



UPPSALA
UNIVERSITET

UPTEC W 18 009

Examensarbete 30 hp
Mars 2018

Utvärdering av standard EN 1793–6:2012 för att undersöka bullerskyddsskärmars effektivitet in-situ

Evaluation of standard EN 1793–6:2012
to examine noise barriers efficiency in-
situ

Andrea Sjöberg

Referat

Utvärdering av standard EN 1793–6:2012 för att undersöka bullerskyddsskärmars effektivitet in-situ

Andrea Sjöberg

Bullerskyddsskärmar används för att reducera buller från väg- och spårtrafik. Syftet med examensarbetet var att utvärdera standard EN 1793–6:2012, en mätmetod för att undersöka bullerskyddsskärmars effektivitet in-situ med avseende på ljudisoleringen. I nuläget bestäms bullerskyddsskärmars effektivitet med laborationsmätningar i ett diffust ljudfält, som inte överensstämmer med det direkta ljudfält och den komplexitet som är in-situ. Till följd av det blir ofta laborationsmätningarna missvisande. Det finns även en okunskap kring håligheter/läckage och hur det påverkar den akustiska prestandan, vilket gör att det emellanåt leder till brister i installationen av bullerskyddsskärmar och att enhetens ljudreducering inte stämmer överens med förväntningarna. Det finns således ett behov av att bestämma en bullerskyddsskärmars befintliga prestanda in-situ för att säkerställa de krav som ställs i specifikationerna.

EN 1793–6:2012 ansågs vara lämplig för ändamålet men fler mätningar behövs utföras för att kunna säkerställa resultaten och för att verifiera mätsystemet. Ljudisoleringen bestämdes som en funktion av frekvenser i tersband och var giltiga i frekvensområdet mellan 200 Hz till 5 kHz respektive 400 Hz till 5 kHz. De undersökta bullerskyddsskärmarna var: en i laminerat och härdat glas med aluminiumpelare, en icke-homogen vegetationsskärm i stålram och en kombinerad bullerskyddsskärm i akrylglas med aluminiumprofiler. Resultaten jämfördes med laborationsmätningar och/eller simuleringar i Insul. Bullerskyddsskärmarna i glas gav högre värden på ljudisoleringen än i laborationsmätning, ett resultat som kan bero på skillnaderna mellan diffust ljudfält och direkt ljudfält. Komplexiteten i vegetationsskärmen gjorde resultaten svåra att analysera, men läckage förekom i de högre frekvenserna.

Adrienne-fönstren behövde bli specifikt beräknade för samtliga impulssvar eftersom dimensionerna för bullerskyddsskärmarna inte överensstämde med vad som definieras i EN 1793–6:2012 för certifieringsändamål. I EN 1793–6:2012 omnämns inte heller markreflektion, som påverkar den filtrerade signalen. Vidare studier behövs för att filtrera bort dessa oönskade komponenter.

Nyckelord: Buller, bullerskyddsskärmar, EN 1793–6:2012, ljudisolering, ljudisoleringsindex, ljudreducerande enheter, ljudreduktion

Institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet
Villavägen 16, Box 256, SE-752 36 Uppsala, Sverige
ISSN 1401–5765

Abstract

Road traffic noise devices, for example noise barriers, are used to reduce the noise from road traffic and trams. The purpose of this master thesis is to evaluate the standard EN 1793-6:2012, a test method for determining noise barriers efficiency in-situ. Currently, noise barriers efficiency is determined with laboratory measurements in a diffuse sound field, which does not reflect the direct sound field and the complexity that are in-situ. As a result, laboratory measurements are often misleading. Due to a lack of knowledge about leakage, there are sometimes defects caused in the installation of the noise barriers that adversely affect the acoustic properties. There is thus a need to determine the intrinsic parameters of a noise barrier in-situ to ensure the requirements set in the specifications.

The new method described in EN 1793-6:2012 was considered useful for the purpose but it was found that more measurements need to be performed to ensure results and to verify the measurement system. The sound insulation was determined for three noise barriers where results are expressed as a function of frequency in one third octave band and were valid in the frequency range between 200 Hz to 5 kHz respective 400 Hz to 5 kHz. The noise barriers tested were: a barrier in laminated glass with metal posts, a non-homogeneous vegetation barrier in a steel frame and a combined barrier with acrylic glass and metal. The results were compared with laboratory measurements and/or simulations in Insul. The glass barriers showed higher values of the sound insulation index than the laboratory measurements, perhaps due to the different sound fields. The complexity of the vegetation barrier made the results difficult to analyze, but leakage occurred in the higher frequencies.

The Adrienne temporal windows were specifically calculated for all impulse responses, since the dimensions of the noise barriers differed from the one defined in EN 1793-6: 2012 for certification purposes. Also, in EN 1793-6: 2012, ground reflection, which affects the filtered signal, is not mentioned. Further studies are needed to filter out these unwanted components.

Keywords: EN 1793-6:2012, noise, noise barriers, road traffic noise reducing devices, sound insulation, sound insulation index, sound reduction

Förord

Det här examensarbetet motsvarar 30 hp och avslutar således mina studier inom civilingenjörsprogrammet i miljö- och vattenteknik vid Uppsala universitet. Arbetet utfördes på uppdrag av Structor Akustik i Stockholm och min handledare har varit Åsa Stenman Norlander, Johan Arnqvist på Institutionen för geovetenskaper har varit min ämnesgranskare och Monica Mårtensson på Institutionen för geovetenskaper har varit min examinator.

Tack till Massimo Garai och Paolo Guidorzi (*Tabell 1* och *Tabell 2*) samt John Bull (*Tabell 3* och *Tabell 4*) för att jag fick använda era resultattabeller i min rapport. Jag vill också tacka Monica Waaranperä för att jag fick intervjua dig angående EN 1793–6:2012. Tack till Johan, tekniker vid Stockholms sjukhem, och Mikael från Knivsta kommun för att vi fick hjälp att kunna utföra mätningarna vid Fridhemsplan och Knivsta. Och tack till Alexander Betsikokos på ATA för din hjälplighet att få information och laborationsmätningar.

Ett stort tack till min handledare Åsa Stenman Norlander för stöd och kunskap. Tack till alla medarbetare på Structor Akustik och examensarbetare Emelie Rooth för att ni har visat intresse för mitt examensarbete, kommit med input och ibland även hjälpt till under mätningar.

Jag vill självklart även tacka min syster Sofie och min sambo Mikael för ert stöd och för att ni har stått ut med mina utläggningar om hur viktig bullerfrågan är. Med risk av att svamla iväg vill jag även passa på, nu när jag har möjlighet att få det på print, att tacka mina klasskamrater och vänner som jag har fått under mina år i Uppsala.

Sist men inte minst, vill jag tacka två personer som har hjälpt mig extra mycket under den här perioden. Tack till Johan för att du trodde på mig, att du alltid kom med uppmuntran och lärdom, jag har dig att tacka för det här examensarbetet. Jag vill såklart också tacka Stefan på Structor, jag är oerhört tacksam för att du tog dig mycket tid för att hjälpa mig och jag vill också tacka för några underhållande mätningar (oftast även snöiga). Aldrig att glömma; *the linjal* och ”*There are no problems, only possibilities*”.

Andrea Sjöberg
Uppsala 2018

Copyright © Andrea Sjöberg och Institutionen för geovetenskaper, Luft-, vatten- och landsskapslära, Uppsala universitet
UPTEC W 18 009, ISSN 1401–5765
Publicerad digitalt vid Institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet, Uppsala, 2018.

Populärvetenskaplig sammanfattning

Buller definieras som oönskat ljud, till exempel när en lastbil åker förbi utanför fönstret och upplevs som störande. Samhällsbuller är i själva verket det miljöproblem som påverkar störst andel människor i Sverige, över två miljoner människor. Samhällsbuller är ett samlingsnamn för buller från väg-, spår- och flygtrafik och till följd av att fler människor flyttar in till städerna så förväntas andelen människor som upplever sig störda även att öka. Det finns emellertid stor anledning till att bry sig om buller. Tidigare forskning har visat att buller kan medföra betydande hälsoeffekter, bland annat stress, sömnstörningar samt hjärt- och kärlproblem. Det har också visat sig att kroppen inte vänjer sig vid upprepade bullerstörningar, kroppen kommer således inte att vänja sig vid att vara utsatt för buller under en längre tid. Samhällsbuller påverkar inte enbart människan, utan hela den biologiska mångfalden genom att buller påverkar arters beteende, eftersom djuren blir störda. Vissa djur använder sig ju till exempel av ljudsignaler för att hålla samman gruppen, försvara sig, signalera fara, jaga, hävda revir och attrahera partners, och buller kan störa eller överrösta de signalerna. Det leder till en förändrad, ofta försämrad, livsmiljö som påverkar populationer och den biologiska mångfalden.

Det mest betydelsefulla verktyget för att kontrollera omgivningsbuller är genom riktlinjer för buller, men under våren 2017 fastslog regeringen nya riktvärden som tillåter ännu högre ljudtrycksnivåer vid fasad än tidigare. Åtgärder behöver göras för att minska bullermiljön. Ett sätt att minska buller från väg- och spårtrafik är med bullerskyddsskärmar som fungerar som ett hinder mellan bullerkällan och till exempel byggnaden. Det är vanligt förekommande men ska inte misstas för ett plank för att minska insyn. Det är viktigt att bullerskyddsskärmar passar in i den omgivning där den ska vara för att inte förstöra landskapets karaktär. Förutom estetisk design så är även kostnaden för bullerskyddsskärmen viktig. Dessvärre går ofta kostnaden och utseendet före de akustiska egenskaperna, vilket kan göra att bullerskyddsskärmen inte blir så bra som förväntat. Det finns flera parametrar som påverkar hur bra en bullerskyddsskärm är akustiskt, till exempel ljudisoleringen. Syftet med det här examensarbetet är att utvärdera en ny mätmetod för att undersöka hur bullerskyddsskärmars faktiska effektivitet är på plats med avseende på ljudisoleringen.

Bullerskyddsskärmars effektivitet bestäms idag enbart med laborationsmätningar och det finns ett behov att utföra mätningar när den befintliga bullerskyddsskärmen är färdigbyggd på plats. Det är nämligen en mer komplex miljö utomhus än vad det är i ett laboratorium och därför kan laborationsresultaten bli missvisande. Ett annat problem är att det finns en okunskap om hur håligheter och läckage påverkar den akustiska prestandan hos en bullerskyddsskärm. Tidigare forskning har visat att läckage spelar stor roll för bullerskyddsskärmens effektivitet, men ibland förekommer det håligheter och det behövs en mätmetod för att kunna bestämma om den akustiska prestandan är så bra som det faktiskt var tänkt.

Den nya mätmetoden ansågs vara lämplig för att bestämma hur bra en bullerskyddsskärm faktiska prestanda är. Det behöver dock utföras fler mätningar för att kunna säkerställa resultaten och för att vara säker på att mätsystemet är funktionsdugligt. Ljudisoleringen bestämdes på tre olika bullerskyddsskärmar: en i laminerat glas, en vegetationsskärm och en i

kombinerat akrylglas/metall. Resultaten jämfördes med laborationsmätningar och/eller mätningar på konstruerade bullerskyddsskärmar i en beräkningsmodell.

För bullerskyddsskärmar i glas visade resultat från mätningarna högre värden på ljudisoleringen än vad laborationsmätningarna gjorde. Det kan tyckas motsägelsefullt, men det kan eventuellt förklaras med att mätningarna utförts i olika ljudfält och att ljudfältet i laboratorium påverkar bullerskyddsskärmar i glas att uppträda på det sättet. Läckage kan också vara en del i förklaringen.

Vegetationsskärmen var mer komplicerad att analysera, eftersom den inte var homogen på grund av vegetationen (gräs av varierande längd), men det var en förändring i de högre frekvenserna som antydde på att det var ett större läckage i form av en springa. Ett resultat som kunde styrkas med hur bullerskyddsskärmen var konstruerad, eftersom pelaren bara var en skiva mot den trafikerade vägen och bakom den var det en springa.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1. INTRODUKTION	1
1.1 SYFTE	2
1.2 MÅLFORMULERINGAR	2
1.3 AVGRÄNSNINGAR	2
1.4 HYPOTES	2
2. BAKGRUND	3
2.1 HÄLSOEFFEKTER	3
2.2 BIOLOGISK MÅNGFALD OCH NATUR	3
2.3 LJUD OCH LJUDUTBREDNING	4
2.3.1 Buller från väg- och spårtrafik	5
2.4 BULLERSKYDDSSKÄRMAR	5
2.4.1 Akustiska egenskaper	5
2.4.2 Icke-akustiska egenskaper	8
2.5 STANDARD EN 1793–6:2012	9
2.5.1 Mätningar in-situ för att undersöka bullerskyddsskärmars ljudisoleringsindex	9
2.6 ARBETET MED EN 1793–6:2012 I SVERIGE IDAG	13
2.7 TIDIGARE STUDIER MED STANDARD EN 1793–6:2012	14
2.7.1 European methodology for testing the airborne sound insulation characteristics of noise barriers in situ: Experimental verification and comparison with laboratory data (Garai, M. & Guidorzi, P., 2000)	14
2.7.2 Measurement of the airborne sound insulation of traffic noise barriers using impulse response techniques (Bull, J., 2014)	18
2.7.3 In-situ measurements according to EN 1793–5 and EN 1793–6 – When sample size matters (Clairbois, J-P. et al., 2017)	20
2.7.4 In-situ measurements of sound reflection and sound insulation of noise barriers; Validation by means of signal-to-noise ratio calculations (Garai, M. och Guidorzi, P., 2013a)	20
2.7.5 On the declaration of the measurement uncertainty of airborne sound insulation of noise barriers (Garai, M. & Guidorzi, P., 2013b)	21
2.7.6 The use of MLS based methods for characterizing the effectiveness of noise barriers and absorptive road surfaces (Morgan, P. & Watts, G., 2003)	21
3. METOD	22
3.1 MÄTUTRUSTNING - SYSTEMHÅRDVARAN	22
3.1.1 Datainsamlingsenhet	22
3.1.2 Högtalare	22
3.1.3 Mikrofoner	22
3.1.4 Mikrofonställning	23
3.2 MÄTOBJEKT	23
3.2.1 Fridhemsplan	24
3.2.2 Lidingövägen	25
3.2.3 Knivsta	26
3.3 UTFÖRANDE	28
3.3.1 Mätningar in-situ	28
3.3.2 Signalprocessering	29
4. RESULTAT	30
4.1 FILTRERING, UNDRE FREKVENSVÄRDE OCH GILTIGT FREKVENSSOMRÅDE	30
4.2 BESTÄMNING AV IMPULSSVARETS LÄNGD	32

4.3 BERÄKNING AV LJUDISOLERINGSINDEX, SI_j	32
4.4 BERÄKNING AV SAMMANVÄGDA VÄRDEN	34
4.5 SIGNAL-BRUSFÖRHÅLLET	35
4.6 MÄTOSÄKERHET	35
5. DISKUSSION	36
5.1 FILTRERING AV IMPULSSVAR	36
5.2 VERIFIERING AV IMPULSSVAREN	36
5.3 LJUDISOLERINGSINDEX, SI_j	36
5.4 SAMMANVÄGDA VÄRDEN FÖR DEN TOTALA PRESTANDAN	38
5.5 SIGNAL-BRUSFÖRHÅLLET	38
5.6 MÄTOSÄKERHETEN	38
5.7 UTVÄRDERING AV EN 1793–6:2012	38
5.8 FELKÄLLOR	39
5.9 FÖRSLAG PÅ VIDARE STUDIER	39
6. SLUTSATSER	40
7. REFERENSER	41
BILAGA A – FREKVENSER I TERSBAND	
BILAGA B – DET UNDER GRÄNSVÄRDETS BEROENDE AV HÖJDEN, NÄR BULLERSKYDDSSKÄRMENS HÖJD ÄR MINDRE ÄN BREDDEN	
BILAGA C – NORMALISERAT SPEKTRUM FÖR BULLER FRÅN VÄGTRAFIK, ENLIGT EN 1793–3	
BILAGA D – INTERVJUSAMMANSTÄLLNINGAR	
BILAGA E – INTERVJUFRÅGOR	
BILAGA F – BILDER PÅ MÄTSYSTEMETS HÅRDVARA	
BILAGA G – LÄCKAGE PÅ BULLERSKYDDSSKÄRMEN VID FRIDHEMSPLAN	
BILAGA H – LÄCKAGE PÅ BULLERSKYDDSSKÄRMEN VID LIDINGÖVÄGEN	
BILAGA I – FILTRERING AV IMPULSSVAREN	
BILAGA J – RESULTAT AV LJUDISOLERINGSINDEX, SI_j, I TABELLFORM	

ORDLISTA

Adrienne-fönster (Eng; Adrienne Temporal Window) – Tidsbestämt fönster som används för att filtrera ett impulssvar.

Bakgrundsljud – Ljud som kommer från andra ljudkällor än ljudkällan som skickar ut testsignalen.

Buller – Önskat ljud.

Bullerreducerande enheter – Konstruerade för att reducera ljudutbredning från vägtrafik, till exempel en bullerskyddsskärm.

Ekvivalent ljudtrycksnivå – Medelljudnivån för en definierad tidsperiod.

EN – Europeisk standard.

Frifältsmätning – Mätning in-situ som ger ett referensvärde för ett reflektionsfritt scenario. Mätningen är specifik för den undersökta bullerskyddsskärmen och mätuppställningen har samma definierade avstånd som för mätningen på enheten.

Impulssvar – Ett systems svar på en mycket kort ljudpuls.

Inbyggda parametrar – Akustiska parametrar, beror på konstruktionen.

In-situ – På befintlig plats.

ISO – Internationell standard.

Koincidenseffekt – Resonans mellan ljudvåg i luft och material.

Ljudabsorption – En energiförlust som beror på hur mycket av det inkommande bullret som reflekteras tillbaka till den motsatta sidan vägen, men också på ljudkällan.

Ljudisolering – En energidämpning som beror på bullerskyddsskärmens konstruktion, vikt per ytenhet.

Ljudisoleringsindex – Resultat av den luftburna ljudisoleringen som beskrivs av *Ekvation 1*.

Luftburen ljudisolering – Isoleringen mot ljud sprids genom luft (luftburet ljud).

Pelare – Stolpar som förankrar skärmelement till varandra och mark, ibland akustiska element.

Sammanvägt värde – Ett singelvärde för att redovisa en bullerskyddsskärms olika delars sammanvägda prestanda.

Signal-brusförhållande (Eng; signal-to-noise ratio) – Förhållande mellan bakgrundsljud och impulssvaret i decibel inom Adrienne-fönstret.

Skärmelement – Akustiskt element med primära funktion att förse enheten med akustisk prestanda.

SV EN – Nationell standard (Sverige).

Tersband – En tredjedels oktavband.

Yttre parametrar – Icke-akustiska parametrar.

1. INTRODUKTION

Naturvårdsverket är den myndighet som ansvarar för att utföra en hälsorelaterad miljöövervakning av buller. En viktig uppgift är att uppskatta hur stor andel av befolkningen som utsätts för olika nivåer av samhällsbuller, det vill säga buller från spår-, väg- och flygtrafik. Kartläggningen från 2014 visade att två miljoner människor exponeras för en ekvivalent ljudnivå över 55 dBA vid sin bostad från trafikbuller (Naturvårdsverket, 2017a). Samhällsbullret är således det miljöproblem som påverkar störst andel människor i Sverige (Miljömål, 2013) och andelen ökar i takt med att urbaniseringen ökar, eftersom bostäder alltmer byggs nära större vägar (Tideström, K., 2012). Miljömålet "God bebyggd miljö" innefattar att livsmiljön ska vara hälsosam och eftersom buller har påvisats medföra stora hälsoeffekter behöver insatser göras för att reducera bullermiljön (Miljömål, 2013). Det mest betydelsefulla verktyget för att kontrollera omgivningsbuller är genom riktvärden för buller (Naturvårdsverket, 2017b), men under våren 2017 fastslog Regeringen emellertid nya riktvärden för dygnsekvivalent ljudtrycksnivå vid fasad från spår- och vägtrafik. De nya riktvärdena för bostäder på 35 kvm eller mindre var nivån tidigare 60 dB och nu 65 dB samt för bostäder större än 35 kvm var nivån 55 dB och nu 60 dB (Regeringen, 2017).

Bullerreducerande enheter används för att reducera buller från väg- och spårtrafik, ett exempel på en sådan enhet är en bullerskyddsskärm (CEDR, 2017). Bullerskyddsskärmens prestanda karakteriseras av inbyggda parametrar, det vill säga diffraktionsindex (DI_j) definierad i EN 1793-4 för vägtrafik och EN 16272-4 för spårtrafik, ljudreflektion definierad i EN 1793-5 (RI_j) och ljudisoleringsindex (SI_j), samt yttre parametrar (Couter, M. et al., 2016; CEDR, 2017). Prestandan kontrolleras i nuläget enbart med laborationsmätningar men det finns ett behov av att fastställa deras verkliga prestanda in-situ eftersom brister i kan förekomma i installationen vilket påverkar den akustiska prestandan (Waaanperä, M., 2018; Stenman Norlander, Å. 2018). För att bestämma en bullerreducerande enhets prestanda finns följande standarder:

- EN 1793-1: Road traffic noise reducing devices – Test method for determining the acoustic performance – Part 1: Intrinsic characteristics of sound absorption;
- EN 1793-2: Road traffic noise reducing devices – Test method for determining the acoustic performance – Part 2: Intrinsic characteristics of airborne sound insulation under diffuse sound fields conditions;
- EN 1793-3: Road traffic noise reducing devices – Test method for determining the acoustic performance – Part 3: Normalized traffic noise spectrum;
- EN 1793-4: Road traffic noise reducing devices – Test method for determining the acoustic performance – Part 4: Intrinsic characteristics – In situ values of sound diffraction;
- EN 1793-5: Road traffic noise reducing devices – Test method for determining the acoustic performance – Part 5: Intrinsic characteristics – In situ values of sound reflection and airborne sound insulation; och
- EN 1793-6: Road traffic noise reducing devices – Test method for determining the acoustic performance – Part 6: Intrinsic characteristics – In situ values of airborne sound insulation under direct sound field conditions.

Examensarbetet syftar till att utvärdera EN 1793–6:2012, som beskriver en testmetod in-situ för att bestämma den luftburna ljudisoleringen i ett direkt ljudfält. Med hjälp av en teknik som involverar impulssvar med deterministiska excitationssignaler kan mätningar utföras i miljöer där det förekommer bakgrundsbrus (CEDR, 2017). Merparten av det här examensarbetet refererar till den metod som definieras i EN 1793–6:2012.

1.1 SYFTE

Examensarbetet syftar till att utveckla och utvärdera ett mätsystem som uppfyller EN 1793–6:2012. Utvärderingen baseras på mätningar av ljudisoleringen in-situ, vilket är en parameter som har visat stämma bra överens med laborationsmätningar (CEDR, 2017), på lämpliga mätobjekt. Mätningarna kommer därefter att jämföras med teoretiska beräkningar på ideala skärmar och eventuella redan utförda laborationsmätningar.

1.2 MÅLFORMULERINGAR

- Genomföra en litteraturstudie.
- Utveckla ett mätsystem som uppfyller EN 1793–6:2012.
- Utvärdera det utvecklade mätsystemet genom att utföra mätningar samt analys på lämpliga mätobjekt i enlighet med EN 1793–6:2012.
- Jämföra resultat med teoretiska beräkningar (för ideala skärmar), specifikation i upphandlingar mellan akustiker och byggherrar samt eventuella laborationsmätningar.

1.3 AVGRÄNSNINGAR

Initialt avgränsades examensarbetet till att analysera ljudisoleringen på fyra till sex lämpliga mätobjekt, men på grund av tidsbrist valdes istället tre mätobjekt ut för att undersökas.

1.4 HYPOTES

Mätningarna in-situ, i enlighet med EN 1793–6, antas ge liknande kurvor fast förskjutna nedåt på ljudisoleringsindexet i tersband jämfört med laborationsmätningarna, i enlighet med EN 1793–2. Detta eftersom mätningarna in-situ tar hänsyn till brister i installationen av en bullerskyddsskärm och läckage som antas påverka ljudisoleringen negativt.

2. BAKGRUND

En litteraturstudie genomfördes som fokuserade på att få en ökad förståelse i bullerreducerande enheters relevans och grundläggande akustiska egenskaper. Framför allt har buller från vägtrafik studerats, eftersom EN 1793–6:2012 är tillämpningsbar för det, men även spårtrafik omnämns.

