$ . Varför minst avvikelse sker vid 2500 Hz skulle kunna ha att göra med att maximal absorption troligtvis sker här, vilket har diskuterats tidigare. I en studie av Conter & Wehr (Conter & Wehr, 2015) jämfördes olika bullerskyddsskärmar som undersöktes i fält och laboratorium där kurvorna i tersband uppvisade ett liknande utseende mellan laboratorium och fält. Detta var dock inte alls fallet i en studie av Garai & Guidorzi (Garai & Guidorzi, 2008), där en metallskärm med mineralull undersöktes. I ytterligare en studie som genomfördes genom *the QUIESST Project* (QUIESST, 2012b) undersöktes en skärm i metall där resultaten i tersband mellan fält- och laborationsmätningar hade liknande utseende, men fluktuationer förekom i flera av tersbanden. När utseendet för  $\alpha_{\text{lab}}$  och  $\alpha_{\text{fält}}$  jämförs med dessa studier anses det rimligt att kurvorna inte följer varandra helt.

De sammanvägda värdena uppvisar också skillnader, där  $DL_{RI}$  var 4,81 dB och  $DL_{\alpha}$  var 12,6 dB för frekvensintervallet 250-5000 Hz. Vid mätningar i Flandern som genomfördes av Buytaert m.fl. (Buytaert m.fl., 2017) undersöktes absorptionen hos tre aluminiumskärmar där  $DL_{\alpha,1}$  var 16 dB respektive  $DL_{RI,1}$  7 dB,  $DL_{\alpha,2}$  10 dB respektive  $DL_{RI,2}$  6 dB samt  $DL_{\alpha,3}$  16 dB respektive  $DL_{RI,3}$  8 dB. I ytterligare en studie som utfördes av Garai & Guidorzi (Garai & Guidorzi, 2008) undersöktes en skärm i metall som var fylld med mineralull. I denna undersökning var  $DL_{\alpha}$  20 dB medan  $DL_{RI}$  var 7 dB. Även i en studie av Conter & Wehr (Conter & Wehr, 2015) uppvisades stora skillnader mellan  $DL_{\alpha}$  och  $DL_{RI}$  när olika typer av bullerskyddsskärmar

undersöktes.  $DL_\alpha$  varierade mellan 8-20 dB och  $DL_{RI}$  mellan 3-7 dB för samma skärmar (Conter & Wehr, 2015). Resultaten för  $DL_{RI}$  i detta projekt anses därmed rimliga vid jämförelse med resultaten från dessa studier.

Enligt den tidigare kategoriseringen av  $DL_\alpha$  (tabell 3) ingår skärmen i grupp A4 med avseende på dess  $DL_\alpha$ , som innebär näst högst absorption. Om  $DL_{RI}$  jämförs med denna kategorisering hamnar värdet i kategori A2, vilket innebär mindre absorption och är två kategoriseringar lägre än  $DL_\alpha$ . Vid jämförelse med den flamländska regeringens krav uppfyller  $DL_\alpha$  kraven medan  $D_{RI}$  precis understiger (Buytaert m.fl., 2017). Den största anledningen till varför  $DL_{RI}$  och  $DL_\alpha$  skiljer sig så mycket beror enligt forskare som arbetat i *the QUIESST Project* på att ljudfälten är olika, där direkt ljudfält råder vid fältmätningarna och diffust vid laborationsmätningarna. Ytterligare anledningar som anges är att samplingen och medelvärdesbildningen skiljer sig samt att impulsvaret som erhålls vid fältmätningarna är mycket annorlunda i jämförelse med den stabila signalen som erhålls vid laborationsmätningarna (QUIESST, 2012b).

Trots medvetenheten om skiljaktigheterna mellan mätningar i fält och laboratorium undersöker forskare dess korrelation och uppger att det behövs fler studier kring detta (CEDR, 2017). Dock visar flera studier att korrelationen är svag och att det behövs mycket mer data för att kunna skapa pålitliga korrelationsformler, vilket hittills inte har utförts (QUIESST, 2012b, Conter & Wehr, 2015). Då  $RI$  och  $\alpha$  över tersbanden har visat sig både att följa varandra väl och att inte följa varandra väl i tidigare studier (Conter & Wehr, 2015, Garai & Guidorzi, 2008, QUIESST, 2012b) kommer det troligen vara svårt att hitta trovärdiga korrelationsformler. Intresset för korrelationen verkar numera inte heller vara lika aktuellt längre eftersom standarderna nu är specificerade att gälla för respektive ljudfält (vilket inte var fallet tidigare), vilket innebär att mätningar måste utföras enligt det avsedda ljudfältet (direkt eller diffust) samt att det nu anses finnas tillräcklig kunskap om mätning i direkt ljudfält (Garai, 2018).

## 5.5 FELKÄLLOR

Förutom de felkällor som redan har nämnts så finns det ett flertal faktorer som kan ha inverkat på resultaten. Meteorologiska faktorer som refraktion, turbulens och atmosfärisk absorption kan ha påverkat. Detta anses dock inte ha skett i någon större utsträckning eftersom det är så kort avstånd mellan ljudkällan och mikrofonerna. De meteorologiska förhållandena bedömdes även vara likvärdiga för mätningarna framför bullerskyddsskärmen och i frifält, vid varje mättillfälle. Alla lufttemperaturer var dessutom  $> 0^\circ$  och vindhastigheter var  $< 5$  m/s vilket följer standarden. Dock kan inte meteorologisk inverkan uteslutas med säkerhet. Aluminiumsektionen i Knivsta och skärmen vid Lidingövägen kan ha varit fuktiga inuti vid mätningen, vilket innebär att absorptionen kan ha påverkats.

Justeringen av frifältssignalen som utfördes i tidsdomänen för att överensstämna med signalen som uppmätts framför skärmen (innan skiftet i frekvensdomänen kunde ske) tyder på att högtalarens position i förhållande till metallrutnätet med mikrofonerna inte var exakt lika mellan mätningen framför skärmen och mätningen i frifält, då detta inte ska behöva utföras. Det gick inte att få exakta positioner med enbart en tumstock som

hjälpmedel för att mäta avstånden. Om högtalare och metallrutnätet med mikrofonerna vore förankrade till varandra skulle placeringar kunna underlättas.

Vid beräkningen av ljudets hastighet användes inte den specifika fuktigheten då denna inte fanns att tillgå vilket innebär att alla beräkningarna som utfördes där  $c$  användes är utförda med antagandet om att luften var torr. Det mest kritiska för beräkningarna med  $c$  i detta projekt är dock att reflektionen hamnar inom sitt Adrienne-fönster och att markreflektionen hamnar utanför, vilket var fallet för alla mätningar förutom för akrylglassektionen i Knivsta vilket har förklarats tidigare.

Korrektionsfaktorn  $C_{gain,k}(\Delta f_g)$  beräknades inte eftersom inställningarna hos högtalaren och mikrofonerna inte ändrades och såldes ansågs faktorn inte inverka. Detta kunde dock ha utförts ändå i efterhand för att kontrollera detta antagande.

Skärmen intill Lidingövägen är inte homogen och absorptionen skiljde sig mellan de två uppmätta elementen, vilket innebär att ett medelvärde över enbart dessa element inte är representativt för hela skärmen eftersom variation förekommer. Dessutom varierar vegetationen över året mellan elementen för denna skärm, vilket kan påverka ljudabsorptionen. Ett sådant specialfall som denna vegetationsbekladda skärm är inkluderad inte i standarden.

Ett krav på högtalaren som ställs i standarden är att impulssvaren inte ska vara längre än 3 ms för signalen som mäts i frifält. När impulssvaren studerades vid signalanalysen observerades det att tog ungefär mellan 3-4 ms för signalerna som mätts i frifält att mynna ut mot 0 (se figur 18). Därmed uppfyller högtalaren inte kravet vilket kan ha påverkat resultaten. För att analysera detta ytterligare hade det varit intressant att även använda en högtalare som uppfyller kraven och undersöka om det blir några skillnader när mätningar utförs på samma skärmar som i detta projekt. Detta utfördes inte då ingen annan högtalare fanns att tillgå.

Vissa av studierna som har använts för att jämföra projektets resultat med har utförts enligt den äldre versionen av EN 1793-5, som var en teknisk specifikation, där metoden skiljer sig en del från den nya versionen. Många av studierna som har utförts har också lett till den senaste uppdateringen av mätmetoden som sedan blev själva standarden. Eftersom den senaste utgåvan av standarden som har använts i detta projekt publicerades år 2016 finns det inte många studier som har utförts sedan dess, vilket är anledningen till att tidigare studier har använts för jämförelser.

