

Inventering av internationella bullerskyddsåtgärder för höghastighetståg

Inventory of international noise preventive
measures for high-speed trains

Jonas Andersson

REFERAT

Inventering av internationella bullerskyddsåtgärder för höghastighetståg

Jonas Andersson

Utvecklingen inom järnvägssektorn går mot snabbare och mer effektiva transporter, dock begränsas utvecklingen av att det krävs nya och mer utvecklade spår och tåg för att uppnå det. Med dagens infrastruktur och tågmodeller är hastigheter på 200 km/h det maximala. Behovet att öka kapaciteten och införa höghastighetstrafik i Sverige utreds i nuläget. Med höghastighetstrafik avses hastigheter på minst 250 km/h. Banverket har som förvaltare av järnvägen ett sektorsansvar för miljön och således även buller. I och med ökade hastigheter ökar även bullret från tågen. Dessutom uppkommer nya former av buller vid hastigheter över 300 km/h. Det buller som uppstår vid dessa höga hastigheter är så kallat aerodynamiskt buller som kommer av turbulenta luftflöden runt tåget.

Syftet med examensarbetet har varit att samla in kunskap som finns internationellt angående bulleremissioner och åtgärder mot dessa. Information har samlats in genom en litteraturstudie samt genom personlig kontakt med personer inom den internationella järnvägssektorn. Utifrån kunskapsläget internationellt har en modell skapats med de åtgärder som bedömts viktigast. Tanken med modellen är att ge en bild av de åtgärder mot och källor till bullret som främst kommer av höghastighetstrafik. Men även för att ge Banverket en kompetensgrund att stå på inför en framtida implementering av höghastighetstrafik.

Bullerskyddsåtgärder som prioriteras internationellt är planeringen om var banan ska dras. Denna åtgärd utreds under planerandefasen vid nybyggnation av bana. I denna fas kan problem likväl skapas som elimineras och det är här som grunden läggs för framtiden. Utvecklingen av tågen och tekniska lösningar som räldämpare, bullerskärmar och optimal design av banunderbyggnaden är även det prioriterade områden inom höghastighetstrafiken internationellt. Då är det främst utveckling av tekniska lösningar för att minimera det aerodynamiska buller som uppkommer samt buller från kontakten mellan hjul och räl.

Den generella arbetsgången är att fokus ligger på åtgärder mot källbullret. Därefter prioriteras åtgärder som ligger längs ljudutbredningsvägen och sist kommer de åtgärder som tillämpas vid mottagaren av bullret.

Nyckelord: Järnväg, buller, höghastighetståg, bullerskyddsåtgärder

ABSTRACT

Inventory of international noise preventive measures for high-speed trains

Jonas Andersson

The development within the railway sector is heading towards faster and more effective transports. The limitations are that new developments must be applied on the trains as well as the tracks. With the infrastructure and train models that we have today, speeds up to 200 km/h is the maximum speed. The needs to raise the capacity and implement high-speed trains in Sweden are under investigation. The speed of the trains must exceed 250 km/h to be labeled as high-speed trains. Banverket as the infrastructure manager has a responsibility for the environment and the noise pollution created by train traffic. As the speed increases so does the noise as well, but it is also new forms of noise that appear with speeds over 300 km/h. The noise that appears around these velocities is called aerodynamic noise and it is coming from the turbulence in the air around the train.

The aim of the thesis has been to gather knowledge internationally on the issues concerning noise emissions and measures to prevent them. The information has been gathered thorough a literature survey and by interviews with people within the international railway sector. By the inventory of the knowledge a model has been developed with the issues that are judged to be the most important. The idea with the model is to give a picture of the measures to prevent the noise and sources of the noise that are coming from high-speed traffic. It is also made for Banverket to get the competence to deal with a future implementation of high-speed traffic.

A noise preventive measures that is prioritized internationally is planning the localization of the track. This measure is treated during the land use planning when a new line should be built. In this phase problems can either be created or eliminated and it is here the foundation is built for the future. The development of the trains and technical solutions such as rail dampers, noise screens and optimal track design are also measures that have high priority internationally. It is mainly the development and the technical solutions to minimize the aerodynamic noise that occurs and also the noise that are emitted from the contact between the wheels and the rail.

The general working process is that the focus is on reducing the noise from the source. After that the priority is to minimize the noise along the propagation path and at last measures at the recipient.

Keywords: Railway, noise, high-speed trains, noise preventive measures

*Department of Earth Sciences, Program for Air, Water and Landscape Sciences.
Uppsala University. Geocentrum, Villavägen 16, SE-752 36 UPPSALA
ISSN 1401-5765*

FÖRORD

Detta examensarbete har utförts som avslutning på civilingenjörsprogrammet i miljö- och vattenteknik vid Uppsala universitet. Arbetet omfattar 30 högskolepoäng och har utförts åt Banverket i Borlänge. Ämnesgransklare har varit Conny Larsson vid institutionen för geovetenskaper, luft, vatten och landskapslära vid Geocentrum i Uppsala.

Jag vill tacka Terje Johnsson på Banverket i Borlänge för idén till examensarbetet och Karin Blidberg för aktuell information angående lagstiftning inom bullerområdet. Jag vill även ge ett stort tack till Per-Olof Larsson Kråik på Banverket i Luleå som varit min handledare och som har vridit och vänt på mina tankar och funderingar under projektets gång.

Sist vill jag rikta ett varmt tack till Vivianne Karlsson på Banverket i Borlänge, utan ditt engagemang hade jag inte skrivit mitt examensarbete här.

Borlänge 2009

Jonas Andersson

Copyright © Jonas Andersson och Institutionen för geovetenskaper, Luft-, vatten och landskapslära, Uppsala universitet.

UPTEC W09 023, ISSN 1401-5765

Tryckt hos Institutionen för geovetenskaper, Geotryckeriet, Uppsala universitet, Uppsala 2009

POPULÄRVETENSKAPLIG SAMMANFATTNING

Inventering av internationella bullerskyddsåtgärder för höghastighetståg

Jonas Andersson

Järnvägen har som transportslag den minsta miljöpåverkan, men trots denna fördel behöver järnvägen utvecklas för att fortsätta minska sina redan små utsläpp. Banverket har som förvaltare av järnvägen i Sverige ett sektorsansvar för att minimera miljöpåverkan. Den påverkan som berör flest människor och anses vara den största är oönskade ljudnivåer kallat buller. Banverket arbetar kontinuerligt med att minimera antalet påverkade med olika åtgärder längs befintlig och vid nybyggnation av bana. Det är åtgärder som bullerskärmar och åtgärder på fastigheter som är de vanligaste idag.

Det finns olika typer av buller som uppkommer på olika sätt och vid olika hastigheter. I den infrastruktur som Banverket förvaltar framförs tåg med den maximala hastigheten 200 km/h. Vid dessa hastigheter dominerar det så kallade rullningsbullret som uppkommer vid kontakten mellan hjul och räl. Denna form av buller minskas genom att åtgärder sätts in direkt på hjulen och rälen. Detta för att minska de vibrationer som uppkommer och sedan avges som ljud. Det går även att minska bullret med skärmar längs spåret och åtgärder på utsatta bostäder.

Ljudvågor utbreder sig genom att luften trycks ihop och dras isär och på så sätt sprids ljudet. Fysiken bakom generell akustik och vågrörelselära är välkänd. Yttre förutsättningar som kan ha en stor påverkan på ljudet är bland annat väder och topografi. Dessa förhållanden kan bidra till att ljudet sprids flera hundra meter längre än normalt.

För att tillgodose kundernas behov på snabbare transporter och ökade möjligheter att förflytta sig utreds nu frågan om att införa höghastighetstrafik i Sverige. Med detta menas hastigheter på minst 250 km/h. Med dagens järnväg och tekniker runt den är det hastigheter på maximalt 250 km/h som får användas. Det kommer att krävas nya banor och till viss del ny teknik för att framföra tåg i dessa höga hastigheter. I och med detta ökar kraven på anläggningen och vid ökade hastigheter ökar även miljöpåverkan. Vid dessa höga hastigheter uppkommer en ny källa till bullret som kallas aerodynamiskt buller och kommer av att luften runt tåget hamnar i så pass stor turbulens att det avger ett ljud som dominerar över övriga källor. Denna typ av luftturbulens som orsakar buller kommer från ojämnheter i vagnkroppen, utstickande föremål samt frampartiet på tåget. På grund av bullrets komplexitet, frekvensinnehåll och dess starka hastighetsberoende är det svårt att hindra bullret från att sprida sig.

Höghastighetstrafik är implementerat i många länder med Japan och Frankrike som pionjärer. I Japan har höghastighetstrafik funnits sedan 1960-talet och utvecklingen går fortfarande framåt med nya tågtyper för mer effektiva transporter. Höghastighetståg är mycket utvecklingsbara med avseende på bulleralstrande komponenter. Det pågår flera projekt internationellt där avsikten är att öka komforten och hastigheten men också att minimera påverka på miljön i form av bland annat buller.

Detta arbete syftar till att identifiera de specifika källorna till bullret samt åtgärder för att minska bullret för höghastighetstrafik internationellt. Eftersom utvecklingen är längre gången internationellt än i Sverige är tanken att dra lärdom av den problematik som uppkommit där, vilka åtgärder som bedömts viktiga och hur de implementerats. Resultaten i undersökningen har föregåtts av en litteraturstudie där akustiska fenomen har behandlats. Även ljudets utbredning tillsammans med faktorer som påverkar utbredningen har tagits hänsyn till. Därefter har en omfattande faktasökning gjorts med avseende att identifiera specifika bullerproblem för höghastighetstrafik. I studien har även förvaltarnas prioriteringar mot källbullret för höghastighetstrafik behandlats. I och med detta har befintlig litteratur och aktuella rapporter behandlats men information har även inhämtats via intervjuer av personer inom både förvaltning av infrastruktur, tågoperatörer, forskare och tåg tillverkare. Utifrån den information som tagits fram har en modell utarbetats med de prioriterade åtgärderna mot bullret. Denna modell har validerats mot en internationell expertgrupp och åtgärderna har klassificerats ur ett prioriteringsperspektiv.

Resultatet av undersökningen är tänkt att bidra till en ökad förståelse för komplexiteten med bullerkällorna för höghastighetståg. Med denna modell skall Banverket lättare kunna prioritera åtgärder mot buller vid ett införande av höghastighetstrafik. Åtgärder mot det aerodynamiska bullret som framkommer vid de höga hastigheterna är prioriterat internationellt. Det gäller framförallt tåg tillverkare men intresset att minska detta buller finns även hos förvaltarna. Det är även viktigt att noggrant planera var nya sträckor skall dras. Vid denna fas kan framtida problem både skapas och elimineras. En stor vikt bör läggas på att planera nya järnvägar med avseende på lokalisering av banan. Detta för att minimera antalet berörda av buller samt att maximera hastigheten.

En generell trend med bullerarbetet i de länder som undersökts är att först och främst prioritera åtgärder på källan. Att minska källbullret gör att övriga åtgärder kan bli överflödiga. Därefter är det åtgärder på ljudets utbredningsväg som det fokuseras på. Det sker i former av bullerskärmar och bullervallar. En bullerskärm minskar bullret effektivt men medför stora ingrepp i natur och på de resandes utsikt. Sist prioriteras åtgärder på berörda byggnader, ofta i form av fönsterbyten och åtgärder på fasader. Denna åtgärd bör även ses i framtiden om det sista alternativet för att minska bullret hos mottagaren.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

REFERAT	ii
ABSTRACT	iii
FÖRORD	iv
POPULÄRVETENSKAPLIG SAMMANFATTNING	v
INNEHÅLLSFÖRTECKNING	vii
1 INLEDNING.....	1
1.1 BAKGRUND	1
1.2 SYFTE	2
1.3 UPPLÄGG	2
1.4 AVGRÄNSNING	2
2 METODER OCH TEKNIKER	3
2.1 LITTERATURSÖKNING	3
2.2 ENKÄT	3
3 ALLMÄNT OM LJUD	5
3.1 LJUDET UTBREDNING	6
3.1.1 Refraktion	8
3.1.2 Absorption	9
3.1.3 Turbulens.....	10
3.1.4 Markdämpning	10
3.2 VÄGNINGSFILTER	10
3.3 BULLER	11
3.3.1 Viktningsmått.....	11
3.3.2 Påverkan på människor.....	11
3.3.3 Nationella riktvärden och mål.....	12
3.3.4 Statistik på antalet berörda i Sverige	13
4 KONVENTIONELLA TÅG	14
4.1 RESANDETÅG	14
4.2 GODSTÅG.....	14
4.3 BULLEREMMISSIONER	14
4.3.1 Stationärt buller.....	15
4.3.2 Rullningsbuller	15
5 BULLERSKYDDSÅTGÄRDER NATIONELLT	19
5.1 ÅTGÄRDER FÖR ATT REDUCERA BULLRET.....	19
5.1.1 Direkta bullerskyddsåtgärder.....	19
5.1.2 Indirekta bullerskyddsåtgärder	21
5.1.3 Övriga åtgärder.....	22
6 HÖGHASTIGHETSTÅG	24
7 BULLERSKYDDSÅTGÄRDER INTERNATIONELLT	28
7.1 JAPAN	28

7.1.1	<i>Japan Railways Group (JR-Group)</i>	28
7.1.2	<i>Shinkansen</i>	28
7.2	SPANIEN.....	32
7.2.1	<i>Red Nacional de los Ferros Arriles Española (RENFE)</i>	32
7.2.2	<i>Alta Velocidad Española (AVE)</i>	33
7.3	FRANKRIKE.....	34
7.3.1	<i>Société Nationale des Chemins de fer Français (SNCF)</i>	34
7.3.2	<i>Train à Grande Vitesse (TGV)</i>	35
7.4	TYSKLAND.....	37
7.4.1	<i>Deutsche Bahn (DB)</i>	37
7.4.2	<i>Intercity Express (ICE)</i>	38
8	ANALYS	42
9	DISKUSSION	44
9.1	TILLÄMPNING HOS BANVERKET.....	45
10	SLUTSATSER	48
11	REFERENSER	50
BILAGA 1	I
BILAGA 2	a

1 INLEDNING

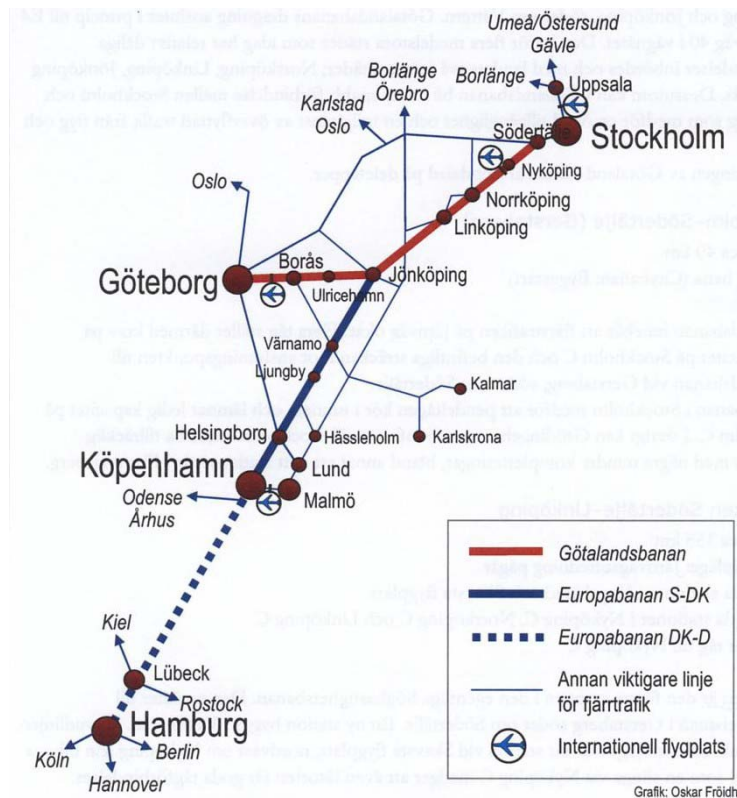
Banverket har som förvaltare av den mesta delen av järnvägen i Sverige ett ansvar att upprätthålla en så god standard som möjligt på järnvägsnätet.

1.1 BAKGRUND

Transporter på järnväg är det mest miljövänliga alternativet i dagsläget, det är dock inte helt fritt från påverkan på omgivningen. En miljöstörning som påverkar väldigt många människor och som anses vara det största problemet, är buller. Det är Banverkets ansvar att se till att så få människor som möjligt påverkas av denna störning. Bulleremissioner från järnvägen är ett komplext problem även internationellt och många forskningsprojekt behandlar uppkomsten och de åtgärder som reducerar bullret och dess spridning.

I dagsläget är efterfrågan på järnvägskapacitet på de viktigaste järnvägsstråken mycket stor hos Banverket. Detta har lett till ett pågående arbete med att utreda behovet av svenska separata höghastighetsbanor, för att kunna tillgodose den ökande efterfrågan. Regeringen har gett i uppdrag till Banverket att utreda huruvida det skulle vara lönsamt med höghastighetsbanor som klarar hastigheter upp emot 320 km/h (Banverket, 2008). De tänkta banorna är Götalandsbanan och Europabanan (Nelldal, 2008) se Figur 1. Inom Banverket pågår ett kontinuerligt arbete med att utveckla krav och specifikationer för en framtida höghastighetsjärnväg, dock har inget definitivt beslut tagits angående införandet av svenska höghastighetsbanor.

