KUNSKAPSCENTRUM
OM
BULLER

Detta dokument har producerats inom Kunskapscentrum om Buller, ett kompetenscentrum som drivs av VTI på uppdrag av Naturvårdsverket, Trafikverket och Transportstyrelsen. Syftet med Kunskapscentrum om Buller är att stödja myndigheternas arbete vid tillämpning av plan- och bygglagen, miljöbalken och andra regelverk med avseende på buller genom att utveckla och vägleda om mät- och beräkningsmetoder för buller utomhus.

www.kunskapscentrumbuller.se

VÄSTRA GÖTALANDSREGIONEN
MILJÖMEDICINSKT CENTRUM

# Beräkning av maximal bullernivå med CNOSSOS-EU

Mikael Ögren, Anders Genell, Andreas Gustafson

28 januari 2021

Sahlgrenska Universitetssjukhuset
Arbets- och miljömedicin
Västra Götalandsregionens Miljömedicinska Centrum (VMC)
ADRESS Box 414, 405 30 Göteborg BESÖK Medicinaregatan 16
TELEFON 072-203 30 13 E-POST mikael.ogren@amm.gu.se
HEMSIDA www.amm.se

# Förord

Denna rapport är ett underlag till arbetet inom "Kunskapscentrum om buller", Sveriges nationella samordningsgrupp för bullerberäkningar. Arbetet leds av Statens Väg- och transportforskningsinstitut (VTI), och denna rapport har finansierats av medel från Kunskapscentrum och Västra Götalandsregionens Miljömedicinska Centrum.

Göteborg 28 januari 2021
Arbets- och miljömedicin
Mikael Ögren

# Innehåll

**1 Maximal ljudtrycksnivå** **4**

**2 Beräkning av maximal nivå och spridning mellan fordon** **6**

**3 Maximal nivå i Cnossos-EU** **9**
3.1 Vägtrafik . . . . . 10
3.2 Spårtrafik . . . . . 13

**4 Förslag till beräkningsgång för Cnossos-EU** **17**

**A Tidsvägning och frekvensvägning** **20**

# Sammanfattning

När man beräknar buller från väg-, spår- och flygtrafik i Sverige så har man sedan lång tid tillbaka tagit fram två mått, den ekvivalenta och den maximala nivån. Den ekvivalenta ljudtrycksnivån är ett mått på den totala trafiken och är ett slags medelvärde, medan den maximala ljudtrycksnivån är ett mått på den högsta nivån som uppstår. Det är relativt enkelt att definiera vad den ekvivalenta nivån är, och det finns inte olika definitioner eller konkurrerande beskrivningar från olika aktörer. För maximalnivån är det dock mera komplext, exempelvis definieras ofta maximalnivån från vägtrafik som den maximala nivån som man beräknar om trafiken passerar ett fordon i taget med konstant hastighet och med tom väg i övrigt. För mätning av maximal nivå krävs viss manuell hantering av mätdata, speciellt på platser med hög trafik. Samma frågeställning är inte så viktig för tåg- och flygtrafik, eftersom det är ovanligt med möten eller samtidiga passager.

För strategiska kartläggningar skall den nya EU-gemensamma beräkningsmetoden Cnossos-EU användas från och med 2022 års kartläggning. Denna beräkningsmetod kan endast beräkna ekvivalenta mått och har inga indata eller metodbeskrivningar för beräkningar av maximal nivå. I denna rapport redovisas genom ett antal beräkningsexempel för väg- och spårtrafik hur man utgående från Cnossos-EU ändå kan beräkna den maximala nivån om man lägger till indata och modifierar beräkningsmetodiken. Utmaningarna är i första hand att få tag i bra data på hur den akustiska källstyrkan varierar mellan olika källor, exempelvis mellan lastbilar i trafik eller mellan de många axlarna på ett godståg, och att få rimliga beräkningstider eftersom en beräkning av maxnivån kan vara tidskrävande, i första hand för spårtrafik.

Många mätmetoder och standarder som används för att samla in källdata för spår- och vägtrafik är inriktade på att ta fram medelfordonets källdata med god noggrannhet, men tar inte fram något mått på hur källdata sprider mellan olika individer. Därför krävs nya insatser, eller att man faller tillbaka på gamla mätserier, för att få indata användbara för max-beräkningar. För tidsåtgången vid beräkning är det en begränsad ökning så länge man kan betrakta varje fordon som en punktkälla, vilket är rimligt för vägtrafik. För tågtrafik, där varje fordon består av många delkällor, är det en större ökning av beräkningsbördan, särskilt för Cnossos-EU som har en källmodell med högre komplexitet.

Ytterligare en utmaning är att förmå programvaruutvecklare att införa särskilda svenska förändringar i programvaror avsedda att användas för bullerberäkningar i hela Europa eller till och med globalt utifrån Cnossos-EU. Men redan idag så finns många nationella anpassningar och metoder i de beräkningsprogram som är etablerade på den svenska marknaden, och troligtvis kommer dessa utvecklare att fortsätta göra de förändringar och uppdateringar som är nödvändiga för att uppfylla svenska myndighetskrav, för att behålla sina svenska kunder. Men naturligtvis är incitamentet mindre för mjukvaruutvecklare att införa nya metoder och anpassningar om marknaden är mindre.

# 1 Maximal ljudtrycksnivå

Den maximala ljudtrycksnivån kan tyckas vara en enkel sak att definiera, helt enkelt den högsta ljudnivå som uppstår under en viss tid. Men även denna enkla definition kan vara svår att tolka i många fall. För det första måste man bestämma sig för hur snabbt ljudnivåmätaren reagerar på en förändring i ljudnivån, men det är mer eller mindre alla nyare källor överens om att för väg- och tågtrafik bör man använda tidsvägning FAST, som är en exponentiell tidsvägning med tidskonstant 0,125 s. För flygbuller rekommenderas i vissa fall SLOW, motsvarande 1,0 s. Se Appendix A för ett exempel som illustrerar tids- och frekvensvägning.

För det andra måste man fundera på vad som menas med "under en viss tid". För en mätning kan det verka självklart att man avser mättiden, men den måste ju då anges i standarder eller myndighetsråd så att mätningar på olika platser behandlas lika. Mäter man för kort tid så riskerar man att underskatta nivån, och mäter man lång tid så ökar risken att man får med icke representativa händelser av olika slag. I beräkningsmetoder finns dessutom ingen tid i betydelsen att ljudvågorna beskrivs som tryckvariationer över tid. I vissa metoder utgår man ifrån att prediktera ljudnivån i ett statiskt typfall, som till exempel den Nordiska metoden för vägtrafik från 1996 [1], i andra metoder vill man prediktera medelvärdet över ett år inklusive variationer i trafik, temperatur och vind, som i Cnossos-EU [2].

Det är också viktigt att ta hänsyn till de statistiska egenskaperna för olika typer av mått på den maximala nivån. Betrakta en mätning på en plats under en vecka, och låt oss anta att inga andra ljud finns på platsen än de vi vill mäta. För att beräkna den ekvivalenta nivån använder vi då hela mättiden för att bilda resultatet. För en naiv tolkning av maximal nivå så använder vi endast ca 0,125 s av en hel veckas mätningar, de 0,125 s som ger den starkaste nivån. Alla andra variationer under mättiden blir irrelevanta, och bidrar inte till att bilda resultatet. Mätningar av denna typ får också egenskapen att ju längre mättid, desto högre blir den maximala nivån, även utan ovidkommande störningar av mätsignalen. Mätresultatet är helt enkelt ett slags rekord i ljudnivå. Repeterbarheten av denna typ av mätningar blir mycket dålig, dvs en upprepad mätning kan ge mycket stor skillnad i resultat.

Ett vanligt sätt att hantera bristerna med rekordmåttet är att bilda någon form av statistiskt mått på den maximala nivån, exempelvis den nivå som överskrids 5% av tiden, eller överskrids av 5% av fordonspassagerna. Om vi antar en viss statistisk fördelning av bullernivåer så kan vi då beräkna medelvärdet av den maximala nivån tillsammans med standardavvikelsen, som ett mått på spridningen, utifrån hela mätserien. Dessa båda parametrar kan sedan användas för att förutsäga 95 percentilen, och måttet blir mycket mer repeterbart än rekordnivån.

En annan problematik är hur man ser på händelser där många fordon är hörbara samtidigt. För beräkningar är det bekvämt att anta att fordonen passerar en och en, som till exempel i följande rapport från 2006:

> Traditionally, in the Nordic countries, the maximum level is the maximum level from a single vehicle, and not from a combination of vehicles. [3]

För mätmetoder är detta dock en problematisk definition. Då måste man på något sätt exkludera alla mätresultat som fås när många fordon är hörbara och bara inkludera enskilda passager. Är trafiken hög kan det vara tidskrävande att mäta fordonen ensamma. Därför definierar man inte maxnivån på samma sätt i alla mätmetoder. Ett exempel är hur man gör i följande metod från NordTest där man betraktar passager av grupper av fordon som en särskild klass av händelser:

> The maximum sound pressure level during the pass-by of an individual vehicle or a group of vehicles, determined with time weighting F … [4]

Med andra ord kan man inte på ett enkelt sätt jämföra en beräknad maximal nivå med en uppmätt, något som noterades redan vid riksdagens bullerutredning 1993 [5]. Om mätningen utgår från NordTestmetoden [4] så kan man få ett mätvärde som bättre överensstämmer med beräknade värden, men det kräver manuell hantering av mätdata som måste klassas i olika typer av fordon och man måste dessutom avgöra ifall varje ljudtopp var en enstaka passage eller om den var samtidig med andra fordon. När trafiken ökar så ökar risken för svårtolkade mätresultat, men samtidigt så minskar betydelsen av den maximala nivån och den ekvivalenta nivån blir den begränsande gentemot riktvärden. Utmaningen med samtidiga passager gäller i första hand för vägtrafik, för tåg- och flygtrafik är problemet mindre, eftersom det är ovanligare med samtidiga passager.