## **5.6 FÖRDELAR OCH NACKDELAR MED MÄTMETODEN**

Som visat i detta projekt är mätmetoden SS-EN 1793-5 praktiskt genomförbar. En sammanfattning av fördelarna respektive nackdelarna som har identifierats under projektets gång ges nedan.

Fördelar med mätmetoden:

- Mätmetoden möjliggör mätningar för ljudabsorption hos bullerskyddsskärmar i fält, vilket är mer representativt än mätningar i laboratorier, eftersom ljudfältet är direkt



i fält och diffust i laboratorier (observera att detta inte gäller för skärmar i tunnlar, djupa vallar eller vid vägar som är täckta, då ljudfältet är diffust för dessa fall och laborationsmetoden ska således användas)

- Metoden medför att det går att undersöka hur ljudabsorptionen hos bullerskyddsskärmar förändras med tid, vilket innebär att kontrollmätningar kan utföras. Vid behov ger detta dessutom underlag för att ta fram skärmar med bättre hållbarhet gällande dess akustiska prestanda
- Med en bra utrustning är själva mätförandet relativt enkelt att utföra
- Standarden innehåller flera exempel på hur resultaten ska presenteras, vilket ger läsaren mer förståelse

Nackdelar med mätmetoden:

- Standarden innehåller ett flertal tidskrävande moment. Dessa innefattar montering av mätutrustningen, positionskontrolleringar samt signalanalysen för att bearbeta mätdata. Det skulle vara bättre att kunna köpa en design som garanterar rätt positioner. Även en färdigutvecklad programvara för att bearbeta mätdata skulle underlätta, då det inte kräver att användaren kan utföra programmering
- För att få reda på den fullständiga ljudabsorptionen behöver även skärmens ljudisolering mätas, eftersom ljudtransmission ingår i absorptionskoefficienten. Detta innebär att en bra absorptionskoefficient inte behöver betyda att ljud absorberas i skärmen utan det kan innebära att ljudet tar sig igenom skärmen
- Trafik kan behöva avledas eller tillfälligt stängas av under mätningarna, vilket kan vara kostsamt
- Standarden specificerar att lufttemperaturen behöver vara  $> 0$  °C och vindhastigheten  $< 5$  m/s samt att skärmen ska vara helt torr under mätningarna vilket innebär att mätningar inte alltid kan utföras. I ett land som Sverige kan mätningar därmed inte utföras under större delar av året
- Korrektionsfaktorn för ljudkällans riktning,  $C_{dir,k}(\Delta f_j)$  är praktiskt svår att mäta. Det skulle vara önskvärt med ytterligare förklaring kring hur denna ska mätas
- Standarden omfattar bullerskyddsskärmar med en höjd  $\geq 4$  m. Mer information om Adrienne-fönstrens längd för skärmar med en höjd  $< 4$  m skulle behövas då många skärmar är  $< 4$  m höga
- Det blir begränsningar för låga frekvenser för skärmar som har en höjd  $< 4$  m vilket innebär att resultaten inte är giltiga för hela frekvensskalan (100-5000 Hz)
- Specialfall behandlas inte i standarden. Det saknas information om hur skärmar som inte är homogena ska hanteras.
- En ekvation för hur signal-brusförhållande beräknas inkluderas inte i standarden
- Mätosäkerheten skulle behöva utvecklas ytterligare för att inkludera ingående komponenters osäkerhet

## 6 SLUTSATSER

- Den nya fältmätningssmetoden för att undersöka ljudabsorptionen hos bullerskyddsskärmar (SS EN-1793-5:2016) är praktiskt genomförbar
- Standardens fördelar är framförallt att mätmetoden är mer representativ än laborationsmetoden (SS-EN 1793-1:2017) för att undersöka ljudabsorptionen hos bullerskyddsskärmar där direkt ljudfält råder, samt att ljudabsorptionens förändring över tid kan undersökas
- Standardens nackdelar är framförallt att metoden är tidskrävande, att ljudisoleringen hos skärmen även behöver mätas för att få reda på den fullständiga ljudabsorptionen (då ljudtransmission ingår i absorptionskoefficienten som uppmäts), att standarden inte innehåller utförliga beskrivningar för utvärdering av mätdata för bullerskyddsskärmar som har en höjd  $< 4$  m och att låga frekvenser blir ogiltiga för skärmar som har en höjd  $< 4$  m
- Bullerskyddsskärmen vid Fridhemsplan och akrylglassektionen i Knivsta uppvisades vara reflekterande skärmar, där Fridhemsplan generellt hade högst reflektionsindex i tersband. Bullerskyddsskärmen vid Lidingövägen och aluminiumsektionen i Knivsta visade sig vara mer absorberande, där Lidingövägen hade lägst reflektionsindex i tersband. Dock hade Lidingövägen tidigare visat sig ha sämre ljudisoleringsindex än aluminiumsektionen i Knivsta vilket innebar att den bättre absorptionen troligtvis berodde på att ljud tog sig igenom skärmen. Skillnaderna i ljudabsorption mellan skärmarna berodde på att skärmarna bestod av olika material vid jämförelse skärmarna emellan
- Ljudabsorptionen som uppmättes i fält för aluminiumsektionen i Knivsta var lägre i samtliga tersband än de laborationsvärden som tidigare hade uppmätts. Det sammanvägda värdet som uppmätts i laboratorium var mer än dubbelt så högt som det sammanvägda värdet som uppmätts i fält. Orsaken till skillnaderna ansågs framförallt bero på att ljudfälten skiljer sig, där ett direkt ljudfält råder vid fältmätningarna och ett diffust ljudfält råder vid laborationsmätningarna

## 7 REFERENSER

### Tryckta och elektroniska referenser

- Andersson, J. (1998). *Akustik & Buller*, utg. 4, AB Svensk Byggtjänst, Stockholm. ISBN: 91-7332-727-1.
- Behler, G.K., Dietrich, P., & Vorländer, M. (2012). *Multi Channel Measurements for the Qualification of Noise Barriers In Situ, Discussion of Uncertainty Factors*. Internoise 2012, New York, USA, 19-22 augusti 2012.
- Boverket (2018). *CE-märkning*. [online] Tillgänglig: <https://www.boverket.se/sv/PBL-kunskapsbanken/regler-om-byggande/byggprodukter/att-salja-byggprodukter/ce-markning/> [Hämtad 2018-04-17].
- Buytaert, A., Vanhooreweder, B., Clairbois, J.P., Houtave, P., Glorieux, C., & Roozen, N.B. (2017). *In-situ measurements according EN 1793-5 and EN 1793-6 – First results and impressions*. Internoise 2010, Hongkong, 27-30 augusti 2017.
- CEDR (2017). *CEDR Technical Report 2017-02: State of the art in managing road traffic noise: noise barriers*. CEDR Secretariat, No. 02. ISBN: 979-10-93321-27-1.
- CEDR (2014). *CEDR Transnational Road Research Programme: QUESTIM: Assessing the acoustic durability of noise barriers on NRA road networks* [pdf] Tillgänglig: [http://www.cedr.eu/download/other\\_public\\_files/research\\_programme/call\\_2012/road\\_noise/QUESTIM-Deliverable-D4-1-Acoustic-Durability-of-Noise-Barriers-on-NRA-roads.pdf](http://www.cedr.eu/download/other_public_files/research_programme/call_2012/road_noise/QUESTIM-Deliverable-D4-1-Acoustic-Durability-of-Noise-Barriers-on-NRA-roads.pdf) [Hämtad 2018-01-19].
- Clairbois, J-P., de Roo, F., Garai, M., Conter, M., Defrance, J., Oltean-Dumbrava, C. & Fusco, I. (2010). *QUIESST: toward a better knowledge and understanding of how efficient noise barriers could actually be*. Internoise 2010, Lissabon, Portugal, 13-16 juni 2010.
- Conter, M. & Wehr, R. (2015) *Comparison between laboratory and in-situ methods for measuring sound absorption properties of noise barriers*. EuroNoise 2015, Maastricht, Nederländerna, 31 maj-2 juni 2015.
- Conter, M., Haider, M., Bohrn, J., & Lechner, A. (2007) *Investigation of the long-time performance of a noise barrier and statistical stability of the reflection index with the Adrienne method*. 3rd Congress of the Alps Adria Acoustics Association, Graz, Österrike, 27-28 september 2007.
- Cox, T.J. & D'Antonio, P. (2009). *Acoustic Absorbers and Diffusers - Theory, design and application*, utg. 2, Taylor & Francis, Abingdon. ISBN: 0-203-89305-0.
- EUR-Lex (u.å.). *The Official Journal of the European Union*. [online] Tillgänglig: <https://eur-lex.europa.eu/oj/direct-access.html> [Hämtad 2018-04-17].
- EUR-Lex (2002). *Document 32002L0049*. [online] Tillgänglig: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/SV/TXT/?uri=celex%3A32002L0049> [Hämtad 2018-01-29].