Tåg som framförs med en hastighet på minst 250 km/h kallas per definition höghastighetståg. I och med att hastigheten ökar så uppkommer andra former av buller än på de tåg som framförs konventionellt idag. Denna problematik behandlas redan i länder där höghastighetstrafik är kommersiell.



Figur 1. Schematisk bild över de planerade höghastighetsbanorna i Sverige (Fröidh, 2008)

1.2 SYFTE

Syftet med examensarbetet var att se vilka källorna är till buller vid hastigheter över 250 km/h samt att inventera och identifiera vilka bullerreducerande åtgärder som prioriteras internationellt där höghastighetståg är i kommersiell trafik.

Arbetets mål har varit att ta fram en enkel modell med prioriterade åtgärder som sedan skall ligga till grund för fortsatt arbete med bullerfrågor för höghastighetsbanor nationellt.

1.3 UPPLÄGG

Arbetet har utförts som en litteraturstudie där internationella bullerskyddsåtgärder kommer att inventeras. Efter studien har en arbetsmodell med prioriterade åtgärder utformats för att sedan valideras mot en internationell expertgrupp.

1.4 AVGRÄNSNING

I och med fokuseringen på höghastighetståg, vilket medför i första hand resandetåg, så har problemen med godståg att utelämnas.

2 METODER OCH TEKNIKER

I denna rapport har olika metoder och vetenskapliga tekniker använts för att identifiera problem, sätta sig in i kunskapsläget och behandla och analysera de resultat som framkommit. En omfattande litteraturstudie har genomförts inom ämnesområdet för att ge en grund till en teoretisk modell. I modellen klassificerades de viktigaste åtgärderna mot buller med hjälp av en internationell expertgrupp.

2.1 LITTERATURSÖKNING

Det finns i huvudsak två tekniker att välja för att samla in information till en undersökning, en kvalitativ metod samt en kvantitativ metod (Patel & Davidsson, 2003). Den kvalitativa tekniken kännetecknas av att insamlingen av data sker från få enheter samt att de data som samlas in är noga analyserad och bearbetad. Detta kan ske genom intervjuer eller tolkande analyser av befintlig data.

Med kvantitativ teknik menas att många enheter använts för insamlingen av data. Detta betyder att en stor bredd fås vid insamlingen samt att den inte blir lika bearbetad per enhet. Det är bredden och mängden data som är viktigt (Patel & Davidsson, 2003).

Den teknik som huvudsakligen används i denna rapport är den kvalitativa. Detta för att få den expertkunskap som behövs för att behandla frågeställningen.

Informationen vid datainsamlingen kan delas upp i primärdata och sekundärdata. Med primärdata menas den information som erhålls direkt från personer eller grupper av personer. Man går direkt till den primära informationskällan. Sekundärdata är information som andra personer har samlat in för ett annat syfte än det den nu ska användas till. Detta sker oftast genom publicerade rapporter och artiklar (Jacobsen, 2002).

I denna rapport har insamlandet av information dels skett genom mailkorrespondens (primärdata) dels genom en omfattande litteraturundersökning (sekundärdata).

Litteraturstudien har genomförts inom akustik och ljudutbredning för att få en djupare förståelse och en bra grund för vidare resonemang om problemet. Vidare har denna metod använts för att se till Banverkets åtgärder idag mot buller.

2.2 ENKÄT

Efter litteraturstudiens *State of the art* arbetades en modell fram för att identifiera prioriterade åtgärder. Denna modell testades genom en internationell expertgrupp. Detta skedde genom att ett frågeunderlag skickades ut tillsammans med modellen som sedan sammanställdes under kapitlet analys. För att undersökningen skall vara av god kvalitet bör den uppfylla två krav. För det första ska den vara av hög validitet vilket betyder i denna rapport att expertgruppen skall inneha den kompetens som behövs för att besvara och utvärdera modellen. Den andra faktorn är att undersökningen ska ha en hög reliabilitet. Med detta menas att undersökningen ska kunna besvaras av samma personer vid ett annat tillfälle och samma resultat erhålls (Ejvegård, 2009).

Expertgruppen som användes vid undersökningen ses i Tabell 1. Denna grupp har valts ut genom att de har stor förståelse för bullerfrågor kopplat till järnvägstrafik. De är dels

representanter från internationella järnvägsförvaltare och operatörer av järnvägstrafik, dels för forskarvärlden.

Tabell 1. Expertgruppen som deltog i undersökningen

Namn	Yrke	Företag
Franck Poisson	Coordinator in acoustics and ground vibration research activities	SNCF Innovation and research department
Bernhard Koch	Environmental manager	DB Netz AG
Pedro Pérez del Campo	Director of Environment	ADIF
Hideaki Tsuda	Engineer at the general technology division	JR - Central
David Thompson	Professor	Institute of Sound and Vibration Research, University of Southampton

De vetenskapliga metoder som framförallt användes i denna undersökning var modellbyggande och klassificering av åtgärder. Klassificeringen byggde på modellens teser och användes för att ge Banverket information och förslag på åtgärder vid fortsatt arbete kring höghastighetstrafik.

3 ALLMÄNT OM LJUD

Ljud framkallas av longitudinella mekaniska vågrörelser i ett medium. Med longitudinella vågor menas att partiklarna utbreder sig parallellt med utbredningsriktningen. Vågens partikelrörelser ger upphov till förändringar av det statiska trycket (Larsson, 2008). En periodisk kurva beskriver upprepningen av vågen (Figur 2) där amplituden (trycket [Pa]) är $y_{\max, \min}$ och våglängden är λ_1 . Detta betyder att efter periodtiden T [s] har ljudet utbredd sig λ [m] (Wallin m.fl. 1999). Då gäller ekvation (3.1)

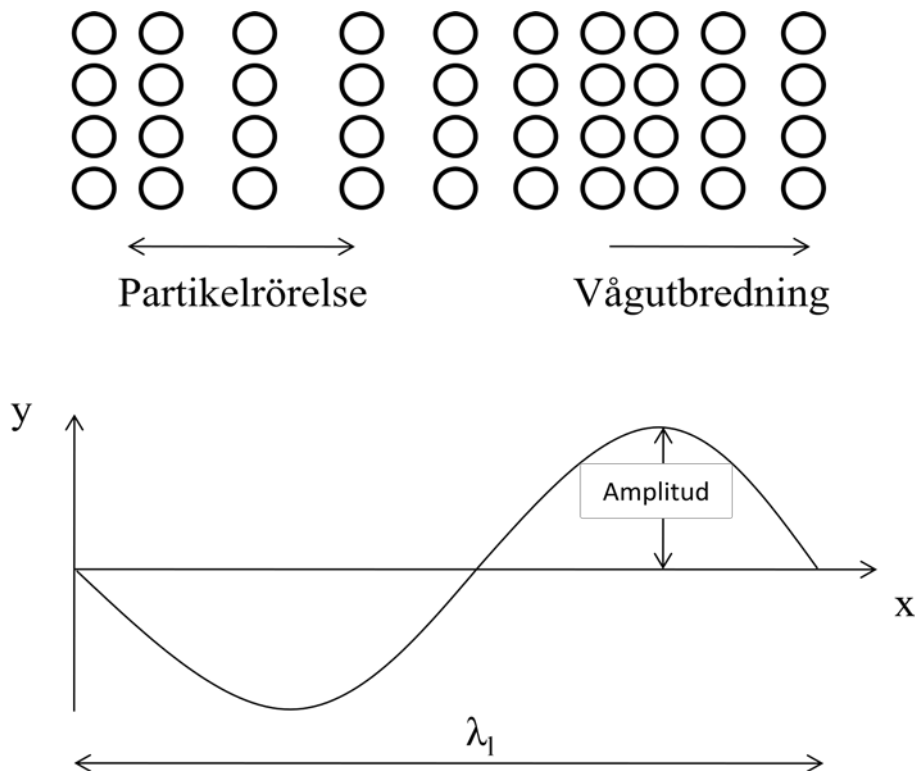
$$c = f \cdot \lambda \quad (3.1)$$

där

$$c = \text{ljudvågens utbredningshastighet} \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$f = \text{ljudets frekvens} \left[\frac{1}{s} = \text{Hz} \right]$$

$$\lambda = c \cdot T = \text{ljudets våglängd} [m]$$



Figur 2. Den övre bilden visar illustrativt en longitudinell vågutbredning. Den undre bilden visar den longitudinella vågens amplitud och våglängd vid en viss tidpunkt.

När mediet förtunnas och förtätas uppkommer densitets- och tryckskillnader i mediet vilket ger upphov till ljud. Ljudets styrka beror av hur stora tryckskillnaderna blir.

Det frekvensintervall som det mänskliga örat uppfattar ligger mellan 20 Hz – 20 kHz. Detta översatt i våglängder är mellan approximativt 17 m – 17 mm i luft (Fahy &

Walker, 1998). Övriga frekvensintervall är infraljud (< 20 Hz) och ultraljud (> 20 kHz). Inom detta intervall ligger ljudtrycksnivåerna (p) mellan $2 \cdot 10^{-5}$ och 60 Pa.

På grund av det stora omfånget på ljudtrycket används en logaritmisk skala med enheten dB (decibel). Ljudstyrkan definieras som

$$L_p = 10 \log \frac{\tilde{p}^2}{p_{ref}^2} = 20 \log \frac{\tilde{p}}{p_{ref}} \quad (3.2)$$

där

$$\begin{aligned} \tilde{p} &= \text{effektiva ljudtrycket [Pa]} \\ p_{ref} &= 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \end{aligned}$$

Det effektiva ljudtrycket (\tilde{p}) ger information om tidsmedelvärdet av signalens effektinnehåll (Wallin m.fl., 1999) och definieras som

$$\tilde{p} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt} \quad (3.3)$$

Där T [s] är den tid över vilket medelvärdet skall bestämmas.

För en överblick på olika ljudnivåer och exempel på vilka ljud de innebär se Tabell 2.

Tabell 2. Typiska ljudtryck och ljudnivåer vid frekvensen 1 kHz (Larsson, 2008)

Ljudtryck [Pa]	Ljudnivå [dB]	Typiska ljud
63	130	Smärtgräns
20	120	Kraftigt bilhorn (avstånd 1 m)
6	110	Bullrig industrilokal
2	100	Tunnelbana (New York)
0,63	90	Extremt gatubuller
0,2	80	10 personbilar vid 50 km/h (avstånd 7 m)
0,063	70	1 personbil vid 50 km/h (avstånd 7 m)
0,02	60	Vanligt samtal
0,0063	50	Kontorsrum
0,002	40	Vardagsrum i förort
0,00063	30	Bibliotek där tystnad råder
0,0002	20	Sovrum nattetid utan mekanisk ventilation långt ifrån staden
0,000063	10	Andning i ekofritt rum
0,00002	0	Hörselgräns

3.1 LJUDETS UTBREDNING

Vid spridning av ljud beskrivs källan som antingen en punkt eller en linje. Ljudet från en punktkälla utbreder sig i alla riktningar och ljudtrycket sprids då enligt:

$$L_p = L_0 - 20 \log \left(\frac{r}{r_0} \right) \quad (3.4)$$

Där L_0 [dB] är ljudtrycket vid avståndet r_0 [m]. För en linjekälla definieras spridningen som:

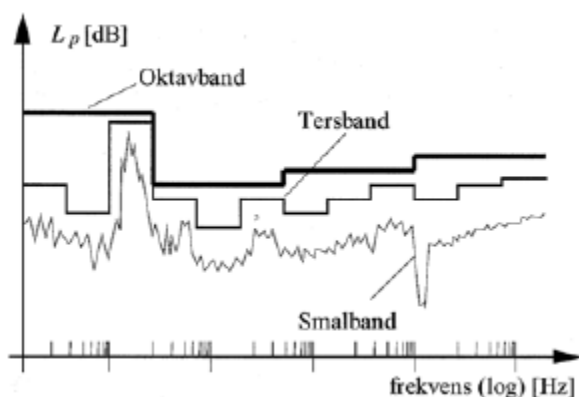
$$L_l = L_0 - 10 \log \left(\frac{r}{r_0} \right) \quad (3.5)$$

Ett tågsätt som passerar antas som en linjekälla vilket medför att ljudet avtar med 3 dB per avståndsdubbling. Vid tillräckligt långa avstånd övergår linjekällan mer och mer till en punktkälla. Ett tågsätt kan även ses som flera punktkällor som bidrar till en ljudbild.

Vid flera källor kan inte ljudtrycksnivåerna adderas ihop direkt eftersom ljudtrycksnivåerna definieras logaritmiskt (och har enheten dB). En summering sker därför av följande additionsregel för okorrelerade källor

$$L_{p_{tot}} = 10 \cdot \log \sum_{n=1}^N 10^{L_{pn}/10} \quad (3.6)$$

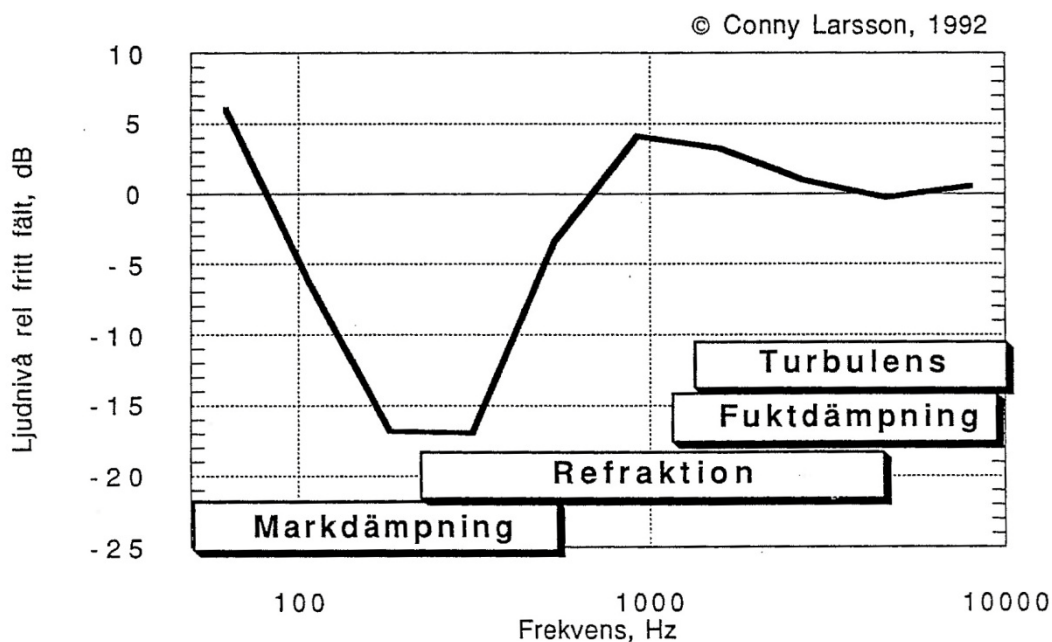
Denna ekvation gäller även vid summering av enskilda frekvenser eller frekvensband (index n). Frekvensbanden är ett vanligt begrepp vid beräkningar av ljudnivåer, olika band innehåller olika frekvensområden (exempel: Oktavband, tersband och smalband). Figur 3 visar fördelningen för olika frekvensband. Vilket band som används beror på vilken upplösning som erfordrats.



Figur 3. Samma ljudspektrum presenterat i smalband, tersband och oktavband.

Vädret kan inverka på ljudutbredningen med omkring 20-25 dB(A)

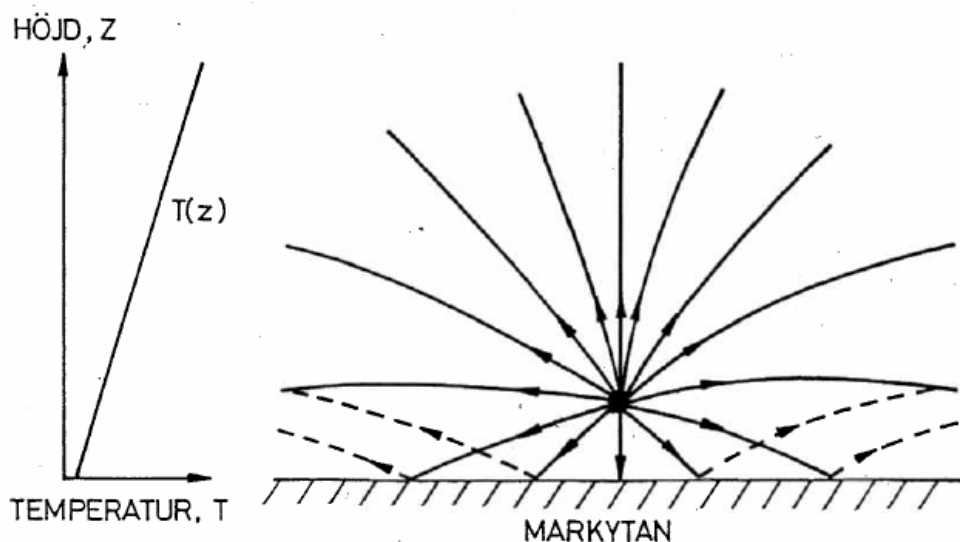
Vädret kan inverka på ljudets spridning genom att antingen dämpa eller förstärka utbredningen och vara så stor som 20-25 dB(A) kan (Larsson, 1994). Figur 4 visar inom vilka frekvensområden olika faktorer förstärker eller försvagar ljudnivån.



Figur 4. Ljudspektrum för olika utbredningsfaktorer med källan och mottagaren på låg höjd och med korta avstånd (Larsson, 2008).