Vad säger då de officiella styrande dokumenten om den maximala nivån? I trafikbullerförordningen definierar man maximal ljudtrycksnivå på följande vis:

> ... maximal ljudnivå: en ljudnivå för spårtrafik och vägtrafik av den mest bullrande fordonstypen med tidsvägning F,[6]

, dvs man utgår från "den mest bullrande fordonstypen", vilket indikerar att man troligen avser enskilda passager. I Trafikverkets dokument uttrycker man sig lite annorlunda:

> Den högsta ljudnivån i samband med en enskild bullerhändelse under en viss tidsperiod. Ljudtrycksnivån är A-vägd och med tidsvägning F, Fast (0,125 sekund). [7]

man utgår alltså från "enskild bullerhändelse", som tyder på att man ser det som enskilda passager. Liknande definitioner finns i dokument från Naturvårdsveket [8] och Boverket [9].

Som tidigare nämnts så är det en dålig idé att utgå ifrån den absolut högsta nivån, rekordnivån. Därför har flera av dokumenten ovan en diskussion om hur man skall hantera nivåer som överskrider en viss gräns. Till exempel anger Trafikverket följande:

> Om ljudnivån överskrids bör den inte överskridas med mer än 10 dBA fem gånger per timme dag- och kvällstid (06-22) [7][1]

En liknande skrivning finns i Boverkets byggregler:

> Avser dimensionerande maximal ljudnivå som kan antas förekomma mer än tillfälligt under en medelnatt. Med natt menas perioden kl. 22:00 till kl. 06:00. Dimensioneringen ska göras för de mest bullrande vägfordons-, tåg- och flygplanstyper, samt övrigt yttre ljud, exempelvis från verksamheter eller höga röster och skrik, så att angivet värde inte överstigs oftare än fem gånger per natt och aldrig med mer än 10 dB. [9]

Med andra ord så definieras den maximala nivån genom att, för enstaka fordonspassager, så överskrids den inte mer än ett visst antal gånger under en viss tid. Återigen är detta en definition som lämpar sig för beräkningar, där man kan räkna som om hela trafiken består av enskilda fordonspassager, men inte för mätningar där det ju förekommer både enskilda och samtidiga passager.

Ett sätt att tolka skrivningarna om att nivån inte får överskridas med mer är 10 dB är att grupper av samtidigt hörbara fordon inte får överskrida den maximala nivån med mer än 10 dB. För beräkningar används dock inte denna del av definitionen i praktiken, då skulle man behöva ta ställning till hur man statistisk beräknar en nivå som "aldrig" får förekomma eller "inte bör" överskridas.

[1] Dokumentet är under revision, ny version väntas i början på 2021.

# 2 Beräkning av maximal nivå och spridning mellan fordon

Beräkning av maximal nivå beskrivs i beräkningsmetoderna själva [1, 10, 11]. Men informationen i dessa räcker inte för att helt specificera hur man skall gå tillväga. Sedan 2008 finns dock en bra och entydig beskrivning i följande rapport från Boverket [12, Bilaga D].

Om man definierar den maximala nivån som den högsta nivån vid enskilda passager av den bullrigaste fordonstypen, och antar att alla passager sker enskilt, så kan man beräkna den statistiska nivån som i medeltal överskrids av $n$ passager utifrån medelvärdet av maximal nivå av enstaka passager $\overline{L_{\mathrm{AFmax}}}$ och standardavvikelsen $s$ enligt

$$L_{\mathrm{AFmax,n}} = \overline{L_{\mathrm{AFmax}}} - s \cdot \Phi^{-1}(n/N), \tag{1}$$

där $N$ är totala antalet passager av den bullrigaste fordonstypen och $\Phi^{-1}$ är inversen av den kumulativa fördelningsfunktionen för normalfördelningen, eller probitfunktionen. Probitfunktionen kan beräknas på olika sätt, många mjukvaror har en inbyggd funktion för detta. Som alternativ kan man använda polynomapproximationen från [12, Bilaga D].

Vad händer då om trafiken är så låg att det inte passerar $n$ fordon, vad blir då nivån som i medeltal överskrids av $n$ passager? För att hantera detta så tar man medelvärdet okorrigerat för låg trafik, eller uttryckt på ett annorlunda sätt; man tillåter inte en negativ korrektion. Ett praktiskt sätt att hantera detta är att beräkningsmässigt alltid ha minst $2n$ passager, dvs alltid välja $N \geq 2n$ i ekvation (1). För $N = 2n$ blir korrektionen noll eftersom $Phi^{-1}(1/2) = 0$.

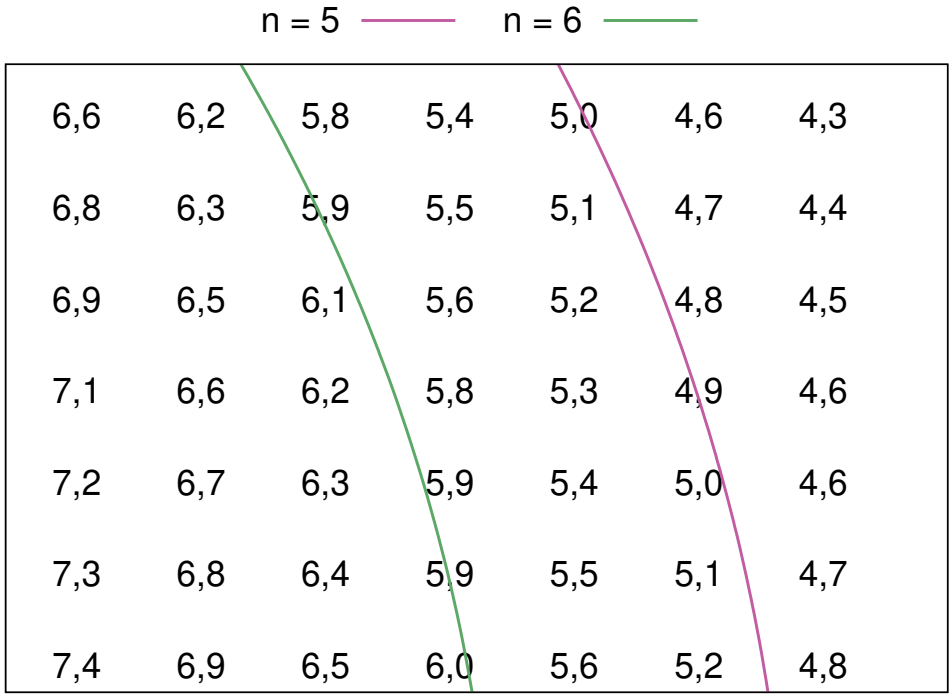
Frågan är om man skall ha fem eller sex fordonspassager som riktlinje i ekvation (1). I Boverkets rapport säger man $n = 5$ [12], men i efterhand har detta ändrats till $n = 6$ [2]. Då har man resonerat som så att eftersom riktlinjerna tillåter fem överskridanden, bör den sjätte bullrigaste händelsen klara riktvärdet, och man väljer $n = 6$. I båda fallen förekommer det perioder i verkliga situationer där om man mäter under en period, så kommer det slumpmässigt ibland att ske fler överskridanden, men som medelvärde över många mätperioder kommer resultatet representera den femte bullrigaste händelsen om man väljer $n = 5$ och den sjätte bullrigaste händelsen om man väljer $n = 6$.

Ett annat sätt att illustrera skillnaden mellan $n = 5$ och $n = 6$ är att tänka på hur maximal nivå ofta illustreras på kartor, som en konturlinje. I Figur 1 visar två konturlinjer för ett hypotetiskt scenario med källan till vänster om kartan, en beräknad för $n = 5$ och en för $n = 6$ för en viss maximal nivå. Siffrorna i figuren kan tolkas på två sätt. Antingen kan man se det som att siffrorna visar medelvärdet av antal överskridanden om upprepade mätningar genomförs i ett rutmönster, eller som ett beräknat $n$ i ekvation 1. För en enskild mätning är alltid antalet överskridanden ett heltal, men som medelvärde över många mätningar så blir det ett decimaltal som i figuren. Denna effekt finns inte i beräkningarna, som i teorin skall motsvara oändligt många mätningar.

