

# EXAMENSARBETE

## Tågbuller utvärdering med binaural teknik samt förslag till åtgärder

Joakim Lagerkranser

**Civilingenjörsprogrammet Maskinteknik**

Institutionen för Maskinteknik  
Avdelningen för Maskinelement

## **Förord**

Detta examensarbete är avslutningen av min civilingenjörsutbildning vid Luleå tekniska universitet inom maskinteknik med maskinkonstruktionsavlutning.

Examensarbetet är gjort på uppdrag av Banverket, norra banregionen.

Arbetet har bedrivits vid institutionen för Arbetsvetenskap på avdelningen Miljöteknik vid Luleå tekniska universitet.

Jag vill framföra ett stort tack till alla anställda vid Miljöteknik som verkligen har fått mig att känna mig som en i gänget. Ett extra stort tack till Nicklas Frenne och Donatas Trapenskas som bidragit med stor hjälp i detta arbete och även gjort stunder utanför arbetet oförglömliga.

Från Banverket vill jag tacka Henrik Eriksson och P-O Larsson.

Jag tackar också mina medmusikanter i bandet Rooster för att de stått ut med mitt humör när det inte varit på topp p.g.a. examensarbetet, tack Björn, Jörgen, Magnus och Robert.

Men framförallt vill jag tacka min handledare Örjan Johansson som inte bara lärt mig akustik, statistik, hur forskning ska bedrivas och hur rapportskrivning ska gå till, utan även visat stort tålamod när saker inte har gått så smidigt.

Luleå den 14 november 2000

Joakim Lagerkranser

## Sammanfattning

Närhet till tågstationen är av central betydelse för järnvägstrafik, för både persontrafik och tung godstrafik. Närhet till stationen innebär att det är nära till fastigheter och där folk vistas. Ett problem till följd av den centrala placeringen av järnvägen är bullret från tågen. Idag minskas buller från järnvägstrafik genom att förbättra isoleringen på närliggande fastigheter och genom att utmed järnvägsspåret bygga bullerplank. Detta är dock kostsamma lösningar och de positiva effekterna är i vissa avseenden begränsade.

Buller från järnväg beskrivs vanligen med A-vägd ljudtrycksnivå, dels medelvärdesbildad över viss tid och dels som maximal nivå. A-vägd ljudtrycksnivå ger begränsad möjlighet att beskriva bullerstörning. För att ge en bättre beskrivning av bullerstörning krävs bättre mätmetoder.

Denna studie baseras på binaural teknik. Skillnaden mellan traditionell mätteknik och binaural teknik är att ljudet först spelas in för att sedan spelas upp i lyssningstest, där testpersoner får ange grad av bullerstörning. Den inspelade mätsignalen används dessutom för beräkning av ett stort antal mätstorheter, t. ex. A-vägd ljudtrycksnivå men även så kallade sensoriska mätstorheter, som beskriver signalen på ett sätt som är mer direkt jämförbar med hörupplevelsen. Syftet med studien är att utvärdera hur olika faktorer påverkar graden av bullerstörning. Bl. a. undersöks effekten av bullerskärmar, skillnader mellan olika tågtyper, körsätt och tåg som på olika sätt avviker från normal gång. Två lyssningstest har genomförts. Test 1 baserades på en faktoriell design och Test 2 var ett försök att mer generellt beskriva bullret kring järnvägen. Bullerstörning skattades av två olika lyssningsgrupper på en sjugradig skala där 7 motsvarar extremt störande och 1 motsvarar inte alls störande.

Test 1 visade att bullerskärmar är effektiva, med befintlig skärm sjunker bullerstörningen nästan två skalsteg, vilket motsvarar en minskning av hörstyrkan med 57 %. Effekten av bullerskärm är störst sommartid. Orsaken till detta är att bullret från tåg, som till stor del kommer från räil, slippers och reflexer via banvallen, till stor del absorberas och dämpas av snö och is. Lyssningstesten visade dessutom att tåg med någon form av avvikelse, exempelvis hjulplattor och bromsskrik, ger ökad bullerstörning med ungefär 1,5 skalsteg, vilket motsvarar en ökning av hörstyrkan med 85 %.

Sambandet mellan relativ bullerstörning (Test 2, medelvärden för respektive grupp) och olika mätstorheter studerades med multipel regressionsanalys. En modell som baseras på mätstorheterna hörstyrka och skarphet ger en bra beskrivning av relativ bullerstörning och förklarar 91 % av variansen ( $r = 0,95$ ) och validerades med data från Test 1 ( $r = 0,97$ ). A-vägd ljudtrycksnivå är den enskilda mätstorhet som korrelerar bäst med relativ bullerstörning ( $r = 0,92$  för Test 2).

För ytterliggare minskning av bullerstörning från järnvägstrafik måste i första hand tåg med avvikelser åtgärdas. Till avvikande tåg räknas godståg som bromsar eller har hjulplattor, vilket är problem som kan minskas med nya konstruktionslösningar. För tunga godstransporter i tätbebyggelse bör man undvika onödiga inbromsningar, t. ex. genom bättre planering och hårdare hastighetsbegränsning. Problemet med hjulplattor kan troligen minskas om speciella hjul används på tåg med höga axeltryck. För en tidig upptäckt av defekta tåg krävs en utbyggd och bättre mikrofonövervakning av tågtrafiken, vilket på sikt även kan innebära ett mer ansvarsfullt körsätt.

## Abstract

A train station near the center of a city is an essential aspect for railroad traffic, both freight traffic and passenger traffic. The central position, however, means that the train traffic is near areas where people live which may cause noise annoyance. Today, increasing insulation of buildings, and barriers along the rail reduces noise from railroad traffic. These are expensive solutions and the positive effects are in some cases limited.

A-weighted sound pressure levels both as long term rms-values and as maximum levels are often used for description railroad traffic noise. In many circumstances a particular sound character may have a great influence on annoyance. Characteristics as break squeal for example are not well described by dB(A), but there are also other non acoustic factors that influences noise annoyance. To meet future demands on improved life quality, methods for quantification and description of sound events has to be improved.

The aim of this study is to use binaural technology for description and quantification of relative annoyance caused by railway noise. The difference between traditional measurement technology and binaural technology is that the sound is first recorded and then played back in listening test where test persons make judgments of relative annoyance. The recorded signals are also used for calculation of a great number of acoustic measures, e.g. A-weighted sound pressure level and different types of psychoacoustic descriptors. Two listening tests have been conducted. Test 1 was based on factorial design and Test 2 was an attempt to give a general description of railway noise. Two different groups conducted the listening tests. Annoyance was assessed using a seven-point scale, ranging from (1) not at all annoying, to (7) very much annoying.

Test 1 focuses on how different factors influence the degree of annoyance. For example the effects of screens, train types, and trains that diverge from normal behavior. The result showed that screens are efficient. A screen reduces annoyance by almost 2 scale steps, which corresponds to a reduction in loudness by 57 %. The effect of screen is most notable during summertime. The reason for this is that the main part of noise from train at low speeds radiates from the rail, wheels and slippers, which to a great extent are damped and absorbed by snow and ice. The listening test also showed that train with some kind of diverge, e.g. out of round wheels and break squeals, increases the annoyance by 1,5 scale steps, which corresponds to an increase in loudness by 85 %.

Multiple regression analysis was used to examine the relationships between relative annoyance (Test 2, scaled values for each group) and different measurement descriptors. An index based on the psychoacoustic descriptors loudness and sharpness explain 91 % of the variance in relative annoyance ( $r = 0,95$ ). The annoyance index was validated by data from Test 1 ( $r = 0,97$ ). The best single descriptor was, however, A-weighted sound pressure which explains 84% of the variance in relative annoyance in Test 2 ( $r = 0,92$ ).

Further reductions of annoyance from railroad traffic requires efficient control for diverging trains, like breaking freight trains or trains with out of round wheels. Some of these problems can be reduced by new design solutions. The problem caused by out of round wheels can probably be reduced if special wheels and/or new break systems are used on trains with high axle loads. Another solution is to avoid unnecessary breaking of heavy freight transports in populated areas, for example by better planning and heavier speed regulations. Early detection of diverging trains can also lead to a more careful driving.

# Innehållsförteckning

<b>INNEHÅLLSFÖRTECKNING</b> .....	<b>1</b>
<b>1 INLEDNING</b> .....	<b>3</b>
<b>2 BAKGRUND</b> .....	<b>4</b>
2.1 BULLERMILJÖN KRING JÄRNVÄGEN .....	4
2.1.1 <i>Vibrationer</i> .....	5
2.1.2 <i>Bulleralstrande mekanismer</i> .....	5
2.1.3 <i>Bullerstörning från tågen</i> .....	6
2.1.4 <i>Åtgärder på enskilda fastigheter</i> .....	6
2.1.5 <i>Åtgärder vid tågspåret</i> .....	7
<b>3 MÄTMETODER</b> .....	<b>8</b>
3.1 TRADITIONELL MÄTTEKNIK.....	8
3.1.1 <i>Ljudtrycksnivå</i> .....	8
3.1.2 <i>Frekvensvägning</i> .....	9
3.1.3 <i>Frekvensanalys</i> .....	11
3.2 PSYKOAKUSTISKA MÄTPARAMETRAR.....	12
3.2.1 <i>Örats hörförmöga</i> .....	12
3.2.2 <i>Hörstyrka</i> .....	13
3.2.3 <i>Skarphet</i> .....	14
3.2.4 <i>Råhet</i> .....	14
3.2.5 <i>Tonalitet</i> .....	14
3.3 BINAURAL INSPELNINGSTEKNIK .....	15
<b>4 FÖRSÖKSDESIGN</b> .....	<b>16</b>
4.1 TEST 1 .....	16
4.2 TEST 2 .....	17
<b>5 MÄTPROCEDUR</b> .....	<b>18</b>
5.1 INSPELNING .....	18
5.2 LYSSNINGSTEST.....	19
5.2.1 <i>Pilotstudie</i> .....	20
5.2.2 <i>Test 1 och Test 2</i> .....	20
<b>6 RESULTAT</b> .....	<b>21</b>
6.1 RESULTAT TEST 1 .....	21
6.2 LJUDTRYCKSNIVÅER TEST 1.....	25
6.3 DETALJERAD ANALYS AV BULLERSKÄRMENS INVERKAN.....	26
6.4 BULLERSTÖRNING JÄMFÖRT MED MÄTSTORHETER .....	27
6.5 RESULTAT TEST 2.....	29
<b>7 NYA LÖSNINGAR FÖR SÄNKT BULLERNIVÅ</b> .....	<b>31</b>
7.1 SYSTEMATISERAD KONSTRUKTION .....	31
7.1.1 <i>Problemklarläggning</i> .....	31
7.1.2 <i>Specifikation</i> .....	31
7.1.3 <i>Abstraktion</i> .....	32
7.1.4 <i>Idématrix</i> .....	32
7.1.5 <i>Gallring</i> .....	33
7.1.6 <i>Önskemålsträd</i> .....	34
7.1.7 <i>Betygsättning och meritall</i> .....	35
7.1.8 <i>Känslighetsanalys</i> .....	36
7.2 HÖGPRESTANDA HJUL OCH RÄL .....	36
7.3 MIKROFONÖVERVAKNING AV TÅG .....	38
7.4 DIFFERENTIERADE HASTIGHETER .....	39
<b>8 SLUTSATSER</b> .....	<b>40</b>
<b>REFERENSER</b> .....	<b>41</b>

<b>BILAGOR</b>	<b>ANTAL SIDOR</b>
BILAGA 1: FÖRSÖKSDESIGN .....	3
BILAGA 2: INSTRUKTION TILL LYSSNINGSTEST .....	1
BILAGA 3: MÄTDATA.....	6
BILAGA 4: DIAGRAM.....	8

## 1 Inledning

Idag är det för många en självklarhet att järnvägen finns. Den används för att transportera människor och gods. En förutsättning för att alla ska kunna använda järnvägen är att den finns där allt folk finns. Det spelar ingen roll om det är för persontrafik eller tung godstrafik, det måste vara nära till tågstationen och om det är nära till stationen är det också nära till fastigheter där folk vistas. Ett problem till följd av den centrala placeringen av järnvägen är bullret från tågen. De vanligaste metoderna för att minska buller från järnvägen är att förbättra isoleringen av närliggande fastigheter och att bygga bullerplank utmed järnvägsspåret. För att beskriva järnvägsbuller används oftast A-vägd ljudtrycksnivå (medelvärde och maxnivå). Även presentation av frekvensspektrum i form av ters- eller oktavband förekommer. Denna typ av presentation har vissa begränsningar men bättre alternativ saknas.

Detta examensarbete är en studie om att mäta och analysera järnvägsbuller med binaural teknik. Fördelen med denna teknik är att man via lyssningstest kan spegla hur människan upplever ljud och därefter finna samband mellan bullerstörning och olika mätstorheter. Vid binaural teknik spelas först bullret in, sedan spelas det upp för ett stort antal testpersoner som får ange hur störande bullret upplevs. Från ljudsignalen beräknas en hel del mätstorheter, inte bara A-vägd ljudtrycksnivå utan även också psykoakustiska (sensoriska) mätstorheter som är baserade på mer avancerade modeller av vårt hörande. Slutligen kan man med statistiska metoder jämföra olika mätstorheter med resultaten från lyssningstesten för att se vilken mätstorhet som bäst beskriver upplevd bullerstörning. Fördelen med metoden är att bullret bedöms under mer kontrollerade former jämfört med traditionella metoder för skattning av bullerstörning. I undersökningen tas ingen hänsyn att tas till vibrationer, men kunskapen om vibrationers påverkan på bullerstörning är viktig för en behaglig miljö nära järnvägen.

Två lyssningstest är genomförda med två olika testgrupper. Den ena gruppen bestod av personal från Banverket och andra gruppen bestod av "vanligt" folk som inte har direkt anknytning till tåg eller järnvägstrafik. Anledningen till två testgrupper är att se hur personer som jobbar med tåg upplever tågbuller jämfört med hur "vanligt" folk upplever samma buller. Syftet med det första lyssningstestet var att studera bullerstörning i förhållande till ett antal påverkande faktorer. Följande fem faktorer undersöktes: (i) bullerskärm, (ii) körsätt, (iii) tågtyp, (iv) årstid och (v) last. Syftet med det andra testet var att göra en mer generell bedömning och beskrivning av järnvägsbuller, t.ex. inverkan av olika lok, tåg, hastigheter, inspelningsställen och körsätt.

Förutom mätningar och analyser kommer även förslag till åtgärder för att ytterligare sänka bullernivån vid järnvägen. Förslagen är framtagna enligt Beitz metod för konstruktiv utformning [1].

## 2 Bakgrund

Även om tågtrafik bullrar så anger endast 19 % av de som är utsatta för bullerstörning från trafikbuller i Sverige att tågtrafik är mest störande, motsvarande siffra för vägtrafik är 76 %. Omkring 2 miljoner människor i Sverige utsätts idag för ekvivalentnivåer över 55 dB(A) [2]. Förutom problemet med buller anses järnvägstrafik mycket miljövänlig i Sverige, eftersom de flesta tågen drivs med el. Konkurrenter till järnvägstrafik, både på person- och godssidan som bil, buss, lastbil, båt och flyg, alla dessa belastar miljön mycket. 1996 var utsläppen från transportsektorn av koldioxid 22 miljoner ton och för svaveldioxid och kväveoxider var det totalt 217 tusen ton. Utsläppen från järnvägsburet gods är försumbart, utsläppen kommer från vägtrafik, sjöfart och flyg. Järnvägen stod för 22 % av godstransportarbetet (antalet tonkm) 1997, sjöfarten stod för 38 % och vägtrafiken 40% [2].

### 2.1 Bullermiljön kring järnvägen

Miljökraven skärps på många håll i världen och Sverige ligger långt fram i miljöarbetet på många håll. Kraven på en behaglig ljudmiljö kommer därför också att bli mycket hårdare i framtiden. När det gäller buller från tågen jobbar Banverket efter en "Bullerpolicy" vilken redovisas i "Buller och Vibrationer från spårburen linjetrafik" [3]. Den är framtagen i samarbete med Naturvårdsverket och en proposition från regeringen säger att riktvärdena bör godtas. De värden och riktlinjer som Banverket fastställt ska vara uppfyllda år 2004 och om värdena uppfylls innebär det i princip en nolltolerans, ingen ska vara störd av spårburen trafik på de statliga spåranläggningarna.

De värden som är uppsatta för att uppnå denna "nollösning" är:

- Ekvivalent ljudnivå för ett vardagsmedeldygn utomhus i frifältsområde är 60 dB(A) och för ett speciellt avgränsat område är det 55 dB(A).
- Ekvivalent ljudnivå för ett vardagsmedeldygn inomhus är 30 dB(A), endast boningsrum ingår ej hall, WC, förråd osv.
- Maxnivå utomhus för speciellt avgränsat område är 70 dB(A).
- Maxnivå inomhus är under tiden 22.00 – 06.00 är 45 dB(A).

I skriften finns också värden för hur mycket det får bullra på andra ställen som t.ex. arbetsplatser och undervisningslokaler.

För att dessa värden ska uppnås måste den befintliga bebyggelsen omkring järnvägsspåren kartläggas noggrant och alla parametrar måste tas med. Bulleråtgärderna måste också vara kostnadseffektiva så att inte pengar satsas på fel ställen för det handlar om mycket pengar. Enbart för den befintliga miljön beräknas kostnaderna för bulleråtgärder bli 470 – 570 miljoner kronor [3].



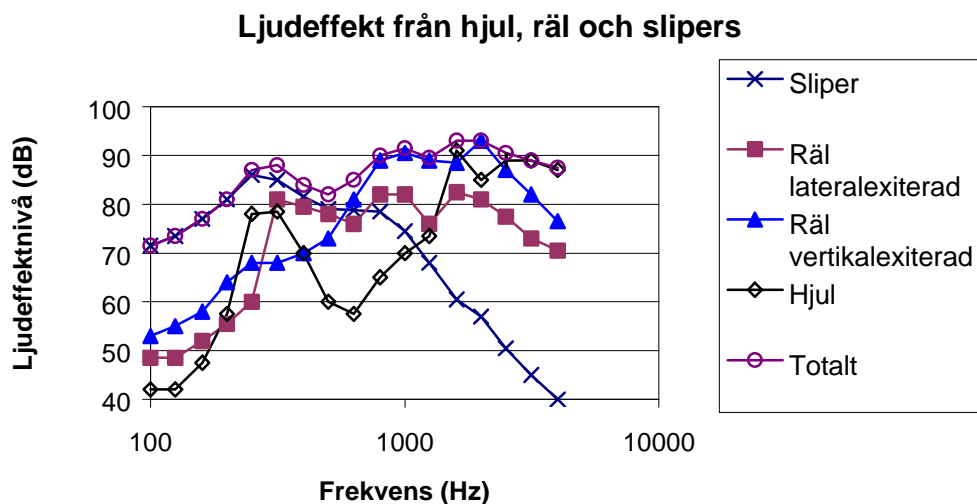
### 2.1.1 Vibrationer

Enligt en svensk undersökning [4] påverkas bullerstörningen av vibrationer. I de områden där vibrationer förekommer upplevs störningen från tågen högre jämfört med de områden som inte har några vibrationer. Skillnaden mellan ett område som har vibrationer jämfört med ett som inte har vibrationer är så kraftig som 10 dB(A). Detta innebär att området utan vibrationer kan ha en ljudnivå som är 10 dB(A) högre jämfört med området med vibrationer utan att det upplevs som mer störande.

Enligt Banverkets riktlinjer ska specificerade ljudnivåer endast följas om vibrationshastigheten är under 0,5 mm/s (frekvens-vägt max rms-värde, tidsvägning "slow") [3]. Vid högre vibrationsvärden kan bullerstörningen förstärkas vilket också styrks av den svenska undersökningen. I fastigheter med vibrationshastigheter över 1 mm/s bör vibrationsdämpande åtgärder göras innan bullerdämpande vidtas. År 2004 ska ingen uppleva kraftigare vibrationer än 2,5 mm/s i sovrummen nattetid. Precis som för bulleråtgärderna finns det siffror på den beräknade kostnaden för vibrationsåtgärderna, för att uppnå målet 2004 beräknas kostnaden bli 50 – 100 miljoner kronor.

### 2.1.2 Bulleralstrande mekanismer

En stor del av järnvägsbullret kommer från hjul, räl och slipers. Ljudeffekten för dessa källor är koncentrerad till frekvensområdet 100 – 5000 Hz, bidraget från ballasten är endast noterbart vid väldigt låga frekvenser [5]. Figur 2.1 visar hur ljudeffekten från olika delkällor varierar med frekvensen.



Figur 2.1 Ljudeffekt från hjul, räl och slipers. Källa: Vincent et al. [5].

### 2.1.3 Bullerstörning från tågen

Bullerstörning från tågtrafik beror bl a på ljudnivån, hur ofta och vid vilken tid på dygnet tågen passerar. Ett tåg mitt på dagen är t ex inte lika störande som ett tåg på natten.

Enligt en fransk undersökning [6] beror det dessutom på vad man gör när tåg passerar. Störst störning upplevs vid TV-tittande och radiolyssnande, då upplever 34% att de är störda av tågen, när man pratar i telefon är 30 % störda och slutligen vid konversation inomhus är 26% störda.

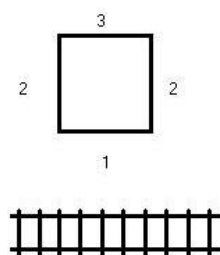
Den franska undersökningen kommer också fram till att störningsgraden ökar på sommaren. Detta relateras till att vistelsen ökar utomhus under sommaren och fönster öppnas, under veckoändarna ökar bullerstörningen ytterligare.

Under 80-talet visade undersökningar från Storbritannien, Tyskland och att godstrafik upplevs mer störande än persontrafik. Ett land som har stora problem med att godstrafiken upplevs mer störande är Holland. Från hamnen i Rotterdam ska varor transporteras vidare in i Europa. Bästa tiden att köra godstrafik på järnvägsnäten är nattetid, men på natten krävs lägre bullernivåer. Enligt en artikel från 1996 [7] påpekas att det inte tagits hänsyn till skillnader i bullernivåerna när godståg och persontåg jämförts. Författaren menar att om hänsyn tas till bullernivåerna kan det inte påvisas att det skulle vara mer störande med godståg jämfört med persontåg.

### 2.1.4 Åtgärder på enskilda fastigheter

Idag kan bullret från järnvägen minskas på flera sätt. Det vanligaste är att åtgärda enskilda fastigheter, en väldigt effektiv metod är täta befintliga fönster eller ersätta äldre fönster med nyare 3-glasfönster. Att både byta fönster och fönsterkarmar är naturligtvis mycket effektivare, men i många fall har det visat sig att isolering av rutor kan räcka.

Placeringen av huset kan också påverka graden av åtgärder. Figur 2.2 föreställer ett hus som står vid järnvägen, huset har fyra väggar och fönster på alla. Fönster som sitter på väggen som är märkt med 1 är känsligast mot bullret från järnvägen. De fönster som sitter på väggarna som är märkt 2 är



inte lika känsliga för bullret. Fönster på vägg 3 är nästan helt oberörda av bullret från tågen. Allt detta betyder att insatserna måste prioriteras på vägg 1 eftersom fönster på den väggen släpper in mest ljud. Åtgärderna på vägg 2 blir mycket mindre än på vägg 1 medan vägg 3 klarar sig utan åtgärder.

Figur 2.2 Hus vid järnväg.

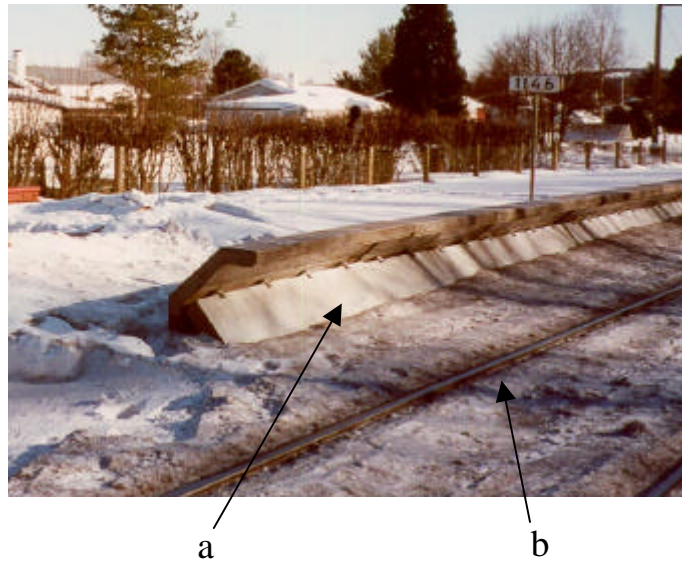
En annan detalj som påverkar åtgärderna är att det måste vara tystare i ett sovrum jämfört med andra rum i huset och därför kan det räcka att enbart åtgärda fönstren till dessa rum.

