



UPPSALA
UNIVERSITET

UPTEC W 21035

Examensarbete 30 hp
Juni 2021

Lyssningsbara bullerutredningar

Auralisering av trafikbuller för bättre
tolkning av ljudnivån

Maria-Therese Carlsen

Referat

Lyssningsbara bullerutredningar– Auralisering av trafikbuller för bättre tolkning av ljudnivån

Maria-Therese Carlsen

Syftet med detta examensarbete har varit att ta fram en metod för att skapa lyssningsbart trafikbuller med datorn, så kallat auraliserat trafikbuller, att koppla till en bullerkarta. I kartan skulle det gå att lyssna på hur trafikbullret skulle låta för att ge en bättre uppfattning om vad ljudnivån och färgskalan i en traditionell bullerkartläggning betyder. Bullerkartläggningar kan annars vara svåra att förstå då de enbart beskriver ljudnivån och inte typen av trafikbuller eller hur störande det är. Metoden behövde vara snabberäknad och lätt att använda för att vara ett lättillgängligt komplement till traditionella bullerkartläggningar.

Auraliseringen baserades på ljudinspelningar av en motorväg, landsväg och en stadsgata, och som bakgrundsljud användes en lokalgata, fågelsång och ett förklarande samtal. Med Trafikverkets uppdelning av vägnätet i funktionella klasser delades vägarna in i vägtyperna motorväg, landsväg och stadsgata, och avståndet mellan fasadpunkterna och vägtyperna beräknades med programvaran ArcGIS Pro. Från en traditionell bullerkartläggning som beräknats i SoundPLAN erhöles ljudnivån vid fasadpunkterna. Genom att dämpa trafikbullret från de olika vägtyperna med atmosfärsdämpning, som främst dämpade de höga frekvenserna vilket gjorde att bullret uppfattades som mer avlägset, och med geometrisk spridning som dämpade den totala ljudnivån, kunde en ljudmix skapas för varje fasadpunkt.

I många fall behövdes ljudet dämpas ytterligare eftersom dämpningen på grund av exempelvis andra hus och bullerskyddsskärmar inte hade inkluderats, och detta gjordes genom att sänka den totala ljudnivån till beräknade ljudnivån i bullerkartläggningen. I lugna områden där enbart lokalgator fanns i närområdet återspeglade ljudnivån trafikbullret från lokalgatorna, och trafikbullret från de större vägarna riskerades att överskattas och ge en missvisande trafikljudmix. Detta korrigerades genom att addera en avståndsberoende extradämpning som adderades till motorvägen, landsvägen och stadsgatan.

Med en beräkningstid av 100 000 punkter på fem dagar är metoden tillräckligt snabb för att kunna användas vid bullerkartläggningar av även de största städerna i Sverige. Resultatet ger en uppfattning av hur det skulle låta på platsen, men låter inte exakt som i verkligheten. För att hålla komplexiteten nere beräknades auraliseringen med monoljud som sedan dubblerades till stereo. Den begränsas också av hur väl genomförd bullerkartläggningen är och inkluderar inte hur vädret påverkar trafikbullret. En noggrannare kalibrering av extradämpningen skulle behöva ske för att för en mer korrekt ljudmix i lugna bostadsområden. Metoden är anpassningsbar och fler trafikinspelningar går att addera till beräkningarna, väderparametrar kan justeras och med en anpassad bullerkartläggning går det att erhålla mer korrekta auraliseringar.

Nyckelord: Auralisering, bullerkartläggning, bullerutredning, trafikbuller

Institutionen för geovetenskaper, Vindenergi, Uppsala universitet, Villavägen 16, SE-75236 Uppsala, Sverige. ISSN1401-5765

Abstract

Audible noise maps - auralization of traffic noise to improve the perception of the sound level

Maria-Therese Carlsen

The aim of this project has been to develop a method for making audible traffic noise with the computer (auralization of traffic noise) to upload to a noise map. In the noise map, it would be possible to listen to how the traffic noise would sound like to give a better idea of what the sound level and color scale in a traditional noise survey means. Noise surveys can otherwise be difficult to understand as they only describe the noise level and not the type of traffic noise or how disturbing it would be. This method needed to be fast and easy to use to be an easily accessible complement to traditional noise maps.