2.1 HÄLSOEFFEKTER

Samhällsbuller påverkar både hälsa och livskvalitet. Det är en subjektiv reaktion och hur störd en individ blir beror på flera faktorer, bland annat på ljudets styrka och frekvens, eventuella vibrationer, variation över tid och tid på dygnet, psykologiska komponenter samt den omgivande miljön. Buller kan på så sätt påverka människans möjlighet till god livskvalité (Miljömål, 2013). En studie av Babisch, W. et al. (2001), som syftade till att förstå hur trafikbuller påverkar stresshormoner i kroppen, visade en positiv korrelation mellan trafikbullernivå och utsöndring av stresshormonet noradrenalin. Buller är således en stressor som aktiverar kroppens hormoner och det autonoma nervsystemet, vilket frisätter stresshormoner. Stresshormonerna påverkar flera kroppsliga funktioner, som till exempel blodtryck, immunförsvar och ämnesomsättning (KI, 2017). De fysiologiska funktionerna kan påverkas både tillfälligt och permanent. Om kroppens fysiologiska funktioner påverkas tillfälligt så kan det ge upphov till förhöjt blodtryck och höjd hjärtfrekvens samt hörselskador. Det är ännu inte klarlagt hur människan påverkas av långvarigt förhöjda ljudnivåer, men studier visar på att långvarig exponering kan ge upphov till hjärt- och kärlsjukdomar (Folkhälsomyndigheten, 2016).

Sömnstörningar är en av de mest kritiska effekterna av buller, eftersom kroppen behöver ostörd sömn för att mentalt och fysiologiskt kunna fungera (Naturvårdsverket, 2017b). En enkätstudie av Belojević, G. et al. (2009) visade att respondenter från bullriga områden oftare angav svårigheter i att somna och vakna, dålig sömnkvalitet, trötthet efter sömn och användning av sömnmedicin, än respondenter från tysta områden. En annan studie, som syftade till att undersöka förhållandet mellan ökade blodtrycks- och hjärtfrekvensnivåer i samband med flygplanshändelser under natttid, antydde på att kroppen inte heller vänjer sig vid återkommande bullerstörningar (Folkhälsomyndigheten, 2016). Vid bakgrunds nivåer uppmätta från 30 dBA inomhus har mätbara störningar fastställts och från maximala ljudtrycksnivåer från 45 dBA inomhus har väckningseffekter påvisats (Länsstyrelsen, 2007).

Otillräcklig kunskap om bullers effekt på människor och brist på definierade kriterier har lett till att kontrollen av miljöbuller inte har varit tillräcklig i jämförelse med andra föroreningar. Till exempel finns det en låg andel studier som har karakteriserat den rumsliga korrelationen mellan buller och luftföroreningar, något som troligtvis behöver studeras ytterligare (Istrate, I.A. et al., 2014).

2.2 BIOLOGISK MÅNGFALD OCH NATUR

Transportinfrastrukturen påverkar inte enbart människan, utan har betydande effekt på hela den biologiska mångfalden. Buller och kemikalier förorenar omgivningen, ofta i samverkan med varandra. Det påverkar arters beteende eftersom det stör djur som använder ljudsignaler för att hålla samman deras grupp, till exempel för att försvara sig, signalera fara, jaga, hävda revir och

attrahera partners. Det leder till en förändrad, ofta försämrad, livsmiljö som påverkar populationer och biologisk mångfald. Effekterna är bra belagda för fåglar, men fler arter påverkas (Helldin, J-O., 2013). Även fiskar påverkas negativt av buller, men främst av buller från fartyg och vindkraftverk (Andersson, M. & Sigray, P, u.å.). Det är emellertid förbjudet att ”avsiktligt störa djur, om det äventyrar arters livslånga livskraft” (Helldin, J-O., 2013), enligt svenska artskyddsförordningen som är baserad på EU:s naturvårdsdirektiv.

Eftersom det är ett komplext problem finns det i dagsläget inte en samlad tillståndsbeskrivning vad gäller väg- och spårtrafikens påverkan på biologisk mångfald och natur. Förutom trafikminskning är bullerskyddsskärmar ett åtgärdsalternativ, men kunskapsbristen inom området gör att ytterligare forskning behövs för att kunna säkerställa att arterna inte får betydande negativa effekter (Trafikverket, 2015).

2.3 LJUD OCH LJUDUTBREDNING

Ljud är tryckvågor som sprids i ett elastiskt medium (Nationalencyklopedin, u.å.). Ljudtrycksnivå mäts i decibel (dB), en logaritmisk skala som karaktäriserar ljudstyrkan i förhållande till en referensnivå (Socialstyrelsen, 2008). Beroende på vilken typ av störning som utvärderas så kan ljudet vara antingen A-, C- eller ovägt (Larsson, 2016), där A är det index som är viktat mot hur det mänskliga örat generellt uppfattar ljud (Länsstyrelsen, 2007). För att beskriva trafikbuller används primärt den A-vägda ekvivalenta ljudtrycksnivån, L_{Aeq} [dBA], för en godtycklig tidsperiod, vanligtvis 24 timmar. Den ekvivalenta ljudtrycksnivån tar större hänsyn till höga ljudtrycksnivåer och till antalet fordon (Länsstyrelsen, 2007).

Ljudvågor som sprids i luft kallas för luftburet ljud, stomljud och/eller markvibrationer. Luftburet ljud är direktljud, som sprider sig direkt från källan till mottagaren, och reflekterat ljud, som har reflekterat minst en gång mellan källan till mottagaren. För en byggnad så överförs det luftburna ljudet överförs genom fasad, tak, ventilation och läckage (springläckage). Generellt dämpar fasaden högre frekvenser bättre än låga frekvenser, något som kallas lågpassfiltrering. Lågpassfiltreringen blir mer påtaglig om det inte finns ett fönster som vetter ut mot vägen, eftersom fönstrets ljudreduktion normalt är den bristande faktorn i en fasad. Därför upplevs bullret från vägtrafik generellt som ett dovt muller inomhus (WSP, 2015). Stomljud är ljudvågor som överförs till underlaget och sedan kan alstra nytt ljud på stora avstånd från källan (Andersson, 1998). Stomljud kan också spridas som transienter, det vill säga energirika och kortvariga bullertoppar. Stomljud från väg- eller spårtrafik överförs genom markvibrationer eller genom mekanisk kontakt via exempelvis balkar eller betongelement. I tätorter, där avstånd mellan byggnader och vägbanor generellt är mindre, kan väg- och spårtrafik även ge upphov till stomljudstörningar. Markvibrationer är lågfrekventa och ligger i frekvensområdet 1 Hz till 80 Hz. Markvibrationstörningar kan vara fysiskt kännbara i både mark och närliggande byggnader, särskilt om marken är elastisk. Enligt Norges Geotekniska Institut, NGI, borde inte mikrofoner användas för att mäta stomljud utan istället borde en accelerometer användas, eftersom luftljudsstörningar kan påverka resultatet (WSP, 2015).

Ljud kan beskrivas i olika frekvenser och för att beskriva en ljudsignals frekvensfördelning så delas ljudsignalen upp i oktavband, med referens i hur människan upplever ljud (Hallberg, J., 2007). Oktavbanden kan delas upp i tredjedels oktavband, tersband, som beskriver ljudsignalen

än mer specifikt, se *Bilaga A*. Oktavbanden begränsas av ett undre och ett övre gränsvärde, men namnges av dess mittfrekvens, där varje mittfrekvens är en fördubbling av den föregående (The Engineering Toolbox, 2017). Oktavband har en konstant relativ bandbredd, vilket innebär att skillnaden mellan den undre och den övre gränzfrequensen för ett band (bandbredden) genom division med bandets geometriska mittfrekvens erhåller samma värde oberoende av vilket band som iakttas. Frekvensspektrumet upplevs olika på olika delar av spektrumet, särskilt anmärkningsvärt är det att ljud upplevs svagare med ökad frekvens. Låga och höga frekvenser används för att beskriva hela frekvensområdet, oavsett vilken del av spektrumet som observeras. Trafikbuller brukar oftast studeras mellan frekvenserna 50 Hz och 5 kHz, där kan höga frekvenser antas vara mellan 2 kHz och 5 kHz. Det kan jämföras med det hörbara spektrumet, 20 Hz till 20 kHz, där de höga frekvenserna vanligtvis är mellan 10 kHz och 20 kHz (Hallberg, J., 2007).

2.3.1 Buller från väg- och spårtrafik

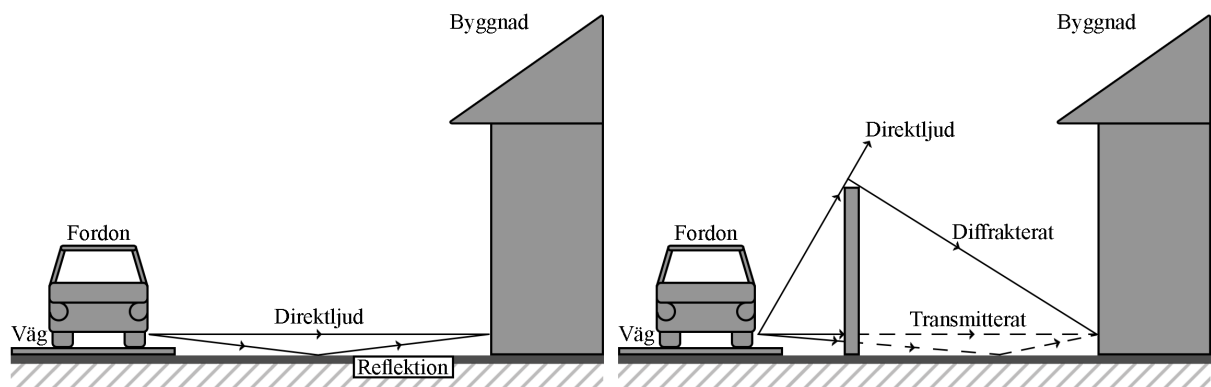
Fordon brukar klassificeras som antingen lätta eller tunga. Det spektrum som generellt används för att karaktärisera vägbuller innehåller störst andel lätta fordon och en mindre andel, ofta 5 % till 10 %, tung trafik (Kropp, W., 2010). Vid alstring av stomljud och markvibrationer är fordonets totala vikt och hastighet betydelsefulla parametrar, men ursprunget är mer komplext (WSP, 2015). Den huvudsakliga ljudkällan från ett fordon är från friktion mellan däck och väg, men fordonets kraftenhet är även av betydelse, det vill säga motor, avgassystem och fläktar. I avsevärt högre hastigheter så är vindturbulens av signifikant betydelse (Ejmont, J.A. & Sandberg, U., 2002). Ljudet från tunga fordon är dovre, eftersom de generellt dels låter mer totalt och dels har högre ljudtrycksnivå i det lägre frekvensområdet, <200 Hz. Tunga fordon har en ljudtrycksnivå som är vanligtvis 8 dBA högre än lätta fordon vid 90 km/h. För tyngre fordon kan även transienta ljud vara en signifikant bullerkälla, till exempel bromsljud, detta brukar dock inte synas i ekvivalentnivån (Kropp, W., 2010). Genom att behandla ljudkällan, mottagaren eller transmissionsvägen kan ljudtrycksnivån minskas (Bies, D. & Hansen C., 2009).

2.4 BULLERSKYDDSSKÄRMAR

Bullerskyddsskärmar har både akustiska egenskaper såväl som icke-akustiska egenskaper. Det är en konstruktion som ska tillgodose flera funktioner. I det här avsnittet beskrivs främst de akustiska egenskaperna men även icke-akustiska egenskaper omnämns.

2.4.1 Akustiska egenskaper

Bullerskyddsskärmar skapar ett hinder för vägbullret genom att blockera det direkta ljudfältet mellan ljudkällan till mottagaren. En bullerskyddsskärm som är korrekt konstruerad hindrar en betydande del av ljudvågorna att passera igenom (CEDR, 2017), se *Figur 1*. Figuren till vänster visar hur ljudet överförs mellan ljudkällan och mottagaren utan en bullerskyddsskärm medan figuren till höger visar hur ljudet överförs med en bullerskyddsskärm på plats. I det senaste fallet är mottagaren således exponerad för diffraktion (ljudvågorna över bullerskyddsskärmen samt ljudvågorna från sidorna) och transmission (ljudvågorna genom bullerskyddsskärmen) (CEDR, 2017).



Figur 1. Bullerskyddsskärmen skapar ett hinder mellan ljudkällan (fordonet) och mottagaren (byggnaden). I figuren till vänster finns ingen bullerskyddsskärm och i högra figuren finns en bullerskyddsskärm som blockerar direktljudet.

Ljudreduktionen bakom en bullerskyddsskärm beror på (CEDR, 2017):

- i) de akustiska egenskaperna hos bullerskyddsskärmen (ljudisolering, diffraktion och absorption/reflektion)
- ii) dimensioner för bullerskyddsskärmen (längd, höjd, tjocklek och form)
- iii) utförande och installation
- iv) åldrande, det vill säga förändring över tid
- v) position för ljudkällan, bullerskyddsskärmen och mottagaren
- vi) trafikintensitet
- vii) hastighetsförhållanden
- viii) vägytan
- ix) terräng mellan den trafikerade vägen och mottagaren
- x) meteorologiska faktorer

2.4.1.1 Ljudisolering

Det är helheten av en bullerskyddsskärm och utförandet som beskriver hur bra ljudisoleringen blir. En betydande ljudisolering hos en bullerskyddsskärm dämpar de direkta ljudvågorna genom skärmelementet. Bullerskyddsskärmens massa och tjocklek är avgörande för ljudisoleringens egenskaper. För en bullerskyddsskärm är densiteten av ordningen $\geq 15\text{--}20 \text{ kg/m}^3$ gynnsamma. Det transmitterade ljudet definieras antingen som DL_R [dB] eller DL_{SI} [dB], beroende på om det är baserat på laborationstester eller mätningar in-situ, två parametrar som vanligen ger god korrelation. Differensen mellan dem kan förklaras med att mätningarna sker i olika ljudfält, diffust ljudfält för laborationsmätningar och direkt ljudfält för mätningar in-situ, och att det direkta ljudfältet är mer komplext (CEDR, 2017).

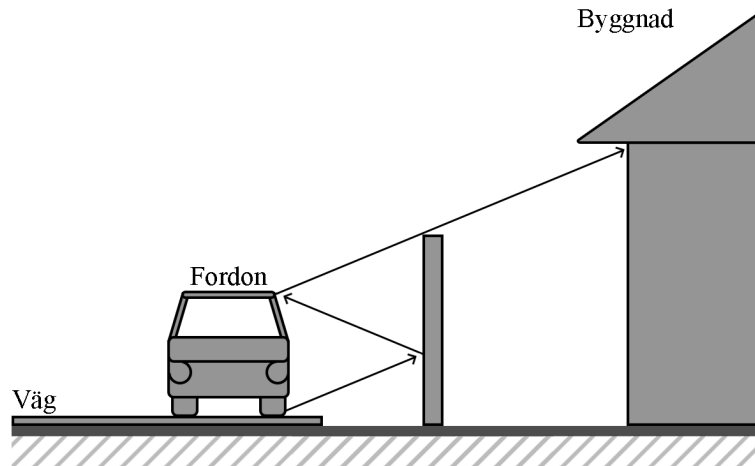
2.4.1.2 Läckage

Läckage påverkar bullerskyddsskärmens ljudisolering negativt. De mest betydelsefulla källorna till läckage är vid gränssytor mellan komponentmaterial i bullerskyddsskärmen, till exempel mellan gränssnitt och skärmelement eller pelare. Ju högre bullerskyddsskärmen är, desto mer betydande blir effekterna av läckaget. Det är också betydande att skärmelementet består av hållbara komponentmaterial eftersom hål/läckage kan uppkomma i och med att materialen

åldras. En bullerskyddsskärms dimensioner och position relativt mottagaren varierar, därför behöver de vara väl designade för att minimera sannolikheten för läckage. Det är också av avgörande betydelse att efterfölja tillverkarens instruktioner vid installation (CEDR, 2017).

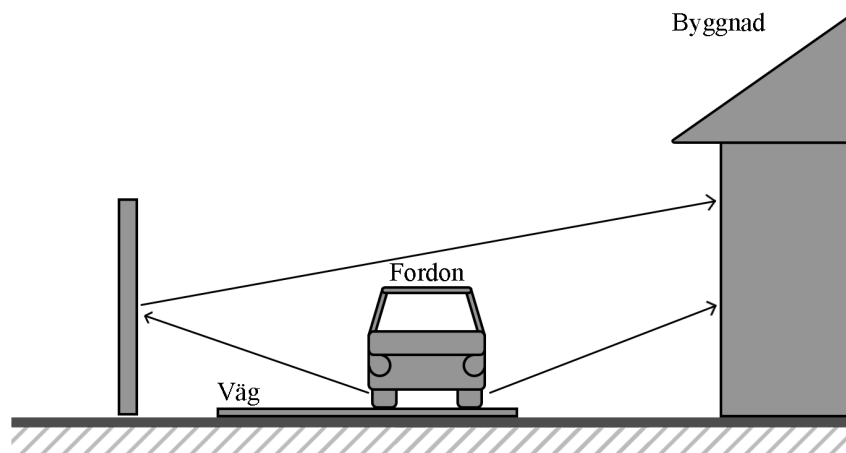
2.4.1.3 Absorption och reflektion

Bullerskyddsskärmens ljudabsorption, DL_α [dB], definierar hur det inkommande vägbullret reflekterar tillbaka till den motsatta sidan av vägen, men också tillbaka på ljudkällan. Reflektionsytor uppkommer på flera ställen; mellan bullerskyddsskärmen och till exempel passerande fordon samt mot närliggande byggnader (CEDR, 2017).



Figur 2. Upprepade reflektioner mellan en bullerreducerande enhet och ett passerande fordon, orsakat av att bullerskyddsskärmen är icke-absorberande eller reflekterande.

Icke-absorberande eller reflekterande bullerskyddsskärmar tillåter ljudet att sprida sig vilket ger upphov till upprepade, oönskade reflektioner, se *Figur 2*. Det medför att ljudtrycksnivån framför bullerskyddsskärmen ökar och för att motverka detta borde en bullerskyddsskärm med en godtyckligt hög absorptionsgrad väljas. På en närliggande byggnad på motsatt sida av en bullerskyddsskärm, se *Figur 3*, kan reflektion ge ett bidrag på maximalt + 3 dBA. En bullerskyddsskärm med $DL_\alpha \geq 10$ dB anses ge en tillräckligt god absorptionsförmåga (CEDR, 2017).



Figur 3. Reflektionsbidrag på en närliggande byggnad, orsakat av att bullerskyddsskärmen är icke-absorberande eller reflekterande.

2.4.1.4 Diffraction

Diffraction kallas den ljudutbredning som uppkommer när direktljudet bryts av och sprids. Det finns två placeringar av diffraction som kan uppkomma hos bullerskyddsskärmar, nämligen diffraction när ljudvågor bryts av mot enhetens topp eller ljudvågor som bryts av mot sidorna. Den begränsande faktorn vid akustiska utföranden är ofta diffractionen från dess topp. Bullerskyddsskärmens höjd har visats vara en betydande parameter eftersom detta avgör avståndet för de diffrakterande ljudvågorna från toppen. Toppens utformning är också av betydande karaktär för de diffrakterande ljudvågorna (Couter, M. et al., 2016; CEDR, 2017).

2.4.1.5 Risker vid utförandet ur akustisk synpunkt

Sammanfattningsvis kan det konstateras, utifrån avsnitten ovan, att för att minimera risker vid konstruktionen av en bullerskyddsskärm behöver följande komponenter tas i beaktning:

- i) materialkomponenternas densitet och konstruktion
- ii) närvaron av läckage
- iii) hur god absorptionsförmåga bullerskyddsskärmen har, särskilt om det är byggnader på motsatt sida
- iv) hur bullerskyddsskärmens topp är utformad
- v) hur bullerskyddsskärmen anses förändras över tid, det vill säga åldras

Genom att designa en väl anpassad bullerskyddsskärm för en specifik plats och följa tillverkarens instruktioner vid installation minimeras riskerna för att den akustiska prestandan blir lägre än förväntat. I dagsläget så sker det inga efterkontroller efter installation för att undersöka den akustiska prestandan, och för att uppnå ett fullvärdigt resultat borde både efterkontroller och övervakning av de akustiska egenskaperna utföras under hela bullerskyddsskärmens livslängd (CEDR, 2017).

2.4.2 Icke-akustiska egenskaper

Icke-akustiska egenskaper hos en bullerskyddsskärm är till exempel estetisk design, form, materialkomponenter och höjd. I allmänhet påverkar likväl dessa egenskaper hur effektiv en bullerskyddsskärmes ljudreduceringsförmåga blir. Bullerskyddsskärmar behöver bli designade för att passa in i den specifika omgivningen för att inte förstöra landskapets karaktär. Det är även av betydelse att bullerskyddsskärmen består av hållbara material så att utförandet förblir konsekvent genom hela dess livslängd. Andra faktorer som är avgörande för utförandet av en bullerskyddsskärm är kostnad, plats, säkerhet och underhålls krav. Dessvärre prioriteras ofta kostnaden och utseendet före de akustiska egenskaperna, vilket gör att en bullerskyddsskärm emellanåt inte blir så bra som förväntat (NZ Transport Agency, 2010).

2.5 STANDARD EN 1793–6:2012

EN 1793–6:2012 är en testmetod för att bestämma den luftburna ljudisoleringen för en ljudreducerande anordning vid trafikerade vägar i förhållande till en frifältsmätning utan reflekterande ljud. Standarden kan även användas för andra förhållanden, till exempel för spårtrafik eller industri, men då behöver mätningen anpassas med ett mer passande spektrum för ändamålet.

Standarden kan användas för:

- i) att bestämma en bullerskyddsskärms ljudisolering in-situ
- ii) att jämföra en bullerskyddsskärms ljudreducering med specifikationer från mätningar i laboratorium
- iii) att verifiera den långsiktiga ljudreduceringen för en bullerskyddsskärm
- iv) att vara ett hjälpmedel vid utformningen av nya ljudreducerande enheter

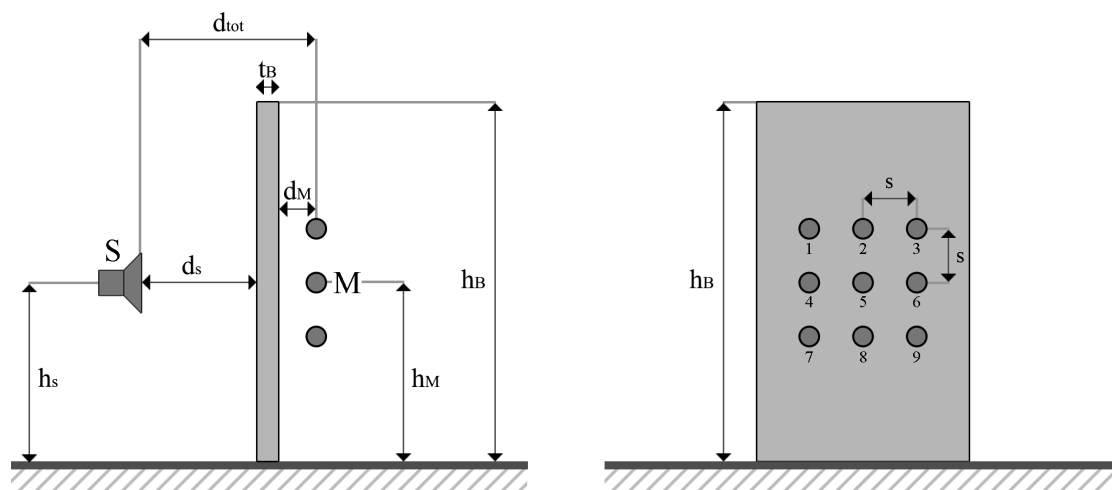
Resultat presenteras som en funktion av frekvenser i tersband mellan 100 Hz och 5 kHz. Om det inte är möjligt att få validerat resultat över det frekvensspannet kan ett begränsat frekvensområde användas om orsakerna till restriktionen motiveras tydligt.

2.5.1 Mätningar in-situ för att undersöka bullerskyddsskärmars ljudisoleringsindex

EN 1793–6:2012 baseras på två impulsresponsmätningar, en i frifält (reflektionsfritt) och en mätning på en befintlig bullerskyddsskärm. För båda mätningarna mäts ljudsignalerna med hjälp av nio mikrofoner i ett rutnät, 3 x 3, med ett avstånd på 0,4 m mellan mikrofonerna. Mikrofonerna är placerade 0,25 m från den mest utskjutande delen av bullerskyddsskärmens. Den mittersta mikrofonen och ljudkällan ligger på samma axel, där ljudkällan är en högtalare placerad 1,0 m från den främsta delen av bullerskyddsskärmens. Se *Figur 4* för mätuppställning för frifältsmätningen och *Figur 5* för mätuppställning för en bullerskyddsskärm.



