



Nyttoberäkningar av minskat buller från elbusstrafik i Göteborg

Krister Larsson, Maria Holmes

SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut



**Göteborgs
Stad**

Nyttoberäkningar av minskat buller från elbusstrafik i Göteborg

Krister Larsson, Maria Holmes

Abstract

Social benefit calculations of reduced noise from electric bus transport in Gothenburg

In this study we examine noise from different types of buses. The aim is to calculate the economic benefits of electric buses over other bus types used in Gothenburg in terms of noise reduction. Since there is no established method to investigate the economic effects of noise from buses a large part of this study focuses on if methods currently available to quantify the health effects and economic costs of noise are sufficient to assess the effects of noise from buses. DALYs is a measure that has been developed by the World Health Organization (WHO) to quantify the health effects by counting the number of healthy life years lost every year because of the noise. ASEK is a Swedish method used to calculate the costs caused by the transport sector to society every year.

In order to calculate noise from buses in a sufficiently correct way, it is necessary to have knowledge on how the different bus types operating in Gothenburg today sound. In Gothenburg there are diesel, gas, hybrid and electric buses. The method we used to calculate the bus noise was Nord2000, which is a more advanced method of calculation than the one usually used for calculations in Sweden, i.e. the Nordic Prediction method from 1996 (RTN: 96). The advantage with Nord2000 is that you can use specific input data for each bus type, something that is impossible with RTN where in-data for light and heavy vehicles are based on measurements carried out in the early 1990s. Nord2000 has been implemented in different noise calculation software, of which SoundPLAN is the computational tool used in this project. The drawback with SoundPLAN however, is that it is not possible to calculate maximum sound levels with the Nord2000 model as this has not been implemented in the software. For calculations with Nord2000 new input data has been collected based on measurements of gas, electrically charged hybrid buses driving in diesel mode, and electrically charged hybrid buses driving in electric mode on a test track in the autumn of 2016. For diesel buses existing input data for Nord2000 was used based on measurements in real traffic in 2015. The results of these measurements are used not only to do outdoor calculations of bus noise, but also for calculations of indoor noise.

Another disadvantage of Nord2000 is that the calculations are more time consuming, which meant that we had to limit the geographic calculation area to 32 km² in central Gothenburg. It is the most densely populated area in Gothenburg is where the bus traffic is most intense. In this area, bus traffic along with car traffic and other heavy vehicles was calculated within 100 meters from the road center, as well as within 30 meters of all bus stops to see the effect of starting and stopping on noise levels. We have also calculated a small residential area in the center of town where buses dominate namely the area around Bäckegatan, to analyze the impact of bus traffic noise in more detail.

Measurements of the various bus types demonstrates that there are differences between the bus types and that diesel buses cause more noise than the other bus types. A frequency analysis of the sound also shows that the sound from diesel buses contains much more low frequency sound than electric buses. Gas and hybrid buses lie somewhere in between when it comes to the content of low-frequency sound.

The estimates of the health effects and economic costs of bus noise show that diesel buses cause the highest costs of the various bus types included. But despite electric buses being perceived as much quieter it is in general difficult to show any significant difference between the bus types, even if hybrid buses in diesel mode and gas-powered buses contain more low frequency sound than electric buses. There is however a greater

difference between bus types at bus stops because diesel, hybrid bus in diesel mode and gas-powered buses make a lot more noise than electric buses during acceleration. When the buses are calculated together with other road traffic, the other road traffic tends to dominate due to the fact that the volume of other traffic tends to be much greater than the volume of buses.

However if you only have bus services near homes (without other traffic), the differences in exposure, especially from 55 dBA and above, is large between bus types and the electric bus is by far the quietest option. For exposure at night, calculated both with buses only and with buses and other traffic included, the differences in exposure to sound levels that can cause sleep disturbances are greater between bus types, and electric bus clearly contribute least to increased sleep disturbance.

Research shows that the link between annoyance to and loudness of noise from heavy traffic, measured or calculated as a daily equivalent noise level in decibel A, is not particularly good. Low-frequency sounds are perceived as more disturbing and are perceived as louder than sound sources that are dominated by sounds in the higher frequencies, such as car traffic. The methods for quantifying the health impact and economic costs of traffic noise need to be developed or supplemented by other methods which more accurately include annoyance and sleep disturbance from heavy traffic in order to be able to make more accurate cost-benefit calculations.

Key words: Buller, elbussar, Nord2000, ASEK, DALYS, kollektivtrafik

SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut
SP Technical Research Institute of Sweden

SP Rapport 2016:89
ISBN 978-91-88349-77-4
ISSN 0284-5172
Borås 2016

Innehållsförteckning

Abstract	3
Innehållsförteckning	5
Förord	6
Sammanfattning	7
1 Introduktion och bakgrund	9
1.1 Hälsoeffekter av trafikbuller	9
1.2 Samhällsekonomiska kostnader	11
1.3 Skillnaden mellan elfordon och fordon med förbränningsmotorer	14
1.4 Avgränsningar	15
2 Mätningar på bussar med olika drivlinor	16
3 Indata till beräkningsmodellen Nord2000	23
3.1 Nord2000 Road modellen	23
3.2 Uppdaterade indata till Nord2000 Road	25
3.3 Koefficienter till Nord2000 för uppmätta bussar	26
3.4 Korrektion för acceleration för uppmätta bussar	27
3.5 Avgränsningar	28
3.6 Källor till osäkerheter i indata	28
3.7 Trafikdatabas	29
4 Bullerberäkningar	32
4.1 Beräkningsmetod och beräkningsprogram	32
4.2 Mått för att beskriva buller	33
4.3 Lågfrekvent buller	33
4.4 Urval av beräkningsområde	36
4.4.1 Centrala Göteborg	36
4.4.2 Detaljområde Bäckegatan	37
5 Inomhusnivåer	39
5.1 Maximalnivåer	39
5.2 Typfall för beräkning av inomhusnivåer	40
6 Resultat	43
6.1 Jämförande beräkningar av olika fordonstyper i Nord2000	43
6.2 Centrala Göteborg	44
6.2.1 Antalet exponerade personer	44
6.2.2 Nyttoberäkningar av hälsoeffekter	46
6.2.3 Nyttoberäkningar av samhällsekonomiska kostnader	47
6.2.4 Bullerexponering vid busshållplatser	48
6.2.5 Nyttoberäkningar av samhällsekonomiska kostnader vid hållplatser	51
6.3 Bäckegatan	51
6.3.1 Antalet exponerade personer	56
6.3.2 Nyttoberäkningar av samhällsekonomiska kostnader på Bäckegatan	57
6.4 Resultat inomhus	58
7 Diskussion	61
8 Sammanfattning	65
9 Framtida studier	66
Bilaga 1	67

Förord

Detta projekt har utförts som ett samarbete mellan SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut och Miljöförvaltningen, Göteborgs Stad, på uppdrag av Trafikkontoret vid Göteborgs Stad. Projektet har finansierats inom ramen för Electricity projektet i Göteborg. Författarna vill också passa på att tacka Volvo Buss och Keolis för stödet och hjälp med tillgång till bussar att mäta på. Mätningarna har kunnat utföras på Volvo Cars provbana.

Fredrik Öberg (SP) och Patrik Höstmad (Chalmers) var också behjälpliga vid mätningarna.

Författarna vill också passa på att tacka Mikael Ögren (GU) för stöd och hjälp i samband med beräkning av hälsoeffekter och samhällskostnader.

Sammanfattning

I detta uppdrag undersöker vi buller från busstrafik. Syftet är att beräkna den samhällsekonomiska nyttan av elbussar jämfört med andra busstyper som används i Göteborg med avseende på minskat buller. Eftersom det inte finns någon etablerad metod för att undersöka samhällsekonomiska effekter just av bussbuller har en stor del av denna studie gått ut på att se om de metoder som finns idag för att kvantifiera hälsoeffekter och samhällsekonomiska kostnader av buller är tillräckliga för bussbuller. DALYs är ett mått som har tagits fram av Världshälsoorganisationen (WHO) för att kvantifiera hälsoeffekten genom att räkna ut antalet friska levnadsår som går förlorade varje år på grund av buller. ASEK är en svensk metod som används för att räkna ut kostnader för samhället orsakade av transportsektorn varje år.

För att kunna beräkna bussbuller på ett tillräckligt tillförlitlig sätt krävs det att man har kunskaper om hur de olika busstyper som trafikerar Göteborg idag låter. I Göteborg finns diesel, gas, hybrid och elbussar. Metoden som vi använt för att beräkna bussbuller är Nord2000, som är en mer avancerad beräkningsmetod än den som brukar användas för beräkningar i Sverige, d.v.s. den Nordiska beräkningsmetoden från 1996 (RTN:96). Fördelen med Nord2000 är att man kan använda specifik indata för varje busstyp, något som är omöjligt med RTN där schabloner för lätta och tunga fordon används som är baserade på mätningar som utfördes under början på 1990-talet. Nord2000 finns implementerad i olika mjukvaror, varav SoundPLAN är det beräkningsverktyg som använts i detta projekt. Nackdelen med SoundPLAN är att det inte går att beräkna maximala ljudnivåer med hjälp av Nord2000 modellen. För beräkningar med Nord2000 har indata tagits fram baserade på mätningar av gas, laddhybridbuss i dieseldrift och laddhybridbuss i eldrift på en provbana under hösten 2016. För dieselbuss har befintliga indata för Nord2000 använts med senaste uppdateringen baserat på mätningar i verklig trafik under 2015. Resultaten från dessa mätningar används inte endast för att göra utomhusberäkningar av bussbuller, utan också för beräkningar av inomhusbuller.

En annan nackdel med Nord2000 är att beräkningar är mera tidskrävande vilket gjort att vi har begränsat det geografiska beräkningsområdet till 32 km² i centrala Göteborg. Det är området i Göteborg som är mest tätbefolkat och där busstrafiken är som tätast. Inom detta område har busstrafik tillsammans med biltrafik beräknats för konstant hastighet inom 100 meter från vägmitt, samt inom 30 meter från alla hållplatser för att se effekten av start och stopp på bullernivåer. Vi har också beräknat ett mindre bostadsområde i centrala staden där busstrafiken dominerar, nämligen området kring Bäckegatan, för att kunna analysera effekten av busstrafik på buller mer i detalj.

Mätningar av de olika busstyper visar dels att det finns skillnader mellan de olika busstyperna och att dieselbussar orsakar mer ljud än de andra busstyperna. En analys av ljudet genom en frekvensanalys visar också att ljud från dieselbussar innehåller mycket mer lågfrekvent ljud än elbussar. Gas och hybridbussar ligger någonstans mittemellan när det gäller innehåll av lågfrekvent ljud. Beräkningarna av hälsoeffekter och samhällsekonomiska kostnader av bussbuller visar att dieselbussar orsakar de högsta kostnaderna av de olika busstyper som inkluderats, men att det är svårare att visa någon större skillnad mellan de andra busstyperna, trots att hybridbussar i dieseldrift och gasbussar innehåller mera lågfrekvent ljud än elbussar och trots att elbussar upplevs som mycket tystare. Det närmaste som vi kommer till att visa någon större skillnad är vid hållplatserna på grund av att diesel, hybridbuss i dieseldrift och gasbussar låter så mycket mer än elbussar vid acceleration. När busstrafik beräknas tillsammans med övrig vägtrafik, som vi har gjort, dominerar övrig vägtrafik p.g.a. att antalet passager jämfört med bussar är förhållandevis stort.

Däremot om man bara har busstrafik i närheten av bostäder (utan biltrafik) är skillnaderna i exponering, i synnerhet från 55 dBA och uppåt, stora mellan busstyperna och elbussen är överlägset det tystaste alternativet. För exponering nattetid både med endast busstrafik och även med biltrafik inkluderat är skillnaderna i exponering för ljudnivåer som kan orsaka sömnstörningar större mellan busstyperna och elbussen bidrar klart minst till ökad störning.

Forskning visar att kopplingen mellan störning och buller från tung trafik, mätt eller beräknat som en dygnsekvivalent ljudnivå i decibel A inte är särskilt bra, just på grund av det stora innehållet av lågfrekvent ljud. Lågfrekvent ljud upplevs som mer störande och som att det låter mer än ljudkällor som domineras av ljud i högre frekvenser såsom personbilstrafik. Metoderna för att kvantifiera hälsoeffekten och samhällsekonomiska kostnader av buller från trafiken behöver utvecklas eller kompletteras med andra metoder som på ett mer korrekt sätt kan inkludera störningar från tung trafik för att kunna göra mer korrekta nyttoberäkningar.

1 Introduktion och bakgrund

Göteborg står inför stora förändringar i kollektivtrafiken. I Göteborgs stads trafikstrategi¹ är ett av effektmålen att minst 55 procent av de motoriserade resorna ska ske med kollektivtrafik år 2035. Siffran för 2015 var 37 procent. Andelen resor med buss utgjorde 41 procent (57 procent var spårvagn och 2 procent båt)². Staden planerar för 150 000 fler bostäder och 80 000 nya arbetstillfällen under samma 20 års-period.

Busstrafiken kommer att öka markant de närmaste åren för att möta upp behoven som kommer att finnas i en förtätad stad. För att invånarna, besökarna och näringslivet ska trivas i en tätare stad är det viktigt att vi har ett modernt kollektivtrafiksystem som är tyst och som inte bidrar till högre halter av luftföroreningar. Ett sätt att åstadkomma lägre buller- och luftföroreningsnivåer är att ha en bussflotta som består av elbussar. Vi vet att buller från busstrafik stör invånarna i Göteborg i synnerhet nattetid när man försöker sova ostört. Vi vet också att elbussar är tystare än konventionella bussar, i synnerhet vid låga hastigheter där motorljudet dominerar över däckljudet. Frågan är just hur mycket tystare dessa bussar är i stadsmiljön och vilken effekt detta kan ha på hälsa och välbefinnande.

Västtrafik ansvarar för merparten av busstrafiken i Göteborg. Västtrafik är ett kollektivtrafikföretag som samordnar kollektivtrafiken i Västra Götalands Län. Själva fordonen och förare upphandlas och körs på entreprenad. Göteborgs stadstrafik trafikeras av drygt 700 bussar. Ungefär 220 av dessa är gasbussar, 25 är hybridbussar (linje 60), fem är laddhybrider och tre är elbussar (linje 55) och resterande ungefär 450 fordon är diesalbussar, d.v.s. 64 procent av fordonsflottan³. Ungefär 9 500 bussturer kör på 115 busslinjer under en vanlig veckodag i Göteborg⁴.

Projektets syfte är att beräkna den samhällsekonomiska nyttan av elbussar jämfört med andra busstyper som används i Göteborg med avseende på minskat utomhusbuller.

1.1 Hälsoeffekter av trafikbuller

Den största hälsoeffekten beror på störningar (sömnstörningar och allmänna störningar). Enkätstudier visar att buller upplevs som mer störande än luftföroreningar eller andra föroreningar i miljön. Störning är ingen sjukdom, men den påverkar välbefinnande i hög grad och välbefinnande omfattas av WHO definition av hälsa som är ”ett tillstånd av fullständigt fysiskt, mentalt och socialt välbefinnande”. Störning under längre tid kan leda till sjukdom. Bland människor som är exponerade för högre bullernivåer under en längre tid kan det utlösas en stressreaktion som ökar frekvensen av olika sjukdomar. Hjärt- och kärlsjukdomar (framför allt ischemisk hjärtsjukdom, bl.a. hjärtinfarkt, högt blodtryck och stroke) och diabetes är exempel på sådana sjukdomar. En annan effekt av högre bullernivåer kan vara försämrad inlärning bland barn⁵. Hälsoeffekter orsakade av buller innebär en kostnad för samhället främst på grund av ökade sjukvårdskostnader och förlorade arbetsdagar⁶.

¹ Göteborg 2035 Trafikstrategi för en nära storstad. Antagen av trafiknämnden februari 2014

² Trafiknämndens årsrapport 2015

³ Information från Västtrafiks kundservice, e-post 10 november och 2 december 2016

⁴ E-post meddelande från Diana Björck Laursén, GIS-samordnare Västtrafik, inkl. ifylld excelfil med antalet turer per timme den 13 september 2015, inkommen den 8 juni 2016

⁵ Burden of disease from Environmental noise, WHO 2011.

http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0008/136466/e94888.pdf?ua=1

⁶ Science for environment policy thematic issue: Noise impacts on health, EU-kommissionen, januari 2015.

Bullers påverkan på sömnen har störst betydelse för hälsan. Vi behöver sova bra för att må bra. Det finns starka kopplingar mellan sämre sömn och en rad olika hälsoeffekter. Hör man buller medan man sover ökar hjärtslagen, sömnkvaliteten påverkas och man kan bli väckt. Människor som är exponerade för buller nattetid tar fler medicinska preparat, rör sig mer när de sover och har svårare att somna. Effekterna börjar redan vid 40 dBA utomhus nattetid (mellan kl 22 och 06)⁷. WHO utgår från att skillnaden mellan ljudnivå utomhus och inomhus är 21 decibel, för att ta hänsyn till att man ska kunna sova med öppet fönster. I Sverige, där man oftare sover med stängt fönster och fönstren generellt är bättre (p.g.a. kallt klimat) än i övriga Europa, används 25-27 dBA som en schablon för skillnaden mellan utomhus och inomhus ljudnivåer. Detta innebär att vi bör utgå från ca 45 dBA som utomhusnivå nattetid för att kunna göra en analys mer relevant för Sverige. Det är denna nivå som används också i WHO:s metod för uträkning av hälsoeffekter. WHO påpekar dock att om man tvingas sova med stängt fönster (t.ex. på grund av trafikbuller) med sämre luftomväxling kan det också medför sämre sömn. Enligt Boverket vill 60 procent av befolkningen kunna sova med öppet fönster⁸. Det är därför viktigt att kunna få sova med öppet fönster om man vill. Boverket anger att ett rum med fönster öppet på glänt har 15 -20 dBA högre ljudnivå än om fönstret är stängt. En bullernivå över 55 dBA utomhus nattetid anses av WHO vara farlig för hälsa.

För att utvärdera omgivningsbullers påverkan på hälsa har WHO utarbetat en metod för kvantitativ riskbedömning som utgår från en identifiering av faror, bedömning av befolkningens exponering och bestämningen av lämpliga dos-responssamband⁹. Bedömningen presenteras som DALYs (disability-adjusted life-years), som är en uträkning på hur många friska levnadsår som förloras varje år på grund av omständigheter som påverkar hälsan negativt, i detta fall omgivningsbuller. Enligt WHO:s uträkningar förloras långt över en miljon friska levnadsår i EU varje år p.g.a. trafikbuller (mest vägtrafikbuller men också tåg och flyg påverkar) varav de allra flesta förlorats genom sömnstörningar (53 procent) följt av allmän störning (39 procent). De övriga hälsoeffekter som bedömts i WHO-rapporten (ischemisk hjärtsjukdom och försämrad inlärning bland barn) svarar tillsammans för omkring åtta procent av hälsoeffekten. Andra hälsoeffekter såsom diabetes har dock inte inkluderats i bedömningen och det är därför osäker vilken effekt buller har på denna och andra hälsoeffekter. WHO Europa håller på med en revidering av bedömningen av hälsoeffekter av buller baserad på senaste forskningsresultat. Vilket troligtvis kommer att innebära att fler hälsoeffekter kan med större säkerhet kopplas till buller.

I DALYs uträkningen i denna rapport använder vi en dygnsekvivalent ljudnivå på 50 dBA (detta motsvarar 53 L_{den}^{10}) som den lägsta nivån för allmänna störningar och 45 dBA L_{night} för lägsta nivå för sömnstörningar nattetid. I en WHO rapport¹¹ ges egentligen 42 dB L_{den} som tröskelnivå för hälsoeffekter, men vid så låga nivåer blir exponeringseffekter svårberäknade. Problemet är också att det saknas uppgifter om exponering vid lägre nivåer då vid bullerkartläggningar för EU-direktivet som görs av städer med en befolkning över 100 000 invånare, redovisas exponering endast från 55 dB L_{den} och uppåt.

⁷ Night noise guidelines for Europe. WHO Europe, 2009.

⁸ Buller i planeringen. Boverkets Allmänna råd 2008:1.

⁹ Burden of disease from Environmental noise, WHO 2011

¹⁰ L_{den} är dag-kväll-natt ekvivalent ljudnivå där ljudnivåer kvällstid straffas med ett påslag på 5 dB och nattetid med 10 dB. $L_{den} \approx LA_{eq} + 3$ dB

¹¹ Methodological guidance for estimating the burden of disease from environmental noise. WHO 2012

I WHO:s rapport om nattbuller⁷ anges att man ska använda samma beräkningspunkt som för L_{den} , d.v.s. den mest exponerade fasaden. I praktiken leder detta till en överskattning av exponering nattetid då många har sina sovrum mot den tystaste sidan. I brist på detaljinformation om i vilka rum folk sover i för varje bostad används den mest exponerade sidan för beräkning av exponering även för nattbullret i denna utredning i enlighet med WHO:s rekommendationer.

I en nyligen publicerad studie av exponering för trafikbuller i Malmö som har undersökt störning från trafikbuller med och utan tillgång till en tyst sida på bostaden¹². En tyst sida definieras som en sida med en dygnsekvivalent nivå under 45 dBA. En av huvudslutsatserna var att ljudnivåer från vägtrafik inte bör överskrida 50 dBA som dygnsekvivalent ljudnivå, även om bostaden har tillgång till tyst sida, om man vill skydda merparten (80 procent) av befolkningen från bullerstörning.

Det finns många forskningsstudier som visar på att störning underskattas med A-vägningen (dBA) när ljudet domineras av låga frekvenser. Det betyder att störning från vägtrafik som har en stor andel tung trafik underskattas. Mer om detta finns i avsnitt 4.2.

1.2 Samhällsekonomiska kostnader

Trafikbuller innebär stora samhällsekonomiska kostnader. Kostnader av vägtrafikbuller i Sverige beräknades vara 16 miljarder kronor baserat på 2011 års vägtrafikdata¹³. Kostnaderna i Göteborg är enligt våra tidigare beräkningar över en miljard kronor per år¹⁴. Kostnader beräknas utifrån dygnsekvivalenta ljudnivåer i decibel A.

Samhällsekonomiska analyser av kostnader inom transportsektorn görs enligt en kalkyl- och analysmetod som heter ASEK (Arbetsgruppen för samhällsekonomiska kalkyl- och analysmetoder inom transportområdet). Gruppen samordnas av Trafikverket. I ASEK baseras den totala kostnaden för bullerstörningar från trafiken på störningsgraden både inomhus och utomhus. Värdena av störningarna räknas ut i kronor per utsatt person och år. Ingångsvariabeln är ljudnivån utomhus. Inomhusnivåer antas vara 27 dBA lägre än utomhusnivåer. Merparten av kostnader för bullerstörningar är baserade på betalningsvilja, d.v.s. hur mycket människor är beredda att betala för att minska bullernivåer, baserad på en analys av huspriser. Sjukvårdskostnader och produktionsbortfall på grund av sjukdomar, främst hjärt- och kärlsjukdomar och högt blodtryck bidrar också till kostnaderna av trafikbuller.

Varje år publicerar gruppen en rapport som presenterar de kalkylvärden och kalkylprinciper som bör användas i kommande kostnadsanalyser. De analyser som tidigare utförts i Göteborg har gjorts med ASEK 5.2. I april 2016 kom en ny version av ASEK ut. Nya skattningar av bullerkostnader från vägtrafik har tagits fram och har använts i ASEK 6.0, vilket innebär några förändringar i uträkningen av kostnaderna¹⁵. Dels har nivån från vilken kostnader börjar höjts (från 46 dBA till 50 dBA som dygnsekvivalenta ljudnivån) och kostnaderna är lägre i de lägre bullerintervallerna (50 –

¹² Annoyance, Sleep and Concentration Problems due to Combined Traffic Noise and the Benefit of Quiet Side. Theo Bodin 1, Jonas Björk 1, Jonas Ardö 2 and Maria Albin, 2015. International Journal of Environmental Research and Public Health 2015, 12(2), 1612-1628

¹³ Kartläggning av antalet överexponerade för buller. SWECO, 2014-06-30 på uppdrag av Naturvårdsverket.

¹⁴ Bulleruppföljning av Västsvenska paketet Del 4: Nulägesbeskrivning av exponering för vägtrafikbuller i Göteborg och Mölndal, 2014. Maria Holmes, Miljöförvaltningen i Göteborg, januari 2016

¹⁵ Beräkning av externa kostnader för trafikbuller. Swärdh, J-E., PM till Trafikverket 2015-02-27, VTI.

56 dBA) med ASEK 6.0 än ASEK 5.2. Se bilaga 1 för en jämförelse mellan kostnader med ASEK 5.2 jämfört med ASEK 6.0 för vägtrafik.

I Swärth's PM till Trafikverket 2013¹² beskrivs det hur kostnaderna räknats var för sig för hälsokostnader (baserad på risk för hjärtinfarkt) och störningskostnader (allmänna störningar och sömnstörningar). Störningskostnaderna antas ingå i uträkningen av husköparens betalningsvilja för bullerreducering. Det råder dock osäkerhet om störningskostnader verkligen ingår i betalningsviljan. Enligt Swärth finns det både en risk för dubbelräkning men också att alla effekter såsom störningseffekter inte täcks in. Det finns stora osäkerheter i synnerhet på om kostnader för sömnstörning ingår helt.

I en studie av Andersson et al (2015)¹⁶ visar det sig att betalningsvilja är kopplad till den dygnsekvivalenta ljudnivån och att betalningsviljan inte ökar om man även inkluderar maximala ljudnivåer för vägtrafik. Detta innebär att det inte är möjligt just nu att använda maximala ljudnivåer som ett sätt att raffinera uträkningen av bullerexponeringens samhällsekonomiska kostnader. För tågtrafik är maximala ljudnivåer däremot av stor betydelse. I rapporten skriver man dock att detta är den första studien där man har tittat på maximala ljudnivåer tillsammans med ekvivalenta ljudnivåer och att resultaten därför ska tolkas med försiktighet. Mer forskning behövs, t.ex. i områden där det finns bostäder nära vägen och där trafikflöden är relativt låga men där det finns ett stort inslag av tung trafik, i synnerhet nattetid. Det finns också som tidigare nämnts osäkerheter kring om hälsoeffekterna av maximala ljudnivåer nattetid och dess påverkan på sömnstörning inkluderas i betalningsviljan eller inte.

I en studie finansierad av Trafikverket¹⁷ som baseras på data från sju kommuner i Sverige har man räknat ut betalningsviljan för icke-marginella förändringar i bullerexponering från vägtrafik. Uträkningarna baseras på fastighetspriser indexerade till 2009 års priser. Resultaten visar betalningsviljan för varje decibel sänkning av den dygnsekvivalenta ljudnivån. Att sänka bullernivån med en decibel från en hög nivå (t.ex. 65 – 64 decibel) är värt mycket mer än en sänkning mellan 56 – 55 decibel.

Enligt Trafikverkets anvisningar om tillämpning¹⁸ ska ASEK användas för att räkna ut den samhällsekonomiska nyttan av en bulleråtgärd genom att avläsa skillnaden mellan bullerkostnaderna före en åtgärd med efter åtgärden, baserad på skillnaderna i bullernivåerna före och efter och antalet personer som är berörda. I denna studie beräknar vi bullernivåer på totaltrafiken på de väglänkar som trafikeras av bussar samt alla huvudvägar tillsammans med skillnader i bullernivåer från de olika typer av bussar som ingår i studien, d.v.s. diesel, gas, elbussar och till viss del även elhybrid (endast för Bäckegatan och beräkningar av buller vid hållplatser. Beräkningar på hybridbussar i hela centrala Göteborg har inte rymts inom detta projekt).