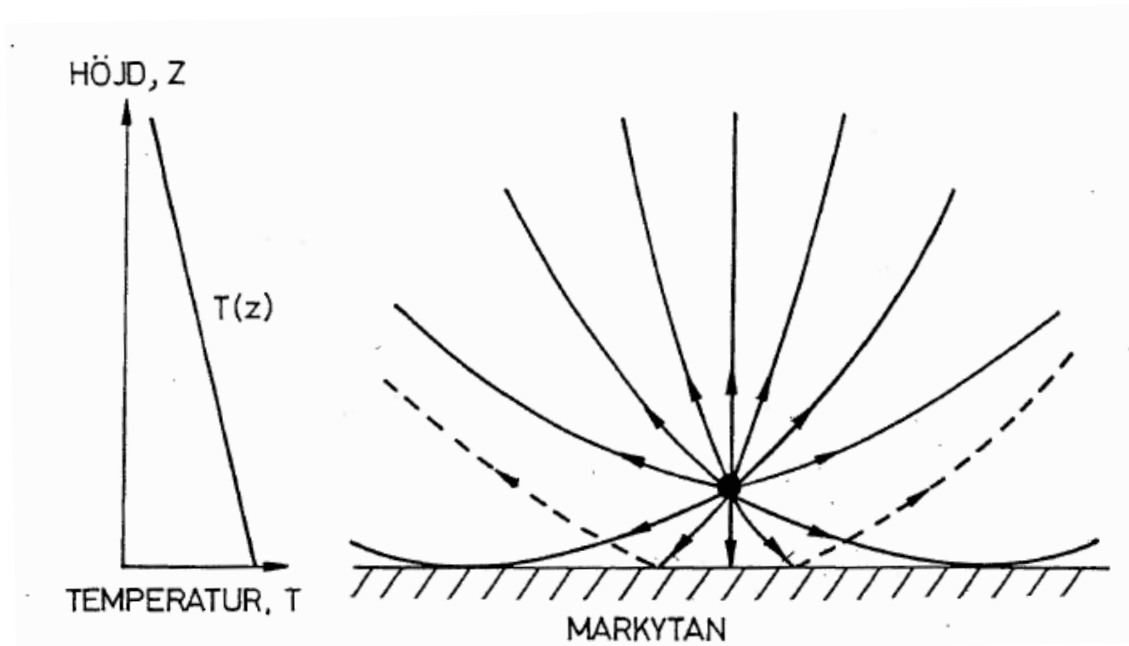
3.1.1 Refraktion

Med refraction avses ljudutbredningens avböjning på grund av olika meteorologiska förhållanden. I Figur 5 ses effekten av en positiv temperaturgradient på ljudvågorna. Positiv vertikal temperaturgradient, d.v.s. temperaturen tilltar med höjden kallas inversion. Ljudvågorna böjs då av mot marken vilket gör att ljudvågorna når längre bort längs marken.



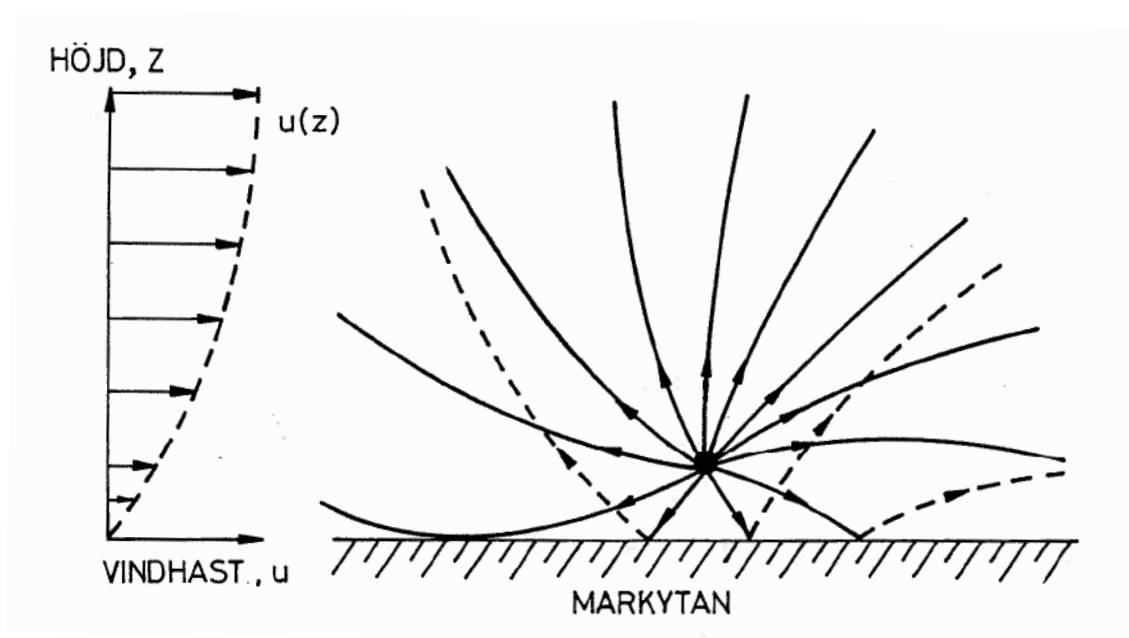
Figur 5. Ljudvågornas avböjning vid positiv temperaturgradient (Larsson, 2008).

Motsatt effekt fås med negativ temperaturgradient (Figur 6). Där reflekteras ljudvågorna bort från marken och ljudet sprids betydligt mindre längs marken.



Figur 6. Ljudvågornas avböjning vid negativ temperaturgradient (Larsson, 2008).

En annan stor inverkan på ljudets spridning är vinden. Figur 7 visar hur ljudet böjs i med- och motvind. Dessa faktorer bidrar mycket till hur ljudet sprids och hur höga ljudnivåerna blir (Larsson, 2008).



Figur 7. Vindens inverkan på ljudvågorna (Larsson, 2008).

3.1.2 Absorption

Ljudabsorptionen ökar med frekvensen och avståndet samt är beroende av relativ fuktighet, temperatur och lufttryck. Absorptionen sker vid all ljudutbredning i atmosfären. Absorptionen kallas ibland för fuktdämpning (Larsson, 1997).

3.1.3 Turbulens

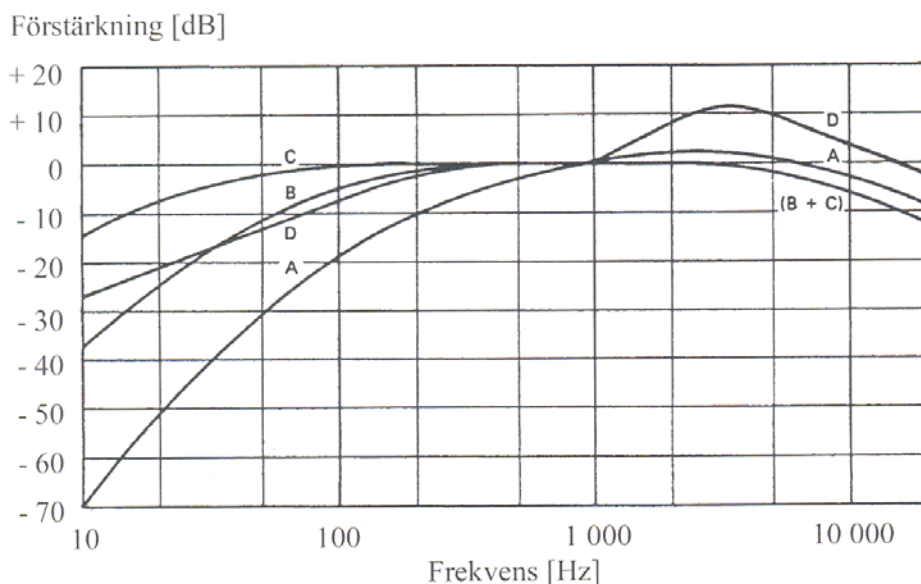
Det finns två typer av turbulens, mekanisk (vind) och termisk (temperatur), som på olika sätt påverkar ljudutbredningen. När faser och amplituder förändras hos ljudvågorna orsakas turbulent spridning. Detta medför att ljudvågor antingen interfererar med varandra och på så sätt förstärks eller försvagas. Ljudvågorna kan även påverkas av markens dämpning eller att vädrets inverkan på fluktuationerna medför en ökad eller minskad spridning av ljudet. Den turbulenta spridningen kan nå de områden som i lugna förhållanden ej nås, till exempel områden med ljudskugga (Åström, 2003).

3.1.4 Markdämpning

Denna dämpningsfaktor är beroende av dels topografin, vegetationen på marken samt markens skrovlighet. Dock är dämpningen följd av vegetation relativt liten. Endast cirka 1 dB(A) dämpas efter 10-20 meter av tätt buskage. En viss psykologisk inverkan tenderar dock vegetationen att ha. Ser man inte källan till bullret kan det uppfattas lägre (Svenska kommunförbundet, 1998). Dämpningen beror av markens skrovlighet och materialet i sig. Hårda plana ytor har ingen dämpning av ljudutbredningen.

3.2 VÄGNINGSFILTER

Hur ett ljud uppfattas är beroende på vem man frågar. Det faktiska värdet (decibel [dB]) beskriver ljudtrycksnivåerna men hur det uppfattas är beroende av den som utsätts för ljudet. Olika frekvenser uppfattas olika av det mänskliga örat (Berglund m.fl. 1999). I och med detta så innehåller ljudnivåmätare filter, så kallade vägningsfilter som förstärker signalen vid olika frekvenser (Figur 8).



Figur 8. Filterkurvor för ljudnivåmätarens A, B, C och D filter (Wallin m.fl. 1999).

A-filtret är det vägningsfilter som används mest (Johansson, 2002), framförallt vid beräkningar av människors påverkan. Filtret viktas så att förstärkningen är negativ vid frekvenser < 1 kHz för att kompensera för människans lägre känslighet vid låga frekvenser (Wallin m.fl. 1999).

3.3 BULLER

Den allmänna definitionen på önskat ljud är buller.

3.3.1 Viktningsmått

Inom järnvägssektorn beskrivs buller med främst två mått, L_{max} (maximal ljudtrycksnivå) och L_{eq} (ekvivalenta ljudtrycksnivån). Den ekvivalenta ljudtrycksnivån (medelljudnivån) är till för att karakterisera ett tidsvarierande buller (Johansson, 2002) och definieras enligt

$$L_{peq,T} = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{T} \int_0^T 10^{0,1L_{pA}(t)} dt \right] \quad (3.7)$$

där

$L_{peq,T}$ = den ekvivalenta ljudtrycksnivån över tiden T, [dB(A)]

T = mätperiodens längd

$L_{pA}(t)$ = momentana ljudtrycksnivån [dB(A)]

Ett annat mått som används internationellt och som kommer att användas i Sverige är L_{den} (Direktiv, 2002/49/EG) och det definieras enligt

$$L_{den} = 10 \cdot \log \frac{1}{24} \left[12 \cdot 10^{L_{day}/10} \cdot 4 \cdot 10^{(L_{evening} + 5)/10} \cdot 8 \cdot 10^{(L_{night} + 10)/10} \right] \quad (3.8)$$

där

L_{day} är den A-vägda ekvivalenta kontinuerliga ljudtrycksnivån enligt definition i (ISO, 1996-2: 1987) över ett års samtliga dagperioder

$L_{evening}$ är den A-vägda ekvivalenta kontinuerliga ljudtrycksnivån enligt definition i (ISO, 1996-2: 1987) över ett års samtliga kvällsperioder

L_{night} är den A-vägda ekvivalenta kontinuerliga ljudtrycksnivån enligt definition i (ISO, 1996-2: 1987) över ett års samtliga nattperioder

Detta viktningsmått ger ett tillägg på de uppmätta bullernivåerna på eftermiddagen (med 5 dB) och på natten (med 10 dB) då de anses som mest problematiska.

Syftet med direktivet är att skapa ett gemensamt tillvägagångssätt för bedömning av buller inom EU. Detta direktiv är implementerat i Svensk lagstiftning genom förordningen (SFS, (2004:675)) om omgivningsbuller.

3.3.2 Påverkan på människor

Vilken effekt bullret har på människor är beroende på vem som utsätts för det. Exempel på inverkan är (Svenska kommunförbundet, 1998)

- Hörselskador

Vid 8 timmars daglig exponering av bullernivåer > 85 dB(A) eller kortare

exponering av högre nivåer föreligger risk för skador (enligt svensk standard).

- Talmaskering
Vid bullerskillnader på < 10 dB mellan tal och buller blir dessa svåra att separera.
- Sömnstörningar
Denna påverkan uppkommer vid för höga bullernivåer kvälls- och nattetid.
- Koncentrationssvårigheter
- Irritation
Detta är beroende på den utsattes inställning till källan av bullret. En negativ inställning till källan kan ge en större effekt av bullret.
- Annan medicinsk påverkan

Ett samtal mellan två personer påverkas på olika sätt av olika ljudkällor. Vid en tungt trafikerad vägtrafikled finns ett konstant buller med värden på L_{max} som ligger nära L_{eq} , vilket betyder att vi anpassar oss till denna bakgrunds nivå. En järnvägssträcka medför ljudnivåer där L_{max} och L_{eq} ligger långt ifrån varandra. Det medför att det är svårt att anpassa sig till när ljudtopparna kommer, och vi störs i regel mer av det (Öhrström & Skånberg, 2006). Rapporten visar på det omvända när det gäller störningar på sömnen. Det finns dock stora motsägelser i undersökningar när det gäller störningsfaktorer mellan vägtrafik och tågtrafik.

3.3.3 Nationella riktvärden och mål

De nationella riktvärden som gäller för trafikbuller är (Proposition, (1996/97:53))

- 30 dB(A) ekvivalentnivå inomhus
- 45 dB(A) maximalnivå inomhus nattetid
- 55 dB(A) ekvivalentnivå på uteplats i anslutning till bostad
- 60 dB(A) ekvivalentnivå utomhus för bostadsområdet i övrigt (gäller enbart för järnväg)
- 70 dB(A) maximalnivå på uteplats i anslutning till bostad

Dessa riktvärden bör normalt inte överskridas vid nybyggnation av bostadsbebyggelse eller nybyggnation eller väsentlig ombyggnad av infrastruktur.

För befintlig bana arbetar Banverket sedan 1997 med åtgärder för att minska bullret från järnvägen enligt proposition 1996/97:53. Arbetet sker i två etapper där etapp 1 i huvudsak är klar och etapp 2 beräknas vara klar 2017.

Banverket har utöver riktvärdena tagit fram långsiktiga miljömål och riktvärden tillsammans med Naturvårdsverket och i samråd med Boverket (Banverket & Naturvårdsverket, 2006). Se Tabell 3.

Tabell 3. Banverkets planeringsmål - riktvärden för miljö kvalitet (Banverket & Naturvårdsverket, 2006)

Lokaltyp eller områdestyp	Ekvivalent ljudnivå i dB(A) för vardagsmedeldygn	Maximal ljudnivå i dB(A) "fast"
Permanentbostäder, fritidshus och vårdlokaler		
Utomhus	60 ¹⁾ 55 ²⁾	70 ²⁾
Inomhus	30 ⁶⁾	45 ³⁾
Undervisningslokaler		
Inomhus		45 ⁷⁾
Arbetslokaler		
Inomhus		60 ⁵⁾
Områden med låg bakgrundsnivå		
Rekreationsområden i tätort	55 ^{1) 4)}	
Friluftsområden	40 ^{1) 4)}	

¹⁾ Riktvärdena avser frifältsvärden eller frifältsvärden korrigerade värden.

²⁾ Avser uteplats, särskilt avgränsat område.

³⁾ Avser utrymme för sömn och vila (sovrum) under tidsperioden 22:00-06:00 samt övriga bostadsrum (ej hall, förråd, WC etc.).

⁴⁾ Avser områden med låg bakgrundsnivå.

⁵⁾ Avser arbetslokaler för tyst verksamhet.

⁶⁾ Avser boningsrum (ej hall, förråd, WC etc.).

⁷⁾ Avser nivå under lektionstid

3.3.4 Statistik på antalet berörda i Sverige

Antalet berörda av bullernivåer över de riktvärden som satts bygger på beräkningar från 1989 gjorda av Banverket. Dessa siffror används än idag officiellt. Resultatet visar att antalet exponerade personer för $L_{eq, 24h} \geq 55$ dB(A) 2 meter över mark vid bostadens mest exponerade fasad är omkring 500 000 personer (Blidberg, 2007).

4 KONVENTIONELLA TÅG

4.1 RESANDETÅG

Definitionen för höghastighetståg är hastigheten $v \geq 250 \text{ km/h}$ men dessa hastigheter förekommer inte på banor i Sverige idag.

De tågtyper som idag uppnår de högsta hastigheterna på det svenska bannätet är så kallade motorvagnståg. De definieras som motoriserade fordon med utrymme för passagerare till skillnad från vanliga lok som inte tar passagerare. De senaste modellerna av motorvagnstågen har på varje vagn minst en boggi med drivande axel. X2 (benämns konventionellt som X2000) och X40 (benämns konventionellt som Dubbeldäckare) är två exempel på motorvagnståg som trafikerar det svenska järnvägsnätet. Tågtypen X2 är framtagen av ABB och är tillverkad av Kalmar Verkstad och av ASEA i Västerås. Den andra typen X40 är framtagen och tillverkad av Alstom. Dessa tågtyper framförs med en maximal hastighet på 200 km/h på det svenska nätet.