Figur 4. Skiss över mikrofonuppställningen för frifältsmätningen (ej skalenlig). Figuren till vänster är mätuppställningen sett från sidan och figuren till höger är mätuppställningen sett framifrån. Förklaring av beteckningarna: (vänster) S = ljudkälla (högtalare); M = ljudmätare (mikrofoner); $h_s = 0,5$ m x bullerskyddsskärmens höjd; $d_{TOT} = 1,25$ m + bullerskyddsskärmens tjocklek; (höger) $s = 0,4$ m (avstånd mellan mikrofonerna). Numreringen i figuren till höger visar mikrofonnumreringen.



Figur 5. Skiss över mätuppställningen för bullerskyddsskärmsmätningen (ej skalenlig). Figuren till vänster är mätuppställningen sett från sidan och figuren till höger är mätuppställningen satt framifrån. Förklaring av betäckningarna: (vänster) S = ljudkälla (högtalare); M = ljudmätare (mikrofoner); h_B = bullerskyddsskärmens höjd; $h_S = h_M = 0,5$ m \times h_B ; $d_S = 1,0$ m (avstånd mellan högtalare och bullerskyddsskärm); $d_M = 0,25$ m (avstånd mellan mikrofoner och bullerskyddsskärm); t_B = bullerskyddsskärmens tjocklek; $d_{TOT} = d_S + d_M + t_B$; (höger) $s = 0,40$ m (avstånd mellan mikrofonerna). Numreringen i figuren till höger visar mikrofonnumreringen.

Den generella principen går ut på att ljudkällan emitterar en ljudtrycksvåg som träffar den undersökta bullerskyddsskärmen och blir därefter delvis reflekterad, transmitterad och diffrakterat. Mottagaren, mikrofonerna, mäter det transmitterade och diffrakterande ljudet. För att mätningen ska anses tillräckligt bra så behöver det diffrakterande ljudet från kanterna vara signifikant fördröjda, så att den filtrerade signalen inte får influenser från oönskade komponenter. Frifältsmätningen och den transmitterande ljudtrycksvågen från mätningen på bullerskyddsskärmen ligger till grund för bestämningen av ljudisoleringsindexet, som är ett logaritmiskt medelvärde av de nio mikrofonerna.

Ljudisoleringsindex, SI [dB], beräknas i varje tersband mellan 100 Hz och 5 kHz, med hjälp av impulssvaren från båda mätningarna, enligt *Ekvation (1)*:

$$SI_j = -10 \log \left\{ \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{\int_{\Delta f_j} |F[h_{tk}(t)w_{tk}(t)]|^2 df}{\int_{\Delta f_j} |F[h_{ik}(t)w_{ik}(t)]|^2 df} \right\} \quad (1)$$

där

$h_{ik}(t)$ är referenskomponenten för impulssvaret från frifältsmätningen

$h_{tk}(t)$ är den transmitterade komponenten för impulssvaret

$w_{ik}(t)$ är tidsfönstret vid referenspunkten för frifältsmätningen

$w_{tk}(t)$ är tidsfönstret vid den transmitterade komponenten

F är symbol för Fouriertransform

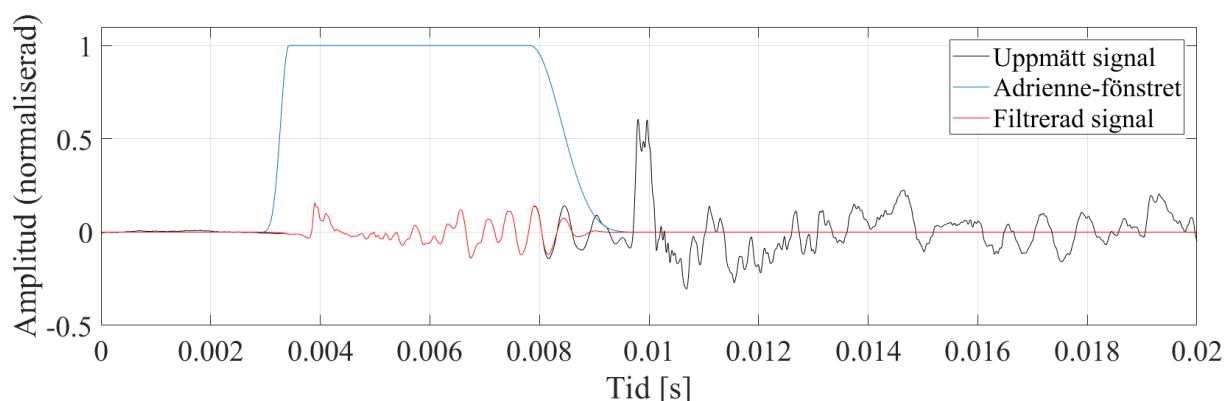
j är indexet för det j^{th} tersbandet, mellan 100 Hz och 5 kHz

Δf_j är bredden för det j^{th} tersbandet

n är antalet mikrofonpositioner, $n = 9$

2.5.1.1 Filtrering - Adrienne Temporal Window

I EN 1793–6: 2012 specificeras ett tidsfönster, *Adrienne*, (Eng; Adrienne Temporal Window) som filtrerar bort de diffrakterade komponenter från impulssvaren. Tidsfönstret definieras som en halv Blackman-Harris kurva om 0,5 ms, en rektangulär sektion om 5,18 ms och en halv Blackman-Harris kurva om 2,22 ms. Den totala längden för Adrienne-fönstret är således 7,9 ms för en ideal bullerskyddsskärm, enligt EN 1793–6:2012. I *Figur 6* ses ett exempel på ett filtrerat impulssvar med hjälp av ett Adrienne-fönster. Blå linje är Adrienne-fönstret, röd linje är den filtrerade signalen och svart linje är det uppmätta frekvenssvaret.



Figur 6. Ett exempel på ett filtrerat impulssvar med hjälp av ett Adrienne-fönster. Blå linje är Adrienne-fönstret, röd linje är den filtrerade signalen och svart linje är det uppmätta frekvenssvaret.

2.5.1.2 Undre gränsvärde - Low frequency limit

Det undre gränsvärdet bestäms av längden på Adrienne-fönstret, som i sin tur bestäms av den minsta dimensionen, höjden eller bredden, för den ljudreducerande enheten. När enhetens höjd är mindre än bredden är den mest kritiska komponenten det diffrakterande ljudet från bullerskyddsskärmens topp och när bredden är mindre än höjden så beror istället det undre gränsvärdet på en funktion av höjden, se *Bilaga B*. Om bullerskyddsskärmens tjocklek är av betydelse förväntas det undre gränsvärdet anta ett längre värde. Det undre gränsvärdet beskriver i vilket frekvensområde som resultaten är giltiga.

2.5.1.3 Bestämning av en bullerreducerande enhets prestanda

För att indikera en bullerskyddsskärmens prestanda beräknas tre sammanvägda värden med hjälp av ljudisoleringsindexet för: skärmelementet, pelaren (om möjligt) och ett totalvärde för hela enheten beräknat med de andra värdena. Värdena för skärmelementets och pelarens ljudisoleringsindex vägs enligt det normaliserade spektra för vägtrafik, som definieras i EN 1793–3, se *Bilaga C*. De tre värdena skall beräknas med en decimalsiffra och resultatet presenteras som ett heltal. Värdena skall beräknas för de minsta dimensionerna.

Skärmelementets index, $DL_{SI,E}$ [dB], beräknas enligt *Ekvation (2)*:

$$DL_{SI,E} = -10 \log \left[\frac{\sum_{i=m}^{18} 10^{0,1L_i} 10^{-0,1SI_{E,i}}}{\sum_{i=m}^{18} 10^{0,1L_i}} \right] \quad (2)$$

där

$SI_{E,i}$ är ljudisoleringsindexet mätt för skärmelementet i det i^{th} tersbandet
 m är värdet för det lägsta tillförlitliga tersbandet, baserat på Adrienne-fönstret där $m=4$
 L_i är det relativt A-viktade ljudtrycksnivån [dB] för det normaliserade vägtrafikspektrumet i det i^{th} tersbandet, som definieras i EN 1793-3

Pelarens index, $DL_{SI,P}$ [dB], beräknas enligt *Ekvation (3)*:

$$DL_{SI,P} = -10 \log \left[\frac{\sum_{i=m}^{18} 10^{0,1L_i} 10^{-0,1SI_{P,i}}}{\sum_{i=m}^{18} 10^{0,1L_i}} \right] \quad (3)$$

där

$SI_{P,i}$ är indexet för ljudisoleringen mätt över pelaren, i det i^{th} tersbandet
 m är värdet för det lägsta tillförlitliga tersbandet, baserat på Adrienne-fönstret där $m=4$
 L_i är det relativt A-viktade ljudtrycksnivån [dB] för det normaliserade vägtrafikspektrumet i det i^{th} tersbandet, som definieras i EN 1793-3

Därefter kan det totala värdet, $DL_{SI,G}$, beräknas enligt *Ekvation (4)*:

$$DL_{SI,G} = -10 \log \left[\frac{10^{-0,1DL_{SI,E}} + 10^{-0,1DL_{SI,P}}}{2} \right] \quad (4)$$

där

$DL_{SI,E}$ är värdet för skärmelementet [dB]

$DL_{SI,P}$ är värdet för pelaren [dB]

Om värdet för pelaren inte kan beräknas blir istället totala värdet för prestandan ekvivalent med värdet för skärmelementet.

2.5.1.4 Osäkerheter

Osäkerheten skall bestämmas för samtliga mätningar som har utförts enligt EN 1793-6:2012, gärna i enlighet med ISO/IEC Guide 98-3.

2.5.1.5 Meteorologiska förhållanden och enhetens yta

EN 1793-6:2012 begränsas av bland annat meteorologiska förhållanden och enhetens yta. Den omgivande temperaturen ska vara mellan 0 °C och 40 °C under mätningarna och vindhastigheten inte bör överstiga 5 m/s. Mätningarna bör genomföras på en torr yta, så länge inte undersökningen syftar till att undersöka olika meteorologiska faktorerers inverkan på ljudutbredningen. Yttemperaturen bör vara mellan 0 °C och 70 °C under mätningarna.

2.6 ARBETET MED EN 1793–6:2012 I SVERIGE IDAG

Monica Waaranperä (MW) på Trafikverket och Åsa Stenman Norlander (ÅSN) på Structor Akustik intervjuades med syfte att få en ökad förståelse kring arbetet med EN 1793–6:2012 i Sverige idag och hur det troligtvis kommer att se ut i framtiden. Se *Bilaga D* för fullständiga intervjusammanställningar och *Bilaga E* för intervjufrågorna.

Standard *EN 14388:2005 Road traffic noise reducing devices - Specifications* (sv; Vägutrustning - Bullerskydd - Specifikationer) är en produktstandard som beskriver vilka parametrar som kan deklarerar för produktstämpling (CE-märkning). De akustiska parametrarna som behandlas är diffraktion, reflektion/absorption och ljudisolering, men också icke-akustiska parametrar inkluderas såsom hållfasthet, vindlaster och livslängd. Hur parametrarna skall verifieras beskrivs i undergrupper till EN 14388:2005, dock innefattar denna inga standarder med mätningar in-situ, till exempel EN 1793–6:2012. Enligt MW så finns det en senare produktstandard från 2015, som omfattar dessa standarder, men den blev aldrig publicerad i Official Journal, inte på grund av innehållet utan på administrativa teknikaliteter. Eftersom EN 14388:2015 inte har publicerats så är den inte bunden av produktansvarslagen och därför går det inte att beställa en bullerskyddsskärm som deklarerar enligt EN 14388:2015. Av denna anledning så har inte mätningar in-situ någon status och bullerskyddsskärmars prestanda deklarerar istället enbart genom mätningar i laboratorium, trots att mätningarna sker i ett diffust ljudfält istället för ett direkt ljudfält. Eftersom publiceringen drog ut på tiden så bestämde sig arbetsgruppen TC 226/WG6 istället för att ytterligare uppdatera EN 14388, vilken förhoppningsvis kommer publiceras under 2018, och som i framtiden också är tänkt att inkludera en standard för hållbarhet (Eng; Sustainability). Samtliga standarder som tillhör EN 14388:2005 är applicerbara för vägtrafik och i dagsläget finns det ingen produktstandard för bullerskyddsskärm för järnvägstrafik (Waaranperä, M., 2018).

Trafikverket måste upphandla enligt byggproduktlagen och eftersom marknaden i nuläget inte kräver att vissa egenskaper ska deklarerar så är det ingenting som har implementerats. Observera även att alla egenskaper inte måste uppfyllas för att en bullerskyddsskärm ska bli CE-märkt, utan bara några parametrar måste uppfyllas. Det är beställarna som måste styra marknaden och insistera att parametrar även ska redovisas genom mätningar in-situ för att undersöka en bullerskyddsskärmns funktion i ett direktljudsfält. MW:s förhoppning är att det ska kravställas i deras upphandlingsmallar i framtiden (Waaranperä, M., 2018).

De efterkontroller som utförs på en bullerskyddsskärm efter att den är färdigkonstruerad granskar om enheten är tillräckligt säker, klarar vindlaster, klarar krocksäkerhet och att den består i ett antal år. ÅSN menar att det dessvärre inte kontrolleras hur bra bullerskyddsskärmen är akustiskt och om den faktiskt klarar de akustiska krav som har ställts på den. Akustiker borde vara med genom hela arbetet för att kunna säkerställa att det blir en optimal bullerskyddsskärm akustiskt sett ur alla variabler. För att säkerställa bullerskyddsskärmens effektivitet borde mätningar utföras in-situ (Stenman Norlander, Å., 2018).

I framtiden ser gärna ÅSN även att akustiker är med genom hela processen som standard och att de får vara med och göra mer detaljerade specifikationer. Enligt ÅSN finns det en kunskapslucka som ibland leder till att specifikationen inte efterföljs fullständigt, att det blir en fråga om vad för material som finns tillgängligt och kostnad. Otydligheter eller för luftiga specifikationer kan göra att bullerskyddsskärmen som konstrueras inte håller akustiskt. Det kan till exempel vara om det är otydligheter i tätning eller massan av någon konstruktionsdel. Leverantörerna behöver bli mer medvetna om hur deras eventuella val som avviker från specifikationerna påverkar enhetens akustiska prestanda. ÅSN ser gärna att akustiker är med och pratar med leverantörerna från start, så att alla inblandade har samma synvinkel och fokus (Stenman Norlander, Å., 2018).

När byggnationen av bullerskyddsskärmen sedan påbörjas så kan akustiker vara med i en granskningsfas och besiktiga det som har byggts hittills, för att säkerställa att enheten faktiskt håller akustiskt enligt specifikationen. Då kan standarderna för mätningar in-situ användas, till exempel EN 1793–6:2012. Om bullerskyddsskärmen inte är tillräckligt bra så kan justeringar göras så att den håller enligt specifikationerna. Efter att hela konstruktionen är på plats så kan efterkontroller utföras för att än en gång undersöka enhetens prestanda. Det borde även ske återkommande kontroller efter ett antal år. Detta skulle det inte behövas akustiker för att genomföra, men akustikens synpunkter behöver vara med. Detta kan till exempel göras med en specifikation för underhållsplan som beställaren får ansvara för. Exempelvis behöver underdelen mot mark oftast bytas ut efter några år, eftersom den bland annat utsätts för en större andel fukt med mera (Stenman Norlander, Å., 2018).

2.7 TIDIGARE STUDIER MED STANDARD EN 1793–6:2012

Tidigare studier med mätningar i enlighet med EN 1793–6:2012 analyserades för att komplettera eventuella uppdateringar av genomförandet.

2.7.1 European methodology for testing the airborne sound insulation characteristics of noise barriers in situ: Experimental verification and comparison with laboratory data (Garai, M. & Guidorzi, P., 2000)

En studie av Garai, M. och Guidorzi, P. (2000) utvärderade 17 bullerskyddsskärmar, se *Tabell 1*, för att verifiera testmetoden som definieras i 1793–6:2012 genom att jämföra med laborationsmätningar, enligt EN 1793–2:1997. För båda fallen beräknades ett sammanvägt värde för ljudisoleringsindexet fram. I studien beskrevs vikten av en mätmetod in-situ, eftersom ljudläckage som ett resultat av bristande installation och design inte kan detekteras med laborationsmätningar. Detta kunde styrkas med de erhållna resultaten, där mätningarna in-situ ofta gav högre ljudreduktion än laborationsmätningarna. En sammanställning av resultaten ses i *Tabell 2*.

Tabell 1. Grundläggande egenskaperna för de undersökta bullerskyddsskärmarna (Garai, M. & Guidorzi, P., 2000)¹

Sample	Type	Basic elements composition	Element thickness (mm)	Element height (m)	Element width (m)
CON1	Concrete	Back: concrete 2500 kg/m ³ Front: light clay aggregate 1250 kg/m ³	275	2.00	4.50
CON2	Concrete	Back: concrete 2500 kg/m ³ Front: light clay aggregate 1250 kg/m ³	250	2.00	3.00
CON3	Concrete	Back: concrete 2500 kg/m ³ Front: light clay aggregate 1250 kg/m ³	250	2.00	3.00
CON4	Concrete	Back: concrete 2050 kg/m ³ Front: light clay aggregate blocks (1000 kg/m ³) with holes (resonators)	220	2.00	3.26 (last 1.70)
CON5	Concrete	Back: concrete 2500 kg/m ³ Front: light clay aggregate 1200 kg/m ³	190	4.00	2.40 (last 1.20)
CON6	Concrete	Back panel: concrete 2500 kg/m ³ Front panel: grooved light concrete	240	1.00	4.00 (last 2.00)
MET1	Metal	Box made with a 1.5-mm metallic sheet, perforated on one face and filled with a 100-kg/m ³ rock wool blanket, 80 mm thick	119	0.50	4.00 (last 2.00)
MET2	Metal	Curved box made with a 1.5-mm metallic sheet, perforated on one face and filled with an 85-kg/m ³ rock wool blanket, 50 mm thick, and a high-density synthetic damper	130	0.50	4.00 and 3.00
MET3	Metal	Box made with a 1.5-mm metallic sheet, perforated on one face and filled with a 95-kg/m ³ rock wool blanket, 60 mm thick	115	0.50	3.00
MET4	Metal	Single 1.0-mm metallic sheet, folded to form protruding supports 60 mm wide	60	0.50	4.00 (last 2.00)
MET5	Metal	Single 1.0-mm metallic sheet, folded to form protruding supports, 60 mm wide, containing panels in polyester fibre wool, thickness 50 mm, density 50 kg/m ³ . Frontal protection grid.	60	0.50	4.00 (last 2.00)

¹ Reprinted with permission from “European methodology for testing the airborne sound insulation characteristics of noise barriers *in situ*: Experimental verification and comparison with laboratory data”. Copyright 2000, Acoustic Society of America.

MET6	Metal	Box made with a 1.0-mm metallic sheet, perforated on one face and filled with a 100-kg/m ³ rock wool blanket, 40 mm thick	122	0.50	3.00
MET7	Metal	Box made with a 1.8-mm metallic sheet, perforated on one face and filled with a 85-kg/m ³ rock wool blanket, 40 mm thick, and a high-density synthetic damper	80	0.50	4.00 and 3.00
RES1	Resin	Box made with a 3-mm-thick polyether resin sheet reinforced using glass fibers, perforated on one face and filled with a 60-kg/m ³ glass fiber blanket, 40 mm thick	86	0.50	3.00
ACR1	Acrylic	Polymethylmethacrylate (PMMA) sheets 20 mm thick, supported by a metallic frame, 130 mm thick	20	2.00	3.00
MIX1	Bottom (0 to 2m): metal Top (2 to 4 m): acrylic	Box made with a 1.5-mm metallic sheet, perforated on one face and filled with a 90-kg/m ³ rock wool blanket, 60 mm thick. Polymethyl methacrylate (PMMA) sheets 15 mm thick, supported by a metallic frame, 120 mm thick	120/15	0.50/2.00	3.00
WOOD	Wood	From front to back: wood tiles 1x1 m ² , made of spaced laths 19 mm thick; 90-kg/m ³ rock wool blanket, 60 mm thick; fiber-concrete aggregate board, 4 mm thick; wood board, 19 mm thick	127	1.00	3.00

Tabell 2. Sammanvägda värden för ljudisoleringsindexet från mätningar in-situ och laborationsmätningar samt det viktade reduktionsindexet, R_w (Garai, M. & Guidorzi, P., 2000)²

Sample	Type	R_w (dB)	DL_R (dB)	DL_R (dB)	DL_{SI} (dB)	DL_{SI} (dB)
		laboratory 100 Hz to 5 kHz	laboratory 100 Hz to 5 kHz	laboratory 200 Hz to 5 kHz	outdoors elements 200 Hz to 5 kHz	outdoors posts 200 Hz to 5 kHz
CON1	Concrete	56	52	54	63	61
CON2(Q)	Concrete	46	44	44	57	38
CON2(A)	Concrete	56	52	53	57	38
CON3	Concrete	53	48	50	62	54
CON4	Concrete	55	50	51	60	64
CON5	Concrete	48	45	45	55	57
CON6	Concrete	53	50	51	59	55
MET1	Metal	36	31	33	39	33
MET2	Metal	33	29	31	32	35
MET3	Metal	36	31	34	37	33
MET4	Metal	26	23	23	31	26
MET5	Metal	30	26	26	32	32
MET6	Metal	34	28	31	30	34
MET7	Metal	30	28	28	33	36
RES1	Resin	27	23	25	25	23
ACR1	Acrylic	36	33	33	40	40
MIX1	Metal/acrylic	32	30	31	37	29
WOOD	Wood	34	30	30	34	27

Resultat visade en god korrelation mellan mätningarna in-situ och laborationsmätningarna. Ett samband mellan mätningarna in-situ och laborationsmätningarna togs fram för ett av mätobjekten (CON2), se *Ekvation 5* och *Ekvation 6*:

$$\text{Skärmelement: } DL_{SI} = 1,18DL_R - 0,94 \quad (r = 0,97) \quad (5)$$

$$\text{Pelare: } DL_{SI} = 1,18DL_R - 3,16 \quad (r = 0,93) \quad (6)$$

Från laborationsmätningarna togs även ett förhållande mellan den luftburna ljudisoleringen och det viktade ljudreduceringsindexet, R_w , beräknat över frekvensområdet 100 Hz till 5 kHz fram, se *Ekvation 7*:

$$DL_R = 0,93R_w - 3,05 \quad (r = 0,995) \quad (7)$$

Slutsatserna var att testmetoden beskriven i EN 1793–6:2012 var tillräcklig för den avsedda användningen, eftersom den var enkel att använda och pålitlig att tillämpas på flera varianter av bullerskyddsskärmar.

² Reprinted with permission from “European methodology for testing the airborne sound insulation characteristics of noise barriers *in situ*: Experimental verification and comparison with laboratory data”. Copyright 2000, Acoustic Society of America.

2.7.2 Measurement of the airborne sound insulation of traffic noise barriers using impulse response techniques (Bull, J., 2014)

Ett examensarbete av Bull, J. (2014) syftade till att mäta åtta bullerskyddsskärmars ljudisolering i Auckland, Nya Zeeland, med mål att få en ökad förståelse kring de faktorer som påverkar bullerskyddsskärmars prestanda. En sammanställning av mätobjekt ses i *Tabell 3*. Ett mätsystem i enlighet med standard EN 1793–6:2012 utvecklades och validerades för att uppfylla de krav som definieras i standarden. Resultat av studien visade att ett liknande värde för ljudisoleringen kan erhållas för flera mätningar på samma bullerskyddsskärm. Det konstateras även att den akustiska prestandan blir sämre av läckage och dolda defekter, särskilt i de högre frekvenserna.

Tre olika högtalare validerades för att säkerställa att ljudkällan skulle uppfylla de kriterier som beskrivs i standarden. För samtliga högtalare var impulssvarens längd >3 ms och gav relativt jämna frekvensvar. Högtalaren med störst effektkapacitet (600 W) valdes eftersom det ger en ökad förmåga att uppfylla kraven för signal-brusförhållandet. Mikrofonhållarnas inverkan på mätningarna undersöktes även med slutsatsen att de gav en försumbar påverkan på resultatet. Fyra olika mikrofonställningar studerades för att undersöka eventuella ytterligare reflektioner. Fiberull användes för att reducera amplituder från oönskade, eventuella reflektioner. Enbart små skillnader kunde ses för de olika mikrofonställningarna, där den obehandlade mikrofonuppställningen hade den största variationen 1,2 dB i 3,15 kHz tersbandet jämfört med referensen. Slutsatsen var att reflektioner från mikrofonställningen ansågs vara svagt märkbara och kan därför antas ha en försumbar påverkan på impulssvaren. Även valideringstestet för att undersöka påverkan från mikrofonernas vindskydd ansågs vara försumbara, eftersom den största variationen var 0,5 dB i 5 kHz tersbandet.