I en studie av Koucky and Partners¹⁹ har man använt en annan beräkningsmodell som också baseras på ASEK. Modellen heter BEVA. I modellen kan man använda antaganden om ljudskillnader i dBA mellan olika busstyper (diesel, el och hybrid el-diesel) för att räkna fram antalet exponerade för olika trafikscenarier där olika körförhållanden råder. De har gjort kalkylexempel baserade på fyra olika trafikscenarion som de kallar:

¹⁶ Traffic noise effects of property prices: Hedonic estimates based on multiple noise indicators. Andersson, A., Swärth J-E. & Ögren M. Centre for transport studies working paper 2015:11

¹⁷ Efterfrågan på tystnad – skattning av betalningsviljan för icke-marginella förändringar av vägtrafikbuller. Andersson H., Swärth, J-E. och Ögren, M., 14 november 2013

¹⁸ Analysmetod och samhällsekonomiska kalkylvärden för transportsektorn: ASEK 6.0, kapitel 10 Kostnad för buller. Trafikverket 2016-04-01

¹⁹ Tystare stadsbussar kravställning vid upphandling för minskat källbuller, 3013. Koucky & Partners, författare Ljungblad, H. och Renhammar, T.

Trafikled, central stråk, central bostadsområde och yttre bostadsområde. Utifrån trafikflöden, andelen tung trafik, befolkningstäthet, antal busspassager, flöden under rusningstrafik jämfört med övrig tid samt om det finns nattrafik eller inte har man räknat ut generella skillnader i dBA mellan de olika busstyperna både inomhus och utomhus. Tabell 1 visar de antaganden som de tagit gällande ljudskillnader mellan elbussen och hybridbussen i blandad drift (ibland på el och ibland diesel) jämfört med diesel i de olika trafikscenarion. Tabell 2 visar de samhällsekonomiska störningskostnaderna för busstrafik per kilometer väg för de olika fallen. Någon jämförelse med gasbussar har inte gjorts.

Tabell 1 Antaganden om skillnaden i ljudnivåer mellan el och hybridbussar jämfört med dieselbussar, utomhus och inomhus samt en sammanvägning av utom- och inomhus. Från¹⁹

	El jämfört med diesel	Hybrid el-diesel jämfört med diesel
Utomhus		
Trafikled	-3 dBA	-2 dBA
Central stråk	-6 dBA	-4 dBA
Central bostadsområde	-5 dBA	-3 dBA
Yttre bostadsområde	-4 dBA	-2 dBA
Inomhus		
Trafikled	-6 dBA	-5 dBA
Central stråk	-10 dBA	-7 dBA
Central bostadsområde	-8 dBA	-5 dBA
Yttre bostadsområde	-8 dBA	-5 dBA
Sammanvägning av inomhus och utomhus		
Trafikled	-4 dBA	-3 dBA
Central stråk	-8 dBA	-5 dBA
Central bostadsområde	-6 dBA	-4 dBA
Yttre bostadsområde	-5 dBA	-3 dBA

Tabell 2 Samhällsekonomiska störningskostnader per kilometer väg och per år i miljoner kronor

Trafikscenario	Diesel	El	Hybrid el-diesel
Trafikled	0,72	0,34	0,39
Central stråk	1,58	0,2	0,27
Central bostadsområde	0,46	0,08	0,17
Yttre bostadsområde	0,39	0,14	0,21

Dessa scenarioräkningar visar att den största besparingen, med över en och en halv miljon kronor per kilometer väg och år, är inom det centrala stråket om man byter från dieselbuss till el eller hybridbuss.

BEVA är ett alternativt sätt att räkna fram samhällsekonomiska kostnader där man inte har information om antalet exponerade enligt bullerberäkningar. Eftersom vi tar fram exponering i denna studie använder vi ASEK rakt av för att räkna fram kostnader. Det är en mer exakt metod för uträkningen. Nackdelen för hybridtrafik är att vi inte kan räkna med olika driftslägen (el kontra dieseldrift) utan räknar med att hybridbussen kör endast i dieseldrift.

1.3 Skillnaden mellan elfordon och fordon med förbränningsmotorer

Det finns några olika forskningsstudier och rapporter som har undersökt skillnader mellan konventionella fordon med förbränningsmotorer och elfordon. Inom ett EU- finansierat projekt som heter Civitas Dynamo²⁰ (CIVITAS är ett nätverk inom EU som arbetar för att få städer att gå över till en grön transportsektor) har man bland annat studerat buller från olika busstyper och jämfört el- och elhybridbussar med konventionella dieselbussar av samma typ. Man har kikat på ljudnivåerna både på konstant hastighet och när bussen stannar och accelererar. Man har också jämfört hur mycket de skiljer sig när bussen är fullastad eller bara delvis lastad med passagerare. När den är delvis lastad låter hybridbussen i eldrift i genomsnitt 10 decibel (A) mindre än motsvarande dieselbuss vid acceleration från en hållplats, vilket upplevs som en halvering av ljudnivå. Maximala ljudnivåer kan skilja sig mer än 16 dBA mellan diesel och el drift. När den är fullastad låter elhybriden endast 5 dB mindre än dieselbussen. Problemet när hybridbussen är fullastad är att dieselmotorn startar efter några meter eftersom elenergin tar slut snabbt. Så är inte fallet med elbussar. Enligt artikeln är den genomsnittliga hastigheten av urbana bussar som kör i stadsmiljön mellan 5 och 15 km/tim på grund av att de stannar eller saktar ner ofta vid trafikljus och busshållplatser. Vid dessa låga hastigheter är elbussar väldigt mycket tystare. I centrala Göteborg är medelhastigheten något högre, men ändå tillräckligt låg att det ska finnas stora fördelar med elbussar.

I projektet FOREVER²¹ har man studerat ljudemissioner från olika el och elhybrid fordon. FOREVER är ett av få studier som inkluderar buller från tunga fordon i hybrid eller eldrift. Syftet har varit att ta fram källdata för beräkningar i olika bullermodeller. Enligt resultat som presenteras i projektet var mellantunga hybridlastbilar (kategori 2, som även omfattar bussar) i eldrift betydligt tystare (upp till 8 dB) än motsvarande fordon med förbränningsmotorer vid konstant låga hastigheter. Hybridlastbilen i dieseldrift var 1-3 dBA lägre än den konventionella lastbilen. Över 50 km/tim försvann skillnaden p.g.a. att däckljudet dominerar.

Inom projektet har man också gjort försök med testpersoner för att undersöka hur man upplever ljud från elfordon genom auralisering av vägtrafikbuller med olika andelar elfordon (lätta och tunga fordon). Resultaten visar att deltagarna tyckte att ljudet från trafiken som bestod enbart av elfordon var mer behaglig än trafiken som bestod enbart av fordon med förbränningsmotorer.

I en studie om tystare stadsbussar²² jämfördes busstillverkarnas uppgifter med avseende på buller. Enligt uppgifter från Volvo är gasbussar 2-3 dBA tystare än likvärdiga dieselbussar. Volvo uppger också att elhybridbussen är 3 dB lägre än motsvarande dieselbuss på raksträcka och 4 dBA tystare vid hållplatsläget avseende maximalnivåer. I en backe ligger dock båda busstyper på ungefär samma nivå. I samma studie anges beräkningsresultat av tre olika busstyper – en dieselbuss, en elbuss och en hybridbuss som drivs med el och diesel. Skillnaden mellan normaldrift med el och normaldrift med diesel är 5 dBA. Bussar med blandad el- och dieseldrift är 3 dBA tystare. Det nämns också att skillnaderna i bullernivåerna inomhus kommer att vara ännu större då elbussar är mycket tystare vid låga frekvenser. Enligt deras uppskattning blir det upp till 4 dBA tystare vid låga hastigheter, 30 km/tim eller lägre.

²⁰ <http://www.civitas.eu/content/dynmo>, 2015

²¹ FOREVER – noise emission of electric and hybrid electric vehicles, WP 2, April 2015. CEDR transnational road research program call 2012

²² Tystare stadsbussar kravställning vid upphandling för minskat källbuller, 2013. Koucky & Partners, författare Ljungblad, H. och Renhammar, T.

1.4 Avgränsningar

Inom projektet används befintliga tillgängliga beräkningsmodeller för bullerberäkningar. Det har inte funnits utrymme för att utveckla källmodeller bättre lämpade till alternativa drivlinor eller körförhållanden. Indata anpassas i stället efter befintliga beräkningsmodeller.

Mätningar har enbart gjorts på ett enstaka exemplar av respektive fordonstyp. Ingen analys av individuella variationer eller inverkan av olika däck eller vägtyper har gjorts i denna rapport.

Beräkningstiden med Nord2000 i Soundplan är betydligt större än för den Nordiska 1996 modellen. För att få hanterbara beräkningstider har beräkningarna gjorts för ett begränsat området och med avgränsad trafik.

Andra nyttor som t.ex. minskade emissioner och partiklar studeras inte i denna rapport.

2 Mätningar på bussar med olika drivlinor

Befintliga indata för bullerberäkningsmodeller som den nordiska beräkningsmodellen från 1996 eller Nord2000 baseras på statistiska utvärderingar av ett stort antal mätningar av fordon i verklig trafik²³. Indata representerar typiska fordon i respektive fordonskategori. RTN från 1996 kategoriserar fordon i endast två olika kategorier; lätta fordon och tunga fordon. Nord2000 modellen innehåller flera kategorier men de indata som finns gäller för lätta fordon, medeltunga fordon respektive tunga fordon. Bussar kategoriseras in i samma kategori som lastbilar. Det saknas därför indata för specifika busstyper och befintliga kategorier enligt Nord2000 är därför inte direkt användbara för beräkningar på elbussar.

För att ta fram relevanta indata till Nord2000 genomfördes mätningar på en laddhybridbuss (2-axlig Volvo 7900) samt en gasbuss (3-axlig MAN Lion's city) på en provbana 14-15 september 2016. Vägytan uppfyller kraven enligt ISO10844. Laddhybridbussen testades dels i ren eldrift och dels i dieseldrift, vilket innebär att tre olika drivlinor testades. Mätningarna gjordes under goda väderleksförhållanden. Lufttemperaturen varierade mellan 22-27 grader, vindhastigheten var lägre än 5 m/s och klar himmel.

Mätningarna genomfördes enligt tillämpliga delar av NT 116²⁴ NT 109²⁵, ISO 362²⁶, samt anvisningar enligt PIEK²⁷. Fyra mikrofoner på olika höjd användes placerade på 7,5 m avstånd från vägmitt. Mikrofonhöjderna var 0,5 m, 1,2 m, 1,5 m och 4,0 m. Tre olika typer av mätningar genomfördes för varje fordon, dels pass-by mätningar vid konstanta hastigheter 10, 20, 30 40 respektive 50 km/h, dels accelerationsprov från stillastående enligt PIEK, samt mätningar av simulerad hållplats med stopp från 30km/h och start igen upp till 30 km/h. Under accelerationsproven gjordes mätningar vid tre olika accelerationsnivåer, låg medel samt maximal acceleration. Mätningarna gjordes både för vänster- respektive högerpassager.

Båda fordonen preparerades med samma typ av däck och däckstryck justerades för att kompensera för fordonens tyngd och last. Laddhybridbussen hade två axlar, medan gasbussen hade tre axlar, vilket kan ha påverkat resultaten på grund av inverkan av däckvägbuller.

Mätningarna korrigerades för bakgrunds nivå. Ljudexponeringsnivån (SEL) under fordonspassagerna med konstant hastighet beräknades för en sträcka av totalt 75 meter (37,5 m före respektive efter mikrofonpositionerna). Passagetiden bestämdes utifrån sträckan och den nominella hastigheten för respektive passage, d.v.s. 10, 20, 30, 40 respektive 50 km/h. För hållplatssimuleringarna beräknades SEL för hela fordonspassagen. Maximalnivåer bestämdes från accelerationsförloppen från hållplatssimuleringarna.

²³ Larsson K. Jonasson H. SP-Rapport 2015:72 Uppdaterade beräkningsmodeller för vägtrafikbuller. Borås 2015, ISBN 978-91-88001-95-5

²⁴ Nordtest method NT ACOU 116, ROAD VEHICLES: DETERMINATION OF NOISE EMISSION

²⁵ Nordtest method NT ACOU 109, DETERMINATION OF IMMISSION RELEVANT NOISE EMISSION

²⁶ ISO 362-1:2015 Measurement of noise emitted by accelerating road vehicles – Engineering method – Part 1: M and N categories

²⁷ PIEK-Keur, Methods of measurement for peak noise during loading and unloading (2015 update), available at www.piek-international.com

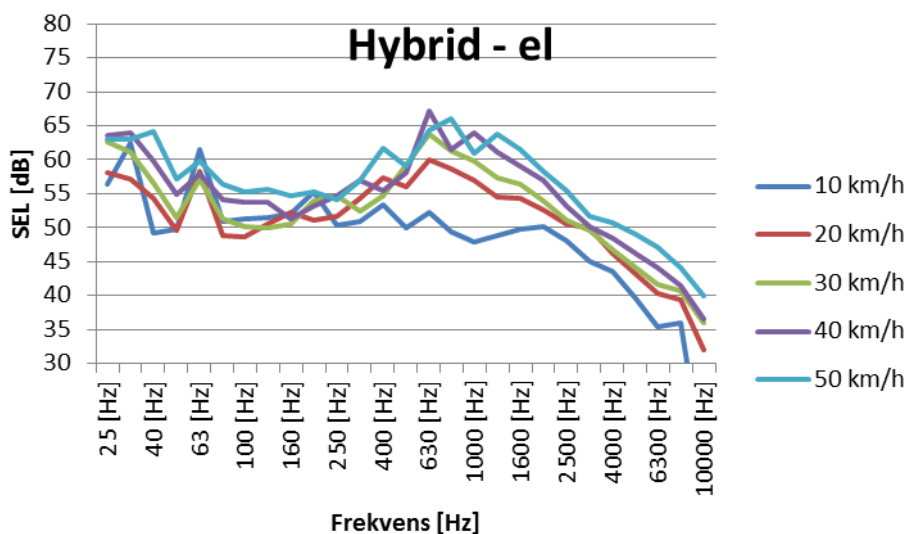
Figur 1 - Figur 3 visar uppmätt ljudexponeringsnivå (SEL) på 1,2m höjd och 7,5m avstånd vid olika hastigheter i tersbanden 25Hz- 10kHz för laddhybrid i eldrift, laddhybrid i dieseldrift samt för gasbuss. SEL motsvarar den totala ljudenergin under en passage och kan relateras till den ljudeffekt som bussarna ger ifrån sig under mätsträckan när man tar hänsyn till fordonens hastighet. De värden som redovisas här är medelvärden av passager från både höger och vänster för att ta hänsyn till att bussarna kan låta olika i olika riktningar då bussarna kan ha olika utrustning och ljudkällorna kan vara placerade på ena sidan av bussen. Medelvärdesbildningen är baserad på minst 2 fordonspassager, vilket är en orsak till större mätosäkerhet. Repeterbarheten för fordonspassagera var dock mycket hög. Båda bussarna kördes av samma chaufför som var tränad och van att utföra testerna, vilket minskar variationen beroende på körfallen. Den största källan till osäkerheter i indata bedömdes ha att göra med spridningen mellan olika fordonsindivider och variation mellan förare i verklig trafik. Därför bedömdes inte att fler repetitioner med samma fordon och förare skulle resultera i någon betydande högre noggrannhet i slutresultatet, trots en förbättrad noggrannhet av repeterbarheten.

Resultaten visar att hybridbussen i eldrift genererar de lägsta nivåerna av de tre mätta bussarna, speciellt i de lägre frekvenserna under ca 400 Hz. Elbussen visar också ett tydligt hastighetsberoende över ett brett frekvensområde. Vid högre frekvenser, över 400 Hz, beror hastighetsberoendet på att däck-väg bane bullret här har en stor inverkan på nivåerna. Högre hastighet resulterar i högre ljudemission. Resultaten visar också vissa enskilda frekvenstoppar, t.ex. vid 63 Hz, vilka kan härledas till tonala komponenter i motorljudet.

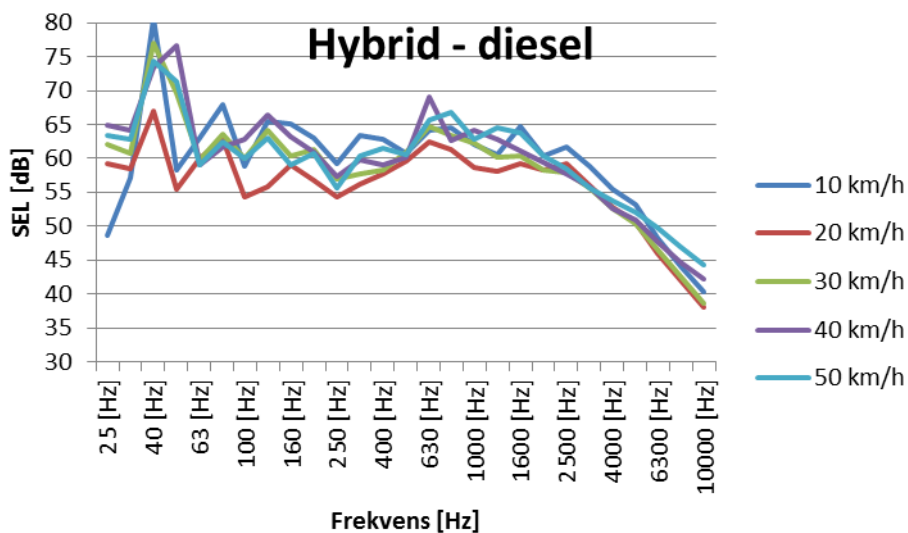
När hybridbussen körs i dieseldrift blir ljudemissionen generellt sett högre över hela frekvensområdet, se Figur 2. Hastighetsberoende är inte längre lika tydligt och motorljudet påverkar resultatet även vid de något högre hastigheterna. Vid låga frekvenser syns tydliga frekvenstoppar som kan härledas till motorvarvtalet. Erfarenhetsmässigt kan dessa toppar variera stort mellan olika fordonsindivider och körsätt beroende på växel och motorvarvtal. Vid en jämförelse med befintliga indata till beräkningsmodellen Nord2000 som redovisas t.ex. i ²⁸ är de kurvorna jämnare över frekvens tack vare medelvärdesbildningen av många olika fordon och körförhållanden i verklig trafik.

Uppmätt ljudemission för gasbussen redovisas i Figur 3. Resultaten visar ett tydligare hastighetsberoendet för gasbussen än hybrid-dieseln i frekvensområdet över 400 Hz, vilket tyder på att däck-väg ljudet kan vara mer dominant och därmed att motorljudet är något lägre än för den aktuella dieseln, men samtidigt högre än för elmotorn. Vid lägre frekvenser är hastighetsberoendet inte lika starkt och motorljudet dominerar troligtvis där. Nivåerna för gasbussen är något högre än hybrid-dieseln för frekvensområdet 100-250 Hz. Även gasbussen visar tydliga tonala lågfrekventa komponenter vilka beror av motorvarvtal, även om de inte är lika starka som för hybrid-dieseln.

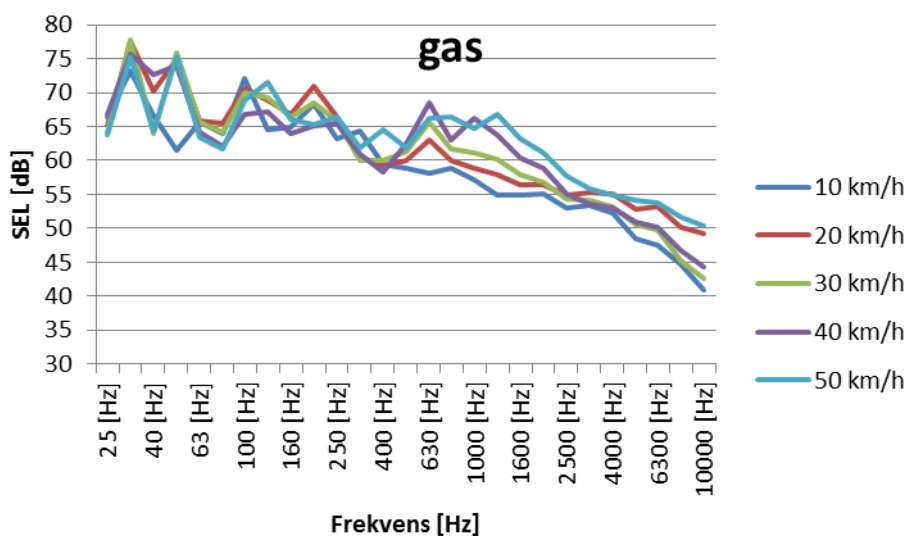
²⁸ Larsson K. Jonasson H. SP-Rapport 2015:72 Uppdaterade beräkningsmodeller för vägtrafikbuller. Borås 2015, ISBN 978-91-88001-95-5



Figur 1 Ljudexponeringsnivå på 1,2 m höjd vid 7,5 m avstånd för elbusspassage



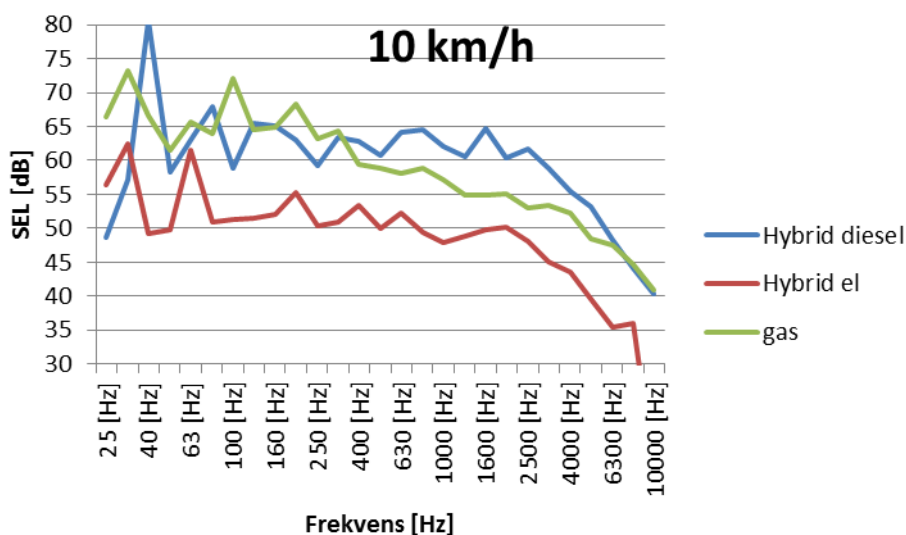
Figur 2 Ljudexponeringsnivå på 1,2 m höjd vid 7,5 m avstånd för hybrid-dieselbusspassage



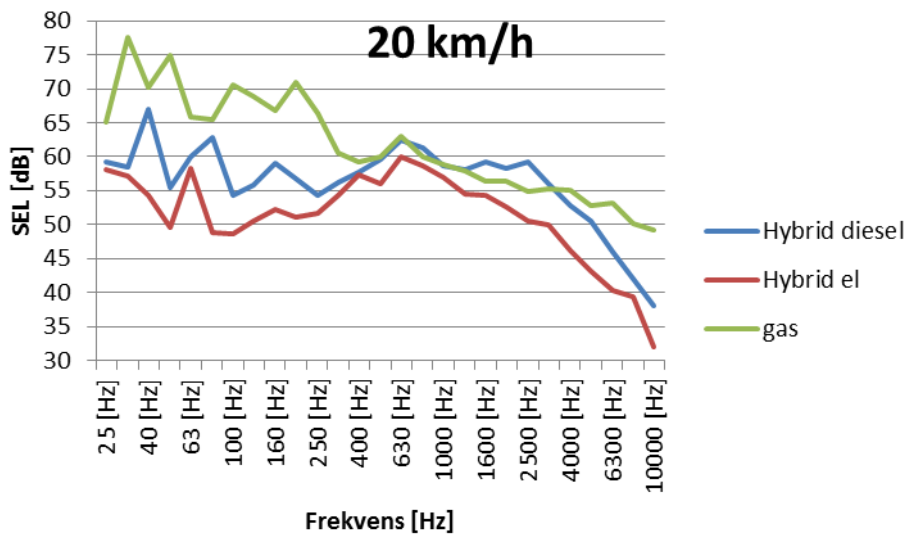
Figur 3 Ljudexponeringsnivå på 1,2 m höjd vid 7,5 m avstånd för gasbusspassage

De tonala komponenterna som syns vid låga frekvenser kan ha stor betydelse för inomhusnivåer i rum i närheten av exempelvis busshållplatser, korsningar, bussterminaler eller vid tomgångskörning där resonanser i rummen kan resultera i höga inomhusnivåer och störningar om de sammanfaller med de tonala komponenterna från motorerna.

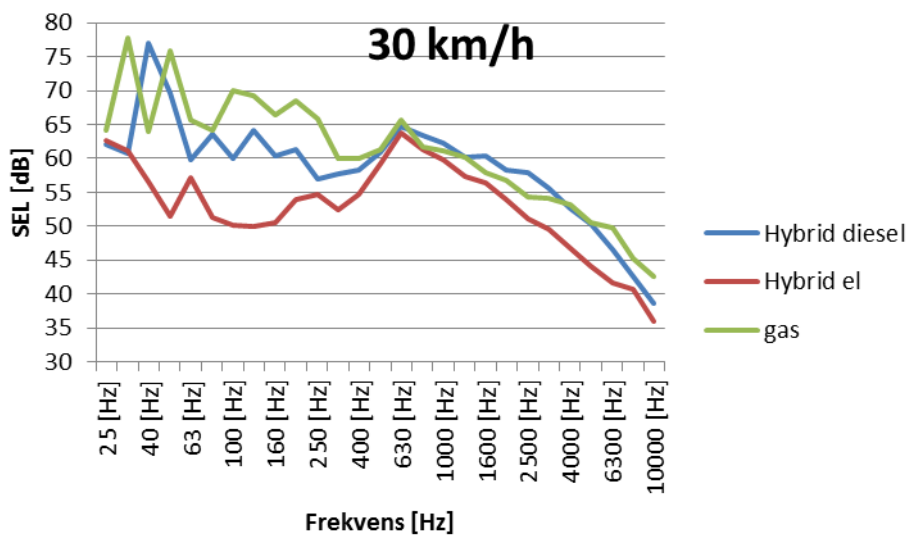
För att göra resultaten och jämförelsen mellan fordonen tydligare redovisas i Figur 4 - Figur 8 uppmätt SEL på 1,2m höjd som funktion av frekvens för de 5 olika hastigheterna separat. Vid 10 km/h är normalt däck-väg ljudet mycket litet, speciellt på en provbana med slät asfalt, varför Figur 4 ger en fingervisning om skillnaderna i motorljud mellan de olika fordonen. Figuren visar tydligt att elbussen genererar tydligt lägre buller över i princip hela frekvensområdet än övriga fordon. Intressant är också att gasbussen och hybrid-dieseln genererar i stort sett samma bullernivå för frekvenser under 400 Hz vid denna hastighet, medan motorljudet från hybrid-dieseln är starkare för frekvenser över 400 Hz jämfört med gasbussen. När hastigheten ökar kommer rullningsljudet från däck-väg kontakten att få större och större betydelse även på provbanan, varför bussarna betar sig mer och mer lika i frekvensområdet där däcksbullret bidrar, 400 Hz – 2500 Hz. Vid lägre frekvenser under 400 Hz där motorljudet är dominerande för samtliga hastigheter i denna mätning på provbanan ger gasbussen högst nivåer, medan elbussen är tydligt tystast.