Övriga tåg som trafikerar det svenska bannätet och som inte är av motorvagnstyp är lokdragna resandetåg. Dessa enklare tåg benämns oftast InterCitytåg medans motorvagnstågen oftast benämns med sina konventionella namn.

4.2 GODSTÅG

De godståg som trafikerar det svenska bannätet är lokdrivna, detta betyder att vagnarna i sig inte drivs med egna motorer. Då rapporten fokuserar på höghastighetståg, vilket framförallt innebär resandetåg, tas ej godståg med i någon större utsträckning.

4.3 BULLEREMMISSIONER

De buller som generas av dagens konventionella tåg är indelat som stationärt och rullningsbuller, vilket innebär buller från stillastående tåg samt från tåg i rullning. En problematik som utelämnats i denna rapport är den att godståg genererar mer buller än resandetåg vid samma hastighet (Jonasson & Göransson, 1995). Framförallt beror detta på att dämpningen på vagnarna är sämre än för resandetåg samt att det finns mer lösa delar på vagnarna som bullrar.

Enligt Jonasson & Göransson, 1995 ökar rullningsbullret med hastigheten. För resandetåg följer hastighetsberoendet ungefär:

$$L_p = L_p(v_0) + 30 \log\left(\frac{v}{v_0}\right) \quad (4.1)$$

där

v_0 = Referenshastigheten

$L_p(v_0)$ = Ljudtrycksnivån vid referenshastigheten

Detta medför att en fördubbling av hastigheten höjer den maximala ljudtrycksnivån med 9 dB (= $30 \cdot \log(2)$)

4.3.1 Stationärt buller

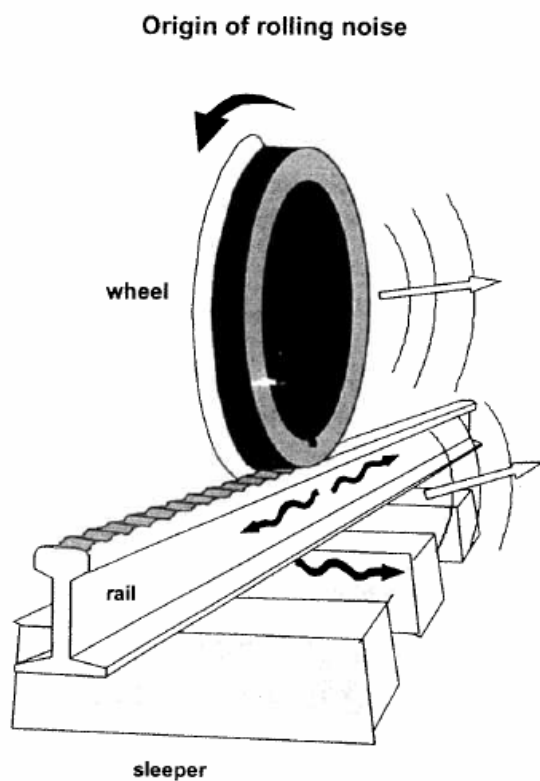
När tåget står stilla hörs de ljud som normalt inte hörs när tåget är i rörelse. När tåget accelererar och kommer upp till en viss hastighet övergår det stationära bullret till rullningsbuller (vid approximativt ≥ 30 km/h). Det stationära bullret kommer främst av (Ögren, 2006):

- Motorer
- Kylare
- Transformatorer
- Fläktar
- Luftkonditioneringsystem

Dessa bullerkällor är problematiska vid tillfälliga stopp längs banan, vid stationer samt på sträckor där låga hastighetsbegränsningar finns. Eftersom det stationära bullret även definieras vid låga hastigheter (mindre än 30 km/h) förekommer buller från bromssystemen på tågen.

4.3.2 Rullningsbuller

Rullningsbullret uppkommer när tåget är i rörelse. Det är en av de dominanta källorna till den totala bulleremissionen vid hastigheter inom intervallet $100 \text{ km/h} \leq v \leq 300 \text{ km/h}$.



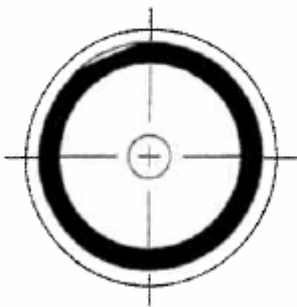
Figur 9. Komponenter som genererar rullningsbuller (Hemsworth, 2000).

Det är många faktorer som påverkar dessa ljudnivåer (Figur 9):

- Hjul

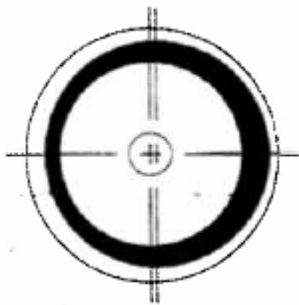
När hjulet genererar buller är det framförallt olika former av förslitningar på hjultallriken som bidrar. Ojämnheter och obalanser sätter hjulet i vibration och ljud alstras. Det frekvensintervall som vanligtvis förekommer för hjulens bulleralstring är från 1 kHz och uppåt (Hartung, 2002). Hur hjulets ojämnheter ser ut delas upp enligt följande (Åström, 2003):

Radiell förskjutning uppkommer då hjulet glider mot rälsen utan att rulla. Detta medför att radien minskar på ett litet område beroende på hur länge hjulet glidit. Då uppkommer glidplattor som genererar buller och dessutom skadar rälen (Figur 10).



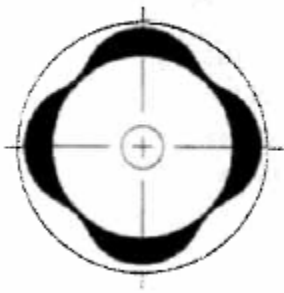
Figur 10. Exempel på radiell förskjutning (hjulplatta) (Johansson & Nielsen, 1998).

Excentricitet betyder att hjulets centrum ej sammanfaller med hjulaxeln. Detta kan uppstå då den radiella förskjutningen blivit mer sliten. Kan även inträffa om hjulet fixerats fel vid svarvning (Figur 11).



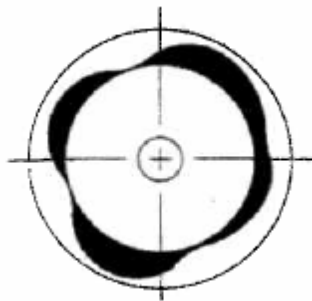
Figur 11. Exempel på excentricitet (Johansson & Nielsen, 1998).

Periodisk orundhet är en defekt som endast uppkommer vid blockbromsade hjul. Amplituden är i normalfallet cirka 1 mm och våglängden mellan 0,14 mm och hjulets omkrets (Figur 12).



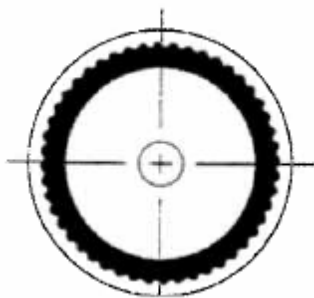
Figur 12. Exempel på periodisk orundhet (Johansson & Nielsen, 1998).

Icke periodisk orundhet uppkommer endast vid blockbromsade hjul. Beror av obalanser i hjulparet eller inhomogent material (Figur 13).



Figur 13. Exempel på icke periodisk orundhet (Johansson & Nielsen, 1998).

Korrugering och råhet är oregelbundna radier hos hjulet. För korrugering är våglängderna cirka 3-6 cm och amplituden mindre än $10\mu\text{m}$, motsvarande för råhet är cirka 1 mm och cirka $10\mu\text{m}$. Uppkommer vid blockbromssystem (Figur 14).



Figur 14. Exempel på korrugering och råhet (Johansson & Nielsen, 1998).

Vid blockbromsning är det vanligt förekommande med skrikande ljud. Detta uppkommer då bromsklossarna som är av gjutjärn pressas mot hjulets glidyta och självsvängningar uppstår. Godståg står för denna problematik då dessa vagnar är utrustade med blockbromssystem.

- Räl

När hjul med korrugeringar rullar på spåret riskerar ojämnheter i form av räfflor och vågor att bildas även på rälen, vilket bidrar till en ytterligare källa till buller. När

hjulparen rullar på rälen uppstår vibrationer som fortplantas i olika led. Dessa vibrationer alstrar ljud. Det frekvensintervall som är dominant för rälen vibrationer är $100 \text{ Hz} \leq f \leq 1000 \text{ Hz}$ (Hartung, 2002). Skarvfria spår genererar mindre buller än skarvade spår (Jonasson & Göransson, 1995). Skarven som kommer till vid hopsättning av rälen är en faktor till bulleremission då tåg rullar över.

- Hjul/räl kontakt

När hjulen rullar på rälen uppstår vibrationer på grund av att de båda komponenterna inte är helt släta vid kontaktytorna. När dessa korrugeringar i rälen och på hjulen möts uppstår variationer i kontaktkrafterna som i sin tur leder till fortplantning av vibrationer. Vibrationerna utbreder sig i hjulen, rälen och ner till sliprarna, detta medför att ljud alstras. Ljudet som genereras av ojämnheter i kontaktytorna kallas rullningsbuller. Frekvensintervallet för detta buller ligger mellan 100 Hz och 5000 Hz (Thompson, 1996a).

Ett annat fenomen vid kontakten mellan hjul och räl kallas tjutande buller. Denna form av ljud uppkommer då hjulet glider lateralt på rälhuvudet (Brunel, 2006) och är av tonisk karaktär. Ljudet uppkommer främst vid passager genom kurvor och till viss del genom växlar (Ögren, 2006). Den laterala förskjutningen uppkommer då stela hjulboggis passerar en kurva.

- Sliper

Rälen vilar på sliprar och mellan dem ligger ett mellanlägg som är till för att dämpa vibrationer som uppstår. Sliprarna ligger på en bädd av ballast. De vibrationer som uppstår under rälen är av lågfrekvent karaktär. Ljudemissionerna från dessa svängningar är begränsade då vibrationerna dämpas väl till följd av banunderbyggnaden och mellanläggen.

För att beskriva och kvantifiera rullningsbullret finns flera olika modeller, dock är det TWINS (Track-Wheel Interaction Noise Software) som är utvecklad av UIC (International Union of Railways) genom European Rail Research Institutes (ERRI) expertkommitté C163 (Railway Noise) (Thompson m. fl. 1996b, Thompson m.fl. 1996c) som är den mest vedertagna internationellt (Hemsworth, 2008). Denna modell modellerar det buller som framkommer av kontakten mellan hjul och räl.

5 BULLERSKYDDSÅTGÄRDER NATIONELLT

När bullernivåerna överstiger de etappmål och långsiktiga mål som satts längs befintlig bana bör åtgärder för att minska bullret övervägas. Detta kan göras på ett flertal olika sätt såsom åtgärder på fordon, upprättande av bullerskärmar och bullervallar samt åtgärder på fasader.

5.1 ÅTGÄRDER FÖR ATT REDUCERA BULLRET

Vid befintlig bana där bullernivåerna är högre än riksdagens etappmål 1 (Proposition, (1996/97:53)) har Banverket främst vidtagit åtgärder som ligger utanför själva fordonen (indirekta åtgärder). Åtgärder på källbullret är oftast direkt kopplat till tågen och tågtillverkarna. Men eftersom utvecklingen av fordon pågår kontinuerligt av de tågleverantörer som finns kommer sannolikt bullernivåerna från tågen successivt att minska.

Vid befintlig bana och vid ny- och ombyggnationer av bana beräknas mottagarens ljudnivåer med en beräkningsmodell för spridning av buller kallad Nordisk Beräkningsmodell (Naturvårdsverket, 1999). Den beräknar vilka ljudnivåer som alstras och hur långt de utbreder sig med ett flertal olika inparametrar. Vid byggande av järnväg (Lag om byggande av järnväg, (1995:1649)) skall en MKB (miljökonsekvensbeskrivning) upprättas och i den skall en bedömning finnas om huruvida bullret kommer att påverka omgivningen och till vilken grad. Denna bedömning bygger på de resultat som kommer av beräkningar med den Nordiska Beräkningsmodellen. En bedömning av vilka åtgärder som bör utföras för att reducera bullret skall framgå (indirekta åtgärder).

Vid befintlig bana har åtgärder på fasad vid närliggande och utsatta bostäder varit det som prioriteras av Banverket för etappmål 1. För etappmål 2 som planeras vara klar 2017 är syftet att förbättra utemiljön för de som bor permanent vid järnvägen. En minskning av buller inomhus i lokaler för vård, skola, omsorg och barnomsorg inkluderas även i etapp 2.

5.1.1 Direkta bullerskyddsåtgärder

Det mest långsiktiga sättet att komma tillrätta med bullerproblematiken är att påverka källan direkt. Om bullret från källan reduceras och mottagaren ej upplever det genererade ljudet som störande är övriga åtgärder överflödiga. De bulleralstrande mekanismer och de bullerreducerande åtgärder som utvecklas och används på dagens konventionella tåg är:

- Bromssystem

Bromssystemet på tågen påverkar hjulen på olika sätt beroende på vilket system som är monterat. Det förekommer två olika system på de tåg som trafikerar järnvägsnätet i Sverige. Det ena kallas blockbromsade system och det andra kallas skivbromsande system. För blockbromsade hjul slits rullytan och korrugeringar och ojämnheter kan uppkomma. Dessa blockbromsar är i Sverige gjorda av gjutjärn och är standard på godståg. Det andra systemet kallas skivbroms och är standard på resandetågen i Sverige. Skivbromsar är ur en bullersynpunkt bättre då de avger mindre ljud än blockbromsar.

Den fungerar så att bromsbelägg pressas mot en separat bromsskiva som sitter på hjulaxeln.

- Hjul

Som beskrivet i kapitlet Rullningsbuller så genererar hjul som är ojämna eller i obalans ljud. Det finns flera åtgärder på hjulen som ska minska de ojämnheter och obalanser som kan uppstå och därmed genereringen av buller. Hjulets diameter kan minskas vilket medför minskad vibration i sidled på hjulet. En annan åtgärd är att göra tvärsnittet så optimalt som det går kring det plan som hjulet passerar genom kontaktpunkten. Detta medför en rak hjulstomme som motverkar vibrationer. Även hjulstommens tjocklek kan modifieras för att minska bullret, vilket även det leder till minskad vibration i sidled (Thompson & Jones, 2006).

Vibrationer i hjulet uppkommer genom den stora kraft som verkar mellan rälen och hjulets kontaktyta. Den motstående delen av hjulet har då ingen påfrestning vilket kan leda till vibrationer. Ytterligare en åtgärd för att minska vibrationerna är att använda perforerade hjul. Dessa perforeringar bidrar till att släppa igenom luft och detta gör att tryckskillnaderna mellan hjulstommens sidor minskas och därmed även bullret. Problemet med denna typ av åtgärd är att hjulets hållfastighet minskas vid perforering. En avvägning mellan hjulets hållfastighet och bullerreducerande egenskap måste därför göras.



Figur 15. Exempel på hjulboggi med perforerat hjul (Åbom, 2009).

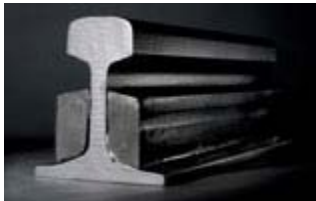
De åtgärder som hittills har tagits upp omfattar hjulets design. Men det finns även åtgärder på hjulen i form av dämpare som fästs på hjulet för att fånga upp ljudalstrande vibrationer. Forskning pågår för att förbättra dessa dämpare ytterligare.

- Räl

För att dämpa de vibrationer som uppkommer genom rälen finns det anordningar som fästs mellan rälfoten och rälhuvudet. Dessa anordningar kan sitta dels längs hela rälen eller bara mellan sliparna. Det finns även mellanlägg som ligger mellan rälen och slipern som skall minska de genererade vibrationerna. Dessa dämpare kan användas vid tätbefolkade eller känsliga områden för att reducera bullret.

Behandling och underhåll av befintlig räl sker bland annat genom spårslipning och är i första hand till för att minska vibrationer som kan slita ut rälen och minska livslängden. En bieffekt av detta är att bulleralstringen minskar vid ett kontinuerligt underhåll. Även rälsmörjning bidrar till att minska bullret.

Optimering av sliprar reducerar bulleremissionerna, detta har dock en låg prioritet eftersom vibrationerna är av låg frekvens och påverkar oss väldigt lite.



Figur 16. Exempel på rälämpare av typ Corus damper (Corus, 2007).

- Kjolar

Eftersom den stora källan till buller är från kontakten mellan hjul och räl kan tågans utformning bidra till att minska bullret. Boggikjolar är en åtgärd som bidrar till att minska detta buller. De utformas så att hjulboggin och hjulen täcks med en skärm. Denna teknik är ännu inte implementerad på konventionella tåg i Sverige som alltså har öppet omkring hjulen, se Figur 17.



Figur 17. Ett Regina X-52-2 tåg. Här är inte boggin med hjul täckta. För exempel på ett skyddande hölje över boggin se Figur 24. Fotograf: Lef-Erik Nygårds.

Denna åtgärd med kjolar som täcker boggin är även av stor vikt vid reducering av det aerodynamiska buller som alstras vid områdena omkring boggin. Detta diskuteras vidare senare i rapporten.

5.1.2 Indirekta bullerskyddsåtgärder

Det är Banverket som bygger bullerskydd i form av bullerskärmar, bullervallar och fasadåtgärder, utformningen sker dock i samråd med kommuner och markägare (www.banverket.se, 2009).