Tabell 3. Beskrivning av mätobjekt i Auckland, Nya Zeeland (Bull, J., 2014)

Mätobjekt	Material	Antal mätningar	Höjd [m]
St Marys Bay	Akryl	2 x skärmelement 1 x pelare	3,60
Greenhithe	Konstruerat virke	2 x skärmelement 2 x pelare	4,20
Maioro Street 1	Konstruerat virke	2 x skärmelement 2 x pelare	2,90
Maioro Street 2	Betong	1 x skärmelement 1 x pelare	3,20
Hobsonville	Plywood	2 x skärmelement	3,90
Green Lane	Betong	1 x skärmelement 1 x pelare	3,30
Kingsland Cycleway	Timmer	2 x skärmelement	3,90
Northern Busway	Plywood	1 x skärmelement	2,10

Resultaten, se *Tabell 4*, för studien visade att mätobjekten Greenhithe, Maioro Street och Hobsonville gav konsekventa värden för ljudisoleringen, inom ± 1 dB från varandra. Det resultatet fick dock inte de mätobjekten där läckage och dolda defekter förekom, det vill säga för St Marys Bay, Kingsland Cycleway och Greenhithe-pelarna. För St Marys Bay, där det förekom större luftluckor mellan skärmelement och betongfundamentet, blev

ljudisoleringsindexet lägre i det 1,25 kHz tersbandet. Mer signifikanta prestanda-förluster för enheten erhöles när mätningarna utfördes närmare luftluckorna. Kingsland Cycleways bullerskyddsskärm bestod av flera luftluckor, orsakat av timmerplankornas åldrande. Resultatet visar på låga värden av ljudisoleringen vid höga frekvenser och ett sammanvägt värde på 19 dB, som följd av större sekundära toppar i Adrienne-fönstret. Pelaren vid Greenhithe hade dolda effekter då skärmelementet inte var tillräckligt fäst vid pelaren. Detta gav ett resultat på 29 dB, som kan jämföras med skärmelementen på vardera sida av pelaren med värden på 32 dB och 33 dB. En prestandaförlust kunde utläsas från ljudisoleringsindexet för pelaren mellan frekvensområdet 500 Hz till 1 kHz och över 2 kHz.

Tabell 4. Sammanställning över ljudisoleringsindex och sammanvägda värden för mätobjekten, inkl. komponent för läckage för St Marys Bay inom parantes (Bull, J., 2014)

Mätobjekt	DL _{SI} [dB] in-situ skärmelement	DL _{SI} [dB] in-situ pelare	Frekvensområde [Hz]
St Marys Bay	34 (39) 32 (42)	26 (41)	400 till 5 k
Greenhithe	32 33	29 16	160 till 5 k
Maio Street 1	36 35	36 36	400 till 5k
Maio Street 2	66	65	250 till 5 k
Hobsonville	30 30	-	200 till 5 k
Green Lane	54	54	250 till 5 k
Kingsland Cycleway	19 19	-	250 till 5 k
Northern Busway	34	-	400 till 5 k

Bullerskyddsskärmarna i betog gav bäst resultat, vilket var väntat på grund av frånvaro av läckage och högre densitet. Bullerskyddsskärmarna i timmer var båda av liknande konstruktion men varierande dimensioner och att den ena uppskattades vara fyra år äldre. Resultat skiljde sig inte så märkbart från varandra, förutom att den äldre hade en försämring i 1 kHz till 3,15 kHz tersbandet, något som inte kunde förklaras men med misstanke om att det berodde på de varierande dimensionerna. Skärmelementet vid pelare två vid Greenhithe var inte tillräckligt förankrat och kan därför förklara det låga värdet.

På grund av bristande kunskap om signal-brusförhållandet vid de första mättillfällena var det inte över 10 dB, med hänsyn till medelvärde, över hela det giltiga frekvensområdet. Det var särskilt i 3,15 till 5 kHz tersbandet som bristerna uppkom. Resultatet för signal-brusförhållandet varierade kraftigt mellan val av metod och för andra metoder än den som valdes blev några av dessa mätningar istället giltiga.

Osäkerheten beräknades inte för resultaten på grund av att samtliga mätningar skulle utföras med samma mätsystem. Dock inkluderades maximum- och minimumvärden för

reproducerbarhetsvärdet fram för både skärmelement och pelare, enligt en studie av Garai, M., Guidorzi, P. & Schoen, E. (2013).

Slutligen konstaterades det att en sweep-sinussignal, istället för en MLS-signal, bör användas eftersom den hanterar icke-linjäriteter i systemet mer effektivt, det vill säga eliminerar avvikelser som kan vara en följd av förändringar av vindhastighet och temperatur.

2.7.3 In-situ measurements according to EN 1793–5 and EN 1793–6 – When sample size matters (Clairbois, J-P. et al., 2017)

En studie av Clairbois, J-P., et al. (2017) syftade till att undersöka samplingsstorleken betydelse när den ljudreducerande enheten är mindre än vad som definieras i EN 1793–6:2012 för certifieringsändamål. Resultat från studien visade att Adrienne-fönstret måste anpassas följaktligen när dimensionerna för en bullerskyddsskärm är mindre än vad som definieras, vilket således påverkar den lägst giltiga frekvensen. I studien diskuteras det också om hur icke-homogena och konsekventa enheters samplingsstorlek och Adrienne-fönster behöver analyseras mer grundligt.

2.7.4 In-situ measurements of sound reflection and sound insulation of noise barriers; Validation by means of signal-to-noise ratio calculations (Garai, M. och Guidorzi, P., 2013a)

Garai, M. och Guidorzi, P. (2013a) visade kriterium för att kunna verifiera mätresultat som har utförts i enlighet med EN 1793–6:2012, men också för andra mätningar in-situ. I EN 1793–6:2012 definieras att impulsvaret att det behöver vara minst 10 dB över bakgrundsljudet under hela mätningen för att resultaten ska vara giltiga över hela frekvensområdet. Mätmetoden är enbart applicerbar för frekvenser i en tredjedels oktavband och baseras på en utvärdering av impulsvarets signal-brusförhållande, enligt *Ekvation 8*:

$$SNR_{SI,k,j} = 10 \log_{10} \left\{ \frac{\int_{\Delta f_j} |F[h_k(t)w_{signal,k}(t)]|^2 df}{\int_{\Delta f_j} |F[h_k(t)w_{noise,k}(t)]|^2 df} \right\} \quad (8)$$

där

$h_k(t)$ är den uppmätta impulssignalen vid den k^{th} mikrofonpositionen

$w_{signal,k}(t)$ är tidsfönstret för det undersökta impulsvaret, vanligen ekvivalent till 1 mellan 3,5 ms till 7,0 ms, annars 0

$w_{noise,k}(t)$ är tidsfönstret för det undersökta impulsvarets bakgrundsljud, vanligen vald till 1 mellan 0 ms till 3,5 ms, annars 0

k är mikrofonen som undersöks ($k = 1$ till 9)

j är indexet för tersbandet till det giltiga frekvensområdet

Δf_j är bredden för det j^{th} tersbandet

F är symbol för Fouriertransform.

2.7.5 On the declaration of the measurement uncertainty of airborne sound insulation of noise barriers (Garai, M. & Guidorzi, P., 2013b)

Garai, M. & Guidorzi, P. (2013b) visade hur mätosäkerhet för bullerskyddsskärmars ljudisoleringen, som definieras enligt standard 1793:6–2012, kan hanteras, något som inte har funnits innan. För EN 1793:6 rekommenderar studien att basera mätosäkerheten på de laborationsvärden på reproducerbarheten, R , som erhållits genom det EU-finansierade projektet QUIESST. Reproducerbarheten är den slumpmässiga variationen under förändrade mätförhållanden, till följd av exempelvis olika mätsystem, aktörer, mätplatser (laboratorier) och återupprepande mätningar på en enhet eller liknande. Reproducerbarhetsvärdet beräknas som den expanderade osäkerheten, U , enligt *Ekvation 9*:

$$R = U = k \times u = k \times s_R \quad (9)$$

där

k är täckningsfaktorn som beror konfidensnivå och på fördelningen av möjliga värden för den specifika mätningen (generellt används en konfidensnivå på 95%)

s_R är standardavvikelsen hämtade från ISO/DIS 12999–1 och QUIESST

Avslutningsvis rekommenderas det i studien att EN 1793:6 uppdateras med standardavvikelser, s_R , från QUIESST-testet och att 95 %-konfidensintervall beräknas innan avrundningen av de sammanvägda värdena utförs.

2.7.6 The use of MLS based methods for characterizing the effectiveness of noise barriers and absorptive road surfaces (Morgan, P. & Watts, G., 2003)

En studie av Morgan, P. & Watts, G., (2003) verifierade en metod baserad på maximala längdsekvenser, MLS, med syfte att karaktärisera ljudabsorption och transmission för ett antal olika bullerskyddsskärmar och vägytor. Resultat visade att håligheter uppträdde som mindre ljudkällor med spridningsmönster beroende på läckagets dimensioner. Mätresultat kan således variera med avståndet mellan mikrofonställning och läckaget. Variationer på större än 2 dB karaktäriseras som följd av mindre bra tillverkning och design. För ett mätobjekt ledde stora brister i konstruktionen mellan skärmelement och pelare till att de sammanvägda värdena blev 37 dB respektive 20 dB medan laborationsmätningar gav ett resultat på 45 dB. Slutsatsen från studien var att MLS-metoden inte var lämplig på mätobjekt med låg ljudabsorption. Vid mätningar över betydande läckage/lufthål gav detta signifikanta effekter.

3. METOD

För att uppnå projektets syfte så utfördes mätningar in-situ och analys av mätningarna. För att få en ökad förståelse i hur arbetet kring EN 1793–6:2012 fungerar idag så genomfördes intervjuer med Monica Waaranperä, bullerspecialist på Trafikverket, och Åsa Stenman Norlander, konsult på Structor Akustik.

3.1 MÄTUTRUSTNING - SYSTEMHÅRDVARAN

Kraven för systemhårdvaran beskrivs i EN 1793–6:2012. För att utföra mätningar i frekvensområdet 100 Hz till 5 kHz i tersband krävs det att utrustningen klarar av frekvensområdet 88 Hz till 5650 Hz. Se *Bilaga F* för bilder på hårdvaran.

3.1.1 Datasamlingsenhet

Datasamlingsenheten som användes var STUDIO-CAPTURE, Roland. Enheten är portabel och dess specifikationer återfinns i *Tabell 5*. Med Roland är det möjligt att individuellt bestämma in- och utgångsvolym.

Tabell 5. Specifikationer för Roland. Information hämtad från Thomann (2013)

Information	Specifikation
Antal inputs	16
Antal outputs	10
Maximal upplösning	24 bit
Maximal samplingshastighet	192 kHz
Operativsystem	Windows och Mac

3.1.2 Högtalare

Ljudkällan som användes var Mackies SRM150, ett bärbart ljudförstärkningssystem, se specifikationer i *Tabell 6*.

Tabell 6. Specifikationer för SRM150. Information hämtad från Thomann (2010)

Information	Specifikation
Diameter	133 mm
Frekvensintervall	100 Hz till 17,5 kHz
Maximal ljudtrycksnivå	120 dB
Effekt	150 W (klass D)

3.1.3 Mikrofoner

Nio stycken ljudmätare från NTI Audio, M4261, användes för att mäta ljudtrycksnivåer, se specifikationer i *Tabell 7* och *Tabell 8* för mikrofonnummer, position och serienummer för ljudmätarna.

Tabell 7. Specifikationer för M4261. Information hämtad från Thomann (2017)

Information	Specifikation
Typ	Klass 2
Diameter	20,5 mm
Längd	150 mm
Frekvensintervall	20 till 20 kHz
Maximal ljudtrycksnivå	146 dB
Känslighet	16,3 mV/Pa
Ström	48 V DC

Tabell 8. Mikrofonnummer, position och serienummer för ljudmätarna

Mikrofonnummer	Position (se Figur 4/5)	Serienummer
1	Högst upp	1122
2	Högst upp	1123
3	Högst upp	1126
4	Mitten	1127
5	Mitten	1129
6	Mitten	1130
7	Längst ner	1131
8	Längst ner	1132
9	Längst ner	1133

3.1.4 Mikrofonställning

Mikrofonställningen är huvudsakligen gjord av aluminium och står på två justerbara stativ. Nio stycken justerbara hållare i plast fästs till mikrofonställningen som håller de nio mikrofonerna på plats.

3.2 MÄTOBJEKT

Mätningar utfördes i enlighet med standard EN 1793–6:2012 på tre bullerskyddsskärmar, en i glas vid Fridhemsplan, en vegetationsskärm vid Lidingövägen och en i absorberande material/akrylglas vid Knivsta tågstation. Mätobjekten behövde uppfylla vissa kriterier, exempelvis möjlighet att kunna vara på båda sidorna av bullerskyddsskärmen utan fara för säkerheten. Se *Tabell 9* för en sammanställning av de valda mätobjekten och *Tabell 10* för den rådande lufttemperaturen vid mättillfällena, hämtat från SMHI:s observationsdata (2018). I det här avsnittet följer en mer detaljerad beskrivning av de tre mätobjekten.

Tabell 9. Sammanställning av de tre mätobjekten som undersöktes

Mätobjekt	Material	Tjocklek [mm]	Höjd [m]	Bredd [m]
Fridhemsplan	Laminerat, härdat glas	12,00	2,75	1,90
Lidingövägen	Vegetation/stållram	29,00	2,50	1,14
Knivsta	Akryl/aluminium	15,00	4,00	4,00

Tabell 10. Rådande lufttemperatur vid mättillfällena (timdata), hämtat från SMHI (2018)

Mätobjekt	Lufttemperatur [°C]
Fridhemsplan	1,2–1,4
Lidingövägen	2,0–2,5
Knivsta	-0,4

3.2.1 Fridhemsplan

Bullerskyddsskärmen vid Fridhemsplan var av laminerat, härdat glas fäst i aluminiumprofiler, se *Figur 7*. Enhetens höjd varierade mellan 2 m till 3 m och även bredden mellan stål stolparna varierade, men det undersökta skärmelementet hade höjden 2,75 m och bredden 1,90 m. En detaljerad beskrivning av mätobjektet återfinns i *Tabell 11*.



Figur 7. Bild på högtalar- och mikrofonuppställningen för mätning av bullerskyddsskärmen vid Fridhemsplan, från den trafikerade vägen. De röda cirklarna visar vart mätningarna utfördes.

Tabell 11. Detaljerad beskrivning av mätobjektet vid Fridhemsplan

Information	Observation
<i>Anmärkning</i>	<i>Mätningen är baserad på en metod enligt EN 1793–6:2012</i>
Mätplats	Fridhemsplan, Drottningholmsvägen vid Vallgossen 13
Datum för mätningen	2017-12-11
Tillverkare	Frijo (tidigare Grävbolaget) / Ekströms glas
Typ	Laminerat, härdat glas
Beskrivning av skärmelementet	Bullerskyddsskärm i laminerat, härdat glas fäst i aluminiumprofiler
Beskrivning av pelaren	Pelarna är varmförzinkade stål stolpar, 160 mm

Beskrivning av fastsättning	Enheten är fäst i betongfundament utan synlig ovkant, varav det är träpaneler mellan mark och aluminiumprofilerna
Dimensioner	2,75 m hög 1,90 m bred 0,012 m tjock
Ytans torrhet	Fuktig
Ytans temperatur	-
Läckage	Två hål 0,5 x 0,5 cm vid vardera sida av pelarens nederkant, se <i>Bilaga G</i> , det vill säga fyra hål per skärmelement
Fysiskt tillstånd under mätningen	Inget anmärkningsvärt bortsett från håligheter
Närliggande objekt	En byggnad cirka sju m till vänster om bullerskyddsskärmen satt från den trafikerande vägen och en byggnad 30 m rakt fram (på andra sidan bullerskyddsskärmen)

3.2.2 Lidingövägen

Bullerskyddsskärmen vid Lidingövägen är en vegetationsbarriär med stålprofil, se *Figur 8*. Konstruktionen hade en komplex uppbyggnad eftersom den inte var homogen. En detaljerad beskrivning av mätobjektet återfinns i *Tabell 12*.



Figur 8. Bullerskyddsskärmen på Lidingövägen (från den trafikerade vägen). Till vänster ses placering av ljudkällan under mätning, från den trafikerade sidan. De röda cirkelarna visar vart mätningarna utfördes. Till höger ses de fickor som vegetation växte ut från. Vegetationen var av olika varianter och storlek.

Tabell 12. Beskrivning av mätobjektet vid Lidingövägen

Information	Observation
<i>Anmärkning</i>	<i>Mätningen är baserad på en metod enligt EN 1793–6:2012</i>
Mätplats	Lidingövägen, vid korsningen till Löjtnantsgatan (idrottsplatsen)
Datum för mätningen	2017-12-15
Tillverkare	Stockholm stad, egenkonstruerad
Typ	En vegetationsskärm
Beskrivning av skärmelementet	Basen till skärmelementet är ett grovt sträckmetallnät. I håligheterna finns jord (fyllning) som gräs av varierande längd växer på. Skärmelementet är således inte konsekvent. Håligheterna är av dimensionen 14,5 x 3,5 cm
Beskrivning av pelaren	Pelarna är av (rostat) stål. Pelarna består av en skiva mot den trafikerade vägen, på andra sidan är det luft, se <i>Bilaga H</i>
Beskrivning av fastsättning	Enheten är fäst i betongfundament
Dimensioner	2,50 m hög 1,14 m bred 0,29 m tjock
Ytans torrhet	Fuktig
Ytans temperatur	-
Läckage	Öppet >10 mm mellan skärmelement och mark, som en glipa. Håligheter längst upp på grund av att fyllningen har sjunkit ner
Fysiskt tillstånd under mätningen	Det fanns håligheter mellan skärmelementets övre kant och innermaterialet, antagligen på grund av att materialet är rörligt och har sjunkit ned. Materialet är inte konstant utan fyllningen varierar över hela bullerskyddsskärmen
Närliggande objekt	-

3.2.3 Knivsta

Bullerskyddsskärmen vid Knivsta tågstation är av varierande material, till mestadels av ett absorberande skärmelement men också dels av ett skärmelement i kombinerat glas, se *Figur 9*. På grund av yttre omständigheter utfördes mätningar enbart på den kombinerade glasskärmen med tillhörande pelare. En detaljerad beskrivning av mätobjektet återfinns i *Tabell 13*. Mätuppställningen för mätningen på pelaren mellan skärmelementen i kombinerat glas kan ses i *Figur 10*.



Figur 9. Bullerskyddsskärmen i Knivsta, absorberande skärmelement/kombinerat glas. De röda cirkelarna visar vart mätningarna utfördes.

Tabell 13. Beskrivning av mätobjektet vid Knivsta

Information	Observation
Anmärkning	Mätningen är baserad på en metod enligt EN 1793-6:2012
Mätplats	Knivsta, tågstation
Datum för mätningen	2018-01-18
Tillverkare	ATA / Forster
Typ	Absorberande skärmelement / kombinerat glas
Beskrivning av skärmelementet	Abs. skärm: Enkelsidiga högabsorberande bullerskyddsskärm i aluminium; Glas: Akryl, tjocklek 15mm, ytvikt: 25 kg/m ² , fäst med gummi till pelare i aluminium
Beskrivning av pelaren	Abs. pelare i aluminium
Beskrivning av fastsättning	Enheten är antagligen fäst i betongfundament
Dimensioner (glas)	4,0 m hög 4,0 m bred 15,0 mm tjock
Ytans torrhet	Fuktig
Ytans temperatur	-
Läckage	Inga synliga håligheter
Fysiskt tillstånd under mätningen	Inget anmärkningsvärt
Närliggande objekt	-



Figur 10. Mätuppställning för mätning på pelaren mellan skärmelementen i kombinerat glas för bullerskyddsskärmen i Knivsta.

3.3 UTFÖRANDE

Utförandet består av mätningar i enlighet med EN 1793–6:2012 och en dataanalys för att beräkna samtliga ljudisoleringsindex, SI_j , och bestämma enheternas totala prestanda.

3.3.1 Mätningar in-situ

Dimensioner (höjd, bredd och tjocklek) mättes in för respektive mätobjekt och noterades. Konstruktionen och eventuella håligheter undersöktes. Se *Tabell 14* för det mätschema som utfördes vid de olika mätningarna.

Tabell 14. Mätschema för de olika mätobjekten

Mätobjekt	Material	Antal mätningar	Höjd [m]	Bredd [m]
Fridhemsplan	Laminerat, härdat glas	1 x skärmelement	2,75	1,90
Lidingövägen	Vegetation/jord/stål	1 x skärmelement 1 x pelare	2,50	1,14
Knivsta	Aluminium/akryl	1 x skärmelement 1 x pelare	4,00	4,00

Mikrofonuppställningen monterades och mikrofonerna placerades på respektive plats, enligt *Figur 4* och *Figur 5*. Därefter utrustades samtliga mikrofoner med vindskydd och kopplades in till datasamlingsenheten Roland. Högtalaren ställdes in i samma höjd och axel som mikrofon fem. Roland och högtalaren förseddes med AC-ström. Utrustningen startades och ljudsignalen ställdes in så att ljudtrycksnivån var minst 10 dB över bakgrundsljudet på mottagarsidan, se *Tabell 15* för mätinställningar i mjukvaran Easera. Därefter startades mätningen och data samlades in. Frifältsmätning beror på skärmdimensionerna och utfördes därför för samtliga mätobjekt.

Tabell 15. Inställningar för mjukvaran Easera för samtliga mätningar

Välj mätinställningar (Eng; Select measurement setup)	
Mätinställning	Flerkanalig inspelning
Huvudsaklig input	Roland
Input	Nio ljudmätare
Output	Högtalare
Välj excitationsparametrar (Eng; Choose excitation parameters)	
Stimulus	Log-sweep
Samplingshastighet	96 kHz
Inspelningstid	5,5 s
Justera ljudtrycksnivå (Eng; Levels adjustment)	
Justera ljudnivå (direktljud)	Tillräckligt hög ljudtrycksnivå för att få en lämplig dynamisk frekvens, mellan -10 och -20 dBFS
Starta mätningen (Eng; Start measurement)	
Medelvärde	5

3.3.2 Signalprocessering

Mätdata analyserades med hjälp av MATLAB, där data från både frifältsmätning och mätning på bullerskyddsskärm infördes. Adrienne-fönstret definierades manuellt för samtliga impulssignaler, enligt:

- i) först definierades tidpunkten då direktljudets första topp skedde
- ii) Adrienne-fönstret början placerades så att den platta delen började 0,2 ms före första toppen
- iii) Adrienne-fönstrets ände placerades så att svansen var vid $y = 0$ precis vid den första diffrakterande komponenten

Därefter beräknades Adrienne-längden för samtliga impulssvar. Den minsta Adrienne-längden var det minsta avståndet mellan ljudkälla och mottagare, och alltså den begränsande faktorn. Den begränsande faktorn används för att bestämma den undre gränshfrekvensen, som beskriver i vilket frekvensområde som resultaten är giltiga.

Spektra för dessa ljudtrycksvågor ligger till grund för ljudisoleringsindexet, som är ett resultat av den luftburna ljudisoleringen som beskrivs av *Ekvation 1*. Energin för de filtrerade impulssignalerna beräknades med hjälp av Fouriertransformation (från tid till frekvens) och genom summering av all energi i varje tersband så erhöles ett värde för ljudisoleringsindexet i tersband, SI_j , enligt *Ekvation 1*.

Sammanvägda värden för skärmelement och (eventuellt) pelare beräknades fram, enligt *Ekvation 2* och *Ekvation 3*. Dessa värden beräknades bullerskyddsskärmens totala prestanda, $DL_{SI,G}$, enligt *Ekvation 4*. Signal-brusförhållandet beräknades enligt *Ekvation 8* och därefter bestämdes mätosäkerheten med hjälp av *Ekvation 9*. Simuleringar för bullerskyddsskärmarna vid Fridhemsplan och Knivsta utfördes med Insul, men inte för Lidingövägen på grund av dess komplexitet.

4. RESULTAT

I följande avsnitt presenteras de resultat som erhöles av mätningarna in-situ, som genomfördes i enlighet med EN 1793–6:2012.