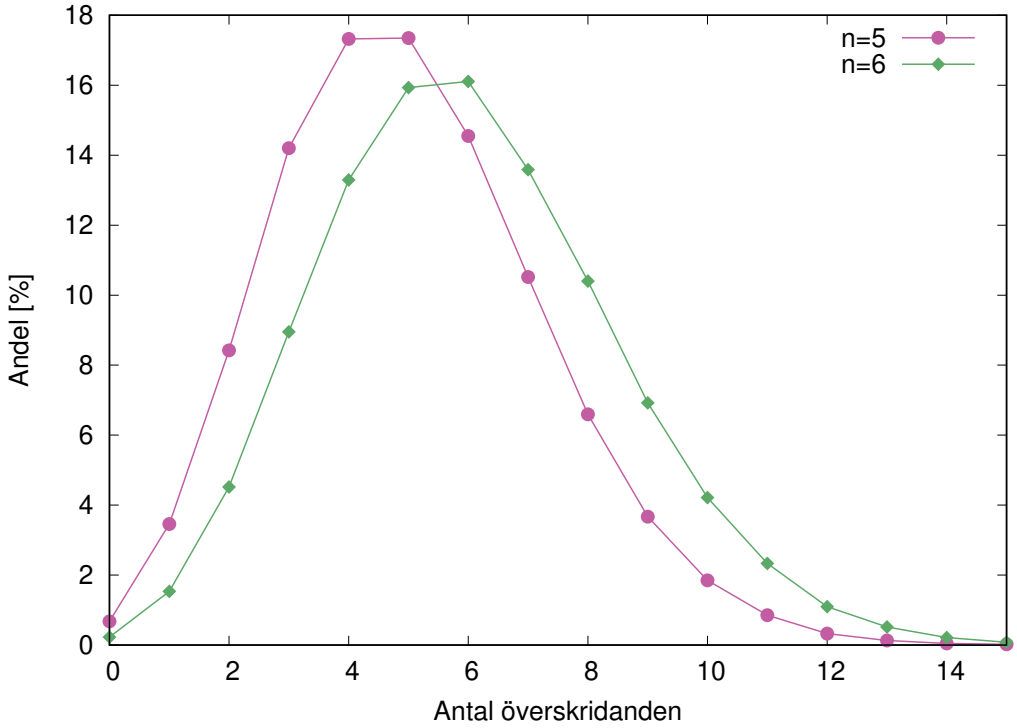
Om man antar att alla passager sker enskilt och att den maximala nivån vid passagerna är normalfördelad med varians 4,1 dB (tunga fordon vid 50 km/h [1]) och trafiken i sig är Poissonfördelad så kommer antal överskridanden under en mätning fördela sig som i Figur 2. Notera att denna fördelning inte påverkas av trafikflöde, utan endast beror på $n$.

Hur stor blir då skillnaden i beräknad maxnivå om man använder fem eller sex i ekvation (1)? Korrektionen beror av total trafik och av standardavvikelsen, som i sin tur beror av fordonstyp och hastighet. För tung trafik beräknat enligt den Nordiska metoden [1] och under antagande om normalfördelad maxnivå och poissonfördelad trafik så blir skillnaden störst för låga trafikflöden och låga hastigheter, som mest 0,9 dB, se Figur 3. För väldigt låg trafik blir korrektionen begränsad till noll i båda fallen och det blir ingen skillnad.

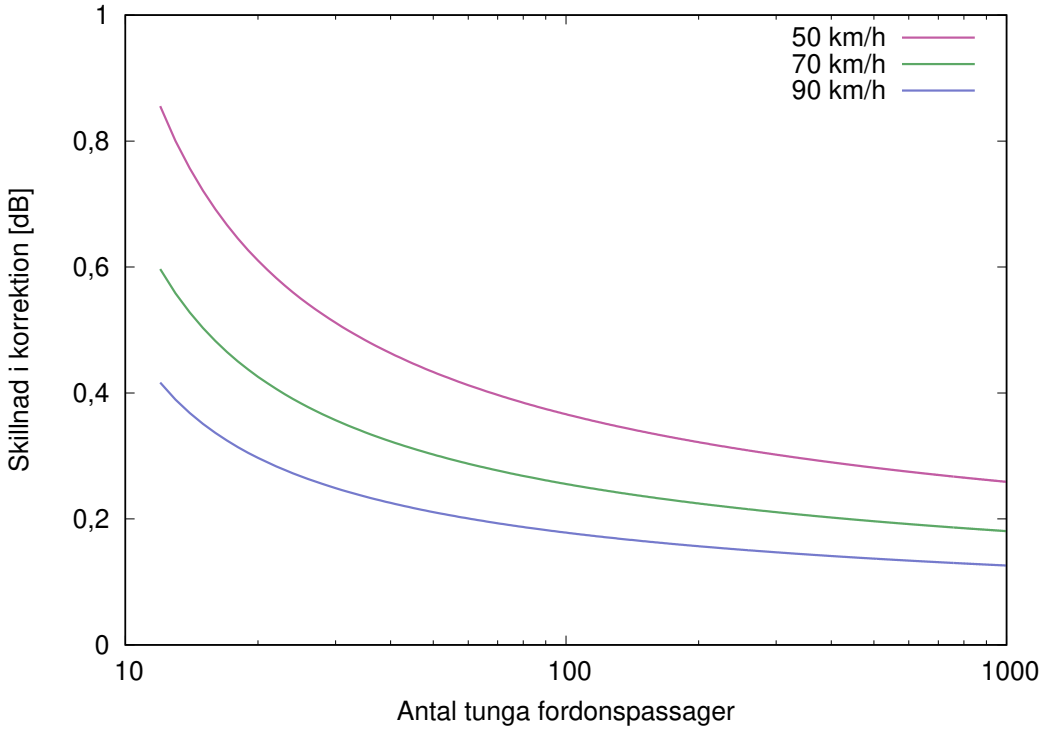
[2] Formlerna för [12] togs fram av Hans Jonasson, som har bekräftat via personlig kommunikation att det blev fel då rapporten skrevs och korrekt är $n = 6$.




*Figur 1: Illustration av karta med konturlinjer som är beräknade för $n$=5 eller $n$=6 överskridanden. Källan är utanför bilden till vänster, och siffrorna anger medelvärdet av antal överskridanden vid upprepade mätningar på respektive plats.*




*Figur 2: Histogram över andel av mätperioder som ger visst antal överskridanden där maximal nivå beräknats med $n$=5 eller $n$=6.*




*Figur 3: Skillnad i beräknad maximal nivå beroende på trafik och hastighet för $n$=5 och $n$=6 i (1).*

Notera att medelvärdet av den maximala nivån $\overline{L_{\mathrm{AFmax}}}$ är det aritmetiska medelvärdet av maximal ljudtrycksnivå under isolerade passager. Om värdet istället anges som energimedelvärde $L_{\mathrm{EM}}$ kan man beräkna det aritmetiska medelvärdet med en korrektionsfaktor som beror av standardavvikelsen $s$ enligt

$$\overline{L_{\mathrm{AFmax}}} = L_{\mathrm{EM}} - 0,05 \cdot \ln(10) \cdot s^2. \tag{2}$$

För spårtrafik brukar man inte använda någon korrektion för trafikflöde, utan man beräknar det aritmetiska medelvärdet av den maximala nivån $\overline{L_{\mathrm{AFmax}}}$ för den aktuella tågtypen. För höga trafikflöden innebär det en underskattning av den maximala nivån, men det är ovanligt med så höga trafikflöden per tågtyp att en korrektion i samma anda som (1) skulle ge något större bidrag. Det är också svårt att beräkna vilken standardavvikelse som skall användas i formeln eftersom det är många källor på varje tåg som bidrar till den maximala nivån. Därför skulle standardavvikelsen vara olika för olika avstånd och även påverkas av skärmning osv.

# 3 Maximal nivå i Cnossos-EU

Beräkningsmetoden Cnossos-EU [2] har tagits fram av EU-kommissionen som en gemensam beräkningsmodell för Europa. Tanken är att införandet av Cnossos-EU skall medföra att beräkningar på olika platser inom EU skall vara mer jämförbara. Utbredningsmetoden är gemensam för tågtrafik, vägtrafik och industribuller, men källmodellerna är väldigt olika. Cnossos-EU kan i grundutförandet inte beräkna den maximala nivån, och innehåller inga källdata som beskriver spridningen i källstyrka mellan olika fordon eller mellan olika delkällor inom ett och samma fordon för vägtrafik. För spårtrafik finns en mer detaljerad beskrivning av källorna som i viss mån kan användas för att avgöra skillnader mellan olika delkällor, men det är inte tillräckligt för att kunna beräkna en maximal nivå i grundutförandet.

Genom att ta hjälp av andra beräkningsmetoders data på spridning i källstyrka kan man dock använda utbredningsmodellen från Cnossos-EU för att beräkna maximal nivå på olika sätt. För att kunna dra slutsatser kring hur man skulle kunna gå tillväga med Cnossos-EU för att beräkna maximal nivå från väg- och spårtrafik, utgår vi från ett enkelt fall där varje källstyrka beskrivas av följande ekvation:

$$L_W = L_{WC} + \sigma^2 \, w, \tag{3}$$

där $L_W$ är ljudeffektnivån angiven i dB per meter för en enskild fordonspassage, $L_{WC}$ är ljudeffektnivån angiven i Cnossos-EU i aktuellt driftsfall (hastighet, vägbeläggning osv), $\sigma^2$ är variansen uttryckt i dB hämtad från respektive Nordisk metod och $w$ en normalfördelad stokastisk variabel med väntevärde noll och varians ett.