- Skärmar

För att en bullerskärm ska vara effektiv krävs det att den är tät. Med det menas att inga glipor skall finnas mellan skärmelementen eller vid dess kontakt med marken. Hur stor dämpningen blir av skärmar beror av designen, höjden samt på vilket avstånd den är placerad från källan (Svenska kommunförbundet, 1998). Det är även så att höga frekvenser dämpas mer än låga. Hur formen skall vara på skärmen samt förslag på optimal placering beräknas med modellen nordisk beräkningsmodell vid ny- eller ombyggnation av bana.

Det finns en rad olika material bullerskärmar kan byggas av. Det vanligaste är träpanel men det förekommer även plast, tegel, glas, betong och olika former av absorbenter. Valet av material (förutom absorbenter) bygger mycket på estetiken, Detta eftersom dämpningen mest beror av skärmens höjd, placering och utbredning d.v.s. inte materialet i sig. Absorbenterna fångar upp ljudvågorna och förhindrar reflektion. Bullerskärmar vid perronger skall vara försedda med absorberande material (Svenska kommunförbundet, 1998).

Det finns en mängd olika former på bullerskyddsskärmarna som har olika egenskaper för att reducera bullret. I rapporten *Framtida alternativ till bullerskärmar* beskriver Jönsson (2002) flertalet olika bullerskyddsåtgärder och dess reducerande effekt.

- Vallar

Ett sätt att ta tillvara på de mängder schaktmassor som uppkommer vid byggnationsprojekt är att upprätta bullervallar. Denna typ av bullerskydd är oftast vanlig i utkanten av ett samhälle då den kräver en större yta än bullerskärmar. En kombination av skärm och vall är ett sätt att minska bullret vid problemområden. Det är dock vid nybyggnation som bullervallar främst förekommer.

- Fasadåtgärder

Vid nybyggnation av bostadshus nära befintlig bana skall noga beräkningar utföras med avseende på bullret för att dimensionera huset så att bullret inomhus blir inom riktvärdena för inomhusbuller. För hus längs befintlig bana där bullernivåerna är för höga kan olika fasadåtgärder utföras för att minska inomhusbullret.

En åtgärd för att minska ljudnivåerna inomhus är fönsteråtgärder. Om ljudnivån är för hög inomhus kan fönstren isoleras, justeras eller uppgraderas till en mer bullerisolerande anordning.

5.1.3 Övriga åtgärder

De direkta åtgärder som presenterats har varit av fysisk karaktär vilket betyder att källan modifieras på olika sätt för att reducera bulleremissionerna. Åtgärderna som beskrivs som indirekta är till för att reducera bullret längs utbredningsvägen samt vid mottagaren. Dock skall detta ses som en sista utväg då källan till bullret ej förändrats.

Detta är inte ett långsiktigt alternativ men vid speciellt utsatta områden kommer direkta åtgärder även i framtiden att behövas.

Det finns fler åtgärder som minskar bulleralstringen men inte modifierar materialen i sig. Att planera en ny- eller ombyggnation av bana så att så få som möjligt blir berörda av buller är ett alternativ som minskar negativ påverkan. Där är det en rad faktorer som spelar in. Det som måste finnas i åtanke är att bullerproblemet inte får ersättas av andra problem (Svenska kommunförbundet, 1998).

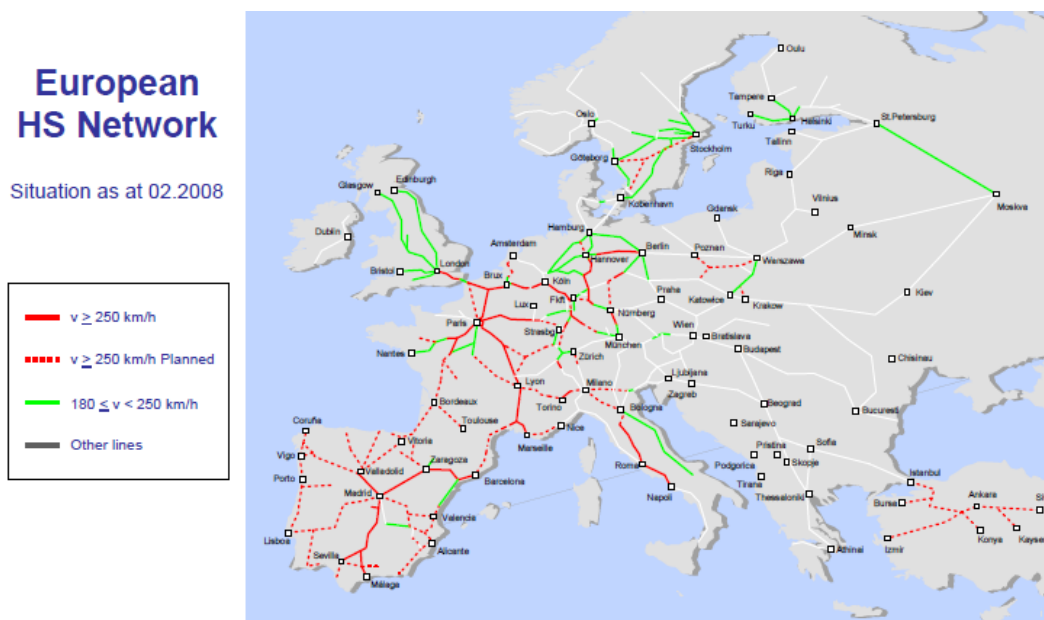
6 HÖGHASTIGHETSTÅG

De tåg som har en maximal hastighet på över 250 km/h kallas höghastighetståg. I nuläget framförs inga höghastighetståg i Sverige, men inom Banverket utreds frågan om ett införande av dessa typer av tåg. Det medför även att ny- och ombyggnationer av banan utreds för att klara de belastningar som höghastighetståg kräver.

Det pågår en kontinuerlig utveckling av höghastighetståg och banor internationellt. Flera länder har planerat för ett införande av nya eller uppgraderade banor. De länder som idag har befintlig höghastighetstrafik enligt UIC (2009) är:

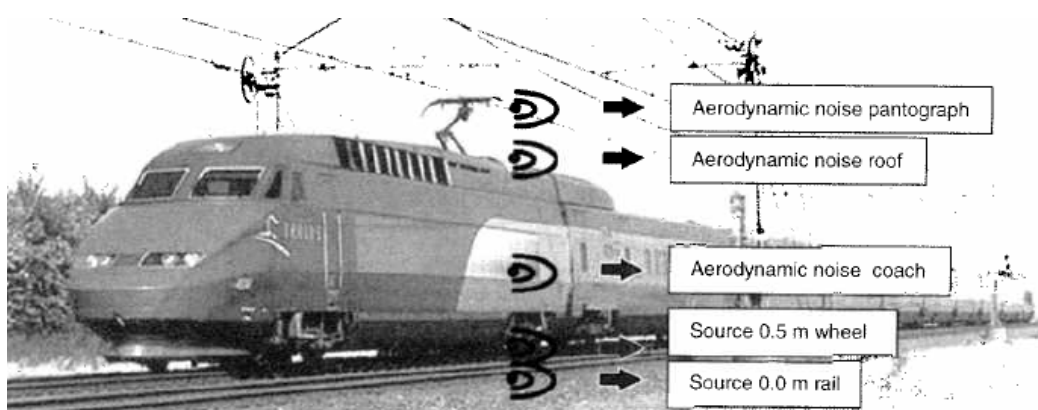
- Belgien
- Frankrike
- Tyskland
- Italien
- Spanien
- England
- Kina – Taiwan
- Japan
- Korea
- USA

Det Europeiska höghastighetsnätverket (Figur 18) utvecklas ständigt med nya linjer och planerna på expanderings är stora i många länder.



Figur 18. Det Europeiska höghastighetsnätverket (UIC, 2009).

Ljud som emitteras av höghastighetståg kan indelas i två större block. Det första är kontakten mellan hjul och räl som kallas rullningsbuller. Denna bullerkälla är densamma som beskrivs i kapitlet bulleremissioner för konventionella tåg i Sverige. Det andra blocket som är specifikt för höghastighetståg är det aerodynamiska buller som genereras av turbulens i luften omkring vagnkroppen (Mellet, 2006). För konventionella tåg där hastigheterna kommer upp till 160-200 km/h är rullningsbuller den dominanta källan. Denna mekanism modelleras korrekt med mjukvaran TWINS men vid högre hastigheter sker en samverkan mellan rullande och aerodynamiskt buller som inte kan modelleras med TWINS.



Figur 19. Källor till buller för höghastighetståg (Krylov, 2001).

Enligt Thompson (2009d) följer det aerodynamiska bullret ett hastighetsberoende på ungefär:

$$L_p = L_p(v_0) + 60 \log\left(\frac{v}{v_0}\right) \quad (6.1)$$

där

v_0 = Referenshastigheten

$L_p(v_0)$ = Ljudtrycksnivån vid referenshastigheten

Detta medför att en fördubbling av hastigheten höjer den maximala ljudtrycksnivån med 18 dB (= $60 \log(2)$). Det finns ett flertal olika tekniker att beräkna detta hastighetsberoende men osäkerheten är stor och resultaten kan därför variera kraftigt.

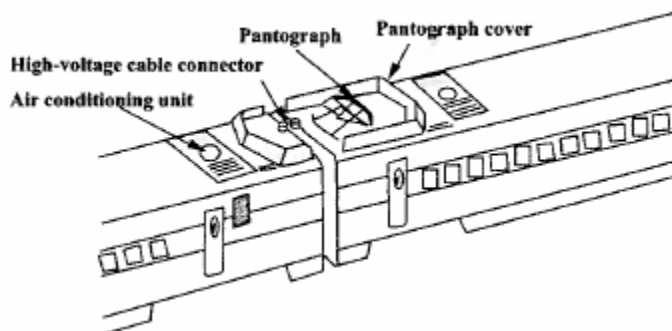
Det aerodynamiska bullret har generellt sett ett frekvensinnehåll på ≤ 500 Hz (Thompson D., 2009d). Detta låga frekvensinnehåll medför enligt ekvation 3.1 att våglängden kan bli relativt lång (upp till 17 m inom ramen för människans hörbara område). Den långa våglängden skapar problem med indirekta åtgärder då vågorna tenderar att gå förbi dem.

Källorna till det aerodynamiska bullret är enligt Raghu (2002) den främre delen av tåget, kopplingen mellan vagnarna och strömvagnsystemet.



Figur 20. Olika frampartier för olika Shinkansenmodeller . Bilden hämtad från (www.traveltojapan.info, 2009).

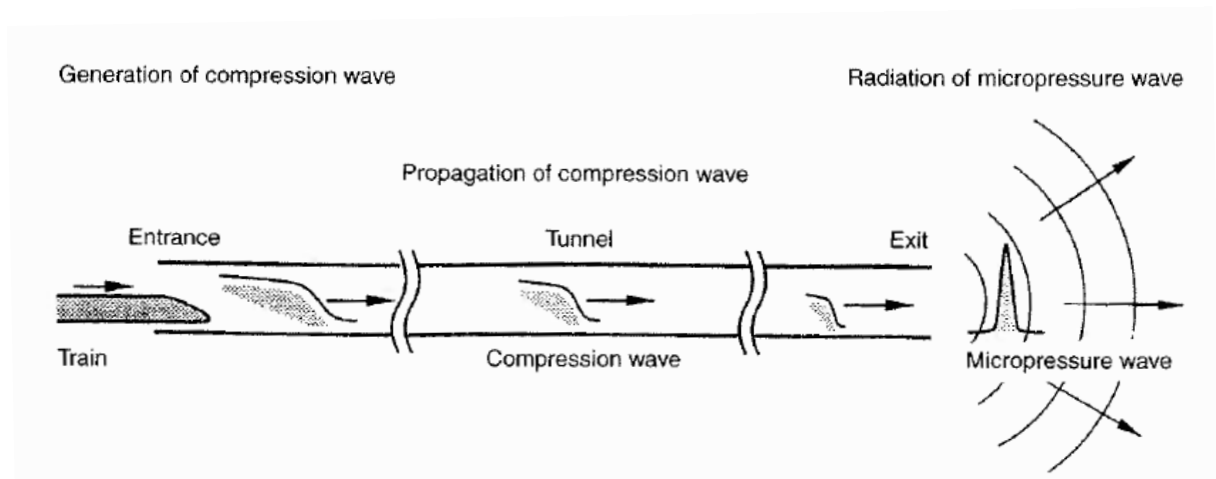
På tågtaget sitter den anordning som förser tåget med elektricitet kallad strömvtagare. Den är en av orsakerna till det aerodynamiska bullret. Ett sätt att minska exponeringen av strömvtagaren är att bygga in den med ett skyddande hölje. Ett problem uppkommer dock då även detta hölje bidrar till en bulleralstring (Raghu, 2002). Där kommer en avvägning in där två bulleralstrande källor ställs mot varandra. Utformningen på strömvtagaren är även den under utveckling för att minska luftmotståndet och därmed minska bullret.



Figur 21. Strömvtagare (eng. pantograph) med aerodynamiskt anpassad skyddslösning runt (Raghu, 2002)

När det gäller den främre delen på tåget är det framförallt ojämnheter på ytan i viss kombination med utformningen på framdelen (nosen) och områden kring boggin som har inverkan på bulleralstringen.

För att generellt sett minimera det aerodynamiska bullret krävs det att tågkroppen är utan större håligheter. Nosen på höghastighetståg kännetecknas ofta av att de är långa och framförallt spetsiga i någon form. Den främsta anledningen till detta är att den spetsiga nosen minskar den akustiska tryckpuls som uppkommer när ett tåg rullar in i med hög hastigheten i en tunnel (Krylov, 2001). Denna tryckvåg fortplantas i tunneln med ljudets hastighet och vid mynningen av tunneln uppkommer en ljudknall. Fenomenet med ljudknallar i utloppet av tunnlar illustreras i Figur 22.



Figur 22. Illustrativ bild över uppkomsten av en ljudknall i en tunnel (Krylov, 2001)

Området omkring boggin är även det en källa till både mekaniskt och aerodynamiskt buller. En åtgärd för att minska detta buller är att skärma av boggin med olika typer av skyddande kåpor (kjolar). Det uppstår dock problem med att stänga in den, dels i underhållssynpunkt, dels p.g.a. att det lätt kan ansamlas smuts eller snö mellan kjolen och boggin.

För att definiera vilka krav som ställs och hur rullande materiel (tågen) skall utformas har EU tagit fram tekniska specifikationer för driftskompatibilitet (TSD). TSD finns för både höghastighetståg och konventionella tåg. Inom TSD finns ett beslut av den 21 februari 2008 (Om tekniska specifikationer för driftskompatibiliteten avseende delsystemet Rullande materiel i det transeuropeiska järnvägssystemet för höghastighetståg) 2008/232/EG som behandlar bullerkrav och det rullande materialets geometrier. Även standarder för bullermätningar beskrivs.

7 BULLERSKYDDSÅTGÄRDER INTERNATIONELLT

Nedan följer en inventering av internationella bullerskyddsåtgärder samt orsaker till bullret. De länder som ingår i undersökningen har en befintlig höghastighetstrafik och planerar även nya banor.

7.1 JAPAN

7.1.1 Japan Railways Group (JR-Group)

År 1987 privatiserades det statliga järnvägssystemet Japanese National Railways (JNR) och sex stycken regionala företag för resandetåg samt ett för godstrafik bildades. Det samlade namnet för dessa företag är Japan Railways group. De företag som rapporten fokuserar på är Central Japan Railway Company (JR Central) som förvaltar linjen Tokaido Shinkansen och tågserierna 300, 700 och N700 (de tåg som enligt definitionen är höghastighetståg) samt West Japan Railway Company (JR West). JR West förvaltar linjen Sanyo Line och tågserien 500 (Figur 23).

7.1.2 Shinkansen

Shinkansen är benämningen på det Japanska järnvägssystemet för höghastighetståg. I cirka 40 år har tåg framförts i Japan med hastigheter över 200 km/h vilket är unikt. I artikeln *Development and Impact of the Modern High-Speed Train* diskuterar Givoni (2006) olika modeller av höghastighetståg och skriver att Shinkansen är basmodellen till många modeller av höghastighetståg i världen. Ett kännetecken för Shinkansen är dess säkerhet i kombination med höga hastigheter. Varje linje inom järnvägsnätet har ett eget namn och detsamma gäller för tågtyperna.



Figur 23. Det Japanska höghastighetsnätverket Shinkansen (www.japanrail.com, 2009)

Den första sträckan invigdes 1964 och var Tokaido Line mellan Osaka och Tokyo. Nozomi är benämningen på de höghastighetståg som trafikerar Tokaido Line (samt Sanyo Line från Osaka till Fukuoka). Nozomi innehåller bland annat tåg från Shinkansens 500-serie som är den snabbaste trafikerade tågtypen i Japan och uppnår en högsta hastighet på 300 km/h på linjerna (Salomon, 2001). Även tågserierna 700 och 300 ingår i Nozomi. De som tillverkar dessa tåg är bland annat Hitachi (www.hitachi-rail.com, 2009) och Kawasaki (www.khi.co.jp, 2009).