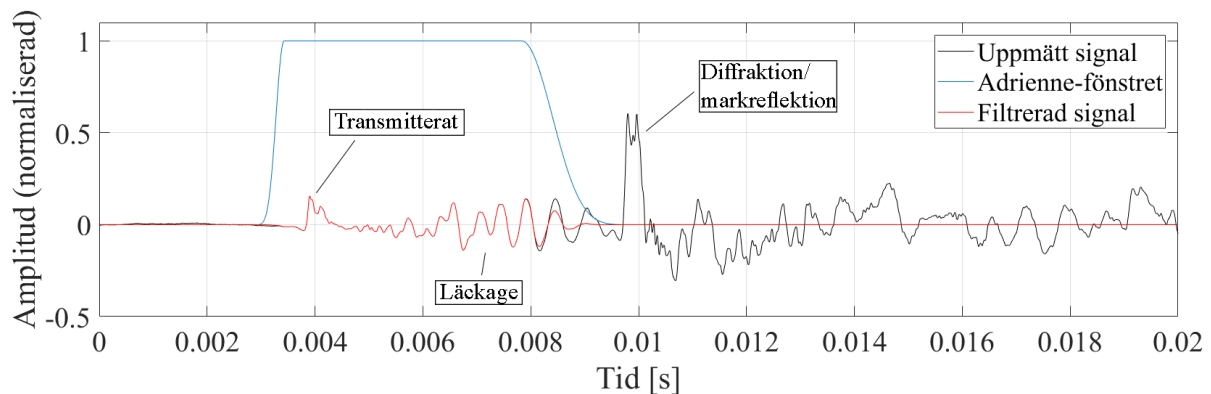
4.1 FILTRERING, UNDER FREKVENSVÄRDE OCH GILTIGT FREKVENNSOMRÅDE

Resultat för den minsta Adrienne-längden för mätobjekten, definierade undre gränsvärden och giltiga frekvensområden ses i *Tabell 16*.

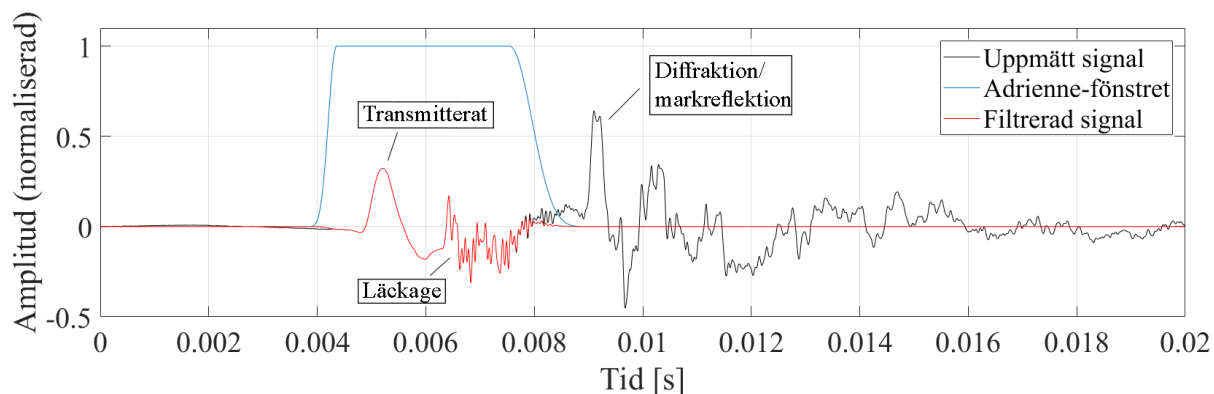
Tabell 16. Sammanställning av minsta Adrienne-längd, undre frekvensvärde och giltigt frekvensområde för mätobjekten

Mätobjekt	Adrienne-längd [ms]	Undre frekvensvärde [Hz]	Giltigt intervall [Hz]
Fridhemsplan	4,50	293	400 till 5 k
Lidingövägen	3,45	390	400 till 5 k
Knivsta	8,24	156	200 till 5 k

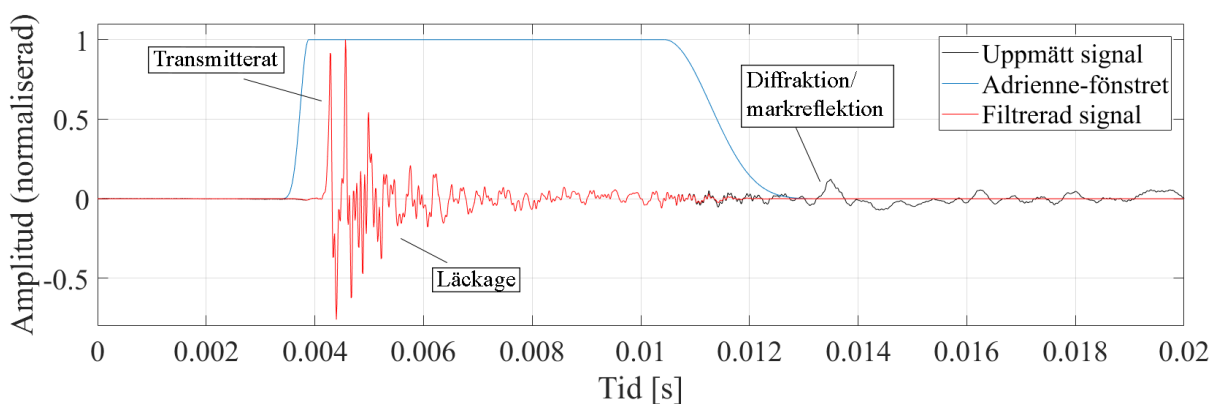
I *Figur 11*, *Figur 12* och *Figur 13* ses ett filtrerat impulssvar från mikrofon fem från mätningen på skärmelementen vid Fridhemsplan, Lidingövägen respektive Knivsta. Se *Bilaga I* för samtliga filtrerade impulssvar. Komponenterna för transmitterat ljud, diffrakterat ljud/markreflektion och ”läckage” är markerade i figurerna. Den blå linjen är Adrienne-fönstret, röda linjen är den filtrerade signalen och den svarta linjen är det uppmätta impulssvaret.



Figur 11. Filtreering av impulssvaren för skärmelementet vid Fridhemsplan (mikrofon fem). Den blå linjen är Adrienne-fönstret, den röda linjen är den filtrerade impulssignalen och den svarta linjen är det uppmätta impulssvaret. De olika komponenterna som är synliga är markerade i figuren.



Figur 12. Filtrering av impulssvaren för pelaren vid Lidingövägen. Den blåa linjen är Adrienne-fönstret, den röda linjen är den filtrerade impulssignalen och den svarta linjen är det uppmätta impulssvaret. De olika komponenterna som är synliga är markerade i figuren.

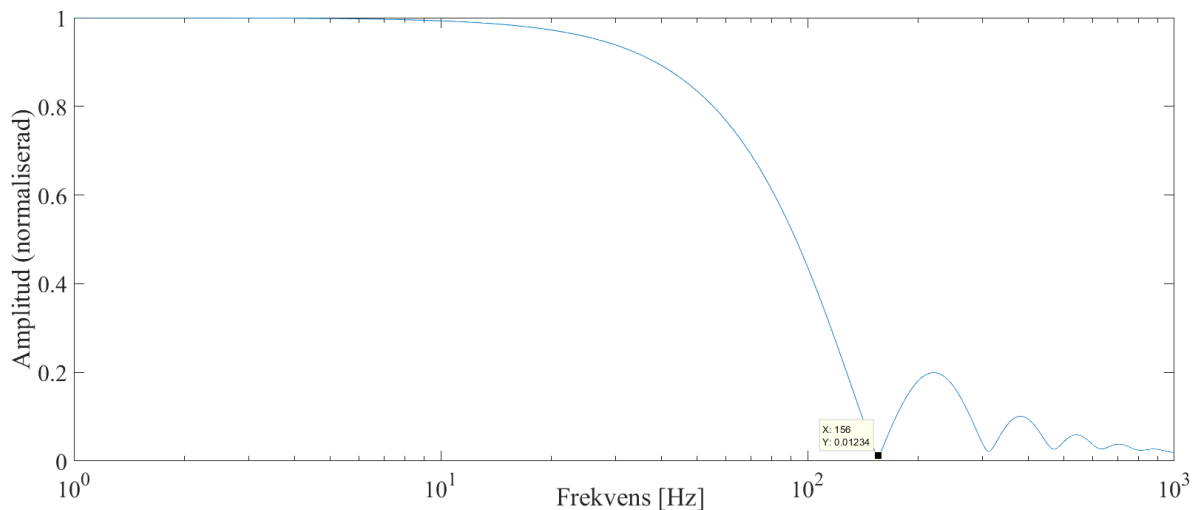


Figur 13. Filtrering av impulssvaren för skärmelementet vid Knivsta. Den blåa linjen är Adrienne-fönstret, den röda linjen är den filtrerade impulssignalen och den svarta linjen är det uppmätta impulssvaret. De olika komponenterna som är synliga är markerade i figuren.

Det kan ses från *Figur 11* att det transmitterande ljudets första topp sker efter ca 4 ms och att de diffrakterande komponenterna kommer efter ca 10 ms. Samtliga komponenter har jämförts med avstånd och tider från MATLAB.

Ljudvågorna inne i Adrienne-fönstret som uppkommer efter att direktljudet/det transmitterande ljudvågorna har planat ut är komplext, men beror delvis på reflexer, konstruktion och läckage. Det är alltså en förenkling att benämna alla dessa komponenter som "läckage".

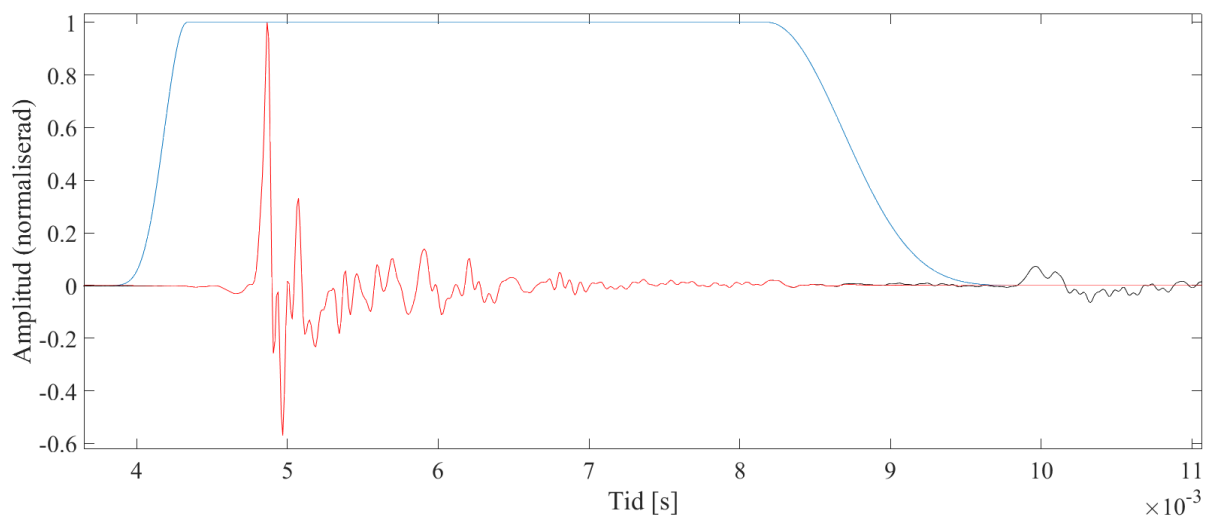
Figur 14 visar hur det undre gränsvärdet bestämdes för skärmelementet på Fridhemsplan. Det undre gränsvärdet bestäms med hjälp av frekvenssvaret för Adrienne-fönstret.



Figur 14. Frekvenssvaret för ett 4,50 ms långt Adrienne-fönster, det vill säga för skärmelementet vid Fridhemsplan. Amplituden är normaliserad med den maximala ljudtrycksnivån. Det undre frekvensvärdet är markerat i figuren och sammanfaller med huvudlobens slut, det vill säga 293 Hz i det här fallet.

4.2 BESTÄMNING AV IMPULSSVARETS LÄNGD

För att säkerställa att tillräckligt långa signaler användes så undersöktes impulssvaret för mikrofon fem för frifältsmätningen vid Lidingövägen närmare, se *Figur 15*. Figuren är inzoomad på Adrienne-fönstret för att tydligare kunna se hur direktljudet mynnar ut.



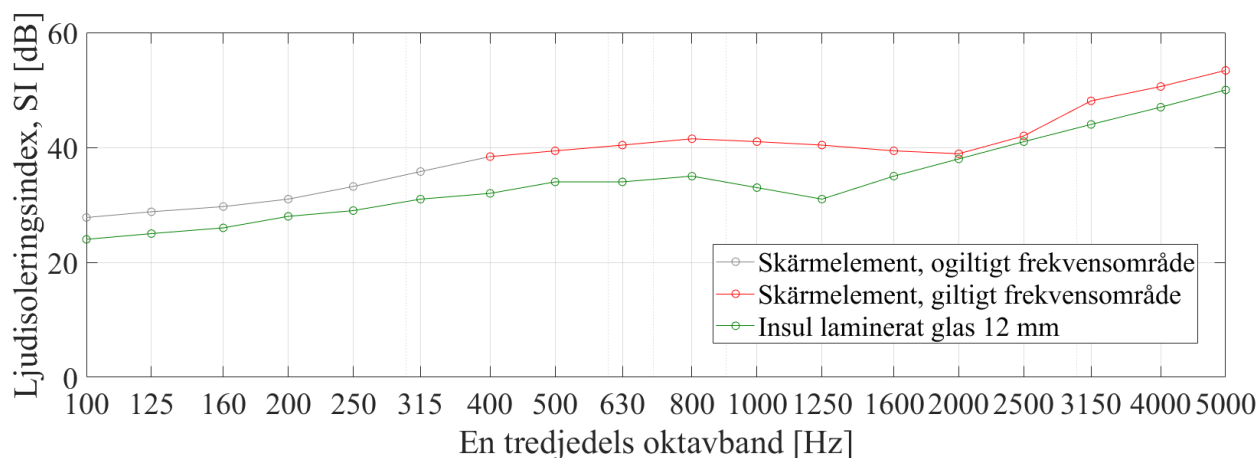
Figur 15. Impulssvaret för mikrofon fem för frifältsmätningen vid Lidingövägen.

Det kan ses från *Figur 15* att direktljudets första topp är vid ca 4,8 ms och att ljudvågorna mynnar ut vid ca 8,5 ms. Impulssvaret var således ca 3,7 ms.

4.3 BERÄKNING AV LJUDISOLERINGSINDEX, SI_j

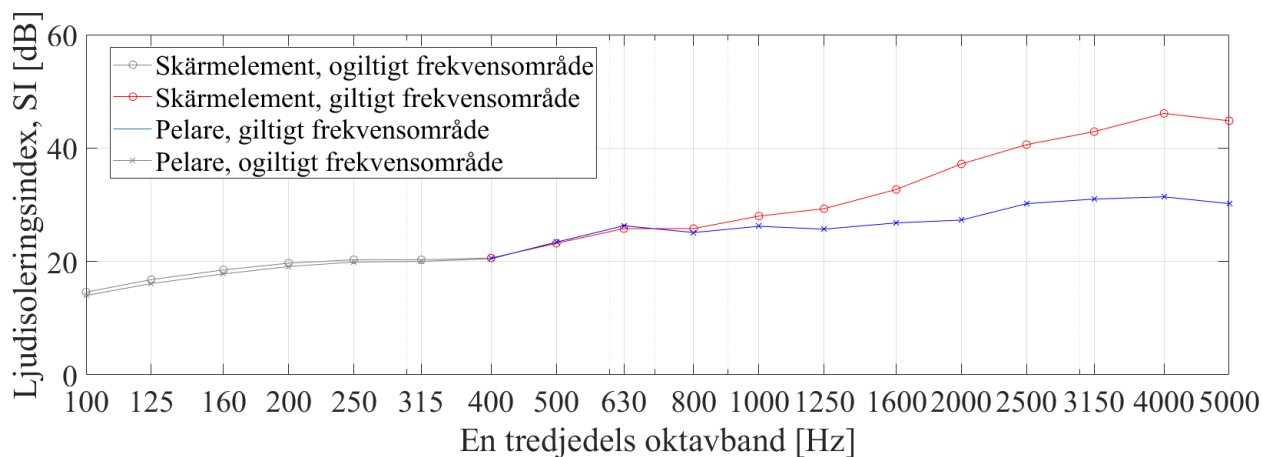
Resultat för ljudisoleringsindexet, SI_j , presenteras som en funktion av frekvenser i tersband, se *Figur 16* för resultat från Fridhemsplan, *Figur 17* för Lidingövägen och *Figur 18* för Knivsta. De röda kurvorna visar ljudisoleringsindexet för skärmelementet och de blåa kurvorna ljudreduceringsindexet för pelare. För bullerskyddsskärmen i Knivsta erhöles laborations-

mätningar i enlighet med EN 1793–2 från leverantören och visas med gul kurva. För att få en referens användes även simulerade värden i Insul på ljudisoleringsindexet och dessa värden visas med grön kurva. Markörerna visar det enskilda värdet i respektive tersband för samtliga mätningar.



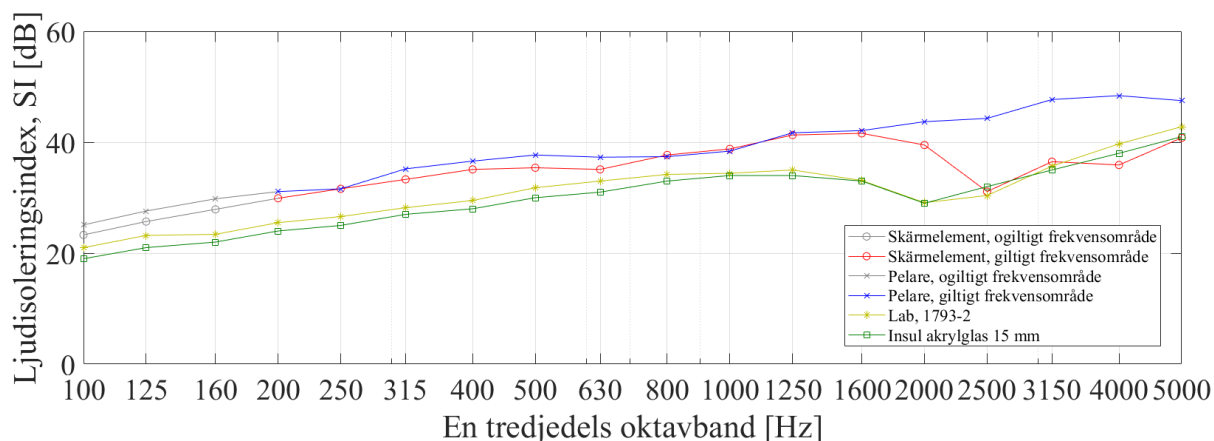
Figur 16. Ljudisoleringsindex, SI_j , som funktion av frekvens i tersband för Fridhemsplan. Röd linje är ljudisoleringsindexet för skärmelementet och grön linje är laborerade värden med hjälp av Insul för ett 12 mm tjockt skärmelement i laminerat glas. Grå linje är ogiltigt frekvensområde, men som visas för information.

I Figur 16 ses att kurvorna följer varandra, men att den röda kurvan är förskjuten uppåt med cirka 5 dB. Båda kurvorna sjunker i de högre frekvenserna, i tersbandet 2 kHz för mätningen på skärmelementet och tersbandet i 1,25 kHz för laborationsvärdena.



Figur 17. Ljudisoleringsindex, SI_j , som funktion av frekvens i tersband för Lidingövägen. Röd linje är ljudisoleringsindexet för skärmelementet i det giltiga frekvensområdet och blå linje är ljudisoleringsindexet för pelaren i det giltiga frekvensområdet. Grå linjer är ogiltiga frekvensområden, men som visas för information.

I Figur 17 ses att linjerna följer varandra upp till tersbandet i 630 Hz och därefter är den röda linjen brantare än den blåa. Båda linjerna sjunker i tersbandet 800 Hz.



Figur 18. Ljudisoleringsindex, SI_j , som funktion av frekvens i tersband för Knivsta. Röd linje är ljudisoleringsindexet för skärmelementet i det giltiga frekvensområdet, blå linje är ljudisoleringsindexet för pelaren i det giltiga frekvensområdet, gul linje är laborerade värden enligt med EN 1793:2, och gröna linje är laborerade värden med hjälp av Insul för ett 15 mm tjockt skärmelement i akryl. Gråa linjer är ogiltiga frekvensområden, men som visas för information.

I Figur 18 ses att kurvorna följer varandra, men att värdena för mätningarna in-situ är förskjutna uppåt, den röda och blåa kurvan. Den röda och blåa kurvan följer varandra någorlunda fram till tersbandet i 1,6 kHz då den röda kurvan sjunker och den blåa kurvan fortsätter uppåt. Den röda kurvan sjunker i tersbandet i 2,5 kHz. Laborationsmätningarna följer varandra väl och sjunker båda ner i tersbandet 2 kHz.

I Bilaga J ses enskilda ljudisoleringsindex för samtliga mikrofoner för både skärmelement och pelare. Även klassificering (D0 till D4) av bullerskyddsskärmarna, enligt 1793–6:2012, ses.

4.4 BERÄKNING AV SAMMANVÄGDA VÄRDEN

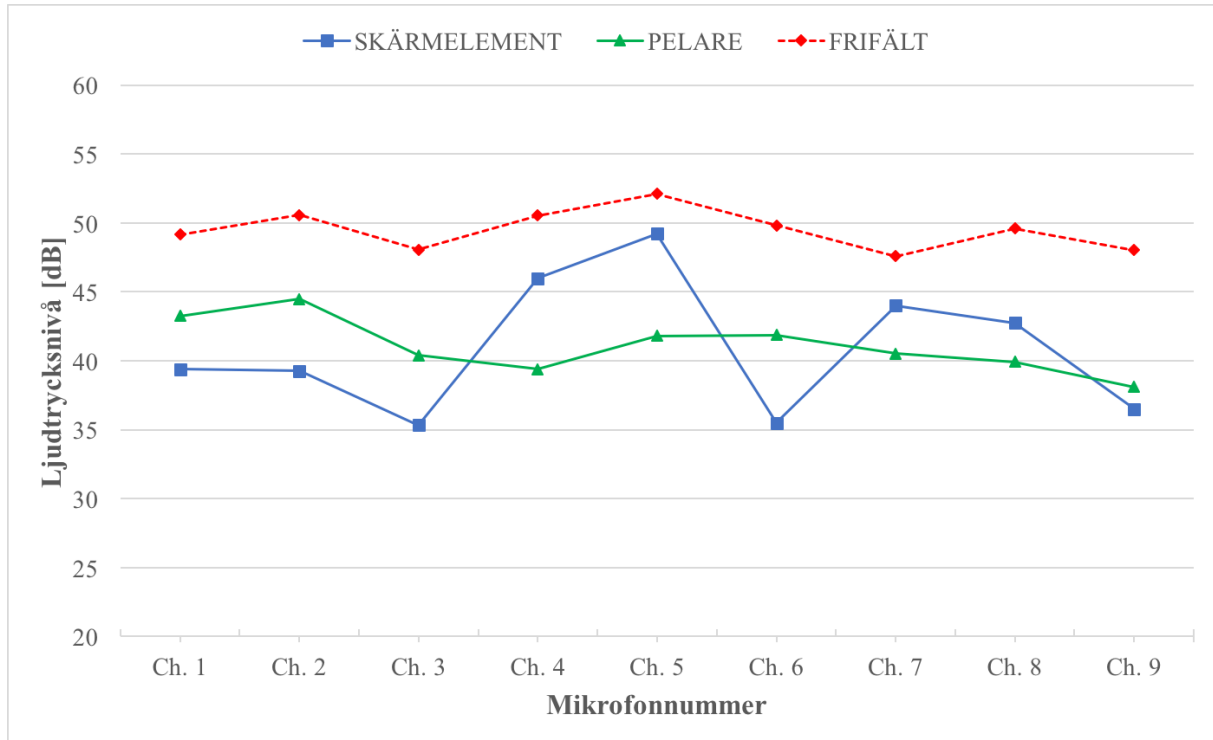
Utifrån det frekvensberoende ljudisoleringsindexet beräknas de sammanvägda värdena för skärmelementen och pelarna, se Tabell 17.

Tabell 17. De sammanvägda värdena för ljudisoleringsindexet för skärmelement och pelare för de olika mätobjekten samt giltigt frekvensområde. Observera att frekvensområdet inom parantes är giltigt frekvensområde för Knivsta. Värden för laborationsmätningar i enlighet med EN 1793–2 var tillgängliga för bullerskyddsskärmen vid Knivsta

Mätobjekt	DL_{SI} [dB]	DL_{SI} [dB]	DL_{GI} [dB]	DL_R [dB]
	in-situ skärmelement (200) 400 Hz till 5 kHz	in-situ pelare (200) 400 Hz till 5 kHz	in-situ (200) 400 Hz till 5 kHz	lab 200 (100) Hz till 5 kHz
Fridhemsplan	39	-	39	-
Lidingövägen	26	25	25	-
Knivsta	36	38	37	32 (31)

4.5 SIGNAL-BRUSFÖRHÅLLET

För att kontrollera att impulssvaret var 10 dB över bakgrundsljudet så kontrollerades signal-brusförhållandet för samtliga mikrofoner, se *Figur 19*. Den blåa linjen är ljudtrycksnivån för impulssvaren för skärmelementet, den gröna linjen är ljudtrycksnivån för pelaren och den röda linjen är ljudtrycksnivån för frifältsmätningen. Samtliga mikrofoner har ljudtrycksnivåer som är ≥ 10 dB över bakgrundsljudnivån.