- European Commission (2018). *Harmonised standards*. [online] Tillgänglig: [https://ec.europa.eu/growth/sectors/construction/product-regulation/harmonised-standards\\_en](https://ec.europa.eu/growth/sectors/construction/product-regulation/harmonised-standards_en) [Hämtad 2018-04-17].
- Fuchs, H.V. & Möser, M. (2013). *Sound Absorbers*. In: Müller, G., & Möser M., *Handbook of Engineering Acoustics* [e-bok] Springer, Berlin, Heidelberg. Tillgänglig genom Uppsala universitetsbibliotek: <https://link-springer-com.ezproxy.its.uu.se/book/10.1007%2F978-3-540-69460-1> [Hämtad 2018-03-15]. ISBN: 978-3-540-69460-1.
- Garai, M. & Guidorzi, P. (2015). "Sound reflection measurements on noise barriers in critical conditions". *Building and Environment*, vol. 94, ss. 752-763.
- Garai, M. & Guidorzi, P. (2013). "In-situ measurements of sound reflection and sound insulation of noise barriers: Validation by means of signal-to-noise ratio calculations". *Proceedings of Meetings on Acoustics*, vol. 19, ss. 1-9.
- Garai, M. & Guidorzi, P. (2008). "In situ measurements of the intrinsic characteristics of the acoustic barriers installed along a new high speed railway line". *Noise Control Engineering Journal*, vol. 56(5), ss. 342-355.
- Garai, M., & Guidorzi, P. (2000) *Experimental verification of the European methodology for testing noise barriers in situ: Sound reflection*. Internoise 2000: The 29th International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering, Nice, Frankrike, 27-30 augusti 2000.
- Garai, M. (1993). "Measurement of the Sound-Absorption Coefficient In Situ: The Reflection Method Using Periodic Pseudorandom Sequences of Maximum Length". *Applied Acoustics*, vol. 39, ss. 119-139.
- Guidorzi, P. & Garai, M. (2013). "Advancements in Sound Reflection and Airborne Sound Insulation Measurement on Noise Barriers". *Open Journal of Acoustics*, vol. 3, ss. 25-38.
- Guidorzi, P., Garai, M., & Klepáček, J. (2012). *On the repeatability of Reflection Index measurements of noise barriers*. Euronoise Prague 2012, Prag, Tjeckien, 10-13 juni 2012.
- Guidorzi, P., & Garai, M (2011). *Reflection index measurement on noise barriers with the Adrienne method: source directivity investigation and microphone grid implementation*. Internoise 2011, Osaka, Japan, 4-7 september 2011.
- Larsson, C. (1991). *Uppskattning av krökningen hos ljudstrålar nära marken*. Meteorologiska institutionen, Uppsala universitet.
- Larsson, C. (1990). *Bullerutbredning*. Institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet.
- Lee, J., Kim, J., Park, T., Chang, S. & Kim, I. (2015). "Reduction Effects of Shaped Noise Barrier for Reflected Sound". *Journal of Civil & Environmental Engineering*, vol. 5(2), ss. 1-7.

- Kotzen, B. & English, C. (1999). *Environmental noise barriers: a guide to their acoustic and visual design* [e-bok] CRC Press, ProQuest Ebook Central. Tillgänglig genom Uppsala universitetsbibliotek: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/uu/detail.action?docID=165287> [Hämtad 2018-01-29].
- Miljöbalken (1998). *SFS 1998:808*. [online] (uppdaterad januari 2018) Tillgänglig: <http://www.notisum.se/rnp/sls/lag/19980808.htm> [Hämtad 2018-01-29].
- Miljömål (2016). *God bebyggd miljö*. [online] Tillgänglig: <https://www.miljomal.se/sv/Miljomalen/15-God-bebyggd-miljo/> [Hämtad 2018-01-29].
- Murphy, E. & King, E. (2014). *Environmental noise pollution: noise mapping, public health, and policy*, utg. 1, AB Svensk Byggtjänst, Boston. ISBN: 978-0-12-411595-8.
- Naturvårdsverket (2017). *Vem gör vad i bullerfrågan?* [online] Tillgänglig: <http://www.naturvardsverket.se/Miljoarbete-i-samhallet/Miljoarbete-i-Sverige/Uppdelat-efter-omrade/Buller/> [Hämtad 2018-01-29].
- NE (u.å.a). *Interferens*. [online] Tillgänglig: <https://www-ne-se.ezproxy.its.uu.se/uppslagsverk/encyklopedi/enkel/interferens> [Hämtad 2018-05-14].
- NE (u.å.b). *Absorption*. [online] Tillgänglig: <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lang/absorption> [Hämtad 2018-02-13].
- NE (u.å.c). *Resonans*. [online] Tillgänglig: <https://www-ne-se.ezproxy.its.uu.se/uppslagsverk/encyklopedi/enkel/resonans> [Hämtad 2018-05-14].
- Oxford University Press. *Signal to noise ratio (SNR or S/N)*. [online] Tillgänglig: <http://www.oxfordreference.com.ezproxy.its.uu.se/view/10.1093/acref/9780191830822.001.0001/acref-9780191830822-e-0157> [Hämtad 2018-03-14].
- QUEISST (2012a). *Seventh Framework Programme Theme 7: Transport - Guidebook to Noise Reducing Devices Optimisation* [pdf] Tillgänglig: [http://actions-incidentatives.ifsttar.fr/fileadmin/uploads/recherches/seminaires/JTAV2013/5-2\\_JTAV2013\\_Demizieux\\_2.pdf](http://actions-incidentatives.ifsttar.fr/fileadmin/uploads/recherches/seminaires/JTAV2013/5-2_JTAV2013_Demizieux_2.pdf) [Hämtad 2018-01-19].
- QUEISST (2012b). *Seventh Framework Programme Theme 7: Transport - D4.3 and MS 4.3: Final procedural report on WP4 activities: Including public database of European NRD, data analysis and definition of NRD families* [pdf] Tillgänglig: [http://www.quiesst.eu/images/QUEISST\\_D4.3\\_MS4.2.pdf](http://www.quiesst.eu/images/QUEISST_D4.3_MS4.2.pdf) [Hämtad 2018-01-19].
- QUEISST (2012c). *Seventh Framework Programme Theme 7: Transport - D3.5 vr. 1.2: Technical report: Inter-laboratory test to assess the uncertainty of the new measurement methods for determining the in situ values of sound reflection and airborne sound insulation of noise reducing devices under direct sound field conditions* [pdf] Tillgänglig: [http://www.quiesst.eu/images/QUEISST\\_D3.5.pdf](http://www.quiesst.eu/images/QUEISST_D3.5.pdf) [Hämtad 2018-05-14].