### 2.1.5 Åtgärder vid tågspåret

Förutom att isolera enskilda fastigheter kan bulleråtgärder göras vid spåret med hjälp av bullerskärmar. Att bygga bullerskärmar är mycket dyrare jämfört med att åtgärda enskilda fastigheter, naturligtvis blir det billigare att bygga skärmar om det finns väldigt många fastigheter.

En av de stora fördelarna med bullerskärm är att den också dämpar ljudnivån utomhus.

Det finns många olika typer av bullerskärmar för reduktion av järnvägsbuller. En relativt ny bullerskärm är "Sound Track" som Skanska AB tillverkar. Sound Track är en "liten" skärm som placeras nära spåret, se figur 2.3.



Figur 2.3 Bullerskärm "Sound Track" på Torpgården i Boden, a) Bullerskärm  
b) Järnvägsspår.

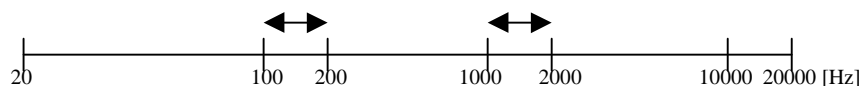
### 3 Mätmetoder

Buller kan definieras som ej önskat ljud dvs det är en subjektiv bedömning av ljud. Den akustiska signalen som hjärnan tolkar påverkas av förhållanden från örat till hjärnan, dessa förhållanden skiljer sig från person till person och innebär att signalen påverkas av fler faktorer än enbart det akustiska innehållet [8].

Buller kan alltså identifieras utan mätinstrument, men samtidigt är det bra om mätinstrument kan ge siffror på hur störande ett ljud är [9]. Det har länge varit vanligt att presentera buller i termer av A-vägda ljudtrycksnivå (dB(A)). För att beskriva bullerstörning hos folk har det länge varit känt att det inte är det bästa sättet. Till detta projekt har psykoakustiska (sensoriska) mätstorheter utvärderats för att se om de bättre kan beskriva hur människor upplever bullerstörningen från tåg.

#### 3.1 Traditionell mätteknik

Det traditionella sättet att mäta buller på är att använda mätinstrument med en mikrofon. Mätningarna presenteras sedan som A-vägda ljudtrycksnivå dB(A), dessa kan vara maxnivå eller medelvärdesbildad nivå över tiden. Genom att ljudtrycksnivån varierar i styrka vid olika frekvenser redovisas de även som frekvensspektrum, vanligtvis i oktav- eller tersband mellan 20 och 20000 Hz i en logaritmisk skala. En anledning till att frekvensskalan är logaritmiskt beror på att det beskriver hur människan uppfattar frekvensförändringar. Figur 3.1 visar det hörbara området efter en logaritmisk skala. Avståndet i figuren mellan 100 och 200 Hz är lika stort som avståndet mellan 1000 och 2000 Hz, på samma sätt uppfattar människan frekvensförändringarna. Om skalan hade varit linjär skulle avståndet mellan 1000 och 2000 Hz varit 10 gånger större än avståndet mellan 100 och 200 Hz och det hade inte beskrivit hur frekvensförändringar upplevs av människan.



Figur 3.1 Logaritmisk skala över de hörbara området.

##### 3.1.1 Ljudtrycksnivå

Örat är ett kan ses som ett väldigt känsligt instrument som kan uppfatta väldigt små ljudtryck och tåla väldigt kraftiga ljudtryck. Vid 1000 Hz är hörselgränsen c:a 20  $\mu$ Pa och smärtgränsen är omkring 20 Pa. Uttryckt som skillnad i intensitet vilket är proportionellt mot  $p^2$  motsvarar det  $10^{12}$  enheter, vilket innebär att en vanlig linjär skalindelning är olämplig. Därför används en logaritmiskt indelning med enheten decibel. Logaritmiska mätvärden stämmer dessutom bättre med hur vi uppfattar ljudnivåer [10].

*Momentan ljudtrycksnivå*

$$L_p = 10 \log \left( \frac{p}{p_0} \right)^2 \quad p_0 = 20 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \quad (3.1)$$

Ekvationen visar hur momentan ljudtrycksnivå ( $L_p$ ) beräknas och beskriver ett förhållande mellan effektivvärdet (rms) av det uppmätta ljudtrycket  $p$  och referensvärdet  $p_0$ .  $p_0$  är ISO standardiserad och är 20  $\mu\text{Pa}$  vilket motsvarar värdet på hörtröskelnivån vid 1000Hz. För att beskriva kontinuerligt buller fungerar den momentana ljudtrycksnivån bra. När nivån varierar mycket över tiden krävs dock andra metoder [9, 10].

*Ekvivalent ljudtrycksnivå*

På de flesta ställen varierar ljudtrycksnivån med tiden, den medelnivå (rms) som är under en viss tid kallas för den ekvivalenta ljudtrycksnivån. Den ekvivalenta ljudtrycksnivån ( $L_{eq}$ ) ges av

$$L_{eq} = 10 \log \left( \frac{1}{T} \int_0^T 10^{L_p(t)/10} dt \right) \quad (3.2)$$

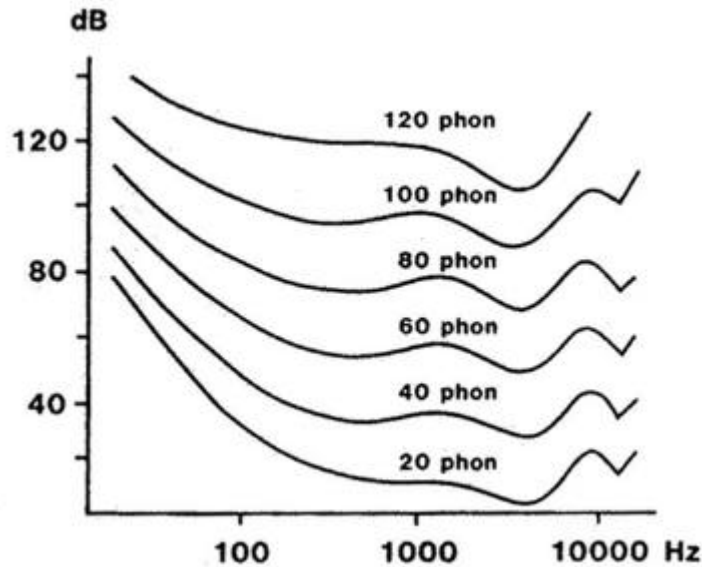
*Statistisk fördelning*

Statistisk fördelning på ljudtrycksnivån över tiden är ett ännu bättre alternativ för att beskriva tidsvariationen hos ljudsignalen. Den ekvivalenta ljudtrycksnivån användes för att få ett medeltal (rms-värde) på nivån. En statistisk fördelning beskriver hur ofta ljudtrycket går över en viss nivå. Ett exempel på detta är nivån som endast överskrider 5 % av den totala tiden och den kallas för 5-percentilens ljudtrycksnivå. 5-percentilens ljudtrycksnivå har visat sig vara bättre än rms-nivån för att beskriva bullerstörning. Andra vanligt förekommande fördelningar för utvärdering av samhällsbuller är 10-, 50- och 90-percentilerna [10].

**3.1.2 Frekvensvägning**

Människan uppfattning av ljudstyrka är frekvensberoende. Låt en testperson få lyssna på en ren ton vid bestämd frekvens och ljudtrycksnivå (volym). När testpersonen en kort stund senare får lyssna till en annan ton och själv får ställa in volymen så att den låter lika högt som första tonen kommer ljudtrycksnivån att var högre eller lägre, hörnivån för de två tonerna kommer dock att vara densamma för de två tonerna. Att hörseln är frekvensberoende har varit känt länge, 1933 började Fletcher och Munson genomföra experiment av denna typ [10].

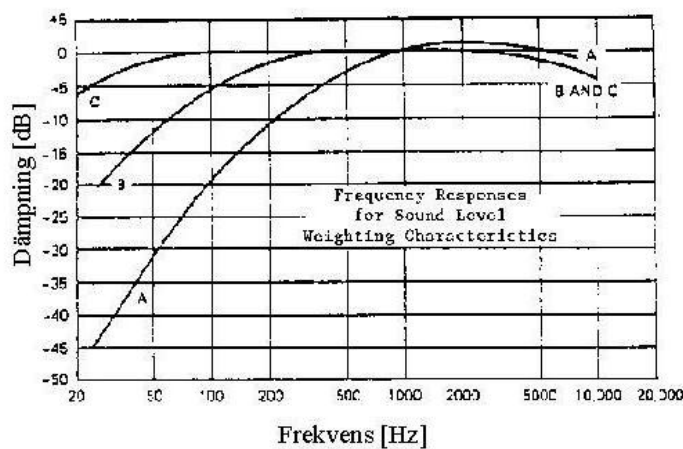
För att erhålla kurvorna i figur 3.2 får ett stort antal testpersoner göra liknande test som Robinson och Dadson står bakom vilket är en vidareutveckling av Fletcher och Munson[10]. Testpersonerna utgår från en ren ton av frekvensen 1000 Hz och en bestämd ljudtrycksnivå i c:a 1 s, efter ungefär 0,5 s får testpersonerna ställa in volymen på nästa rena ton så att de låter lika starkt, testet fortsätter sedan med fler toner så att en kurva kan fram.



Figur 3.2 Kurvor för lika hörnivå, enligt ISO 226.

Nästa steg är att upprepa proceduren ett antal gånger med annan ljudtrycksnivå på utgångstonen (1000 Hz), till slut fås alla kurvor som visas figur 3.2. Kurvornas enhet är phon och bestäms efter ljudtrycksnivån vid 1000 Hz. Hörtröskeln för människan är 0 dB vid 1000 Hz förutsatt normal hörsel, vid nedsatt hörsel förskjuts naturligtvis hörtröskeln uppåt, vid stigande ålder blir också hörseln sämre.

För att kompensera örats och hörselns egenskaper filtreras ljudet i mätinstrument. Linjärt (ofiltrerat) buller som är under 55 dB filtreras efter en filterkurva som fås från medelvärdet av de kurvor som är mellan 0 – 55 phon. Detta filter kallas för A-filtret och mätstorheten benämns A-vägd ljudtrycksnivå (dB(A)). A-filtret har också visat sig stämma väl överrens med mellanörats överföringsfunktion [11]. Den medelkurva som bildas av lika hörnivåkurvorna mellan 55 – 85 phon har legat som mall för B-filtret, här brantheten mot de lägre frekvenserna inte lika hög som i fallet för A-filtret. I det sista fallet med C-filtret har kurvorna ovan 85 phon använts, här reagerar örat nästan linjärt [10].



Figur 3.3 Vagningskurvor för A-, B- och C-filter.

De filter som skapas är inverterade jämfört med kurvorna för lika hörsstyrkenivå. De frekvenser som människan uppfattar högre måste sänkas och därmed vara inverterade. Figur 3.2 visar dämpningen på A-, B- och C-filter.

Idag används nästan bara A-filtret vid bullermätningar, A-filtrets främsta fördel är att det ger väldigt god korrelation med hörselskaderisken. Det har dock under årens lopp visat sig att A-filtret har för kraftig lågfrekvens dämpning för att beskriva lågfrekvent bullerstörning. C-filtret brukar användas i kompletterande mätningar för att ge en bättre bild av den lågfrekventa bullerstörningen, B-filtret brukar också användas till detta men är inte lika vanligt som C-filtret. Det finns även ett D-filter som är framtaget för flygbuller [9, 10].

### 3.1.3 Frekvensanalys

Frekvensen kan mätas, analyseras och presenteras i olika format eller snarare upplösningar, de vanligaste standardiserade sätten att mäta buller på är i oktavband, tredjedels oktavband (tersband) eller smalband (FFT). Smalare bandbredd innebär mer avancerad och dyrare mätutrustning.

- **Oktavbandsanalys**

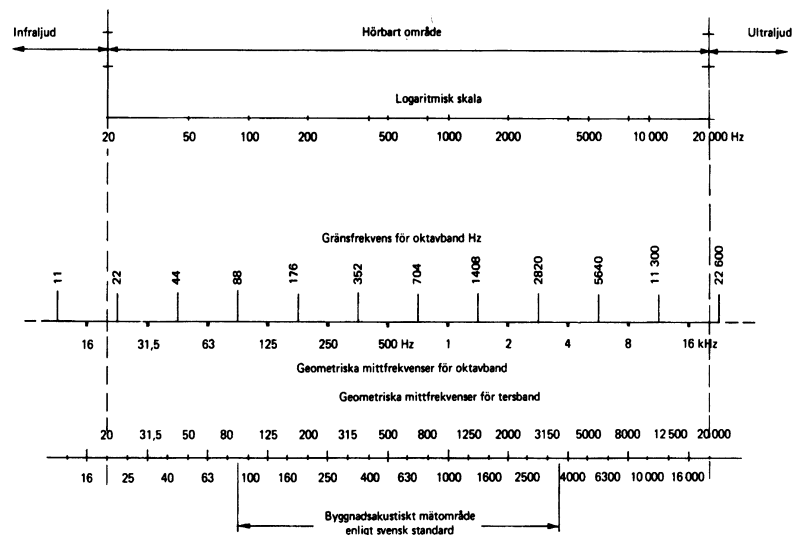
Den bredaste bandbredden används bl.a. för buller på arbetsplatser, bedöma risk för hörselskador och för att bestämma erforderlig dämpning på åtgärder.

- **Tersbandsanalys**

Tersband är tredjedels oktavband, denna bandbredd användas vid bl.a. byggnadsakustiska mätningar, enligt svensk standard.

- **FFT-analys**

För väldigt detaljerade analyser används smalbandsanalys, det kan gälla uppsökning av diskreta toner.



Figur 3.4 Mitterfrekvenser för oktav- och tersband.

Figur 3.4 visar mittfrekvenserna för oktav- och tersband, för oktavbanden finns även gränshfrekvenserna. Mittfrekvenserna för oktavbanden är fastlagda enligt internationell standard av ISO. Förhållandet mellan gränsh- och mittfrekvenser för oktav- och tersband är:

$$f_{\text{mitt}} = \sqrt{f_{\text{undre}} f_{\text{övre}}} = f_{\text{undre}} \sqrt{2} = \frac{f_{\text{övre}}}{\sqrt{2}} \quad (3.3)$$

$f_{\text{undre}}$  och  $f_{\text{övre}}$  är undre respektive övre gränshfrekvens.

Bandbredden för ett oktavband är,

$$f_{\text{övre}}/f_{\text{undre}} = 2 \quad (3.4)$$

för tersbanden (tredjedels oktavband) är bandbredden,

$$f_{\text{övre}}/f_{\text{undre}} = \sqrt[3]{2} \quad (3.5)$$

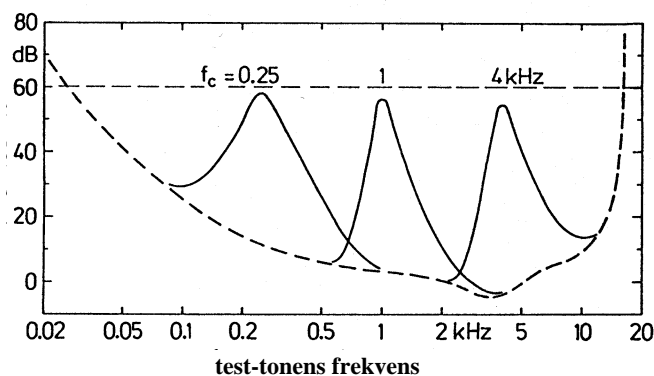
## 3.2 Psykoakustiska mätparametrar

För att ge en mer korrekt bild av hörandet måste mätparametrar som bygger på mer avancerade modeller av människans hörande. Psykoakustiska mätparametrar (sensoriska) tar hänsyn till maskeringseffekter och har en upplösning i tid, frekvens och nivå som motsvarar vårt hörande [9].

I avsnittet om traditionell mätteknik avhandlades enbart en mätparameter, ljudtrycksnivå, och den analyserades ganska noggrant. De psykoakustiska mätparametrarna kommer inte behandlas lika ingående bl.a. för att det inte finns någon standard för dessa, undantaget är hörstyrka. Det finns dock en arbetsgrupp som arbetar på uppdrag av ISO med standardiseringar [12].

### 3.2.1 Örats hörförmöga

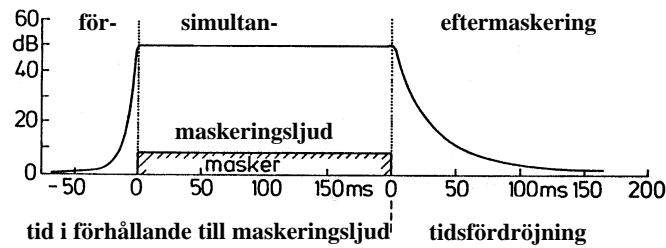
Innan de psykoakustiska mätparametrarna kan beskrivas måste det beskrivas mer ingående hur örat kan uppfatta olika ljud. *Maskering* är ett grundläggande fenomen, om två ljud når örat samtidigt maskeras det svagare. En effekt av detta är att den undre hörgränsen höjs. Figur 3.5 visar maskeringseffekten av testtoner med medelfrekvenserna 250, 1000 och 4000 Hz. Kurvorna visar att även om maskeringen från en testton är effektivast så höjs för frekvenser under och över testtonens frekvens [10, 13].



Figur 3.5 Maskeringseffekter i frekvensdomänen.

Maskering förekommer inte bara i frekvensdomänen utan också i tidsdomänen. Figur 3.6 visar maskeringseffekter i tidsdomänen. Maskeringsljudets varaktighet är 200 ms och maskerar ljud både före, under och efter det har ljudit.





Figur 3.6 Maskeringseffekter i tidsdomänen.

Örat kan också att uppfatta ljud med samma energiinnehåll olika starkt. Ett ljud som är smalbandigt kommer uppfattas svagare än ett ljud som är mer bredbandigt även om ljudtrycksnivån är densamma. Gränsen för denna bandbredd då bullret uppfattas starkare trots samma nivå kallas för *kritisk bandbredd*. Ett exempel på detta är att 1000 Hz tonen kommer att uppfattas svagare än ett ljud/buller som har en centerfrekvens på 1000 Hz och en bandbredd som överstiger 170 Hz [9, 10, 13].

Det hörbara området har delats in i 24 band med standardiserad bandbredd, centerfrekvens och gränsfrekvens. Att det är 24 är relaterat till ett linjärt samband mellan kritisk bandbredd och vibrationer i basilmembranet. Ett kritiskt band motsvarar 1,3 mm längs basilmembranet och definieras som 1 Bark som är den psykoakustiska frekvensskalan [9, 10, 13]. I tabell 3.1 finns de 24 kritiska banden, lägg märke till att bandbredden är konstant upp till 450 Hz.

Tabell 3.1 Kritiska band

Kritiskt band	(Bark)	1	2	3	4	5	6
Medelfrekvens	(Hz)	50	150	250	350	450	570
Bandbredd	(Hz)	100	100	100	100	110	120
Kritiskt band	(Bark)	7	8	9	10	11	12
Medelfrekvens	(Hz)	700	840	1 000	1 170	1 370	1 600
Bandbredd	(Hz)	140	150	160	190	210	240
Kritiskt band	(Bark)	13	14	15	16	17	18
Medelfrekvens	(Hz)	1 850	2 150	2 500	2 900	3 400	4 000
Bandbredd	(Hz)	280	320	380	450	550	700
Kritiskt band	(Bark)	19	20	21	22	23	24
Medelfrekvens	(Hz)	4 800	5 800	7 000	8 500	10 500	13 500
Bandbredd	(Hz)	900	1 100	1 300	1 800	2 500	3 500

### 3.2.2 Hörstyrka

Idag är det enbart hörstyrka som är standardiserad (ISO 532B 1965) av de psykoakustiska mätparametrarna, grunden för denna standardisering kom Zwicker med 1957. Enheten för specifik hörstyrka är sone/Bark och beskriver hörstyrkan inom ett kritiskt band, där 1 sone motsvaras av en 1 kHz ton vid 40 dB. Jämför med hörnivåkurvorna i avsnittet 3.1.2. Hörstyrka anges i sone och motsvarar arean under kurvan för specifik hörstyrka. En förenklad ekvation av specifik hörstyrka är:

$$N' = 0.08(10^{L_p/10})^{0.23} \left[ \left( 0.5 + 0.5 \frac{10^{L_p/10}}{10^{L_{TQ}/10}} \right)^{0.23} - 1 \right] \quad (3.6)$$

$L_p$  och  $L_{TQ}$  är ljudtrycksnivå och hörtröskelnivå inom varje kritiskt band.

Ekvationen gäller för varje enskilt kritiskt band och är förenklad p.g.a. att ekvationen som direkt beräknar specifik hörstyrka är relativt komplex. För att den förenklade modellen ska gälla får inte ljudtrycksnivån maskeras av ljudkomponenter i något närliggande kritiskt band. Om intensiteten är låg i ett kritiskt band bestäms den specifika hörstyrkan av maskeringseffekter i närliggande kritiska band.

### 3.2.3 Skarphet

Ljud som till stor del består av höga frekvenser brukar uppfattas som skarpa. Mätstorheten skarphet kan då sägas beskriva skillnaden mellan låg- och högfrekvent ljudkaraktär, enheten är acum och motsvaras av 60 dB vid 1000Hz. Den ekvation som finns här är utvecklad av Bismarck och det är den mest accepterade idag. Den beskriver tyngdpunktsläget för arean under specifika hörstyrkekurvan och ger extra tyngd för ljud över 3,15 kHz (16 Bark).

$$S = 0.11 \frac{\int_0^{24} z \cdot N'(z) \cdot g(z) dz}{\int_0^{24} N'(z) dz} \quad (3.7)$$

$z$  är positionen på kritiska bandskalan,  $N'(z)$  är specifik hörstyrka som funktion av kritiska band skalan och  $g(z)$  är en funktion som är 1 under 16 Bark och ökar exponentiellt upp till fyra vid 24 Bark.

### 3.2.4 Råhet

Råhet mäts i asper och beskriver skillnaden mellan rå och mjuk ljudkaraktär. En ljudsignal som är snabbt modulerande upplevs som rå eftersom råhet relaterar till modulationsfrekvenser mellan 30 och 300 Hz. 1 asper motsvaras av en ton vid 1000 Hz och 60 dB som är 100% amplitudmodulerad med 70 Hz.

### 3.2.5 Tonalitet

Tonalitet kan sägas beskriva en skillnad mellan ljud och buller. Ljud sägs innehålla tonkomponenter eller delar av buller som är smalare (mindre) än den kritiska bandbredden. Buller eller bredbandigt buller däremot sägs sakna enskilda tonkomponenter. Tonaliteten ökar vid närvaron av toner eller vid smalbandigt buller. För att beräkna tonaliteten normaliseras tonkomponenternas nivå utifrån det maskerade ljudets nivå, beräkningen sker i fyra steg.

Först studeras frekvenskomponenter i ett FFT-spektrum med en ungefärlig bandbredden på 4% av den kritiska bandbredden, de komponenter som är mer 7 dB högre än närliggande väljs ut. Bland de utvalda komponenterna räknas maskeringseffekterna ut och de som inte är maskerade är de relevanta komponenterna för örat ( $f_u$ ).

I det andra steget beräknas de utvalda komponenternas styrka ( $LX_u$ ) i förhållande till de övriga komponenternas bidrag inom den kritiska bandbredden.