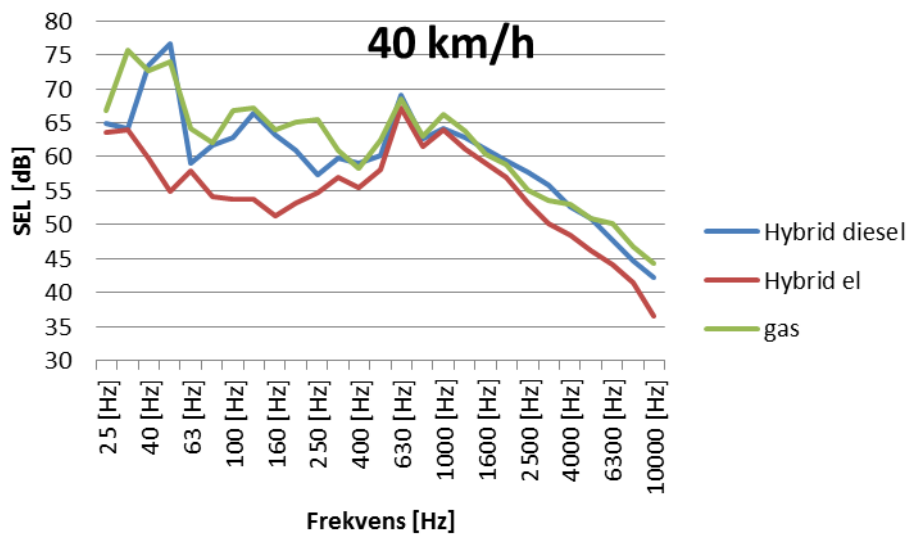
Figur 4 Ljudexponeringsnivå på 1,2m höjd vid 7,5m avstånd



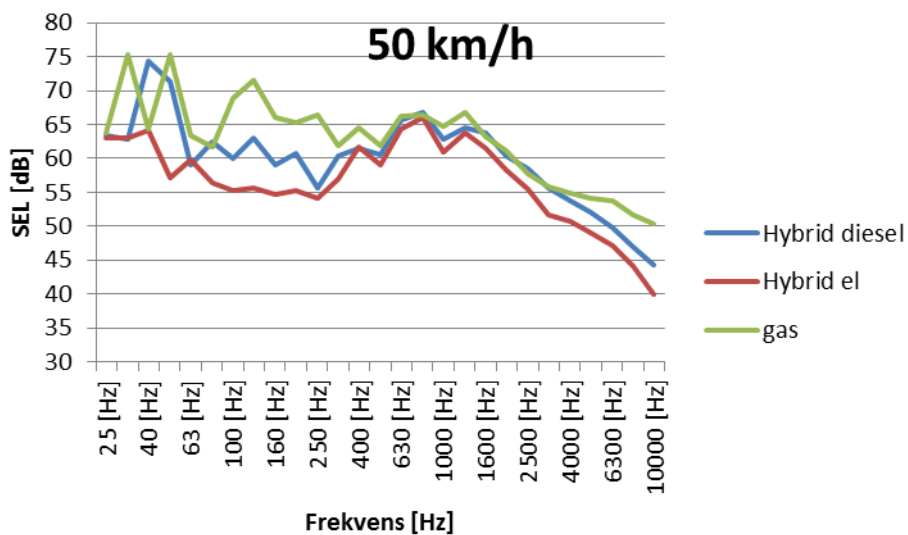
Figur 5 Ljudexponeringsnivå på 1,2m höjd vid 7,5m avstånd



Figur 6 Ljudexponeringsnivå på 1,2m höjd vid 7,5m avstånd



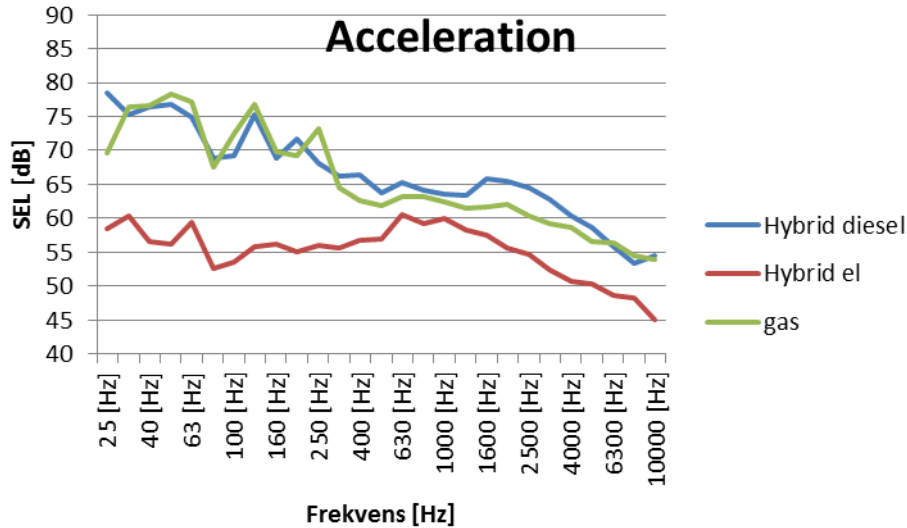
Figur 7 Ljudexponeringsnivå på 1,2m höjd vid 7,5m avstånd



Figur 8 Ljudexponeringsnivå på 1,2m höjd vid 7,5m avstånd

Vid beräkning av ljudexponering vid bostäder används normalt A-vägning för att jämföra med riktvärden, eller för att beräkna störning och hälsoeffekter. A-vägningen gör att de lägre frekvenserna får mindre inverkan på den totala nivån. I stället har frekvensområdet mellan 500 – 2500 Hz störst betydelse för den totala A-vägda nivån. Mer om detta redovisas i avsnitt 4.3. De skillnader som de redovisade mätresultaten visar mellan bussarna kommer därför inte att ge lika stora skillnader i A-vägd ljudexponeringsnivå. Däck-vägljudet får där en större inverkan på det totala A-vägda resultatet. Eftersom samma däck och vägbeläggning antas för samtliga bussar kommer inte skillnaderna i motorljud påverka den totala A-vägda ljudnivån, förutom i de körfall där motorljudet dominerar även den totala nivån. Ett exempel på en sådan situation kan vara vid acceleration t.ex. vid start och stopp vid busshållplatser.

Figur 9 visar uppmätt SEL på 4 m höjd och 7,5 m avstånd under accelerationsförlopp för de 3 mätta bussarna. Figuren visar att för hybriderna i dieseldrift och gasbussen är det lågfrekventa ljudet under 400 Hz dominerande, medan för elbussen är det lågfrekventa ljudet betydligt lägre. Accelerationsmätningen visar också att dieselbussen är något bullrigare än gasbussen vid högre frekvenser, vilket troligtvis även kan ge skillnader på den totala A-vägda nivån.



Figur 9 Ljudexponeringsnivå på 4,0m höjd vid 7,5m avstånd under acceleration

De redovisade mätdata för olika hastigheter har använts för att beräkna indata i form av koefficienter för drivlinebullret till Nord2000 modellen, samt för att beräkna accelerationskoefficienter för samma modell.

3 Indata till beräkningsmodellen Nord2000

För att förstå hur indata till beräkningsmodellen Nord2000 är utformad behöver vi också förstå hur modellen är utformad. Här följer en kort beskrivning för att ge en bakgrund till hur indata till källmodellen i form av koefficienter kan tas fram. En mer utförlig beskrivning av vägtrafikbullermodellen Nord2000 Road ges i användarmanualen till Nord2000²⁹ och för källmodellen i en SP rapport³⁰.

3.1 Nord2000 Road modellen

Nord2000 för vägtrafikberäkningar (Nord2000 Road) består av flera delar där källorna modelleras för sig och ljudutbredningen mellan källan och mottagaren modelleras för sig. Här fokuserar vi på källmodellen för vägtrafikbuller enbart. I Nord2000 Road görs beräkningar i tersband mellan 25 Hz upp till 10 000 Hz, och den A-vägda nivån beräknas utifrån tersbandsnivåer.

Nord2000 använder fordonskategorier enligt Tabell 3. I Nord2000 Road finns för närvarande bara data för huvudkategorierna 1, 2 och 3; lätta, medeltunga och tunga fordon.

Tabell 3 Fordonskategorier enligt Nord2000 Road / Harmonoise

Main category (type)	No.	Sub-categories: Example of vehicle types	Notes
Light vehicles	1a	Cars (incl MPV:s up to 7 seats)	2 axles, max 4 wheels
	1b	Vans, SUV, pickup trucks, RV, car+trailer or car+caravan, MPV:s with 8-9 seats	2-4 axles, max 2 wheels per axle
	1c	Electric vehicles, hybrid vehicles driven in electric mode	Driven in combustion engine mode: See note
Medium heavy vehicles	2a	Buses	2 axles (6 wheels)
	2b	Light trucks and heavy vans	2 axles (6 wheels) ⁽³⁾
	2c	Medium heavy trucks	2 axles (6 wheels) ⁽³⁾
	2d	Trolley buses	2 axles
	2e	Vehicles designed for extra low noise driving	2 axles ⁽⁵⁾
Heavy vehicles	3a	Buses	3-4 axles
	3b	Heavy trucks	3 axles
	3c	Heavy trucks	4-5 axles
	3d	Heavy trucks	≥6 axles
	3e	Trolley buses	3-4 axles
	3f	Vehicles designed for extra low noise driving	3-4 axles
Other heavy vehicles	4a	Construction trucks (partly off-road use)	
	4b	Agr. tractors, machines, dumper trucks, tanks	
Two-wheelers	5a	Mopeds, scooters	Include also 3-wheel motorcycles
	5b	Motorcycles	

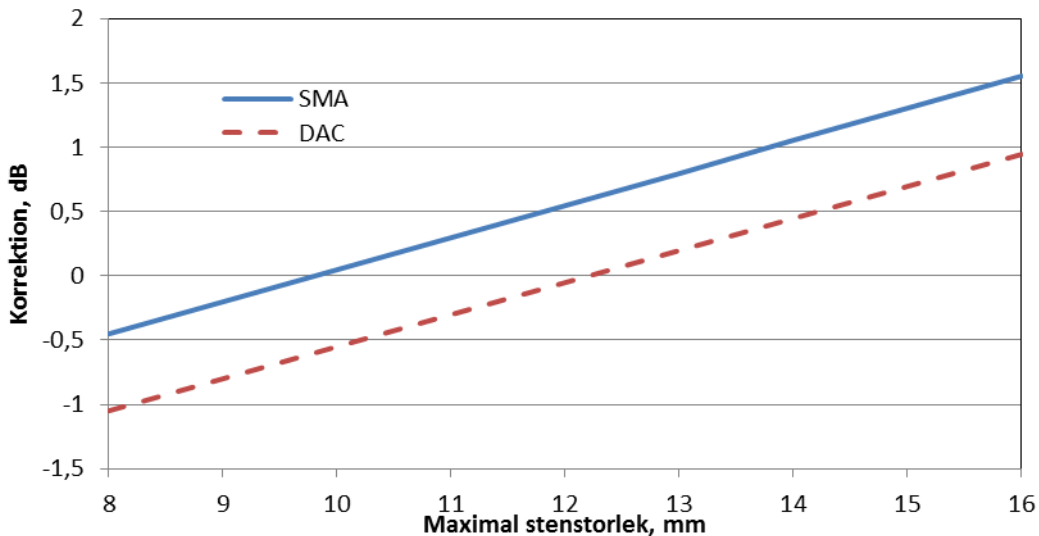
²⁹ User's Guide Nord2000 Road . u.o. : Delta, 2006. Report AV1171/06.

³⁰ Jonasson, Hans G. *SP Rapport 2006:12 Acoustic Source modelling of Nordic Road Vehicles. Revised 2006-10-17.* Energy Technology. Borås : SP, 2006. SP Rapport.

Inom det europeiska Imagineprojektet³¹ inom EUs 6e ramprogram mättes data för kategori 5 upp. För tunga fordon kompletteras med antalet axlar. Utgångsvärdena anges i form av ljudeffektnivå och man separerar mellan däck-vägbanebuller och framdrivningsbuller. Ljudeffektnivån, L_{WR} , för en referensvägbana som funktion av frekvensen, f , och hastigheten v för däck-vägbanebuller beskrivs med ekvation (1).

$$L_{WR}(f) = a_R(f) + b_R(f) \lg \left[\frac{v}{v_{ref}} \right] \quad (1)$$

Koefficienterna a_R och b_R ges för referensförhållandena 20°C och en virtuell referensvägbeläggning som representerar medelvärdet av tät asfaltbetong, DAC (eller ABT på svenska), och skelettasfalt, SMA (eller ABS på svenska), med maximal stenstorlek 11 mm. För de vanligaste avvikande vägbanorna ges korrektioner till koefficienten a_R , dvs. korrektionerna är hastighets- och frekvensoberoende. Observera att vägbanekorrektionen endast ska göras för lätta fordon i kategori 1. Korrektionen är 0,25 dB per mm ökad stenstorlek och visas i Figur 10. Att korrektionen enbart ska göras för lätta fordon baseras på antagandet att motorljudet har en större inverkan på totala ljudeffekten även vid högre hastigheter för tyngre fordon, samt att olika typer av däck används för tunga respektive lätta fordon. För tunga elfordon eller hybridfordon i eldrift dominerar bullret ofta av däck/väg kontakten varför hänsyn till vägytan borde göras även i de fallen. Detta har dock inte kunnat studeras närmare inom ramen för detta projekt, utan befintlig antaganden i Nord2000 har använts.



Figur 10 Korrektion för inverkan av vägbeläggning att addera till a_R enligt Nord2000 Road

Korrektioner ges även för lufttemperaturen där kategori 2 och 3 endast ska korrigeras hälften så mycket som kategori 1 fordon.

Ljudeffekten för framdrivningsbullret L_{WP} ges av ekvation (2).

$$L_{WP}(f) = a_P(f) + b_P(f) \left[\frac{v - v_{ref}}{v_{ref}} \right] \quad (2)$$

där koefficienterna a_P och b_P ges för respektive fordonskategori i³².

³¹ http://ec.europa.eu/research/fp6/ssp/imagine_en.htm

³² Jonasson, Hans G. *SP Rapport 2006:12 Acoustic Source modelling of Nordic Road Vehicles. Revised 2006-10-17*. Energy Technology. Borås : SP, 2006. SP Rapport.

Däck-vägbankällan representeras av en punktkälla 0,01 m över vägbanan medan framdrivningsbullret representeras av en punktkälla som är 0,3 m över vägbanan för lätta fordon och 0,75 m över vägbanan för tunga. Dessutom görs en viss fördelning av ljudeffekten från respektive ljudkälla genom att placera 20% av ljudeffekten från däckvägljudet vid den högre källan, samt 20% av ljudeffekten från framdrivningsljudet vid den lägre källan.

Ljudutbredningsmodellen som används för Nord2000 är baserad på en fysikalisk modell som tar hänsyn till fasförhållandena mellan direkt och reflekterat ljud³³. Den är dokumenterat väldigt korrekt vid neutral väderlek med rätlinjig ljudutbredning. Vid väderleksberoende ljudutbredning bygger modellen på böjda ljudbanor och då blir beräkningsosäkerheten större.

Förutom ytbeläggning korrigeras rullningsljudets ljudeffekt för lufttemperatur samt en korrektion av spektrum för dubbdäcksanvändningens påverkan på vägbanan som används för svenska, norska och finska förhållanden. Dubbdäcken sliter på vägbeläggningen och för att klara slitaget används grövre stenar i beläggningen. Vägslitaget påverkar frekvensinnehållet från däck-väg ljudet och därför korrigeras för det för svenska beläggningar. Korrektionen ges i Tabell 4 och adderas till koefficienterna a_R i frekvensbanden 250 Hz – 10kHz för fordonskategorier 1, 2 och 3, d.v.s. både lätta och tunga fordon.

Tabell 4 Befintliga spektrumkorrektioner för Svenska förhållanden enligt Nord2000 Road

250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	6,3k	8k	10k
1,0	1,0	1,0	1,0	2,0	2,0	2,0	2,0	-1,0	-2,0	-3,0	-4,0	-4,0	-3,0	-1,0	0,0	2,0

För att ta hänsyn till ökad ljudeffekt vid acceleration ges en möjlighet i beräkningsmodellen att addera en korrektion till framdrivningsbullret enligt Tabell 5.

Tabell 5 Korrektioner för acceleration

Fordonskategori	C
Kategori 1	4,4
Kategori 2	5,6
Kategori 3	5,6

3.2 Uppdaterade indata till Nord2000 Road

Nyligen genomfördes ett projekt för att uppdatera indata för Nord2000 Road modellen och redovisas i en SP rapport³⁴. I rapporten ges förslag till uppdaterade korrektioner för vägytekorrektionen för svenska förhållanden enligt Tabell 6. Denna tabell ersätter den befintliga enligt Tabell 4, d.v.s. värdena adderas till a_R för frekvensbanden 250 Hz till 10kHz. Uppdateringen innebär att den total A-vägda ljudnivån blir beräkningsmässigt något lägre än tidigare, och att spektrum passar bättre till nyare mätningar.

Tabell 6 Korrektioner att addera till a_R

250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	6,3k	8k	10k
1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-2	-3	-4	-5	-4	-3	-2	1

³³ User's Guide Nord2000 Road . u.o. : Delta, 2006. Report AV1171/06.

³⁴ Larsson K. Jonasson H. SP-Rapport 2015:72 Uppdaterade beräkningsmodeller för vägtrafikbuller. Borås 2015, ISBN 978-91-88001-95-5

Dessutom ges förslag i rapporten på att framdrivningsbullret korrigeras enligt Tabell 7 för att bättre överensstämna med de senaste mätningarna i verklig trafik. Värdena i tabellen adderas till a_p i samtliga frekvensband mellan 25Hz och 10kHz, vilket innebär att framdrivningsbullret minskar med 3 dB jämfört med gamla data. Dessa antas gälla för alla fordonskategorier, även bussar. Att motorljudet kan ha minskat de senaste 10 åren kan ha flera orsaker, dels skärpta bulleremissionskrav och dels att motorer blivit effektivare och bränslesnålare.

Tabell 7 Korrekationer att addera till a_p

25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500
-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	6,3k	8k	10k
-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3

3.3 Koefficienter till Nord2000 för uppmätta bussar

Indata till beräkningsmodellen utgör koefficienterna för a_R , b_R , a_p och b_p i ekvation 1 respektive ekvation 2. Baserat på mätresultaten redovisade i kapitel 2 beräknas specifika koefficienter för de bussar som mättes. Mätningarna utfördes på en provbana med en mycket slät beläggning för att minimera däck/vägbanebuller varför mätresultaten endast används för att bestämma koefficienterna för rullningsljudet a_p och b_p . Beräkningen av koefficienterna involverar flera steg. Mätningarna utförs på 4 mät höjder under fordonspassagerna. Nord2000 utbredningsmodell används för att beräkna hastighetsberoende överföringsfunktioner mellan punktkällorna i källmodellen och mikrofonpositionerna. Här antas att mätningarna görs på hård mark och inverkan av meteorologin försummas eftersom mätningarna görs på korta avstånd. Eftersom fler mikrofonpositioner än källor används bildas ett överbestämt ekvationssystem och ljudeffekten från punktkällorna kan därmed beräknas genom att lösa ekvationssystemet som ett optimeringsproblem. När väl ljudeffekten för ljudkällorna i modellen bestämts kan drivlineljud bestämmas för de uppmätta hastigheterna baserat på antagandet hur den fördelas mellan källorna i modellen. Koefficienterna beräknas slutligen från en linjär regression av de beräknade ljudeffekterna för respektive frekvensband. I vissa frekvensband saknas dock i vissa fall en lösning, eller att resultaten är osäkra. Det kan t.ex. bero på att rullningsljudet dominerar i det aktuella frekvensbandet, eller att överföringsfunktionerna för de olika mikrofonerna är för lika för att kunna separera källorna. I de fallen har ljudeffekten bestämts genom interpolation eller extrapolation av tillgängliga data från näraliggande hastigheter. I vissa fall har också koefficienterna bestämts från befintliga Nord2000 koefficienter, framförallt avseende hastighetsberoendet (b_p) i frekvensområdet där däcksbuller dominerar.

Koefficienterna för rullningsljudet a_R och b_R tas i stället från befintliga Nord2000 data. Däck/vägbaneljudet beror till stor del av vägbeläggningen, men också av däckstyp. Eftersom olika vägbeläggningar används på olika sträckor och vägtyper samt att samma fordon kan vara utrustat med olika däckstyper bedöms befintliga data vara mer representativt då de baseras på mätningar på olika vägytor och med olika däck.

Ingen traditionell dieselbuss mättes på provbanan. För att representera dieselbussar används i denna rapport i stället befintliga koefficienter för kategori 2 fordon enligt Nord2000. Kategori 2 består av 2-axliga tunga fordon vilket innehåller både bussar och lastbilar.

Resultaten redovisas i Tabell 8.

Tabell 8 Koefficienter för Nord2000 källmodell beräknade från de uppmätta bussarna

f (Hz)	Hybrid El		Hybrid Diesel		Gas		Diesel*		Däck/väg**	
	a_p	b_p	a_p	b_p	a_p	b_p	a_p	b_p	a_R	b_R
25	92,3	25,3	97,8	37,0	98,3	34,5	94	0	76,5	33
31,5	90,0	21	91,2	23,8	102,0	17,1	94,7	0	76,5	33
40	94,9	36,7	96,2	8,1	90,6	10,4	95,5	0	76,5	33
50	83,9	28	108,9	44,4	108,1	32,1	95,5	0	78,5	30
63	80,9	8,9	80,3	5,9	85,5	7,3	98,5	0	79,5	30
80	82,9	23,7	83	4,0	84,0	6,6	98,4	0	79,5	30
100	79,4	18,9	85	19,5	89,3	4,6	94	0	82,5	41
125	73,2	14,5	92,4	22,6	82,4	8,5	93,5	0	84,3	41,2
160	66,2	3,9	80,8	9,0	73,4	8,5	92,2	0	84,3	42,3
200	74,2	9,7	74,9	8,5	88,1	9,8	96,6	0	84,3	41,8
250	73,4	15,1	71,3	8,1	89,3	15,7	97,7	8,5	88,4	38,6
315	80,2	22,2	85,7	8,5	83,6	28,3	98	8,5	89,2	35,5
400	91,1	34,4	89,1	35,1	86,4	29,5	95,3	8,5	93	31,7
500	87,5	27,8	83,8	12,9	90,8	25,8	91,2	8,5	95,1	25,9
630	91,9	30,6	89,6	22,4	92,4	24	89,4	8,5	97,5	26,5
800	97,1	41,6	83,3	8,9	76,7	5,6	90,4	12,5	97,8	32,5
1000	85,1	30,9	81,2	12,5	83,5	12,5	92,5	12,5	96,6	37,7
1250	86,1	30,9	82,4	12,5	80,2	12,5	93	12,5	94	41,4
1600	87,3	30,9	86,7	12,5	76,7	12,5	90,8	12,5	92,9	41,6
2000	87,8	30,9	77,8	12,5	85,2	29,3	90,4	12,5	89,5	42,3
2500	85,8	30,9	80	1,2	78,5	10,1	89,1	12,5	85,1	38,9
3150	71,4	11,9	80,8	6,8	82,7	13,4	87,1	12,5	82,1	39,5
4000	75,5	19,2	78,9	9,0	82,2	14,3	84,9	12,5	79,2	39,6
5000	71,7	14,8	77,6	10,0	81,9	17,7	82,6	12,5	76,3	39,8
6300	66,1	9,3	76,9	14,1	82,2	17,8	82,7	8,5	74,3	40,2
8000	73,2	18,3	74,6	15,5	79,6	17,2	79,6	8,5	75,3	40,8
10000	71,7	22,3	73,4	17,0	79,6	19,4	76,5	8,5	78,3	41

* från befintliga Nord2000 data för kategori 2. ** Däck/väg data från befintliga Nord2000 används för samtliga fordon i denna rapport.

Resultaten i Tabell 8 är angivna inklusive korrekationer till svenska vägbeläggningar samt de senaste uppdateringarna från 2015³⁵ se också avsnitt 3.2.

3.4 Korrektion för acceleration för uppmätta bussar

Inverkan av acceleration beräknades genom att beräkna hur mycket högre den A-vägd ljudexponeringsnivån under en hållplatssimulering, dvs 30km/h – stopp – 30 km/h, blev jämfört med en passage med konstant hastighet i 30 km/h förbi mätpositionen. I beräkningen användes mätningarna från medelacceleration som ska representera en typisk normalacceleration vid t.ex. en busshållplats för att bussen ska komma ut i trafikflödet. Accelerationen antas motsvara i dessa beräkningar att hastigheten 30 km/h uppnås på ca 30 meter, d.v.s. en konstant acceleration på $1,16 \text{ m/s}^2$ antas. Resultatet visas i Tabell 9.

³⁵ Larsson K. Jonasson H. SP-Rapport 2015:72 Uppdaterade beräkningsmodeller för vägtrafikbuller. Borås 2015, ISBN 978-91-88001-95-5

Tabell 9 Accelerationskorrektioner baserat på enskilda mätdata

Fordonskategori	C
Hybrid El	1,2
Hybrid Diesel	4,7
Gas	6,1
Diesel*	5,6

* från befintliga Nord2000 data för kategori 2.

Initialt i projektet användes grundvärdet enligt Nord2000 för kategori 1 ($C=4,4$) för att representera elbussen, samt värdet för kategori 2 ($C=5,6$) för gasbussen, vilket diskuteras närmare i avsnitt 4.

3.5 Avgränsningar

Ljudemissionen från enskilda fordon inom samma fordonskategori kan variera stort. Många enskilda faktorer som exempelvis motorstorlek, placering av olika komponenter, motorstyrning etc. påverkar bullergenereringen i det enskilda fallet. Bullret varierar dels beroende på variationer i fordon från olika tillverkare, men också mellan olika exemplar från samma tillverkare. De indata till beräkningsmodellen som presenteras i denna rapport gäller enbart för de fordon som har mätts upp och ska inte användas generellt för olika bussar i allmänhet. För att fastställa mer generellt användbara koefficienter krävs betydligt mer omfattande mätunderlag än vad som varit möjligt att ta fram inom ramen för denna rapport.

3.6 Källor till osäkerheter i indata

Osäkerheterna i källdata är stora och det är mycket svårt att kvantifiera hur stor osäkerheten är. De faktorer som påverkar osäkerheten är framförallt att olika fordonsindivider kan ha olika karaktär och vara utrustade med olika komponenter, vilket påverkar både ljudeffekt, dvs hur starkt ljudet är, och direktivitet, dvs vilken riktning ljudet strålar ut från fordonen. Tidigare erfarenhet visar också att fördelningen av ljudeffekten mellan de två källorna i Nord2000 modellen varierar mellan fordonsindivider och att bara mäta på ett enskilda fordon ger ingen representativ bild av en hel fordonstyp. Inom ramen av detta projekt har mätningar på enskilda fordon gjorts och används som indata till beräkningarna trots begränsningarna i generaliserbarhet till andra fall. De typer av bussar som mättes används i trafik i Göteborg idag och är därför relevanta att använda vid en jämförelse. Men detta kan också delvis förklara skillnaderna mellan resultaten för de uppmätta bussarna och dieselbussarna, där indata baseras på en annan typ av indata och resultaten ska därför hanteras med en viss försiktighet.