Figur 19. Signal-brusförhållandet för impulssvaren för samtliga mikrofoner, från mätningen vid Knivsta, beräknat enligt studie av Garai, M. & Guidorzi, P (2013a). Blå linje är ljudtrycksnivå hos impulssvaret för skärmelementet, grön linje är ljudtrycksnivå för pelaren och röd linje är ljudtrycksnivå för frifältsmätningen.

4.6 MÄTOSÄKERHET

Mätosäkerheten i ett 95 % konfidensintervall beräknades och kan ses i *Tabell 18*.

Tabell 18. Mätosäkerheten i ett 95 % konfidensintervall, beräknat enligt studie av Garai, M. & Guidorzi, P (2013b)

Mätobjekt	Mätning	Reproducerbarhet, R [dB]	Täckningsintervall [dB]
Fridhemsplan	Skärmelement	2,55	[36,5–41,6]
Lidingövägen	Skärmelement	2,55	[23,5–28,6]
	Pelare	1,76	[23,2–26,8]
Knivsta	Skärmelement	2,55	[33,5–38,6]
	Pelare	1,76	[36,2–39,8]

5. DISKUSSION

Syftet med examensarbetet var att utvärdera och utveckla ett mätsystem som uppfyllde EN 1793–6:2012. Mätningar skulle utföras på minst fyra bullerskyddsskärmar, men på grund av tidsbrist så blev det i slutändan tre. Flera förberedande mätningar för att validera mätsystemet utfördes dock. Mätresultaten jämfördes med simuleringar i Insul och laborationsmätningar där det var möjligt. Ljudisoleringen bestämdes för en bullerskyddsskärm i laminerat, härdat glas vid Fridhemsplan, en vegetationsbarriär i stålram vid Lidingövägen och en i absorptionsmaterial/kombinerat glas vid Knivsta tågstation. På grund av väderbegränsningar (snö, minusgrader) så kunde inte alla mätningar genomföras enligt plan, det vill säga på så många mätpunkter som önskat.

5.1 FILTRERING AV IMPULSSVAR

I EN 1793–6:2012 omnämns ingenting om markreflektion. Avstånden för diffraktionsljud över toppen av en bullerskyddsskärm och för markreflektionen borde vara samma för den mittersta raden i mikrofonuppställningen. De filtrerade impulssvaren för mikrofon fem som visas i rapporten, *Figur 11* till *Figur 13* samt *Bilaga I*, borde således påverkas av diffraktion och markreflektion vid samma tidpunkt. För den översta raden borde istället diffraktionstoppen komma först och markreflektion efter medan det borde vara tvärtom för den nedersta raden. Eftersom markreflektion inte omnämns i standarden så definieras inte heller det transmitterade ljudet som först reflekteras mot mark och sedan transmitteras genom bullerskyddsskärmen. Eftersom det här avståndet är mindre än för diffraktions-/markreflektionskomponenterna borde således den filtrerade signalen påverkas av oönskade komponenter. Fler studier borde utföras för att undersöka markreflektionens betydelse och hur dessa oönskade komponenter kan filtreras bort.

På grund av att dimensionerna för bullerskyddsskärmen vid Fridhemsplan och Lidingövägen var mindre än vad som definieras i standarden så influeras även dessa impulssvar, för skärmelementen, av pelarna. Det är oundvikligt för dessa dimensioner och därför bör hänsyn tas till dessa vid analys av resultaten.

5.2 VERIFIERING AV IMPULSSVAREN

I EN 1793–6:2012 definieras att impulssvaren inte ska vara längre än 3,0 ms. För att undersöka att mätningarnas impulssvar hade en passande längd analyserades mikrofon fem för frifältsmätningen från Lidingövägen, se *Figur 15*. Det kan utläsas att direktljudets första topp var vid ca 4,8 ms och att ljudvågorna mynnar ut vid ca 8,5 ms. Impulssvaret var således ca 3,7 ms och längre än vad som bestämts i EN 1793–6:2012. Ju längre impulssvaret, desto mer abnorm energi kan komma att adderas till impulssignalen. Impulssvarets längd beror på högtalaren och eftersom leverantörerna av hårdvaran inte anger detta i specifikationerna går det inte att veta det i förväg. Alternativ skulle vara att antingen validera ljudkällan innan mätningarna påbörjas eller att konstruera en egen ljudkälla. Slutsatsen dras att impulssvaren är tillräckligt lämpliga för att kunna analyseras.

5.3 LJUDISOLERINGSINDEX, S_{ij}

Tidigare studier på mätningar av ljudisoleringen, i enlighet med EN 1793–6:2012, har visat varierade resultat mellan mätningarna in-situ och laborationsmätningar. För vissa fall har

mätningarna in-situ gett ett lägre värde på ljudisoleringen men ibland även ett högre värde, se *Tabell 1*, *Tabell 2* och *Tabell 4*. Skillnaderna förklaras med att mätningarna sker i olika ljudfält, direkt ljudfält respektive diffust ljudfält, och att utomhusmiljön är mer komplex (Garai, M. & Guidorzi, P., 2000; CEDR, 2017; Waaranperä, M., 2018; Stenman Norlander, Å., 2018). Det har emellertid konstaterats att läckage påverkar ljudisoleringen negativt (Garai, M. & Guidorzi, P., 2000; Morgan, P. & Watts, G., 2003; Bull, J., 2014; CEDR, 2017).

Erhållna resultat för detta projekt gav högre värden på ljudisoleringen för bullerskyddsskärmarna i akrylglas (Knivsta) och i laminerat, härdat glas (Fridhemsplan), se *Figur 16* och *Figur 18*. Vid närmare analys av tidigare nämnda studier (Garai, M. & Guidorzi, P., 2000) visade det att liknande resultat erhållits även där, det vill säga att bullerskyddsskärmarna i glas gav högre ljudisolering för mätningar in-situ. Mätningar in-situ och laborationsmätningarna följer emellertid varandra väl. Skillnaderna kan förklaras med att mätningarna sker i olika ljudfält. Det transmitterade ljudet blir högre vid snett infall (direkt ljudfält, mätningar in-situ) än vid vinkelrätt infall (diffust ljudfält, laborationsmätningar). Skillnaden eventuellt också bero på att i ett diffust ljudfält frambringas de indirekta komponenterna en koincidenseffekt, vilket också kan förklara varför laborationsmätningarna och simuleringarna sjunker tidigare än mätningarna in-situ. Koincidenseffekten verkar sammanfalla i tersbandet 1,25 kHz för Fridhemsplan och i 2,0 kHz för Knivsta.

Bullerskyddsskärmen vid Lidingövägen var mer komplex att analysera, eftersom den inte är homogen på grund av jord (fyllnadsmaterial) och vegetation. Det fanns inga laborationsmätningar att tillgå och komplexiteten gjorde att simuleringar i Insul inte kunde genomföras. Vad som kan konstateras från *Figur 17* är att mätningarna för skärmelementet och pelaren följer varandra väl fram till tersbandet i 600 Hz. Därefter ökar ljudisoleringsindexet för skärmelementet i de högre frekvenserna medan ljudisoleringsindexet för pelaren inte ökar i lika stor utsträckning. Skillnaderna i de högre frekvenserna kan eventuellt förklaras i pelarens konstruktion och att det kan förekomma mer läckage där. Eftersom förändringen är i samtliga högre frekvenser kan det tyda på att läckaget är i form av en springa, något som kan stärkas med att pelaren egentligen bara består av en platt framsida mot den trafikerade vägen och bakom den är det luft. Detta kan ses, om än aningen otydligt, i *Bilaga H*. Håligheten fortsätter hela vägen ner till mark. Bullerskyddsskärmen hade även en betydande glipa mellan skärmelement och anslutning till mark.

Samma mönster, som för Lidingövägen, kan ses för mätningarna på skärmelementet och pelaren på bullerskyddsskärmen vid Knivsta, se *Figur 18*. Kurvorna följer varandra väl fram till tersbandet i 1,6 kHz, men här är det istället pelaren som stiger i de högre frekvenserna medan skärmelementet mer liknar värdena från laborationsmätningar och simuleringar i Insul. Det här kan eventuellt också förklaras med läckage, men att det i det här fallet är pelaren som har en bättre konstruktion sett ur akustiskt perspektiv än skärmelementet. Anledningen kan vara att den här bullerskyddsskärmen inte är homogen, som Fridhemsplan, utan det är en kombinerad bullerskyddsskärm med akrylglas och aluminiumprofiler. Akrylglaset är fäst i profilerna med gummi och även om det inte fanns några synliga håligheter, kan det vara så att gummidelarna begränsar den akustiska prestandan. Om det skulle vara gummit som begränsar så hade varit

intressant att utföra mätningar vid olika temperaturer, eftersom gummi hårdnar vid lägre temperaturer. Det kan vara så att pelarna i det här fallet är bättre konstruerade än fästningen mellan akrylglas och aluminiumprofil, men vidare undersökningar behöver genomföras för att kunna fastställa det.

5.4 SAMMANVÄGDA VÄRDEN FÖR DEN TOTALA PRESTANDAN

Bullerskyddsskärmarnas totala prestanda beräknades och resultat ses i *Tabell 17*. Från resultaten kan det betraktas att bullerskyddsskärmen vid Fridhemsplan fick högst sammanvägt värde (39 dB), följt av Knivsta (37 dB) och sen Lidingövägen (25 dB). En jämförelse med det mänskliga örat på mätplatserna kan säkerställa att Fridhemsplan och Knivsta var de bättre bullerskyddsskärmarna ur ljudisoleringsvinkel. De sammanvägda värdena för Knivsta kan även jämföras med laborationsmätningar på de sammanvägda värdena, i enlighet med 1793–2, och även här ses att mätningarna in-situ gav högre värden, vilket var förväntat efter tidigare resultat. Från resultaten kan det konstateras att bullerskyddsskärmar i glas ger bra ljudisolering.

5.5 SIGNAL-BRUSFÖRHÅLLET

Signal-brusförhållandet behöver beräknas för att säkerställa att samtliga ljudtrycksnivåer är mer än 10 dB över bakgrundsljudet och att resultaten är giltiga över hela frekvensområdet, vilket definieras i EN 1793–6:2012. Ett kriterium för att validera mätningarna saknas i EN 1793–6:2012, men Garai, M. & Guidorzi, P (2013b) fann en pålitlig metod för att beräkna detta, se *Ekvation 9*. Signal-brusförhållandet bestämdes bara för bullerskyddsskärmen i Knivsta, se *Figur 19*, på grund av tidsbrist men enligt EN 1793–6:2012 borde således samtliga mätningar valideras. Från *Figur 19* kan det ses att samtliga ljudtrycksnivåer är klart över 10 dB relativt bakgrundsljudet.

5.6 MÄTOSÄKERHETEN

Mätosäkerheten beräknades genom en metod som beskrivs i en studie av Garai, M. & Guidorzi, P (2013), se *Tabell 18*. Det är inte enligt ISO/IEC Guide 98–3, som föreslås i EN 1793–6:2012, men det är en studie vars syfte var att visa hur mätosäkerheten för bullerskyddsskärmars ljudisoleringen kan beräknas, något som inte har funnits innan.

5.7 UTVÄRDERING AV EN 1793–6:2012

Överlag är det en del utföranden som inte beskrivs i EN 1793–6:2012 som behövs undersökas av den som vill tillämpa standarden. Det här examensarbetet syftade till att genomföra tester av ett mätsystem som uppfyllde EN 1793–6:2012 och genomföra mätningar i enlighet med standarden. För att uppfylla mätsystemet behövdes detta undersökas:

- Mätsystemets hårdvara. I EN 1793–6:2012 beskrivs kraven för hårdvaran men inga rekommendationer utöver det ges. De mätinstrument som valdes uppfyllde de krav som specificerats.
- Mjukvaran varierar också mellan användare. Studier analyserades och flera förberedande mätningar utfördes för att komplettera kunskapen kring detta. I det här examensarbetet användes mjukvaran Easera, vilket även examensarbetet av Bull, J. (2014) använde. Uppfattningen är att Easera har fungerat bra men att det inte kan användas som ett analyseringsalternativ eftersom programmet inte beskriver vad som händer i de olika analyseringsstegen, istället har MATLAB använts. Det kan dock dras

en slutsats om att Easera inte är lämplig att använda för att flytta den första toppen i impulssvaret till noll (Eng; move to zero) eftersom definitionen av noll är osäkert.

- I EN 1793–6:2012 definieras Adrienne-fönstret enligt en ljudreducerande enhets dimensioner för certifieringsändamål. Något som inte nämns vidare är att Adrienne-fönstret behöver anpassas om dimensionerna för en bullerskyddsskärm skiljer sig från vad som definieras och som även påverkar den lägst giltiga frekvensen, vilket kan styrkas av en studie av Clairbois, J-P. et al. (2017).
- I EN 1793–6:2012 omnämns inte någonting om markreflektion, något som visades vara av betydelse.
- Det finns även en del praktiska aspekter att ta hänsyn till, till exempel meteorologiska förhållanden och säkerhet, som är upp till användaren att undersöka. I det här examensarbetet var det inga större säkerhetsproblem, men rådande väderförhållanden (snö, minusgrader) påverkade möjligheten att utföra tillräckligt många mätningar. Mätutrustningen påverkades negativt vid lägre temperaturer och därför kan det vara fördelaktigt att ha med extrautrustning av allt om det är möjligt.
- Det kan även vara fördelaktigt att utveckla ett välplanerat system för hur kommunikation ska ske vid mätningarna. Kommunikationsmöjligheterna är begränsade och en följd av detta kan vara att det blir svårt att justera mätutrustningen till korrekta positioner.

5.8 FELKÄLLOR

Det finns flertalet felkällor att ta i beaktning, några nämns även ovan. Validering och val av hårdvara kan antagligen ge varierande resultat för mätsystemet och därmed resultaten. Ljudkällan är även svår att rikta precis och de definierade avstånden kan variera något in-situ, även om bästa möjliga resultat alltid har försökts uppnås. Mjukvaran kan också vara en felkälla, då den varierar mellan användare och ett medelvärde av fem togs för samtliga mätningar, när EN 1793–6:2012 rekommenderar minst 16. Adrienne-fönstren tillämpades även manuellt och trots att det jämfördes med beräkningar så kan det finnas felkällor i det arbetet. Mätningen i Knivsta uppfyllde inte heller de krav för de meteorologiska förhållandena som definieras i EN 1793–6:2012 vad gäller lufttemperatur.

5.9 FÖRSLAG PÅ VIDARE STUDIER

Examensarbetet har lagt en god grund för fortsatta studier med EN 1793–6:2012, men också till 1793–4 och 1793–5. Nedan listas några förslag på vidare studier:

- ytterligare arbete med mätteknikens signalbehandlingsaspekter
- ytterligare arbete kring filtreringen och passande Adrienne-längd
- bestämning av markreflektionens betydelse
- hur väl vegetation reducerar buller, vilket bör studeras vid olika säsonger och för olika typer av plantor (materialtäthet)
- hur bullerskyddsskärmars olika komponenters hållbarhet påverkas över tid.

6. SLUTSATSER

Examensarbetet syftade till att utvärdera EN 1793–6:2012. Tre bullerskyddsskärmar mättes in-situ, i enlighet med EN 1793–6:2012, för att bestämma deras ljudisolering och totala akustiska prestanda med avseende på ljudisoleringen. Slutsatserna var följande:

- Resultaten för ljudisoleringsindexen är giltiga i frekvensområdet 200 Hz till 5 kHz för Knivsta och 400 Hz till 5 kHz för Fridhemsplan och Lidingövägen.
- Bullerskyddsskärmarna i akrylglas (Fridhemsplan) och kombinerat glas (Knivsta) gav högst värden på den totala prestandan, 39 dB respektive 37 dB, och är således klass D enligt 1793–6:2012. För bullerskyddsskärmen vid Lidingövägen var den totala prestandan 26 dB, klass D2, men eftersom att det var en icke-homogen vegetationsskärm där fyllnadsmaterialet varierade över skärmelementet kan inte ett konsekvent resultat förväntas för samtliga skärmelement.
- Samtliga resultat gav högre värden än laborationsmätningar och simuleringar i Insul, förutom för Lidingövägen där några referensvärden inte kunde fås. Resultat visar att bullerskyddsskärmar i glas ger god ljudisolering.
- Adrienne-fönsterna behövde bli specifikt beräknade för samtliga impulssvar, på grund av att bullerskyddsskärmarnas dimensioner inte överensstämde med vad som definieras i EN 1793–6:2012 för certifieringsändamål.
- Markreflektion omnämns inte i EN 1793–6:2012 och med stor sannolikhet påverkar det resultaten, eftersom avståndet för det transmitterade ljudet som har reflekterat mot mark är mindre än avstånden för diffraktion/markreflektion. Vidare studier behövs för att filtrera bort dessa komponenter från den filtrerade signalen.
- Produktstandarden som inkluderar mätningar in-situ, till exempel 1793–6:2012, är ännu inte publicerad och därför har inte mätningar in-situ någon status. En ny produktstandard som inkluderar dessa publiceras troligtvis år 2018. För att säkerställa den akustiska prestandan borde mätningar in-situ genomföras och EN 1793–6:2012 anses vara lämplig för ändamålet.
- Efterkontroll och underhåll av en bullerskyddsskärms akustiska prestanda borde tillämpas.

7. REFERENSER

- Andersson, J. (1998). Akustik & buller. 4:e upplagan. Stockholm: AB Svensk Byggtjänst.
- Andersson, M. & Sigray, P., (u.å). *Buller stör fiskarnas naturliga beteende*. Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI. Tillgänglig:
http://www.havsmiljoinstitutet.se/digitalAssets/1493/1493726_sjofart_buller.pdf
- Babisch, W., Beyer, A., Fromme, H. & Ising, H., (2001). Increased catecholamine levels in urine in subjects exposed to road traffic noise: The role of stress hormones in noise research. *Environment International* [Elektronisk], vol. 26, Issue 7–8, 2001, ss. 475–481.
- Belojević, G., Milutinović, S. & Stošić, L., (2009). Effects of traffic noise on sleep in an urban population. *Arhiv za Higijenu Rada i Toksikologiju* [Elektronisk], vol. 60, Issue 3, 2009, Pages 335–342.
- Bernhard, R.J., Mun, E.P., Rasmussen, R.O. & Sandberg, U., (2007). The Little Book of Quieter Pavements. Technical Report FHWA-IF-08-004, US Department of Transportation, Federal Highway Administration.
- Bies, D. & Hansen, C., (2009). *Engineering noise control: theory and practice*. Taylor & Francis.
- Bull, J. (2014). *Measurement of the airborne sound insulation of traffic noise barriers using impulse response techniques*. Examensarbete, University of Canterbury.
- CEDR, (2017). CEDR Technical Report 2017–2. State of the art in managing road traffic noise: noise barriers. *Conference of European Directors of Roads* (CEDR). ISBN: 979-10-93321-27-1.
- CEN/TS 1793–3 Road traffic noise reducing devices – Test method for determining the acoustic performance – Part 3: Normalized traffic noise spectrum (Comité Européen de Normalization, Geneva, 2003).
- CEN/TS 1793-6 Road traffic noise reducing devices – Test method for determining the acoustic performance – Part 6: Intrinsic characteristics – In situ values of airborne sound insulation under direct sound field conditions (Comité Européen de Normalization, Geneva, 2003).
- Clairbois, J-P., Glorieux, C. & Houtave P., 2017. In-situ measurements according to EN 1793–5 and EN 1793–6: When sample size matters. *Internoise*, augusti 2017.
- Couter, M., Fuchs, A., Reiter, P., Wehr, R. & Ziegelwanger, H., (2016). Optimization of an acoustic resonator for noise barrier top elements. *German Acoustical Society (DEGA)*, INTER-NOISE 2016, August 2016, pages 4203-4210, code 124187.
- Ejsmont, J.A. & Sandberg, U., (2002). Tyre/road noise reference book. INFROMEX, Harg, SE-59040 Kisa, Sweden.

The Engineering Toolbox (2017). *Octave band frequencies – Octave and 1/3 octave band frequencies*. Tillgänglig: https://www.engineeringtoolbox.com/octave-bands-frequency-limits-d_1602.html [2017-12-18]

Folkhälsomyndigheten (2016-09-20). *Hälsoeffekter av buller*. <https://www.folkhalsomyndigheten.se/livsvillkor-levnadsvanor/miljohalsa-och-halsoskydd/inomhusmiljo-allmanna-lokaler-och-platser/buller/halsoeffekter/> [2017-09-12]

Garai, M. & Guidorzi, P., (2000). European methodology for testing the airborne sound insulation characteristics of noise barriers in situ: Experimental verification and comparison with laboratory data. *Acoustical Society of America*, vol. 108, ss 1054–1067.

Garai, M., Guidorzi, P. & Schoen, E., (2013). Assessing the repeatability and reproducibility of in situ measurements of sound reflection and airborne sound insulation index of noise barriers. *In Proc. AIA-DAGA 2013*.

Garai, M. & Guidorzi, P., (2013a). On the declaration of the measurement uncertainty of airborne sound insulation of noise barriers. *Internoise*, september 2013, ss. 15–18.

Garai, M. & Guidorzi, P., (2013b). In-situ measurements of sound reflection and sound insulation of noise barriers; Validation by means of signal-to-noise ratio calculations. *Acoustical Society of America*, Vol. 19, 040082, 2013.

Hallberg, J., (2007). Frekvensspektrum. *Ljudlandskap* [Elektronisk]. Tillgänglig: http://www.ljudlandskap.acoustics.nu/ljudbok.php?del=anvaendare&kapitel=kapitel_3&rubrik=rubrik4

Helldin, J-O., (2013). *Trafikbuller i värdefulla naturmiljöer II*. CBM:s skriftserie 74. Tillgänglig: <http://media.triekol.se/2013/10/Triekol-CBM-skrift-74.pdf>

Karolinska institutet (2017-02-15). *Buller*. <http://ki.se/imm/buller> [2017-09-12]

Kropp, W., (2010-07-09). Vägtrafik. *Ljudlandskap* [Elektronisk]. Tillgänglig: http://www.ljudlandskap.acoustics.nu/ljudbok.php?del=anvaendare&kapitel=kapitel_10&rubrik=rubrik1_1 [2018-01-06]

Istrate, I.A., Oprea, T., Rada, E.C. & Torretta, V., (2014). Noise and air pollution from urban traffic. *WIT Transactions on Ecology and the Environment* [Elektronisk], vol. 191, 23 september 2014, Pages 1381–1389.

Larsson, C. (2016). *Bullerutredning del 1*. Opublicerat manuskript.

Länsstyrelsen, (2007-04-26). *Buller*. Plan PM 1:1 [Elektronisk]. Tillgänglig: <http://www.lansstyrelsen.se/skane/SiteCollectionDocuments/Sv/samhallsplanering-och-kulturmiljo/planfragor/planpm/BullerPM.pdf>

Máca, V. & Urban, J., (2013). Linking traffic noise, noise annoyance and life satisfaction: A case study. *International Journal of Environmental Research and Public Health* [Elektronisk], vol. 10, Issue 5, May 2013, Pages 1895–1915.