I steg 3 ska varje enskild tonkomponent beräknas och vägas i relation till hörselns känslighet för toner, se ekv. 3.8. För varje tonkomponent blir det en "spectral Pitch Weight", tonkomponenterna som ligger vid 700 Hz har störst betydelse.

$$W_{Su} = (1 - e^{-L_{su}/15}) \frac{1}{1 + 0.07 \left( \frac{f_u}{700} - \frac{700}{f_u} \right)^2} \quad (3.8)$$

I det sista steget summeras och normaliseras bidraget från de vägda tonkomponenterna i förhållande till signalens icke tonala energi.

### 3.3 Binaural inspelningsteknik

Idag räcker det inte längre att bara beskriva buller efter dess ljudtrycksnivå, man vill också beskriva bullrets kvalité och karaktär. För att ge en bättre beskrivning av bullret används olika psykoakustiska mätparametrar. Även om ljudkvaliteten kan beskrivas med olika mätparametrar är den viktigaste parametern fortfarande vad människan tycker om bullret. Det viktigaste med binaural teknik är att bullret först spelas in och sedan återges så naturtroget som möjligt i en neutral miljö. Genom denna teknik kan flera olika ljud spelas upp för testpersoner som då kan rangordna de inspelade ljuden. Därefter kan testpersonernas bedömning jämföras med mätparametrarna för att se vilken mätparameter som bäst beskriver bullerstörning.

För att återskapa ljudet så verklighetstroget som möjligt används ett konsthuvud vid inspelningen. Även axlarna "färgar" ljudet och därför är konsthuvudet en avbild från axlar och uppåt, se figur 3.7. Mikrofonerna är placerade i öronen på huvudet. För att bibehålla det verklighetstroga ljudet spelas det in digitalt med hög upplösning, 24 bitars upplösning vid en samplingsfrekvens på 44,1 kHz.



Figur 3.7 Konsthuvud HMS III från HEAD Acoustics, mikrofon finns vid vardera öroningångsöppning.

## 4 Försöksdesign

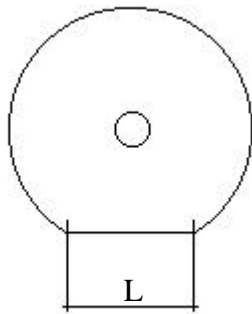
Försöksdesignen grundar sig dels på kravspecifikationen till projektet och dels på den statistiska modell som ska användas. I Test 1 undersöks hur olika faktorer påverkar bullerstörning från järnvägstrafik. I Test 2 studeras olika mätstorheter för att se vilken som bäst beskriver bullerstörning. De två testerna föregicks av en pilotstudie.

Test 1 och Test 2 genomfördes som två oberoende lyssningstest utförda av två olika grupper. Grupp 1 representerar personer med anknytning till järnvägstrafik och består av personal från Banverket. Grupp 2 representerar människor utan direkt anknytning till tågtrafik. I denna grupp finns dock några personer som är experter på buller och vana vid lyssningstest. Avsikten med gruppindelningen var att identifiera skillnader i bedömning mellan olika individer. De två lyssningsgrupperna beskrivs av en så kallad blockparameter.

### 4.1 Test 1

Test 1 är designat som ett faktorförsök i två nivåer, vilket innebär att alla faktorer varierar i två nivåer, t.ex. med bullerskärm och utan bullerskärm [14]. I bilaga 1 står det mer om faktordesign och hur försöken designades. Faktorerna avser olika aspekter som kan tänkas påverka bullerstörning från järnvägstrafik. Följande fem faktorer har studerats:

- **Bullerskärm**  
Denna faktor avser att beskriva effekten av ”sound track” bullerskärm. D.v.s. hur mycket minskar bullerstörningen när man installerar en bullerskärm.
- **Normal eller avvikande gång**  
Denna faktor avser att beskriva skillnader mellan ett ” normalt” tåg och ett tåg som bromsar eller har hjulplatta. Hjulplatta är ett hjul som inte är helt runt utan är ”platt” på ett parti av hjulet, figur 4.1 visar en överdriven hjulplatta. Vanligaste uppkomsten av hjulplatta sker när hjulet av någon anledning inte kan rulla fritt på rälen utan istället glider på den, värmeutveckling ger martensit vilket gör hjulet lokalt hårdare. I Sverige är det tillåtet att köra med max 40 mm hjulplatta.



Med denna faktor fås ett värde på hur bullerstörningen minskar för felfria tåg jämfört med tåg som har hjulplattor eller bromsskrik.

Figur 4.1 Hjul med hjulplatta, L) Längden på hjulplattan.

- **Tågtyp**  
Denna faktor avser att kontrollera skillnaden mellan malmtåg och Stålpil. Tåget som kör slabs (stålämnen) från SSAB i Luleå till SSAB i Borlänge kallas för Stålpilen eller Stålpendeln. Det föreligger ett speciellt intresse kring malmtågen eftersom MTAB (Malmtrafik i Kiruna AB) som ansvarar för malmtransporterna inom snar framtid kommer att byta ut vagnar och lok.
- **Med och utan last**  
Faktorn ”med eller utan last” finns för att se om lastade godståg bullrar mer än olastade. Det är inte säkert att ett tungt lastat godståg är tystare än det olastade. T. ex. har tomma malmvagnar en stor resonanslåda som kan ge upphov till irriterande buller. Stålpilen med öppna vagnar kan t. ex. ha lösa delar som skramlar när det är olastat.
- **Årstid**  
Inspelningarna till denna studie är gjorda i Luleå vilket innebär att det är stor skillnad på vinter- och sommarförhållandena. I det aktuella området är marken oftast täckt med snö från mitten av november till en bit in i april. Flera faktorer skiljer mellan vinter och sommar bl.a. är snö är bra absorberande. Inspelningarna på sommaren är gjorda under lövsprickningen vilket minskar trädens absorberande förmåga. Påverkan av denna faktor bör dock vara minimerad eftersom det inte finns några träd mellan spåret och mätpositionen.

I en komplett design med 5 faktorer i två nivåer krävs 32 ljud ( $2^5 = 32$ ). P.g.a. att vissa tåg inte finns, t.ex. olastad Stålpil med avvikande körsätt, reduceras försöksdesignen till 12 ljud.

## 4.2 Test 2

Tågen för andra testet är utvalda för att ge en mer representativ beskrivning av trafiksituationen som råder vid inspelningsplatserna, 32 ljud ingick i testet. I Test 2 har fler tågtyper inkluderats, förutom Stålpil och malmtåg finns även persontåg, täckta godsvagnar och enskilda lok. Hastigheten vid inspelningsplatserna varierar mellan 30 och 130 km/h. Test 2 innehåller även extrema tåg t. ex. ”tvärnitande” tåg som glider på rälen. I bilaga 1 finns de ingående faktorerna till de 32 ljuden.

Huvudsyftet med Test 2 är finna samband mellan bullerstörning och mätstorheter. Det är även möjligt att se vilket tåg som är mest störande och under vilka förutsättningar detta sker.

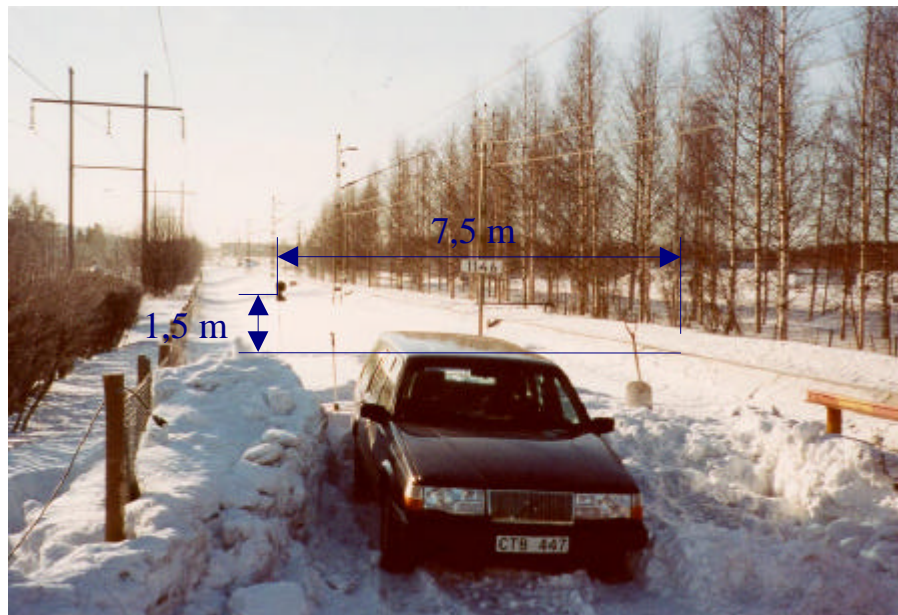
## 5 Mätprocedur

Mätproceduren består av två steg. I det första steget spelas tågen in i fält med binaural teknik, i det andra steget genomförs lyssningstest på testpersoner i neutral miljö.

### 5.1 Inspelning

Mätningarna (inspelningarna) utgår från standarder och praxis som finns och används. Riktlinjer för hur mätningar ska utföras finns beskrivet i "Buller från spårburen trafik- och förslag till mätmetod" [15]. Bl.a. anges hur många tåg det ska vara i mätserien, väderlek, mikrofonhöjd, mikrofontyp samt avstånd till tågen. För att data ska kunna utvärderas på ett jämförbart sätt är det viktigt att följa de riktlinjer som finns. Ett exempel på detta är att bullermätning inte får ske om det är snö på marken beroende på att snö fungerar som absorberant av bullret.

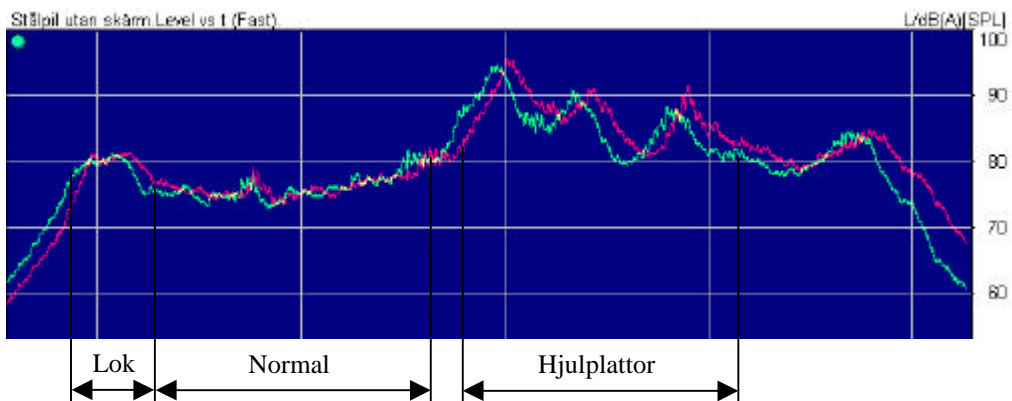
Mätningarna i denna studie följer inte angivna riktlinjer eftersom syftet är att undersöka hur olika faktorer påverkar ljudet. Alla inspelningar i denna studie är gjorda 7,5 m från spårmittpunkt och 1,5 m ovan räil. Figur 5.1 visar inspelningsplatsen i Boden på Torpgården under vinterförhållanden.



Figur 5.1 Mätuppställning i Boden.

## 5.2 Lyssningstest

Ljuden till lyssningstesten skapas genom att noggrant välja en sekvens från det inspelade ljudet och lägga det i en "loop". En "loop" innebär att ljudet spelas om igen vilket upplevs som ett sammanhängande ljud, längre än vad det i själva verket är. Figur 5.2 visar ett FFT-spektrum från inspelningen av ett Stålpilentåg. Figuren är ett exempel på hur två olika typer av ljud fås från en inspelning. Partiet som är märkt *normal* kan klippas ut till lyssningstestet och representera ett normalt ljud från Stålpilen. Den del av inspelningen som är märkt *hjulplattor* kan klippas ut och representera avvikande ljud i lyssningstestet. På samma sätt klipps bromsljud ut.



Figur 5.2 A-vägt FFT-spektrum från Stålpil, utmed x-axeln är tiden och efter y-axeln är ljudtrycksnivån (dB(A)). Kurvorna representerar vänster- och högerkanal.

Alla ljud spelas upp efter varandra och testpersonerna har till uppgift att bedöma ljuden efter hur störande de upplevs. Graden av bullerstörning anges på en skattningsskala (figur 5.3). Eftersom människor klarar av att särskilja 7 +/- 2 alternativ används en sjugradig skala. Det lyssnaren gör är att sätta ett kryss i den ruta som bäst stämmer med bullerstörningen från ljudet som avlyssnats. 1 betyder inte alls störande och 7 betyder extremt störande. 4 motsvarar mitten på skalan och står för ganska störande. Denna skala har använts i flera liknande studier och visat sig att fungera bra.

1	2	3	4	5	6	7
not at all annoying			moderately annoying			very much annoying

Figur 5.3 Skattningsskala som användes i lyssningstestet.

Vid lyssningstestet återgavs de inspelade ljuden med kalibrerade elektrostatiska hörlurar, som har låg distortion vid höga nivåer och låga frekvenser, vilket är nödvändigt för en verklighetstrogen ljudåtergivning. Lyssningstesten genomfördes i en störningsfri miljö, med bakgrundsbuller under 25 dB(A).

### 5.2.1 Pilotstudie

För att fastlägga lyssningstestproceduren genomfördes en pilotstudie. Testet omfattades enbart av vintertåg och testpersonerna bestod av personal från universitetet.

Testet som omfattades av 8 ljud spelades upp på ett annorlunda sätt jämfört med de övriga testen. Testpersonerna fick själva sköta uppspelningen av ljud. En fördel med att låta testpersonerna sköta uppspelet är att de obegränsat kan klicka sig fram och tillbaka mellan de olika ljuden och lyssna på de flera gånger. Skulle det finnas någon osäkerhet med något ljud är det bara att lyssna på det igen och göra jämförelser med de andra ljuden.

Ljudsekvenserna i testet var ganska långa 8 – 15 sekunder som testpersonerna fick lyssna till, de flesta sekvenserna var drygt 10 sekunder.

### 5.2.2 Test 1 och Test 2

Banverkspersonalens lyssningstest gjordes i ett videokonferansrum med låg bakgrundsnivå på Banverkets regionkontor i Luleå. Lyssningstest för universitetsgruppen gjordes i ekofritt rum på Luleå tekniska universitet vid avdelningen för Miljöteknik. I banverksgruppen ingick det 9 män och 9 kvinnor i universitetsgruppen ingick det 9 män och 11 kvinnor, ungefär hälften av universitetsgruppen var vana att göra denna typ av lyssningstest. Medelåldern för hela gruppen var 37,6 år ( $s = 11,1$  år) och var mellan 23 och 61 år. Medelåldern för Banverksgruppen var 42,3 år ( $s = 11,4$ ) och för Universitetsgruppen var den 33,6 år ( $s = 9,4$ ).

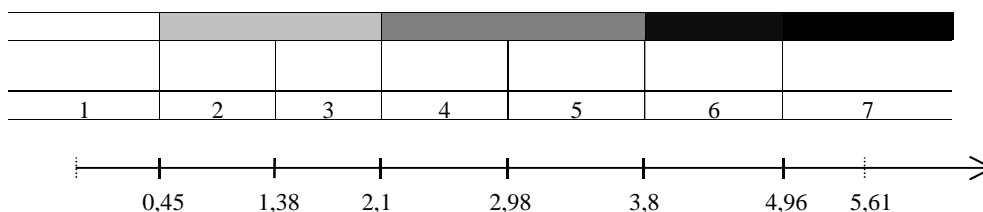
Innan lyssningstestet påbörjades gavs en skriftlig och muntlig instruktion, se bilaga 2. En skillnad mellan de två testgrupperna är att testpersonerna i banverksgruppen och försöksledaren satt i skilda rum utan ögon- eller öronkontakt med varandra. Vid lyssningstestet för universitetsgruppen övervakades testpersonen via videokamera och kunde kommunicera med försöksledaren via mikrofon.

Försöksledaren kontrollerade uppspelningen av ljuden. För att undvika allt för höga ljudnivåer sänktes nivån 6 dB för alla ljud. Varje ljud spelades upp i c:a 14 sekunder och mellan varje ljud spelades ett "pausljud" i c:a 10 – 15 sekunder. Pausljudet var bakgrundsljud från inspelningsplatserna, pausljudens ljudnivå var låg, 40 dB(A). Pausljudet hade två syften, dels visste testpersonen när tågljudet var slut och att det snart skulle komma ett nytt ljud, dessutom kunde testpersonen under pausen tänka efter och markera graden av bullerstörning i formuläret.



## 6 Resultat

Resultaten av lyssningstesten skalas enligt en procedur som benämns "Method of successive intervals" [16]. Det innebär att den sjugradiga skalans intervall (figur 5.3) justeras så att steglängden bättre stämmer överens med hur ljuden upplevs. Figur 6.1 visar hur skalan "tänjs" ut i kanterna och "trycks" ihop på mitten, steglängden kan relateras till standardavvikelseenheter (z-poäng).



Figur 6.1 Omräknad bullerstörningsskala för Test 1. Ändpunkterna på skalan motsvarar en approximativ skattning av mittpunkten i extremintervallen.

Fullständig data från lyssningstesten finns i bilaga 3.

### 6.1 Resultat Test 1

Hur olika faktorer påverkar bullerstörning är statistiskt beräknat enligt faktoranalys i två nivåer. Resultat och diagram kommer från Statgraphics. Test 1 omfattar 12 ljud men för att tydliggöra skillnader i resultaten delas analysen upp i två delar. Delanalyserna betecknas A respektive A och omfattar 8 ljud vardera. Figur 6.2 och 6.3 beskriver faktorernas inverkan på bullerstörningen för respektive delanalys. Beräkning av 95 % konfidensintervall är baserade på antagandet att högre ordningens interaktionseffekter är försumbara.

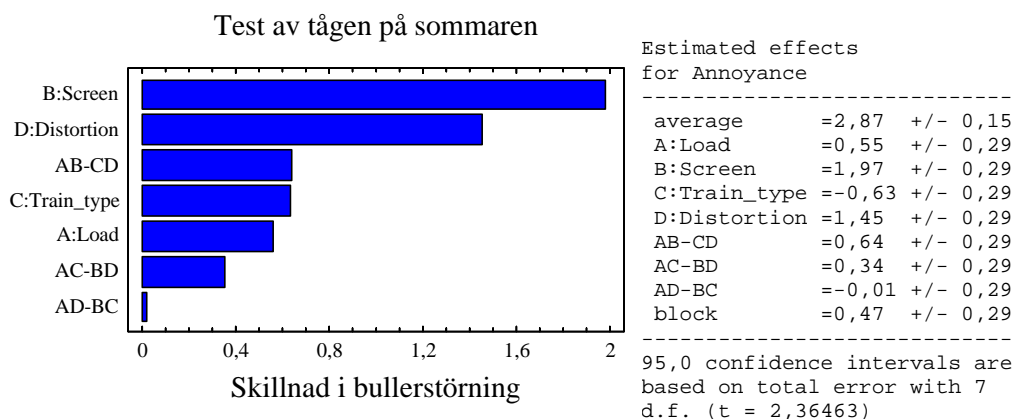
Den omräknade störningsresponsen för respektive testgrupp och delanalys visas i tabell 6.1 och 6.2, vilka även inkluderar designfaktorer och A-vägd ljudtrycksnivå (dB(A)). Vid lyssningstesten sänktes ljudnivån med 6 dB, tabellvärden relaterar dock till nivån i mätpositionen. Notera t.ex. skillnaden mellan lägsta och högsta ljudtrycksnivå för tågen. Det tystaste tåget är ljud 9 med ljudtrycksnivån 65 dB(A). Det bullrigaste tåget är ljud 8 med ljudnivån 99 dB(A). Skillnaden är 35 dB och dessa tåg är inspelade på samma ställe. Nivåskillnaderna blir extrema i lyssningstesten p.g.a. att det är korta sekvenser av hela tågpassager som använts, se avsnitt 5.2. Om en analys görs för hela passagera blir ekvivalenta ljudtrycksnivån för tågen 74 dB(A) respektive 92 dB(A), en skillnad 18 dB. Det måste dock poängteras att det tystare tåget har en bullerdämpande skärm och det bullrigaste är utan skärm.

För att underlätta förståelse av tabell 6.1 och 6.2 ges följande exempel. Ljud 1 och 2 har samma förutsättningar förutom körsätt och bullerskärm. Trots bullerskärm upplevs ljud 1 mer störande än ljud 2 som är utan skärm, orsaken är det avvikande körsättet. Motsatsen till ljud 1 och 2 är ljud 3 och 4, där har tåget med normalt körsätt bullerskärm, tåget med avvikande gång saknar skärm. I detta fall upplevs tåget utan skärm som mycket mer störande, vilket avspeglas i en ökad ljudtrycksnivå.

Första delanalysen (1A) berör endast sommartåg som i medeltal ger bullerstörningen 2,87, d.v.s. något över skalans mittpunkt. Skillnaden mellan lastade och olastade tåg visar att *bullerskärm* (*Screen*) och *normal/avvikande körsätt* (*Distortion*) är de två faktorer som ger störst påverkan på bullerstörningen. Skillnaden mellan befintlig *bullerskärm* (*Screen*) och avsaknad av *skärm* motsvarar 2 steg på bullerstörningsskalan, d.v.s. *bullerskärm* minskar bullerstörningen 2 steg, se figur 6.2. Ett tåg med någon form av *avvikelse* (*Distortion*) höjer bullerstörningen nästan 1,5 steg jämfört med ett tåg som inte har någon avvikelse. Övriga faktorer har ingen praktisk signifikant påverkan på bullerstörning.

Tabell 6.1 Beskrivning och resultat av ljuden till delanalys 1A, U=universitetsgruppen, B=banverksgruppen.

Ljud	A	B	C	D	Bullerstörning		L <sub>p</sub> (dB(A))
	Last	Bullerskärm	Tågtyp	Körsätt	U	B	
5	Olastad	Befintlig	Malmtåg	Avvikande	2.77	3.51	80.84
6	Lastad	Befintlig	Malmtåg	Normal	0.85	1.69	69.47
7	Olastad	Ingen	Malmtåg	Normal	2.69	3.35	82.63
8	Lastad	Ingen	Malmtåg	Avvikande	5.35	5.27	98.95
9	Olastad	Befintlig	Stålpilen	Normal	0.41	1.01	64.56
10	Lastad	Befintlig	Stålpilen	Avvikande	2.26	2.58	79.11
11	Olastad	Ingen	Stålpilen	Avvikande	3.17	3.84	85.82
12	Lastad	Ingen	Stålpilen	Normal	3.59	3.59	86.05



Figur 6.2 Analys 1A, beräknade skillnader i bullerstörning i förhållande till olika bakgrundsfaktorer enligt tabell 6.1.

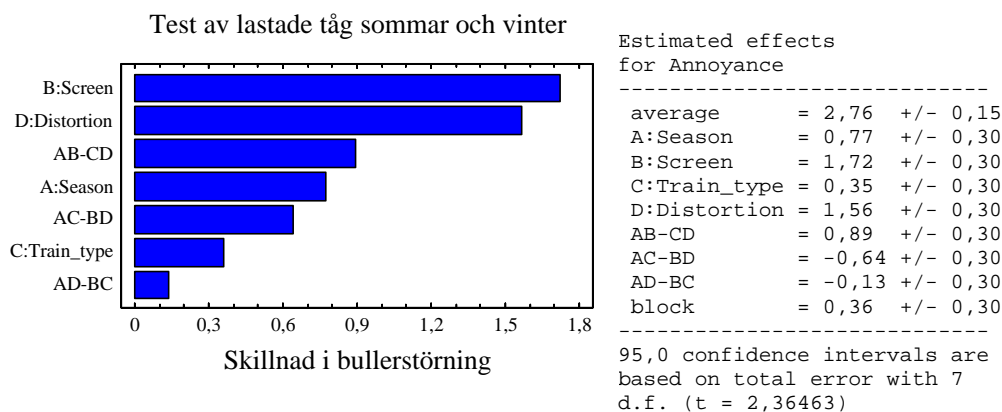
Andra delanalysen (1B) beskriver skillnaden mellan lastade tåg sommar- och vintertid och ger i medeltal 2,76 i bullerstörning, se figur 6.3. Precis som för sommartågen ger *Screen* och *Distortion* stor påverkan på bullerstörningen. Effekten av *bullerskärm* och *avvikande körsätt* minskar när vintertågen inkluderas. Figur 6.3 visar att *Screen* fortfarande är den faktor som påverkar bullerstörningen mest, d.v.s. *bullerskärm* minskar bullerstörning med 1,7 steg. Effekten av faktorn *Distortion* påverkar bullerstörningen i högre grad och ger en ökning av bullerstörning med 1,6 steg.