Det finns dock ett fundamentalt problem inbyggt när man utgår från en beräkningsmetod avsedd för att ta fram den ekvivalenta nivån till att försöka beräkna den maximala; hur reflektioner hanteras. Gemensamt för nästan alla metoder som används för att räkna på trafikbuller är att de hanterar reflektioner som bidrag energimässigt, men inte i termer av tid. Man beräknar hur mycket effekt som reflekteras i till exempel en byggnads fasad och når mottagaren, och summerar det till den effekt som når samma mottagare via andra vägar (så kallade ljudstrålar), men man tar inte hänsyn till när reflexen anländer. Med målet att förutsäga den maximala nivån med tidsvägning F, så är ju en ungefärlig tidsupplösning 125 ms, vilket motsvarar ca 40 m vid normalt tryck och temperatur. Så om en ljudstråle tar en omväg på 40 m så läggs alltså effekten ihop vid en normal beräkning, men den bidrar egentligen i mindre utsträckning till att öka den maximala nivån. I praktiken har dock detta ganska liten betydelse, eftersom ljudstrålar till mottagare nära källan som har väsentligt längre gångväg också oftast har ett ganska litet bidrag på grund av avståndsdämpning, markeffekt, reflektionsförluster och/eller diffraktion.

För den viktigaste reflektionen, den så kallade markreflexen, så tar dock vissa metoder hänsyn till tiden, eller mer exakt uttryckt fasskillnaden mellan direktljudet och fasreflexen. Exempel på detta är Nord2000 [11, 13], Nordisk metod för vägtrafik [1] och Nordisk metod för spårtrafik [10]. Det gör dock inte Cnossos-EU [2], varför det kan bli skillnader på upp till 3 dB mellan Cnossos-EU och de övriga metoderna för korta avstånd och källor som domineras av låga frekvenser.

En annan utmaning med att införa en beräkning av den maximala nivån för beräkningar i Sverige med Cnossos-EU är att de aktuella standardiserade mätmetoder som används helt eller delvis för att få indata till Cnossos-EU, SS ISO 118 19 [14] och EN ISO 3095 [15], inte tar fram några data på hur variationen i fordonsflottan ser ut (standardavvikelsen i (1)). Så antingen måste mätningar i Sverige göras med tillägg utöver dessa standarder, eller så måste gamla data som besriver standardavvikelsen insamlade för de äldre nordiska metoderna användas tillsammans med de nyare inmätningarna.

## 3.1 Vägtrafik

För vägtrafik antar vi att varje fordon kan beskrivas som en punktkälla som rör sig, vilket är en förenkling. Om avståndet till mottagaren är längre än längden på fordonet så stämmer förenklingen med rimlig noggrannhet, vilket är fallet för lätta fordon men inte alltid för tunga. Egentligen borde man behandla tunga fordon på samma sätt som fordon på järnväg; med flera delkällor utmed fordonets längd för korta avstånd, något som också noteras i den senaste rapporten med mätdata från svenska vägfordon [16]. En möjlig lösning vore att ta fram avståndsberoende korrektionsfaktorer för de tunga fordonsklasserna utifrån mätningar. I detta kapitel betraktar vi dock även tunga fordon som punktkällor på samma sätt som man gör i den Nordiska beräkningsmetoden [1].

En stor fördel med denna förenkling är att det blir förhållandevis effektivt att beräkna maximal nivå. Typiskt gör beräkningsprogrammen om linjesegmenten som representerar vägar på kartan till kedjor av punktkällor, där varje punktkälla representerar ett visst segment av vägen. För en viss mottagarpunkt beräknas därefter utbredningsdämpningen från varje punktkälla, och bidragen summeras till en total ljudtrycksnivå. Men istället för att summera bidragen kan man då i samma beräkningsmoment spara det starkaste bidraget, och på så sätt beräkna utbredningsdämpningen för den maximala nivån. Då återstår endast att ta hänsyn till källans variation i ljudeffektnivå via standardavvikelsen, så kan den maximala nivån beräknas. Tyvärr är det inte lika enkelt om man inte kan anta att källan kan beskrivas av en enda punktkälla, vilket diskuteras under spårtrafik nedan.

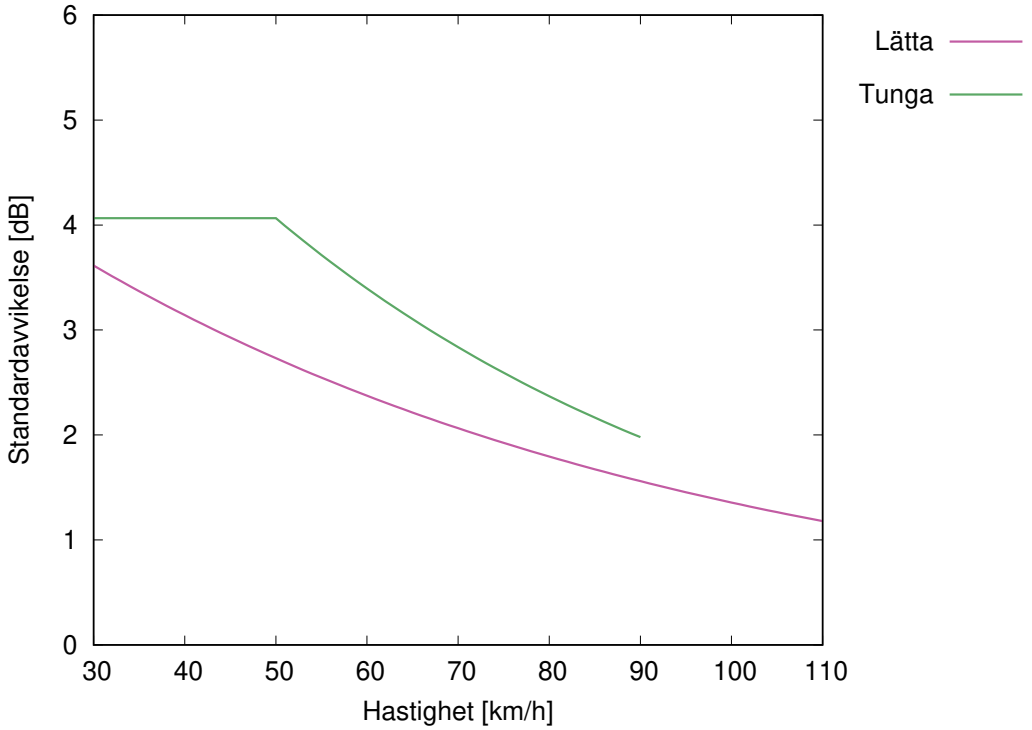
För beräkningarna har vi utgått från ett typscenario med en dubbelriktad väg med en mottagarposition på 50 m avstånd från vägens mitt och plan mark däremellan. Övriga parametrar för beräkningen redovisas i Tabell 1. Trafiken simulerades under en timme med poissonfördelad trafik och normalfördelad ljudeffekt enligt (3). För sex olika trafikflöden mellan 20 och 1000 fordon per timma simulerades sedan ljudtrycksnivån under en timma 2000 gånger, dvs totalt 12 000 beräkningar. Slutligen filtrerades ljudtrycksnivån för att få fram den maximala nivån med tidsvägning FAST ($L_{\mathrm{AFmax}}$).

*Tabell 1: Beräkningsparametrar för simulering av maxnivå från vägtrafik.*

| Parameter | Värde |
|---|---|
| Marktyp | D |
| Mottagarhöjd | 2 m |
| Vägbredd | 13 m |
| Andel tunga klass 2 | 4 % |
| Andel tunga klass 3 | 4 % |
| Avstånd till vägmitt | 50 m |
| Hastighet | 50 km/h |

Eftersom Cnossos-EU inte innehåller någon beskrivning av hur mycket bullernivån sprider mellan olika fordon tog vi standardavvikelsen ifrån den Nordiska metoden [1] (som också används i Nord2000), se Figur 4. Tunga fordon av klass 2 och 3 i Cnossos-EU antogs ha samma standardavvikelse som tunga fordon i den Nordiska metoden. Det vore dock önskvärt att ta fram nya mått på spridningen för de olika klasserna, i en rapport från 2011 noterades att spridningen för tunga fordon verkade ha minskat jämfört med mätdata från 90-talet [3], tyvärr presenterades inga nya data i samband med detta.