- Sjöberg, A. (2018). *Utvärdering av standard EN 1793-6:2012 för att undersöka bullerskyddsskärmars effektivitet in-situ*. Uppsala universitet, Institutionen för geovetenskaper. ISSN 1401-5765. Tillgänglig: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1193634/FULLTEXT01.pdf> [Hämtad 2018-05-22].
- SMHI (u.å.). *Meteorologiska observationer*. [online] Tillgänglig: <https://opendata-download-metobs.smhi.se/explore/?parameter=0> [Hämtad 2018-04-05].
- SMHI (2009). *Turbulens - byig vind*. [online] (uppdaterad juli 2015) Tillgänglig: <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/turbulens-byig-vind-1.6067> [Hämtad 2018-02-13].
- Stockholms stad (2018). *Grön bullerskyddsskärm Lidingövägen*. [online] Tillgänglig: <http://miljobarometern.stockholm.se/natur/ekosystemtjanster/gron-bullerskarm-lidingovagen/> [Hämtad 2018-04-05].
- Sveriges Riksdag (2004). *Svensk författningssamling 2004:675: Förordning (2004:675) om omgivningsbuller*. [online] Tillgänglig: [http://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/forordning-2004675-om-omgivningsbuller\\_sfs-2004-675](http://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/forordning-2004675-om-omgivningsbuller_sfs-2004-675) [Hämtad 2018-02-16].
- Swedish Standards Institute (2017). *Svensk standard SS-EN 1793-1:2017: Vägutrustning - Bullerskydd - Provningsmetod för bestämning av akustiska egenskaper - Del 1: Produkttegenskaper - Ljudabsorption i diffust ljudfält*, utg. 3, SIS Förlag AB, Stockholm.
- Swedish Standards Institute (2016). *Svensk standard SS-EN 1793-5:2016: Vägutrustning - Bullerskydd - Provningsmetod för bestämning av akustiska egenskaper - Del 5: Produkttegenskaper - Fältmätning av ljudreflektion vid direkta ljudförhållanden*, utg. 1, SIS Förlag AB, Stockholm.
- Swedish Standards Institute (2015). *Svensk standard SS-EN 14388:2015 Vägutrustning – Bullerskydd – Specifikationer*, utg. 2, SIS Förlag AB, Stockholm.
- Swedish Standards Institute (2014). *Svensk standard SS-EN 16272-3-2:2014 Järnvägar – Spår – Bullerbarriärer och anordningar som påverkar uppkomsten av luftburet ljud – Provningsmetoder för bestämning av akustiska egenskaper – Del 3-2: Normaliserat spektrum för järnvägsbuller och en-siffrig skattning vid direkt tillämpning i fält*, utg. 1, SIS Förlag AB, Stockholm.
- Swedish Standards Institute (2012). *Svensk standard SS-EN 1793-1:2012: Vägutrustning - Bullerskydd - Provningsmetod för bestämning av akustiska egenskaper - Del 1: Produkttegenskaper - Ljudabsorption i diffust ljudfält*, utg. 2, SIS Förlag AB, Stockholm.
- Swedish Standards Institute (2003). *Byggakustik – Mätning av ljudabsorption i efterklangsrum (ISO 354:2003)*, utg. 1, SIS Förlag AB, Stockholm.
- Swedish Standards Institute (1997). *Svensk standard SS-EN 1793-3: Vägutrustning - Bullerskydd - Provningsmetod för bestämning av akustiska egenskaper - Del 3: Enhetligt trafikbullerspektrum*, utg. 1, SIS Förlag AB, Stockholm.

- Swedish Standards Institute (u.å.a). *CE-märkning*. [online] Tillgänglig: <https://www.sis.se/standarder/ce-markning/> [Hämtad 2018-03-05].
- Swedish Standards Institute (u.å.b). *SS-EN 16272* [online] Tillgänglig: <https://sis.se/sok/?q=SS-EN+16272&category=> [Hämtad 2018-05-16]
- Trafikverket (2017a). *Buller från vägtrafik* [online] Tillgänglig: <https://www.trafikverket.se/for-dig-i-branschen/miljo---for-dig-i-branschen/buller-och-vibrationer---for-dig-i-branschen/Fakta-om-buller-och-vibrationer/buller-fran-vagtrafik/> [Hämtad 2018-03-06].
- Trafikverket (2017b). *Buller från trafik på järnväg* [online] Tillgänglig: <https://www.trafikverket.se/for-dig-i-branschen/miljo---for-dig-i-branschen/buller-och-vibrationer---for-dig-i-branschen/Fakta-om-buller-och-vibrationer/buller-fran-trafik-pa-jarnvag/> [Hämtad 2018-03-06].
- Trafikverket (2004). *Vägar och gators utformning (VGU): VV Publikation 2004:80* [pdf] Tillgänglig: [https://www.trafikverket.se/TrvSeFiler/Foretag/Bygga\\_och\\_underhalla/Vag/Vagutformning/Dokument\\_vag\\_och\\_gatuutformning/Vagar\\_och\\_gators\\_utformning/Vag\\_och\\_gatuutrustning/07\\_bullerskydd\\_gatuutrustning.pdf](https://www.trafikverket.se/TrvSeFiler/Foretag/Bygga_och_underhalla/Vag/Vagutformning/Dokument_vag_och_gatuutformning/Vagar_och_gators_utformning/Vag_och_gatuutrustning/07_bullerskydd_gatuutrustning.pdf) [Hämtad 2018-03-15]. ISSN: 1401-9612.
- Tronchin, L. (2013). "On the acoustic efficiency of road barriers: The Reflection Index". *International Journal of Mechanics*, vol. 7(3), ss. 318-326.
- Wallin, H.P., Carlsson, U., Åbom, M., Bodén, & Glav, R. (2010). *Sound and vibration*, utg. 2 rev. engelsk utg., US-AB, Universitetservice, Stockholm. ISBN: 978-91-7415-553-2.
- Öhlund, O. & Larsson, C. (2015). "Meteorological effects on wind turbine sound propagation". *Applied Acoustics*, vol. 89, ss. 34-41.

### **Opublicerat material**

- Garai, M. (2018). Personlig kommunikation 2018-05-23 [e-mail].
- Waaranderä, M. (2018). Intervju som utfördes 2018-04-17. [Muntlig referens].

## APPENDIX A - BERÄKNADE VÄRDEN FÖR $R_{SUB}$ , $D_{K,5}$ & $C_{DIR,K}(\Delta F_J)$

**Tabell A1:**  $R_{sub}$  i dB för varje mikrofon för respektive mätning på de olika mätplatserna. Det är markerat för mätningen i Knivsta när exciteringssignalen MLS användes. För övriga mätningar användes exciteringssignalen ESS.

Mätobjekt	$R_{sub}$ [dB] för varje mikrofonposition								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Fridhemsplan	34,3	26,2	26,9	35,9	41,7	34,0	26,2	33,5	32,2
Lidingövägen element 1	26,4	18,5	17,9	47,5	40,8	21,7	19,0	27,7	24,7
Lidingövägen element 2	28,7	33,7	35,3	38,8	47,2	23,6	22,2	22,8	21,1
Knivsta element 1	14,0	32,5	32,9	15,6	31,1	23,7	29,4	37,1	23,0
Knivsta element 1 MLS	13,7	32,6	32,7	16,3	30,9	23,6	29,1	39,0	22,7
Knivsta element 2	14,1	28,9	32,7	18,6	30,2	24,3	15,5	30,1	20,3
Knivsta element 2 MLS	12,8	29,6	33,9	19,2	31,5	32,8	12,8	23,7	32,5
Knivsta glaselement	19,9	39,9	33,3	19,2	31,5	32,8	12,8	23,7	32,5
Knivsta glaselement MLS	19,2	40,3	32,6	20,4	32,8	32,8	12,7	23,5	32,0

**Tabell A2:** Beräknade ljudbanelängdsskillnader,  $d_{k,5}$  [m], för varje mikrofon vid respektive mätning på de olika mätplatserna. F står för Fridhemsplan, L för Lidingövägen och K för Knivsta. När exciteringssignalen MLS användes för Knivsta har detta angivits, för övriga mätningar där inget anges har exciteringssignalen ESS använts.