Eftersom interaktionseffekten *AB* – *CD* på 0,89 i Test 1B är signifikant kan ej huvudeffekterna *bullerskärm* (*A*) och *avvikande körsätt* (*D*) tolkas oberoende av övriga faktorer. Resultat från pilotstudien (med enbart vintertåg) tyder på att denna interaktionseffekt i huvudsak kan relateras till *AB* (*Årstid och Skärm*), eftersom skärmen har begränsad verkan vintertid. Hur faktorerna (*A*) och (*B*) påverkar bullerstörning visas i figur 6.4. Resultatet visar att bullerstörningen sjunker med skärm, men att effekten av skärm

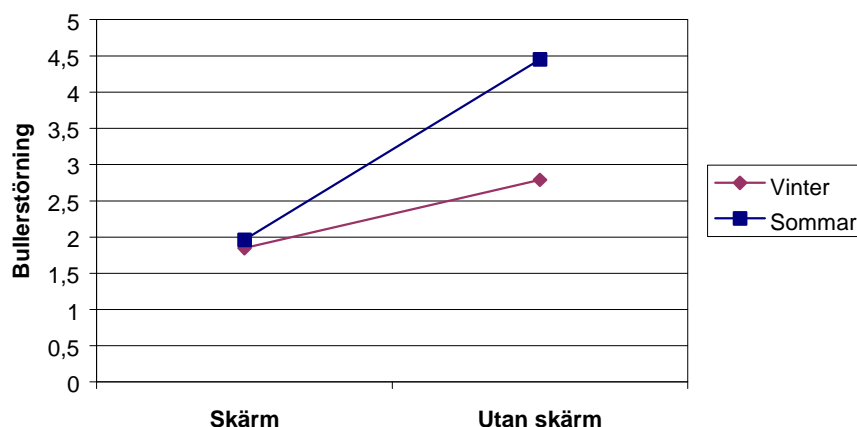
minskar vintertid. Effekten *CD* (*Tågtyp och Körsätt*) är sammanblandad p.g.a. reduktionen i försöksdesignen och kan utifrån tidigare erfarenheter anses vara av liten betydelse. Vilket innebär att effekten av *avvikande körsätt* (*Distortion*) är 1,6 steg.

Tabell 6.2 Beskrivning och resultat av ljuden till lyssningstest 1B, U=universitetsgruppen, B=banverksgruppen.

Ljud	A	B	C	D	Bullerstörning		L <sub>p</sub> (dB(A))
	Årstid	Bullerskärm	Tågtyp	Körsätt	U	B	
1	Vinter	Befintlig	Malmtåg	Avvikande	2.05	2.58	73.28
2	Vinter	Ingen	Malmtåg	Normal	1.24	1.65	70.91
3	Vinter	Befintlig	Stålpilen	Normal	1.20	2.02	72.26
4	Vinter	Ingen	Stålpilen	Avvikande	4.10	4.17	89.45
6	Sommar	Befintlig	Malmtåg	Normal	0.85	1.69	69.47
8	Sommar	Ingen	Malmtåg	Avvikande	5.35	5.27	98.95
10	Sommar	Befintlig	Stålpilen	Avvikande	2.26	2.58	79.11
12	Sommar	Ingen	Stålpilen	Normal	3.59	3.59	86.05



Figur 6.3 Analys 1B, beräknade skillnader i bullerstörning i förhållande till olika bakgrundsfaktorer enligt tabell 6.2.



Figur 6.4 Skillnader i bullerstörning mellan tåg vinter- och sommartid med och utan skärm.

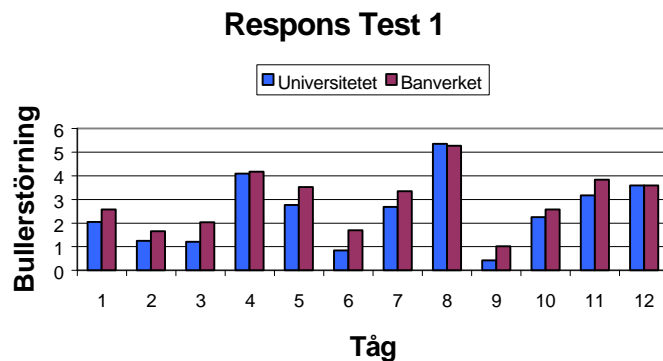
Att bullerskärmen inte påverkar bullerstörningen så mycket vintertid beror på att räl, slipers och marken närmast spåret "bäddas" in i snö och is, eftersom ljudutstrålning från räl och slipers delvis förhindras. Detta stöds av studier som visar att under 500 Hz kommer större delen av ljudeffekten från slipers och att själva rälen är en viktig ljudutstrålare inom frekvensområdet

800 – 2000 Hz, se avsnitt 2.1.2. Dessutom är området mellan mätpositionen och tåget täckt av snö vilket ytterligare bidrar till bullerdämpning vid höga frekvenser. Figur 6.5 och 2.3 (avsnitt 2.1.5) visar hur snö och is bäddar in rälen.



Figur 6.5 Figuren visar hur räl och slipers täcks av snö och is vintertid.

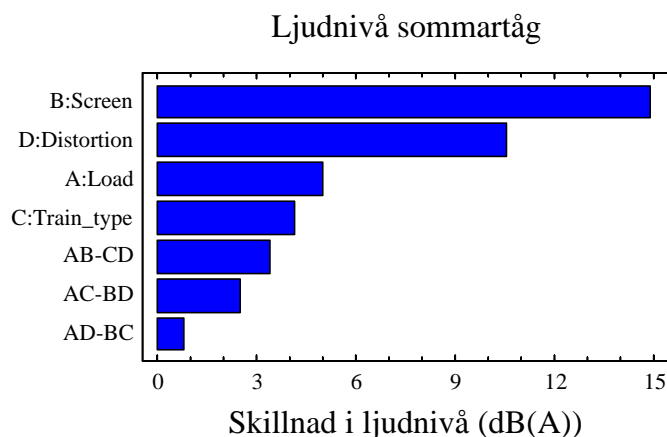
Båda resultaten visar att Banverksgruppen är något mer störd än universitetsgruppen. Enda undantaget är tåg 8, som för övrigt är det tåg som upplevdes som mest störande. Skillnaden mellan grupperna beskrivs av blockparametern och motsvarar ungefär ett halvt skalsteg. Att grupperna skiljer sig åt kan bero på flera saker, men en bidragande orsak är att Banverksgruppen vet vad det är som bullrar och att det ger en förstärkt bullerstörning. Exempel på detta är hjulplattor, förutom att ”plattor” bullrar kan de också orsaka materiella skador. Detta känner banverksgruppen till och bullerstörningen förstärks. Den andra testgruppen är ej medveten om att hjulplattor kan orsaka materiella skador och därmed uteblir störningsförstärkningen. Skillnaden i bullerstörning mellan testgrupperna för varje tåg visas i figur 6.6. Tydligast är skillnaden mellan tåg 3, 5, 6 och 11.



Figur 6.6 Bullerstörningsrespons för vardera tåg och testgrupp i Test 1.

## 6.2 Ljudtrycksnivåer Test 1

A-vägd ljudtrycksnivå används som riktvärden för lagstiftning. Därför är det mest intressant att se hur A-vägd ljudtrycksnivå påverkas av designfaktorerna.



Figur 6.7 Analys 1A, beräknade skillnader i A-vägd ljudtrycksnivå i förhållande till olika bakgrundsfaktorer enligt tabell 6.1.

Analys 1A visar att bullerskärmen i medeltal ger 15 dB(A) lägre ljudtrycksnivå, se figur 6.7. Tågen med någon avvikelse höjer i medeltal ljudtrycksnivån med 10 dB(A).

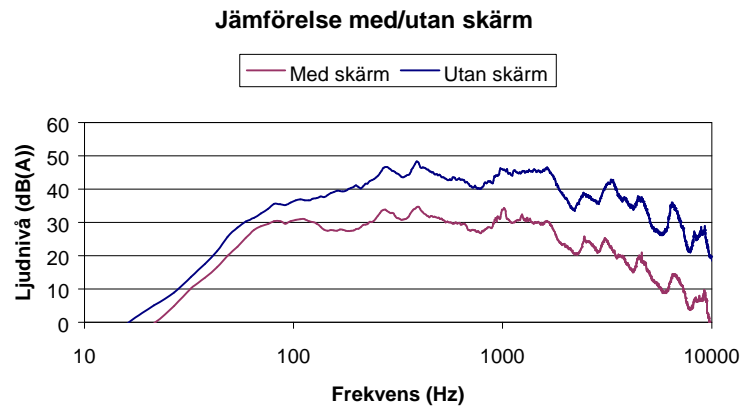
Analys 1B som inkluderar tåg från både vinter- och sommartid visar att bullerskärmens betydelse minskar på vintern. Figur 6.8 visar att skillnaden mellan tåg vinter- och sommartid är 7 dB(A) i medeltal. Effekten av ett avvikande körsätt är i stort samma som för sommartågen, d.v.s. en avvikelse ger en ökning med 10 dB(A).



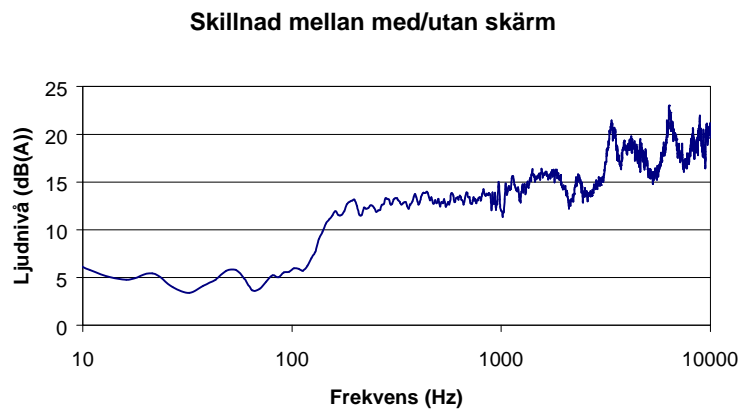
Figur 6.8 Analys 1B, beräknade skillnader i A-vägd ljudtrycksnivå i förhållande till olika bakgrundsfaktorer enligt tabell 6.2.

### 6.3 Detaljerad analys av bullerskärmens inverkan

Både lyssningstest och mätdata visade att bullerskärmen är effektiv. Figur 6.9 visar A-vägda frekvensspektrum för tåg sommartid med och utan bullerskärm. Kurvorna representerar ett logaritmiskt medelvärde av 4 tåg vardera. Figur 6.10 visar skillnaden i ljudtrycksnivå mellan med och utan skärm. Från figureerna framgår det att under 100 Hz är ljudnivån omkring 5 dB högre om skärm saknas, mellan 100 och 200 Hz stiger skillnaden till c:a 12 dB som därefter är konstant till 1000 Hz. Över 1000 Hz är skillnaden 15 – 20 dB.



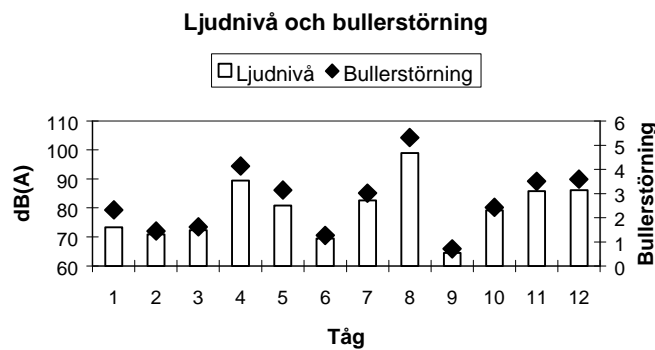
Figur 6.9 A-vägt FFT-spektrum från tåg med och utan bullerskärm.



Figur 6.10 FFT-spektrum som beskriver skillnad i ljudtrycksnivå för tåg med och utan bullerskärm.

## 6.4 Bullerstörning jämfört med mätstorheter

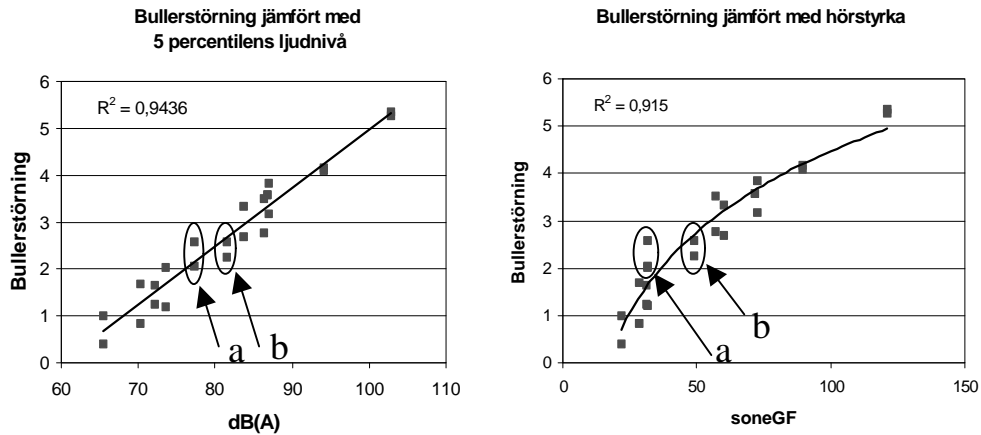
Finns det något samband mellan testpersonernas tyckande och mätstorheter? Figur 6.11 visar sambandet mellan bullerstörning och A-vägd ljudtrycksnivå. Det framgår att höjd ljudnivå ger upphov till ökad bullerstörning. Sambandet mellan ljudnivå och bullerstörning är dock ej entydigt. För att förklara avvikelserna studeras även andra mätstorheter, se bilaga 4. Mätstorheterna representeras genomgående av medelvärdet mellan vänster- och högerkanal eftersom det oftast gav bäst resultat. Andra varianter hade varit att visa den kanal som är högst eller plotta både vänster- och högerkanal.



Figur 6.11 Jämförelse av A-vägd ljudtrycksnivå och bullerstörning för Test 1.

En annan typ av digram är när x-axeln beskriver mätstorheterna och y-axeln anger bullerstörningen. Y-axeln representerar medelvärdet av bullerstörningsresponsen för de två testgrupperna. Om en mätstorhet som stämmer bra överens med vad testpersonerna tyckte kommer punkterna i diagrammet att visa upp ett regelbundet mönster, detta mönster kan t.ex. följa en rak linje eller en logaritmisk linje. En mätstorhet som däremot inte stämmer överens med vad testpersonerna tyckte kommer visa upp ett oregelbundet mönster. För att förtydliga dessa mönster finns en trendlinje inlagd i diagrammen med tillhörande  $R^2$ -värde. Ett högt värde på  $R^2$  desto bättre stämmer linjen med punkterna i diagrammet, d.v.s. mätstorheten stämmer bra överens med testpersonernas bullerrespons.

För att bäst beskriva skillnaden mellan två olika mätstorheter visas dels den mätparameter som stämde bäst med vad testpersonerna tyckte (5 percentilens ljudnivå, dB(A)), samt den sensoriska mätparameter som stämde bäst med bullerstörningen (hörstyrka, sone GF).



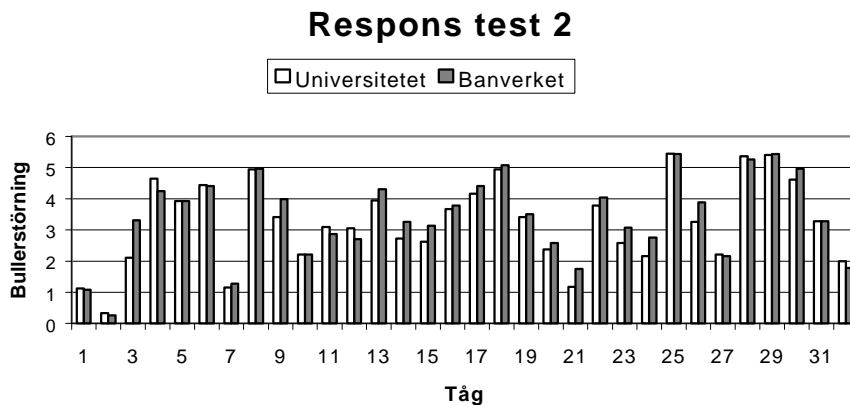
Figur 6.12 Bullerstörning i förhållande till 5 percentilens A-vägda ljudtrycksnivå och hörstyrka, a) tåg 1 b) tåg 10.

Figur 6.12 visar att 5 percentilens ljudtrycksnivå ger bra beskrivning av bullerstörning där 94 % av variationen förklaras ( $r = 0,97$ ). Av de sensoriska mätstorheterna stämmer hörstyrka bäst ( $r = 0,96$ ). Dessa modeller kan ej ge en fullständig förklaring på variationerna i bullerstörning. Exempel på detta är ljuden från tåg 1 och 10 som är markerade a och b i figur 6.11. Bullerstörningen för ljud 1 och 10 är ungefär densamma (2,31 resp 2,42) men 5 percentilens ljudtrycksnivå är 77,32 dB(A) för tåg 1 och 81,45 dB(A) för ljud 10. Trots att ljud 1 är 4 dB lägre än ljud 10 så upplevs tågen lika störande, således måste det vara andra egenskaper hos ljudet som ligger till grund för skillnaden i bullerstörning. Det visar sig att skillnaden i skarphet och tonalitet kan förklara den ökade bullerstörningen. Vid jämförelse av alla mätstorheter för ljud 1 och 10 ligger värden för skarphet och tonalitet mycket högre på ljud 1 jämfört med ljud 10, se bilaga 3 och 4.



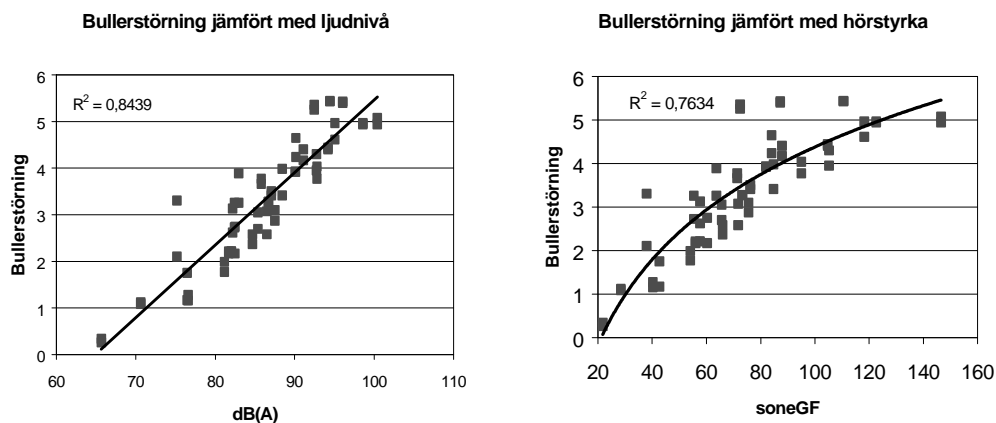
## 6.5 Resultat Test 2

Test 2 innehöll 32 ljud som avser att ge en mer variationsrik beskrivning av tågbuller. Figur 6.13 visar testgruppernas bullerstörningsrespons. Jämfört med Test 1 har skillnaden mellan testgrupperna minskat.



Figur 6.13 Bullerstörningsrespons för vardera tåg och testgrupp i Test 2.

När de enskilda mätstorheterna jämförs stämmer A-vägd ljudtrycksnivå bäst med bullerstörning, 84 % av variationen förklaras ( $r = 0,92$ ), se figur 6.14. Som jämförande storhet visas hörstyrka ( $r = 0,87$ ). Dessa modeller ger en relativt god representation av förväntad bullerstörning. Eftersom bullerstörningen representeras av gruppmedelvärden bör spridningen kunna minskas genom kombination mellan olika mätstorheter. I bilaga 4 visas sambanden mellan bullerstörning och övriga mätstorheter.

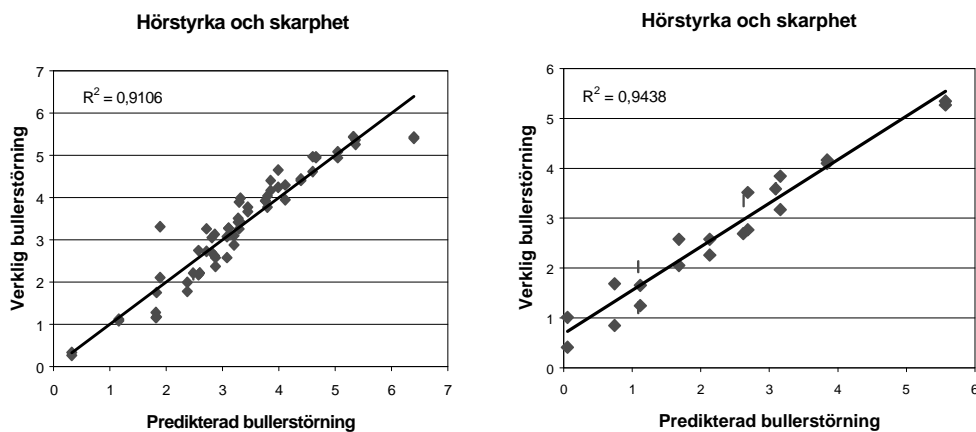


Figur 6.14 Bullerstörning jämfört med A-vägd ljudtrycksnivå (vänstra diagrammet) och hörstyrka (högra diagrammet) i Test 2.

Genom multivariat regression [14] studerades sambanden mellan bullerstörning och olika kombinationer av mätstorheter. Analysen resulterade i en robust och relativt enkel regressionsmodell baserad på hörstyrka och skarpheit, se ekvation 6.1. Det vänstra diagrammet i figur 6.15 visar hur väl modellen beskriver bullerstörning för Test 2 ( $r = 0,95$ ), vilket är betydligt bättre än modellen som baseras på A-vägd ljudtrycksnivå.

$$B = -8,4409 + 5,4224 \lg(N) + 1,0676 S \quad (6.1)$$

För att validera modellen (ekv. 6.1) används den för att prediktera bullerstörningen i Test 1. Denna modell eller störningsindex, förklarar 94 % av variansen i Test 1, se figur 6.15.



Figur 6.15 Det vänstra diagrammet visar modellen baserad på hörstyrka och skarpheit i Test 2. Det högra diagrammet är en validering av modellen med data från Test 1.

För att tydliggöra skillnader i bullerstörning beskrivs skillnaden som en förändring av hörstyrkan. Bullerskärm sommartid minskar bullerstörningen med 1,97 skalsteg, hur mycket motsvarar det i hörstyrka?

Skillnaden i hörstyrka beskrivs enligt ekvation 6.2 och 6.3.

$$B_2 - B_1 = 5,4224 \lg(N_2) + 1,076 S_2 - (5,4224 \lg(N_1) + 1,076 S_1) \quad (6.2)$$

Om skarpheit antas vara konstant och skillnaden i bullerstörning är

$$B_2 - B_1 = 1,97 \text{ fås, } 1,97 = 5,4224 \lg\left(\frac{N_2}{N_1}\right). \quad (6.3)$$

En omskrivning av ekv. 6.3 ger att  $N_1 = 0,43 N_2$ . D.v.s. en sänkning i med 1,97 skalsteg på motsvarar en minskning av hörstyrkan med 57 %.

På samma sätt beskrivs effekten av avvikande körsätt. Där ökade bullerstörningen 1,45 skalsteg för tåg med avvikande körsätt sommartid.  $B_2 - B_1 = 1,45$  insatt i ekv. 6.3, ger  $N_2 = 1,85 N_1$ , vilket motsvarar en 85 % ökning av hörstyrkan.