Beräkningsmodellen Nord2000 baseras på två punktkällor placerade på två olika höjder över vägytan. I vissa fall, exempelvis med lastbilar där avgassystemet mynnar högt upp, kan en högt placerad källa vara nödvändig för att ge en bra beskrivning av fordonet. Modellen har tagits fram och anpassats efter traditionella fordonstyper och drivlinor och har inte anpassats efter t.ex. elbussar med andra komponenter och placering i drivlinan. Inom ramen av detta projekt har t.ex. inte inverkan av antalet källor och källpositionerna i modellen på felet i beräkningsresultat undersökts närmare för elbussar.

Mätningarna utfördes i hastighetsintervallet 10-50 km/h, för att begränsa inverkan av däck/väg bullret och för att genomföra mätningarna vid hastigheter som är relevanta för stadsbusstrafik. Att extrapolera resultaten till hastigheter utanför detta område innebär osäkerheter som inte undersökts närmare inom ramen av denna studie.

3.7 Trafikdatabas

För att kunna göra beräkningar av bussbuller och övrig vägtrafikbuller behöver man bygga upp en databas med trafikdata för bussar. Ett urval av de väglänkar där busslinjer kör i kommunen har tagits fram. Varje väglänk har tilldelats ett antal busspassager baserad på uppgifter från Västtrafik om antalet turer per busslinje samt en GIS-fil med rådata över varje busslinjers körväg under sommaren 2016³⁶.

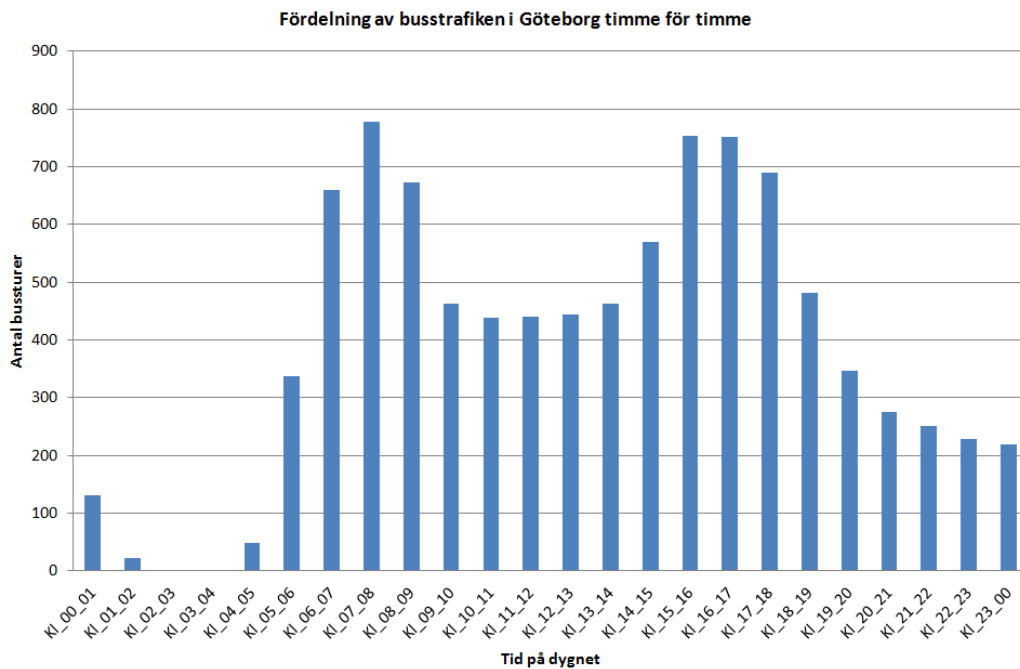
Väglänkarna har också delats in i olika hastigheter beroende på hur snabbt bussarna kör på sträckan. Dessa hastigheter har tagits fram med skyltad hastighet som grund, en kontroll av medianhastighet där det finns från trafikkontorets egna trafikmätningar samt en bedömning för varje väglänk utifrån dessa två samt antagandet att bussar på kortare sträckor ofta kör långsammare än personbilar, dels för att de tar längre tid att komma upp i hastighet och dels att de stannar vid hållplatser. Modellen är dock en förenkling av verkligheten och inkluderar inte platsspecifika förhållanden såsom farthinder, olika åldrar på vägbeläggningar, korrekt stenstorlek i vägbeläggningen på varje plats och ojämn körning. Det sistnämnda har vi försökt att kompensera för genom att dela in väglänkar i olika hastigheter, men det blir ändå en förenkling.

Trafikdatafilen har sedan kopierats ett antal gånger för att skapa separata filer för varje busstyp som trafikerar Göteborg, d.v.s. diesel, gas, elhybrid (i dieseldrift) och el. Hybridbussen är den svåraste att beräkna eftersom den växlar mellan eldrift och dieseldrift och det är svårt att veta exakt när det sker. För hybridbussen antas eldriften låter densamma som för en ren elbuss, dieseldrift är dock tystare än en vanlig dieselbuss på grund av att den har mindre motor. I varje fil är alla fordonspassager av samma fordonsstyp, t.ex. elbussfilen innehåller bara elbussar. Vi har inte gjort en blandning av busstyper för att spegla verkligheten utan avser att visa hur bullernivåerna skulle se ut om man endast hade en busstyp i fordonsflottan. En fil har också tagits fram för bil- och övrig tung trafik.

På de större trafiklederna är antagandet att andelen tung trafik är åtta procent (normalt för lederna i Göteborg söder om älven) varav två procent antas vara busstrafik (kategori 2), två procent antas vara övrig mellantung trafik (kategori 2) och fyra procent är tyngre tung trafik (kategori 3). På vanliga stadsgator med större trafikflöde (över 900 fordon per dygn) antas andelen tung trafik vara fyra procent, varav två procent är busstrafik och två procent är övriga kategori 2 fordon. På gator med ett relativt lågt trafikflöde, t.ex. Bäckegatan, antas all övrig trafik (förutom busspassagera) vara personbilar (kategori 1 fordon).

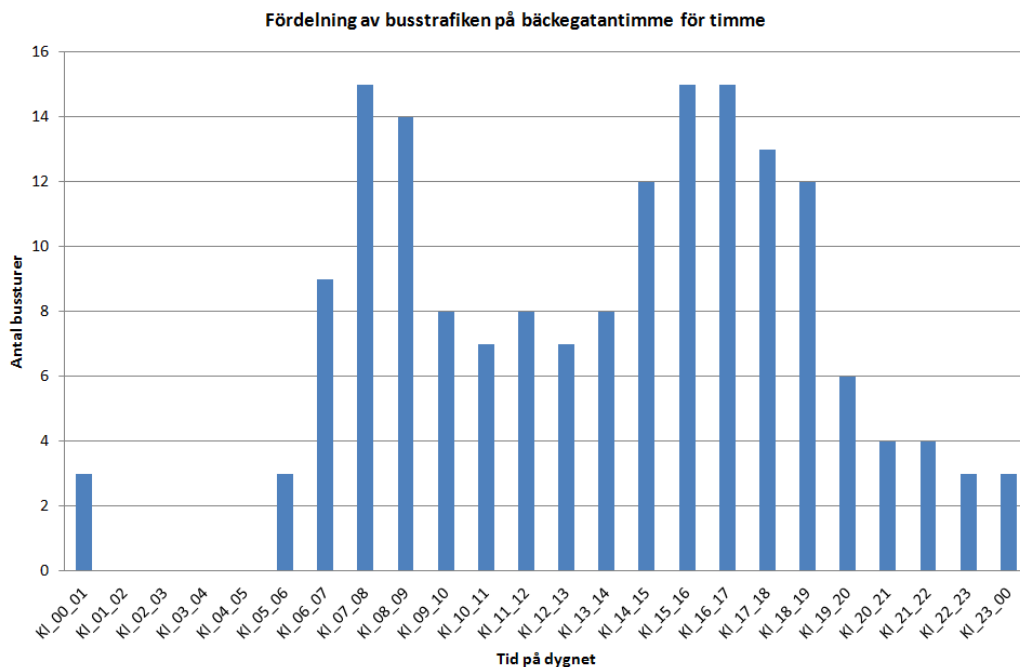
För beräkningen av busstrafiken över dygnet och för att kunna räkna ut ljudnivåer under olika delar av dygnet (i synnerhet nattetid) tilldelas varje väglänk inte endast antalet fordon per dygn utan också en fördelning under dygnet. För busstrafiken i hela Göteborg är fördelningen enligt Figur 11.

³⁶ E-post meddelande med GIS-skikt från Diana Björck Laursén, GIS-samordnare Västtrafik, inkommen den 27 april 2016



Figur 11 Fördelning av busstrafiken i Göteborg under dygnets 24 timmar

För Bäckegatan är fördelningen lite annorlunda (Figur 12). Andelen busstrafik är något lägre nattetid än i övriga Göteborg (7 procent på Bäckegatan jämfört med 10 procent i genomsnitt i Göteborg som stort).



Figur 12 Fördelning av busstrafiken på Bäckegatan under dygnets 24 timmar

Övriga histogram av trafikfördelningen under dygnet har också tagits fram för två vägtyper, en stadsgata (utifrån trafikmätningar utförda på Vegagatan 2013) och en huvudled (utifrån trafikmätningar utförda på Oscarsleden 2013). Dessa används för beräkningar av personbiltrafik och övrig tung trafik i Göteborg.

För att kunna beräkna varje fordonstyp behövs korrekt indata om hur varje fordonstyp låter i verkligheten. Mätningar har gjorts på samtliga busstyper som ingår i denna studie (avsnitt 2 i denna rapport).

I beräkningar ingår även väderdata. Det finns endast ett väderdataset för Sverige i bullerberäkningsprogrammet SoundPLAN och det är för Bromma flygplats. Vi använder denna i våra beräkningar.

Vägbeläggning är också en viktig parameter. I Göteborg är det vanligast att mer trafikerade leder och större vägar har en vägbeläggning med stenstorlek 16 mm. På stadsgator är det mer vanligt med stenstorlek 11 mm³⁷. Däck-vägbullret blir högre i samband med större stenstorlek.

Accelerations/retardationskoefficienter varierar också mellan fordonstyper och det är något vi kan korrigera för i modellen. Bussar antas accelerera eller retardera i uppförs-/nedförsbackar för att ta hänsyn till lutningen och den extra belastningen på motorn. Beräkningsprogrammet är baserat på terrängdata och känner av lutning på vägen. Accelerations- och retardationskorrektioner som finns inlagda i programmet tas med när vägen lutar. Vid start från en hållplats har vi gjort separata beräkningar där acceleration inkluderas. I en rapport av Jonasson, 2006³⁸ anges koefficienter för olika fordonskategorier. För kategori 2 fordon (såsom 2-axliga bussar) anges 5,6 som koefficient för acceleration och retardation för medeltunga fordon. Den kan användas för dieselbussar, men den stämmer inte för el, hybrid eller gasbussarna. Från mätningarna gjorde i denna studie har nya korrektioner tagits fram som är för elbussarna 1,2, för hybridbussar 4,7 och för gasbussar 6,1.

Accelerationssträckan i bullerberäkningen för busshållplatser har satts till 30 meter från busshållplatsens läge (samma sträcka som användes i uträkningen av nya accelerationskorrektioner, avsnitt 3.4). I en rapport om busshållplatsbuller av Skandiakonsult³⁹ visar bullemätningar att maximal ljudnivå inträffar mellan 5 och 10 meter efter start från hållplatsen och att bullernivåerna generellt är högre på en sträcka 10 meter före och 30 meter efter hållplatsen. Mikael Ögren, på Västra Götalands miljömedicinska centrum, som har bistått projektet har också föreslagit en accelerationssträcka på 30 meter från hållplatsen som en lämplig sträcka, i synnerhet på bostadsgator såsom Bäckegatan där hastigheterna är låga.

³⁷ E-post meddelande med uppgifter från Fredric Strandh, Projekt och byggladare på Norconsult AB, 2016-10-12

³⁸ Acoustic Source Modeling of Nordic Road Vehicles, Jonasson, H. G. 2006, SP rapport 2006:12

³⁹ Busshållplatsbuller. Skandiakonsult, 2002

4 Bullerberäkningar

Varför beräknar vi bussbuller istället för att mäta? Generellt anses beräkningar vara mera korrekta än mätningar för trafikbuller p.g.a. att beräkningar är helt oberoende av externa förhållanden som kan variera såsom väderparametrar, som ofta orsakar osäkerheter i bullermätningar, samt störningar från andra bullerkällor såsom fläktar, människoprat, fågelkvitter och dylikt. Mätningar kan vara bra för att visa ljudnivåer på den platsen där mätningar gjorts, men för att skala upp det till ett större område krävs en beräkningsmodell som tar hänsyn till de förhållanden (trafikflöden, byggnader, väglutning, m.m.) som råder på varje plats.

4.1 Beräkningsmetod och beräkningsprogram

Standardmetoden för beräkning av vägtrafikbuller i Sverige är den Nordiska Beräkningsmodellen (RTN, senast reviderad 1996). Fördelen med denna metod är att den är relativt snabb att använda jämfört med mer avancerade metoder, men nackdelen är att den är mycket enklare än vissa andra metoder, och källdata (hur mycket olika fordonstyper låter) till metoden togs fram under början på 1990-talet, och är därför föråldrad. Sedan några år tillbaka har det funnits en mer avancerad beräkningsmetod som heter Nord2000. Denna metod blev klar år 2005 och indata till metoden är från början på 2000-talet. I Nord2000 finns det tre huvudfordonskategorier jämfört med två i RTN. I Nord2000 delas tung trafik i två kategorier, den ena är kategori 2 som representerar medeltunga fordon såsom lättare lastbilar och bussar med 2 axlar. Kategori 3 representerar tyngre tung trafik såsom långträdare och lastbilar med släp. I RTN har dessa två kategorier lagts ihop till en kategori. I de testberäkningar som vi gjort mellan dessa två modeller är det uppenbart att kategori 3 fordon slår igenom där det finns tung trafik och maximala ljudnivåer blir för höga, i synnerhet i stadstrafiken.

I genomsnitt visar modellerna ändå ungefär samma resultat för blandad vägtrafik, men Nord2000 är en mer avancerad metod med fler parametrar och det finns möjlighet att variera antaganden, vilket innebär att resultaten kan variera⁴⁰.

SoundPLAN är programmet som vi använder för att beräkna trafikbuller. Det är ett GIS-baserat, tre dimensionellt program som tar hänsyn till terrängens utformning och strukturer i landskapet som är av betydelse, såsom byggnader och bullerskärmar. Så länge man har en bra modell i databasen, d.v.s. en som liknar verkligheten så mycket som möjligt, går det att beräkna trafikbuller med tillförlitliga resultat. I SoundPLAN finns det möjlighet att beräkna med olika beräkningsmetoder. Vi kan därför beräkna både med RTN och Nord2000. Alla tidigare bullerberäkningar och kartläggningar som Göteborgs stad har genomfört har gjorts i RTN. I denna undersökning använder vi Nord2000 och alla bullerberäkningar har gjorts av Miljöförvaltningen i Göteborgs stad.

Nord2000 är den metod som vi använder för att det är den enda metoden där vi kan variera källdata och se skillnader mellan olika fordonstyper. I denna studie har ny källdata för gas, laddhybrid i diesel- respektive eldrift tagits fram av SP genom mätningar på Volvos provbana i Hällered, utanför Borås i september 2016. Källdata för dieselbussarna kommer från kategori 2 mätningar utförda av SP på uppdrag av Trafikverket under 2015⁴¹. Dessa mätningar visar att diesel bussar låter mer än el och gasbussar, speciellt vid de lägre frekvenserna. En annan fördel med att använda Nord2000 är att man kan tydligt se skillnaden mellan olika frekvenser. Tunga dieselfordon innehåller mycket ljud i det

⁴⁰ Jämförelsen mellan Nord2000 Road och 1996- årsmodell. Hans Jonasson. SP rapport 2009:18

⁴¹ Uppdaterade beräkningsmodeller för vägtrafikbuller. Larsson, K. och Jonasson, H. SP rapport 2015:72

låga frekvensområdet, 20 – 200 Hz. Det är dels detta som gör att ljudnivåerna skiljer sig så mycket mellan el- och dieselfordon och som gör att ljudet från elfordon upplevs som mer behaglig. Mer om frekvenser i nästa avsnitt.

4.2 Mått för att beskriva buller

De vanligaste måtten som används för att representera trafikbuller och som det finns riktvärden för i Sverige är den dygnsekvivalenta ljudnivån, $L_{Aeq,24h}$ och den maximala ljudnivån, L_{AFmax} . A står för A-vägning, och F för tidsvägning ”fast”. I rapporten används också ibland beteckningarna L_{Amax} , och maximalnivå

I denna rapport kommer vi att använda A-vägningen eftersom det är den som används regelmässigt och det är den som används för att räkna fram samhällsekonomiska kostnader och hälsoeffekter av buller från vägtrafik.

De etablerade sätten att räkna ut kostnader eller nytta är genom att räkna ut hälsoeffekten med DALYs och att räkna ut samhällsekonomiska kostnader med ASEK. För uträkningen av DALYs används inom EU den dag-kväll-nattvägda ljudnivån L_{den} och ljudnivån nattetid, L_{night} . I Sverige används L_{eq} istället för L_{den} . L_{eq} är cirka 3 dB lägre än L_{den} då kvälls- och nattbuller vägs tyngre i beräkningen av L_{den} . Vägen till sämre hälsa på grund av trafikbuller går via störningar dagtid (uträknat från den dygnsekvivalenta ljudnivån) och sömnstörningar (uträknat från L_{night}). För uträkning av samhällsekonomiska kostnader av trafikbuller med ASEK är det endast den dygnsekvivalenta ljudnivån som är av vikt. Maximala ljudnivåer förekommer inte i dessa uträkningar. Därför kommer vi inte att fokusera på maximala ljudnivåer i denna studie, även om maximala ljudnivåer är de som människor ofta störs av. Vi är också begränsade av beräkningsmetoden Nord2000 som den är implementerad i SoundPLAN. Eftersom det endast är nordiska länder som har riktvärden för maximala ljudnivåer har SoundPLAN inte implementerat den delen av metoden. Det gör helt enkelt att vi inte kan beräkna maximala ljudnivåer i SoundPLAN.

Måttet L_{night} är kopplat till långsiktiga hälsoeffekter såsom hjärt-kärlsjukdomar. L_{Aeq} och L_{Amax} är bättre på att indikera korttids hälsoeffekter⁴². I EU direktivet om omgivningsbuller (END) har man valt L_{night} som indikator för långsiktiga hälsoeffekter.

För att beräkna exponering för trafikbuller görs så kallade fasadberäkningar där frifältsvärden (utan buller som tillkommer på grund av reflektion i egen fasad) beräknas för varje fasad och varje våningsplan per bostadshus. Från dessa beräkningar används medianmetoden⁴³ som bättre beskriver exponering i flerfamiljshus som ofta är genomgående.

4.3 Lågfrekvent buller

Många ljudkällor innehåller ljud i olika frekvenser och det är frekvensinnehållet som är en viktig del i att beskriva hur ljud upplevs. En ljudkälla som innehåller mycket lågfrekvent buller (20 – 200 Hz) såsom tunga dieselfordon eller ventilationsanläggningar upplevs som mer störande än ljudkällor som innehåller energi mest i det högre frekvensområdet. Människor som exponeras för lågfrekvent buller nattetid, även om nivåerna är relativt låga, har svårare att somna och känner sig tröttare på morgonen⁴⁴.

⁴² Night noise guidelines for Europe, WHO 2009

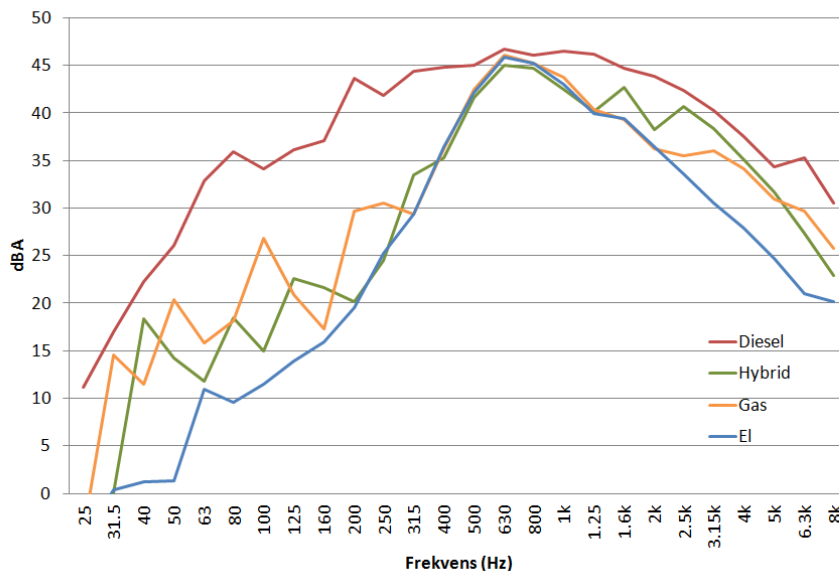
⁴³ Antalet boende (och bostäder) över en viss ljudnivå, PM 2015074-1: Algoritm för utvärdering av resultat från bullerkartläggning. Andreas Gustafson, Gärdhagen Akustik AB. Reviderad version 2015-11-23

⁴⁴ Effects of low frequency noise on sleep. K. Persson Waye. Noise & Health 2004. Vol 6 No 23 sidor 87-91

När man mäter ljud brukar man uttrycka resultatet i dBA. A står för den A-vägda ljudnivån och det är den viktning som anses bäst representerar det ljud som vi normalt hör. Nackdelen med A-vägningen är att den underskattar de låga frekvenserna jämfört med de medelhöga frekvenserna. Ljudkällor som domineras av eller innehåller mycket låga frekvenser representeras bättre med C-vägningen. Vid beräkningar av vanlig blandtrafik ger A-vägningen en mer representativ bild av ljudnivåerna. Men där trafiken domineras av tung trafik kan A-vägningen vara missvisande. Skillnaden mellan dBA och dBC används som ett mått för att se om ljudet innehåller mycket energi i det låga frekvensområdet.

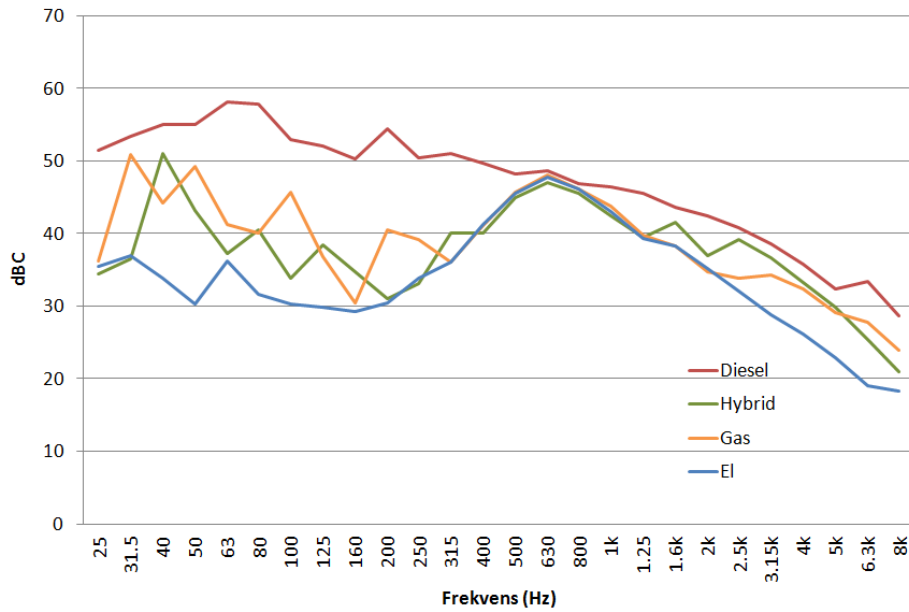
Förutom upplevelse av ljud används måtten också som ett mått på störning. Det är generellt känt att störningar orsakade av att ljudkällor som innehåller mycket ljudenergi i det låga frekvensområdet också underskattas av A-vägningen. Enligt forskning av Kjellberg et al⁴⁵ upplevs ljudkällor med mycket lågfrekvent ljud som 4-7 dB starkare och 5-8 dBA mer störande än ljudkällor med mer högfrekvent ljud vid lika dBA ljudnivå.

Figur 13 - Figur 15 visar skillnaderna i dBA vid olika frekvenser mellan de olika fordonstyperna, baserad på en beräkning på Bäckegatan i centrala Göteborg och vid de olika viktningarna: dBA, dBC samt dBlin (linjärt, d.v.s. utan viktning). Vid de låga frekvenserna är skillnaderna i vissa tersbandsområden över 25 dB (oavsett viktning) mellan den bullrigaste busstypen, diesel, och den tystaste, el.



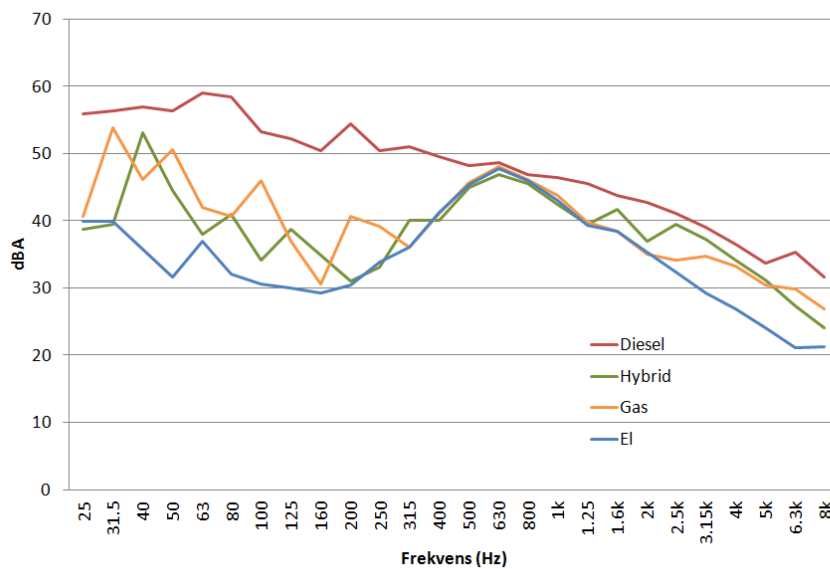
Figur 13 Beräkning av olika busstyper på Bäckegatan 36, spektrumfördelning i dBA

⁴⁵ An assessment of dB(A) for predicting loudness and annoyance of noise containing low frequency components. A. Kjellberg, M. Goldstein and F. Gamberale. Journal of low frequency noise, vibration and active control. Vol 3 No 3 pages 10-16. 1984



Figur 14 Beräkning av olika busstyper på Bäckegatan 36, spektrumfördelning i dBC.

Ibland används skillnaden mellan dBC och dBA som en del i försöket att förklara skillnader i störning från ljudkällor med lågfrekvent ljud⁴⁶. Där skillnaden är stor bör ljudkällan undersökas mer⁴⁷.