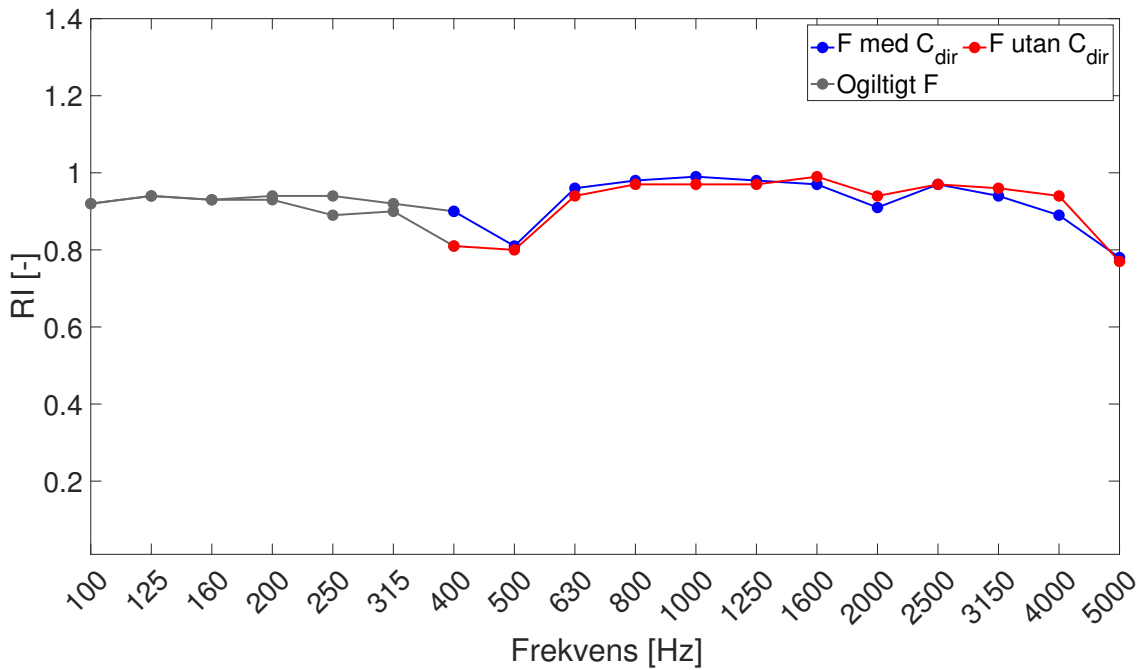
Mätobjekt	$dk_5$ [m] för varje mikrofonposition								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
F element	0,097	0,045	0,108	0,045	0,000	0,052	0,097	0,056	0,049
F frifält	0,097	0,042	0,108	0,045	0,000	0,049	0,097	0,056	0,049
L <sub>1</sub>	0,099	0,042	0,099	0,060	0,000	0,046	0,127	0,074	0,057
L <sub>2</sub>	0,117	0,053	0,113	0,060	0,000	0,057	0,110	0,060	0,057
L frifält	0,110	0,046	0,106	0,064	0,000	0,051	0,118	0,067	0,057
K <sub>1</sub>	0,114	0,057	0,107	0,060	0,000	0,064	0,132	0,075	0,071
K <sub>1,MLS</sub>	0,114	0,057	0,107	0,057	0,000	0,064	0,128	0,075	0,071
K <sub>2</sub>	0,110	0,060	0,117	0,064	0,000	0,064	0,114	0,064	0,060
K <sub>2,MLS</sub>	0,110	0,060	0,117	0,068	0,000	0,064	0,117	0,064	0,060
K <sub>glas</sub>	0,103	0,057	0,114	0,050	0,000	0,053	0,107	0,060	0,053
K <sub>glas,MLS</sub>	0,103	0,057	0,114	0,050	0,000	0,053	0,107	0,060	0,053
K frifält	0,108	0,057	0,111	0,057	0,000	0,059	0,119	0,065	0,060
K frifält <sub>MLS</sub>	0,108	0,057	0,111	0,057	0,000	0,059	0,116	0,065	0,060



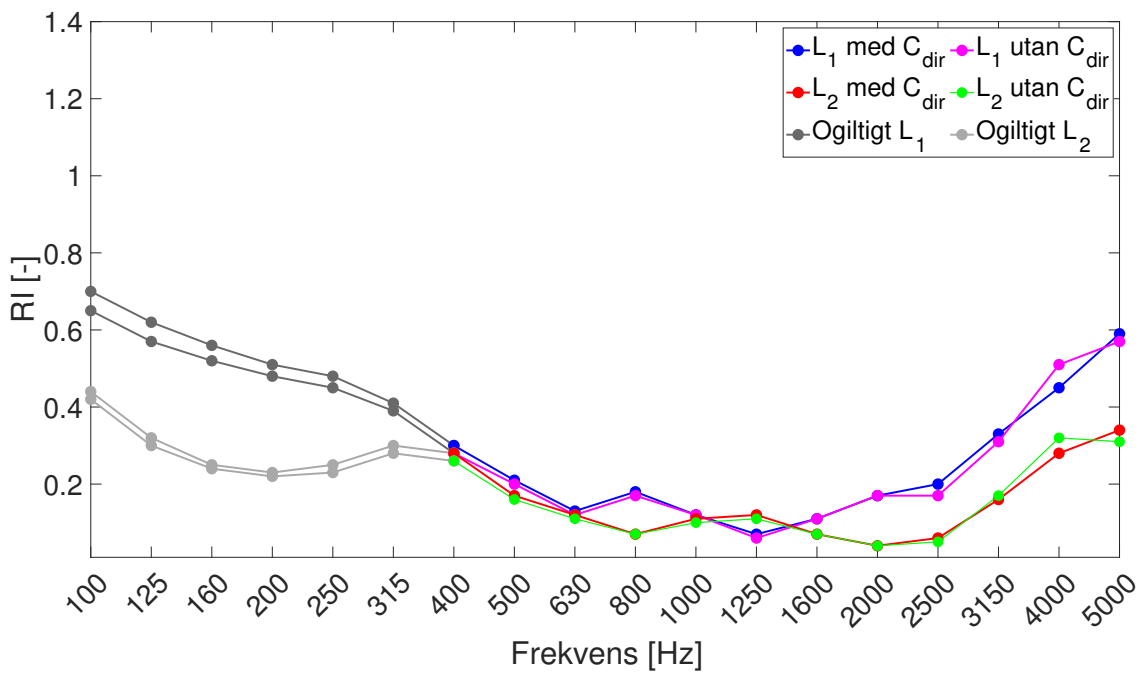
**Tabell A3:**  $C_{dir,k}(\Delta f_j)$  i tersband för varje mikrofon som uppmättes vid ett av mättillfällena.

Tersband [Hz]	$C_{dir,k}(\Delta f_j)$ [-] för varje mikrofonposition								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
100	1,10	1,08	1,11	1,06	1,02	1,07	1,10	1,06	1,08
125	1,10	1,08	1,10	1,06	1,02	1,06	1,10	1,06	1,08
160	1,09	1,07	1,10	1,05	1,02	1,06	1,10	1,06	1,08
200	1,09	1,07	1,10	1,05	1,01	1,06	1,10	1,06	1,08
250	1,08	1,07	1,09	1,05	1,01	1,05	1,09	1,06	1,07
315	1,08	1,06	1,09	1,04	1,00	1,05	1,09	1,06	1,06
400	1,08	1,07	1,09	1,04	1,00	1,05	1,10	1,08	1,06
500	1,09	1,06	1,08	1,04	1,00	1,06	1,11	1,09	1,04
630	1,08	1,05	1,07	1,06	1,01	1,07	1,15	1,11	1,05
800	1,12	1,10	1,13	1,04	1,00	1,05	1,15	1,09	1,10
1000	1,06	1,06	1,11	1,00	0,99	1,10	1,12	1,02	1,10
1250	1,13	1,10	1,11	1,07	1,02	1,07	1,07	0,91	1,05
1600	0,93	1,07	1,02	0,90	1,02	1,13	1,02	0,85	1,31
2000	0,85	0,97	1,07	0,94	1,01	1,11	0,90	1,03	1,30
2500	1,09	1,17	1,40	1,26	1,03	0,98	0,91	1,08	1,32
3150	0,88	0,75	1,23	0,91	1,09	0,85	1,40	1,39	0,71
4000	1,15	1,29	0,73	0,81	1,05	0,88	1,26	0,68	0,68
5000	0,58	1,22	0,98	1,57	0,96	1,27	1,07	2,63	1,11