## 7 Nya lösningar för sänkt bullernivå

Att det finns behov för nya lösningar för att komma till rätta med bullerproblemen kring järnvägstrafiken har mätningarna och lyssningstesten visat. Mätningarna från Test 1 visar en skillnad på 18 dB(A) mellan det bullrigaste och det tystaste tåget. Test 2 med exempel på tåg som bromsade till stillastående och persontåg blir skillnaden mellan det bullrigaste och tystaste tåget ännu större. Enskilda tåg visar också upp stora skillnader inom tågsetet. För tåg 4 i tabell 6.1 är skillnaden 20 dB(A) mellan lägsta och högsta nivå.

Eftersom variationen är så stor för samma tåg eller för liknande tåg vid samma hastighet är det nödvändigt att närmare studera tågen och tekniken omkring för att minska bullret.

### 7.1 Systematiserad konstruktion

Metoden som använts i detta projekt är framtagen av Pahl och Beitz [1]. Den går ut på att dela upp konstruktionsarbetet i obligatoriska moment. Fördelarna med att jobba efter en given mall på är att det går snabbt, detaljer glöms inte bort och det strukturerar jobbet för konstruktören.

#### 7.1.1 Problemklarläggning

I första steget definieras: vad det egentliga problemet är; icke uttalade önskemål; lagkrav eller riktvärden.

Banverket jobbar efter en policy som säger att tågbuller inte får överstiga mer än 60 dB(A) i ekvivalent ljudnivå för ett vardagsmedeldygn utomhus i frifältsområde, maxnivå utomhus i ett avgränsat område är 70 dB(A). Inomhus är siffrorna 30 dB(A) i ekvivalent nivå och maxnivån inomhus är 45 dB(A) mellan klockan 22.00 – 06.00 [3]. Dagens metoder för att minska bullernivåerna med bullerskärmar och tillägsisolering av fastigheter måste kompletteras med ytterligare åtgärder. I avsnitt 2.1 står det mer om Banverkets policy.

För att sänka bullernivån vid järnvägen är det nödvändigt att ta reda på vad det är som stör. För att lösa problemet här är tåg inspelade med binaural teknik och därefter utvärderade med lyssningstest. De tåg som utvärderas i lyssningstesten är också noggrant specificerade. När analysen av lyssningstesten är klar står det klart vilka tåg och under vilka förutsättningar det uppstår störst bullerstörning.

#### 7.1.2 Specifikation

Den specifikation som lämnades till detta projekt var ganska kort och lätt att följa.

- Finns det alternativ till dB(A) som mått på bullerstörning.
- Ta reda på om nuvarande bullerskärmar hjälper att få ned bullerstörningen.
- Specificera nya metoder för att ytterligare reducera bullernivån.

### 7.1.3 Abstraktion

Under detta moment ska huvudproblemen identifieras.

Lyssningstesten gav svar på vilka tåg som bullrade mest. Analysen visade att det var tåg som hade någon form av avvikelser. De två tågtyper som studerats mest noggrant hade olika former av avvikelser. Att Stålpilen orsakar bullerstörning består till största delen på hjulplattor medan malmtågen orsakar bullerstörning p.g.a. bromsning. Ett bromsande malmtåg låter dessutom mycket värre än ett bromsande persontåg. Vid en inbromsning med dagens malmvagnar uppstår även koppelskrammel vilket upplevs som väldigt irriterande. Hjulplattor fanns även på malmtågen men inte lika tydligt som på Stålpilen.

För alla tåg som studerats gäller generellt att bromsning av tåg ökar bullerstörningen. Hjulplattor finns också på en del tåg, men precis som i fallet med malmtåg så dominerar inte plattorna på samma sätt som på Stålpilen.

För fortsatt lösning uppdelas problemställningen enligt följande:

- **Hjulplattor**  
Drabbar de flesta tågen, men på Stålpilen ökar det bullerstörningen väldigt mycket.
- **Broms**  
Så fort tågen bromsar ökar bullerstörningen markant, malmtågen är den tågtyp som är värst drabbad här.
- **Övriga bullerdämpande åtgärder**  
Det finns förutom hjulplattor och broms andra problem att lösa. För att ytterligare reducera buller från järnvägen måste nya lösningar fås fram.

### 7.1.4 Idématrix

I första hand kommer idéer fram under arbetets gång, idéerna kan komma spontant, men kan också vara problem som funnits under hela projektet som får sin lösning under arbetets gång. Många problem blev t.ex. uppenbara redan under inspelningarna.

I andra hand genomförs "brainstorming" för att finna nya lösningar. Under projektets gång har brainstorming genomförts en gång. Deltagarna var akustiker vilket innebär att de hade goda kunskaper om olika sätt att minska bullerstörningen. Brainstormingen var givande med många användbara lösningsförslag. En del lösningar behöver mogna, tekniken saknas för en del och för andra lösningar måste sociala förändringar i samhället accepteras.

För att lösa identifierade huvudproblemen delas dessa upp i subfunktioner:

- **Räl/slipers/ballast**
- **Hjul**
- **Tågagnar**
- **Extern tillbyggnad**
- **Bostadsåtgärder**
- **Övervakningssystem**
- **Samhälle/miljö**

Alla lösningar placeras i idématriken under respektive subfunktion. Genom att kombinera ihop lösningar från samma eller olika subfunktioner kan många nya lösningar hittas. Tabell 7.1 visar alla lösningsförslag för att minska bullerstörningen från järnvägstrafik.

Tabell 7.1 Designmatrik, S = Subfunktion, L = Lösning

S L	Räl/ slipers/ ballast	Hjul	Tågva- gnar	Extern tillbyg- nad	Bostads åtgär- der	Över vaknings system	Sam hälle/ miljö
1	Absorberande mtrl överballast	Duroc-hjul	Vingar på tåg som skapar lyf kraft	Snötippor vid spår	Automatiska fönsterluckor	Mikrofon övervakning av tågen	Genmanipulerade växter som blommor året runt
2	Gummi dämpad slipers	Optimera hjul diameter	Aktiv ljud dämpning	Höstackor vid spår	Fyrglas fönster, luftspalt	Förbättra dagens signal system	Ändra bansträckning /sambhälls planering
3	Absorberande slipers	Skärmar utanför hjulen	Perforerad plåt som absorberant	Tunnlar	Ljud dämpande gardiner	Differen tierade hastigheter	Aut. höjning av volym på stereo
4	Smörjning av räl från tåg		Surra last ordentligt		Sänkt hyra, skatt, lån		Placering av boende
5			Värmda ström avtagare		Flytta luft intag på hus		Gratis stereo till boende vid spår
6			Bättre koppellås				Köpa ut husägarna

### 7.1.5 Gallring

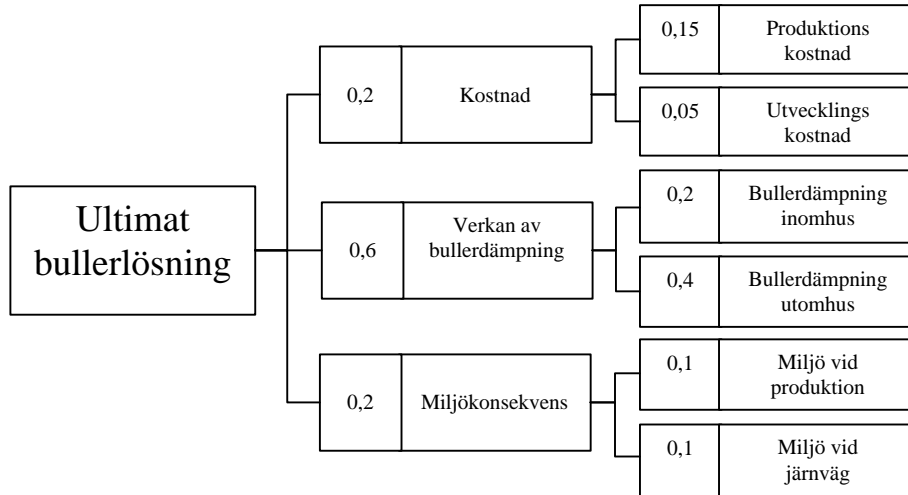
När idématriken analyseras ser man att den består av en mängd lösningar som för tillfället är omöjliga att genomföra. Lösningar som blir för dyra, omöjliga att producera, farliga att använda eller inte uppfyller lokala och/eller globala lagar måste strykas. En del lösningar som kombinerats fram kanske inte ens håller för den kravspecifikation som finns, det kan gälla pris eller något annat som glömts bort under den kreativa process som skett.

Bland de lösningar som klarat gallringen är :

- Hitta hjul som klarar Stålpilens påfrestningar.
- Effektivare mikrofonövervakning av tåg.
- Sänkt hastighet för vissa tåg.
- Bättre räl på utsatta sträckor.

### 7.1.6 Önskemålsträd

Den ”ultimata” lösningen på problemet kan uppdelas i olika nivåer som sedan bildar ett önskemålsträd. Figur 7.1 visar ett exempel på ett önskemålsträd som kan användas till lösningarna i detta projekt.



Figur 7.1 Önskemålsträd till bullerlösning.

Siffrorna som finns till varje önskemål i ”subnivåerna” är viktningen av önskemålets betydelse. Förgreningen kan även fortsätta efter andra subnivån. Exempelvis kan *inomhus* delas upp i olika bostadsytor som finns i hemmen. Alla viktpoäng i sublösningarna måste bli 1 i slutet,  $0,2 + 0,6 + 0,2 = 1$ .

Varför är det nödvändigt med viktningen?

Det är viktigt att alla önskemål på lösningen går igenom noggrant och klassificeras med en siffra på hur viktiga de är för den slutliga lösningen. I exemplet har *verkan av bullerdämpning* fått 0,6 i vikt, medan *kostnad* har 0,2 i vikt. Naturligtvis är det bra om kostnaden är låg, men det är inte alls lika viktigt som en bulleråtgärd med bra verkan, samma sak gäller *miljökonsekvens*. Det gäller att noggrant väga för och emot när viktpoängen ges.

### 7.1.7 Betygsättning och meritall

Alla önskemål från den lägsta subnivån ska jämföras och betygsättas mot varandra. I tabell 7.2 är alla önskemålen insatta i en betygsmatrix. Önskemålen jämförs en mot en, önskemålet som anses bäst får 2 ”poäng”, önskemålet som inte anses bäst får 0 ”poäng”, om båda önskemålen anses likvärdiga får båda 1 poäng. Poängen sätts efter raden i matrisen, ett exempel på hur poäng förs in i matrisen är för produktionskostnaden. Det är bättre att ha låg produktionskostnad än utvecklingskostnad, vilket ger 2 poäng på raden för produktionskostnad. Nästa gång de två jämförs blir det 0 poäng på raden för utvecklingskostnad. I slutet av raden summeras poängen ihop. Merittalen fås när summan och viktningen (från önskemålsträdet) multipliceras ihop.

Tabell 7.2 Matris för betygsättning och meritallsberäkning.

	Produktions kostnad	Utvecklings kostnad	Bullerdämpning inomhus	Bullerdämpning utomhus	Miljö vid produktion	Miljö vid järn- vägen	<b>Summa</b>	<b>Viktning</b>	<b>Meritall</b>
<b>Produktions kostnad</b>		2	0	0	2	1	<b>5</b>	<b>0,15</b>	<b>0,75</b>
<b>Utvecklings kostnad</b>	0		0	0	1	0	<b>1</b>	<b>0,05</b>	<b>0,05</b>
<b>Bullerdämpning inomhus</b>	2	2		0	2	2	<b>8</b>	<b>0,2</b>	<b>1,6</b>
<b>Bullerdämpning utomhus</b>	2	2	2		2	2	<b>10</b>	<b>0,4</b>	<b>4</b>
<b>Miljö vid produktion</b>	0	1	0	0		0	<b>1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>
<b>Miljö vid järnvä- gen</b>	1	0	0	0	0		<b>1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>

När alla önskemål har ett meritall jämförs olika lösningsförslag på ett utvärderingskort, se figur 7.2. Betygsättning av önskemålen på olika lösningsförslag sker efter en valfri betygsskala, t.ex. en tiogradig skala där 0 är helt underkänd och 10 är absolut topp. Betygen på vardera subfunktion multipliceras med tillhörande meritall och till sist adderas subfunktionernas poäng, den lösning som får högst slutpoäng är den ”ultimata lösningen”.

Det är inte gjort någon betygsättning för de kvarvarande förslagen. Istället för att föreslå en lösning för att komma till rätta med bullerstörningen kring järnvägen är det fyra olika åtgärder föreslagna.

Subfunktion	Betyg (1-10)	Merittal	Delbetyg
Produktions kostnad		0,75	
Utvecklings kostnad		0,05	
Bullerdämpning Inomhus		1,6	
Bullerdämpning Utomhus		4	
Miljö vid produktion		0,1	
Miljö vid järnvägen		0,1	
		<b>Slutpoäng</b>	

Figur 7.2 Utvärderingskort.

### 7.1.8 Känslighetsanalys

Känslighetsanalys är viktig punkt i konstruktionsarbetet. En lösning kanske ser ut att vara väldigt bra men kanske bara fungerar under ideala förhållanden. Vissa lösningar kanske kräver att en detalj alltid måste fungera, om den inte fungerar står allt stilla eller ännu allvarligare om den inte fungerar är det livsfara. Svagheten i den konstruktionslösningen blir den här detaljen, den måste alltid fungera och måste därför ha väldigt hög kvalitet eller ett back-up system. Motsatsen till den känsliga detaljen är en okänslig detalj som kan gå sönder utan att i någon större utsträckning påverka den normala driften, den detaljen kan vara billig och får inga större svaghetspoäng.

Känslighetsanalys är till stor del utelämnad i det här projektet. Bullerdämpningsåtgärderna som är föreslagna har naturligtvis en del svaga punkter, men inga resulterar i livsfara eller stillastående tåg. Eventuella svagheter i föreslagna konstruktionslösningar är naturligtvis nämnda.

## 7.2 Högprestanda hjul och räl

Figur 6.1 visar att faktorn *tågtyp* (*train\_type*) har liten inverkan på bullerstörning. För Sommar och vintertåg med last är det den faktor som ger minst påverkan. Jämförelsevärdena av *tågtyp* i figurerna 6.2 och 6.3 visar att på sommartågen (figur 6.2) är effekten *tågtyp* -0,63 och effekten för sommar och vintertåg (figur 6.3) är 0,35. Detta betyder att på sommaren upplevs malmtågen mer störande än Stålpilen och när båda årstiderna inkluderats upplevs Stålpilen som mer störande. Detta antagande är inte statistiskt säkerställt, ty effekten på denna faktor är väldigt låg vid jämförelse med de andra faktorerna. Tendensen finns dock och sammantaget med observationerna som gjordes vid inspelningarna kan det konstateras att lastad Stålpil har problem på vintertid.

Det har varit allmänt känt att Stålpilen har vinterproblem vilket nu bekräftas i denna studie. Orsaken till att problemen bara dyker upp vintertid relateras till det kalla klimatet, i detta fall beror det på att bromsarna fryser fast i låst läge, vilket sker när tåget står och väntar stillastående under en längre tid. När tåget senare åker iväg glider de låsta hjulen på rälen och hjulplatta bildas. I slutändan kan hjulplattor slå sönder rälen vilket är väldigt kostsamt.



När problemet är konstaterat kan bromsarna konstrueras om med elektrisk uppvärmning. Ett sådant konstruktionsförslag kan dock inte föreslås här eftersom någon undersökning av Stålpilenvagnarna ej genomförts här. För nykonstruktion av vagnar kan liknande lösningar säkert tas i beaktning.

Istället för att modernisera Stålpilens bromssystemen är ett förslag att använda högprestanda hjul, Duroc hjul. Denna typ av hjul är laserbehandlade och har därför mycket högre hållfasthet.

Genom att byta till högprestanda hjul kommer säkerligen problemen med hjulplattor att minska, men det för även med sig positiva effekter.

- Risken för sönderslagen räl.
- Reparationskostnader för hjul minskar.
- Idag är det maximalt tillåtet med 40 mm hjulplatta på det Svenska järnvägsnätet och när det överträds måste hjulparet bytas ut. Den vagn som har hjulplattor måste till verkstad för att få hjulparet utbytt och vagnen är obrukbar under tiden för bytet. Stillastående vagnar kostar pengar, dessutom innebär bytet av hjulparet en kostnad. Slutligen behöver inte kontrollerna av hjulen göras lika ofta på högprestanda hjul.

Det negativa med denna typ av hjul är att kostnaden är mycket högre jämfört med standardhjul. Vad händer när ett högprestanda hjul glider på rälen, slipas rälen då?

Några studier är inte gjorda men förslitningen på rälen blir inte så omfattande genom att hjulen glider på en längre sträcka. Förslitningen av rälen är inte så koncentrerad som det är när hjulplattor bildas, då är förslitningen koncentreras till en liten bit av hjulet. Det är nog bättre att låta en stor del av rälen slipas jämfört med att hjulplattor bildas. Dessutom kan högprestanda räl sättas in på utsatta sträckor.

Förslitning på hjul minskas med höghållfasta material, på samma sätt kan också rälen ersättas på utsatta sträckor. De utsatta sträckorna kan vara på de ställen där t.ex. Stålpilen får stå och vänta, vilket fick till följd att bromsarna fryser. Ett annat utsatt ställe är skarpa kurvor, där hjul-räl kontakten bli sådan att slitaget uppstår som får till följd att ljudnivån blir väldigt hög.

Förutom ljudnivåsänkning blir slitaget mindre vilket leder till minskad underhållskostnad. Denna räl kostar tyvärr mycket mer än standard räl.

### 7.3 Mikrofonövervakning av tåg

Idag finns det mikrofoner utplacerade längs järnvägsspåren. När tågen passerar en mikrofon kan lokföraren ringa upp den mikrofonen och lyssna efter defekter på tåget. Idén med kontroller av tågen akustiskt är bra, men ljudkvalitén hos mobiltelefoner (NMT-systemet används på tåg) är för dålig för att upptäcka defekter i tågsetet.

Om mikrofonövervakning av tåg ska användas måste den utvecklas ytterligare.

- Mikrofonerna som används idag kan ersättas med stereomikrofoner vilket förbättrar separationen och gör det enklare att uppfatta defekter på tåget.
- Banverket bör kontrollera avlyssning av tågen. Lokförarna ska även i fortsättningen ha möjlighet att ringa upp och kontrollera sina tåg eftersom allvarliga defekter på tågen kan de upptäckas genom denna avlyssning. Genom att låta Banverket ta över lyssnandet av tågen kontrolleras också ljudkvalitén från tågen på ett annat sätt jämfört med dagens. Det är Banverket som ska se till att det är en acceptabel ljudmiljö kring spåren idag, därför är det naturligt att låta Banverket lyssna på tågen.
- Genom att alla tåg spelas in behöver inte lyssnandet ske i ”realtid”. Tågen spelas in digitalt och sparas i en databas. Redan idag finns det ett väl utvecklat signalsystem längs stora delar av järnvägsnätet. Systemet vet när ett tåg närmar sig ett inspelningsställe, systemet vet också vilket tåg det är, inspelningen startar när tågen närmar sig mikrofonen och slår av när tåget åkt förbi.
- Mätningar av tågen sker samtidigt som de spelas in. Signalen analyseras som vid en traditionell mätning och kan larma om något gränsvärden överskridits. Databasen med tågen gör det enkelt att kartlägga de bullriga tågen.
- Avgifter baserade på bullernivå kan tas ut från trafikanterna. En trafikant som kör väldigt tysta tåg behöver inte betala lika mycket som en väldigt bullrande och störande trafikant.

På sikt kan mikrofonövervakning ge tystare tåg, de som trafikerar järnvägsnäten vet att de övervakas och om ett tyst tåg får billigare avgift är det troligt att förändring sker.

Det negativa med mikrofonövervakning är att det kan drabba den enskilde lokföraren. Eftersom allt finns i databasen, även vem som kör ett visst tåg, är det inget problem att kartlägga en lokförare och hans/hennes körstil. Kostnaden för ett sånt här system är hög, dessutom måste personal utbildas och systemet kräver underhåll.

## 7.4 Differentierade hastigheter

Vissa tåg behöver bromsa mer än andra. För malmtågen finns det tydliga exempel på detta när de passerar järnvägsövergången på Östermalm i Luleå. På väg in mot Luleå vid detta ställe är det lätt nedförslut och det ger tågen lite extra fart. Det finns en skillnad mellan Stålpilen och malmtåg. Stålpilen behöver nästan aldrig bromsa på Östermalm medan större delen av malmtågen bromsade där. Troligtvis beror det på att Stålpilen kommer olastad i den åkriktningen medan malmtågen är fullastade.

Vid infarten till städer och stationer sänks hastigheten successivt. Dagens lastade malmtåg har en maxhastighet på 50 km/h och behöver alltså bara sänka hastigheten på få sträckor. På den aktuella sträckan i Luleå är maxhastighet 40 km/h och där måste malmtåget bromsa. För att slippa bromsningarna med malmtågen kan hårdare hastighetsbestämmelser gälla för malmtågen, om 40 km/h begränsningen börjar gälla tidigare för tungt lastade godståg kanske bromsningarna senare kan undvikas. För att hitta de ideala hastighetsbegränsningarna så att tågen bara kan glida in på stationerna måste samarbete till mellan de som trafikerar järnvägen och Banverket.

För att studera om det är möjligt med lägre hastigheter för att minska inbromsningarna har studiebesök i förarhytten på ett persontåg gjorts. Hastigheten in på stationerna är bra anpassade för persontåg, inga kraftigare bromsningar är nödvändiga förutom den sista för att få stopp på tåget.

I framtiden kan kanske hastigheten räknas fram av en dator. Vikt, temperatur och andra viktiga parametrar är indata, datorn styr loket i en hastighet som krävs och lokföraren får bara en övervakande roll. Detta är inget förslag till nya lösningar utan bara en tanke hur förslaget om *differentierade hastigheter* kan utvecklas vidare.

Om bromsningarna kan minskas för malmtågen görs stora bullerminskningar, det är inte bara bromsskriken minskar. När ett malmtåg bromsar in slår vagnarna ihop och det resulterar i "koppelskrammel", sedan skramlar det lika mycket när koppel mellan vagnarna far isär, om bromsningar kan undvikas blir det inget koppelskrammel heller.

MTAB är på väg att byta ut malmvagnar och malmlok, detta kommer leda till längre malmtåg men färre tåg per dag. Idag går 12 – 14 tåg per dag mot framtidens 6 – 8 tåg per dag, längden på tågen ökas från 481 m till 746 m. Även hastigheterna kommer att ökas för de nya tågen, idag är hastigheterna för lastade tåg 50 km/h, de nya tågen får köra 60 km/h med last, hastigheterna för olastade tåg är 60 km/h och de nya kommer att kunna köra 70 km/h. De nya vagnarna ska också ha helt ny koppelkonstruktion så effekten av koppelskrammel kommer att minska. En helt ny vagnkonstruktion bör också vara tystare än den gamla vagnen, framtiden får utvisa om sådant är fallet.

## 8 Slutsatser

Examensarbetet har haft tre syften. Det första var att utvärdera binaural teknik för kartläggning av bullerstörning från järnvägstrafik. Det andra var att hitta alternativa mätstorheter till A-vägd ljudtrycksnivå för beskrivning av bullerstörning från järnvägstrafik. Det tredje var att kartlägga vad som orsakar bullerstörning från järnvägen och med utgångspunkt från orsakerna hitta nya lösningar för att minska bullerstörning.

Resultaten som i huvudsak baseras på två lyssningstest av binauralt inspelade tåg ljud visar att bullerstörning i första hand är kopplad till hörstyrka. Detta styrks av att både A-vägd ljudtrycksnivå och den sensoriska mätstorheten hörstyrka är väl korrelerad med bullerstörning. Bullerstörningen kan också förstärkas om ljuden upplevs skarpa och tonala.

Vid små variationer av tågkaraktär och hastighet (Test 1) överensstämmer 5-percentilens A-vägda ljudtrycksnivå bäst med bullerstörning ( $r = 0,97$ ). Av de psykoakustiska mätstorheterna stämde hörstyrka bäst med bullerstörning ( $r = 0,96$ ). När fler tågtyper inkluderas, hastighetskillnader ökar och avvikelser från normala tåg blir fler (Test 2), minskar mätstorheternas förklaringsgrad. A-vägd ljudtrycksnivå är den mätstorhet som stämmer bäst med upplevd bullerstörning ( $r = 0,92$ ).