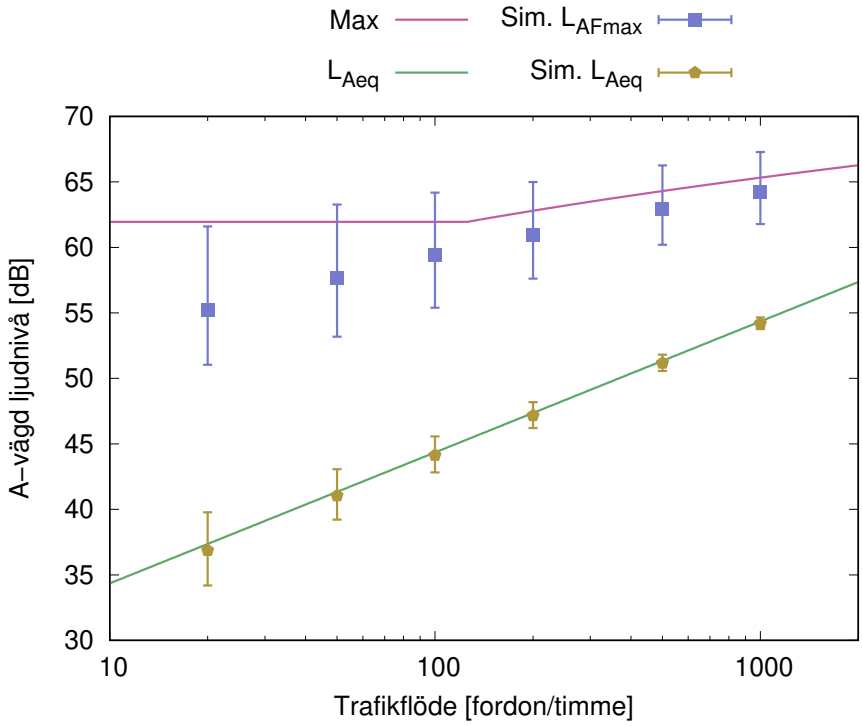
Resultatet av beräkningarna redovisas i Figur 5. I heldragen linje visas en traditionell beräkning av den ekvivalenta nivån och den maximala för $n = 6$ i ekvation (1). Under en trafik på 150 fordon så är maxberäkningen konstant, vilket förklaras av att då blir trafiken för de bullrigaste



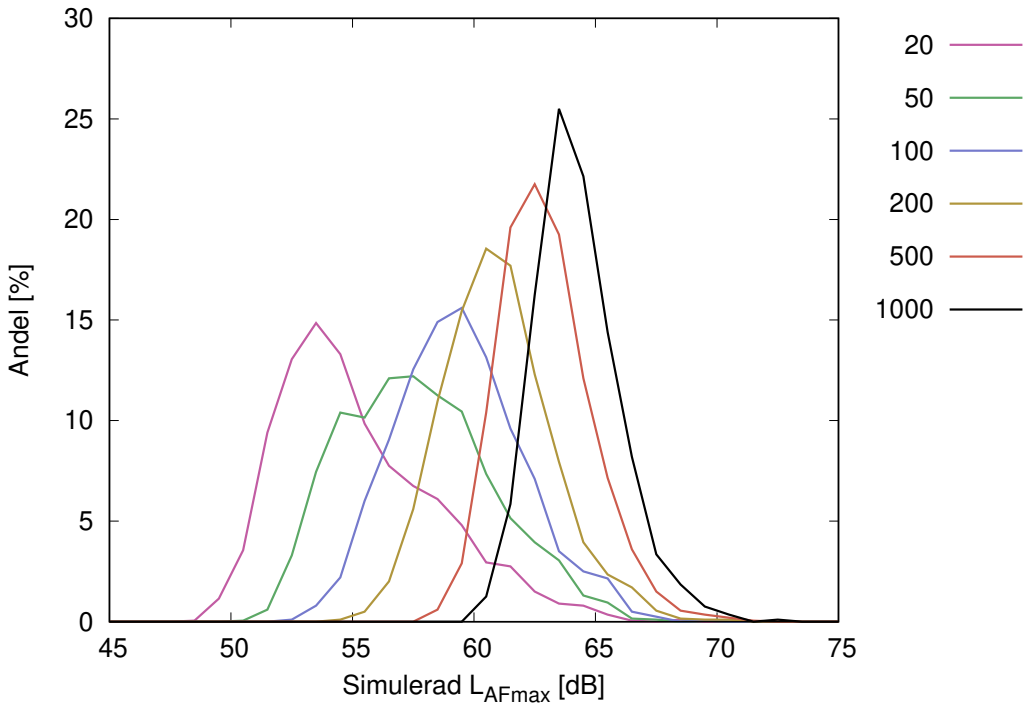

*Figur 4: Standardavvikelse för maximal ljudnivå för tunga och lätta fordon enligt den Nordiska beräkningsmetoden för vägtrafik [1].*

fordonen (klass 2 och 3) precis lika med 12 per timme (8 % av 150), och då blir korrektionstermen negativ och skall inte tas med. De simulerade beräkningarna redovisas som punkter vid medelvärdet och med staplar som indikerar spridningen, i detta fallet 5 till 95 percentilen, dvs 90% av beräknade värden finns inom staplarna. Spridningen redovisas mer detaljerat i histogrammen i Figur 6. Notera att detta är spridningen för den simulerade maximala ljudnivå som uppstår under en timma. Skulle man använda någon form av korrigering, exempelvis genom att använda mätstandarden [4], så skulle spridningen minska något, men det skulle kräva en manuell hantering av alla beräkningar för att dela upp dem i enskilda och samtidiga passager, och för majoriteten av simuleringarna för de lägre trafikflödena skulle inte villkoren i standarden vara uppfyllda eftersom antalet tunga fordon skulle vara för litet.

Spridningen avtar med ökad trafik för den ekvivalenta nivån, men det är inte alls samma utveckling för den maximala nivån. Ju högre trafiken blir, desto mer ökar sannolikheten för att ett ovanligt bullrigt fordon skall passera, eller att två ganska bullriga fordon passerar samtidigt (möte) eller följer varandra så nära att de båda bidrar till maxnivån. Men ibland uppstår inga sådana situationer. Till och med så hög timtrafik som 1000 fordon ger fortfarande en rejäl spridning. För högre trafikflöde så närmar sig medelvärdet av den simulerade maximala nivån den beräknade enligt (1).




*Figur 5: Beräkningsresultat för maximal och ekvivalent nivå från vägtrafik under en timma med hjälp av Cnossos-EU. Heldragna linjer är beräkning för stationära förhållanden och staplarna indikerar spridningen (90% täckningsgrad) för 2000 simuleringar.*




*Figur 6: Histogram över simuleringssresultat för maximal nivå från vägtrafik under en timma med hjälp av Cnossos-EU. Histogrammen visar spridningen i maximal nivå för 2000 simuleringar. Linjefärg indikerar totalt trafikflöde per timma.*

## 3.2 Spårtrafik

För tåg så kan man inte anta att de uppträder som punktkällor. De längsta godstågen är mer än 600 m långa, och det är inte ovanligt med bostäder och andra byggnader betydligt närmare järnvägen än så. Även spårvagnar och tunnelbanetåg är i de flesta fall mycket längre än lastbilar. I ett enkelt fall som ett rakt spår, plan mark och en mottagare en bit bort så kan man tycka att den maximala nivån borde uppstå då tågets mittpunkt är mitt framför mottagaren. Men i verkligheten, och vid typiska beräkningar, så är det inte fallet. Den utstrålade ljudeffekten varierar utmed tåget, och utbredningsförhållandena varierar utmed spåret. Om det är en skärm eller kulle mellan spåret och mottagaren så kan maxnivån uppstå när tåget är en bit innan eller efter hindret, eller när det är delvis skärmat. I det generella fallet måste man alltså flytta tåget stegvis utmed spåret tills man hittar den position som ger maximal nivå.

Att söka efter den position som ger maximal nivå tar tid, men är inget större problem för en mindre beräkning, exempelvis en beräkning som omfattar i storleksordningen ett kvarter, ett vanligt scenario för beräkningar i bygglovsärenden. Men för beräkningar över stora områden, hela län eller hela landet, så blir detta mer krävande i termer av beräkningsresurser.