Figur 15 Beräkning av olika busstyper på Bäckegatan 36, spektrumfördelning i dBA, d.v.s. ovägt ljud

⁴⁶ Evaluation of frequency weighted sound level measurements for prediction of low-frequency noise annoyance. A. Kellberg, M. Tesarz, K. Holmberg, U. Landström. Environmental International vol 23. No 4 pp 519-527, 1997

⁴⁷ Low frequency noise and annoyance. H.G. Leventhall. Noise & Health 2004, 6:23, 59-72

4.4 Urval av beräkningsområde

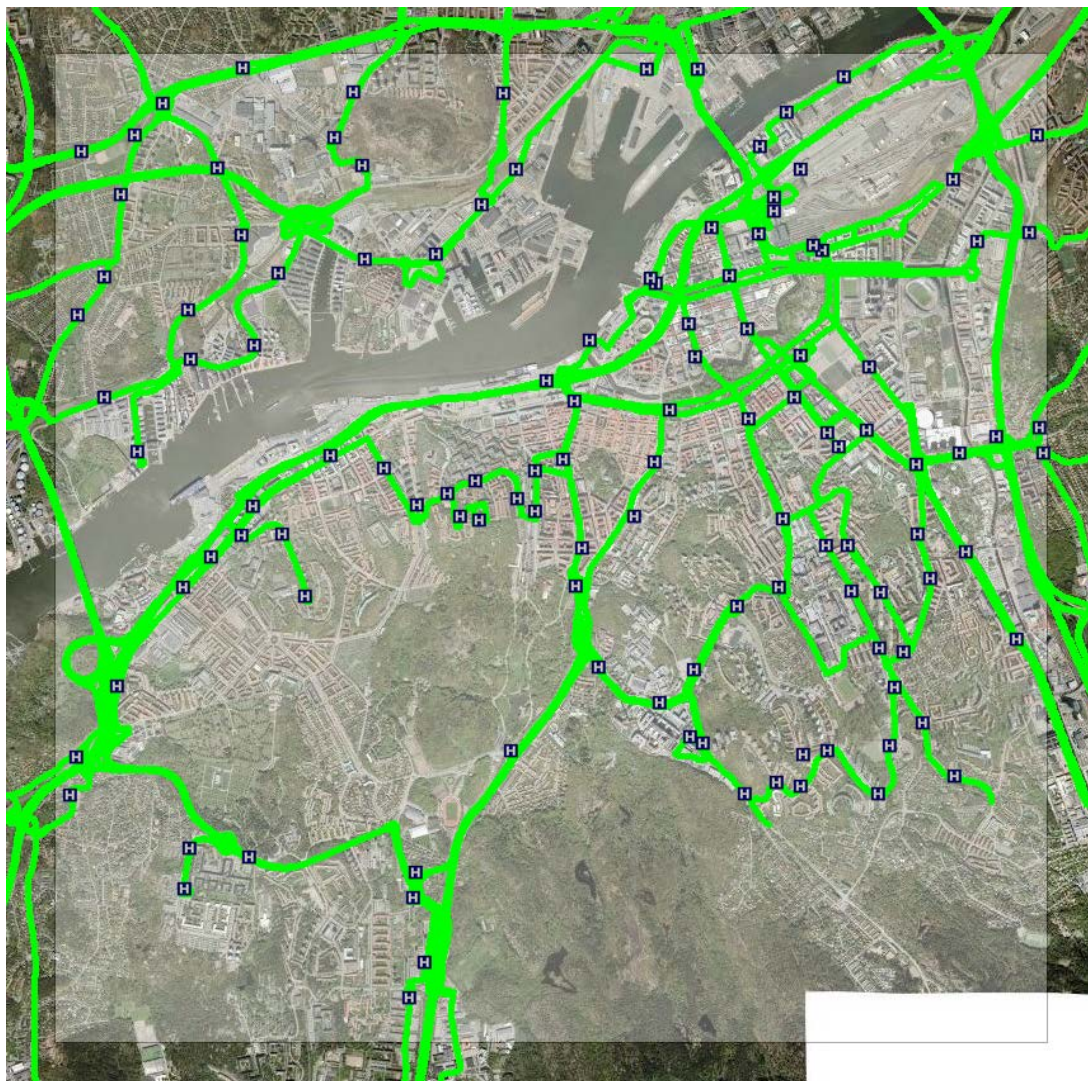
4.4.1 Centrala Göteborg

Beräkningarna utförs i beräkningsmetoden Nord2000 som är en tidskrävande beräkningsmetod. Det skulle ta för lång tid att beräkna busstrafiken i hela kommunen för varje busstyp. Vi fokuserar därför beräkningarna av busstrafiken på den delen av kommunen där busstrafiken har en stor inverkan på den totala ljudnivån från vägtrafiken, d.v.s. den tätaste delen av kommunen där det finns flerfamiljshus väldigt nära vägen. Inom detta område är bullerexponering generellt störst och ger därför en bra bild av bullerexponering i kommunen som stort. Figur 16 visar området i frågan. Området täcker 32 km² av tätorten.

Inom detta område bor 166 000 personer, d.v.s. ungefär 30 procent av Göteborgs befolkning. Befolkningstätheten är 5 200 personer per km². Knappt 100 000 av dessa bor inom 100 meter från en eller flera busslinjer. Utanför tätbebyggt område är avståndet till busstrafiken oftast större och därför är exponering för högre ljudnivåer från bussar mer begränsat.

Centrala Göteborg trafikeras av många busslinjer som kör i tät trafik. Inom området kör bussarna längs 145 km väg och antalet fordonskilometer som bussar kör per dag är ungefär 50 000. Antalet hållplatslägen är 121 (på varje hållplatsläge finns vanligtvis två hållplatser, en i varje riktning, men på vissa t.ex. Marklandsgatan finns det många fler hållplatser) (Figur 16). Som mest trafikeras någon enskild sträcka av 1 600 bussar dagligen. Det är områden kring Korsvägen och över Göta Älvbron som är mest trafikerade.

I centrala Göteborg är avstånden mellan hållplatser normalt mellan 300 och 500 meter. I centrumområdet bor över 10 000 personer i hus som ligger inom 30 meter från en busshållplats. Antalet personer som bor i hus som ligger inom 30 meter från en busshållplats i hela Göteborg är omkring 17 000. I denna studie gör vi även beräkningar vid hållplatser inom den centrala delen av staden.



Figur 16 Centrala 32 km² av kommunen (innanför den ljusgrå rutan) där busstrafik ger ett väsentligt inslag i ljudbilden (Gröna linjer = busslinjer, H = hållplatslägen).

4.4.2 Detaljområde Bäckegatan

Bäckegatan (och de angränsande gatorna Kompassgatan, Paradisgatan, August Kobbsgatan och Flaggatan) är ett område i centrala Göteborg där det finns många flerfamiljshus av landshövdingetyp väldigt nära vägen (Figur 17).



Figur 17 Busslinje 60 rutt (blå linje) i södra Masthugget från Fjällgatan i norr till August Kobbsgatan i söder

Gatan trafikeras av 60-bussen. Bussen kör väldigt ofta, i synnerhet under högtrafik mellan kl 07-08 på morgonen och kl 15-17 på eftermiddagen. Totalt passerar bussen 340 gånger upp och nerför gatan under ett vardagsdygn. Ändhållplatsen för busslinjen ligger på August Kobbsgatan, ett kort avstånd från Bäckegatan. Sträckan från Fjällgatan till ändhållplatsen och tillbaka till Fjällgatan igen är 750 meter. Totalt kör bussarna 200 fordonskilometer dagligen inom området.

Trafiken på gatan domineras av busstrafik (nästa 50 procent av trafikflödet dagtid är busstrafik). Trafikkontoret har fått in flera klagomål om bussbuller från boenden på Bäckegatan och flera fastigheter har fått bidrag för fönsterbyte till mer bullerdämpande fönster. Det är en typisk gata där det skulle innebära en stor förbättring för de boendena om man bytte till tystare bussar. Redan idag är de flesta bussar som trafikerar gatan hybridbussar, men några av invånarna upplever ändå att ljudnivån från bussarna är för hög. Det beror delvis på att gatan är kuperat och det krävs att bussen kör i dieseldrift i uppförbacken. Bussen kör också ofta i dieseldrift vid hållplatsen⁴⁸.

⁴⁸ Uppgifter från mätningar utförda av Miljöförvaltningen 3 mars 2015, rapport över mätningar av trafikbuller på Bäckegatan 34-36 (Miljöförvaltningens diarienummer 11904/14)

5 Inomhusnivåer

En tänkbar nytta med elmotorer jämfört med fordon med förbränningsmotor är att bulleremissionen från drivlinan är betydligt lägre, speciellt i samband med acceleration och även avseende lågfrekvent ljud, t.ex. vid busshållplatser.

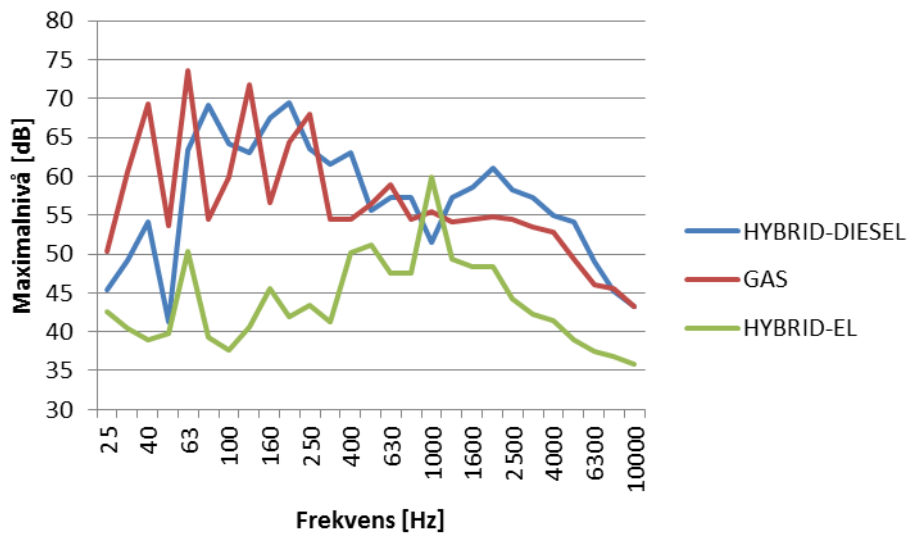
5.1 Maximalnivåer

Maximalnivåer inomhus beräknas här utifrån de uppmätta maximalnivåerna från provbanan från de tre busstyperna som mättes. För bussar med traditionell dieseldrift gjordes inga mätningar, varför den busstypen uteslöts ur denna jämförelse. Diesalbussar är också mindre troliga för framtida bussar. Då beläggningen på provbanan är betydligt slätare än vanliga beläggningar på allmänna vägar kommer däck/vägbullret att underskattas i mätningarna. Men för acceleration vid låga hastigheter domineras det totala ljudet av motor och drivlineljudet, varför mätningarna ändå är relevanta för att visa på skillnaderna som kan uppstå även i verkliga situationer, även om nivåerna som redovisas här generellt är låga jämfört med vanligt förekommande maximalnivåer i verklig trafik och verkliga situationer. Maximalnivåerna vid fasad från mätningarna redovisas i Tabell 10. Både A-vägd och C-vägd maximalnivåer redovisas i tabellen, samt även skillnaden mellan C-vägd och A-vägd nivå. En stor skillnad mellan C-vägd nivå och A-vägd nivå indikerar att ljudet domineras av lågfrekvent ljud och att problem med lågfrekvent buller kan uppstå trots att totala A-vägda ljudnivån inte är besvärande. Enligt tabellen är det tydligt att elbussen i det här fallet har en betydligt lägre andel lågfrekvent buller jämfört med framförallt gasbussen, men även laddhybriden när den körs i dieseldrift.

Tabell 10 Utomhusnivåer vid fasad L_{AFmax}

	Hybrid - diesel	Gas	Hybrid - el
L_{AFmax}	69,6	67,1	61,9
L_{CFmax}	75,9	77,5	62,9
$L_{CFmax} - L_{AFmax}$	6,3	10,4	1,0

För att ge en mer detaljerad bild av skillnaderna mellan fordonstyperna visar Figur 18 mätta ovägd spektra av maximalnivåerna. Figuren visar de mätta resultaten på 7,5 m avstånd och 4 m höjd vid tidpunkten i fordonspassagen där den högsta A-vägd maximalnivån kunde läsas av. Resultaten visar att framförallt elbussen har betydligt lägre nivåer för de lägre frekvenserna under 400 Hz jämfört med övriga busstyper. Resultaten visar också att ljudet innehåller tonala komponenter för samtliga busstyper, men där gasbussen visar ha starkast komponenter. Elbussen har en stark tonal komponent vid 63 Hz, men också vid 1000 Hz. Vi har i dessa mätningar inte utrett orsaken till denna komponent.



Figur 18 Linjär maximalnivå 7,5 m avstånd

5.2 Typfall för beräkning av inomhusnivåer

Sex stycken typfall identifierades för att beräkna inomhusnivåer. Typfallen och indata för fasadelement, fönster och ventiler valdes från Forssén (2014)⁴⁹ där data för tre olika fasadtyper (Figur 19), fyra olika fönster (Figur 20) samt två olika friskluftsventiler (Figur 21) redovisas i ett utökat frekvensområde. Det finns mycket begränsat med data för fasader och komponenter i det relevanta frekvensområdet ner till ca 25 Hz. Förutom fasadkonstruktioner valdes också 2 olika storlekar på rum, dels ett litet sovrum om ca 10 m² (2,8x3,6m) och dels ett något större rum med golvytan ca 15 m² (4,2x3,6m). Takhöjden i typrummen sattes till 2,4 m. Totalt räknades inomhusnivåer i 12 fall. I Tabell 11 beskrivs de olika typfallen.

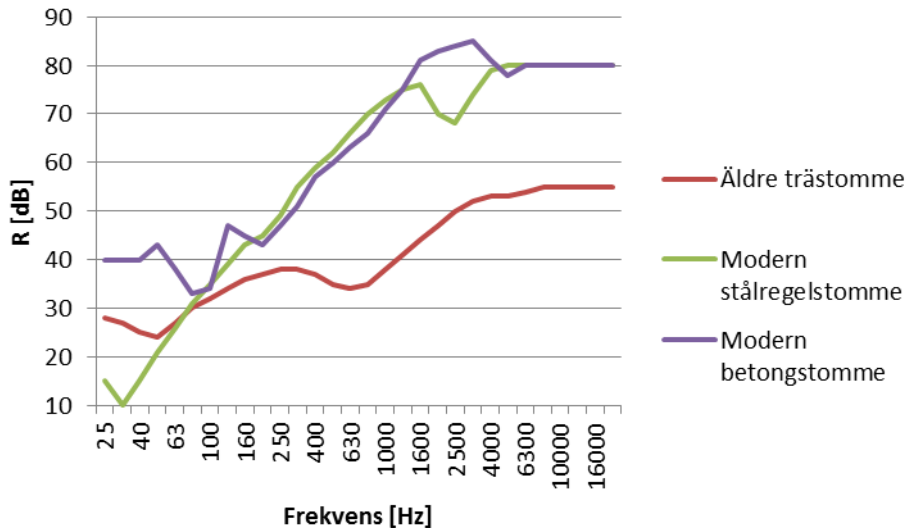
Tabell 11 Typfasader för att beräkna inomhusnivåer i två rum.

Typfall	Beskrivning
Typfasad (Case) 1	Äldre fasad med träregelstomme, gamla kopplade fönster 3-40-3 och normala friskluftsventiler
Typfasad (Case) 2	Äldre fasad med träregelstomme, äldre ljuddämpade fönster 4-12-4 förstärkta med 4mm-ruta på kopplad båge och ljuddämpade friskluftsventiler
Typfasad (Case) 3	Modern lätt stålregelfasad, modernt isolerglasfönster 4-12-4 och ljuddämpade friskluftsventiler
Typfasad (Case) 4	Modern lätt stålregelfasad, moderna ljuddämpade fönster och ljuddämpade friskluftsventiler
Typfasad (Case) 5	Modern tung sandwichfasad av betong, moderna isolerglasfönster 4-12-4 och ljuddämpade friskluftsventiler
Typfasad (Case) 6	Modern tung sandwichfasad av betong, moderna ljuddämpade fönster och ljuddämpade friskluftsventiler

I Figur 19 - Figur 21 redovisas ljudisoleringsdata för de fasadkonstruktioner och komponenter som används i de 6 typfallen. Äldre fasader med trästomme har enligt Figur 19 lägre ljudisoleringsdata än moderna fasader i ett brett frekvensområde. Däremot om man

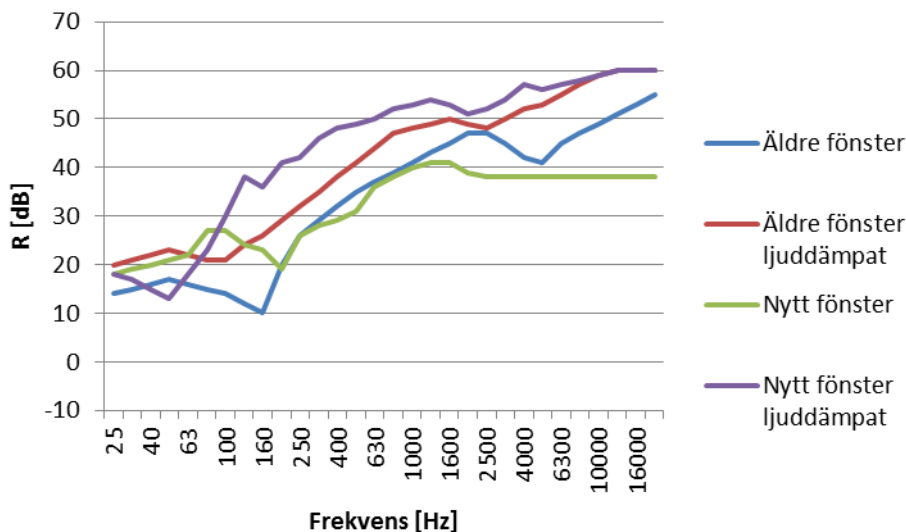
⁴⁹ Forssén J. Suggested façade cases for study of sound insulation considering wall, window and air intake, Report 2014:1, Chalmers University of Technology, 2014.

tittar närmare på de lägsta frekvenserna är ljudisoleringen faktiskt bättre än en modern lätt stomme där den moderna stommen uppvisar en resonansfrekvens. En tyngre modern betongstomme av sandwichelement har enligt dessa data den högsta ljudisoleringen för låga frekvenser under 100 Hz. Vid frekvenser över 100 Hz visar dessa data att en modern stålregelstomme och en modern sandwich betongstomme har likvärdig ljudisolering med undantag för frekvenser runt 2000 Hz, där koincidensfenomenen för skivmaterialen i stålregelstommen kan ge en reducerad ljudisolering.



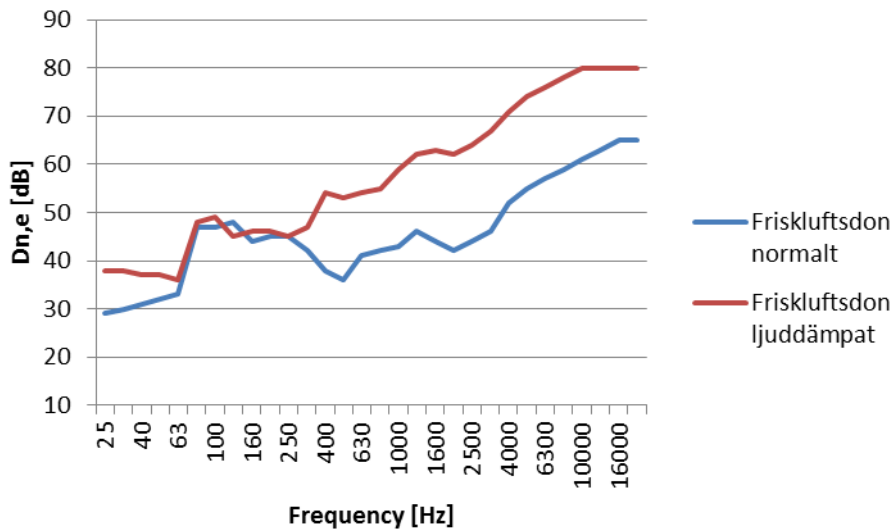
Figur 19 Reduktionstal för de tre fasadtyperna i typfallen

Exempel på fönsters ljudisolering i ett utökat frekvensområde redovisas i Figur 20. Ett stort antal olika fönster finns idag på marknaden. Det äldre fönstret representerar ett tvåglasfönster och det äldre ljuddämpade fönstret är kompletterat med en extra glasruta på en kopplad båge. Det nya fönstret representerar ett modernt isolerfönster med bra värmeisoleringssegenskaper. Däremot är ljudisoleringen dåligt och till och med lägre än ljudisoleringen i äldre fönster vid höga frekvenser över 1000 Hz. Den högsta ljudisoleringen fås av ett modernt ljuddämpat fönster, åtminstone över 100 Hz. Däremot visar figuren att vid riktigt låga frekvenser kan det möjligt att ett modernt fönster har lägre ljudisolering än äldre fönster.



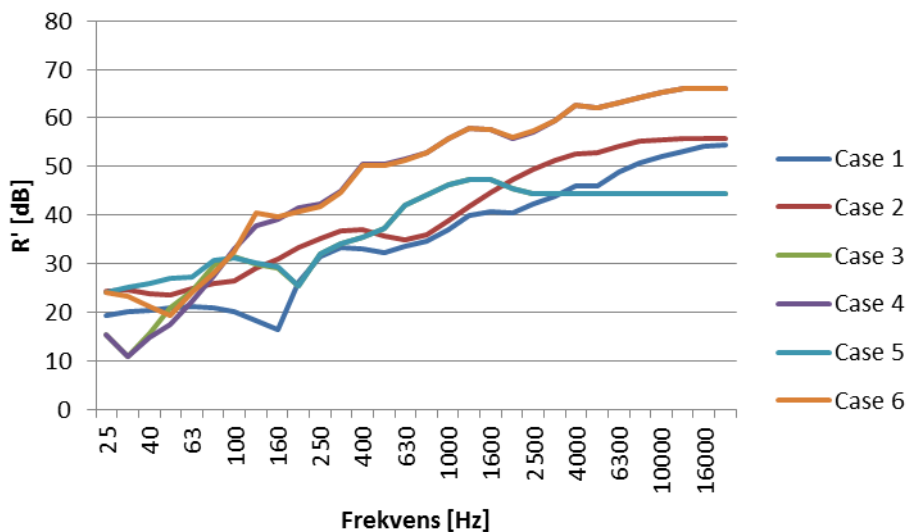
Figur 20 Reduktionstal för fyra fönstertyper

Figur 21 visar exempel på ljudisoleringsdata för två friskluftsventiler, dels ordinär utan ljuddämpat utförande, och dels med ljuddämpat utförande. Båda ventilerna visar ungefär samma ljudisolering i frekvensområdet 100 – 200 Hz. Vid högre frekvenser däremot har den ljuddämpade ventilen bättre ljudisolerande förmåga.



Figur 21 Ljudisolering för ventiler normaliserad till 10m²

I Figur 22 redovisas den totala fasadisolering för de sex typfallen med de olika kombinationerna av fasadkonstruktioner, fönster och friskluftsventiler. Om man jämför typfallen med äldre träfasad (case 1 och case 2) så förbättras ljudisoleringen (högre värden i figuren) när fönstren åtgärdas genom fönsterbyten till ljuddämpade fönster med en extra ruta på kopplad båge. Men ljudisoleringen når ändå inte upp till en modernare fasadkonstruktioner utan begränsas av fasadkonstruktionen och friskluftsventilen. På motsvarande sätt kan en modern tung fasad av sandwichelement resultera i en låg ljudisolering om fönstren väljs ofördelaktigt (case 5). Även de fasadkonstruktioner med högst ljudisolering begränsas av fönstrens ljudisolerande förmåga (case 4 och case 6).



Figur 22 Total fasadisolering för typfallen enligt tabell 11

6 Resultat

6.1 Jämförande beräkningar av olika fordonstyper i Nord2000

Vi har gjort testberäkningar i Nord2000 dels för att se skillnaden mellan befintlig indata för tung trafik som finns i Nord2000 modellen och dels för att jämföra dessa med de olika busstyper som trafikerar Göteborg. I Nord2000 finns det två kategorier för tung trafik – kategori 2 som motsvara medeltung trafik med 2-axlar inklusive bussar och kategori 3 som motsvarar större tunga fordon såsom långtradare och lastbil med släp med 3 axlar eller fler. Bussar har normalt något lägre motoreffekter än tyngre lastbilar varför vi har valt att använda kategori 2 som utgångspunkt för stadsbussar med dieselmotor. Som schablon testade vi bullernivåer för 1000 tunga fordon över en sträcka på 1000 meter vid tre olika hastigheter – 20, 50 och 70 km/tim och vi tre olika avstånd – 10, 25 och 50 meter från vägmitt. Vägbredd sattes till 7 meter och marken som hård. Tabell 12 visar skillnaderna i resultaten mellan de olika fordonskategorierna och busstyperna.

Tabell 12 Nord2000 beräkningar av dygnsekvivalenta ljudnivåer från olika busstyper och kategorier tung trafik vid olika hastigheter och avstånd från vägen

		Dygnsekvivalent ljudnivå per fordonstyp (LAeq)						
Avstånd (m)	Hastighet (km/tim)	Kategori 3	Kategori 2	Kategori 1 (bil)	Diesel buss	Hybrid buss*	Gas buss	El buss
10	20	61	58	48	55	50	50	48
10	50	64	61	55	58	59	58	58
10	70	67	64	58	63	62	62	62
25	20	55	52	42	49	42	42	41
25	50	56	54	47	52	50	50	50
25	70	59	56	50	55	53	54	53
50	20	50	47	37	44	38	36	35
50	50	51	49	43	47	45	44	44
50	70	53	51	46	50	49	48	49

*I dieseldrift

Resultaten visar hur bullernivåerna skiljer sig mellan fordonstyperna enligt modellen på olika avstånd och olika hastigheter. Kategori 3-fordon bullrar mer än de övriga fordonen, i synnerhet i på korta avstånd. Skillnaden mellan kategori 3-fordon och kategori 2-fordon är 3 decibel. Det skiljer ytterligare 3 decibel mellan dieselbussar (baserade på nya mätningar) och kategori 2-fordonen (äldre källdata), vilket baseras på uppdateringen av källdata som har föreslagits⁵⁰. Skillnaden mellan dieselbuss och elbuss är så mycket som 6 decibel vid låga hastigheter nära källan. Vid höga hastigheter är skillnaden väldigt liten p.g.a. att däck-vägbanebuller påverkar resultaten. Något överraskande är att skillnaden mellan el och gasbussar är väldigt liten i beräkningarna, endast en decibel vid den lägsta hastigheten, 20 km/tim. Orsaken är inte helt utredd, men både mätosäkerheten och osäkerheterna i beräkningen av koefficienterna kan inverka. Hybridbussen i dieseldrift ligger på samma nivå som gasbussen. Personbilar (kategori 1) är tystaste av alla fordon, i synnerhet vid högre hastigheter (50 och 70 km/tim). Vid låg hastighet, 20 km/tim, är det dock bara en marginell skillnad mellan personbilar och hybrid, gas och elbussar, vilket är ett tecken på att dessa busstyper lämpar sig för körning på plan mark, och i stadstrafik och bostadsområden där låga hastigheter råder.