För att öka samstämmigheten mellan upplevd bullerstörning och mätstorheter är det tvunget att kombinera olika mätstorheter med varandra. Bullerstörning beskrivs bäst av ett störningsindex baserat på hörstyrka och skarphet ( $r = 0,95$ ) enligt följande regressionsmodell.

$$B = -8,4409 + 5,4224 \lg(N) + 1,0676 S,$$

$B$  är predikterad bullerstörning,  $N$  är hörstyrka (sone GF) och  $S$  är skarphet (acum). Modellen har testats och validerats med data från Test 1 ( $r = 0,97$ ).

Lyssningstesten visade att bullerstörning är starkt årstidsberoende. Skärmar är effektivast under sommarhalvåret och minskar bullerstörningen med 2 skalsteg, vilket motsvaras av en 57 % sänkning av hörstyrkan. Bullerstörning orsakad av defekta eller bromsande tåg överstiger i vissa fall effekten av bullerdämpande skärmar. Sommartid ökar bullerstörningen med 1,5 skalsteg för tåg med någon form av avvikelse, vilket nästan motsvarar en fördubbling (85 % ökning) av hörstyrkan. Ljudtrycksnivån visar också stora skillnader för tåg med avvikelse jämfört med normala tåg, i vissa fall är ljudtrycksnivån 20 dB(A) högre för tåg med avvikelse.

För att ytterligare förbättra bullermiljön kring järnvägen måste dagens åtgärder med bullerskärmar och tilläggsisolering av närliggande hus ses över. Lyssningstesten och mätvärden, tillsammans med iakttagelser vid inspelningsplatsena visar att kartläggning av bullrets uppkomst är nödvändig för att kostnadseffektivt minska bullerstörning. Lyssningstesten visade att bullerstörningen till stor del orsakas av avvikande tåg. För detta problem finns enkla och billiga lösningar som kan vara ett effektivt komplement till dagens lösningar. T. ex. kan ett förändrat körsätt som förhindrar bromsskrik i vissa fall sänka ljudtrycksnivån mer än bullerskärmar.

Om dessutom hjulplattor undviks kan bullerstörning och ljudtrycksnivå sänkas ytterligare. Ett sätt att undvika hjulplattor är att använda högprestanda hjul på tåg som lätt får hjulplattor. En tredje åtgärd som kan sänka buller från tågen är att på känsliga ställen övervaka spåren via mikrofoner. Genom att identifiera bullrande tåg och belägga dessa med extra avgift stimuleras trafikanten att vidta åtgärder för att minska bullernivån.

## Referenser

1. Beitz, W. and Pahl G. Engineering Design : Systematic Approach. 2 Rev ed. Springer – Verlag London ISBN: 3-540-19917-9.
2. Widlert, Staffan. et al. (1999). *Transporter och kommunikationer Årsbok 1998*. Stockholm. Statens institut för kommunikationsanalys. ISBN: 91-630-7652-7.
3. Sammanställning av Banverket och Naturvårdsverket. (1997). *Buller och Vibrationer från spårburen linjetrafik*.
4. Öhrström, E. (1997). Effects of Exposure to Railway Noise-A Comparison between Areas and without Vibration. *Journal of Sound and Vibration*. 205(4).
5. Vincent, N. et al. (1996). Theoretical optimization of track components to reduce rolling noise. *Journal of Sound and Vibration*. 193(1).
6. Lampert, J. et al. (1996). Annoyance from High Speed Train Noise: A Social Survey. *Journal of Sound and Vibration*. 193(1).
7. De Jong, R. G. & Miedema H. M. (1996). Is Freight Traffic More Annoying than Passenger Traffic Noise. *Journal of Sound and Vibration*. 193(1).
8. Johansson, Örjan. (2000). Akustiska mätmetoder och mätstorheter för bedömning av bullerstörning. I : *Störande buller*. Arbetslivsinstitutet. 3-18. ISBN: 91-7045-548-1.
9. Namba, S. (1994). *Noise – quantity and quality, key note speech*. Proceedings Inter Noise 94, Yokohama, 3-22.
10. Andersson, Johnny. (1998). *Akustik och buller*. AB svensk byggtjänst. ISBN: 91-7332-727-1
11. Pickles, J. O. (1988). *An introduction to the physiology of hearing*. Academic Press, London.
12. Widmann, U. (1998). Aurally adequate evaluation of sounds. In: *Proceedings Euro Noise 98, München, Oct 4-8*. 29 – 46. ISBN: 3-9804568-4-6.
13. Kleiner, Mendel. (1996). *Audioteknik och akustik*. 5. uppl. Göteborg, Chalmers tekn. högsk.
14. Box, George E. P. et al. (1978). *Statistics for Experimenters. An Introduction to Design, Data Analysis and Model Building*. John Wiley & Sons, Inc. ISBN: 0-471-09315-7
15. Göransson, Clara. (1995). *Buller från spårburen trafikförslag till mätmetod*. Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut, Akustik. SP Rapport 1995:40
16. Edwards, Allen L. (1957). *Techniques of Attitude Scale Construction*. Irvington Publishers, Inc. ISBN: 0-8290-0067-4
17. Widmann, U. Hölzl, G. (1997). Evaluation of the Indoor Sound of a Modern Car and a High Speed Train by Means of Psychoacoustic Parameters. In: *Proceedings of Inter-Noise 97 Budapest-Hungary, August 25-27*. 1015-1020. ISBN: 963-8241-64-0.

18. Ström Tomas (1994). *Utvärdering av bullerskärmen Soundtrack, monterad i Vattholma*. Borås, Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut. Protokoll 1994-05-25.
19. Sköld Gunilla (1996). *Bulleråtgärder, Förslag till olika lösningar*. Banteknik.
20. Sköld Gunilla (1997). *Utvecklingsprojekt "bullerskärm utmed järnväg" –spårnära skärm*.
21. *Västra stambanan. Tågbullerutredning i Gnesta Kommun*. Banverket Östra Banregionen. Rapport S-12765-r-C, 1999-02-25.
22. Bergström Olof (1999). *Bullermätning vid Soundtrack, Östermalm, Luleå*. Nitro Consult AB, Luleå. Rapport 9924 7385 R.
23. Öhrström, E. & Skånberg A.-B. (1996). A Field Survey on Effects of Exposure to Noise and Vibration from Railway Traffic, Part (i) : Annoyance and Activity Disturbance Effects. *Journal of Sound and Vibration*. 193(1).
24. Fahy, F.J. et al. (1993). Development of a Novel Form of Sound Absorbent Facing for Traffic Noise Barriers. In: *Proceedings of Inter-Noise 93 Leuven, Belgium, August 24-26*. 1687-1690. ISBN: 90-5204-023-0.
25. Yano, T. et al. (1997). Comparison of Community Annoyance from Railway Noise Evaluated by Different Category Scales. *Journal of Sound and Vibration*. 205(4).
26. *Miljökonsekvenser av nordisk väg- och järnvägstrafik*. Transportforskningskommisionen, 1987. TFK rapport, 03470970; 1987:2. IDNR: 918694414.
27. Svärdsudd, Charlotte. (1990). *Attityder till närliggande trafikleder*. Chalmers Tekniska Högskola. Examensarbete 1990:2
28. Jonasson, Hans. Göransson, Clara. (1995). *Väg- och tågtrafikbuller. En översikt över olika fenomen*. Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut, Akustik. SP Rapport 1995:33
29. Öhrström, Evy. Skånberg, Ann-Britt. (1995). *Effekter av exponering för buller och vibrationer från tågtrafik*. Undersökningar i 15 tätorter. Göteborgs Universitet. ISNR: GU-MMED-R—1995/1—SE
30. *Buller från spårburen trafik : nordisk beräkningsmodell*. Naturvårdsverket, 1999. Rapport 0282798; 4935. IDNR: 916204935.
31. Johansson, Anders. Nielsen, Jens. (1998). *Out-of-Round Wheels – A Literature Survey*. Göteborg. Charmec Göteborg. ISSN: 0349-8107

# 1 Försöksdesign

I studien ingår två test. Det första testet (Test 1) ska beskriva hur olika faktorer påverkar bullerstörningen från järnvägstrafik. Det andra testet (Test 2) ska ge en representativ beskrivning av trafiksituationen vid inspelningsplatserna.

## 1.1 Faktordesign, Test 1

För att få statistiskt hållbar analys till Test 1 är det lämpligt att bestämma vilken statistisk metod som ska användas innan inspelningarna sätter igång. Med utgång från faktorerna som är valda i avsnitt 4.1 passar faktordesign i två nivåer bäst. I tabell 1.1 är faktorerna under rubriken **Faktorer**, en av dessa är **Körsätt**. **Avvikelse** i denna analys är *Broms* och *hjulplatta*. Den andra varianten på **Körsätt** är *normalt körsätt*, med detta menas att tåget går normalt utan broms eller någon annan defekt. Nästa steg är att ”märka” de olika varianterna med ett plus eller minustecken. Tecknen står för om något är på eller av. För att vara konsekvent i designen markeras allt som förmodas bullra mest med plustecken (+). Avvikande körsätt märks med ett plus (+), normalt körsätt märks med minus(-). För övriga parametrar gäller samma sak, tom lastvagn minus (-), lastad plus (+), o.s.v. För fullständig design ska alla parametrar varieras mot varandra, fem stycken ingående parametrar kan anta två nivåer (-/+ ) det blir totalt  $2^5 = 32$  försök, fullständiga designen finns i tabell 1.1.

Tabell 1.1 Matris för faktordesign i två nivåer till Test 1.

Ljud	Faktorer				
	Bullerskärm	Last	Tågtyp	Årstid	Körsätt
1	Befintligt (-)	Olastad (-)	Malmtåg (-)	Vinter (-)	Normal (-)
2	Inget (+)	Olastad (-)	Malmtåg (-)	Vinter (-)	Normal (-)
3	Befintligt (-)	Maxlastad (+)	Malmtåg (-)	Vinter (-)	Normal (-)
4	Vinter (-)	Maxlastad (+)	Malmtåg (-)	Vinter (-)	Normal (-)
5	Vinter (-)	Olastad (-)	Stålpilen (+)	Vinter (-)	Normal (-)
6	Inget (+)	Olastad (-)	Stålpilen (+)	Vinter (-)	Normal (-)
7	Befintligt (-)	Maxlastad (+)	Stålpilen (+)	Vinter (-)	Normal (-)
8	Inget (+)	Maxlastad (+)	Stålpilen (+)	Vinter (-)	Normal (-)
9	Befintligt (-)	Olastad (-)	Malmtåg (-)	Sommar (+)	Normal (-)
10	Inget (+)	Olastad (-)	Malmtåg (-)	Sommar (+)	Normal (-)
11	Befintligt (-)	Maxlastad (+)	Malmtåg (-)	Sommar (+)	Normal (-)
12	Inget (+)	Maxlastad (+)	Malmtåg (-)	Sommar (+)	Normal (-)
13	Befintligt (-)	Olastad (-)	Stålpilen (+)	Sommar (+)	Normal (-)
14	Inget (+)	Olastad (-)	Stålpilen (+)	Sommar (+)	Normal (-)
15	Befintligt (-)	Maxlastad (+)	Stålpilen (+)	Sommar (+)	Normal (-)
16	Inget (+)	Maxlastad (+)	Stålpilen (+)	Sommar (+)	Normal (-)
17	Befintligt (-)	Olastad (-)	Malmtåg (-)	Vinter (-)	Avvikande (+)
18	Inget (+)	Olastad (-)	Malmtåg (-)	Vinter (-)	Avvikande (+)
19	Befintligt (-)	Maxlastad (+)	Malmtåg (-)	Vinter (-)	Avvikande (+)
20	Vinter (-)	Maxlastad (+)	Malmtåg (-)	Vinter (-)	Avvikande (+)
21	Vinter (-)	Olastad (-)	Stålpilen (+)	Vinter (-)	Avvikande (+)
22	Inget (+)	Olastad (-)	Stålpilen (+)	Vinter (-)	Avvikande (+)
23	Befintligt (-)	Maxlastad (+)	Stålpilen (+)	Vinter (-)	Avvikande (+)
24	Inget (+)	Maxlastad (+)	Stålpilen (+)	Vinter (-)	Avvikande (+)
25	Befintligt (-)	Olastad (-)	Malmtåg (-)	Sommar (+)	Avvikande (+)
26	Inget (+)	Olastad (-)	Malmtåg (-)	Sommar (+)	Avvikande (+)
27	Befintligt (-)	Maxlastad (+)	Malmtåg (-)	Sommar (+)	Avvikande (+)
28	Inget (+)	Maxlastad (+)	Malmtåg (-)	Sommar (+)	Avvikande (+)
29	Befintligt (-)	Olastad (-)	Stålpilen (+)	Sommar (+)	Avvikande (+)
30	Inget (+)	Olastad (-)	Stålpilen (+)	Sommar (+)	Avvikande (+)
31	Befintligt (-)	Maxlastad (+)	Stålpilen (+)	Sommar (+)	Avvikande (+)
32	Inget (+)	Maxlastad (+)	Stålpilen (+)	Sommar (+)	Avvikande (+)

## 1.2 Reducerad design, Test 1

Under inspelning av tågen visar det sig att vissa tåg inte går att spela in. Om försöksdesignen inte kan fyllas kan den reduceras.

Vid reducering blir en faktor styrd av de andra faktorerna. Faktorn **körsätt** kan bestämmas av de övriga. **Körsätt** fås genom att multiplicera tecknen (-/+ ) på övriga faktorer. För ljud 1 blir **Körsätt** = (-)\*(-)\*(-)\*(-) = (+), motsvarande för ljud 2 blir **Körsätt** = (+)\*(-)\*(-)\*(-) = (-). Vid denna reducering kan hälften av försöken reduceras bort och kallas för ”Half fraction design”. Naturligtvis kan **Körsätt** fås med motsatt tecken, ljud 1: **Körsätt** = (-) ljud 2: **Körsätt** = (+) o.s.v., vid den reducering som är gjord här fås **körsätt** med motsatt tecken.

Tabell 1.2 visar den slutliga designen, den består av två *Half fraction design*. De olastade tågen (ljuden) vintertid var tvunget att väljas bort eftersom vissa olastade tåg saknades, men det går att göra en jämförelse mellan sommar och vinter med lastade tåg. På sommaren kan dock jämförelse med lastade och olastade tåg göras.

Tabell 1.2 Slutlig design Test 1.

Ljud	Faktor				
	Bullerplank	Last	Tågtyp	Årstid	Körsätt
1	Befintligt (-)	Maxlastad (+)	Malmtåg (-)	Vinter(-)	Avvikande (+)
2	Inget (+)	Maxlastad (+)	Malmtåg (-)	Vinter(-)	Normal (-)
3	Befintligt (-)	Maxlastad (+)	Stålpilen (+)	Vinter(-)	Normal (-)
4	Inget (+)	Maxlastad (+)	Stålpilen (+)	Vinter(-)	Avvikande (+)
5	Befintligt (-)	Olastad (-)	Malmtåg (-)	Sommar(+)	Avvikande (+)
6	Befintligt (-)	Maxlastad (+)	Malmtåg (-)	Sommar(+)	Normal (-)
7	Inget (+)	Olastad (-)	Malmtåg (-)	Sommar(+)	Normal (-)
8	Inget (+)	Maxlastad (+)	Malmtåg (-)	Sommar(+)	Avvikande (+)
9	Befintligt (-)	Olastad (-)	Stålpilen (+)	Sommar(+)	Normal (-)
10	Befintligt (-)	Maxlastad (+)	Stålpilen (+)	Sommar(+)	Avvikande (+)
11	Inget (+)	Olastad (-)	Stålpilen (+)	Sommar(+)	Avvikande (+)
12	Inget (+)	Maxlastad (+)	Stålpilen (+)	Sommar(+)	Normal (-)



### 1.3 Test 2

Huvudsyftet med Test 2 är att finna samband mellan bullerstörning och mätstorheter. För att ge en representativ beskrivning av tåg ljuden inkluderas olika tågtyper, hastigheten varieras och tågen spelas in vid olika platser. Tabell 1.3 visar de olika ingående faktorerna.

Tabell 1.3 Beskrivning av ingående faktorer i Test 2.

Ljud	Last	Tågtyp	Årstid	Annat	Hastighet	Bullerplank
1	-	Persontåg	Vinter	-	Sakta	Frifält
2	-	Persontåg	Vinter	-	Sakta	Befintligt
3	-	Persontåg	Vinter	Ringsignal	Snabbt	Befintligt
4	-	Persontåg	Vinter	Ringsignal	Snabbt	Frifält
5	-	Persontåg	Sommar	-	Sakta	Befintligt
6	-	Persontåg	Sommar	Början av tågset	Sakta	Frifält
7	-	Persontåg	Sommar	Mitten/slutet av tågset	Sakta	Frifält
8	-	Persontåg	Sommar	-	Max	Frifält
9	-	Diesellok	Sommar	-	Sakta	Frifält
10	-	Lok (DM-1)	Sommar	-	Sakta	Frifält
11	-	Lok (RC-6)	Sommar	-	Sakta	Frifält
12	-	Lok (RC-4)	Sommar	-	Sakta	Frifält
13	-	Lok (DM-3)	Sommar	-	Sakta	Frifält
14	Olastad	Stålpil	Vinter	Ringsignal	Snabbt	Befintligt
15	Lastad	Stålpil	Vinter	Ringsignal	Snabbt	Befintligt
16	Lastad	Stålpil	Vinter	Ringsignal	Snabbt	Frifält
17	Olastad	Stålpil	Vinter	Ringsignal	Snabbt	Frifält
18	Lastad	Stålpil	Sommar	-	Max	Frifält
19	Lastad	Stålpil	Sommar	-	Sakta	Frifält
20	Lastad	Malmtåg	Sommar	-	Max	Frifält
21	Lastad	Malmtåg	Sommar	-	Sakta	Frifält
22	Olastad	Malmtåg	Sommar	-	Max	Frifält
23	Olastad	Malmtåg	Sommar	-	Sakta	Frifält
24	-	Combi	Sommar	-	Sakta	Frifält
25	-	Combi	Sommar	Tvärnit	Sakta	Frifält
26	-	Tankvagnar	Sommar	-	Sakta	Frifält
27	-	Tankvagnar	Sommar	-	Sakta	Befintligt
28	-	Malmtåg	Vinter	Broms till stillastående	Sakta	Befintligt
29	-	Malmtåg	Vinter	Start av ovanstående tåg	Sakta	Befintligt
30	-	Combi	Sommar	Bilsläp, öppna o täckta vagnar	Sakta	Frifält
31	-	Combi	Sommar	Nästan bara täckta vagnar	Sakta	Frifält
32	-	Combi	Sommar	-	Sakta	Befintligt

## Lyssningstest Tågbuller

Du kommer att få lyssna till 44 olika ljudsekvenser inspelade vid järnvägen.

Ljuden är uppdelade i tre omgångar med paus mellan varje omgång.

Första omgången innehåller 12 ljud, andra och tredje omgången innehåller 16 ljud vardera.

Din uppgift är att bedöma hur störande dessa ljud upplevs.

Ljuden avlyssnas via hörlurar.

När du hör ljudet blunda och tänk att du står ca 15 m från järnvägsspåret.

Bedöm hur störande du upplever ljudet, försök göra bedömningen oberoende av de andra ljuden.

När ljudet upphör markera din bedömning på bifogad skala.

Skalan är graderad från 1 till 7,  
1 motsvarar inte alls störande,  
7 motsvarar extremt störande,  
4 motsvarar ganska störande, och är skalans mittpunkt.

**OBS!! GLÖM EJ ATT STÄNGA AV MOBILTELEFONEN**

## 1 Data från inspelningarna

Från inspelningarna kan mätdata presenteras på olika sätt, inom akustiken är det vanligt att presentera data i olika grafer med frekvensen utmed x-axeln. Här presenteras insamlad data och bullerstörningsresponsen i tabellform. Det är data från både det designade testet (Test 1) och Test 2 som är en mer allmän representation av tåg ljud. Förutom att tabellerna är uppdelade på de två olika testen är också rms-värden (medelvärden) och 5-percentils värden uppdelade i olika diagram p.g.a. utrymmesbrist. Tabellerna för Test 2 är även uppdelat i ljud (tåg) 1 – 16 och ljud (tåg) 17 – 32 p.g.a. utrymmesbrist.

Tabell 1.1 Data från Test 1, rms-värden representerade vid respektive mätstorhet och bullerstörningsresponsen från testpersonerna.

	Channels	Level [dB]	Level(A) [dB(A)]	Hörstyrka [soneGF]	Skarphet [acum]	Råhet [asper]	Tonalitet [tu]	Respons Univ	Respons BV
<b>Ljud 1</b>	1:Left	79.17	73.42	30.79	1.93	2.41	0.14	2.051	2.5766
	2:Right	79.68	73.14	32.24	1.81	2.45	0.14		
<b>Ljud 2</b>	1:Left	79.72	70.43	30.29	1.37	2.78	0.04	1.2437	1.6513
	2:Right	81.72	71.38	31.78	1.38	2.89	0.03		
<b>Ljud 3</b>	1:Left	78.44	71.69	30.8	1.29	2.87	0.03	1.2026	2.0245
	2:Right	79.22	72.82	32.75	1.29	2.97	0.03		
<b>Ljud 4</b>	1:Left	92.01	89.12	88.52	1.58	5.21	0.03	4.0961	4.1663
	2:Right	91.79	89.78	90.79	1.6	5.27	0.03		
<b>Ljud 5</b>	1:Left	89.15	79.63	53.33	1.41	3.64	0.05	2.765	3.5147
	2:Right	90.07	82.05	60.73	1.6	3.85	0.06		
<b>Ljud 6</b>	1:Left	79.85	68.89	27.58	1.21	2.57	0.04	0.8467	1.6859
	2:Right	80.8	70.05	29.47	1.21	2.70	0.04		
<b>Ljud 7</b>	1:Left	88.96	82.29	59.07	1.32	4.17	0.05	2.6887	3.3468
	2:Right	89.33	82.97	61.33	1.32	4.30	0.05		
<b>Ljud 8</b>	1:Left	98.36	98.8	121.04	2.53	5.04	0.11	5.347	5.268
	2:Right	98.74	99.1	121.48	2.55	5.18	0.11		
<b>Ljud 9</b>	1:Left	76.79	63.68	20.52	1.16	2.01	0.04	0.41	1.0073
	2:Right	77.51	65.43	22.74	1.19	2.21	0.04		
<b>Ljud 10</b>	1:Left	89.04	78.43	47.24	1.31	3.62	0.03	2.2564	2.5766
	2:Right	92.39	79.79	50.95	1.32	3.79	0.03		
<b>Ljud 11</b>	1:Left	88.08	85.1	69.48	1.41	4.66	0.03	3.1698	3.8391
	2:Right	88.96	86.54	75.45	1.43	4.91	0.03		
<b>Ljud 12</b>	1:Left	88.59	85.54	70.05	1.4	4.53	0.03	3.5915	3.5896
	2:Right	89.29	86.56	72.87	1.37	4.72	0.03		

## Mätdata

Tabell 1.2 Data från Test 1, 5-percentilerna representerade vid respektive mätstorhet och bullerstörningsresponsen från testpersonerna.