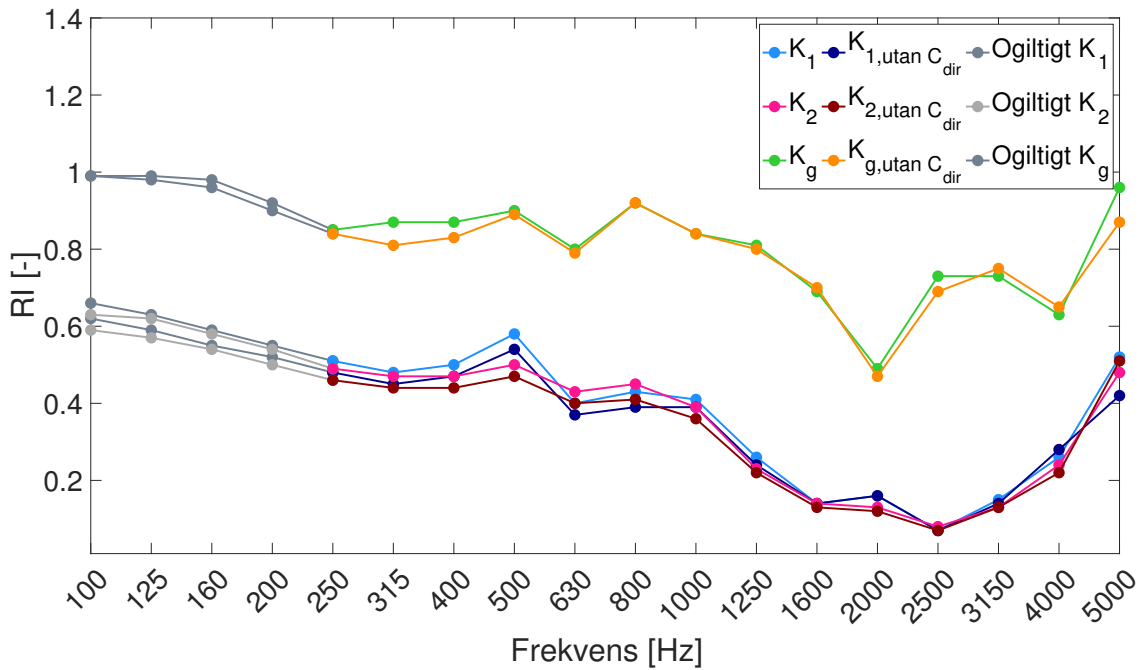
## APPENDIX B - $RI$ OCH $DL_{RI}$ MED OCH UTAN $C_{DIR,K}(\Delta F_J)$



**Figur B1:**  $RI$  i tersband för Fridhemsplan med och utan  $C_{dir,k}(\Delta f_j)$ .



**Figur B2:**  $RI$  i tersband för de två elementen vid Lidingövägen med och utan  $C_{dir,k}(\Delta f_j)$

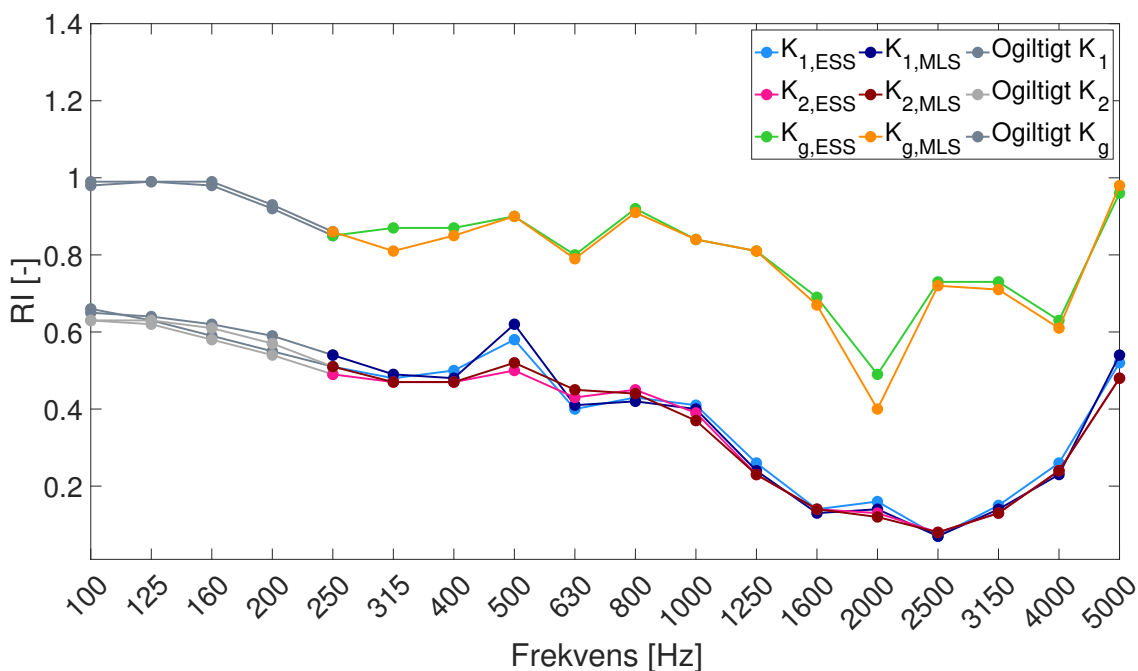


**Figur B3:** RI i tersband för de tre elementen i Knivsta med och utan  $C_{dir,k}(\Delta f_j)$ .  $K_1$  och  $K_2$  är de två elementen som uppmättes från aluminiumsektionen och  $K_g$  är elementet som uppmättes från akrylglassektionen.

**Tabell B1:**  $DL_{RI}$  med och utan  $C_{dir,k}(\Delta f_j)$  för samtliga element som uppmättes för varje mätobjekt.  $F$  står för Fridhemsplan,  $L_1$  och  $L_2$  är de två elementen som uppmättes vid Lidingövägen,  $K_1$  och  $K_2$  är elementen för aluminiumsektionen i Knivsta och  $K_{glas}$  är akrylglassektionen i Knivsta. Konfidensintervallen för varje element finns även givna.

Mätobjekt	Frekvensint. [Hz]	$DL_{RI}$ [dB]	95% konf. int. $DL_{RI}$ [dB]
F med $C_{dir,k}$	400-5000	0,233	[0,00, 1,82]
F utan $C_{dir,k}$	400-5000	0,265	[0,00, 1,86]
$L_1$ med $C_{dir,k}$	400-5000	7,64	[6,05, 9,23]
$L_1$ utan $C_{dir,k}$	400-5000	7,85	[6,26, 9,44]
$L_2$ med $C_{dir,k}$	400-5000	9,28	[7,69, 10,9]
$L_2$ utan $C_{dir,k}$	400-5000	9,47	[7,88, 11,1]
$K_1$ med $C_{dir,k}$	250-5000	4,72	[3,13, 6,31]
$K_1$ utan $C_{dir,k}$	250-5000	4,98	[3,39, 6,57]
$K_2$ med $C_{dir,k}$	250-5000	4,90	[3,31, 6,49]
$K_2$ utan $C_{dir,k}$	250-5000	5,17	[3,58, 6,76]
$K_{glas}$ med $C_{dir,k}$	250-5000	1,01	[0,00, 2,60]
$K_{glas}$ utan $C_{dir,k}$	250-5000	1,07	[0,00, 2,66]

## APPENDIX C - JÄMFÖRELSE AV EXCITERINGSSIGNAL



**Figur C1:**  $RI$  i tersband för de olika elementen i Knivsta när exciteringssignalerna ESS respektive MLS har använts.  $K_1$  står för det ena elementet som uppmättes för aluminiumsektionen och  $K_2$  för det andra.  $K_g$  står för akrylglassektionen.

**Tabell C1:**  $DL_{RI}$  för de tre elementen som uppmättes för bullerskyddsskärmen i Knivsta när exciteringssignalen ESS respektive MLS användes.  $K_1$  och  $K_2$  står för aluminiumsektionen och  $K_g$  för akrylglassektionen. Tillhörande konfidensintervall redovisas även.

Mätobjekt	Frekvensint. [Hz]	$DL_{RI}$ [dB]	95% konf. int. $DL_{RI}$ [dB]
K1	250-5000	4,72	[3,13, 6,31]
K1 MLS	250-5000	4,77	[3,18, 6,36]
K2	250-5000	4,90	[3,31, 6,49]
K2 MLS	250-5000	4,91	[3,32, 6,50]
Kglas	250-5000	1,01	[0,00, 2,60]
Kglas MLS	250-5000	1,06	[0,00, 2,65]

## APPENDIX D - ENSKILDA *RI*-VÄRDEN

För samtliga enskilda *RI*-värdens beräknade konfidensintervall ( $\pm U_j$ ) användes de högsta värdena för  $S_{R,j}$  (tabell 10) eftersom detta anges som exempel i standarden.

**Tabell D1:** Enskilda *RI*-värden för varje mikrofonposition för bullerskyddsskärmen vid Fridhemsplan.  $U_j$  står för ett konfidensintervall på 95%.