⁵⁰ Uppdaterade beräkningsmodeller för vägtrafikbuller. Larsson, K. och Jonasson, H. SP rapport 2015:72

Resultat är intressanta, men de visar också på att den dygnsekvivalenta ljudnivån som dBA inte är tillräcklig för att visa skillnader mellan fordonstyper, t.ex. ljudnivåer vid accelerationer, maximala ljudnivåer eller innehållet av låga frekvenser som varierar stort mellan de olika fordonstyperna. När det gäller maximala ljudnivåer finns det ingen möjlighet att göra beräkningar av utomhusbuller i NORD2000 på grund av begränsningar i beräkningsprogrammet SoundPLAN. I avsnitt 6.4 beräknas inomhusljudnivåer på ett annat sätt för olika typfall och där används maximala ljudnivåer för att visa skillnaden mellan de olika busstyperna inomhus. En jämförelse mellan dBA och dBC (för att indikerar skillnaden i innehåll av lågfrekvent ljud) också görs. Skillnaderna visar sig vara stora mellan de olika busstyperna.

När det gäller accelerationer kan den dygnsekvivalenta ljudnivån ge något mer tydlig information om hur ljudnivåerna skiljer sig mellan fordonstyperna. Testberäkningar har gjorts för varje fordonstyp vid acceleration till 30 km/tim på 30 meter. Resultaten visas i Tabell 13. I denna tabell ser man tydligt skillnaden mellan elbussar och övriga busstyper inklusive gas och elhybrid (i dieseldrift). Beräkningarna visar att elbussen även är tystare än personbilar under accelerationsförloppet. En sak som man kan notera är att ljudet under accelerationsförloppet avtar snabbare med avstånd från källan än under vanlig körning för samtliga fordon, förmodligen på grund av att ljudet har en annan karaktär (frekvensinnehåll). Inslaget av däck-vägbanebullret är troligtvis också annorlunda på grund av att hastigheten inte är konstant utan varierar.

Tabell 13 Nord2000 beräkningar av dygnsekvivalenta ljudnivåer från olika busstyper och kategorier vid acceleration (till 30 km/tim)

		Dygnsekvivalent ljudnivå per fordonstyp (LAeq)						
Avstånd (m)	Hastighet (km/tim)	Kategori 3	Kategori 2	Kategori 1 (bil)	Diesel buss	Hybrid buss*	Gas buss	El buss
10	30	70	67	54	64	56	54	49
25	30	62	59	45	56	46	44	36
50	30	55	52	38	49	40	38	27

*I dieseldrift

6.2 Centrala Göteborg

6.2.1 Antalet exponerade personer

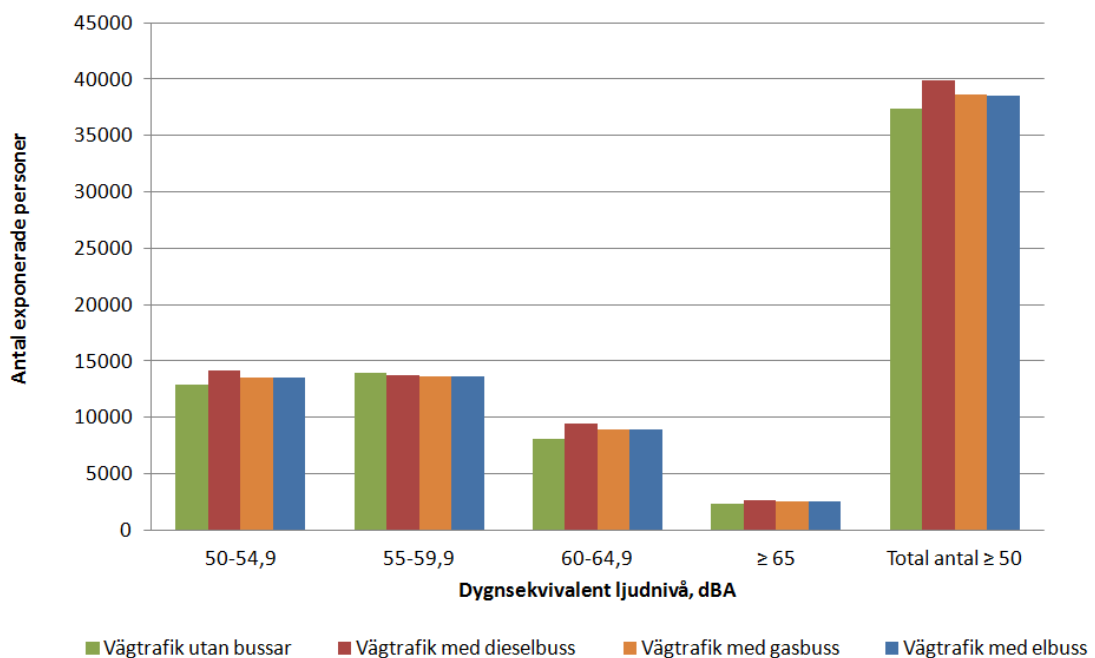
Centrala Göteborg har beräknats som fyra separata fasadberäkningar: en beräkning med all busstrafik som dieselbussar, en beräkning med all busstrafik som elbussar, en beräkning med all busstrafik som gasbussar samt en beräkning för personbilar och övrig tung trafik. Den sistnämnda adderas (energetical addition) till varje bussresultatsfil för att se skillnaden mellan de olika busstyperna. Beräkningsområdet har begränsats till 100 meter från vägmitt.

I Tabell 14 ges antalet exponerade personer för personbilar och övrig tung trafik för sig, som vi anger som kontrollfallet, jämfört med personbilar och övrig tung trafik kombinerad med beräkningar av exponering för varje busstyp. Notera att resultaten innehåller flera osäkerheter, och resultaten ska tolkas med försiktighet, speciellt jämförelsen mellan diesel och övriga busstyper, då indata baseras på olika förutsättningar. Siffrorna illustreras i Figur 23. Det har inte funnits utrymme tidsmässigt inom detta projekt att genomföra beräkningar för hybridbussen.

Tabell 14 Antalet personer med dygnsekvivalent ljudnivå lika med eller mer än 50 dBA vid mest exponerad fasad

Intervall (LAeq)	Antalet exponerade personer			
	Personbilar och övrig tung trafik (kontroll)	Dieselbussar + Personbilar och övrig tung trafik	Gasbussar + Personbilar och övrig tung trafik	Elbussar + Personbilar och övrig tung trafik
50-54,9	12 958	14 144	13 538	13 526
55-59,9	13 906	13 769	13 641	13 621
60-64,9	8 101	9 408	8 935	8 913
≥65	2 396	2 608	2 507	2 504
Total ≥ 50	37 361	39 929	38 621	38 564
Skillnaden mellan kontrollen och busstyperna		+2 568	+1 260	+1 203
Skillnad >55 dB		+1 382	+680	+635

Exponering från vägtrafikbuller på vägar med busstrafik i centrala Göteborg



Figur 23 . Exponering för vägtrafikbuller på vägar med busstrafik samt alla leder i centrala Göteborg

Sömnstörningar börjar vid 45 dBA L_{night} utomhusnivå (eller ännu lägre enligt WHO). I Tabell 15 jämförs antalet personer inom centrala Göteborg som exponeras för vägtrafikbuller nattetid inklusive busstrafik i centrala Göteborg för de olika busstyperna. Enligt WHO är en utomhusnivå nattetid över 55 dBA hälsofarlig. Inom beräkningsområdet ökar antalet personer som exponeras för en hälsofarlig ljudnivå nattetid med över 700 personer om busstrafiken består av dieselbussar istället för el- eller gasbussar. Antalet över 45 dBA är 2 000 personer mer med dieselbuss än gas eller elbuss.

Tabell 15 Antalet personer med högre bullernivåer nattetid vid mest exponerad fasad

Intervall (Lnight)	Antalet exponerade personer nattetid			
	Personbilar och övrig tung trafik (kontroll)	Dieselbussar + Personbilar och övrig tung trafik	Gasbussar + Personbilar och övrig tung trafik	Elbussar + Personbilar och övrig tung trafik
45-49,9	14 275	15 054	14 419	14 396
50-54,9	11 647	13 474	12 891	12 768
55-59,9	4 052	5 168	4 480	4 472
≥60	1 310	1 406	1 382	1 377
Total ≥ 45	31 284	35 102	33 172	33 013
Skillnaden mellan kontrollen och busstyperna ≥45		+3 818	+1 888	+1 729
Skillnad ≥55 (Hälsosam nivå enligt WHO)		+1 212	+500	+ 487

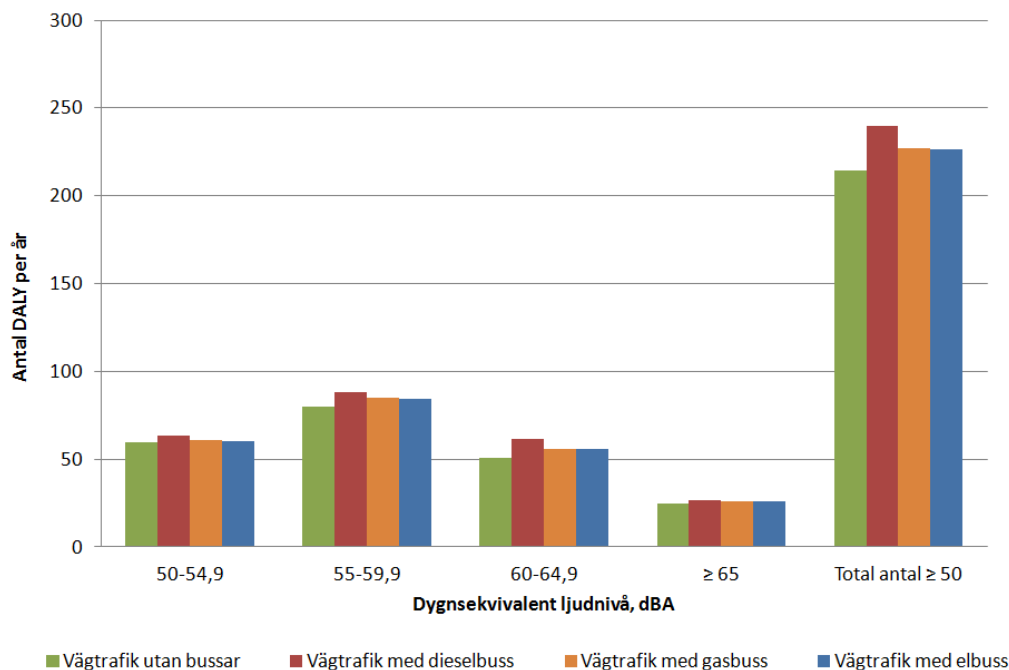
6.2.2 Nyttoberäkningar av hälsoeffekter

Om man översätter antalet exponerade i de olika bullerintervallerna som redovisades i Tabell 14 till DALYs (antalet förlorade friska levnadsår per år), som är metoden utvecklad av WHO för att kvantifiera hälsoeffekter, ser man hur många DALYs orsakas av vägtrafik på de mest trafikerade vägarna i centrala Göteborg samt hur många som tillkommer på grund av olika typer av busstrafik (Tabell 16). Resultaten illustreras i Figur 24.

Tabell 16 Antalet förlorade hälsosamma levnadsår i centrala Göteborg på grund av vägtrafik med busstrafik varje år

Intervall (LAeq)	Antalet DALYs per år (allmänna störningar och sömnstörningar)			
	Personbilar och övrig tung trafik (kontroll)	Dieselbussar + Personbilar och övrig tung trafik	Gasbussar + Personbilar och övrig tung trafik	Elbussar + Personbilar och övrig tung trafik
50-54,9	60	63	61	61
55-59,9	80	88	85	84
60-64,9	51	61	56	56
≥65	25	26	26	26
Total ≥ 50	215	239	228	227
Skillnaden mellan kontrollen och busstyperna		+24	+13	+12

Antalet förlorade DALYs i centrala Göteborg på grund av vägtrafik utan busstrafik beräknas vara 215 per år. Lägger man till busstrafik ökar antalet med mellan 12 och 24 förlorade friska levnadsår beroende på busstyp.



Figur 24 Hälsoeffekter av vägtrafikbuller inklusive busstrafik i centrala Göteborg uträknade som antalet DALYs

6.2.3 Nyttoberäkningar av samhällsekonomiska kostnader

Inom beräkningsområdet för centrala Göteborg på vägar som trafikeras av busstrafik, samt alla stora leder, är den årliga samhällsekonomiska kostnaden av vägtrafik utan busstrafik 306 miljoner kronor. Beräkningen baseras på antalet exponerade personer inom 100 meter från en busslinje som presenterats i Tabell 14. Läger man till busstrafiken kan man beräkna merkostnaden p.g.a. av busstrafik. Tabell 17 visar skillnaden i kostnaderna beroende på olika busstyper.

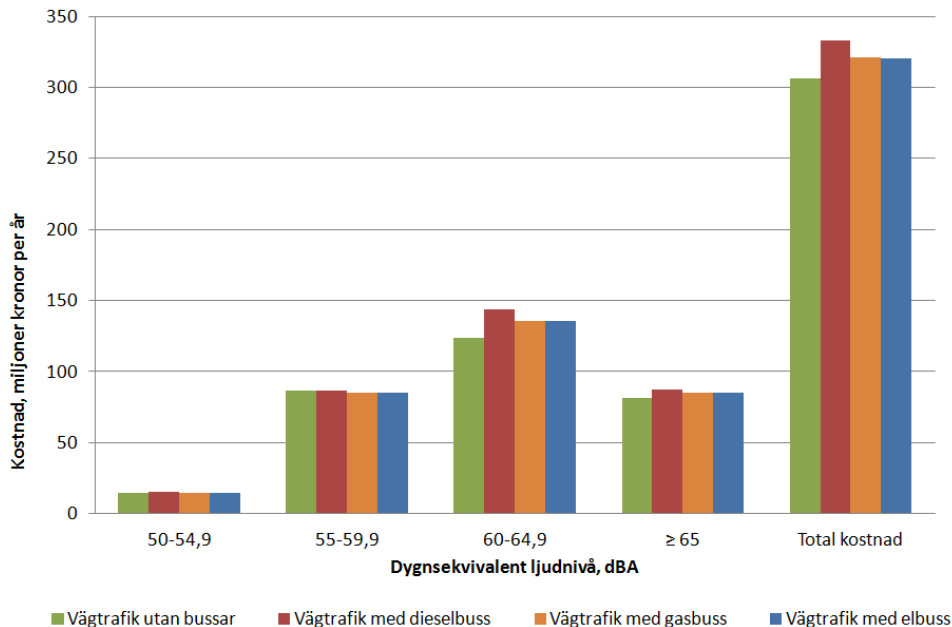
Tabell 17 Samhällsekonomiska kostnader av vägtrafik och nyttoberäkningen av olika busstyper

Intervall (LAeq)	Samhällsekonomiska kostnader, miljoner kr per år			
	Personbilar och övrig tung trafik (kontroll)	Dieselbussar + Personbilar och övrig tung trafik	Gasbussar + Personbilar och övrig tung trafik	Elbussar + Personbilar och övrig tung trafik
50-54,9	14	15	15	15
55-59,9	87	87	85	85
60-64,9	124	143	136	135
≥65	81	87	85	85
Totalt ≥ 50	306	333	321	320
Nyttoberäkningen baserad på Skillnaden mellan kontrollen och olika busstyper		+27	+15	+14

Består busstrafiken av dieselbussar kostar buller 27 miljoner kronor extra årligen enligt denna beräkning. Består busstrafiken av gasbussar är kostnaden 15 miljoner kronor extra per år och om det är elbussar är kostnaden 14 miljoner kronor per år. Nyttoeffekten av att byta från diesel till gas för hela bussflottan blir 12 miljoner kronor årligen och för elbussar 13 miljoner kronor. Uträkningen är under konstant hastighet och tar inte hänsyn till bullernivåer vid hållplatser. Beräkningar vid hållplatser presenteras i nästa avsnitt.

Osäkerheten är samtidigt stor och jämförelser mellan speciellt diesel och övriga motortyper ska göras med försiktighet då de baseras på olika indata. Generellt saknas idag indata för specifikt bussar i verklig trafik med normal vägbeläggning.

Samhällsekonomiska kostnader av vägtrafik utan busstrafik jämfört med vägtrafik med busstrafik med olika busstyper illustreras i Figur 25.



Figur 25 Samhällsekonomiska kostnader av vägtrafikbuller på vägar med busstrafik i centrala Göteborg

6.2.4 Bullerexponering vid busshållplatser

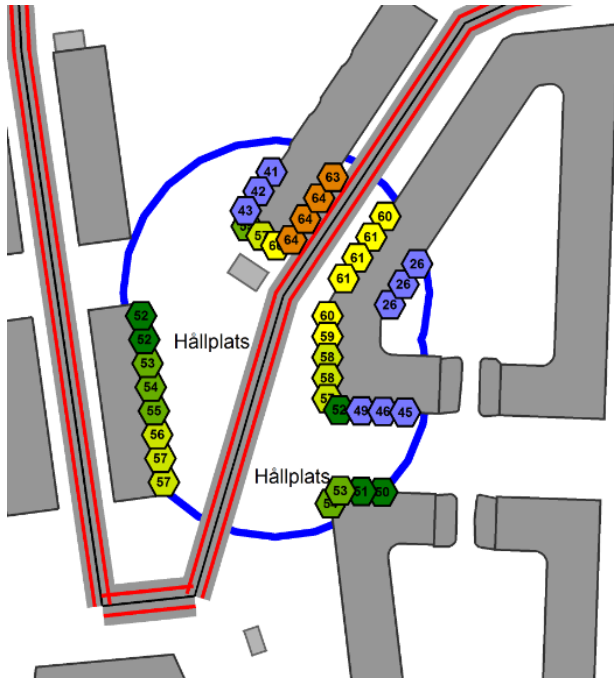
För att visa effekten av en högre bullerexponering vid acceleration från en hållplats har vi beräknat bullernivåer för varje busstyp som accelererar vid start från en hållplats (upp till 30 km/tim på en sträcka på 30 meter). Accelerationer har störst påverkan på de som bor väldigt nära en hållplats och därför har vi satt det maximala avståndet till 30 meter. Det är vid acceleration som bussmätningar visar de största skillnaderna mellan busstyperna.

SP har räknat fram accelerationskorrektioner för samtliga busstyper som ingår i denna studie (Tabell 18) utifrån mätningarna som gjordes på en provbana. Dessa har använts i accelerationsberäkningarna vid busshållplatserna.

Tabell 18 Accelerationskorrektioner baserat på enskilda mätdata

Fordonskategori	Korrektion
El	1,2
Gas	6,1
Hybridbuss i dieseldrift	4,7
Diesel	5,6

Inom centrumområdet bor ca 11 000 personer inom 30 meter från en busshållplats. Vi har beräknat samtliga bostäder inom 30 meter från en hållplats. Figur 26 visar ett exempel på hur resultaten från beräkningarna av accelerationer vid busshållplatser kan se ut. I exemplet har endast dieselbussar beräknats. Inom 30 meter från hållplatsen antas det att bussar accelererar.



Figur 26 Bullernivåer vid bostäder som ligger inom 30 meter från busshållplatsen på Kompassgatan (blå cirklar = buffert på 30 meter kring busshållplatser)

Tabell 19 visar antalet exponerade för högre ljudnivåer för varje busstyp utan personbilstrafik och övriga tunga fordon. Resultaten visar att det är en väldigt stor skillnad mellan dieselbussar och de övriga bussarna, men även att det finns en stor skillnad mellan hybridbussar, gasbussar och elbussar. Dessa skillnader har varit nästintill osynliga vid användningen av den dygnsekvivalenta ljudnivån under konstant hastighet, p.g.a. att ett dygn är för lång tid att visa skillnader där antalet fordon är så litet som det är för busstrafik jämfört med biltrafik, samt att däck- vägbanebullret har större betydelse. Gasbussar låter mycket mer än elbussar vid acceleration och det är vid busshållplatser som skillnaderna blir synliga när man använder dygnsekvivalent ljudnivå. Endast 7 boenden utav 11 000 inom beräkningsområdet exponeras för en dygnsekvivalent ljudnivå över 55 dBA (riktvärdet för nybyggnation) när endast elbusstrafik ingår i beräkningen, jämfört med över 6 000 personer för dieselbusstrafik. Gasbussar och hybridbussar (i dieseldrift) ligger också bra till jämfört med dieselbussar, men det finns ändå en stor skillnad mellan dessa och elbussar.

Tabell 19 Antalet personer med dygnsekvivalent ljudnivå lika med eller mer än 50 dBA endast från busstrafik som bor inom 30 meter från en busshållplats.

Intervall (LAeq)	Antalet exponerade personer			
	Dieselbuss	Hybridbuss (i dieseldrift)	Gasbuss	Elbuss
50-54,9	2 273	3 250	3 103	1 141
55-59,9	4 319	732	489	7
60-64,9	1 839	0	0	0
≥65	69	0	0	0
Total ≥ 50	8 500	3 982	3 592	1 148
Total ≥ 55	6 227	732	489	7

Tabell 20 visar antalet personer som exponeras för ekvivalenta ljudnivåer från 45 dBA och uppåt nattetid, som är nivån där sömnstörningar förekommer oftare. Skillnaderna är återigen stor mellan busstyperna. Det är endast med dieselbussarna att nivåer över 55 dBA, som är en hälsofarlig nivå enligt WHO, förekommer. Det är dock viktigt att ta hänsyn här till att indata till modellen för dieselbussar kommer från befintliga data för

medeltunga fordon som gjordes under 2015. Det är en källa till osäkerhet. Återigen ligger gasbussar och hybridbussar (i dieseldrift) också bra till jämfört med dieselbussar, men det finns ändå en stor skillnad mellan dessa och elbussar som är av stor betydelse för hälsoeffekterna.

Dessa beräkningar är av intresse i en situation där man tänker bygga ett nytt bostadsområde eller göra om ett befintlig bostadsområde till ett med ingen eller begränsad personbilstrafik men där man tillåter kollektivtrafik. Elbussar blir i sådana fall den bästa lösningen för att skapa en god ljudmiljö.

Tabell 20 Antalet personer med ljudnivå lika med eller mer än 45 dBA nattetid *endast från busstrafik som bor inom 30 meter från en busshållplats.*

Intervall (L _{night})	Antalet exponerade personer nattetid			
	Dieselbuss	Hybridbuss (i dieseldrift)	Gasbuss	Elbuss
45-49,9	2231	3293	3121	1195
50-54,9	4373	746	480	7
55-59,9	1825	0	0	0
≥ 60	69	0	0	0
Total ≥ 45	8 498	4 039	3 601	1 202
Total ≥ 55	1 894	0	0	0

Tabell 21 visar skillnaderna när bil och övrig tung trafik inkluderas i beräkningen, d.v.s. som trafiksituationen är i verkligheten idag. Det tillkommer fler personer exponerade för ljudnivåer över 50 dBA när biltrafiken inkluderas. Antalet exponerade över riktvärde blir drygt 100 personer med blandtrafiken med elbussar. Antalet med gasbussar blir knappt 300 personer och antalet med dieselbussar blir knappt 1700 personer.

Tabell 21 Antalet personer med dygnsekvivalent ljudnivå från all vägtrafik lika med eller mer än 50 dBA som bor inom 30 meter från en busshållplats

Intervall (L _{Aeq})	Antalet exponerade personer inom 30 meter från en hållplats				
	Personbilar och övrig tung trafik (kontroll)	Dieselbussar + Personbilar och övrig tung trafik	Hybridbussar* + Personbilar och övrig tung trafik	Gasbussar + Personbilar och övrig tung trafik	Elbussar + Personbilar och övrig tung trafik
50-54,9	1 375	820	1 973	2 015	1 813
55-59,9	3 929	3 036	3 672	3 709	3 793
60-64,9	2 712	4 676	3 200	3 130	2 933
≥65	412	1 012	496	490	437
Total ≥ 50	8 428	9 544	9 341	9 344	8 976
Skillnaden mellan kontrollen och busstyperna ≥50 dB		+ 1 116	+ 913	+ 916	+ 548
Total ≥ 55	7 053	8 724	7 368	7 329	7 163
Skillnad mellan kontrollen och busstyperna ≥ 55 dB		+ 1 671	+ 315	+ 276	+ 110

*I dieseldrift

Tabell 22 visar skillnaderna i exponeringen nattetid när bil och övrig tung trafik inkluderas i beräkningen. För personer som bor i omedelbar närhet till en busshållplats är skillnaderna i exponering nattetid större mellan busstyperna än dagtid. Ökningen i antalet exponerade för ljudnivåer över 45 dBA nattetid när busstrafik förekommer tillsammans med biltrafik är för elbussar en fjärdedel av ökningen jämfört med hybridbuss i dieseldrift eller gasbuss.

Tabell 22 Antalet personer med ljudnivå nattetid från all vägtrafik lika med eller mer än 45 dBA som bor inom 30 meter från en busshållplats

Intervall (Lnicht)	Antalet exponerade personer inom 30 meter från en hållplats nattetid				
	Personbilar och övrig tung trafik (kontroll)	Dieselbussar + Personbilar och övrig tung trafik	Hybridbussar* + Personbilar och övrig tung trafik	Gasbussar + Personbilar och övrig tung trafik	Elbussar + Personbilar och övrig tung trafik
45-49,9	2958	1113	2548	2752	2547
50-54,9	3602	4186	4641	4512	4133
55-59,9	1211	3707	1523	1452	1307
≥ 60	45	424	45	45	45
Total ≥ 45	7 816	9 430	8 757	8 761	8 032
Skillnaden mellan kontrollen och busstyperna ≥45 dB		+ 1 614	+ 941	+ 945	+ 216
Total ≥ 55	1 256	4 131	1 567	1 496	1 352
Skillnad mellan kontrollen och busstyperna ≥ 55 dB		+ 2 875	+ 311	+ 240	+ 96

*I dieseldrift

6.2.5 Nyttoberäkningar av samhällsekonomiska kostnader vid hållplatser

Översätter man exponering till kostnader av vägtrafiken inom 30 meter från hållplatser i centrala Göteborg där accelerationer från bussar medräknas blir nyttoeffekten av elbussar jämfört med dieselbussar 38 miljoner kronor per år. Nyttoeffekten av gasbussar jämfört med diesel blir 33 miljoner kronor och för hybridbussen i dieseldrift blir det 32 miljoner kronor. Skillnaden mellan elbussar och gasbussar ger elbussar en nyttoeffekt på 5 miljoner kronor per år. Tabell 23 visar skillnaden i kostnaderna baserad på olika busstyper (inklusive övrig vägtrafik).