Tabell 4. Information om utvalda Shinkansenmodeller (UIC High Speed , 2009)

Modell	Maximal hastighet	Längd	Bredd	Vikt	Införd
Shinkansen Serie 300	270 km/h	402 m	3,38 m	710 ton	1992
Shinkansen Serie 500	300 km/h	404 m	3,38 m	632 ton	1996
Shinkansen Serie N700	300 km/h	405 m	3,36 m	715 ton	2007

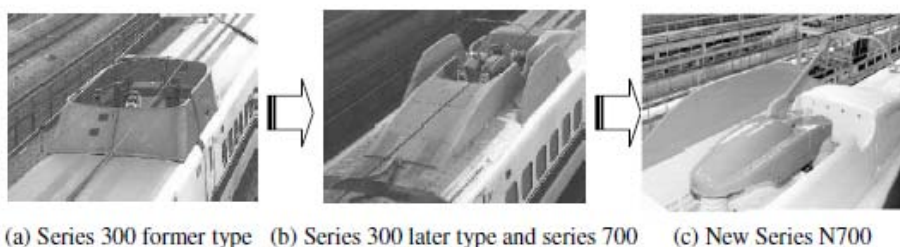


Figur 24. Shinkansen 500-serie på Kyoto Station . Fotograf: Nick Coutts 2005-03-19

I artikeln *Localization of aerodynamic noise sources of Shinkansen trains* skriven av Nagakura (2006) utreds vilka källorna är till det aerodynamiska bullret genom tester i en 1/5 skalig vindtunnel. Testerna visar på olika källor till bullret:

- Ljudnivåerna från framboggin på den främre vagnen var mycket högre än övriga boggis. Vid samma tester mättes även vibrationerna från tåget och det visade sig att vibrationsnivåerna var lika från alla boggis. Detta medför att det aerodynamiska bullret dominerar över hjul/räl-bullret vid den främre vagnens boggi.
- Vid den främre boggin och vid ≥ 2 kHz dominerar det aerodynamiska bullret från den nedre delen av tåget, troligen till följd av snöplogens utformning.
- Förardörren på den främre vagnen orsakar signifikant buller vid frekvenserna 500 – 1000 Hz.
- Buller från vindrutan kännetecknas av frekvenser omkring 4 kHz.
- Strömvatagaren bullrar med ett stort frekvensomfång.

För att minska det aerodynamiska buller som uppkommer av och omkring strömvatagaren har en stor utveckling skett i utformningen av ett skydd som sitter runt den (Figur 25). Detta för att minska bulleralstringen från strömvatagaren på de upphöjda banorna.



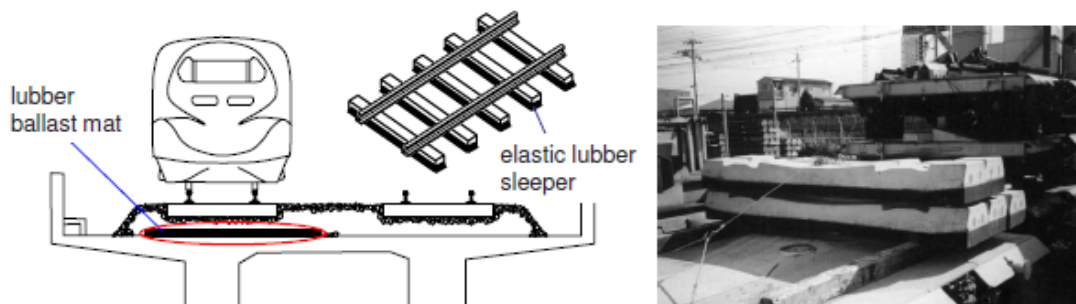
(a) Series 300 former type (b) Series 300 later type and series 700 (c) New Series N700

Figur 25. Utveckling av strömvatagarskydd för olika Shinkansenmodeller förvaldade av JR Central (Kanda m.fl. 2008)

Det sker och har skett en teknisk utveckling inom bland annat optimala vagnkroppar utifrån ett aerodynamiskt perspektiv (Kanda m.fl. 2008). Tester i vindtunnlar har

bidragit till en utveckling av former på tåget som skall minimera luftmotståndet och på så sätt optimera aerodynamiken.

Vid flertalet av de tunnlar som finns på sträckan Tokaido Shinkansen ligger gummidämpare under sliprarna för att minska vibrationer och ljudalstring (Figur 26).



Figur 26. Dämpning på sliprar och gummiatta under sliprarna (Kanda m.fl. 2008)

Åtgärder som inte verkar direkt på källan, så kallade indirekta åtgärder, har visat sig vara ett problem för Tokaido Shinkansen eftersom det inte planerades för bullerskärmar vid byggandet av sträckan. Bullerskärmar är numera byggda längs stora delar av bannätet (Figur 27).

Shinkansens linjer går oftast på upphöjda konstruktioner. Detta medför stora problem med buller alstrat från strömavtagare trots att banan är försedd med bullerskärmar (Thompson D. 2009d). Problemen beror på att bullerskärmarna inte når upp för att skydda mot strömavtagarbullret.

Standardskärmen är 2 meter hög och vid vissa utsatta delar har det byggts en extra anordning på skärmarna vilket reducerar bullret. En negativ effekt med höga bullerskärmar är att den tar bort utsikten för passagerarna, på grund av detta har skärmar utvecklats där utsikten inte störs alltför mycket (Figur 28).

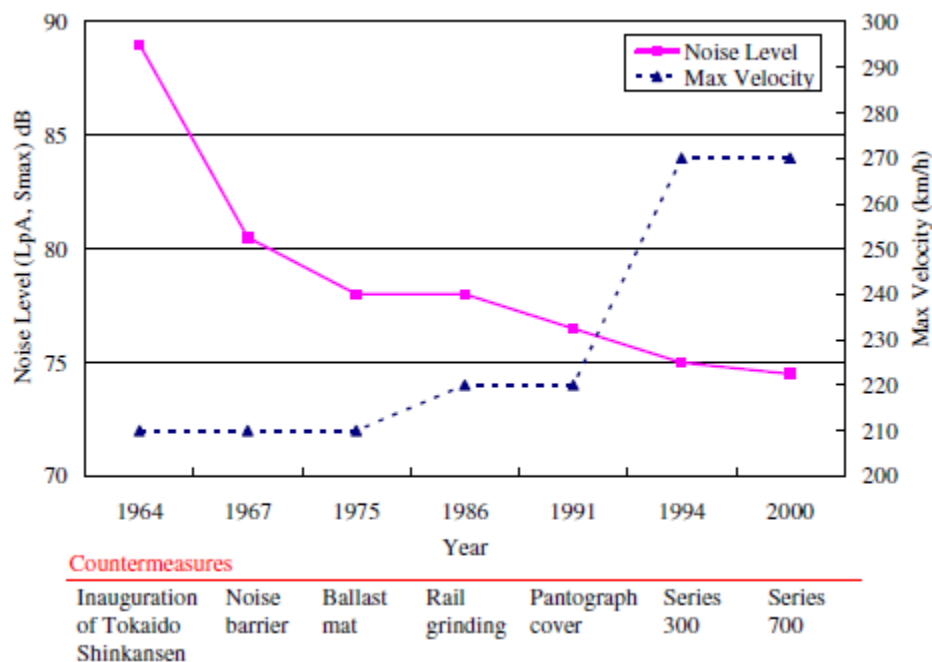


Figur 27. Bullerskärmar längs banan (Kanda m.fl. 2008)



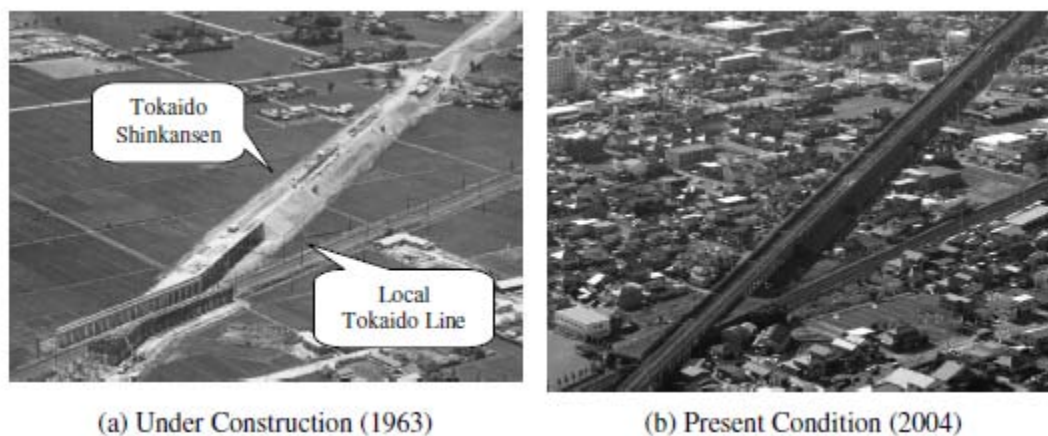
Figur 28. Bullerskärm med en spetsig topp för ökad sikt (Kanda m.fl. 2008)

Dessa åtgärder som beskrivits för Tokaido Shinkansen har utvecklats mycket sedan införandet av höghastighetståg i Japan. I takt med ökande hastigheter så ökar även kraven på att minska bullret, se Figur 29.



Figur 29. Utveckling av bullerskyddsåtgärder i relation till ökande hastighet (Kanda m.fl., 2008)

Problemet med att omgivningen störs av buller längs Tokaido Shinkansen kommer redan från planeringen av banan. När järnvägen byggdes var de boende omkring järnvägen ganska få, men i takt med ett ökat behov av bostäder har bebyggelsen kring banan ökat (Figur 30). Detta har medfört att fler människor störs av tågtrafiken, vilket i sin tur har lett till ökade åtgärder för bullerreducering.



Figur 30. Utveckling av antalet boende omkring Tokaido Shinkansen (Kanda m.fl., 2008)

7.2 SPANIEN

7.2.1 Red Nacional de los Ferro Arriles Española (RENFE)

RENFE är den spanska motsvarigheten till SJ AB. Från 2005 är det ADIF (Administrador de Infraestructuras Ferroviarias) som förvaltar infrastrukturen för höghastighetsbanan.

7.2.2 Alta Velocidad Española (AVE)

Den spanska höghastighetstrafiken kallas Alta Velocidad Española (AVE) och trafikerar LAV (Líneas de Alta Velocidad). Spanien har för tåg som inte definieras som höghastighetståg en unik spårvidd som inte är lika som UICs standard. Därför installerades LAV för att vara kompatibelt med europeisk standard, framförallt Frankrikes (Givoni, 2006).

De tåg som framförs på den spanska höghastighetsbanan är en modell av TGV-A, de bygger på teknik från TGV-A men är delvis tillverkad i Spanien. Ytterligare en modell är ICE-3 som är specialtillverkad av Siemens och kallas ICE-Velaro. Den är modifierad så att den kan framföras snabbare än den ursprungliga ICE-3. Dessa två modeller diskuteras mer ingående i kapitlen 7.3.2 (TGV) och 7.4.2 (ICE). AVE har ytterligare en modell som kallas Talgo-350. Det är den senaste modellen i serien som tagits i trafik, den är tillverkad av det spanska företaget Talgo.



Figur 31. Det spanska järnvägsnätet för höghastighetståg (MJSmit, 2009)

Tabell 5. Information om Talgo-350 (UIC High Speed , 2009)

Modell	Maximal hastighet	Längd	Bredd	Vikt (ton)	Införd
Talgo-350	330 km/h	200 m	2,96 m	324	2005



Figur 32. Talgo 350 även kallad AVE S-102, (www.bombardier.com, 2009)

Den speciella formen på framtaket bidrar till att minska det aerodynamiska motståndet vilket reducerar bulleralstringen. Även vagnarna är utvecklade för att vara aerodynamiskt optimala.

Inom ADIF är det enligt Péres del Campo (personlig kontakt, 2009) i första hand åtgärder på källan som prioriteras och därefter indirekta åtgärder. De indirekta åtgärderna innefattas av bullerskärmar och med fasadåtgärder som en sista åtgärd för att minska bullernivåerna vid mottagaren. En faktor som är av betydelse i Spanien är att LAV går till stor del genom landskap där få människor berörs av bullret och vid de stationer som finns längs banan är hastigheten betydligt lägre än den maximala.

Det arbetas i nuläget med att upprätta åtgärdsprogram samt kartläggning av omgivningsbuller enligt direktiv 2002/49/EG.

7.3 FRANKRIKE

7.3.1 Société Nationale des Chemins de fer Français (SNCF)

SNCF är Frankrikes motsvarighet till svenska SJ AB vilket innebär att de ansvarar för stora delar av trafikeringen av tåg på järnvägarna, innefattar även TGV. Den franska järnvägsinfrastrukturen ägs och förvaltas av RFF (Réseau Ferré de France) som även det är statligt. År 1997 separerades SNCF i två delar där den ena (SNCF) ansvarar för trafikeringen på järnvägen och den andra (RFF) förvaltar och underhåller järnvägen (www.rff.fr, 2009).

Det arbetas kontinuerligt med bullerförebyggande åtgärder inom SNCF och RFF. När en ny bana skall byggas planeras den att ge så liten påverkan som möjligt. Sedan om det är nödvändigt byggs bullerskärmar på utsatta platser (Poisson, personlig kontakt, 2009).

Vid befintlig bana mäts bullernivåer för att se om nivåerna ligger inom gränsvärdena och vid överträdelse kan ytterligare skyddsåtgärder byggas.

Inom RFF arbetas det med att installera räldämpare på ett flertal platser för att minska källbullret. Det pågår även forskning om att minska bullerskärmar höjd och

samtidigt behålla deras bullerreducerande egenskaper för att minska kostnaderna vid byggandet av skärmarna (Poisson, personlig kontakt, 2009).



Figur 33. Karta över det franska järnvägsnätet (MJSmit, 2009).

7.3.2 Train à Grande Vitesse (TGV)

TGV är benämningen på de franska höghastighetstågen som började trafikera järnvägen 1981 (Givoni, 2006). TGV trafikeras inte bara i Frankrike utan trafikerar även banor i grannländerna Belgien och Tyskland. Den franska järnvägen består av två sorters spår, den ena är enbart till för TGV-tågen och kallas LGV (Lignes à Grande Vitesse) (Salomon, 2001). Den andra är den konventionella järnvägen för tåg som inte klassas som höghastighetståg. TGV-tågen får framföras på konventionella spår men övriga tåg får inte framföras på LGV vilket medför att TGV kan utnyttja hela det franska järnvägsnätet men den kan inte utnyttja sin maxhastighet på banor förutom på LGV.

Den första tågmodell som trafikerade frankrikes banor var TGV PSE (Paris Sud-Est) som byggdes av Alstom. Övriga modeller som tas med i denna studie är TGV A

(Atlantique) och TGV Duplex. Dessa tågtyper trafikerar enbart det franska järnvägsnätet och förkortningarna på TGV PSE och TGV A står för vilka regioner de trafikerar. TGV Duplex är ett tvåvåningståg som till skillnad från de andra enbart är konstruerad för LGV (Salomon, 2001).



Figur 34. TGV Duplex, fotograf: Thierry Leleu 2007-05-08

Tabell 6. Information om utvalda TGV-modeller (UIC High Speed , 2009)

Modell	Maximal hastighet	Längd	Bredd	Vikt (torr)	Införd
TGV PSE (Paris Sud - Est)	270 km/h standard, 300 km/h ombyggt	200 m	2,90 m	385 ton	1978
TGV A (Atlantique)	300 km/h	237 m	2,90 m	435 ton	1988
TGV Duplex	320 km/h	200 m	2,90 m	380 ton	1996

Tester på TGV Duplex med en speciell mikrofonkonstellation har testats av Poisson m.fl. (2008) och där utreds varifrån det aerodynamiska bullret kommer ifrån vid olika hastigheter. Testerna visar på att vid 200 km/h är rullningsbullret viktigast men att aerodynamiskt buller som genereras omkring den främre boggin och vindrutan är av liknande storlek. Vid 300 km/h är området kring den främre boggin huvudkällan, dock kan buller från strömvtagaren inte bortses ifrån. När hastigheten ökas till 350 km/h ökar i princip bara ljudnivån från strömvtagaren och främre boggin.

En teknik som används på TGV är att strömvtagaren är monterad i en fördjupning på taket. Flertalet av de tåg som trafikerar det europeiska bannätet har flera strömvtagare eftersom olika elektriska system används i olika länder. Det är även så att strömvtagare finns både fram och bak på tågen för att minska eventuella vibrationer i kraftledningen vid höga hastigheter. Detta medför att denna fördjupning på taket bidrar till turbulenta

luftflöden som är en stor källa till det aerodynamiska bullret (Thompson D. 2009d). Det pågår dock forskning om hur dessa fördjupningar påverkar aerodynamiken och hur bulleralstringen skall minska. Olika metoder med spoilers har prövats men ingen har i nuläget framtagits kommersiellt.

Utveckling och forskning av hjuldämpare på både konventionella tåg och höghastighetståg pågår. Ett annat forskningsområde är bullerreducering för kylfläktar, både med avseende på den stationära bulleralstringen samt den aerodynamiska effekten som uppkommer omkring kylfläktarna vid höga hastigheter (Poisson, personlig kontakt, 2009).

7.4 TYSKLAND

7.4.1 Deutsche Bahn (DB)

Aktiebolaget Deutsche Bahn AG bildades 1994 då de två forna myndigheterna Deutsche Bundesbahn och Deutsche Reichsbahn slogs ihop. Inom DB finns flera underavdelningar där den järnvägsförvaltande avdelningen heter DB Netze (www.deutschebahn.com, 2009).

Vid planeringen av ny- och ombyggnationer av järnvägen utreds behovet av indirekta bullerskyddsåtgärder, detta i form utav bullerskärmar och fasadåtgärder på utsatta bostäder.