<i>RI</i> Fridhemsplan										
Tersband	Enskilda <i>RI</i> -värden för varje mikrofonposition [-]									
[Hz]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Medel ( $\pm U_j$ )
100	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,40	0,99	0,92 ( $\pm 0,63$ )
125	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,55	0,99	0,94 ( $\pm 0,35$ )
160	0,99	0,99	0,99	0,99	0,70	0,99	0,99	0,76	0,99	0,93 ( $\pm 0,24$ )
200	0,99	0,95	0,99	0,99	0,58	0,99	0,99	0,99	0,99	0,94 ( $\pm 0,27$ )
250	0,99	0,99	0,99	0,99	0,69	0,99	0,88	0,99	0,99	0,94 ( $\pm 0,25$ )
315	0,95	0,91	0,99	0,85	0,99	0,99	0,62	0,99	0,99	0,92 ( $\pm 0,25$ )
400	0,58	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,64	0,99	0,96	0,90 ( $\pm 0,24$ )
500	0,99	0,99	0,56	0,99	0,99	0,37	0,99	0,99	0,40	0,81 ( $\pm 0,24$ )
630	0,99	0,90	0,99	0,99	0,80	0,99	0,99	0,95	0,99	0,96 ( $\pm 0,27$ )
800	0,99	0,99	0,99	0,91	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98 ( $\pm 0,29$ )
1000	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99 ( $\pm 0,25$ )
1250	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,91	0,94	0,98 ( $\pm 0,29$ )
1600	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,85	0,99	0,97 ( $\pm 0,31$ )
2000	0,85	0,85	0,99	0,87	0,82	0,99	0,79	0,99	0,99	0,91 ( $\pm 0,29$ )
2500	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,79	0,99	0,99	0,97 ( $\pm 0,29$ )
3150	0,81	0,99	0,99	0,68	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,94 ( $\pm 0,33$ )
4000	0,99	0,99	0,99	0,68	0,99	0,99	0,99	0,50	0,99	0,89 ( $\pm 0,39$ )
5000	0,42	0,99	0,99	0,22	0,99	0,99	0,48	0,99	0,93	0,78 ( $\pm 0,45$ )

**Tabell D2:** Enskilda *RI*-värden för varje mikrofonposition för bullerskyddsskärmen vid Lidingövägen.  $U_j$  står för ett konfidensintervall på 95%.

<i>RI</i> Lidingövägen										
Tersband	Enskilda <i>RI</i> -värden för varje mikrofonposition [-]									
[Hz]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Medel ( $\pm U_j$ )
100	0,44	0,62	0,58	0,56	0,76	0,92	0,32	0,44	0,49	0,57 ( $\pm 0,63$ )
125	0,44	0,59	0,56	0,39	0,52	0,61	0,28	0,37	0,43	0,47 ( $\pm 0,35$ )
160	0,46	0,58	0,55	0,31	0,39	0,43	0,25	0,32	0,37	0,41 ( $\pm 0,24$ )
200	0,48	0,59	0,57	0,27	0,32	0,33	0,22	0,28	0,30	0,37 ( $\pm 0,27$ )
250	0,52	0,64	0,60	0,25	0,29	0,28	0,20	0,25	0,23	0,36 ( $\pm 0,25$ )
315	0,52	0,68	0,59	0,24	0,29	0,24	0,19	0,24	0,19	0,35 ( $\pm 0,25$ )
400	0,35	0,53	0,38	0,19	0,33	0,20	0,19	0,24	0,18	0,29 ( $\pm 0,24$ )
500	0,18	0,27	0,22	0,12	0,25	0,16	0,14	0,18	0,20	0,19 ( $\pm 0,24$ )
630	0,10	0,10	0,21	0,09	0,10	0,17	0,07	0,10	0,18	0,12 ( $\pm 0,27$ )
800	0,15	0,15	0,20	0,09	0,07	0,16	0,06	0,11	0,17	0,13 ( $\pm 0,29$ )
1000	0,11	0,11	0,17	0,10	0,04	0,18	0,09	0,08	0,15	0,11 ( $\pm 0,25$ )
1250	0,09	0,07	0,17	0,08	0,04	0,12	0,14	0,04	0,10	0,10 ( $\pm 0,29$ )
1600	0,10	0,07	0,06	0,07	0,13	0,08	0,12	0,06	0,11	0,09 ( $\pm 0,31$ )
2000	0,13	0,06	0,20	0,03	0,25	0,13	0,02	0,04	0,09	0,11 ( $\pm 0,29$ )
2500	0,10	0,10	0,24	0,18	0,15	0,16	0,06	0,06	0,13	0,13 ( $\pm 0,29$ )
3150	0,17	0,06	0,60	0,10	0,04	0,51	0,28	0,16	0,30	0,25 ( $\pm 0,33$ )
4000	0,26	0,27	0,59	0,18	0,21	0,59	0,42	0,38	0,38	0,36 ( $\pm 0,39$ )
5000	0,31	0,56	0,88	0,36	0,21	0,16	0,28	0,75	0,70	0,47 ( $\pm 0,45$ )

**Tabell D3:** Enskilda *RI*-värden för varje mikrofonposition för aluminiumsektionen hos bullerskyddsskärmen i Knivsta.  $U_j$  står för ett konfidensintervall på 95%.

<i>RI</i> Knivsta absorberande element										
Tersband [Hz]	Enskilda <i>RI</i> -värden för varje mikrofonposition [-]									Medel ( $\pm U_j$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
100	0,99	0,89	0,65	0,87	0,52	0,41	0,68	0,41	0,41	0,65 ( $\pm 0,63$ )
125	0,98	0,84	0,60	0,88	0,53	0,39	0,61	0,40	0,38	0,62 ( $\pm 0,35$ )
160	0,89	0,75	0,54	0,85	0,53	0,39	0,57	0,39	0,37	0,59 ( $\pm 0,24$ )
200	0,76	0,66	0,49	0,79	0,52	0,38	0,55	0,39	0,35	0,54 ( $\pm 0,27$ )
250	0,65	0,58	0,46	0,70	0,49	0,38	0,53	0,39	0,34	0,50 ( $\pm 0,25$ )
315	0,63	0,55	0,45	0,59	0,43	0,37	0,53	0,39	0,34	0,47 ( $\pm 0,25$ )
400	0,61	0,53	0,45	0,62	0,44	0,37	0,55	0,39	0,36	0,48 ( $\pm 0,24$ )
500	0,68	0,61	0,54	0,70	0,52	0,45	0,55	0,39	0,39	0,54 ( $\pm 0,24$ )
630	0,43	0,37	0,33	0,51	0,43	0,39	0,55	0,38	0,37	0,42 ( $\pm 0,27$ )
800	0,51	0,42	0,35	0,51	0,46	0,39	0,53	0,41	0,36	0,44 ( $\pm 0,29$ )
1000	0,47	0,46	0,40	0,40	0,41	0,38	0,39	0,32	0,36	0,40 ( $\pm 0,25$ )
1250	0,31	0,30	0,27	0,29	0,27	0,25	0,19	0,14	0,20	0,25 ( $\pm 0,29$ )
1600	0,09	0,13	0,14	0,17	0,13	0,13	0,12	0,14	0,19	0,14 ( $\pm 0,31$ )
2000	0,23	0,19	0,10	0,09	0,07	0,08	0,10	0,18	0,27	0,14 ( $\pm 0,29$ )
2500	0,08	0,09	0,08	0,03	0,04	0,03	0,11	0,11	0,13	0,08 ( $\pm 0,29$ )
3150	0,20	0,14	0,13	0,10	0,05	0,09	0,26	0,19	0,08	0,14 ( $\pm 0,33$ )
4000	0,54	0,36	0,09	0,28	0,12	0,06	0,40	0,18	0,20	0,25 ( $\pm 0,39$ )
5000	0,77	0,23	0,36	0,99	0,57	0,32	0,57	0,55	0,17	0,50 ( $\pm 0,45$ )

**Tabell D4:** Enskilda *RI*-värden för varje mikrofonposition för akrylglassektionen hos bullerskyddsskärmen i Knivsta.  $U_j$  står för ett konfidensintervall på 95%.