	Channels	Level(A) [dB(A)]	Hörstyrka [soneGF]	Skarphet [acum]	Råhet [asper]	Tonalitet [tu]	Respons Univ	Respons Bv
<b>Ljud 1</b>	1:Left	77.28	32.76	2.29	2.77	0.27	2.051	2.5766
	2:Right	77.35	34.16	2.22	2.77	0.28		
<b>Ljud 2</b>	1:Left	71.62	32.17	1.46	2.98	0.10	1.2437	1.6513
	2:Right	72.52	33.81	1.45	3.16	0.09		
<b>Ljud 3</b>	1:Left	72.98	33.33	1.37	3.16	0.10	1.2026	2.0245
	2:Right	74.17	35.60	1.36	3.32	0.10		
<b>Ljud 4</b>	1:Left	93.83	114.71	1.68	6.42	0.10	4.0961	4.1663
	2:Right	94.50	117.74	1.70	6.44	0.09		
<b>Ljud 5</b>	1:Left	85.21	60.90	1.75	4.00	0.16	2.765	3.5147
	2:Right	87.47	68.32	1.96	4.17	0.17		
<b>Ljud 6</b>	1:Left	69.77	29.16	1.26	2.77	0.12	0.8467	1.6859
	2:Right	70.66	30.95	1.27	2.88	0.13		
<b>Ljud 7</b>	1:Left	83.47	62.52	1.40	4.43	0.13	2.6887	3.3468
	2:Right	83.97	64.24	1.37	4.64	0.13		
<b>Ljud 8</b>	1:Left	103.06	136.59	2.84	6.09	0.22	5.347	5.268
	2:Right	102.49	136.91	2.93	6.07	0.22		
<b>Ljud 9</b>	1:Left	64.41	21.38	1.25	2.24	0.13	0.41	1.0073
	2:Right	66.42	23.92	1.27	2.41	0.12		
<b>Ljud 10</b>	1:Left	81.04	55.35	1.41	4.07	0.10	2.2564	2.5766
	2:Right	81.87	57.81	1.40	4.26	0.09		
<b>Ljud 11</b>	1:Left	86.16	73.18	1.50	5.08	0.09	3.1698	3.8391
	2:Right	87.82	81.47	1.54	5.35	0.08		
<b>Ljud 12</b>	1:Left	86.39	72.31	1.46	4.81	0.10	3.5915	3.5896
	2:Right	87.24	75.91	1.40	5.03	0.10		

### Mätdata

Tabell 1.3 Data från Test 2, rms-värden representerade vid respektive mätstorhet och bullerstörningsresponsen från testpersonerna, ljud (tåg) 1 – 16.

	Channels	Level [dB]	Level(A) [dB(A)]	Hörstyrka [soneGF]	Skarphet [acum]	Råhet [asper]	Tonalitet [tu]	Respons Univ	Respons BV
<b>Ljud 1</b>	1:Left	76.54	70.36	28.04	1,56	2.65	0.05	1.1186	1.0874
	2:Right	76.3	70.89	28.89	1,56	2.80	0.05		
<b>Ljud 2</b>	1:Left	76.52	64.81	21.07	1,36	1.98	0.07	0.3376	0.262
	2:Right	76.4	66.48	22.45	1,36	2.11	0.07		
<b>Ljud 3</b>	1:Left	80.8	73.2	34.17	1,51	2.96	0.07	2.1019	3.308
	2:Right	82.86	77.11	41.75	1,6	2.96	0.14		
<b>Ljud 4</b>	1:Left	97.99	90.25	85.24	1,84	5.02	0.04	4.6473	4.2395
	2:Right	97.91	90	82.87	1,76	5.04	0.05		
<b>Ljud 5</b>	1:Left	90.08	89.13	79.3	1,73	4.83	0.03	3.9232	3.9232
	2:Right	91.37	91	84.7	1,66	5.26	0.03		
<b>Ljud 6</b>	1:Left	93.61	93.81	102.92	1,76	5.85	0.02	4.4408	4.4026
	2:Right	94.34	94.6	106.48	1,75	5.90	0.02		
<b>Ljud 7</b>	1:Left	83.96	76.33	39.72	1,42	3.34	0.03	1.1576	1.2748
	2:Right	81.66	76.85	40.74	1,4	3.46	0.04		
<b>Ljud 8</b>	1:Left	98.96	98.33	122.13	1,61	6.93	0.03	4.9406	4.9666
	2:Right	99.22	98.8	123.16	1,57	6.94	0.02		
<b>Ljud 9</b>	1:Left	96.46	88.44	84.23	1,17	4.98	0.07	3.4135	3.9832
	2:Right	96.72	88.41	85.34	1,16	4.90	0.08		
<b>Ljud 10</b>	1:Left	89.09	81.94	57.39	1,34	4.01	0.04	2.2121	2.2121
	2:Right	88.88	82.09	57.77	1,3	3.87	0.05		
<b>Ljud 11</b>	1:Left	91.06	87.58	76.04	1,29	4.55	0.06	3.0986	2.8737
	2:Right	91.03	87.4	74.94	1,25	4.43	0.06		
<b>Ljud 12</b>	1:Left	89.94	85.3	65.79	1,26	4.06	0.07	3.0536	2.6973
	2:Right	89.69	85.39	65.45	1,21	3.77	0.08		
<b>Ljud 13</b>	1:Left	95.93	92.76	106.06	1,44	5.77	0.03	3.9482	4.2978
	2:Right	95.98	92.69	104.38	1,42	5.61	0.03		
<b>Ljud 14</b>	1:Left	85.66	81.32	50.87	1,44	3.94	0.07	2.7267	3.2593
	2:Right	87.13	83.49	59.85	1,6	4.24	0.09		
<b>Ljud 15</b>	1:Left	85.28	81.2	54.52	1,43	3.97	0.05	2.6217	3.1307
	2:Right	86.2	83.15	60.75	1,57	4.10	0.10		
<b>Ljud 16</b>	1:Left	89.54	85.23	69.33	1,67	4.62	0.05	3.661	3.7734
	2:Right	90.43	86.35	73.32	1,65	4.87	0.04		

### Mätdata

Tabell 1.4 Data från Test 2, rms-värden representerade vid respektive mätstorhet och bullerstörningsresponsen från testpersonerna, ljud (tåg) 17 – 32.

	Channels	Level [dB]	Level(A) [dB(A)]	Hörstyrka [soneGF]	Skarphet [acum]	Råhet [asper]	Tonalitet [tu]	Respons Univ	Respons BV
<b>Ljud 17</b>	1:Left	95.31	90.81	87.78	1,61	5.32	0.04	4.1667	4.4026
	2:Right	95.69	91.35	87.93	1,54	5.39	0.04		
<b>Ljud 18</b>	1:Left	100.17	100.03	143.44	1,6	7.39	0.03	4.9406	5.0776
	2:Right	100.79	100.75	149.63	1,61	7.59	0.03		
<b>Ljud 19</b>	1:Left	90.6	86.91	75.69	1,4	4.89	0.03	3.4135	3.5035
	2:Right	90.35	87.22	76.64	1,37	4.94	0.03		
<b>Ljud 20</b>	1:Left	88.46	84.4	65.21	1,35	4.47	0.04	2.3696	2.5797
	2:Right	88.83	84.95	66.68	1,33	4.61	0.03		
<b>Ljud 21</b>	1:Left	85.42	76.23	42.04	1,32	3.34	0.05	1.1707	1.7527
	2:Right	85.78	76.73	43.35	1,31	3.40	0.04		
<b>Ljud 22</b>	1:Left	94.06	92.44	93.36	1,39	5.75	0.03	3.7734	4.0356
	2:Right	94.7	93.14	96.68	1,39	5.87	0.03		
<b>Ljud 23</b>	1:Left	90.93	86.48	71.31	1,35	4.70	0.06	2.5797	3.0736
	2:Right	91.13	86.52	72.05	1,33	4.71	0.05		
<b>Ljud 24</b>	1:Left	89.1	82.2	59.58	1,25	4.18	0.03	2.168	2.7477
	2:Right	89.38	82.74	60.93	1,23	4.23	0.03		
<b>Ljud 25</b>	1:Left	96.76	97.05	123.25	2,22	5.75	0.09	5.4396	5.4306
	2:Right	92.54	91.83	97.82	2,2	5.11	0.08		
<b>Ljud 26</b>	1:Left	88.84	82.16	60.68	1,44	4.06	0.06	3.2593	3.8899
	2:Right	89.5	83.74	66.68	1,53	4.30	0.06		
<b>Ljud 27</b>	1:Left	85.94	81	54.13	1,31	3.98	0.03	2.2121	2.168
	2:Right	86.85	82.37	57.91	1,28	4.20	0.04		
<b>Ljud 28</b>	1:Left	94.19	91.91	68.27	3,05	3.18	0.22	5.3586	5.2566
	2:Right	94.69	92.95	76.63	3,03	3.70	0.19		
<b>Ljud 29</b>	1:Left	97.15	95.92	85.33	3,27	3.15	0.23	5.4016	5.4306
	2:Right	96.94	96.17	89.12	3,14	3.31	0.24		
<b>Ljud 30</b>	1:Left	95.25	94.82	117.24	1,69	6.18	0.03	4.6124	4.9666
	2:Right	95.71	95.29	119.17	1,66	6.25	0.02		
<b>Ljud 31</b>	1:Left	91.07	86.1	71.07	1,29	4.87	0.03	3.2736	3.2736
	2:Right	91.74	87.29	75.43	1,28	5.02	0.04		
<b>Ljud 32</b>	1:Left	95.67	80.54	52.09	1,27	3.90	0.03	1.9916	1.7766
	2:Right	98.27	81.76	56.02	1,3	4.08	0.02		

## Mätdata

Tabell 1.5 Data från Test 2, 5-percentilerna representerade vid respektive respektive mätstorhet och bullerstörningsresponsen från testpersonerna, ljud (tåg) 1 – 16.

	Channels	Level(A) [dB(A)]	Hörstyrka [soneGF]	Skarphet [acum]	Råhet [asper]	Tonalitet [tu]	Respons Univ	Respons BV
<b>Ljud 1</b>	1:Left	72.40	30.35	1.59	2.99	0.13	1.1186	1.0874
	2:Right	72.56	31.22	1.61	3.08	0.12		
<b>Ljud 2</b>	1:Left	66.13	22.77	1.39	2.33	0.20	0.3376	0.262
	2:Right	68.41	24.02	1.39	2.37	0.20		
<b>Ljud 3</b>	1:Left	74.82	37.72	1.57	3.28	0.17	2.1019	3.308
	2:Right	78.86	45.60	1.69	3.36	0.28		
<b>Ljud 4</b>	1:Left	92.20	94.48	1.86	5.63	0.11	4.6473	4.2395
	2:Right	92.26	93.68	1.80	5.60	0.09		
<b>Ljud 5</b>	1:Left	90.40	84.25	1.73	5.39	0.08	3.9232	3.9232
	2:Right	92.06	90.72	1.67	5.74	0.09		
<b>Ljud 6</b>	1:Left	95.36	110.40	1.78	6.22	0.07	4.4408	4.4026
	2:Right	96.26	113.36	1.76	6.41	0.07		
<b>Ljud 7</b>	1:Left	78.70	44.68	1.46	3.60	0.10	1.1576	1.2748
	2:Right	79.03	46.05	1.44	3.83	0.12		
<b>Ljud 8</b>	1:Left	99.58	131.28	1.71	7.49	0.07	4.9406	4.9666
	2:Right	99.99	131.91	1.62	7.47	0.07		
<b>Ljud 9</b>	1:Left	91.49	102.61	1.21	5.74	0.17	3.4135	3.9832
	2:Right	91.44	100.23	1.20	5.91	0.16		
<b>Ljud 10</b>	1:Left	86.05	72.22	1.37	5.24	0.11	2.2121	2.2121
	2:Right	85.98	72.54	1.40	5.10	0.13		
<b>Ljud 11</b>	1:Left	89.41	83.60	1.36	5.05	0.15	3.0986	2.8737
	2:Right	89.57	83.52	1.34	5.32	0.13		
<b>Ljud 12</b>	1:Left	88.06	76.47	1.32	4.88	0.17	3.0536	2.6973
	2:Right	88.69	77.54	1.29	4.74	0.18		
<b>Ljud 13</b>	1:Left	95.00	121.70	1.47	6.50	0.09	3.9482	4.2978
	2:Right	94.79	119.83	1.46	6.78	0.09		
<b>Ljud 14</b>	1:Left	82.57	54.37	1.50	4.28	0.14	2.7267	3.2593
	2:Right	85.19	65.83	1.65	4.62	0.20		
<b>Ljud 15</b>	1:Left	82.25	58.83	1.47	4.28	0.13	2.6217	3.1307
	2:Right	84.60	65.17	1.63	4.48	0.20		
<b>Ljud 16</b>	1:Left	86.52	76.07	1.69	5.02	0.14	3.661	3.7734
	2:Right	87.85	81.25	1.68	5.43	0.11		

## Mätdata

Tabell 1.6 Data från Test 2, 5-percentilerna representerade vid respektive mätstorhet och bullerstörningsresponsen från testpersonerna, ljud (tåg) 17 – 32.

	Channels	Level(A) [dB(A)]	Hörstyrka [soneGF]	Skarphet [acum]	Råhet [asper]	Tonalitet [tu]	Respons Univ	Respons BV
<b>Ljud 17</b>	1:Left	93.99	100.84	1.66	6.00	0.10	4.1667	4.4026
	2:Right	93.76	98.69	1.58	6.19	0.09		
<b>Ljud 18</b>	1:Left	101.26	150.35	1.62	7.78	0.08	4.9406	5.0776
	2:Right	102.09	158.86	1.63	8.07	0.08		
<b>Ljud 19</b>	1:Left	87.76	78.99	1.41	5.19	0.09	3.4135	3.5035
	2:Right	88.47	80.43	1.41	5.38	0.09		
<b>Ljud 20</b>	1:Left	85.83	69.52	1.36	5.01	0.12	2.3696	2.5797
	2:Right	86.21	70.47	1.34	5.12	0.12		
<b>Ljud 21</b>	1:Left	83.60	64.98	1.27	4.50	0.09	1.1707	1.7527
	2:Right	84.23	67.20	1.26	4.64	0.10		
<b>Ljud 22</b>	1:Left	76.88	43.77	1.34	3.65	0.12	3.7734	4.0356
	2:Right	77.17	45.11	1.32	3.61	0.12		
<b>Ljud 23</b>	1:Left	93.10	97.03	1.42	6.16	0.08	2.5797	3.0736
	2:Right	93.85	100.39	1.41	6.28	0.08		
<b>Ljud 24</b>	1:Left	88.64	78.85	1.37	5.31	0.13	2.168	2.7477
	2:Right	88.70	79.84	1.35	5.22	0.13		
<b>Ljud 25</b>	1:Left	101.76	158.72	2.44	6.68	0.18	5.4396	5.4306
	2:Right	96.07	123.78	2.43	6.41	0.16		
<b>Ljud 26</b>	1:Left	83.80	66.07	1.65	4.35	0.13	3.2593	3.8899
	2:Right	86.95	74.71	1.81	4.65	0.16		
<b>Ljud 27</b>	1:Left	81.98	57.54	1.36	4.23	0.10	2.2121	2.168
	2:Right	83.48	61.32	1.33	4.51	0.10		
<b>Ljud 28</b>	1:Left	95.19	67.90	3.64	5.15	0.36	5.3586	5.2566
	2:Right	97.07	83.44	3.40	5.49	0.32		
<b>Ljud 29</b>	1:Left	101.07	88.42	4.10	5.90	0.46	5.4016	5.4306
	2:Right	101.40	98.91	3.81	5.99	0.39		
<b>Ljud 30</b>	1:Left	96.28	127.03	1.70	6.61	0.08	4.6124	4.9666
	2:Right	96.74	128.42	1.69	6.65	0.07		
<b>Ljud 31</b>	1:Left	87.13	74.33	1.35	5.34	0.09	3.2736	3.2736
	2:Right	89.10	80.44	1.32	5.51	0.10		
<b>Ljud 32</b>	1:Left	81.93	56.34	1.32	4.30	0.09	1.9916	1.7766
	2:Right	83.94	62.96	1.36	4.79	0.07		

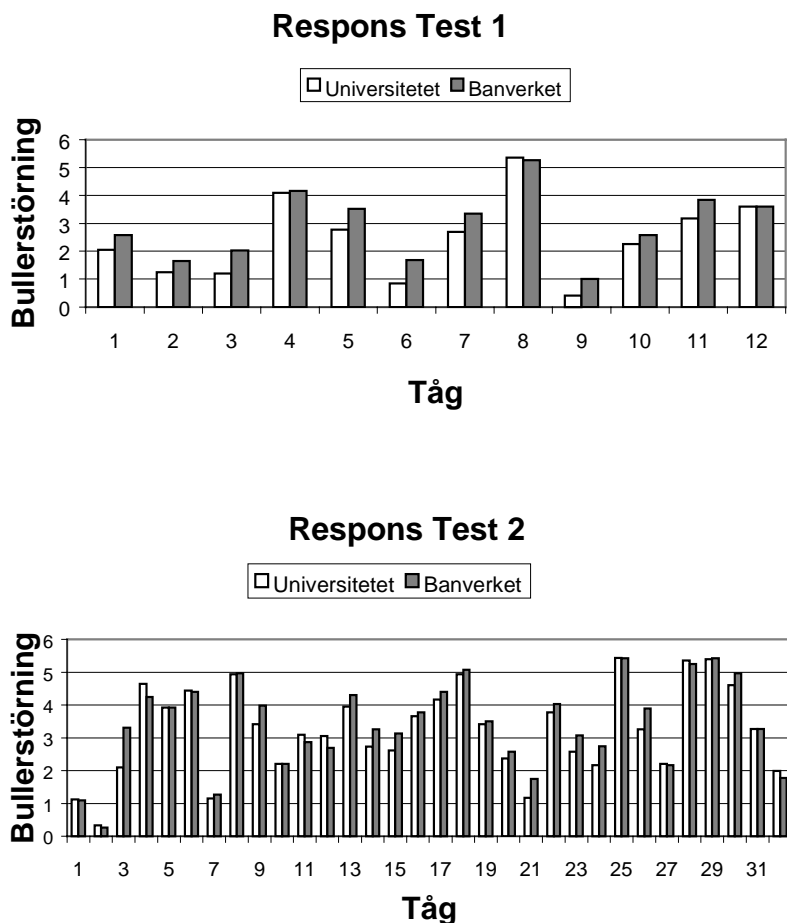


## 1 Jämförande diagram

För att se hur bra eller dåligt mätstorheterna stämmer med vad testpersonerna tyckte om bullret kan testpersonernas respons jämföras med mätstorheterna i olika diagram. Tre typer av diagram är gjorda. I de två första diagramtyperna jämförs bullerstörning och mätstorhet för respektive tåg. Den andra typen av diagram har bullerstörning som funktion av mätstorheterna.

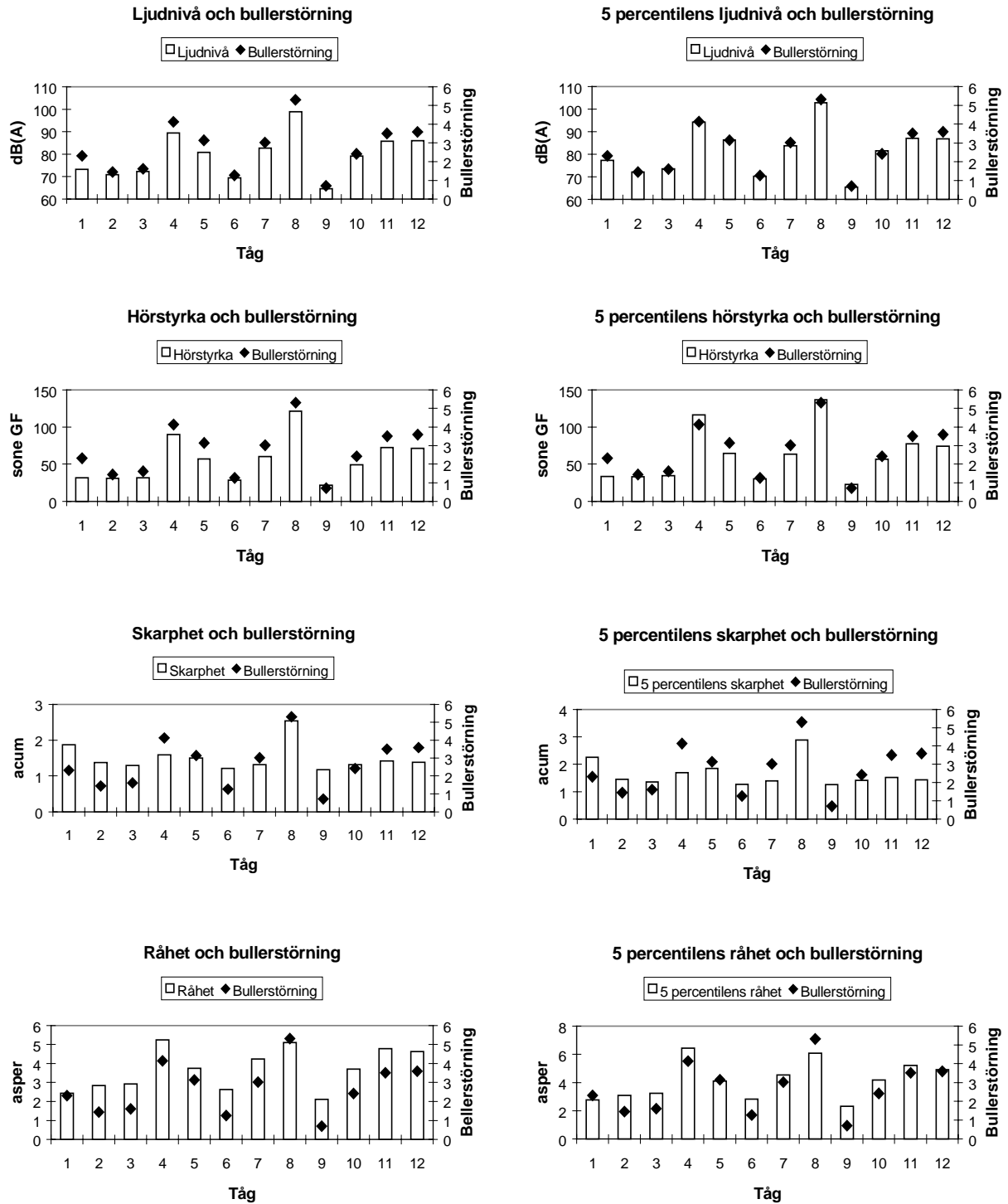
### 1.1 Jämförelse mellan tågen

Figur 1.1 visar responsen för de två grupperna vid respektive tåg (ljud). Efter x-axeln är tågen definierade 1-12 och 1-32 och bullerstörningen representeras av staplar. I den andra typen av diagram finns två y-axlar, den ena axeln representerar medelvärdet av bullerstörningen från de två grupperna och den andra representerar någon mätstorhet. X-axeln representeras fortfarande av respektive tågljud. Med dessa diagram ser man skillnaden mellan bullerstörning och mätstorheterna för varje tåg.



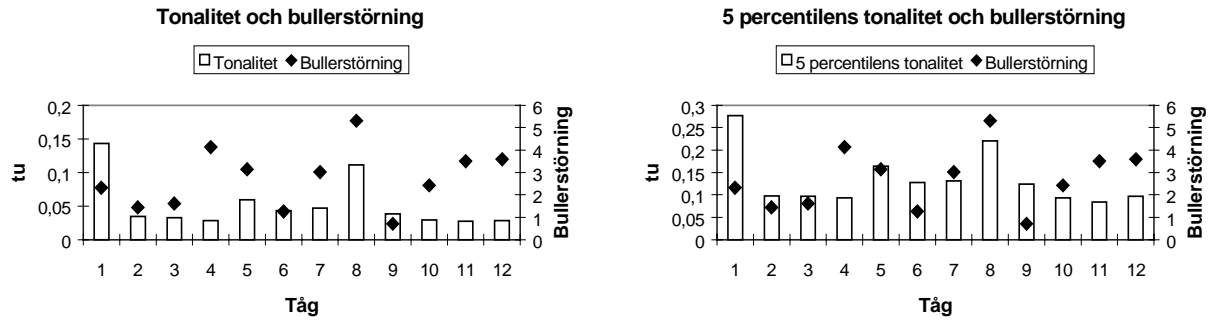
Figur 1.1 Jämförande diagram mellan bullerstörning och testgrupperna. Efter x-axeln finns respektive tåg, efter y – axeln finns bullerstörningen.