Figur 35. Bullerskärm vid Rhendalen i Tyskland (Koch, 2009)

DB har tillsammans med SNCF utfört tester i vindtunnel och även fullskaletest där man tittar på effekter av aerodynamiskt optimala boggis. De har även utfört fullskaliga tester där effekten av boggikjolar i olika hastigheter utreds samt även hur längden på tåget påverkar bulleremissionerna (Schulte-Werning, 2003).

En åtgärd som bedrivs inom DB är akustisk optimerad rälslipning vilket innebär att korrigeringar i rälen slipas ner och leder till minskat buller. Ytterligare en konsekvens av detta är att antalet bullerskärmar och bullerreducerande åtgärder på fastigheter minskas (Hübner, 2007).

7.4.2 Intercity Express (ICE)

I Tyskland startade produktionen av den första versionen av ICE 1989 (Salomon, 2001) kallad ICE-1 och är utvecklad av Siemens och Bombardier. Numera trafikerar den tredje generationen ICE (ICE-3) de tyska järnvägarna och även andra delar av Europa. ICE-3 är en således en utveckling av dess föregångare ICE-1 och ICE-2.

En viktig skillnad mellan den tyska höghastighetsbanan och den franska och japanska motsvarigheten är att godståg har tillåtelse att trafikera större delen av höghastighetsbanorna (Givoni, 2006). Detta medför att ett stort underhållsarbete på spåret krävs för att undvika korrugeringar på rälen som påverkar höghastighetstågen orsakat av blockbromsar på godstågen. Denna problematik gör att godstrafiken är det största bekymret i Tyskland med avseende på buller (Gessner, personlig kontakt, 2009).



Figur 36. ICE-nätverket i Tyskland, maj 2009

- Röd
Höghastighetsbana för 300 km/h
- Orange
Höghastighetsbana för 250 km/h eller mer
- Blå
Uppgraderad bana för 200 km/h eller 230 km/h
- Grå
Konventionell bana, Ofta uppgraderad för 160 km/h

Tabell 7. Information om ICE-3 (UIC High Speed , 2009)

Modell	Maximal hastighet	Längd	Bredd	Vikt (torr)	Införd
ICE 3	330 km/h	200 m	2,95 m	409/435 ¹⁾ ton	2000

¹⁾ Beroende på vilken typ av modell (403/406)



Figur 37. Den 3e generationens ICE, Fotograf: Sebastian Terfloth 2007-08-25

I rapporten *High Speed Train Noise – Sound Source Localization at Fast Passing Trains* skriven av Alexander Martens m.fl. (2003) har författarna genomfört tester på ICE-3 för att lokalisera bullerkällor. Där beskrivs de främsta källorna till bullret som:

- Strömavtagaren
ICE-3 har på samma sätt som TGV flera olika strömavtagare på grund av dess internationella trafik (olika elektriska system). Dock är strömavtagaren ej nersänkt som på TGV utan sitter direkt på taket. Detta har lett till att tillverkaren av ICE-3 har byggt ett skydd runt strömavtagaren som skall minska luftmotståndet och leda luften förbi och på så sätt minska bullret. Ett annat problem är att mellan vissa vagnar sitter det en anordning som binder ihop högspänningskablar (Figur 38). Detta system bidrar till nivåer lika höga som strömavtagaren.



Figur 38. Strömavtagare och kopplingen mellan vagnarna för en ICE-3

- Antenner på taket
På restaurangvagnarna och vagnen längst fram i körriktningen är försedda med antenner vilket medför en ytterligare bulleremission på taket.
- Främre delen på tåget
Den främre boggin är den främsta bullerkällan på ICE-3 vid hastigheter över 300 km/h. Det genereras ett rullningsbuller på grund av hjul/räl kontakten samt även ett aerodynamiskt buller från den otäckta boggin (Figur 37).

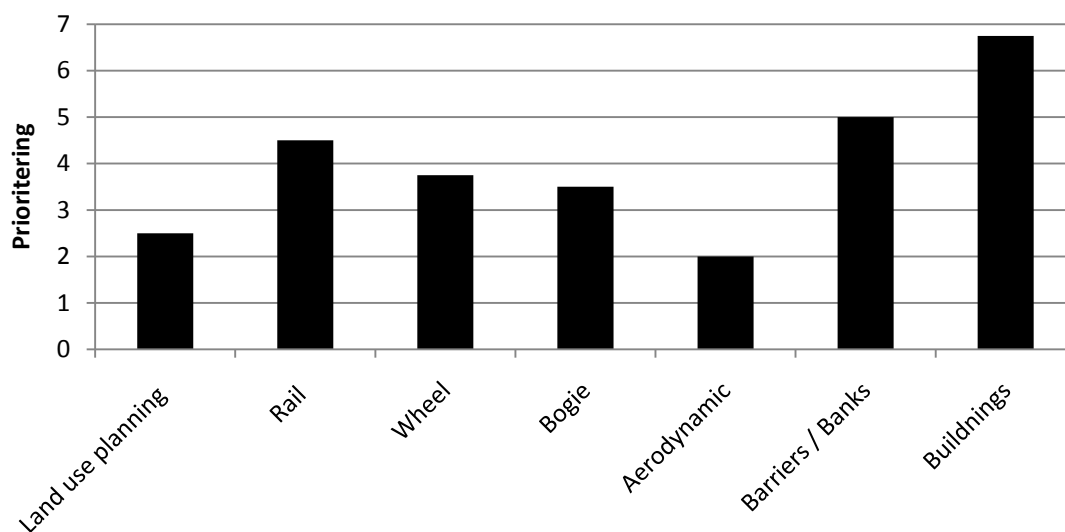
DB och Bombardier har tillsammans arbetat med skapa en aeroakustisk optimal strömavtagare till ICE. Med hjälp av en simuleringsmodell kan lokala emissioner från strömavtagaren lokaliseras och bearbetas. Utöver den optimala formen utvecklades även ett skydd vid foten av anordningen för att minimera bullret (Schulte-Werning, 2003).

Hjulen på ICE-modellerna är försedda med hjuldämpare för att reducera källbullret (Gessner, personlig kontakt, 2009). Den stora utbredningen av hjuldämpare på ICE tågen kommer av att de har en dålig hjuldesign. Designen är vibrationskänslig och åtgärdas med hjuldämpare (Thompson D. personlig kontakt, 2009e).

8 ANALYS

Från litteraturundersökningens *State of the art* har särskilda problemområden identifierats och sammanställts i en modell (Bilaga 2). Modellen har validerats genom en internationell expertgrupp (Tabell 1) genom ett frågeunderlag (Bilaga 1). I underlaget klassificerades även åtgärderna genom att expertgruppen fick prioritera åtgärdernas viktighet, där prioritet 1 är den mest viktiga.

I Figur 39 ses medelvärdet av hur expertgruppen prioriterar problemområdena för buller.



Figur 39. Medelprioritering för olika problemområden för buller.

I Tabell 8 visas de specifika svaren från expertgruppen.

Tabell 8. Prioriteringarna 1-7 uppdelat inom expertgruppen

	Frank Poisson France	Bernhard Koch Germany	Pedro Pères del Campo Spain	Hitoshi Kanda Japan
Land use planning	7	1	1	1
Rail	3	5	5	5
Wheel	2	3	4	6
Bogie	5	4	2	3
Aerodynamic	1	2	3	2
Barriers / Banks	4	6	6	4
Buildnings	6	7	7	7

En punkt har utelämnats i framställningen och det är den som kallades sliper i modellen som skickades ut. Den punkten är något missvisande och handlar egentligen inte direkt om sliparna trots att det är dessa som alstrar bullret. Åtgärden borde istället kallats spårdesign eller banunderbyggnad eftersom det inte bara är sliparna som åtgärdas för att minska bullret det buller som alstras av sliparna. Dessutom är skillnaden stor mellan ländernas utnyttjande av så kallad "slab track" eller ballastfritt spår vilket medförde ytterligare problematik i prioriteringen. Därför utelämnades punkten sliper framställningen.

Punkten *Land use planning* har bedömts av expertgruppen som att det är den främsta åtgärden mot att förhindra att bullret berör mottagare negativt längs banan. Med bra planering kan detta ske i ett tidigt stadium. Dock bedömdes den annorlunda av Franck Poisson (SNCF) där den prioriterades lågt. SNCF är den franska tågoperatören vilket kan ha haft betydelse för klassificeringen av åtgärden *Land use planning*. Ytterligare ett problem med punkten är att förvaltarna av järnvägen inte kan påverka var banan skall byggas utan det ligger på en mer övergripande politisk nivå. Detta kan vara en av anledningarna till att den prioriterades lågt ur den franska järnvägsoperatörens ögon.

En ytterligare frågeställning är angående hur forskning och utveckling skall prioriteras för de åtgärder som diskuterats. Ska fokus ligga på liknande åtgärder eller ska prioriteringarna ändras? För att prioritera åtgärderna mot buller från en forskares synvinkel kontaktades professorn David Thompson som jobbar med buller och vibrationer speciellt för tåg. Enligt Thompson (personlig kontakt, 2009e) så är aerodynamiska åtgärder prioriterade. Utveckling av strömavtagare, karosseri, boggi och nosparti är de viktigaste forskningsområdena i nuläget. Åtgärder som optimering av hjul, samt dämpare på både hjul och räl anses ha hög potential och bör utvecklas ytterligare.

Vid underhållsåtgärder på banan är det räslipning som har en viss effekt på bullret. Men i första hand utförs denna underhållsåtgärd för att minska nedbrytningen av material och för att minska vibrationer.

För att beräkna ljudutbredningen längs järnvägen används olika utbredningsmodeller. I Sverige används Nordisk Beräkningsmodell som beskrivits tidigare och i Tyskland används en modell som heter *Schall 03*. Övriga länder i studien använder sig av olika modeller som de ej namngivit i undersökningen.

9 DISKUSSION

Banverket har tillsammans med KTH och Bombardier utvecklat ett forsknings- och utvecklingsprojekt för höghastighetstrafik som kallas Gröna Tåget. Projektet har tagit fram ett testtåg som syftar till att få fram kunskap om höghastighetståg kopplat till yttre förhållanden i Sverige. Oavsett hur utgången blir angående en implementering av svenska höghastighetsbanor kommer informationen från detta projekt att bli mycket användbar. Detta för att mycket av den forskning som bedrivits även kommer att kunna användas på konventionella tåg för att göra dem mer energieffektiva, komfortabla, säkra m.m.

Vid beräkning av ljudnivåer i Sverige hos en mottagare längs en bana används modellen Nordisk Beräkningsmodell (Naturvårdsverket, 1999). Denna modell har bland annat som indata specifika tågmodellens bulleralstring. Bullernivåerna är empiriskt mätta under kända förutsättningar. Ytterligare indata i modellen är parametrar som påverkar ljudutbredningen. Eftersom rullningsbullret är den största källan för de tåg som framförs i Sverige idag och eftersom ljudet emitteras från de nedre delarna av tågen definieras inte mätningarna på varifrån bullret kommer. För höghastighetståg måste mätningarna utvecklas för att ta hänsyn till varifrån bullret kommer vid olika hastigheter eftersom bullerkällan ändras i höjddled med hastigheten då det aerodynamiska bullret övertar. Det pågår en utveckling av en spridningsmodell som heter Nord 2000 (Jonasson & Storeheier, 2001). Denna modell skall ta hänsyn till fler källor till bullret samt fler meteorologiska parametrar. När och om denna modell kommer att implementeras är en fråga för framtiden. Ett internationellt utvecklingsprojekt för ljudutbredning kallat Harmonoise (de Vos m.fl. 2005) har syftat till att göra en modell för internationellt bruk. Modellen gäller för både väg och järnväg vilket betyder att den inte är speciell för höghastighetståg.

För att modellera och identifiera ljudkällor finns en internationellt vedertagen modell för rullningsbuller kallad TWINS (Track-Wheel Interaction Noise Software). Denna modell simulerar bulleremitteringen utifrån olika material, designer, hastigheter m.m. Däremot finns inga vedertagna kommersiella modeller för att simulera det aerodynamiska bullret. Det finns dock enkelt uppbyggda modeller som ska identifiera källorna till det aerodynamiska bullret, men modellerna är inte implementerade för att användas specifikt på tåg än. Dessa kan vara bland annat Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS), large eddy simulations (LES) och Lattice Boltzmanns metod (Thompson D. 2009d). I nuläget mäts det aerodynamiska bullret med hjälp av flera mikrofoner i olika konstellationer för att lokalisera källan (Figur 40). Olika forskargrupper som arbetar med att ta fram modeller för det aerodynamiska bullret jobbar med liknande konstellationer av mikrofonerna för valideringen.



Figur 40. Stjärnformad akustisk array (Mellet, 2006).

9.1 TILLÄMPNING HOS BANVERKET

Huruvida en framtida höghastighetsjärnväg kommer att byggas i Sverige får framtiden utvisa. Det gäller för Banverket att bygga upp kunskapen omkring de problem som finns vid höghastighetstrafik. Kunskapen och utvecklingen för reducering av buller är starkt kopplat till energieffektiva transporter, komfortutveckling för resenärer, utveckling av säkerheten m.m. Att dra nytta av internationella lösningar på problem som uppstått ger en bredare grund för Banverkets interna arbete. Att se exempel på olika infallsvinklar på problem ger en ökad kunskap och en ökad beredskap inför de problem som Banverket troligtvis kommer att ställas inför vid en implementering.

Med hjälp av modellen i bilaga 2 (*Schematic view of the model for noise sources and the measures to prevent it*) ska arbetet kring åtgärder för att reducera och förhindra buller från höghastighetståg förenklas. Med kunskapen om den prioritering på åtgärder som görs internationellt samt hur utvecklingen och forskningen skall prioriteras kommer det fortsatta arbetet att underlättas och vara mer genomtänkt.

Inom bullerområdet och höghastighetstrafik anser jag att Banverket bör prioritera verksamheten enligt följande punkter:

- Planering

Det arbete som bedömts mest viktigt med att förebygga buller är planeringen av banan. Vid denna fas i arbetet kan många problem både skapas och elimineras. Det som gäller vid planeringen för denna typ av problem är att minimalt med människor skall beröras av buller samt att maximal hastighet skall kunna brukas. Detta är förenklat två extremer som skall samverka vilket kommer att kräva noggrann planering och stor kunskap om problematiken.

I denna planerandefas beräknas även bullernivåer längs utsatta delar på banan. Med en pålitlig och noggrann modell blir planerandet av banan med antalet berörda mottagare mer precist. Beräkningarna utförs i nuläget med en ljudutbredningsmodell kallad Nordisk Beräkningsmodell. Med en god överensstämmelse mellan modell och verklighet skapas goda förutsättningar att sätta in rätt åtgärder i tid.

- Forskning och utveckling

Den bullerproblematik som berör källan ligger oftast hos tågverkarna. Dock är det så att Banverket ansvarar för att bullernivåerna längs banan ligger under givna riktvärden. Tågverkarnas krav ligger under de TSD-er som framtagits och Banverkets riktlinjer finns beskrivna i Tabell 3. Det så kallade källbuller som direkt kan påverkas på tågen kräver stora och omfattande forskningsprogram. Detta för att de bullerreducerande åtgärder och komponenter skall bli så effektiva som möjligt vilket medför att Banverket bör utveckla och stärka sitt samarbete med forskningen. Det finns även en viss utvecklingspotential inom indirekta åtgärder mot bullret där utveckling av bullerskärmar är ett exempel. Det gäller att kunskapen finns för att prioritera rätt

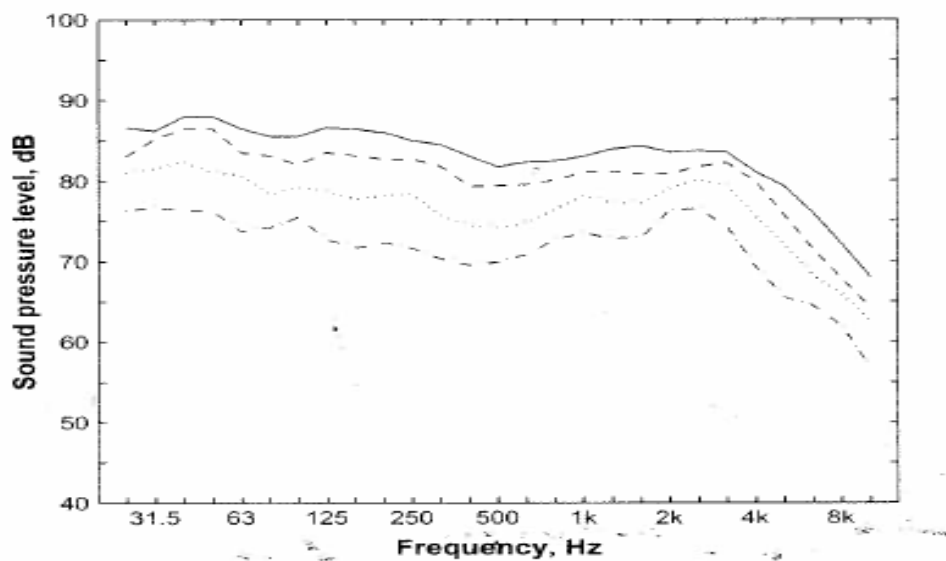
åtgärder för att minimera bullret. Den kunskapen finns internationellt där arbetet är längre gånget än i Sverige inom höghastighetstrafik.