<i>RI</i> Knivsta glaselement										
Tersband	Enskilda <i>RI</i> -värden för varje mikrofonposition [-]									
[Hz]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Medel ( $\pm U_j$ )
100	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99 ( $\pm 0,63$ )
125	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99 ( $\pm 0,35$ )
160	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,89	0,99	0,99	0,99	0,98 ( $\pm 0,24$ )
200	0,99	0,99	0,99	0,88	0,69	0,73	0,99	0,99	0,99	0,92 ( $\pm 0,27$ )
250	0,99	0,99	0,99	0,63	0,47	0,59	0,99	0,99	0,99	0,85 ( $\pm 0,25$ )
315	0,99	0,99	0,99	0,53	0,40	0,99	0,99	0,97	0,99	0,87 ( $\pm 0,25$ )
400	0,99	0,85	0,93	0,98	0,66	0,90	0,99	0,72	0,76	0,87 ( $\pm 0,24$ )
500	0,99	0,99	0,99	0,95	0,42	0,75	0,99	0,99	0,99	0,90 ( $\pm 0,24$ )
630	0,99	0,99	0,99	0,49	0,39	0,36	0,99	0,99	0,99	0,80 ( $\pm 0,27$ )
800	0,99	0,99	0,99	0,99	0,52	0,85	0,99	0,99	0,99	0,92 ( $\pm 0,29$ )
1000	0,99	0,99	0,99	0,63	0,44	0,57	0,99	0,99	0,99	0,84 ( $\pm 0,25$ )
1250	0,99	0,99	0,99	0,52	0,23	0,58	0,99	0,99	0,99	0,81 ( $\pm 0,29$ )
1600	0,61	0,30	0,99	0,69	0,39	0,92	0,64	0,67	0,99	0,69 ( $\pm 0,31$ )
2000	0,36	0,09	0,53	0,79	0,20	0,89	0,44	0,22	0,91	0,49 ( $\pm 0,29$ )
2500	0,99	0,59	0,99	0,99	0,29	0,99	0,62	0,24	0,83	0,73 ( $\pm 0,29$ )
3150	0,99	0,33	0,99	0,69	0,28	0,96	0,99	0,42	0,91	0,73 ( $\pm 0,33$ )
4000	0,99	0,31	0,99	0,32	0,37	0,32	0,99	0,37	0,99	0,63 ( $\pm 0,39$ )
5000	0,99	0,73	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,96 ( $\pm 0,45$ )



**Tabell D5:** Enskilda *RI*-värden för varje mikrofonposition för aluminiumsektionen hos bullerskyddsskärmen i Knivsta, när exciteringssignalen *MLS* användes.  $U_j$  står för ett konfidensintervall på 95%.

<i>RI</i> Knivsta absorberande element, <i>MLS</i>										
Tersband	Enskilda <i>RI</i> -värden för varje mikrofonposition [-]									
[Hz]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Medel ( $\pm U_j$ )
100	0,99	0,93	0,65	0,83	0,62	0,46	0,48	0,40	0,39	0,64 ( $\pm 0,63$ )
125	0,99	0,90	0,59	0,91	0,61	0,42	0,52	0,39	0,37	0,63 ( $\pm 0,35$ )
160	0,99	0,81	0,53	0,93	0,59	0,39	0,55	0,39	0,36	0,62 ( $\pm 0,24$ )
200	0,90	0,70	0,48	0,88	0,56	0,38	0,56	0,39	0,35	0,58 ( $\pm 0,27$ )
250	0,75	0,60	0,44	0,77	0,51	0,36	0,56	0,39	0,34	0,52 ( $\pm 0,25$ )
315	0,70	0,57	0,44	0,62	0,44	0,35	0,53	0,38	0,33	0,48 ( $\pm 0,25$ )
400	0,65	0,54	0,43	0,64	0,44	0,35	0,53	0,37	0,33	0,48 ( $\pm 0,24$ )
500	0,78	0,65	0,54	0,76	0,54	0,45	0,59	0,41	0,39	0,57 ( $\pm 0,24$ )
630	0,45	0,39	0,34	0,53	0,45	0,39	0,55	0,38	0,37	0,43 ( $\pm 0,27$ )
800	0,53	0,43	0,34	0,52	0,45	0,36	0,52	0,39	0,33	0,43 ( $\pm 0,29$ )
1000	0,46	0,45	0,38	0,40	0,39	0,35	0,38	0,30	0,35	0,39 ( $\pm 0,25$ )
1250	0,30	0,29	0,27	0,27	0,25	0,23	0,19	0,14	0,18	0,24 ( $\pm 0,29$ )
1600	0,09	0,13	0,14	0,16	0,13	0,13	0,11	0,14	0,18	0,13 ( $\pm 0,31$ )
2000	0,22	0,16	0,09	0,08	0,06	0,07	0,10	0,16	0,24	0,13 ( $\pm 0,29$ )
2500	0,08	0,09	0,08	0,03	0,04	0,03	0,11	0,11	0,13	0,08 ( $\pm 0,29$ )
3150	0,18	0,14	0,12	0,10	0,05	0,10	0,25	0,16	0,08	0,13 ( $\pm 0,33$ )
4000	0,53	0,36	0,08	0,27	0,12	0,06	0,39	0,16	0,17	0,24 ( $\pm 0,39$ )
5000	0,80	0,29	0,36	0,99	0,58	0,28	0,53	0,59	0,14	0,51 ( $\pm 0,45$ )

**Tabell D6:** Enskilda *RI*-värden för varje mikrofonposition för akrylglassektionen hos bullerskyddsskärmen i Knivsta, när exciteringssignalen *MLS* användes.  $U_j$  står för ett konfidensintervall på 95%.

<i>RI</i> Knivsta glaselement, <i>MLS</i>										
Tersband	Enskilda <i>RI</i> -värden för varje mikrofonposition [-]									
[Hz]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Medel ( $\pm U_j$ )
100	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,92	0,99	0,99	0,98 ( $\pm 0,63$ )
125	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99 ( $\pm 0,35$ )
160	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,96	0,99	0,99	0,99	0,99 ( $\pm 0,24$ )
200	0,99	0,99	0,99	0,94	0,75	0,76	0,99	0,99	0,99	0,93 ( $\pm 0,27$ )
250	0,99	0,99	0,99	0,66	0,50	0,60	0,99	0,99	0,99	0,86 ( $\pm 0,25$ )
315	0,99	0,99	0,99	0,50	0,39	0,52	0,99	0,99	0,99	0,81 ( $\pm 0,25$ )
400	0,99	0,84	0,91	0,94	0,65	0,88	0,99	0,71	0,73	0,85 ( $\pm 0,24$ )
500	0,99	0,99	0,99	0,96	0,45	0,74	0,99	0,99	0,99	0,90 ( $\pm 0,24$ )
630	0,99	0,99	0,99	0,48	0,37	0,34	0,99	0,99	0,99	0,79 ( $\pm 0,27$ )
800	0,99	0,99	0,99	0,99	0,50	0,79	0,99	0,99	0,99	0,91 ( $\pm 0,29$ )
1000	0,99	0,99	0,99	0,62	0,42	0,54	0,99	0,99	0,99	0,84 ( $\pm 0,25$ )
1250	0,99	0,99	0,99	0,52	0,24	0,58	0,99	0,99	0,99	0,81 ( $\pm 0,29$ )
1600	0,59	0,29	0,99	0,66	0,37	0,89	0,64	0,64	0,99	0,67 ( $\pm 0,31$ )
2000	0,37	0,09	0,50	0,74	0,18	0,81	0,44	0,21	0,86	0,47 ( $\pm 0,29$ )
2500	0,99	0,58	0,99	0,99	0,29	0,99	0,63	0,23	0,82	0,72 ( $\pm 0,29$ )
3150	0,99	0,33	0,99	0,62	0,23	0,99	0,99	0,37	0,88	0,71 ( $\pm 0,33$ )
4000	0,99	0,32	0,99	0,26	0,34	0,31	0,99	0,34	0,99	0,61 ( $\pm 0,39$ )
5000	0,99	0,91	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98 ( $\pm 0,45$ )

## APPENDIX E - MÄTUTRUSTNING: FOTOGRAFIER OCH SPECIFIKATIONER



**Figur E1:** *Metallrutnätet med de nio mikrofonerna monterad framför bullerskyddsskärmen i Knivsta.*



**Figur E2:** En av mikrofonerna, där samtliga var av modellen NTI Audio M4261.

**Tabell E1:** Mikrofonernas känslighet (NTI Audio M4261), från dess specifikation.

<b>Mikrofon</b>	<b>Serienummer</b>	<b>Känslighet [mV/Pa]</b>
1	1122	18,3
2	1123	17,5
3	1126	16,0
4	1127	14,8
5	1129	16,7
6	1130	17,5
7	1131	16,3
8	1132	17,5
9	1133	16,9



**Figur E3:** Högtalaren Mackie SRM150.



**(a)**

**(b)**

**Figur E4:** Datasamlingsenheten Roland STUDIO CAPTURE:s framsida (a) respektive baksida (b).