Miljömål (2013-11-18). *Besvär av trafikbuller*. <https://www.miljomal.se/Miljomalen/Alla-indikatorer/Indikatorersida/?iid=26&pl=1> [2017-09-07]

Morgan, P. & Watts, G., (2003). The use of MLS based methods for characterising the effectiveness of noise barriers and absorptive road surfaces. *Internoise* [Elektronisk]- The 32nd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering Jeju International Convention Center, Seogwipo, Korea, August 25–28, 2003. Tillgänglig: http://www.academia.edu/20571358/_N480_The_use_of_MLS_based_methods_for_characterising_the_effectiveness_of_noise_barriers_and_absorptive_road_surfaces [2017-10-25]

Nationalencyklopedin, 2017. *Ljud*. Tillgänglig: <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/enkel/ljud> (2017-11-12)
Naturvårdsverket, 2017a (2017-04-25). Buller ger ohälsa. Tillgänglig: <http://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Manniska/Buller/> [2017-09-11]

Naturvårdsverket, 2017b (2017-06-13). *Vägledning om buller i samhället*. <https://www.naturvardsverket.se/Stod-i-miljoarbetet/Vagledning/Buller/> [2017-09-10]

NZ Transport Agency, 2010. *NZTA state highway noise barrier design guide* [Elektronisk]. August 2010. Tillgänglig: <http://www.nzta.govt.nz/assets/resources/state-highway-noise-barrier-design-guide/docs/noise-barriers-version-1.0.pdf>

Regeringen (2017-05-11). *Nya riktvärden för trafikbuller*. Tillgänglig: <http://www.regeringen.se/pressmeddelanden/2017/05/nya-riktvarden-for-trafikbuller/> [2017-09-09]

SIS (2017a). *Om SIS*. Tillgänglig: <https://www.sis.se/om-sis/> [2018-01-16]

SIS (2017b). *Vad är en standard?* Tillgänglig: <https://www.sis.se/standarder/vadrenstandard/> [2018-01-16]

Socialstyrelsen, (2008). *Buller - Höga ljudnivåer och buller inomhus*. Tillgänglig: <https://www.folkhalsomyndigheten.se/contentassets/ad862888cbd54496b6aa8ec71247bd75/buller-hoga-ljudnivaer-inomhus.pdf> [2017-09-12]

Thomann (2013). *Roland UA-1610 Studio Capture*. https://www.thomann.de/se/roland_studio_capture.htm [2017-12-19]

Thomann (2010). *Portable Sound Reinforcement System*. https://www.thomann.de/se/mackie_srm_150_02.htm [2017-12-19]

Thomann (2017). *Measurement Microphone*. https://www.thomann.de/se/nti_audio_m4261.htm [2017-12-19]

Tideström, K. (2012). Önskat ljud negativt för hälsan. *Medicinsk Vetenskap*, 2012:1. Tillgänglig: <http://ki.se/forskning/oonskat-ljud-negativt-for-halsan> [2017-09-12]

Trafikverket (2015-03-24). Transportinfrastrukturens påverkan på biologisk mångfald – en konceptuell modell för kommunikation och planering [Elektronisk]. En delrapport inom forskningsprogrammet TRIEKOL, 2015:210. Tillgänglig: http://media.triekol.se/2017/04/2015_210_transportinfrastrukturens_paverkan_pa_biologisk_mangfald.pdf [2017-09-25]

WSP, (2015-11-17). *Stomljud – Beskrivning och genomgång av riktvärden för spår- och vägburen trafik*. Uppdragsnummer: 10 186 107 [Elektronisk]. Tillgänglig: <https://www.naturvardsverket.se/upload/miljoarbete-i-samhallet/miljoarbete-i-sverige/buller/stomljud-%20riktvarden-spar-vagburen%20trafik-151117.pdf>

Icke-publicerat material

Stenman Norlander, Å., Structor Akustik, 2018-01-23.

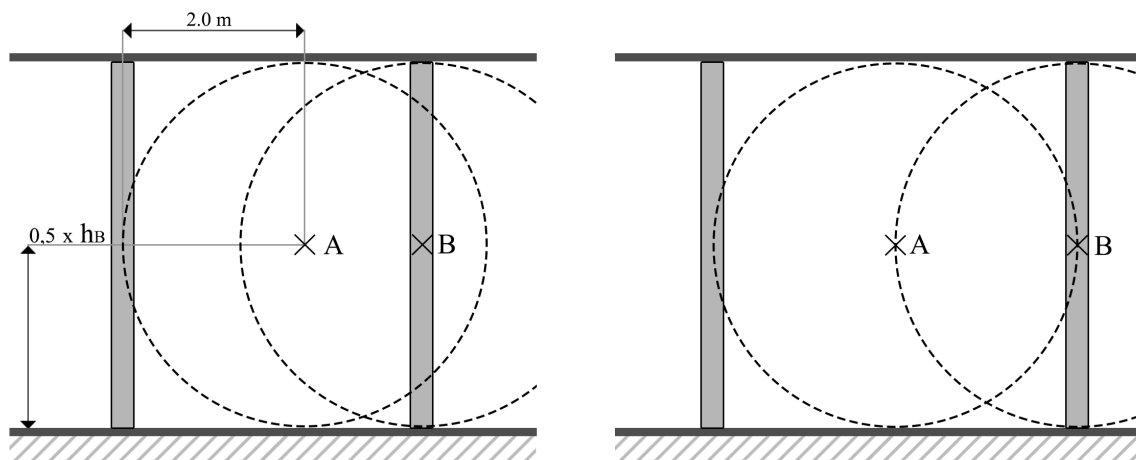
Waanerperä, M., Trafikverket, 2018-01-24.

BILAGA A – FREKVENSER I TERSBAND

Tabell A1. Tersbandsfrekvenser, namnges av centerfrekvensen men begränsas av det undre och övre gränsvärdet

Tersband		
Undre gränsvärde [Hz]	Centerfrekvens [Hz]	Övre gränsvärde [Hz]
11,2	12,5	14,1
14,1	16	17,8
17,8	20	22,4
22,4	25	28,2
28,2	31,5	35,5
35,5	40	44,7
44,7	50	56,2
56,2	63	70,8
70,8	80	89,1
89,1	100	112
112	125	141,4
141	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

BILAGA B – DET UNDRE GRÄNSVÄRDETS BEROENDE AV HÖJDEN, NÄR BULLERSKYDDSSKÄRMENS HÖJD ÄR MINDRE ÄN BREDDEN

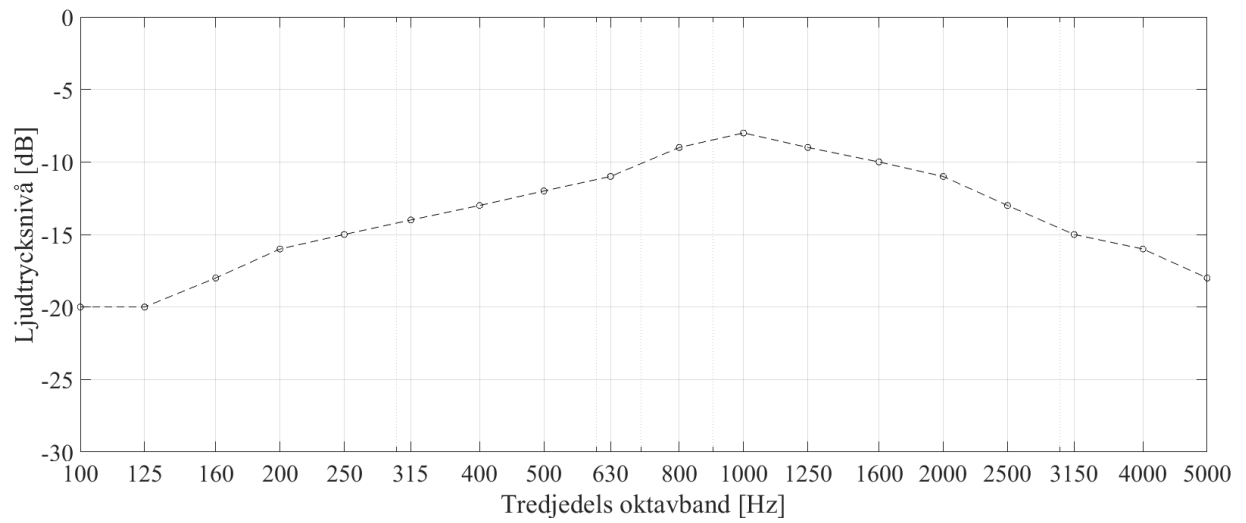


Figur B1. Mätuppställning för mätningar på ljudisoleringsindexet, enligt EN 1793-6:2012. Cirklarna föreställer mätområdena. Den högra figuren föreställer mätuppställningen när dimensionerna är enligt vad som definieras i standarden och den vänstra figuren föreställer mätuppställningen när dimensionerna är mindre än vad som definieras. A och B är de punkter där mätningarna utförs för A: skärmelementet och B: pelaren. Bullerskyddsskärmens höjd är h_B .

När bullerskyddsskärmens bredd är mindre än höjden så beror det undre gränsvärdet på en funktion av höjden. Se *Figur B1* för uppställning för mätningar på ljudisoleringsindexet, i enlighet med EN 1793-6:2012. Cirklarna föreställer mätområdena. Den högra figuren föreställer mätuppställningen när dimensionerna är enligt vad som definieras i standarden och den vänstra figuren föreställer mätuppställningen när dimensionerna är mindre än vad som definieras. A och B är de punkter där mätningarna utförs för A: skärmelementet och B: pelaren.

Tillägg: Samtliga mätningar utfördes enligt den högre figurens mätuppställning. Knivsta var den bullerskyddsskärm som hade dimensioner enligt EN 1793-6:2012, men för Fridhemsplan och Lidingövägen ansågs den vänstra uppställningen inte passande, eftersom bredden på de bullerskyddsskärmarna var >2 m. Influenser från bidrag av pelarna och andra skärmelement togs därför hänsyn till vid analysen.

**BILAGA C – NORMALISERAT SPEKTRUM FÖR BULLER FRÅN VÄGTRAFIK,
ENLIGT EN 1793–3**



Figur C1. Normaliserat spektrum för vägbuller, enligt EN 1793–3.

BILAGA D – INTERVJUSAMMANSTÄLLNINGAR

I följande bilaga ses sammanställningarna från intervjuerna med Monica Waaranperä på Trafikverket och Åsa Stenman Norlander på Structor Akustik.

D1. Monica Waaranperä, Trafikverket

Monica Waaranperä (MW) är bullerspecialist på Trafikverkets avdelning Investering (Teknik- och miljö). MW arbetar dels som specialist i olika projekt inom väg och järnväg, dels nationellt med mallar till upphandling samt kravställning. MW deltar också som svensk representant i CEN³ TC 226/WG 6 – Technical committee 226/Road Equipment/Working group 6 – Noise protection barriers. Enligt MW är det en förutsättning att tekniska specialister, producenter och köpare/användare sitter i kommittén för att standardiseringen skall fungera.

Standard *EN 14338:2005 Road traffic noise reducing devices - Specifications* (sv; Vägutrustning - Bullerskydd - Specifikationer) är en produktstandard som beskriver vilka parametrar som kan deklarerar för produktstämpling (CE-märkning). De akustiska parametrarna som behandlas är diffraktion, reflektion/absorption och ljudisolering, men också icke-akustiska parametrar inkluderas såsom hållfasthet, vindlaster och livslängd. Hur parametrarna skall verifieras beskrivs i undergrupper till EN 14388:2005, dock innefattar denna inga standarder med mätningar in-situ, till exempel EN 1793–6:2012. Enligt MW så finns det en senare produktstandard från 2015, som omfattar dessa standarder, men den blev aldrig publicerad i Official Journal, inte på grund av innehållet utan på administrativa teknikaliteter. Eftersom EN 14388:2015 inte har publicerats så är den inte bunden av produktansvarslagen och därför går det inte att beställa en bullerskyddsskärm som deklarerar enligt EN 14388:2015. Av denna anledning så har inte mätningar in-situ någon status och bullerskyddsskärmars prestanda deklarerar istället enbart genom mätningar i laboratorium, trots att mätningarna sker i ett diffust ljudfält istället för ett direkt ljudfält. Eftersom publiceringen drog ut på tiden så bestämde sig arbetsgruppen TC 226/WG6 istället för att ytterligare uppdatera EN 14388, vilken förhoppningsvis kommer publiceras under 2018, och som i framtiden också är tänkt att inkludera en standard för hållbarhet (Eng; Sustainability). Samtliga standarder som tillhör EN 14388:2005 är applicerbara för vägtrafik och i dagsläget finns det ingen produktstandard för bullerskyddsskärmar för järnvägstrafik.

Trafikverket måste upphandla enligt byggproduktlagen och eftersom marknaden i nuläget inte kräver att vissa egenskaper ska deklarerar så är det ingenting som har implementerats. Observera även att alla egenskaper inte måste uppfyllas för att en bullerskyddsskärm ska bli CE-märkt, utan bara några parametrar måste uppfyllas. Det är beställarna som måste styra marknaden och insistera att parametrar även ska redovisas genom mätningar in-situ för att undersöka en bullerskyddsskärmns funktion i ett direktljudsfält. MW:s förhoppning är att det ska kravställas i deras upphandlingsmallar i framtiden.

MW anser att det finns en okunskap gällande läckage och att det leder till brister i installationen av en bullerskyddsskärm. Enligt Trafikverkets upphandlingsmallar står det att det är viktigt att

³ Den europeiska kommittén för standardisering.

installationen av en bullerskyddsskärm sluter tätt mot underlaget. Det är upp till entreprenören att installationen sker i enlighet med skärmtillverkarens monteringsanvisningar och/eller Trafikverkets krav, men på grund av okunskapen blir det inte alltid tätt mot mark, betongfundament och/eller mot skärmelement. Många gånger förekommer det även håligheter mot mark för att avrinning ska kunna ske. Förekomsten av läckage begränsar en bullerskyddsskärms funktion och får därför inte finnas. Trafikverket håller i utbildningar för att undvika missförstånd och öka kunskapen, men det finns fortfarande brister i arbetet med installationen. Enligt MW är det ofta mindre läckage mot stolparna. Det är avgörande att tillverkarna av bullerskyddsskärmen har bra monteringsanvisningar för installationen. Om dessa efterföljs ska den ha en fullgod funktion utan läckage, vara dimensionerad akustiskt och vara säker.

I dagsläget används den nordiska beräkningsmodellen, reviderad 1996, som standard i planeringsstadiet inför en byggnation av en bullerskyddsskärm. Enligt MW förutsätter metoden att installationen är helt tät. Resultatet som erhålls från denna beräkningsmodell är ljudvågorna som går över och vid sidan om bullerskyddsskärmen. Det är en gammaldags metod och resultatet är missvisande eftersom det inte ser ut som att det finns buller precis bakom skärmen, anser MW. Längre bort blir värdena dock mer realistiska. Enligt MW går de stegvis över till Nord2000. När specifikationerna för en bullerskyddsskärm har preciserats beställer entreprenören bullerskyddsskärmen av en skärmtillverkare, som i sin tur har testat och deklarerat skärmen i enlighet med EN 1793-2 för bestämning av ljudisoleringen, en mätning som utförs i ett diffust ljudfält.

Miljökonsekvensbeskrivningen (MKB) för ett byggnadsprojekt kräver att en bullerutredning genomförs och beskrivs. Trafikverket tar hjälp av akustikkonsulter för att utföra bullerutredningarna enligt en upphandlingsmall. Akustikkonsulter är således med initialt i planeringsstadiet och är centrala i vägutredning och projektering, men eftersom projekteringar ofta drar ut på tiden så tar det tid innan det finns en färdig vägmodell som kan läggas in i bullerberäkningsmodellen. Akustiker är ibland även med i byggnadsfasen om exempelvis dimensionerna för en bullerskyddsskärm behöver omprojekteras av olika skäl.

D2. Åsa Stenman Norlander, Structor Akustik

Åsa Stenman Norlander (ÅSN) är konsult på Structor Akustik. Enligt ÅSN blir akustiker kontaktade av beställare vid detaljplaneringen inför ett byggnationsprojekt för att utföra en bullerutredning och eventuellt komma med åtgärdsförslag, då kan till exempel en bullerskyddsskärm rekommenderas. Ofta släpps akustikerna efter den fasen men ibland är de kvar genom hela planeringen och även under byggnationen, vilket är bra eftersom de då kan granska konstruktörens underlag så att specifikationen för bullerskyddsskärmen blir så optimal som möjligt.

De efterkontroller som utförs på en bullerskyddsskärm efter att den är färdigkonstruerad granskar om enheten är tillräckligt säker, klarar vindlaster, klarar krocksäkerhet och att den består i ett antal år. ÅSN menar att det dessvärre inte kontrolleras hur bra bullerskyddsskärmen är akustiskt och om den faktiskt klarar de akustiska krav som har ställts på den. Akustiker borde vara med genom hela arbetet för att kunna säkerställa att det blir en optimal bullerskyddsskärm akustiskt sett ur alla variabler. För att säkerställa bullerskyddsskärmens effektivitet borde mätningar utföras in-situ.

I framtiden ser gärna ÅSN även att akustiker är med genom hela processen som standard och att de får vara med och göra mer detaljerade specifikationer. Enligt ÅSN finns det en kunskapslucka som ibland leder till att specifikationen inte efterföljs fullständigt, att det blir en fråga om vad för material som finns tillgängligt och kostnad. Otydligheter eller för luftiga specifikationer kan göra att bullerskyddsskärmen som konstrueras inte håller akustiskt. Det kan till exempel vara om det är otydligheter i tätning eller massan av någon konstruktionsdel. Leverantörerna behöver bli mer medvetna om hur deras eventuella val som avviker från specifikationerna påverkar enhetens akustiska prestanda. ÅSN ser gärna att akustiker är med och pratar med leverantörerna från start, så att alla inblandade har samma synvinkel och fokus.

När byggnationen av bullerskyddsskärmen sedan påbörjas så kan akustiker vara med i en granskningsfas och besiktiga det som har byggts hittills, för att säkerställa att enheten faktiskt håller akustiskt enligt specifikationen. Då kan standarderna för mätningar in-situ användas, till exempel EN 1793-6:2012. Om bullerskyddsskärmen inte är tillräckligt bra så kan justeringar göras så att den håller enligt specifikationerna. Efter att hela konstruktionen är på plats så kan efterkontroller utföras för att än en gång undersöka enhetens prestanda. Det borde även ske återkommande kontroller efter ett antal år. Detta skulle det inte behövas akustiker för att genomföra, men akustikens synpunkter behöver vara med. Detta kan till exempel göras med en specifikation för underhållsplan som beställaren får ansvara för. Exempelvis behöver underdelen mot mark oftast bytas ut efter några år, eftersom den bland annat utsätts för en större andel fukt med mera.

ÅSN tror att det kan komma att behövas ytterligare en standard för att få ihop prestandan för hela konstruktionen. Det finns exempelvis ingen standard som mäter bullerreduceringen för bullerskyddsskärmens anslutning mot mark, vilket borde vara en viktig faktor på grund av direktljudet från däck mot underlag.

BILAGA E – INTERVJUFRÅGOR

Frågor till Monica Waaranperä, bullerspecialist på Trafikverket

- 1) Kan du beskriva ditt arbete på Trafikverket? Vart sitter du i organisationen?
- 2) Hur arbetar ni tillsammans med akustiker? Om ni tar hjälp av akustiker för att utföra bullerutredningar, i hur stor andel uppskattar du att ni följer de rekommendationer ni har fått (materialval, placering, utförande m.m.)?
- 3) Hur går det till när en bullerskyddsskärm installeras? Är Trafikverket beställare eller kommer ni med expertis?
- 4) Hur tycker du att installationen av bullerskyddsskärmar går till idag? Finns det några brister i arbetet?
- 5) Ser du läckage som ett problem?
- 6) Vad tycker du om metoden för att beräkna en bullerskyddsskärms prestanda idag?
- 7) Har du några förslag på rekommendationer och åtgärder för hur du tycker att det borde gå till i framtiden? Gäller installation och beräkningsmetodik.
- 8) Hur används standard EN 1793–6:2012 idag?
- 9) Hur tror du att standard EN 1793–6:2012 kommer att användas i framtiden?

Frågor till Åsa Stenman Norlander, konsult på Structor Akustik

1. Hur tycker du att akustiker ska arbeta i byggnationen?
2. Vad tycker du om den beräkningsmetod som används för att beräkna en bullerskyddsskärms prestanda idag?
3. Utför ni några mätningar in-situ på bullerskyddsskärmar idag?
4. Hur tycker du att standard EN 1793–6:2012 ska användas i Sverige?
5. Vad har du för rekommendationer på åtgärder och efterkontroller?

BILAGA F – BILDER PÅ MÄTSYSTEMETS HÅRDVARA



Figur F1. Datainsamlingsenheten STUDIE-CAPTURE, Roland.



Figur F2. Ljudkällan, Mackies SRM150, som användes under mätningarna.



Figur F3. En av mikrofonerna som användes under mätningarna, en ljudmätare från NTI Audio, M4261.

BILAGA G – LÄCKAGE PÅ BULLERSKYDDSSKÄRMEN VID FRIDHEMSPLAN



Figur G1. Läckage vid fästningen av skärmelementet till betongfundamentet, ca 0,5 x 0,5 cm. Finns på båda sidorna av pelaren, dvs. totalt fyra hål per skärmelement.



Figur G2. Förutom får hålligheterna som ses i Figur B1 fanns det inget mer läckage vid skärmelementet, men det fanns större hålligheter på andra skärmelement. Den här springan var ca 100 m bort från det undersökta skärmelementet.

BILAGA H – LÄCKAGE PÅ BULLERSKYDDSSKÄRMEN VID LIDINGÖVÄGEN



Figur H1. Läckage vid toppen av skärmelementet, genomgående för samtliga skärmelement för bullerskyddsskärmen.



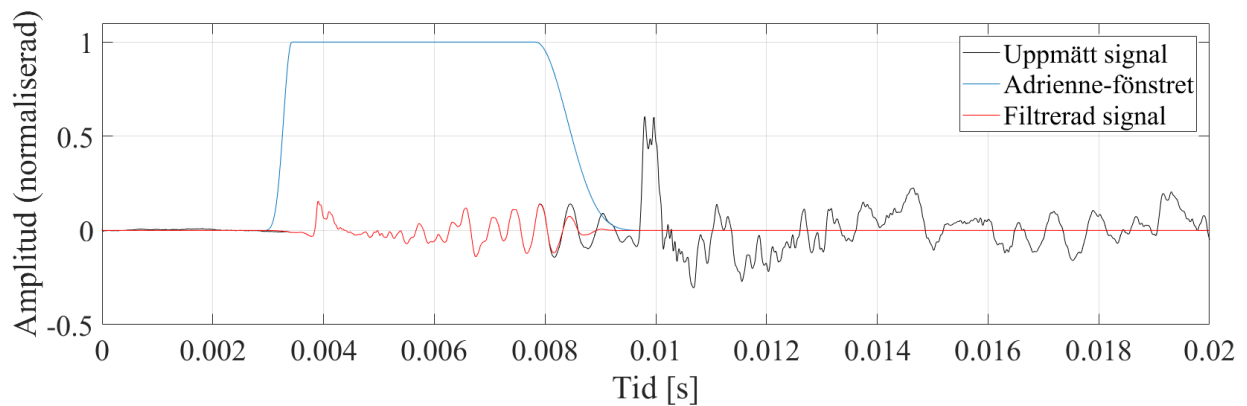
Figur H2. Läckage vid en av pelarna vid skärmelementet, beror på att samtliga pelare bara består av en skiva ut mot den trafikerade vägen.



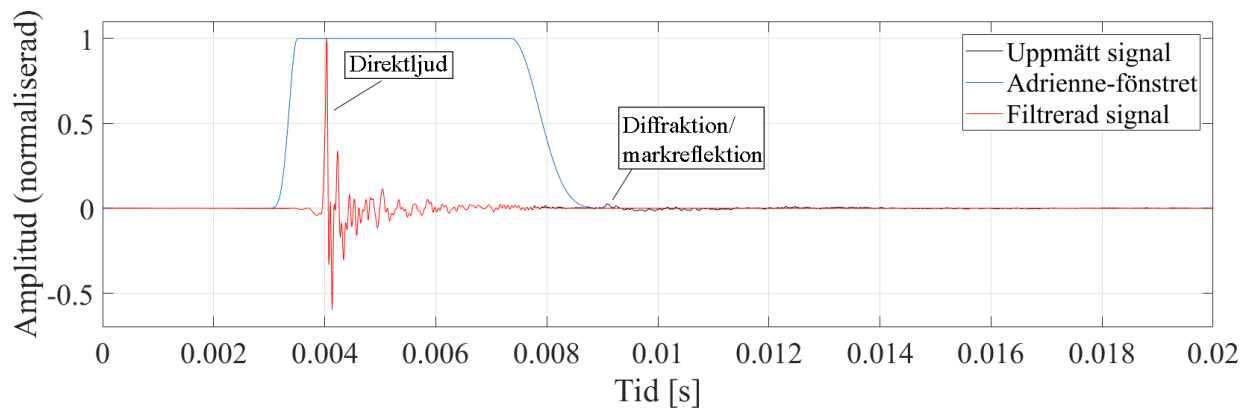
Figur H3. Läckage mellan skärmelement och mark på det undersökta skärmelementet, men läckaget förekom på samtliga skärmelement.