En ytterligare del i utvecklingsfrågan är användandet av ljudutbredningsmodeller. Dagens modell Nordisk Beräkningsmodell hanterar inte specifikt höghastighetståg vilket bidrar till att nya modeller bör tas fram. Modellen Nord 2000 som planeras ta över efter Nordisk Beräkningsmodell bör kunna ta hänsyn till de bullerkällor som är specifika för höghastighetståg. Det finns flertalet internationella modeller inom ljudutbredningen som tillämpas av de olika järnvägsförvaltarna. Dessa modellens indata i form av tågtyper och bulleralstrande mekanismer bör utforskas och vidare implementeras till svenska (eller nordiska) modeller. Eftersom aerodynamiskt buller karakteriseras av låga frekvenser bör modellerna ta mer hänsyn till detta, då sådant buller är mer komplicerat att skydda sig mot.

- Implementering

De åtgärder mot bullret som framtagits och utvecklats skall sedan implementeras i verksamheten. Hur mycket det än utvecklas nya metoder och komponenter som minimerar bullret är det när åtgärden implementeras i längs befintlig bana som de verkliga effekterna uppnås. Det gäller att gå från ord till handling och från laboratoriet till verkligheten.

Det aerodynamiska bullret är dominant vid hastigheter över 300 km/h och rullningsbullret är dominant vid hastighetsintervallet 30 – 300 km/h. Detta medför att åtgärder för rullningsbullret är väldigt viktiga för att minimera antalet berörda trots att det handlar om höghastighetståg. Bullerkällorna för höghastighetståg är delvis det specifika aerodynamiska buller men även det buller som orsakas av det rullande materialet. Denna problematik illustreras i Figur 41. Runt frekvensen 3 kHz finns en topp i kurvorna som ökar i frekvens och i bullernivån med ökad hastighet. Detta är buller som emitteras från hjulen och kommer av kontakten mellan hjul och räl, det dominerar vid hastigheter ≤ 300 km/h. Ljud som karakteriseras av låga frekvenser (aerodynamiskt buller) ses dominera vid hastigheter ≥ 300 km/h. Slutsatsen av detta är att om det aerodynamiska bullret minskar blir snart rullningsbullret dominant varför åtgärder måste ske på båda källorna för att ge samlad effekt.



Figur 41. Typiskt ljudspektrum 25 m från en TGV-Duplex där de fyra kurvorna representerar olika hastigheter. Den nedersta kurvan visar 200 km/h därefter 250 km/h, 300 km/h och den översta kurvan visar 350 km/h (Thompson D. 2009d).

Banverket bör även i framtiden prioritera åtgärder på källan och därefter längs ljudutbredningsvägen för att till sist åtgärda berörda fastigheter vid mottagaren.

10 SLUTSATSER

Utifrån metodvalet och syftet med denna undersökning tillsammans med analysen av modellen har följande åtgärder klassificerats som prioriterade:

- **Planering**
Denna åtgärd för att förebygga bullerspridning till omgivningen bedöms som den viktigaste. Åtgärden bidrar till att antalet berörda längs banan minimeras. Genom att planera en bana där minimalt med människor berörs vid maximala hastigheter skapas goda förutsättningar för fortsatt arbete.
- **Banunderbyggnad**
Designen av banunderbyggnaden där valet av ballastfritt eller ballastspår kommer att beaktas bedöms som någorlunda viktig internationellt. Vissa länder implementerar ballastfria spår, dock har det generellt sett ringa effekt på bullret utan snarare motsatt effekt. Spåren kan dock kombineras med spårnära skärmar som reducerar bullernivåerna.
- **Räl**
Dämpare som fästs på rälen har en hög potential men det behövs ytterligare forskning innan det kan implementeras och ha betydande effekt på reduktionen av bullret. Underhållsåtgärder som rälslipning har en viss effekt på bullret.
- **Åtgärder på tåg**
Dessa åtgärder bedöms ha den största potentialen. Reducering av källbuller på tågen ligger i första hand på tillverkaren av tåg. Specifikt för höghastighetståg är det alstrade aerodynamiska buller som tar över som den största källan vid hastigheter över 300 km/h. Detta buller reduceras genom aerodynamiska vagnkroppar som optimerar luftflödet runt tåget samt att strömvatagaren byggs in eller designas för att minimera luftmotståndet.
- **Bullerskärmar**
Den enskilda åtgärd som idag ger störst effekt och används i första hand vid utsatta områden internationellt sett är bullerskärmar. Detta är dock en åtgärd som har någorlunda stor utvecklingspotential med avseende på reduktion av buller men prioriteringen bör ligga på att minska källbullret. Skärmar placeras fördelaktigt i nära anslutning till spåret.
- **Åtgärder på fasader**
Den sista åtgärden såväl nationellt som internationellt är bullerreducerande åtgärder på fasaden hos utsatta fastigheter. Åtgärden skall även fortsättningsvis vara den åtgärd som prioriteras lägst. I enskilda fall kan dock åtgärden prioriteras för reduktion av bullernivåerna.

Då de företag som tillverkar tåg och komponenter till tåg, samt övriga komponenter till järnvägen, ofta är multiinternationella finns den senaste tekniken nära tillhands. Utvecklingen av komponenter och åtgärder som reducerar det aerodynamiska bullret fortsätter och utvecklas hela tiden och det gäller att ta tillvara på kunskapen och implementera den kontinuerligt.

Det ska dock framhållas att vid reducering av det aerodynamiska buller som uppkommer vid höga hastigheter kan snart rullningsbullrets nivåer bli dominanta igen. Dessa nivåer på bullret kan likväl ligga högre än de riktvärden som finns uppsatta. Detta medför att en reducering av den specifika bullerkällan för höghastighetståg inte löser problemet helt ut. Det måste ske åtgärder på rullningsbullret såväl som på det aerodynamiska. På grund av det aerodynamiska bullrets låga frekvenser som är problematiska att skydda sig mot behövs ytterligare kunskap om dess påverkan.

Läget idag för en implementering av en höghastighetsbana i Sverige är i ett tidigt planerandestadium. Tidigast 2025 skulle en höghastighetsbana kunna vara klar i Sverige. Detta medför att stora möjligheter finns för att påverka bullernivåerna redan innan järnvägen byggts. Kunskapen angående höghastighetstrafikens bullerproblematik behöver utvecklas vidare och bör prioriteras under arbetets gång.

11 REFERENSER

- Banverket & Naturvårdsverket. (2006). *Buller och Vibrationer för spårbunden linjetrafik: Riktlinjer och tillämpning*. Borlänge & Stockholm.
- Banverket. (2008). *Svenska Höghastighetsbanor*. Banverket.
- Berglund, B. Lindvall, T. & Schwela, D. H. (1999). *Guidelines for Community Noise*. Genève: World Health Organization.
- Blidberg, K. (2007). *Bullerkartläggning enligt förordningen om omgivningsbuller*. Borlänge: Banverket, Expertstöd HMSQ Miljö.
- Brunel, J. (2006). Transient models for curve squeal noise. *Journal of Sound and Vibration* (293), 758-765.
- Corus. (2007). Corus Rail Products -Silent Track. *Railway noise reduction system* .
- de Vos, P. Beuving, M. & Verheijen, E. (2005). *Harmonised Accurate and Reliable Methods for the EU Directive on the Assessment and Management of Environmental Noise*. Utrecht: AEA Technology Rail BV.
- Ejvegård, R. (2009). *Vetenskaplig metod* (4:e upplagan uppl.). Lund: Studentlitteratur.
- Fahy, F. & Walker, J. (1998). *Fundamentals of Noise and Vibration*. London: E & FN Spon.
- Givoni, M. (2006). Development and Impact of the Modern High-speed Train: A Review. *Transport Reviews* , 26 (5), 593-611.
- Hartung, C. F. (2002). *A full scale test rig for railway rolling noise*. Göteborg: Chalmers Reproservice.
- Hemsworth, B. (2008). *Environmental Noise Directive Development of Action Plans for Railways*. International Union of Railways (UIC).
- Hemsworth, B. (2000). *Silent track project - Final report*. ERRI.
- Hübner, P. (2007). *Noise Reduction in European Railway Infrastructure: Status report 2007*. Paris: SB Imprimeurs.
- Jacobsen, D. I. (2002). *Vad, Hur och Varför?* Lund: Studentlitteratur.
- Johansson, A. & Nielsen, J. (1998). *Out of railway wheels -A litterature survey*. Göteborg: Chalmers solid mechanics.
- Johansson, B. (2002). *Buller och Bullerbekämpning* (4e uppl.). Danagårds Grafiska AB.
- Jonasson, H. G. & Storeheier, S. (2001). *Nord 2000. New Nordic Prediction Method for Rail raffic Noise*. Acoustics. Borås: SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut.

- Jonasson, H. & Göransson, C. (1995). *Väg- och tågtrafikbuller - En översikt över olika fenomen*. Borås: Sveriges provnings- och forskningsinstitut (SP).
- Jönsson, K. (2002). *Framtida alternativ till bullerskärmar*. Malmö: Banverket.
- Kanda, H. Tsuda, H. Ichikawa, K. & Yoshida, S. (2008). Environmental Noise Reduction of Tokaido Shinkansen and future Prospect. *Noise and Vibration Mitigation* , 1-8.
- Krylov, V. V. (2001). *Noise and vibrations from high-speed trains*. London: Thomas Telford Publishing.
- Lagerkranser, J. (2000). *Tågbuller - Utvärdering med binaural teknik samt förslag till åtgärder*. Maskinelement. Luleå: Institutionen för Maskinteknik.
- Larsson, C. (1997). Atmospheric Absorption Conditions for Horizontal Sound Propagation. *Applied Acoustics* (50), ss. 231-245.
- Larsson, C. (2008). *Bullerutbredning*. Uppsala: Institutionen för geovetenskaper.
- Larsson, C. (1994). Meteorological effects on sound propagation. *Current topics in acoustical research. Council of Scientific Information* . India.
- Martens, A. Wederman, J. Meunier, N. & Leclere, A. (2003). *High Speed Train Noise - Sound Source Localization at Fast Passing Trains*. München: Deutsche Bahn AG.
- Mellet, C. (2006). High speed train emission: Latest investigation of the aerodynamic/rolling noise contribution. *Journal of Sound and Vibration* (293), 535-546.
- Nagakura, K. (2006). Localization of aerodynamic noise sources of Shinkansen trains. *Journal of Sound and Vibration* (293), 547-556.
- Naturvårdsverket. (1999). *Buller från spårburen trafik - Nordisk beräkningsmodell*. Stockholm: Naturvårdsverkets reprocentral.
- Nelldal, B.-L. (2008). *Höghastighetsbanor i Sverige -Götalandsbanan och Europabanan*. Stockholm: KTH Järnvägsgrupp.
- Patel, R. & Davidsson, B. (2003). *Forskningsmetodikens grunder* (3:e upplagan uppl.). Lund: Studentlitteratur.
- Poisson, F. Gautier, P. & Letourneaux, F. (2008). Noise Sources for High Speed Trains: A Review of Results in the TGV Case. i B. Schulte-Werning, *Noise and Vibration Mitigation* (ss. 71-77). Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Raghu, S. (2002). Aerodynamics of high-speed railway train. *Progress in Aerospace Sciences* (38), 469-514.
- Salomon, B. (2001). *Bullet Trains*. Osceola: MBI Publishing Company.
- Schulte-Werning, B. (2003). Research of European railway operators to reduce the environmental impact of high-speed trains. *J. Rail and Rapid Transit* , 217, 249-257.

Svenska kommunförbundet. (1998). *Skönheten och oljudet*. Solna: Tryckindustri AB.

Thompson, D. (1996a). On the relationship between wheel and rail surface roughness and rolling noise. *Journal of Sound and Vibration* (193), 149-160.

Thompson, D. (2009d). *Railway Noise and Vibration: Mechanisms, Modelling and Means of Control*. Oxford: Elsevier Ltd.

Thompson, D., & Jones, C. (2006). Noise and Vibration from Railway Vehicles. i S. Iwnicki, *Handbook of Railway Vehicle Dynamics* (ss. 279-325). CRC Press.

Thompson, D. Fodiman, P. & Mahé, H. (1996c). Experimental Validation of the TWINS Prediction Program for Rolling Noise, Part 2: Results. *Journal of Sound and Vibration* (193), 137-147.

Thompson, D. Hemsworth, B. & Vincent, N. (1996b). Experimental Validation of the TWINS Prediction Program for Rolling Noise, Part 1: Description of the Model and Method. *Journal of Sound and Vibration* (193), 123-135.

UIC. (Januari 2009). High speed rail - Fast track to sustainable mobility. Paris: UIC.

Wallin, H., Bodén, H., Åbom, M., & Glav, R. (1999). *Ljud och Vibrationer*. Stockholm: Norstedts Tryckeri AB.

Åström, M. (2003). *Buller från godståg - Detaljerad kartläggning av buller från godståg samt utvärdering av skärmar*. Arbetsvetenskap, Ljud och vibrationer. Luleå: Luleå Tekniska Universitet.

Ögren, M. (2006). *Noise emission from railway traffic*. Linköping: VTI.

Öhrström, E. & Skånberg, A. (2006). *Litteraturstudie avseende effekter av buller och vibrationer från tåg- och vägtrafik*. Göteborg: Sahlgrenska akademien vid Göteborgs universitet.

Personlig kontakt

Gessner, R. (juni 2009). Dr. Rolf Gessner, DB AG

Péres del Campo, P. (juni 2009). Pedro Péres del Campo, Director of Environment, ADIF

Poisson, F. (juni 2009). Franck Poisson, SNCF

Thompson, D. (2009e). Professor David Thompson, University of Southampton

Lagar och förordningar

Europaparlamentet och rådets direktiv (2002/49/EG)

Europeiska kommissionens beslut den 21 februari 2008 (2008/232/EG)

Förordning om omgivningsbuller, SFS (2004:675)

ISO (1996-2: 1987)

Lag om byggande av järnväg, SFS (1995:1649)

Proposition (1996/97:53)

Internetreferenser

Fröidh, O. (den 14 maj 2008). Gröna tåget. Hämtat från
http://www.infra.kth.se/jvg/presentation/GronaTagetMT_OH080514.pdf

MJSmit. (den 8 juni 2009). *www.wikipedia.se*. Hämtat från
<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:AVE.png>

UIC High Speed . (den 10 augusti 2009). World High Speed Rolling Stock. Hämtat från
<http://www.uic.org/spip.php?article1304>

www.banverket.se. (den 12 maj 2009). Hämtat från
<http://www.banverket.se/sv/Amnen/Jarnvagen/Miljo/Jarnvagens-miljopaverkan/Buller-och-vibrationer/Bullerskydd.aspx>

www.bombardier.com. (den 8 juni 2009). Hämtat från
<http://www.bombardier.com/en/transportation/products-services/rail-vehicles/high-speed-trains/ave-s-102---spain?docID=0901260d8001067e>

www.deutschebahn.com. (den 1 juni 2009). Hämtat från
http://www.deutschebahn.com/site/bahn/de/unternehmen/konzernprofil/im__blickpunkt/markenarchitektur.htmlf

www.hitachi-rail.com. (den 28 maj 2009). Hämtat från http://www.hitachi-rail.com/about_us/delivery/rail_vehicles/high_speed/index.html

www.japanrail.com. (den 26 maj 2009). Hämtat från
http://www.japanrail.com/JR_shinkansen.html

www.khi.co.jp. (den 28 maj 2009). Hämtat från
http://www.khi.co.jp/products/rolling_stock/rolling_stock_e.html

www.rff.fr. (den 29 maj 2009). Hämtat från
<http://www.rff.fr/pages/connaitre/historique.asp?lg=en>

www.traveltojapan.info. (den 4 juni 2009). Hämtat från
<http://www.traveltojapan.info/travel-around-japan/>

Åbom, M. (den 12 juni 2009). *www.gronataget.se*. Hämtat från
http://www.gronataget.se/upload/PublikaDokument/TransportForum20080109/T_forum_BULLER.pdf

BILAGA 1

Questionnaire referred to the problematic sources of railway noise and the measures to prevent propagation

This document is based on the train manufacturers' and the infrastructure managers' biggest issues in noise emissions and noise preventive measures. The .pdf-file *Model* briefly describes the fundamentals in noise emissions and the primarily abatement measures. Note that the questionnaire is only about the **high-speed** traffic. Please look at the file and answer these questions.

Name:

Title:

Company:

Sort these measures in how the priority is in the work of noise abatement at your company, see table 1 on page II.

- A. *Land use planning*
Minimizing the number of people that can be affected by noise when designing and planning a new line.
- B. *Sleepers*
The use of pads beneath the rail and "slab track".
- C. *Rail*
Different types of rail dampers, optimization of rail shape and grinding maintenance.
- D. *Wheels*
By using dampers or optimization of the wheels.
- E. *Bogies*
Measurements for the mechanical noise for example bogie skirt and also the design of the bogie to reduce the squeal noise.
- F. *Aerodynamics*
Development of pantographs, bogie and inter-couch spacing, nose and body-shell design to prevent the aerodynamic noise.
- G. *Barriers / Banks*
To prevent propagation of noise, different types of shielding can be installed and the development of absorbers and optimized shapes.
- H. *Buildings*
The installation of windows or isolation that shields of the noise

Table 1. Fill in the priority column for the noise abatement measures A-H

Measure A-H	The priority (1-8) of the measure, where number 1 is top priority and number 8 is the lowest
A	
B	
C	
D	
E	
F	
G	
H	

Do you think that the same priority order should be applied if the question was about development and research of the measures instead of the actual work?

Do you use a model to calculate the noise propagation from railway traffic?

Does the model “Schematic view of the model for noise sources and the measures to prevent it” illustrate the major issues of noise emissions and briefly describes the methods to prevent noise from reaching the recipient correct?

BILAGA 2