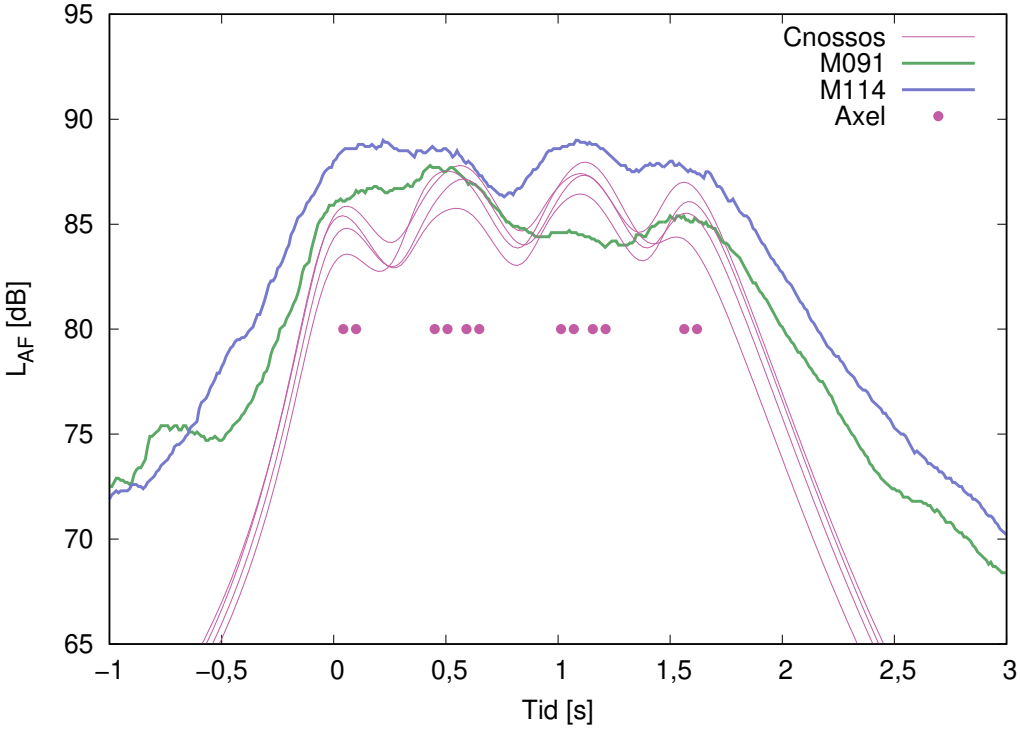
För vägtrafik kan man betrakta fordonsflottan som individer i förhållande till hur mycket de bullrar, och genom att ha ett mått på hur mycket det sprider mellan olika individer så kan vi beräkna den maximala nivån enligt (1). För tågbuller fungerar i praktiken inte detta synsätt på grund av de många oberoende spridningarna som måste mätas på något vis. Spridningen finns i flera oberoende nivåer. Om vi förenklat antar att det bara är hjulen som strålar ut ljud så är det en spridning som kan beskrivas av en varians mellan hjulaxlarna på ett fordon. Exempelvis kan en axel ha nysvarvade och släta hjul medan en annan har lite mer slitna och ojämna. Men det skiljer också mellan fordonen, vilket måste beskrivas av en annan varians. Exempelvis kan ett fordon vara helt nytt från fabrik medan ett annat fordon har gått några år på spåret har olika status på hjulen. Slutligen skiljer också andra parametrar för olika fordonstyper på spåret, viktigast är hastighet och fordonslängd. En sträcka kan trafikeras både av 165 m långa persontåg i 200 km/h och 600 m långa godståg som framförs i 80 km/h. Det kan till och med vara så att maxnivån bestäms av det korta snabba tåget nära spåret, och av det långa långsamma tåget på större avstånd.

För den Nordiska metoden reviderad 1996 [10] så beräknas maxnivån utifrån samma parametrar som används för att ta fram det ekvivalenta bidraget, men med en viss justering som inte är helt enkel att inse hur den är konstruerad. För Cnossos-EU vore det bättre att utgå ifrån Nord2000 [13], där det finns en procedur för att beräkna maxnivån baserad på mätdata från 1994 [17]. Det antyds dock att detta är en tillfällig lösning som bör förbättras i framtiden, något som inte har skett för svenska förhållanden sedan Nord2000 publicerades 2001. I Danmark har dock en reviderad version av beräkningsmetoden för maximal nivå med Nord2000 publicerats [18]. Revisionen berör främst hur man skall hantera när fordonet passerar växlar eller andra korta sträckor med avvikande egenskaper.

Proceduren för Nord2000 fördelar ljudeffekten över 7 punktkällor placerade utmed tågets längd, eller en justerad längd för mottagare nära spåret. Dessa punktkällor flyttas sedan stegvis utmed spåret tills den position som ger högst nivå när ljudeffekten från alla sju källor summeras vid mottagaren hittas. Slutligen görs en empirisk korrektion baserad endast på avståndet till spårmitt som skall motsvara alla slumpmässiga skillnader i tågets ljudutstrålning. Korrektionen är +3 dB vid 10 m avstånd till spårmitt och 0 dB vid 300 m avstånd.

För att studera hur Cnossos-EU kan användas för att beräkna maxnivån utgår vi ifrån grundtanken i Nord2000 men placerar istället källorna vid varje axel och antar en standardavvikelse på liknande sätt som för vägtrafik. I Figur 7 redovisas resultatet för två uppmätta passager av tågtypen X52 tillsammans med beräkningar för fyra realiseringar av en Cnossos-EU beräkning med spridning mellan de 12 hjulaxlarna som beskrivs av en standardavvikelse på 2,0 dB. Ax-

larnas läge i tid illustreras av cirklarna i figuren. Hastigheten var 170±3 km/h vid mätningarna och sattes till 170 km/h för beräkningarna. Redan vid så kort avstånd som 7,5 m påverkar intilliggande axlar varandra i stor utsträckning och det bildas en dal mitt för varje vagn och en topp i anslutning till att en vagn slutar och nästa börjar eftersom boggierna är placerade där, men man kan inte se en topp för varje enskild axelpassage.

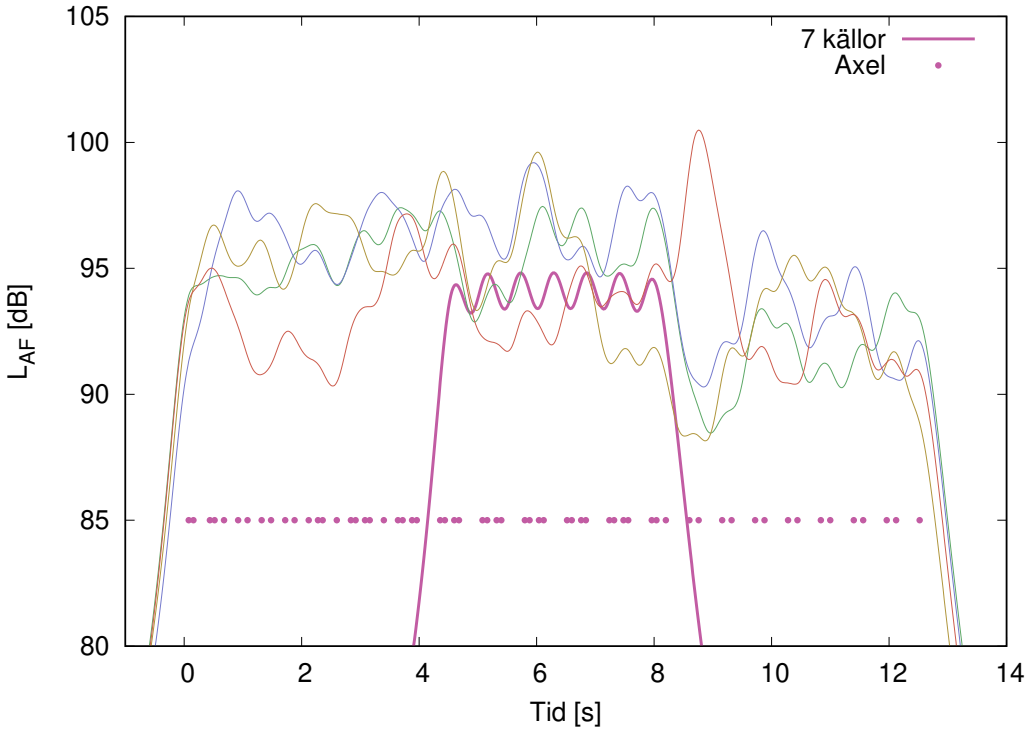



*Figur 7: Ljudtrycksnivå med tidsvägning F ($L_{AF}$) som funktion av tiden för två uppmätta och fyra modellerade tågpassager av tågtypen X52 7,5 m från spårmitt. De fyllda cirklarna indikerar vid vilken tidpunkt de 12 axlarna passerar närmast mikrofonen. Hastigheten under passagerna var ca 170 km/h.*

I Figur 8 redovisas beräkningar för en godstågspassage i 90 km/h, återigen 7,5 m från spårmitt. Godståget är 311 m långt och har totalt 62 axlar. För godståg är spridningen mellan axlar betydligt större än för persontåg, vi har i denna beräkning antagit en standardavvikelse på 4,0 dB. Sammansättningen av tåget är baserat på en verklig sammansättning, och består av ett Rc-lok och total 20 vagnar av fyra olika vagnstyper med två till fem axlar per vagn. I figuren visas en beräkning som samlar all ljudeffekt i sju punktkällor på samma sätt som i Nord2000 samt fyra beräkningar med spridning mellan axlarna enligt ovan. Cirklarna anger axlarnas position. Den maximala nivån under en passage uppträder på olika plats utmed tåget beroende på den slumpmässiga variationen i ljudutstrålning för axlarna. Skillnaden mellan den maximala nivån för en modellerad passage jämfört med sju källor enligt Nord2000 kan vi se som en korrektionsfaktor, som om den är känd kan användas för att beräkna den maximala nivån från en enda beräkning med sju källor.

Genom att göra om beräkningar av samma typ som ovan med olika parametrar så skulle det vara möjligt att bygga upp korrektioner på samma sätt som gjordes för Nord2000 utifrån mätresultaten. I Tabell 2 ges parametrar för en serie beräkningar med persontåget och godståget i exemplen ovan. Beräkningen visar hur mycket den maximala nivån ökar när man inkluderar variationen över axlarna för 250 beräkningar för varje avstånd, se Figur 9.