BILAGA I – FILTRERING AV IMPULSSVAREN

Fridhemsplan

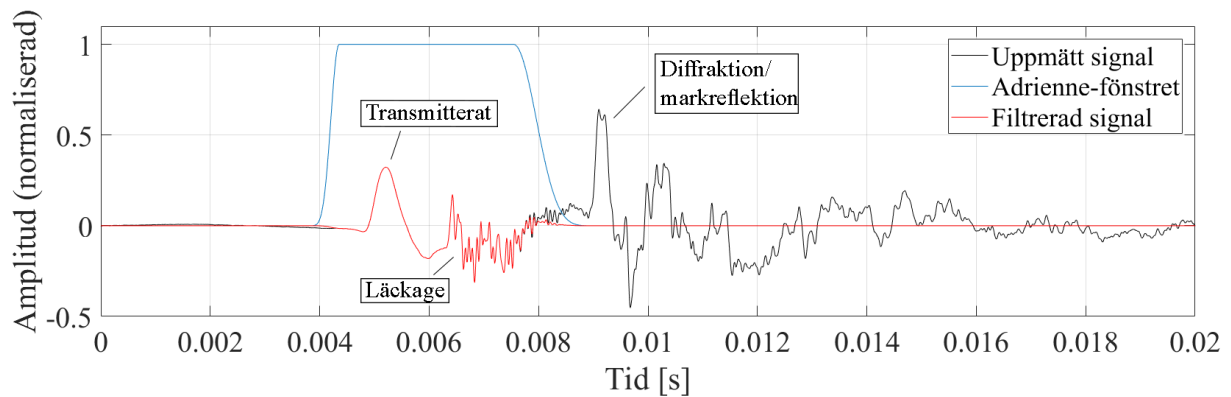


Figur 11. Filtrering av impulssvaren för skärmelementet vid Fridhemsplan. Den blåa kurvan är Adrienne-fönstret, den röda kurvan är den filtrerade impulssignalen och den svarta kurvan är det uppmätta impulssvaret. De olika komponenterna som är synliga är markerade i figuren.

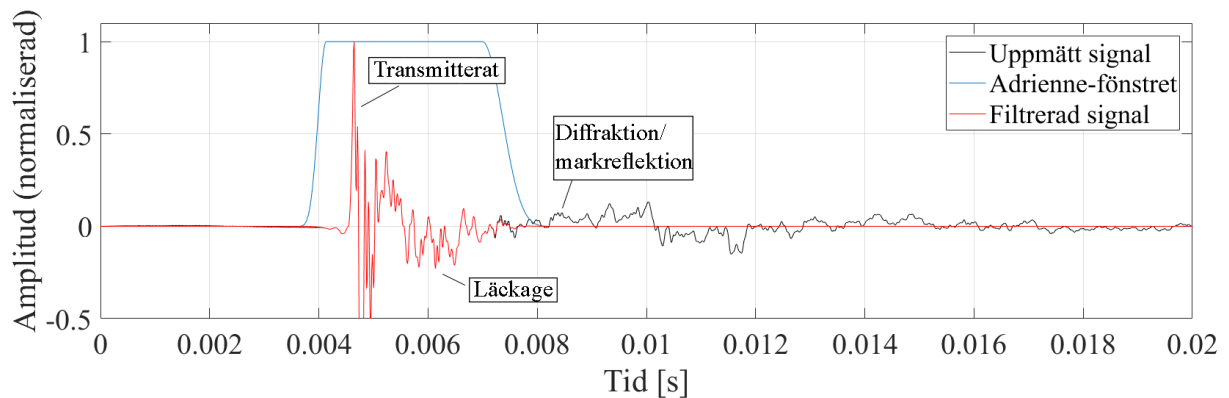


Figur 12. Filtrering av impulssvaren för frifältsmätningen vid Fridhemsplan. Den blåa kurvan är Adrienne-fönstret, den röda kurvan är den filtrerade impulssignalen och den kurvan linjen är det uppmätta impulssvaret. De olika komponenterna som är synliga är markerade i figuren.

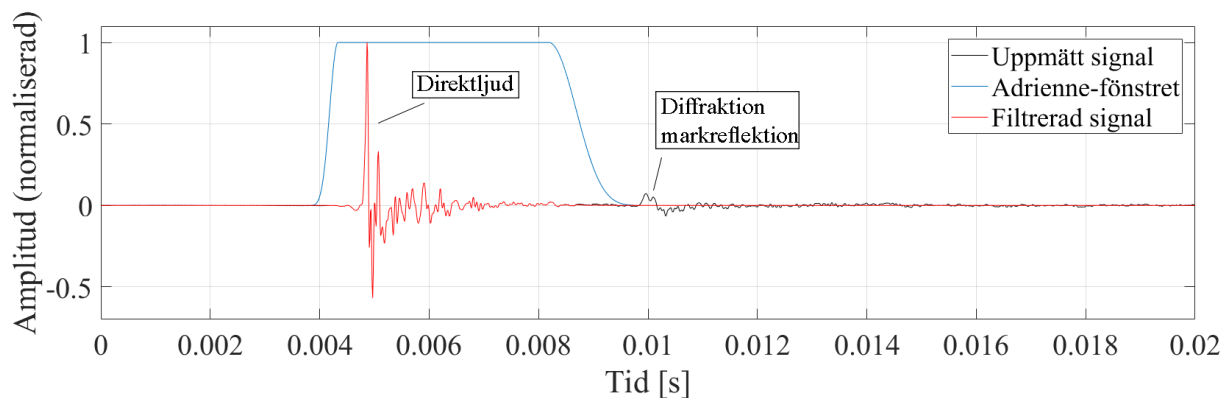
Lidingövägen



Figur 13. Filtrering av impulssvaren för skärmelementet vid Lidingövägen. Den blåa kurvan är Adrienne-fönstret, den röda kurvan är den filtrerade impulssignalen och den svarta kurvan är det uppmätta impulssvaret. De olika komponenterna som är synliga är markerade i figuren.

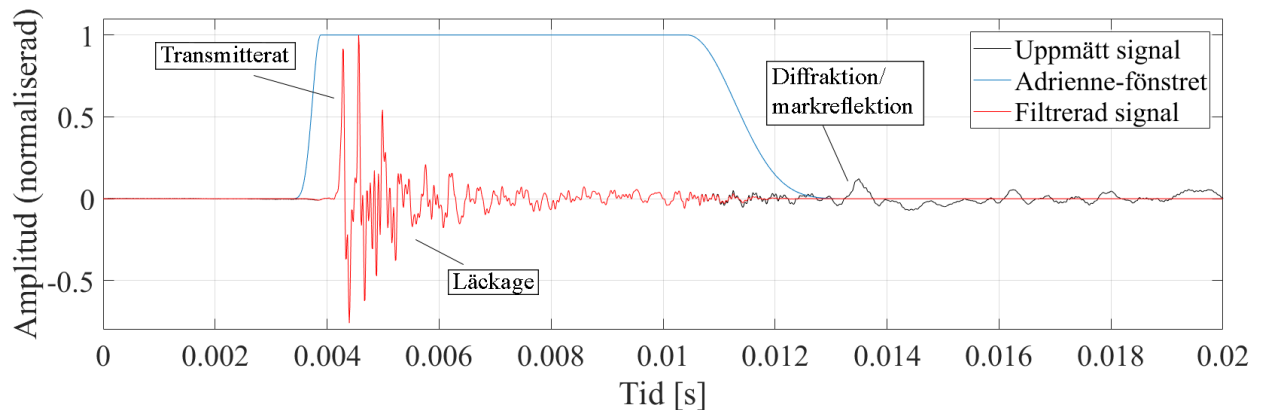


Figur 14. Filtrering av impulssvaren för pelaren vid Lidingövägen. Den blåa kurvan är Adrienne-fönstret, den röda kurvan är den filtrerade impulssignalen och den svarta kurvan är det uppmätta impulssvaret. De olika komponenterna som är synliga är markerade i figuren.

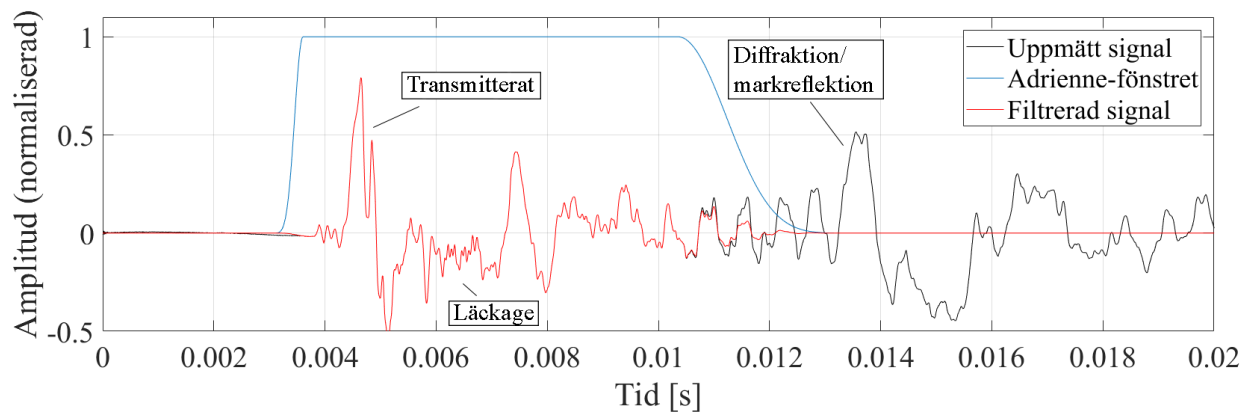


Figur 15. Filtrering av impulssvaren för frifältsmätningen vid Lidingövägen. Den blåa kurvan är Adrienne-fönstret, den röda kurvan är den filtrerade impulssignalen och den svarta kurvan är det uppmätta impulssvaret. De olika komponenterna som är synliga är markerade i figuren.

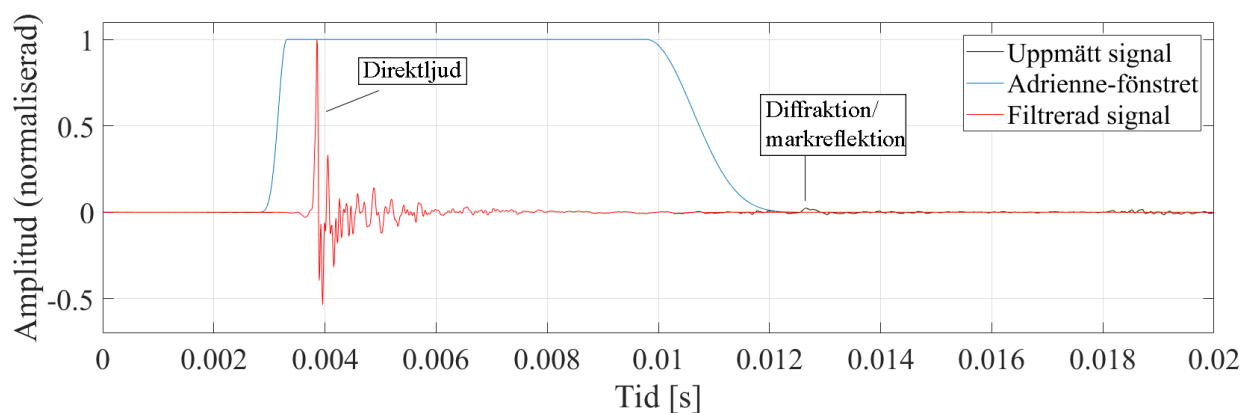
Knivsta



Figur 16. Filtrering av impulssvaren för skärmelementet vid Knivsta. Den blåa kurvan är Adrienne-fönstret, den röda kurvan är den filtrerade impulssignalen och den svarta kurvan är det uppmätta impulssvaret. De olika komponenterna som är synliga är markerade i figuren.



Figur 17. Filtrering av impulssvaren för pelaren vid Knivsta. Den blåa kurvan är Adrienne-fönstret, den röda kurvan är den filtrerade impulssignalen och den svarta kurvan är det uppmätta impulssvaret. De olika komponenterna som är synliga är markerade i figuren.



Figur 18. Filtrering av impulssvaren för frifältsmätningen vid Knivsta. Den blåa kurvan är Adrienne-fönstret, den röda kurvan är den filtrerade impulssignalen och den svarta kurvan är det uppmätta impulssvaret. De olika komponenterna som är synliga är markerade i figuren.

BILAGA J – RESULTAT AV LJUDISOLERINGSINDEX, SI_j , I TABELLFORM

Tabell J1. Resultat av ljudisoleringsindexet, SI_j , för skärmelementet vid Fridhemsplan. Resultatet presenteras som enskilda värden för varje tredjedelsoktavband samt som ett logaritmiskt medelvärde

Tredjedels oktavband [Hz]	Ljudisoleringsindex, SI , för samtliga mikrofoner och logaritmiskt medelvärde för skärmelementet (Fridhemsplan)									
	Enskilda värden									Logaritmiskt medelvärde
	SI_1	SI_2	SI_3	SI_4	SI_5	SI_6	SI_7	SI_8	SI_9	SI
100	25,5	27,3	25,8	30,0	30,9	29,4	28,6	30,2	26,5	27,8
125	27,7	29,5	27,8	31,4	32,9	30,4	28,3	29,3	25,7	28,8
160	29,8	31,6	29,7	32,6	34,4	31,2	28,8	29,5	25,5	29,7
200	31,7	33,6	31,4	33,6	35,4	32,1	30,6	31,0	26,4	31,0
250	33,6	35,3	32,8	34,8	36,0	33,3	34,3	33,7	29,1	33,2
315	36,8	36,8	34,4	36,6	36,3	35,7	38,1	35,2	34,1	35,8
400	41,2	38,0	38,5	39,1	37,6	40,7	37,4	36,7	38,2	38,4
500	36,1	39,3	41,8	37,5	40,2	43,1	38,6	39,5	43,6	39,4
630	39,6	43,6	40,3	39,9	43,2	40,3	38,5	41,3	39,7	40,4
800	42,9	42,1	41,3	41,5	41,2	42,6	40,4	39,8	42,2	41,5
1000	45,2	45,4	44,0	42,2	45,0	41,8	37,9	37,6	39,3	41,0
1250	43,6	39,4	46,4	43,4	39,7	40,8	40,8	38,5	37,4	40,4
1600	42,3	37,5	42,3	41,5	40,6	39,3	41,2	35,5	39,7	39,4
2000	38,8	42,9	42,9	36,1	36,5	38,9	39,3	40,5	38,9	38,9
2500	39,3	46,7	42,8	41,2	39,3	41,9	44,2	43,1	44,8	42,0
3150	47,7	49,3	48,2	48,5	49,0	46,6	47,8	49,8	47,0	48,1
4000	48,9	52,2	49,2	51,8	53,5	50,2	49,9	54,5	48,8	50,6
5000	49,7	58,2	51,3	57,7	58,7	53,6	54,0	57,8	50,7	53,4

Sammanvägt värde för luftburet ljudisoleringsindex för skärmelementet vid Fridhemsplan,
 $DL_{SI,E} = 39$ dB

Kategori för luftburen ljudisolering = D4

Tabell J2. Resultat av ljudisoleringsindexet, SI_j , för skärmelementet vid Lidingövägen. Resultatet presenteras som enskilda värden för varje tredjedelsoktavband samt som ett logaritmiskt medelvärde

Tredjedels oktavband [Hz]	Ljudisoleringsindex, SI , för samtliga mikrofoner och logaritmiskt medelvärde för skärmelementet (Lidingövägen)									
	Enskilda värden									Logaritmiskt medelvärde
	SI_1	SI_2	SI_3	SI_4	SI_5	SI_6	SI_7	SI_8	SI_9	SI
100	16,9	14,6	14,5	13,2	11,7	13,1	17,5	38,0	13,9	14,6
125	19,2	17,0	16,9	15,7	14,5	15,5	18,1	38,1	15,1	16,8
160	20,9	18,9	18,6	17,6	16,9	17,4	18,8	38,1	16,3	18,5
200	22,0	20,2	19,6	18,9	18,7	18,6	19,5	38,1	17,4	19,7
250	22,1	20,7	19,5	19,5	20,1	19,0	20,2	38,1	18,4	20,3
315	21,5	20,7	18,5	19,4	21,2	18,5	20,5	38,1	18,9	20,3
400	21,8	22,6	18,4	19,3	23,5	18,3	20,7	38,1	19,1	20,6
500	25,2	27,3	20,8	22,9	27,2	22,0	21,6	38,1	20,3	23,2
630	29,3	26,9	23,5	27,4	24,6	25,5	25,5	38,1	23,1	25,8
800	27,0	26,4	23,5	25,3	27,0	25,6	27,3	38,1	23,0	25,8
1000	29,3	34,0	26,2	26,2	33,2	28,5	26,1	38,1	24,8	28,0
1250	29,6	38,1	29,3	25,2	38,8	30,6	26,0	38,1	28,5	29,3
1600	33,7	38,6	35,9	27,1	34,8	38,0	29,6	38,1	35,3	32,7
2000	43,4	41,5	40,5	33,4	41,7	35,8	33,4	38,1	40,1	37,2
2500	46,6	48,7	45,9	37,3	45,7	40,8	37,8	38,1	40,1	40,6
3150	56,8	62,7	43,6	39,5	49,2	45,2	42,5	38,1	43,2	42,9
4000	62,7	63,6	52,2	47,7	52,3	49,8	48,4	38,1	49,4	46,1
5000	46,4	56,3	46,0	43,2	53,0	46,5	49,8	38,1	51,4	44,8

Sammanvägt värde för luftburet ljudisoleringsindex för skärmelementet vid Lidingövägen,

$DL_{SI,E} = 26$ dB

Kategori för luftburen ljudisolering = D2

Tabell J3. Resultat av ljudisoleringsindexet, SI_j , för pelaren för Lidingövägen. Resultatet presenteras som enskilda värden för varje tredjedelsoktavband samt som ett logaritmiskt medelvärde

Tredjedels oktavband [Hz]	Ljudisoleringsindex, SI , för samtliga mikrofoner och logaritmiskt medelvärde för pelaren (Lidingövägen)									
	Enskilda värden									Logaritmiskt medelvärde
	SI_1	SI_2	SI_3	SI_4	SI_5	SI_6	SI_7	SI_8	SI_9	SI
100	14,7	15,4	15,0	12,7	12,7	13,5	15,0	14,4	13,4	14,0
125	17,1	17,8	17,3	15,4	15,5	16,0	16,2	15,8	14,6	16,1
160	19,0	19,6	19,2	17,7	17,8	17,9	17,5	17,2	15,9	17,8
200	20,2	20,7	20,3	19,3	19,3	19,2	18,7	18,4	17,1	19,1
250	20,5	20,7	20,5	20,4	20,1	19,7	19,9	19,5	18,2	19,9
315	20,2	19,9	19,9	20,9	19,9	19,7	20,8	20,1	19,0	20,0
400	20,9	20,1	20,8	21,4	19,3	20,3	21,9	20,2	19,9	20,5
500	24,6	22,1	25,4	25,7	21,2	25,7	25,1	20,9	23,1	23,4
630	28,6	25,3	29,3	28,3	23,8	27,8	30,9	22,3	28,1	26,3
800	25,6	25,7	25,2	27,6	24,6	26,9	26,4	22,2	23,9	25,1
1000	26,4	27,4	26,0	29,0	25,2	26,6	26,5	25,7	24,4	26,2
1250	28,7	26,2	29,2	28,1	21,8	27,5	26,6	23,1	26,4	25,7
1600	31,2	25,5	30,1	28,2	22,3	27,2	29,3	25,8	28,6	26,8
2000	33,8	29,1	30,8	30,1	22,6	27,1	31,7	24,2	29,1	27,3
2500	40,2	34,9	37,3	31,6	24,0	29,6	35,3	28,1	33,8	30,2
3150	40,9	35,6	38,1	30,2	25,1	28,6	35,2	32,2	35,0	31,0
4000	40,4	35,7	37,0	31,5	27,6	25,6	35,7	37,7	34,1	31,4
5000	38,8	39,3	30,6	30,8	27,7	23,4	42,9	38,3	37,5	30,2

Sammanvägt värde för luftburet ljudisoleringsindex för pelaren vid Lidingövägen, $DL_{SI,E} = 25$ dB

Kategori för luftburen ljudisolering = D2

Tabell J4. Resultat av ljudisoleringsindexet, SI_i , för skärmelementet vid Knivsta. Resultatet presenteras som enskilda värden för varje tredjedelsoktavband samt som ett logaritmiskt medelvärde

Tredjedels oktavband [Hz]	Ljudisoleringsindex, SI , för samtliga mikrofoner och logaritmiskt medelvärde för skärmelementet (Knivsta)									
	Enskilda värden									Logaritmiskt medelvärde
	SI_1	SI_2	SI_3	SI_4	SI_5	SI_6	SI_7	SI_8	SI_9	SI
100	23,5	23,5	23,2	23,3	23,6	22,3	24,2	23,4	22,7	23,3
125	26,2	26,4	26,0	26,0	26,4	25,0	25,3	25,5	24,4	25,7
160	28,0	28,4	27,8	28,5	29,0	27,6	27,1	27,9	26,8	27,9
200	28,8	29,5	28,9	31,4	31,6	30,5	29,8	30,1	29,7	29,9
250	28,8	29,9	29,4	36,0	35,9	34,5	33,0	31,9	31,6	31,6
315	30,8	32,8	32,3	34,5	36,1	35,8	32,1	34,8	33,4	33,3
400	34,9	36,2	38,3	33,4	33,6	33,5	35,3	35,8	37,1	35,1
500	32,4	36,1	38,1	37,8	41,1	39,1	32,1	34,1	36,3	35,4
630	32,4	38,2	38,4	33,5	37,2	41,4	31,0	35,5	38,5	35,1
800	37,7	40,1	37,5	33,9	41,3	41,7	34,3	41,0	40,3	37,7
1000	41,6	46,8	39,1	36,1	40,5	43,1	36,9	40,3	35,5	38,8
1250	43,3	47,1	40,8	41,5	38,8	50,4	37,4	44,5	40,7	41,3
1600	44,0	45,4	44,8	37,1	47,6	45,7	41,0	43,8	37,8	41,6
2000	44,4	44,8	45,6	36,9	38,9	42,9	39,9	38,8	35,4	39,5
2500	38,4	37,7	45,3	26,3	26,0	39,2	32,0	30,5	40,3	31,1
3150	45,3	43,0	42,4	35,6	31,2	43,4	35,5	33,4	42,8	36,5
4000	37,9	39,7	46,6	38,2	33,1	47,9	30,7	34,0	40,4	35,9
5000	43,2	46,7	45,1	34,2	42,7	43,9	42,1	41,5	44,3	40,8

Sammanvägt värde för luftburet ljudisoleringsindex för skärmelementet vid Knivsta, $DL_{SI,E} = 36$ dB

Kategori för luftburen ljudisolering = D3

Tabell J5. Resultat av ljudisoleringsindexet, SI_j , för pelaren vid Knivsta. Resultatet presenteras som enskilda värden för varje tredjedelsoktavband samt som ett logaritmiskt medelvärde

Tredjedels oktavband [Hz]	Ljudisoleringsindex, SI, för samtliga mikrofoner och logaritmiskt medelvärde för pelaren (Knivsta)									
	Enskilda värden									Logaritmiskt medelvärde
	SI_1	SI_2	SI_3	SI_4	SI_5	SI_6	SI_7	SI_8	SI_9	SI
100	24,4	25,3	24,5	25,8	25,9	26,1	24,7	24,5	24,6	25,1
125	27,3	28,3	27,2	27,9	28,6	28,0	27,1	27,5	27,2	27,6
160	29,3	30,2	29,0	29,5	30,6	29,4	29,9	30,9	29,9	29,8
200	30,4	31,0	30,0	30,7	32,0	30,5	31,7	33,0	31,1	31,1
250	31,5	31,3	30,4	32,4	32,9	32,0	31,7	32,0	30,8	31,6
315	36,6	35,4	34,0	38,5	35,2	36,6	35,0	33,8	33,5	35,2
400	37,9	40,0	38,5	34,0	34,1	34,5	39,2	38,6	37,3	36,6
500	39,5	37,3	39,2	39,4	38,3	36,7	36,6	37,0	36,7	37,7
630	37,1	41,0	36,9	40,5	35,0	39,0	35,9	37,9	36,0	37,3
800	35,4	38,8	37,3	41,9	37,1	37,1	38,9	37,1	35,9	37,4
1000	38,6	36,2	43,8	44,7	36,6	39,1	37,5	36,8	39,5	38,4
1250	41,1	40,4	41,7	46,6	41,3	42,0	42,1	39,9	43,7	41,7
1600	48,8	43,4	45,2	49,2	43,2	41,1	40,3	44,0	37,2	42,1
2000	47,9	49,2	43,9	50,2	53,1	41,7	39,6	42,5	41,6	43,7
2500	44,5	53,7	42,8	46,5	47,6	44,4	41,9	42,6	43,4	44,3
3150	49,4	52,6	47,2	49,8	51,8	49,8	45,5	50,4	42,8	47,7
4000	49,1	57,0	53,4	49,8	56,6	48,2	43,1	56,6	44,7	48,4
5000	47,4	58,3	50,9	51,0	54,6	45,5	45,4	52,7	42,2	47,5

Sammanvägt värde för luftburet ljudisoleringsindex för pelaren vid Knivsta, $DL_{SI,E} = 38$ dB
 Kategori för luftburen ljudisolering = D4