Tabell 23 Samhällsekonomiska kostnader av vägtrafik och nyttoberäkningen av olika busstyper

Intervall (LAeq)	Samhällsekonomiska kostnader, miljoner kr per år				
	Personbilar och övrig tung trafik (kontroll)	Dieselbussar + Personbilar och övrig tung trafik	Hybridbussar + Personbilar och övrig tung trafik	Gasbussar + Personbilar och övrig tung trafik	Elbussar + Personbilar och övrig tung trafik
50-54,9	1,8	1,2	2,1	2,0	1,8
55-59,9	25,9	20,0	25,3	25,4	25,5
60-64,9	41,0	74,0	48,0	46,9	44,0
≥65	10,0	24,5	12,0	11,9	10,6
Total ≥ 50	78,6	119,7	87,4	86,2	81,9
Nyttoberäkningen baserad på Skillnaden mellan kontrollen och olika busstyper		+41	+9	+8	+3

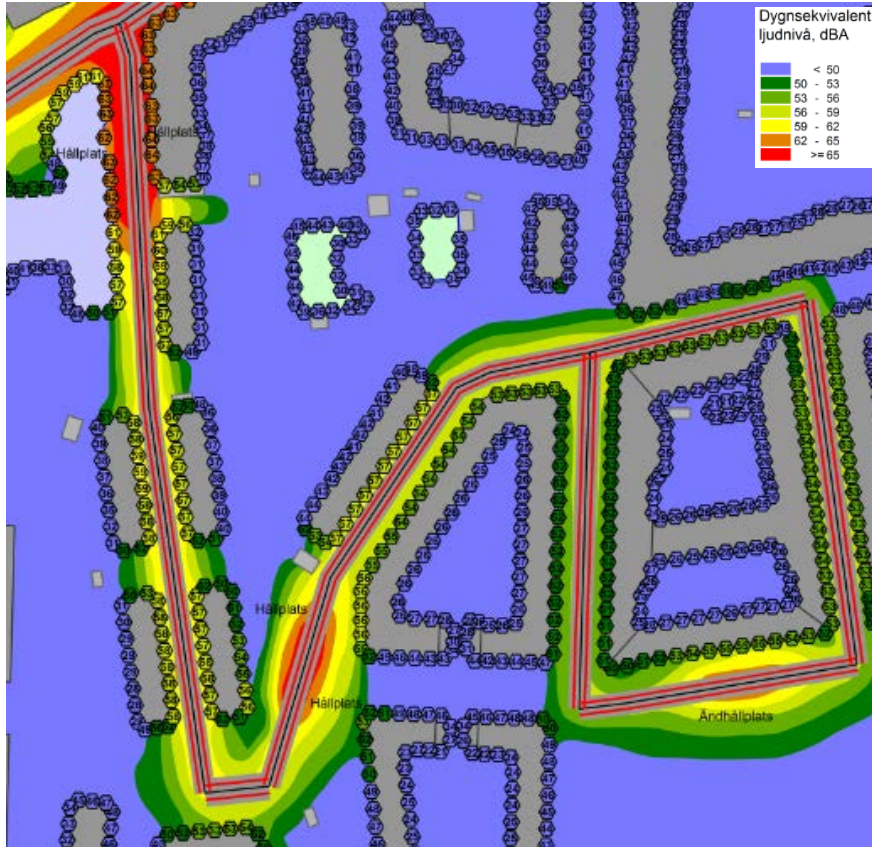
6.3 Bäckegatan

Inom bostadsområdet kring Bäckegatan som trafikeras av busslinje 60 med 340 busspassager om dagen och där busstrafiken utgör nästan hälften av vägtrafiken på gatan, görs mer detaljerade beräkningar av bussbuller. Vi beräknar både spridningen av bullret i terrängen (bakgrundskartan) och vid fasader (fasadpunkter). Vi har lagt in busshållplatserna och använder accelerationskoefficienter för att räkna ut bulleremission från bussarna vid start från hållplatsen.

Figur 27 visar beräknade bullernivåer av vägtrafik utan bussar vid fasad på bostadshusen som ligger inom beräkningsområdet för Bäckegatan. Figur 28 - Figur 31 visar beräknade bullernivåer för all vägtrafik inklusive busstrafik för respektive busstyp.



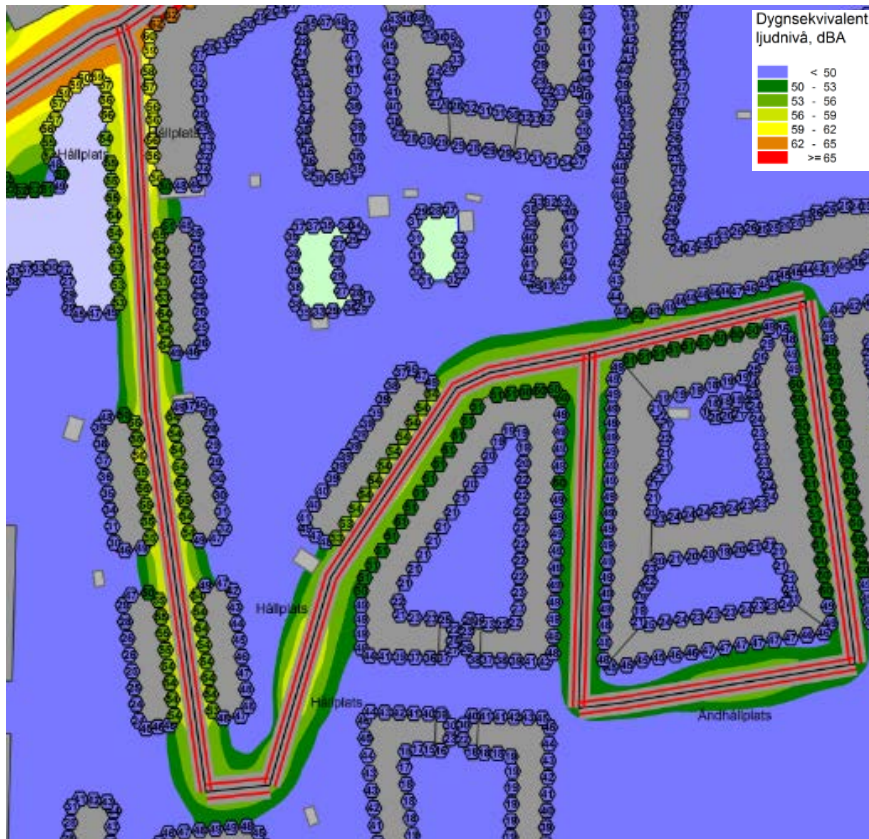
Figur 27 Dygnsekvivalenta ljudnivåer vid fasad för vägtrafiken utan bussar



Figur 28 Dygnsekvivalenta ljudnivåer vid fasad för vägtrafiken inklusive biltrafik där busstrafiken är dieselfordon



Figur 29 Dygnsekvivalenta ljudnivåer vid fasad för vägtrafiken inklusive biltrafik där busstrafiken är hybridfordon som kör i dieseldrift

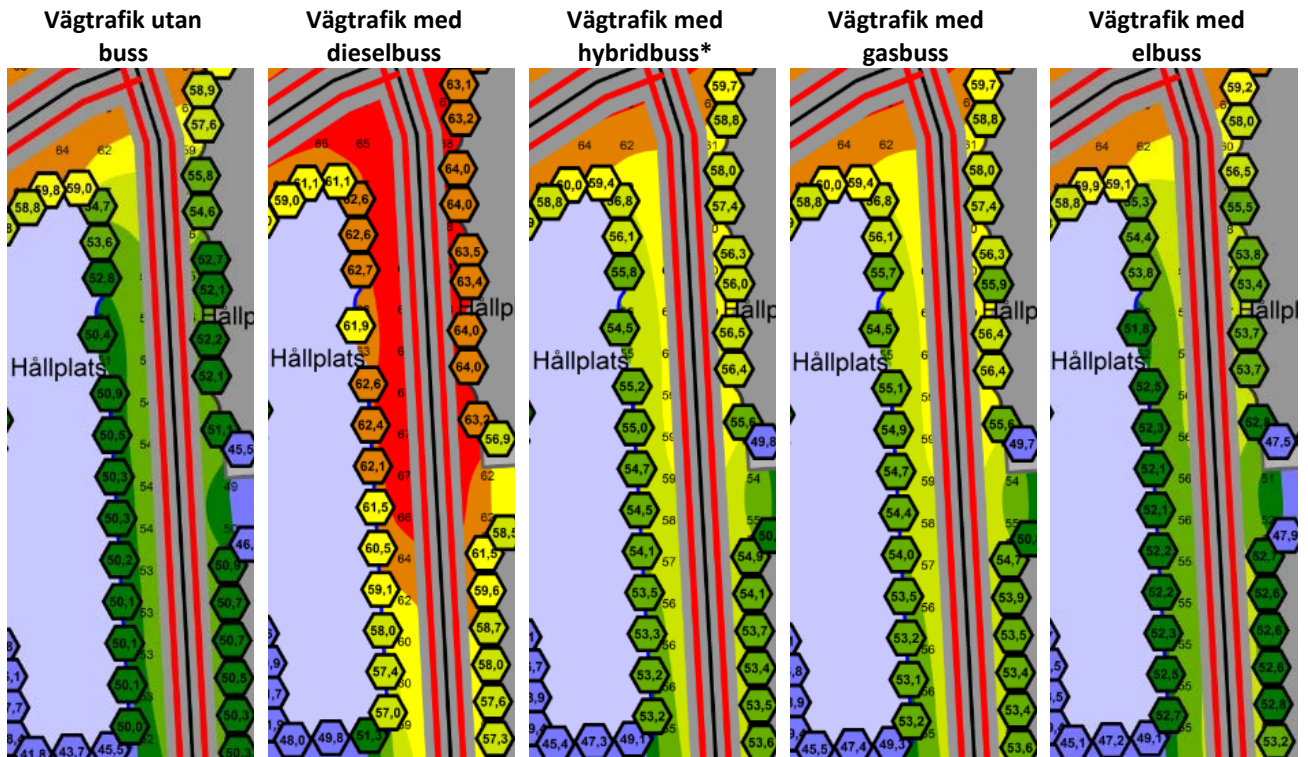


Figur 30 Dygnskvivalenta ljudnivåer vid fasad för vägtrafiken inklusive biltrafik där busstrafiken är gasfordon



Figur 31 Dygnskvivalenta ljudnivåer vid fasad för vägtrafiken inklusive biltrafik där busstrafiken är elfordon

Det kan vara svårt att se skillnaderna när man visar hela området. Om vi zoomar in till hållplatsområdet i början på Bäckegatan vid Fjällskolan kan man lättare se skillnaderna i den dygnsekvivalenta ljudnivån där bussar accelererar från hållplatsen. Figur 32 visar fasadnivåer som frifältsvärden.



Figur 32 Jämförelse av den dygnsekvivalenta ljudnivån mellan vägtrafik utan bussar och total trafik med olika busstyper vid hållplatsläget vid Fjällskolan i början på Bäckegatan

I den första bilden i Figur 32 visas vägtrafiken (biltrafik) utan busstrafik. Ljudnivåerna är relativt låga och de flesta fasadpunkter på Bäckegatan ligger under 55 dBA (riktvärdet för nybyggnation). Undantaget är de lägenheter som ligger närmast korsningen med Fjällgatan. Läger man till dieselbussar som accelererar vid hållplatserna (bild 2 i Figur 32) ökar den dygnsekvivalenta ljudnivån med upp till 12 dBA och samtliga fasader mot gatan får över 55 dBA. Läger man däremot till elbussar ökar den dygnsekvivalenta ljudnivån med som mest 3 dBA enligt beräkningen och endast några av fasadpunkter nära Fjällgatan hamnar över 55 dBA.

Jämför man all vägtrafik med de olika busstyperna (bilder 2-5 i Figur 32) får man följande skillnader:

- vägtrafik med dieselbuss är som mest 7,4 dBA högre jämfört med vägtrafik med hybridbuss som kör i dieseldrift. Hybridbussen som kör i dieseldrift är tystare än standarddieselbussen på grund av att motorn är mindre i hybridbussen.
- vägtrafik med dieselbuss är som mest 7,5 dBA högre jämfört med vägtrafik med gasbuss.
- vägtrafik med dieselbuss är som mest 10,1 dBA högre jämfört med vägtrafik med elbuss.
- vägtrafik med hybridbuss är som mest endast 0,1 dBA högre jämfört med vägtrafik med gasbuss
- vägtrafik med hybridbuss är som mest 2,7 dBA högre jämfört med vägtrafik med elbuss
- Vägtrafik med gasbuss är som mest 2,6 dBA högre jämfört med vägtrafik med elbuss.

Resultaten som presenteras gäller för modellberäkningarna med de förutsättningar som har getts i detta projekt. Osäkerhet och skillnader i indata för de olika busstyperna kan påverka resultatet.

Skillnaden mellan dieselbussen och elbussen som ligger på 10 dBA som dygnsekvivalent ljudnivå motsvarar i vanliga fall en upplevd fördubbling av ljudstyrka. En betydande ökning i störning förekommer redan vid en 3 dB ökning av den dygnsekvivalenta ljudnivån.

Det är också viktigt att komma ihåg att dygnsekvivalenta ljudnivåer är ett trubbigt mått för att kunna se skillnaderna mellan olika fordonstyper på bullerexponering eftersom L_{eq} är ett medelvärde av bullret under dygnet och är därför en utslätning av nivåer och inte toppar med höga nivåer. Momentana bullervärden, t.ex. maximala ljudnivåer är bättre på att visa hur höga bullernivåerna kan bli under kortare perioder. På grund av begränsningarna i bullerberäkningsprogrammet har vi inte kunnat räkna fram maximala ljudnivåer utomhus vid fasad. I avsnitt 5.1 i denna rapport presenteras maximala ljudnivåer från bussmätningarna och beräkningar av maximala ljudnivåer inomhus för olika fasadtyper presenteras i avsnitt 6.4.

6.3.1 Antalet exponerade personer

För Bäckegatan har vi räknat ut antalet personer exponerade för olika ljudnivåer. I Tabell 24 ges antalet exponerade personer för personbilstrafik utan busstrafik, som vi anger som kontrollfallet, jämfört med personbilar kombinerad med respektive busstyp. Resultaten visar att även inom området på Bäckegatan med kuperad terräng, tät busstrafik och med flera hållplatser i närheten av bostaden, är det svårt att med den dygnsekvivalenta ljudnivån i dBA visa någon större skillnad mellan hybrid, gas och elbussar i siffror. Tabellen innehåller också antalet exponerade för ljudnivåer från 45 dBA nattetid inom området. Här är skillnaden större mellan de olika busstyperna och elbussen bidrar klart minst till ökad bullerexponering nattetid.

Tabell 24 Antalet personer inom beräkningsområdet Bäckegatan som har en dygnsekvivalent ljudnivå lika med eller mer än 50 dBA och antalet med en ljudnivå nattetid från 45 dBA

Intervall (LAeq)	Antalet exponerade personer				
	Endast biltrafik	Dieselbussar + Personbilar	Hybridbussar* + Personbilar	Gasbussar + Personbilar	Elbussar + Personbilar
50-54,9	53	359	147	148	144
55-59,9	59	141	52	50	54
60-64,9	7	48	17	16	12
≥65	0	0	0	0	0
Total ≥ 50	119	548	216	214	210
Skillnaden ≥ 50 dBA LAeq mellan endast biltrafik och bil med bussar	-	+429	+97	+95	+91
L_{night}					
Total ≥ 45	110	368	180	154	135
Skillnaden ≥ 45 nattetid mellan endast biltrafik och bil med bussar		+258	+70	+44	+25

*Hybridbuss i dieseldrift

6.3.2 Nyttobräkningar av samhällsekonomiska kostnader på Bäckegatan

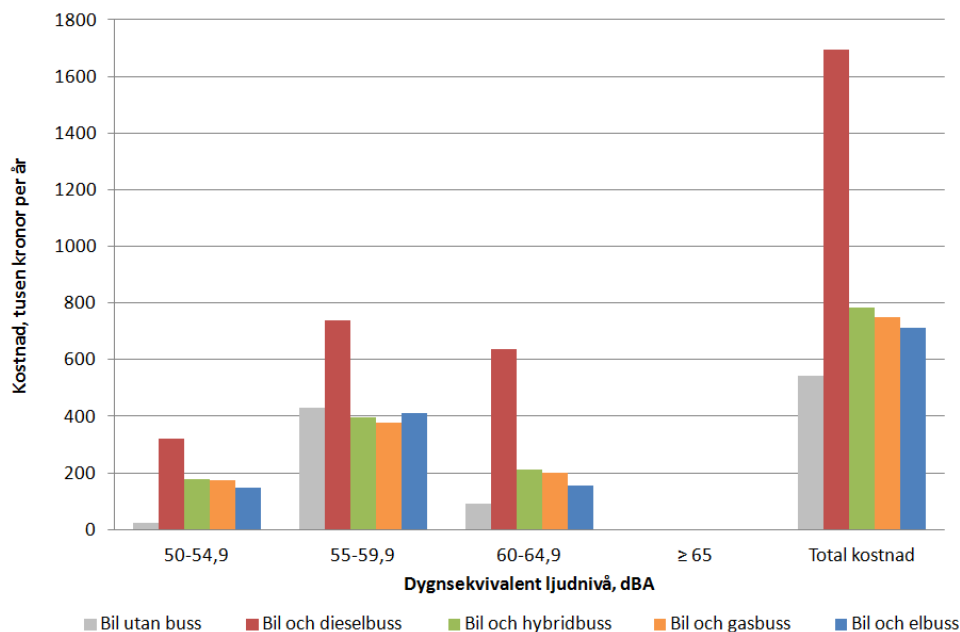
På samma sätt som vi gjort i avsnitt 6.2 går det att räkna ut de årliga samhällsekonomiska kostnaderna av trafikbuller i området kring Bäckegatan. I Tabell 25 och Figur 33 visas skillnaderna i kostnaderna beroende på busstyp som trafikerar gatorna i området.

Tabell 25 . Samhällsekonomiska kostnader av vägtrafik på Bäckegatan med och utan busstrafik av olika typer

Samhällsekonomiska kostnader på Bäckegatan, tusen kr per år					
Intervall (LAeq)	Endast biltrafik	Dieselbussar + Personbilar	Hybridbussar* + Personbilar	gasbussar + Personbilar	elbussar + Personbilar
50-54,9	22	321	178	174	148
55-59,9	430	738	397	377	411
60-64,9	91	636	210	199	153
≥65	0	0	0	0	0
Total ≥ 50	544	1694	785	749	712
Skillnaden mellan endast biltrafik och bil med bussar	-	+1 150	+241	+205	+168

*Hybridbuss i dieseldrift

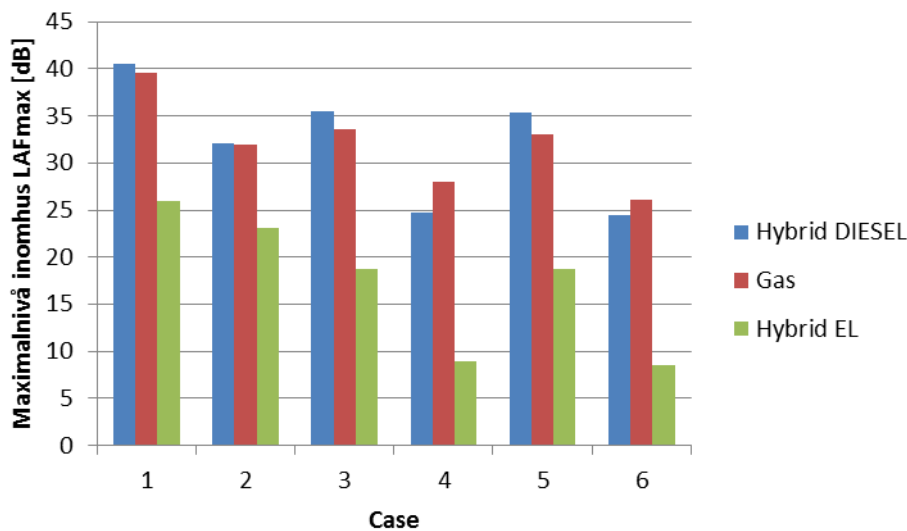
Eftersom busstrafiken på gatan är nästan lika stor sett till antalet passerande fordon som personbilar slår busstrafiken igenom stort i den samhällsekonomiska kostnadsberäkningen och där är mer tydligt vilken effekt busstrafik kan ha på denna typ av gata som domineras av kollektivtrafik med täta turer. Kostnaderna med dieselbussar är mer än dubbelt så stora som kostnaderna med hybrid, el eller gasbussar. Skillnaden är dock liten mellan hybrid, gas- och elbussarna. Kostnaden för vägtrafiken med dieselbussar blir tre gånger så stora än när endast biltrafiken kör på gatan. Den årliga merkostnaden av busstrafiken på Bäckegatan är över en miljon kronor om busstrafiken består av dieselbussar jämfört med 168 000 kronor om busstrafiken består av elbussar. Nyttoeffekten av elbussen jämfört med hybridbussen eller gasbussen är marginell i jämförelse.



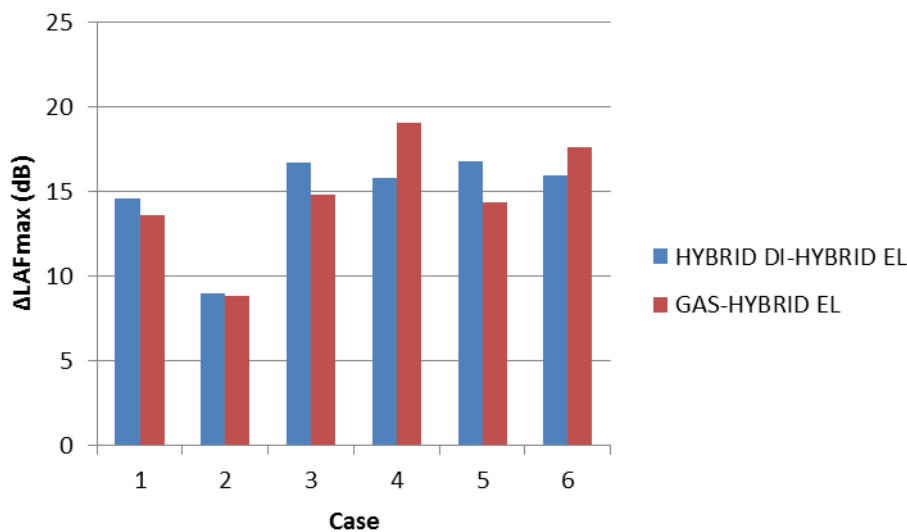
Figur 33 Samhällsekonomiska kostnader av vägtrafik med och utan busstrafik inom området kring Bäckegatan

6.4 Resultat inomhus

I Figur 34 redovisas beräknad maximal A-vägd ljudnivå inomhus i det mindre rummet för gas, hybrid-diesel samt hybrid-el. Resultaten redovisas för typfallen som definierades i avsnitt 5.2. För att göra skillnaderna tydligare redovisas även skillnaderna mellan A-vägd maximal ljudnivå inomhus för respektive busstyp i Figur 35. Beroende på fasadtyp kan elbussen ge 15 dB lägre inomhusnivåer i de aktuella typfallen. Värt att notera är att de största skillnaderna fås i moderna fasader, även om de A-vägda absolutnivåerna i de flesta fall är lägre där. I de resultat som redovisas här har inte hänsyn tagits till att rumsresonanser kan orsaka högre ljudnivåer i enskilda frekvensband speciellt i mindre rum där resonansfrekvenserna kan stämma överens med de starka tonala komponenterna som bussar kan orsaka. Rumsresonanserna kan också påverka störningen av lågfrekvent buller. Större skillnader mellan busstyperna kan förväntas om rumsresonanserna påverkar slutresultatet. Idag finns dock ingen tillförlitlig allmänt vedertagen predikteringsmetod som tar hänsyn till rumsresonanserna.

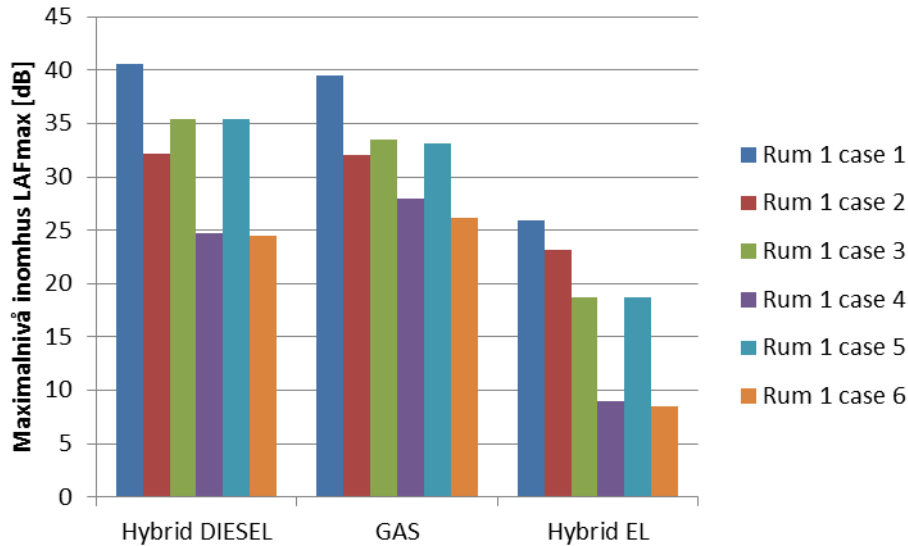


Figur 34 Beräknad A-vägd maximal ljudnivå inomhus för de 6 typfallen.



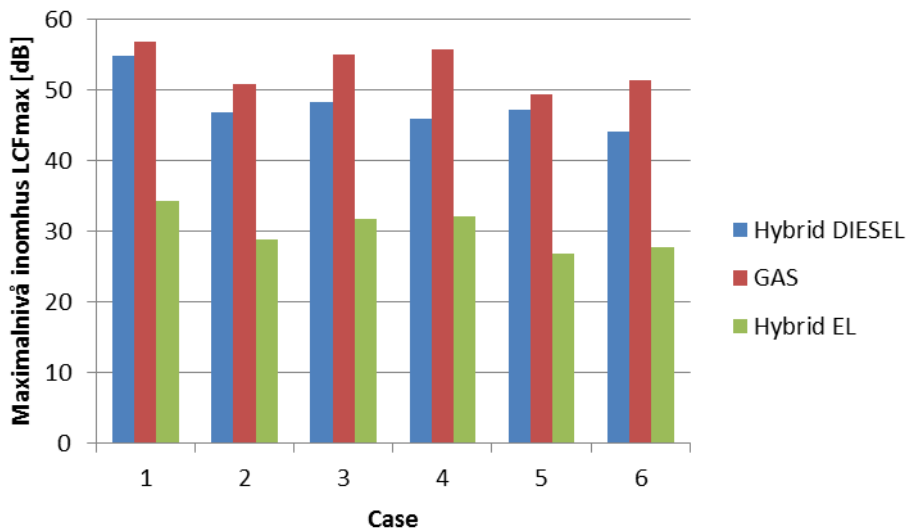
Figur 35 Skillnad mellan A-vägd maximal ljudnivå inomhus mellan olika busstyper för de 6 typfallen.

Samma resultat för den A-vägd maximalnivå inomhus redovisas också i Figur 36 för de olika busstyperna. Resultaten visar tydligt att elbussen resulterar i de lägsta inomhusnivåerna oberoende av fasadtyp. Maximalnivåerna i de beräknade exemplen är relativt låga, vilket beror av att de är baserade på de uppmätta maximalnivåerna vid provbanan. Högre nivåer kan förväntas i verklig trafik. Däremot är de relativa nivåerna relevanta för en jämförelse av fordonstyperna.