Diagram

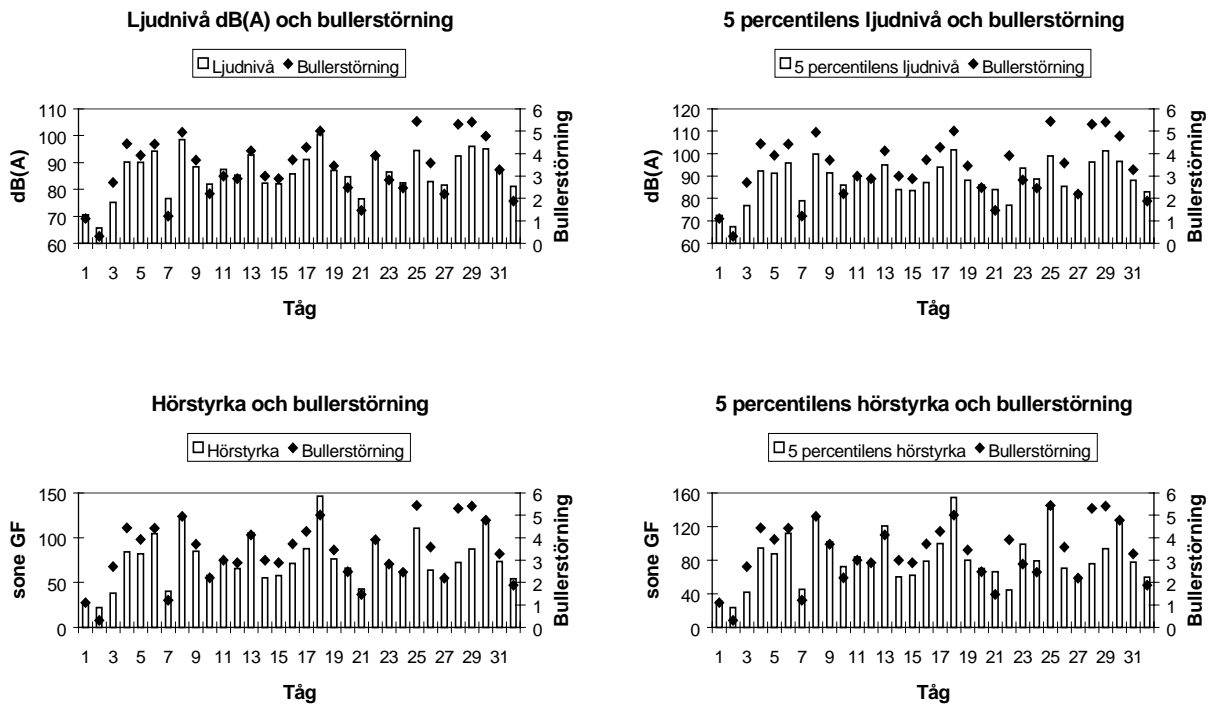


Figur 1.2 Jämförande diagram från Test 1. Efter x-axeln finns tåg 1 – 12, efter vänstra y-axeln avbildas mätstorheterna och efter högra avbildas bullerstyrningen. I figuren visas mätstorheterna som staplar och bullerstyrningen visas som kvadrat.

Diagram

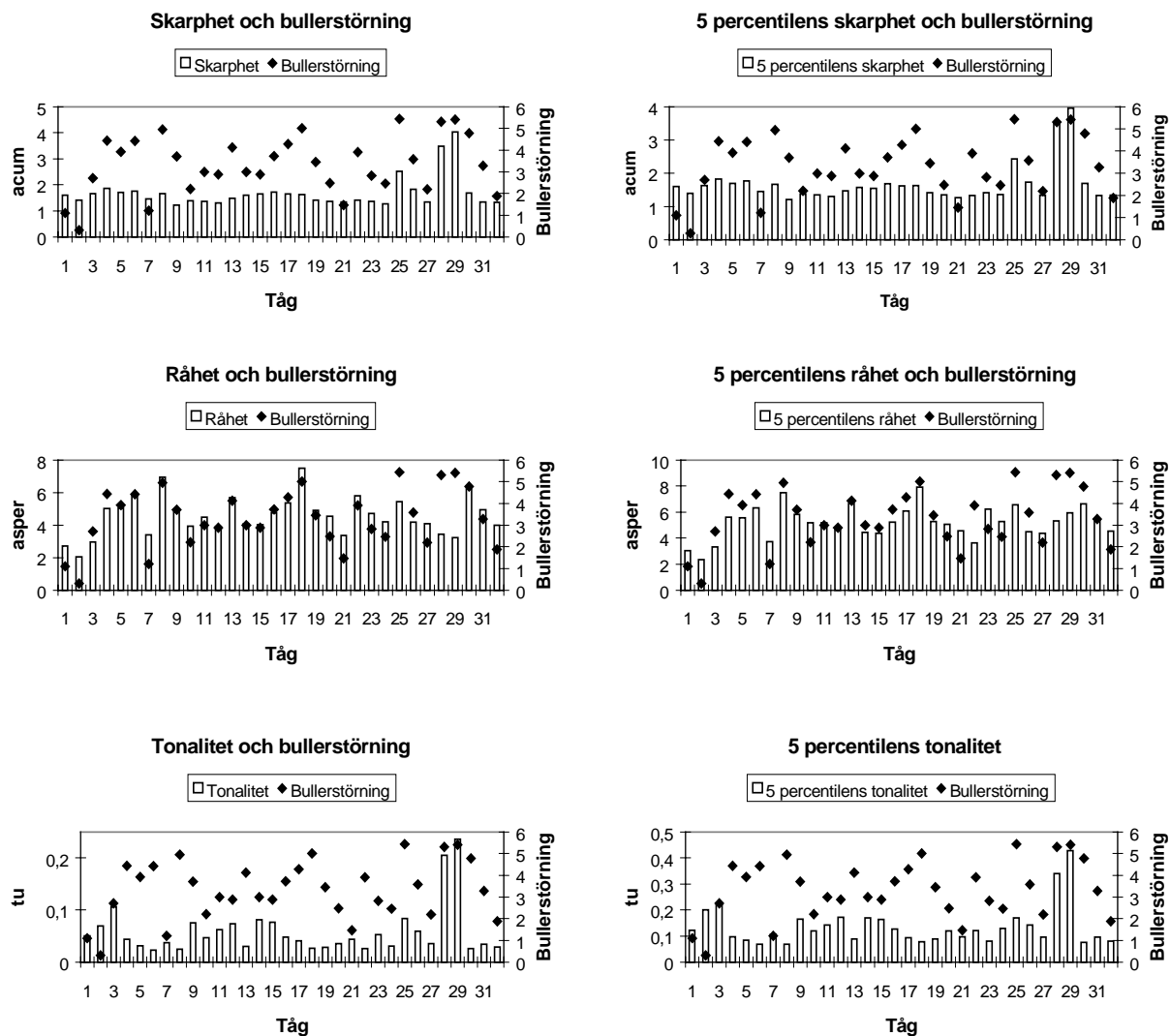


Figur 1.3 Jämförande diagram från Test 1. Efter x-axeln finns tåg 1 – 12, efter vänstra y-axeln avbildas mätstorheterna och efter högra avbildas bullerstörningen. I figuren visas mätstorheterna som staplar och bullerstörningen visas som kvadrat.



Figur 1.4 Jämförande diagram från Test 2. Efter x-axeln finns tåg 1 – 32, efter vänstra y-axeln avbildas mätstorheterna och efter högra avbildas bullerstörningen. I figuren visas mätstorheterna som staplar och bullerstörningen visas som kvadrat.

## Diagram

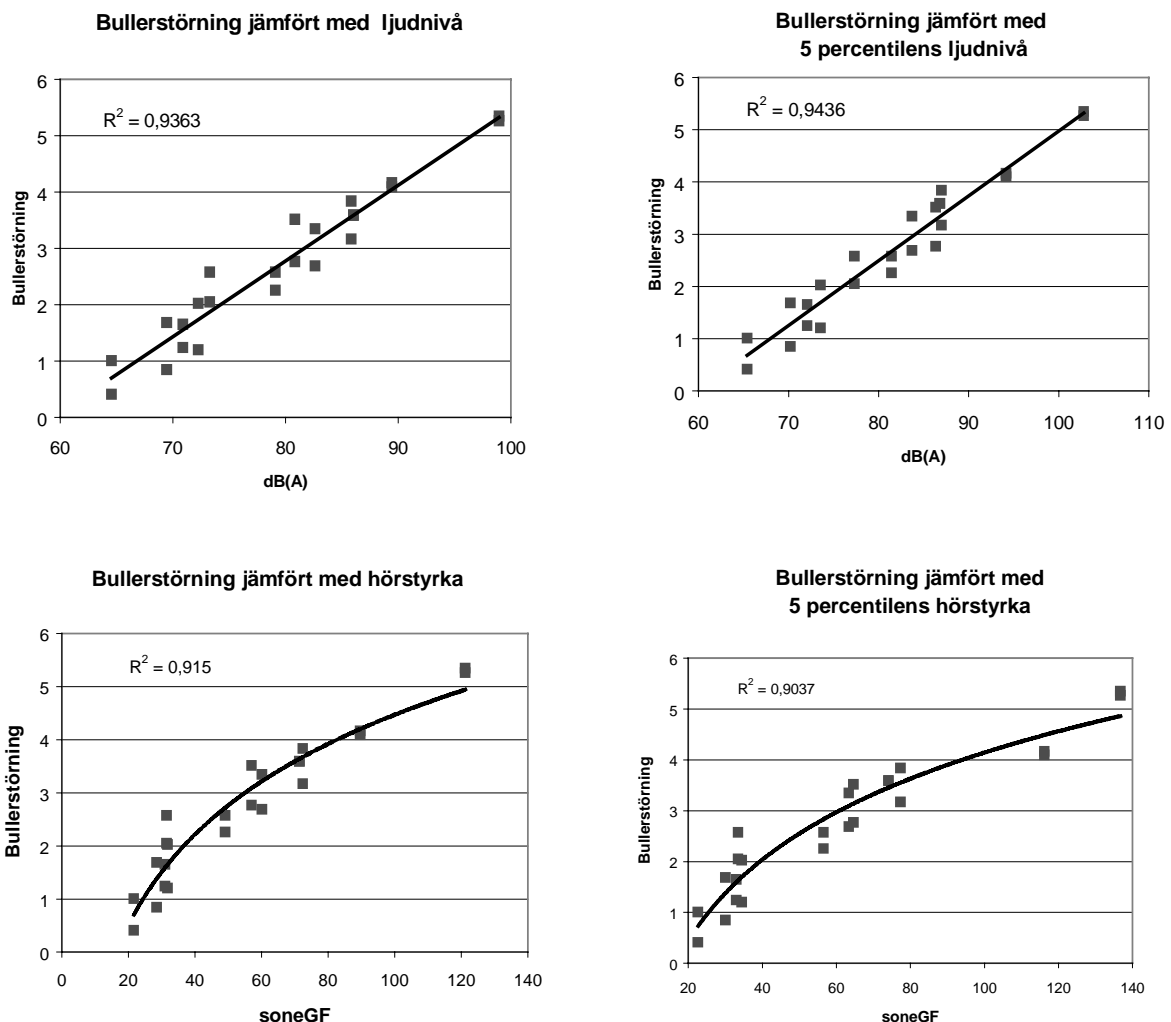


Figur 1.5 Jämförande diagram från Test 2. Efter x-axeln finns tåg 1 – 32, efter vänstra y-axeln avbildas mätstorheterna och efter högra avbildas bullerstörningen. I figuren visas mätstorheterna som staplar och bullerstörningen visas som kvadrat.

## 1.2 Jämförelse mellan bullerstörning och mätstorhet

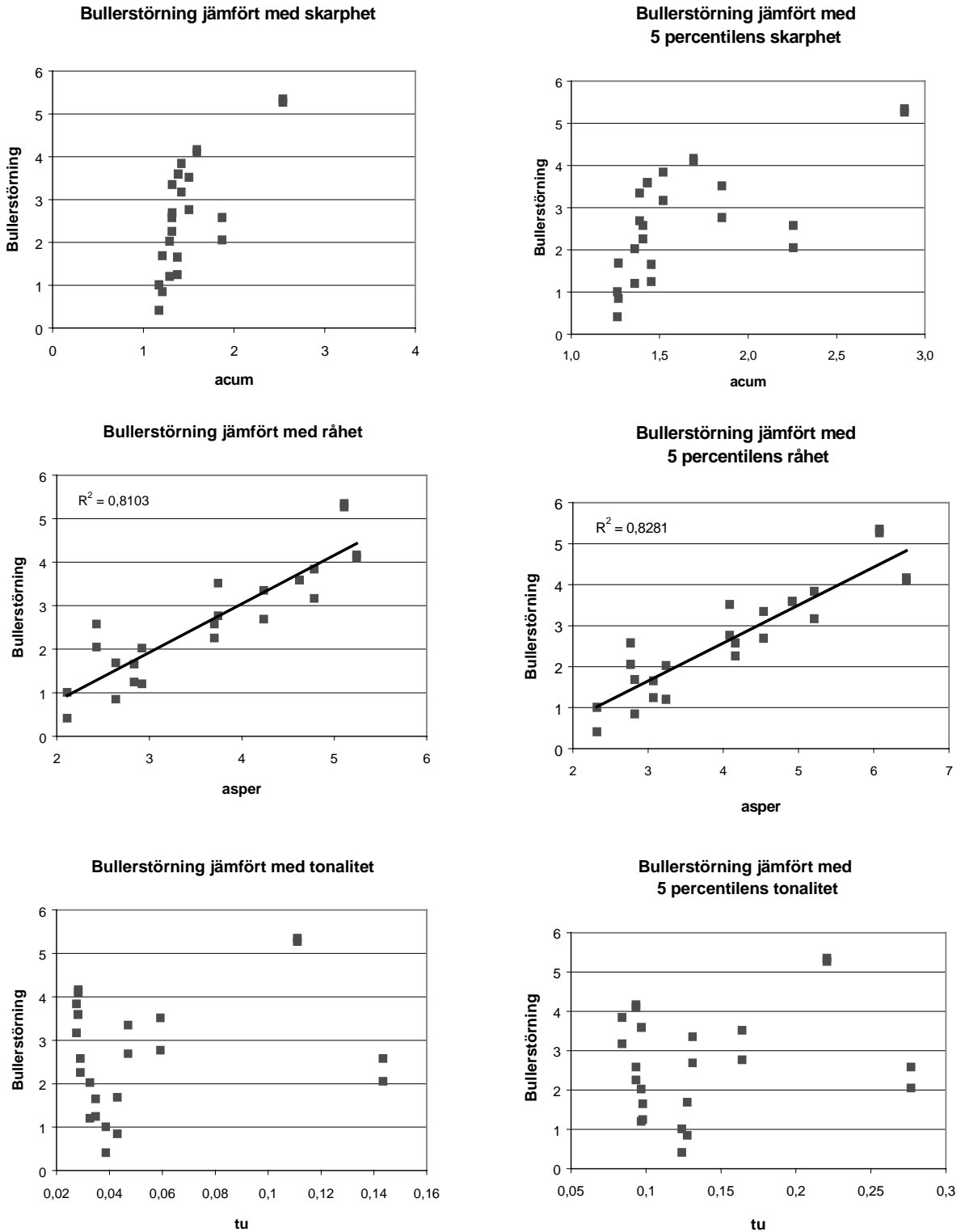
Bullerstörning och mätstorheterna kan jämföras i ett diagram. Bullerstörningen plottas som funktion av respektive mätstorhet. För att göra diagrammen sorteras data i stigande ordning efter bullerstörning. Förhållandet mellan bullerstörning och respektive mätstorhet kan representeras av ekvationer, linjer och  $R^2$ -värden som är inlagda i diagrammen tillhör denna ekvation. Högt  $R^2$ -värde betyder att det stämmer bra.

Vid denna typ av inspelningar finns både höger- och vänsterkanal. Mätstorheten kan representeras på tre sätt, det ena är att ta maxvärdet från någon av kanalerna, det andra är att ta medelvärdet av de två kanalerna och det tredje sättet är att plotta både höger- och vänsterkanal. Till dessa diagram användes medelvärdet från kanalerna p.g.a. att det stämde bäst. Bullerstörningen redovisas från båda testgrupperna, alltså är det två responser till varje mätvärde.



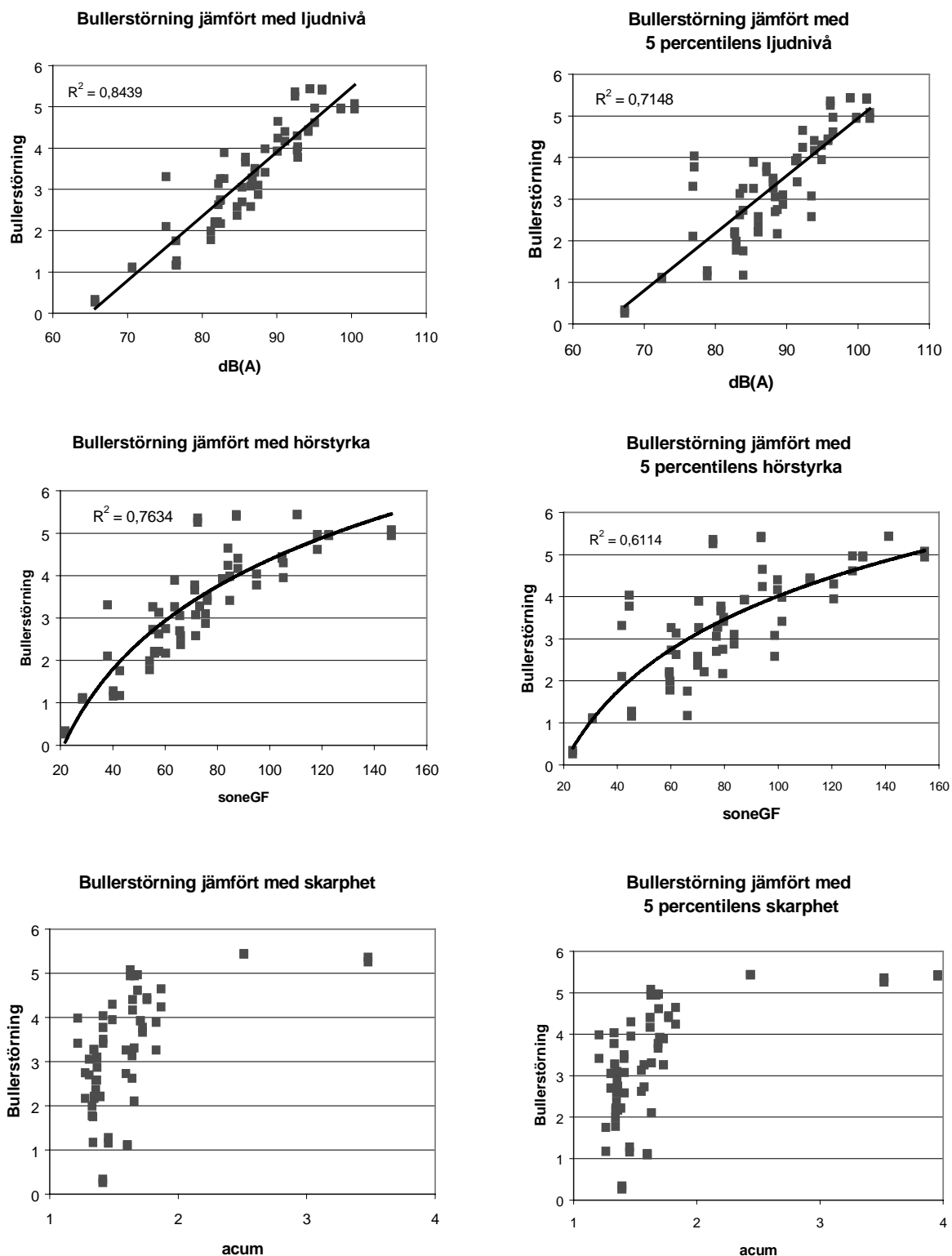
Figur 1.6 Jämförande diagram från Test 1. Efter x-axeln finns mätstorheterna och efter y-axeln avbildas bullerstörningen. I figuren är också trendlinjer inlagda med tillhörande  $R^2$ -värden.

## Diagram



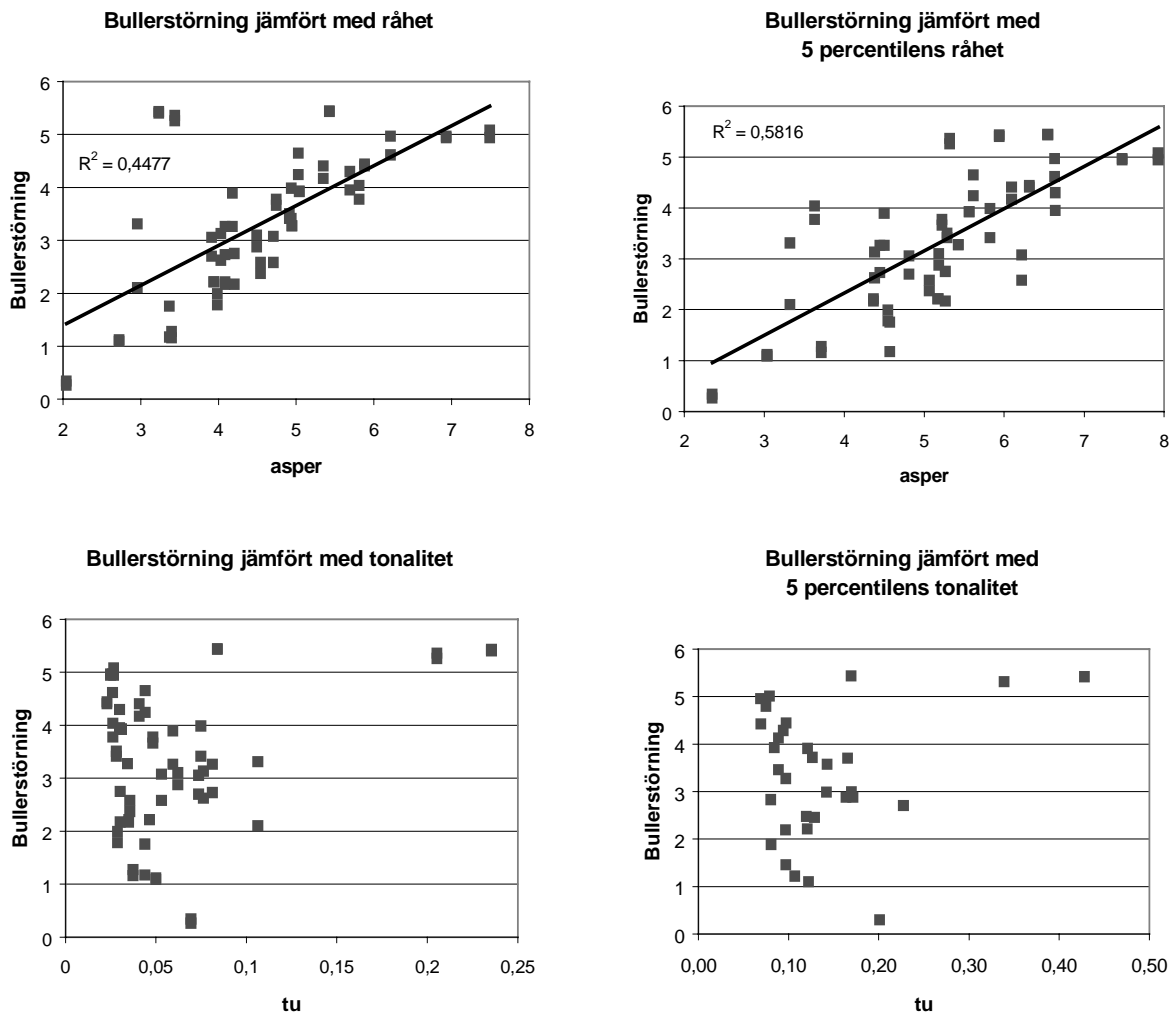
Figur 1.7 Jämförande diagram från Test 1. Efter x-axeln finns mätstorheterna och efter y-axeln avbildas bullerstyrningen. I figuren är trendlinjer inlagda med tillhörande  $R^2$ -värden, tonalitet och skarphet har ingen trendlinje p.g.a. dessa inte stämmer så bra med bullerstyrningen.

## Diagram



Figur 1.8 Jämförande diagram från Test 2. Efter x-axeln finns mätstorheterna och efter y-axeln avbildas bullerstörningen. I figuren är också trendlinjer inlagda med tillhörande  $R^2$ -värden för A-vägd ljudtrycksnivå och hörstryka.

### Diagram



Figur 1.9 Jämförande diagram från Test 2. Efter x-axeln finns mätstorheterna och efter y-axeln avbildas bullerstörningen. Trendlinjer finns inlagda med tillhörande  $R^2$ -värden för råhet.