Utifrån en omfattande serie beräkningar av detta slag, kombinerat med verifierande mätning-

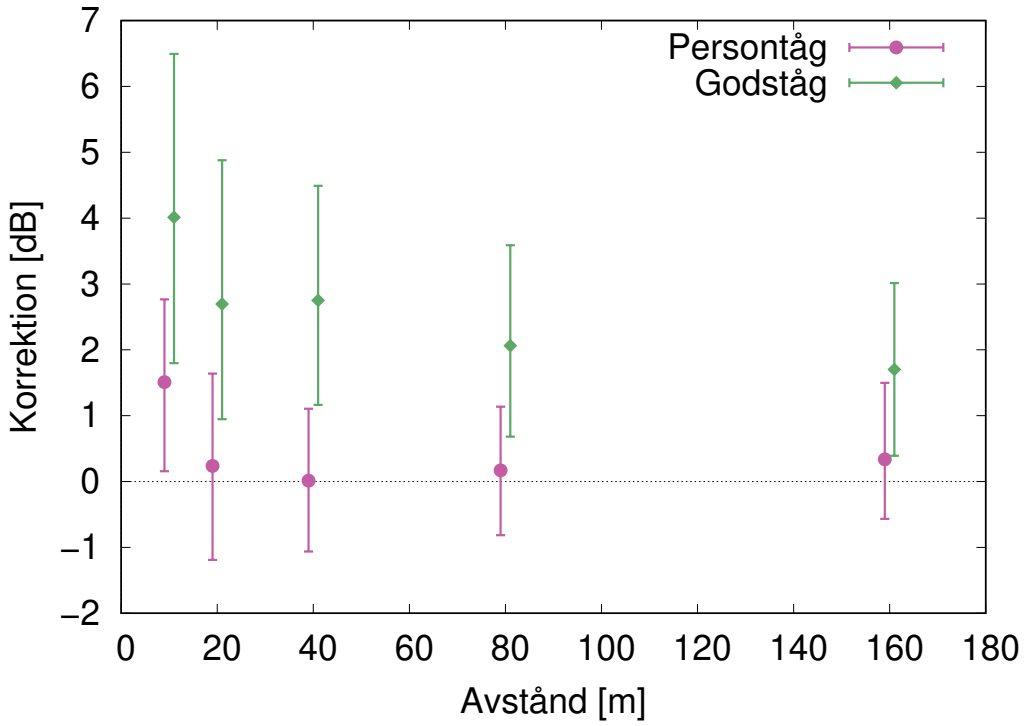



*Figur 8: Ljudtrycksnivå med tidsvägning F ($L_{\mathrm{AF}}$) som funktion av tiden för fem beräkningar av godstågspassager i 90 km/h för en mottagare 7,5 m från spårmitt. Vid en av beräkningarna fördelades all ljudeffekt över 7 punktkällor på samma sätt som i Nord2000, vid övriga fyra valdes ljudeffekten slumpmässigt med standardavvikelse på 4,0 dB. De fyllda cirklarna indikerar vid vilken tidpunkt axlarna passerar närmast mikrofonen.*

ar på olika avstånd, skulle man kunna bygga upp en fungerande maxnivåberäkning baserad på Cnossos-EU. Men man skulle inte komma ifrån behovet att söka vilken position utmed spåret som ger den maximala nivån, vilket skulle ge förhållandevis lång beräkningstid och kräva förändringar i de kommersiellt tillgängliga programmvaror som används för beräkningar av konsulter och andra. En fördel i sammanhanget är att metoden redan finns implementerad för Nord2000 och snarlika metoder för Nordisk beräkningsmetod 1996.

*Tabell 2: Beräkningsparametrar för simulering av maxnivå från tågtrafik.*

| Parameter | Värde |
|---|---|
| Marktyp | D |
| Mottagarhöjd | 2 m |
| Bankhöjd | 0,6 m |
| Standardavvikelse persontåg | 2,0 dB |
| Standardavvikelse godståg | 4,0 dB |
| Hastighet persontåg | 170 km/h |
| Hastighet godståg | 90 km/h |




*Figur 9: Exempel på korrektionsfaktor för att beräkna maximal ljudnivå för ett godståg och ett persontåg från en beräkning utan variation och all ljudeffekt fördelad över sju källor (på samma sätt som i Nord2000). Staplarna indikerar spridningen i 250 beräkningar (90% täckningsgrad).*

# 4 Förslag till beräkningsgång för Cnossos-EU

För vägtrafik kan i princip samma beräkningsmetod som tidigare användas, metodiken beskrivs väl i Nord2000 [11]. Tyvärr saknas nya data på hur spridningen inom de olika fordonsklasserna ser ut, fram tills sådana data publiceras får man utgå från standaravvikelsen från Nordisk metod reviderad 1996 [1], som också återges i Figur 4. Standardavvikelsen antas lika för medeltunga och tunga fordon för Cnossos-EU. För tvåhjulingar och elfordon saknas data för svenska förhållanden, men normalt bestäms den maximala nivån av den tunga trafiken.

För spårtrafik kan samma metod som beskrivs i Nord2000 [13] användas också för Cnossos-EU. För tåg som inte har en särskild källterm för driftsbuller räcker det att använda en källhöjd, för övriga används två källhöjder för beräkningar med Cnossos-EU. Ljudeffekten fördelas lika mellan de 7 källorna och båda höjderna, förutom om det finns element som växlar, broar, skarvar eller kurvor med liten radie. Då hanteras detta genom att öka ljudeffekten enligt Cnossos-EU för respektive källa på samma sätt som beskrivs i Miljøstyrelsens rapport [18].

Jämfört med beräkningar med de metoder som används idag [1, 10] blir avvikelserna relativt små för vägtrafik, i alla fall för korta avstånd och oskärmade lägen där maximal nivå är mest intressant i relation till riktvärden. För spårtrafik kan avvikelserna bli stora, speciellt för godståg och vid situationer där Cnossos-EU ger extra ljudeffekt så som spår med skarvar, passage av växlar och broar och i kurvor med liten radie. Hur stora avvikelserna blir kan utredas först när nya indata är framtagna för svenska spårfordon och infrastruktur. Detta arbete pågår och publicering av data är planerad till slutet på 2020.

För beräkningar av maximal nivå för väg- och spårtrafik krävs modifieringar i de kommersiella mjukvaror som används vid beräkningar för att få med dessa svenska modifieringar till Cnossos-EU. För spårtrafik är modifieringen relativt omfattande jämfört med en standardberäkning med Cnossos-EU, eftersom man då måste införa en sökalgoritm för vilken position och tågtyp som ger den högsta nivån. Det finns dock incitament för mjukvaruutvecklarna att införa dessa för att behålla svenska kunder. En potentiell nackdel med att införa svenska modifieringar till Cnossos-EU är att minskade kostnader till följd av den ökande konkurrensen med en EU-gemensam beräkningsmetod skulle utebli.

# Referenser


[1] Jonasson, H. och Nielsen, H. Vägtrafikbuller, Nordisk beräkningsmodell reviderad 1996. Rapport 4653, Naturvårdsverket, Stockholm. ISBN 9162046535, 1996.

[2] Comission, E. Establishing common noise assessment methods according to directive 2002/49/ec of the european parliament and of the council. Comission Directive 2015/996, European Comission, 2015.

[3] Jonasson, H. Acoustic source modeling of nordic road vehicles. SP Rapport 2006:12, Borås, 2006. ISBN 91-85303-96-8.

[4] Nordtest. Road traffic: Measurement of noise immission - engineering method. NT ACOU 039, NordTest, 2002.

[5] Kihlman, T. Handlingsplan mot buller. SOU 1993:65, Statens offentliga utredningar, 1993. ISBN 91-38-13397-0.

[6] Förordning om trafikbuller vid bostadsbyggnader, 2015. SFS 2015:216.

[7] Blidberg, K. Buller och vibrationer från trafik på väg och järnväg. TDOK 2014:1021, Trafikverket, 2017. Version 2.0.

[8] Naturvårdsverket. Naturvårdsverkets webbsida. `http://www.naturvardsverket.se`, 2020. Hämtad 2020-06-10.

[9] Boverket. Boverkets byggregler – allmänna råd. BFS 2011:6 med ändringar till och med 2018:4 (BBR 26), Boverket, 2018. ISBN 978-91-7563-581-1.

[10] Naturvårdsverket. Buller från spårburen trafik – Nordisk beräkningsmodell. Rapport 4935, Naturvårdsverket, Stockholm, 1996.

[11] Jonasson, H. och Storeheier, S. Nord2000. New nordic prediction method for road traffic noise. SP Rapport 2001:10, SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, Borås, 2001.

[12] Hagberg, K. och Simmons, C. Bullerskydd i bostäder och lokaler. Handbok, Boverket, 2008. ISBN 978-91-86045-41-8.

[13] Jonasson, H. och Storeheier, S. Nord2000. New nordic prediction method for rail traffic noise. SP Rapport 2001:11, SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, Borås, 2001.

[14] ISO. Akustik – vägytans inflytande på trafikbuller – mätmetod – del 1: Statistiska förbifartmetoden. SS ISO 11819:1998, 1998.

[15] ISO. Railway applications – acoustics – measurement of noise emitted by railbound vehicles. EN ISO 3095:2005, 2005.

[16] Krister Larsson, H. J. Uppdaterade beräkningsmodeller för vägtrafikbuller. SP Rapport 2015:72, Borås, 2015. ISBN 978-91-88001-95-5.

[17] Göransson, C. och Ström, T. Externt buller från svenska tågtyper – nya indata till den nordiska beräkningsmodellen. Teknisk rapport 1994:25, Borås, Sweden, 1994. ISBN 91-7848-484-7.