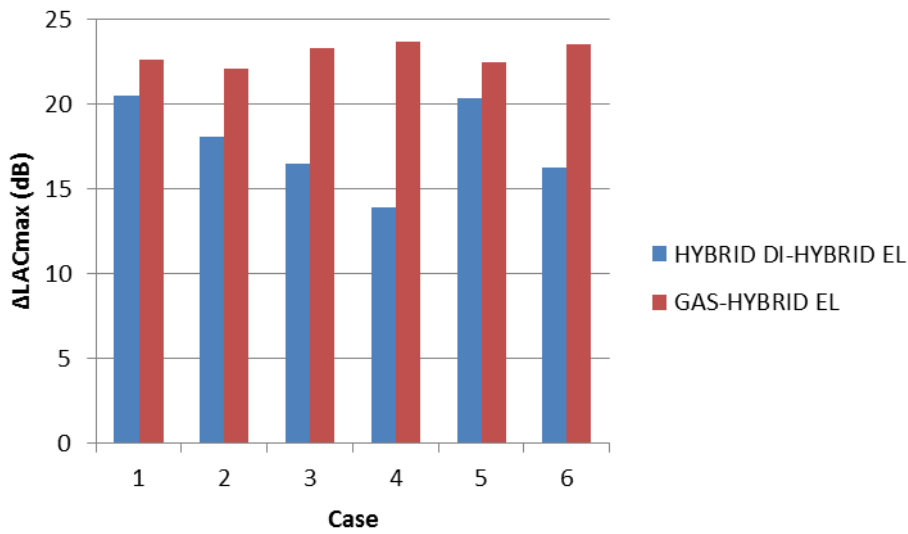


Figur 36 Beräknad A-vägd maximal ljudnivå inomhus för busstyperna.

Figur 37 respektive Figur 38 visar motsvarande absolutnivåer och skillnader för den C-vägd ljudnivå inomhus. Här kommer skillnaderna att bli större för de olika busstyperna än för motsvarande A-vägd nivå, vilket beror på att C-vägningen tar större hänsyn till det lågfrekventa ljudet. Beroende på bussens frekvensinnehåll och fasadens förmåga att isolera bort det lågfrekventa ljudet visar den C-vägda nivån större skillnader. Gasbussen ger i dessa exempel över 20 dB högre C-vägd inomhusnivå jämfört med elbussen.

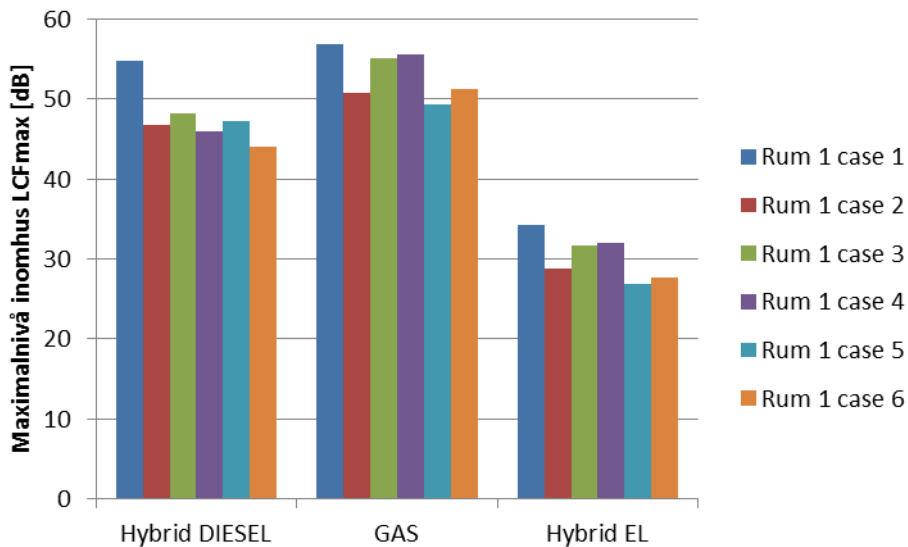


Figur 37 Beräknad C-vägd maximal ljudnivå inomhus för de 6 olika typfallen



Figur 38 Skillnad mellan C-vägd maximal ljudnivå inomhus mellan olika busstyper.

Figur 39 visar beräknad C-vägd maximalnivå inomhus för de olika busstyperna i de olika typfallen. Även här är det tydligt att elbussen har en stor bullermässig fördel jämfört med övriga busstyper. Beräknade ljudnivåer baseras på mätningar gjorda på en provbana med en mycket tyst vägbeläggning. I verkliga miljöer kommer uppmätta maximalnivåer att var högre.



Figur 39 Beräknad C-vägd maximal ljudnivå inomhus för busstyperna.

7 Diskussion

I miljöpolicyen för Göteborgs Stad står det att man ska arbeta tillsammans för en god livsmiljö och en hållbar utveckling⁵¹. Staden ska vara en föregångare som eftersträvar att förebygga och åtgärda miljöproblem. Det finns många strategiska dokument som styr hur detta ska uppnås. Ett är miljöprogrammet som innehåller en handlingsplan med åtgärder som ska göras för att bidra till att nå miljömålen. Inom miljöprogrammet finns åtgärdsprogram mot buller som syftar till att skapa en trivsamt och attraktiv stad med goda ljudmiljöer. Åtgärderna som identifierats handlar om att minska bullret vid mottagaren och förhindra nya bullerproblem. Inom åtgärdsprogrammet finns en handlingsplan för buller från buss och spårvagn. I handlingsplanen står det att buller från kollektivtrafiken måste minimeras för att skapa en trivsamt stad där kollektivtrafiken är ett attraktivt alternativ till bilen. För att kunna vara just ett alternativ till bilen krävs att kollektivtrafiken finns nära bostäder och arbetsplatser. Det är viktigt att kollektivtrafiken ersätter privata bilresor på ett sätt som inte orsakar ökad belastning på den psykiska och fysiska hälsan av stadens invånare och besökare genom t.ex. ökad utsläpp av luftföroreningar och buller. Kollektivtrafiken måste också upplevas som ett säkert, bekvämt och smidigt alternativ till bilen. Det innebär bl. a. att kollektivtrafiken ska erbjuda bra komfort (som inkluderar en bra ljudmiljö inne i bussen), ha en hög turtäthet, kör fler sträckor och linjer än dagens, hållplatser ska ligga så nära bostäder som möjligt, och man ska ha möjlighet att resa även nattetid. Tysta fordon är en avgörande parameter för att kunna komma närmare bostäder utan att öka på fysisk och psykisk stress under alla dygnets timmar. Med tystare bussar kan man köra bland bostäder utan att väcka människor nattetid, folk ges möjlighet att sova med öppet fönster och slipper bli irriterade av lågfrekvent ljud, i synnerhet vid accelerationer från hållplatser, samtidigt som komforten inne i bussen är så bra att man kan koppla av från stadens stress.

Åtgärder vid källan är alltid bättre än skyddsåtgärder. Skyddsåtgärder är kostsamma, kräver ofta drift och underhåll (t.ex. skärmar), ge bara effekt i ett begränsat område (t.ex. inomhus om fönsteråtgärder), kan skapa barriärer (t.ex. skärmar) och kan leda till ökad stress och ohälsa (t.ex. inte kunna sova med öppet fönster eller upplevelse av att vara instängd bakom en skärm). För trafikbuller handlar källan om buller från fordonet eller från kontakten mellan fordonet och vägbanan. De främsta bullerkällorna är motorbullret och däck-vägbanebullret. Vid låga hastigheter dominerar motorljudet och vid högre hastigheter däckljudet. De bästa fordonen är därför de med tystare motorer och tystare däck. Resultaten från denna studie och andra visar att det finns stora skillnader mellan bullret från fordon med förbränningsmotorer, i synnerhet dieselfordon, och elfordon. Det är inte bara som ekvivalent ljudnivå eller maximal ljudnivå, men också frekvensfördelningen av de olika motortyper som skiljer sig åt. Elfordon, och även till viss del gasfordon, har lägre ljudnivåer i de låga frekvenserna, mellan 20 och 200 Hz. Vid störning från tung trafik är det ofta de låga frekvenser som är mest problematiska eftersom de tränger igenom fasader och upplevs som starkare och mer obehagliga. Fordon med generell lägre ljudnivåer och i synnerhet lägre ljudnivåer i det lågfrekventa område lämpar sig därför mycket mer till körning i bostadstäta områden.

Mest klagomål kring bussbuller handlar om start, stop och tomgångskörning vid hållplatser. Klagomålen om bussbuller har ökat under senare år i samband med att bussarna blivit fler⁵². Det finns en liten andel av befolkningen (2,5 procent) som är oerhört känsliga för lågfrekvent ljud. För dessa är tröskeln för lågfrekvent ljud 12 dB

⁵¹ Miljöpolicy för Göteborgs stad, fastställd av kommunfullmäktige 2013-11-07 (H 2013 nr 176, P 2013-11-07, § 16, Dnr 0870/13)

⁵² Handlingsplan för buller från buss och spårvagn, Göteborgs Stad, Trafikkontoret. Underlag för detaljerad åtgärdsprogram. Slutkoncept 30 januari 2012

lägre än de som inte är känsliga. Känslighet till lågfrekvent ljud utvecklas ofta i medelåldern och det är ofta dessa personer som klagat på buller⁵³.

I handlingsplanen för buller från buss och spårvagn²³ står det att acceleration i uppförbackar, i kurvor och vid hållplatser är ett stort problem som skulle minskas om bussar i högre utsträckning kördes på gas eller el. I handlingsplanen föreslås ett antal strategier för att minska buller från busstrafiken, bl.a. att utreda bullereffekten av alternativa drivmedlen som elhybrider och gas. Denna rapport bidrar med kunskapsunderlag till denna fråga.

Staden växer. Målet är 150 000 nya bostäder och 80 000 nya arbetsplatser till 2035. I Göteborg 2035 Trafikstrategi för en nära storstad⁵⁴ har man konkretiserat strategier för resor, stadsrum och godstransporter. Ett av målen för resor är att minst 55% av resor som sker med motortransport ska ske med kollektivtrafik. Ett av målen för stadsrum är att gaturummen och andra miljöer i staden såsom offentliga platser är attraktiva att vistas i. Ett möjligt alternativ för att minska bilnehav i centrala delar av kommunen är att inte ge plats till biltrafik i delar av nyplanerade bostadsområden. Man kan begränsa motoriserad trafik till kollektivtrafik. Elbussar skulle kunna göra ett sådant scenario möjligt. De är luktfria och tystare. Det gör att man kan utöka konceptet att ha busshållplatser väldigt nära bostäder och även, som redan testats med Electricity på Lindholmen, inne i byggnader.

Enligt trafikkontorets årsrapport för 2015⁵⁵ skedde 37 procent av motoriserade resor i Göteborg med kollektivtrafik under 2015 vilken var en minskning med en procent jämfört med 2014. Ska man kunna uppfylla målet i trafikstrategin till 2035 krävs en ökning av antalet resor med kollektivtrafik med 50 procent.

I en rapport av Koucky & Partners 2013⁵⁶ finns det starka ekonomiska argument att investera i elbussar än konventionella dieselbussar, dels p.g.a. att de är mycket tystare och dels p.g.a. att de är mer kostnadseffektiva, d.v.s. den högre inköpskostnaden är mindre än den totala driftskostnaden över avtalsperioden. Ebusco, ett holländskt företag som tillverkar elbussar har i sin kalkyl räknat att trots att dieselbussen kostar endast 60 procent av en elbuss vid inköp är driftskostnader för elbussen så pass låga att man räknar hem prisskillnaden (inklusive kostnaden för laddinfrastrukturen) på mindre än 10 år. Att ha tystare stadsbussar är ett sätt att möjliggöra tätare turer, inrätta nya busslinjer och även kunna köra oftare nattetid. Det bidrar också till en mer attraktiv stadsmiljö.

Beräkningen för Centrala Göteborg visar att antalet exponerade personer för bullernivåer över 50 dBA (nivån man eftersträvar att komma under för att minimera hälsoeffekter) och 55 dBA (riktvärdet för nybyggnation) minskar något om busstrafiken består av gas eller elbuss istället för dieselbuss. Det går dock inte att visa någon större skillnad mellan el- eller gasbussar med denna typ av beräkning av dygnsekvivalent ljudnivå. En något större skillnad mellan elbussen och de övriga bussarna finns dock för bullerexponering nattetid. Ett sätt att försöka ge en mer nyanserad bild av buller från busstrafik i en vanlig situation i staden var genom att beräkna buller i närheten av busshållplatser. Det är ofta här människor blir mest störda av busstrafik. Även här slår biltrafiken igenom så mycket att

⁵³ Low frequency noise and annoyance. H.G. Leventhall. Noise & Health 2004, 6:23, 59-72

⁵⁴ Göteborg 2035 Trafikstrategi för en nära storstad, antagen av trafiknämnden i februari 2014

⁵⁵ Årsrapport 2015, Trafiknämnden Göteborgs Stad.

[http://www4.goteborg.se/prod/Intraservice/Namndhandlingar/SamrumPortal.nsf/EC2183F2743BB5E4C1257F5000669696/\\$File/%C2%A7%2024.2%20Bilaga%201%20Trafiknamndens%20Arssrapport%202015.pdf?OpenElement](http://www4.goteborg.se/prod/Intraservice/Namndhandlingar/SamrumPortal.nsf/EC2183F2743BB5E4C1257F5000669696/$File/%C2%A7%2024.2%20Bilaga%201%20Trafiknamndens%20Arssrapport%202015.pdf?OpenElement)

⁵⁶ Tystare stadsbussar kravställning vid upphandling för minskat källbuller, 3013. Koucky & Partners, författare Ljungblad, H. och Renhammar, T.

det endast går att se någon större ökning i antalet exponerade personer med diesalbuss. Ökningen i antalet personer som exponeras för högre ljudnivåer (från 50 dBA och uppåt) är lika för hybridbussar (i dieseldrift) och gasbussar, medan antalet är färre med elbussar. Vid en dygnskvivalent ljudnivå från 55 dBA och uppåt är ökningen i exponering på grund av elbusstrafik en tredjedel av den för hybridbussar och mindre än hälften av den för gasbussar. Däremot om man bara har busstrafik i närheten av bostäder (utan biltrafik) är skillnaderna i exponering, i synnerhet från 55 dBA och uppåt, stora mellan busstyperna och elbussen är överlägset det tystaste alternativet. För exponering nattetid både med endast busstrafik och även med biltrafik inkluderat är skillnaderna i exponering för ljudnivåer nattetid som kan orsaka sömnstörningar större mellan busstyperna och elbussen bidrar klart minst till ökad störning.

För att försöka analysera mer i detalj skillnaden mellan olika busstyper och den samhällsekonomiska nytta av elbussar använder vi Bäckegatan som ett exempelområde. Bäckegatan och angränsande gator trafikeras av busslinje 60 som kör i tät trafik. Bussar som kör där idag är hybridbussar. Bostadsområdet trafikeras annars av relativt få personbilar nästintill ingen övrig tung trafik. Resultaten visar att om man hade diesalbussar på gatan skulle det innebära en stor samhällsekonomisk kostnad. Men även inom området på Bäckegatan med kuperat terräng, tät busstrafik och med flera hållplatser i närheten av bostaden, är det svårt med den dygnskvivalenta ljudnivån i dBA som mått att visa i siffror någon större skillnad mellan hybrid, gas och elbussar. Skillnaderna blir mer tydliga när man tittar på exponering nattetid. Det är dock framför allt genom inomhusberäkningarna som de stora skillnaderna i ljudnivåer och störning kan anas.

I denna rapport har vi använt de konventionella måtten som finns för utvärdering av hälsoeffekter och samhällsekonomiska kostnader av trafikbuller, d.v.s. DALYs respektive ASEK. Dessa mått baseras på dygnskvivalenta ljudnivåer (för DALYs även ljudnivåer nattetid) vanligtvis uträknade med konstanta hastigheter för trafiken. Skillnader i DALYs och samhällsekonomiska kostnader mellan olika busstyper är relativt små när personbilar och övrig tung trafik inkluderas i beräkningen p.g.a. övrig trafik dominerar ljudbilden och att det krävs en större population med fler exponerade för högre ljudnivåer för att kunna se någon stor skillnad. A-vägningen är bra på att representera ljud från personbilar eftersom det finns en direkt relation mellan störning och dBA. Men dBA är inte tillräckligt väl korrelerad med störning och ljudstyrka när källan innehåller mycket lågfrekvent ljud. Det behövs helt enkelt något annat som bättre representerar upplevelsen av lågfrekvent ljud. Från våra resultat drar vi slutsatser att dessa mått som de är uppbyggda idag inte är tillräckliga för att visa alla nyttor med tystare bussar som innehåller mindre lågfrekvent ljud. Buller som innehåller mycket ljud inom det låga frekvensområdet tränger igenom fasaden mycket mer än ljud som innehåller mest höga frekvenser som filtreras bort av fasaden. Nivåerna blir högre inomhus om det finns mer lågfrekvent ljud.

I ASEK används 27 dBA som en schablon för skillnaden mellan inomhus och utomhusljudnivåer från vägtrafik. Denna nivå är ganska typisk för de äldre bostäder i Göteborg med originalfönster. De riktvärden som funnits för buller sedan slutet på 1990-talet har tillåtit nybyggnation i miljöer där bullernivåer vid mest exponerade fasad överskrider riktvärdet på 55 dBA under förutsättning att man har tillgång till en tyst eller ljuddämpad sida (under 50 dBA), samt att ljudnivåer inomhus klarar riktvärdet. Det har inneburit att nya bostäder har fönster med bättre ljudisolering än 27 dBA. Det är svårt att ta hänsyn till detta när man beräknar buller eftersom man inte har detaljkunskaper om varje bostad. Man kan dock konstatera att när man förtätar staden kommer man fortfarande ha en hög andel bostäder med sämre fönsterkvalitet med mindre områden insprängt i dessa med bättre inomhuskvalitéer.

Det är känt att lågfrekvent buller kan upplevas väldigt störande och att speciellt lätta fasader generellt är dåliga på att dämpa lågfrekvent buller. Ska människor kunna trivas i sina bostäder i bullerutsatta miljöer med ett stort inslag av tung trafik krävs både att man bygger på rätt sätt, men ännu viktigare att man anpassar trafiken och fordonen efter byggnadsbeståndet och inte tillåter för mycket trafikbuller. Åtgärder vid källan är oftast mest kostnadseffektiva.

Våra beräkningar visar att det finns vissa stora nyttor med t.ex. elfordon när det kommer till buller som dagens modeller för samhällsekonomiska nyttoberäkningar inte tar direkt hänsyn till. Maximalnivåer inomhus är ett exempel där eldrift kan ge betydligt lägre bullernivåer som till exempel vid hållplatser eller korsningar. Beroende på vilken tid på dygnet som händelserna inträffar kan de också orsaka väckning och andra störningar för de boende. Dessa effekter tas inte direkt hänsyn till i ASEK eller i beräkningen av hälsoeffekter i DALYs från buller. Även om vissa effekter inkluderas indirekt i ASEK genom en hedonisk värdering av kostnaden, riskerar den samhällsekonomiska nyttan att underskattas i de situationerna. I underlaget till den senaste ASEK revideringen lyftes det fram att mer forskning behövs, t.ex. i områden där det finns bostäder nära vägen och där trafikflöden är relativt låga men där det finns ett stort inslag av tung trafik, i synnerhet nattetid.

Lösningen på bullerfrågan i städer måste tacklas från olika håll med en kombination av åtgärder som bidrar till en tystare ljudmiljö. Man behöver kombinera olika åtgärder såsom tystare motorer, tystare däck, tystare asfalt, lägre hastigheter, mindre trafikflöde, o.s.v. Varje åtgärd bidrar med någon eller några decibel till en tystare helhet. Åtgärder vid mottagaren såsom skärmar eller fönsteråtgärder inskränker också människors möjlighet att röra sig störningsfritt mellan olika miljöer både inomhus och utomhus. Åtgärder som dämpar buller vid källan bör därför prioriteras.

8 Sammanfattning

Här sammanfattar vi några av de viktigaste punkterna från studien.

- Tittar man bara på ekvivalentnivåer i modellerna visar inte beräkningarna någon stor skillnad mellan drivlinorna, förutom för dieselbussar. Skillnaderna blir dock mer tydliga om man tittar på exponering nattetid. Det finns därför risk för att de positiva effekterna som byte av drivlina innebär, förbises om man endast använder den dygnskvivalenta ljudnivån. Att dieselbussarna visar signifikant högre nivåer jämfört med exempelvis gas kan bero på att indata till beräkningsmodellen är framtagna på olika sätt för diesel respektive övriga busstyper.
- Vid start och stopp, t ex vid hållplatser och tomgångskörning syns nyttorna med elbussar mer tydligt vid ekvivalentberäkningen, men de synliggörs vanligen inte i dagens bullerberäkningsmodeller och modeller för samhällsekonomi som ligger till grund för åtgärdsbeslut och planering.
- Genom att visa tersbandsanalys får man en bättre och mer detaljerad förståelse för upplevelsen av bullret.
- Om man kompletterar A-vägd ekvivalentnivå med C-vägd maximal- eller ekvivalentnivå får man bättre förståelse för det lågfrekventa bullret. Skillnaden mellan dBC – dBA ger information om ljudet innehåller mycket lågfrekventa nivåer, vilket kan vara användbart vid bedömning om störning från lågfrekvent ljud trots att A-vägda nivåer inte orsakar störning.
- Bullernivåerna som uppmättes från gasbussen på provbana var lägre än förväntade vid konstant körning.
- Stora skillnader syns i inomhusnivåerna både beroende på fasadtyp och fönster, men också beroende på busstyp. Elbussar genererar signifikant mindre lågfrekvent buller vilket ger lägre inomhusnivåer, även i moderna fasader med god ljudisolering. Åtgärder vid källan är i regel mer kostnadseffektiva totalt sett och elbussar kräver mindre fasadåtgärder, speciellt avseende lågfrekvent buller.
- Det finns få studier som visar hälsoeffekter av lågfrekvent buller.
- Det finns idag inga vedertagna predikteringsmodeller för inomhusnivåer som tar hänsyn till lågfrekvent buller och rumsegenskaper – även om människor kan uppleva sig mycket störda.
- Nordisk beräkningsmodell behöver kunna kompletteras med data från nyare fordonstyper/modeller om den ska fortsätta användas i framtiden.
- Även om beräkningsmodellen Nord2000 hanterar maximalnivåer har det inte implementerats i bullerberäkningsprogram som exempelvis SoundPLAN. Detta begränsar användningsområdet.
- Den nya beräkningsmodellen Cnossos bör utvecklas för maximalnivåer för att kunna användas i Sverige. Den ska användas för bullerkartläggningar enligt END från 2019.
- Modellerna för samhällsekonomisk värdering och hälsoeffekter behöver utvecklas. (Lägre värderingar av fastigheter finns med i samhällsekonomiska värderingar, där buller ingår som en indirekt faktor. Störningstillfällen på natten till följd av lågfrekvent buller och påföljande hälsoeffekter syns ö.h.t. inte i värderingen.)
- I nyexploateringsområden med biltrafikvolym där kollektivtrafik dominerar kommer ljudnivåer från bussar utgöra en större andel av störningen än i ”vanliga” bostadsområden med mer biltrafik. Eldrivlina är en bra åtgärd för att planera bostadsnära, störningsfri kollektivtrafik. Fasader med hög ljudisolering t.ex. tung fasad, och fönster, ventiler och tätningar med hög ljudisolering är också viktigt.
- Tar man enbart hänsyn till A-vägda nivåer kan fasaddimensioneringen innebära att lågfrekvent buller inte dämpas utan blir ett framtida störningsproblem.

9 Framtida studier

Det är känt att lågfrekvent buller kan vara väldigt störande och att speciellt lätta fasader generellt är dåliga på att dämpa lågfrekvent buller. Det finns fortfarande för lite forskning kring lågfrekvent buller och dess påverkan på hälsan. Folkhälsomyndigheten tillsammans med Trafikverket kommer snart att publicera en rapport om lågfrekvent buller från vägar och spår som förhoppningsvis kan bidra till att man kommer fram något inom detta område. Med bättre kunskaper om lågfrekvent buller och dess effekter kunde våra resultat analyseras på ett bättre sätt.

Det behövs bättre sätt att kvantifiera effekten av lågfrekvent buller. De bullerberäkningar som görs inom Göteborg generellt och i denna studie i synnerhet skulle kunna användas i framtida studier för att utveckla bättre metoder för detta.

Resultaten i denna rapport baseras till stor del av mätningar på ett exemplar av varje busstyp. Indata till dieselbussen kommer från kategori 2 enligt Nord2000 mätningar som gjordes för Trafikverket 2015. En vanlig dieselbuss mättes inte samtidigt som de andra fordonen. Precis som det finns skillnader generellt mellan olika drivlinor och utrustning på olika bussmärken och modeller, finns det också skillnad mellan olika exemplar av samma modell. Bullerkällor på bussar i stadstrafik förutom motorn och däcken inkluderar luftkonditionering och ventilation, olika fläktar, avgasljud, otäta motorluckor och bristfälliga isoleringar⁵⁷. Vi drar slutsatserna i denna rapport baserad på att de skillnader som vi har mätt upp mellan de olika bussarna motsvarar skillnader i stort mellan busstyperna. Detta är inte helt korrekt. Det krävs därför att man mäter ett större antal av varje busstyp för att kunna säkerställa skillnader.

⁵⁷ Busshållplatser – kartläggningar av bullerstörningar i samband med start från busshållplats, samt rekommendationer till förändring av fordonsparken. En rapport av Skandiakonsult, 20021115 för SL.

Bilaga 1

ASEK 5.2 jämfört med ASEK 6.0

Bullerintervall	ASEK 5.2	ASEK 6.0	Skillnad (ASEK 6.0 – ASEK 5.2)
45 - 46	0	0	0
46 - 47	276	0	-276
47 - 48	560	0	-560
48 - 49	854	0	-854
49 - 50	1 157	0	-1 157
50 - 51	1 469	155	-1 314
51 - 52	1 798	483	-1 315
52 - 53	2 140	985	-1 155
53 - 54	2 629	1 660	-969
54 - 55	3 146	2 508	-638
55 - 56	3 694	3 529	-165
56 - 57	4 278	4 723	445
57 - 58	4 891	6 091	1 200
58 - 59	5 612	7 770	2 158
59 - 60	6 395	9 469	3 074
60 - 61	7 208	11 439	4 231
61 - 62	8 065	13 595	5 530
62 - 63	8 956	15 952	6 996
63 - 64	9 958	18 509	8 551
64 - 65	11 057	21 254	10 197
65 - 66	12 182	24 185	12 003
66 - 67	13 391	27 317	13 926
67 - 68	14 650	30 649	15 999
68 - 69	16 068	34 182	18 114
69 - 70	17 631	37 905	20 274
70 - 71	19 321	41 845	22 524
71 - 72	21 182	45 972	24 790
72 - 73	23 365	50 300	26 935
73 - 74	25 694	54 828	29 134
74 - 75	28 176	59 557	31 381
75 -	30 842	64 500	33 658

SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut

SP-koncernens vision är att vara en internationellt ledande innovationspartner. Våra 1 400 medarbetare, varav över hälften akademiker och cirka 380 med forskarutbildning, utgör en betydande kunskapsresurs. Vi utför årligen uppdrag åt fler än 10 000 kunder för att öka deras konkurrenskraft och bidra till hållbar utveckling. Uppdragen omfattar såväl tvärtekniska forsknings- och innovationsprojekt som marknadsnära insatser inom provning och certifiering. Våra sex affärsområden (IKT, Risk och Säkerhet, Energi, Transport, Samhällsbyggnad och Life Science) svarar mot samhällets och näringslivets behov och knyter samman koncernens tekniska enheter och dotterbolag. SP-koncernen omsätter ca 1,5 miljarder kronor och ägs av svenska staten via RISE Research Institutes of Sweden AB.



SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut

Box 857, 501 15 BORÅS

Telefon: 010-516 50 00, Telefax: 033-13 55 02

E-post: info@sp.se, Internet: www.sp.se

www.sp.se

Mer information om SP:s publikationer: www.sp.se/publ

SP Rapport 2016:89

ISBN 978-91-88349-77-4

ISSN 0284-5172

PART OF **RISE**