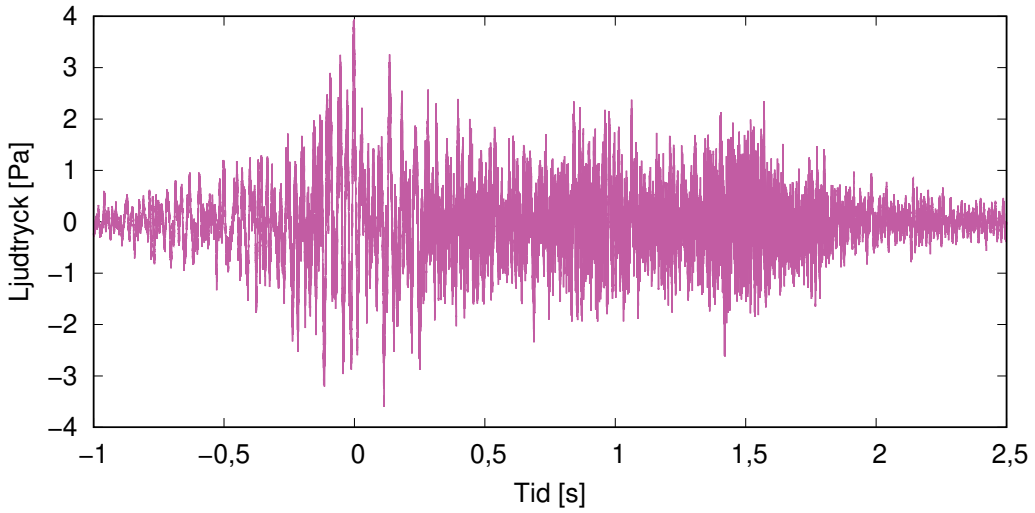
[18] Plovsing, B. Revision af kildemodel ved anvendelse af nord2000 til beregning af maksimalvaerdi fra jernbaner. DELTA notat RL 14/16, Köpenhamn, 2016.

[19] SS-EN. Akustik – ljudnivåmätare. SS EN 61672:2014, 2014.

# A Tidsvägning och frekvensvägning

Den maximala ljudtrycknivån vid mätning av ljud från väg-, spår- eller flygtrafik är tidsvägd och frekvensvägd. Kraven på instrumentet för tidsvägningsfiltret och frekvensvägningsfiltret specificeras i standarden SS EN 61672 [19].

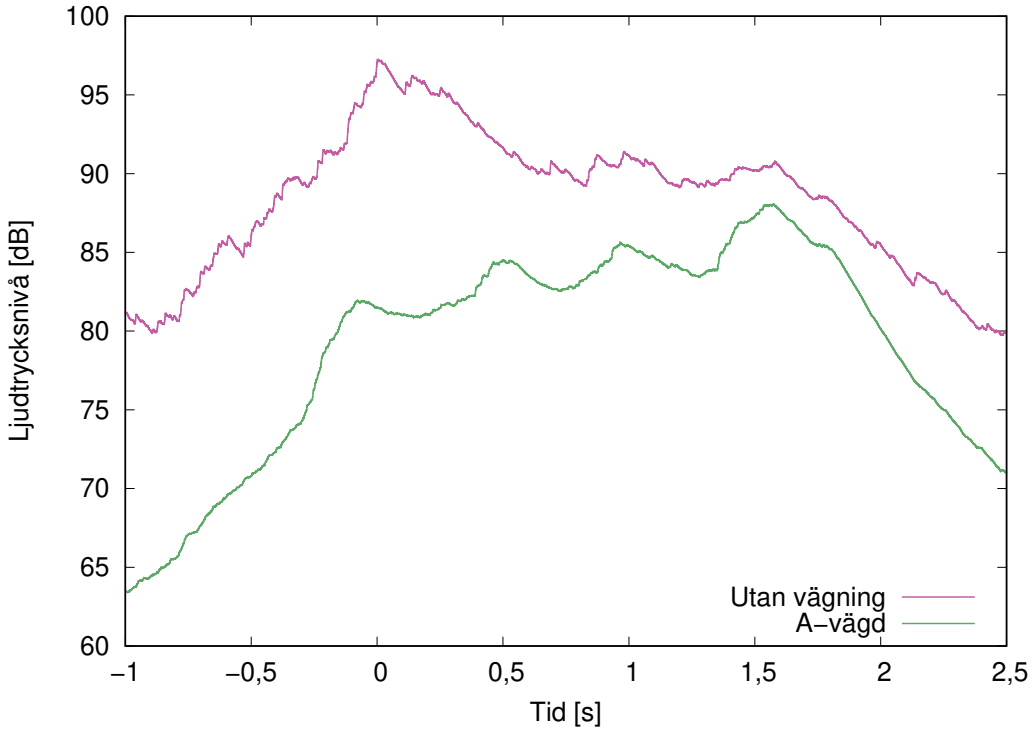
I Figur 10 visas ett exempel på hur ljudtrycket $p(t)$ varierar under en passage av ett tåg. I ljudnivåmätaren filtreras först ljudtrycket med ett frekvensvägningsfilter, det så kallade A-filtret, och sedan tidsvägningsfiltret som för trafik antingen är FAST eller SLOW. Tidsvägningsfiltret är en exponentiell tidsvägning där tidskonstanten är 125 ms för FAST och 1 s för SLOW.



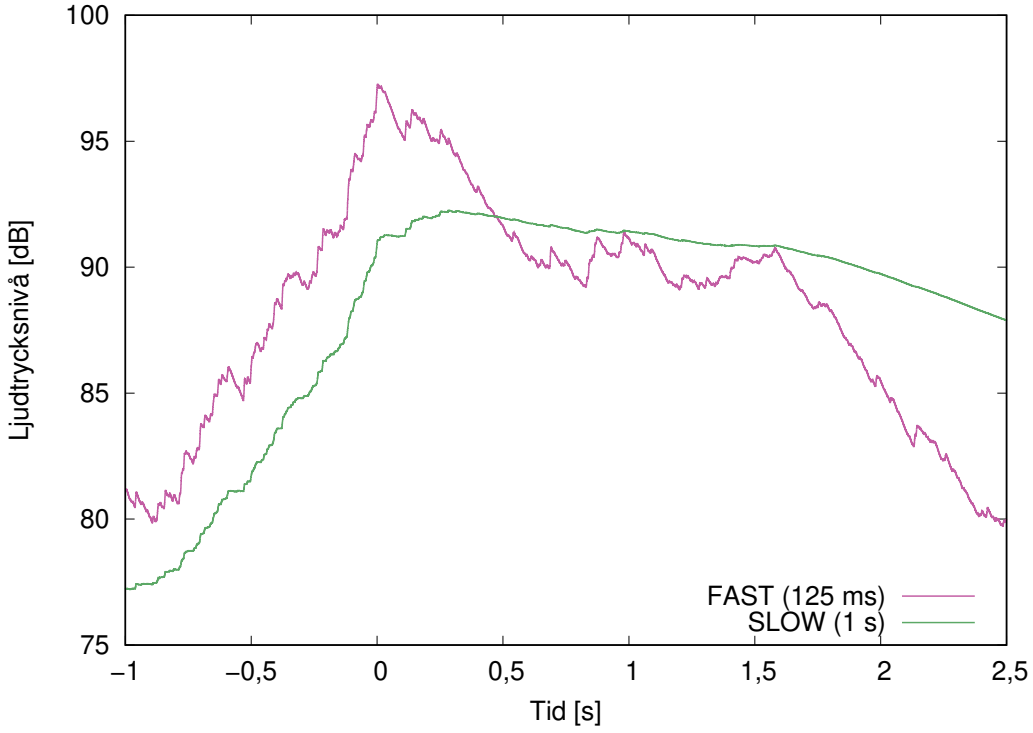

*Figur 10: Ljudtryck i Pa som funktion av tiden under en passage av ett tåg. Tidsaxeln är justerad så att tiden är noll där maximalt ljudtryck uppstår under passagen.*

I Figur 11 visas ljudtrycksnivån i dB med tidsvägning FAST, dels utan frekvensvägning A ($L_{\mathrm{ZF}}$) och dels med A-vägning ($L_{\mathrm{AF}}$) för samma signal som i Figur 10. Notera att maximal ljudtrycksnivå inträffar vid olika tidpunkt beroende på frekvensvägning.

I Figur 12 visas ljudtrycksnivån i dB med tidsvägning FAST ($L_{\mathrm{ZF}}$) och SLOW ($L_{\mathrm{ZS}}$) utan frekvensvägning för samma signal som i Figur 10. Notera att maximal ljudtrycksnivå inträffar vid olika tidpunkt även då tidsvägningen ändras.




*Figur 11: Ljudtrycksnivå med tidsvägning F (FAST, 125 ms) i dB som funktion av tiden under en passage av ett tåg med och utan frekvensvägning A. Tidsaxeln är justerad så att tiden är noll där maximal ovägd ljudtrycksnivå uppstår under passagen.*




*Figur 12: Ljudtrycksnivå med tidsvägning F (FAST, 125 ms) och S (SLOW 1 s) i dB som funktion av tiden under en passage av ett tåg.*