The auralization was based on sound recordings of a highway, country road and a city street, and as background sounds a local street, birdsong and an explanatory conversation were used. With the Swedish Transport Administration's classification of the road network into functional classes, the roads were divided into the road types motorway, country road and city street, and the distance between the facade points and road types was calculated with the ArcGIS Pro software. From a traditional noise map calculated in SoundPLAN, the sound level at the facade points was obtained. By attenuating the traffic noise from the different road types with atmospheric attenuation, which mainly attenuated the high frequencies and made the noise perceived as more remote, and with geometric scattering that attenuated the overall noise level, a sound mix could be created for each facade point.

In many cases, the sound needed to be attenuated further because the attenuation due to, for example, other houses and noise protection screens had not been included, and this was done by lowering the total noise level to the calculated noise level of the noise mapping. In quiet areas where only local streets were in the close surrounding, the noise level reflected the traffic noise from the local streets, and the traffic noise from the major roads risked being overestimated and given a misleading traffic noise mix. This was corrected by adding a distance-dependent extra damping that was added to the motorway, country road and city street.

With a calculation time of 100,000 points of five days, the method is fast enough to be used in noise mapping even in the largest cities in Sweden. The result gives an idea of how it would sound, but does not sound exactly like in reality. It is limited by how well the noise mapping is calculated and does not include how the weather affects traffic noise. A more accurate calibration of the extra damping would need to be calculated in order for a more accurate sound mix in quiet residential areas. The method is adaptable and more traffic recordings can be added to the calculations, weather parameters can be adjusted and with an adapted noise mapping it is possible to obtain more accurate auralizations.

Key words: Auralization, noise mapping, traffic noise

Department of Earth Sciences, Vindenergi, Uppsala university, Villavägen 16, SE-75236 Uppsala, Sweden. ISSN1401-5765

Förord

Detta examensarbete är på 30 hp och avslutar fem års studier på civilingenjörsprogrammet i miljö- och vattenteknik vid Uppsala universitet. Arbetet har utförts på Efterklang i Stockholm med Manne Friman som handledare. Ämnesgranskare var Johan Arnqvist, forskare vid Institutionen för geovetenskaper, Vindenergi på Uppsala universitet. Examinator var Erik Sahlée, universitetslektor vid Institutionen för geovetenskaper, Luft-, vatten- och landskapslära, Meteorologi på Uppsala universitet.

Jag vill rikta ett stort tack till min handledare Manne Friman som kommit med många bra idéer alltid varit peppande. Jag vill också tacka övriga kollegor på Efterklang och Afry som har hjälpt mig med de programvaror som jag har behövt. Ni har fått mig att känna mig väldigt välkommen.

Jag vill också rikta ett stort tack till Johan Arnqvist för all snabb återkoppling och vägledning jag fått under examensarbetets gång.

*Maria-Therese Carlsen
Enköping, juni 2021*

Populärvetenskaplig sammanfattning

Lyssningsbara bullerutredningar– Auralisering av trafikbuller för bättre tolkning av ljudnivån

Maria-Therese Carlsen

Med nutidens tätbebyggda städer och vältrafikerade gator har bullerkartläggningar blivit en viktig del för att kontrollera ljudnivån. Att förstå bullerkartläggningarna kan dock vara svårt då många saknar koppling till vad ljudnivåerna innebär. För att lösa problemet har detta projekt utvecklat lyssningsbara bullerkartläggningar, där det går att lyssna på hur trafikbullret skulle låta genom att klicka på punkter i en karta. Dessa lyssningsbara bullerkartor baseras på en traditionell bullerkarta och skapar ett trafikbuller som motsvarar de värden som finns på kartan, och är en lättillgänglig alternativ som går att använda både för stora och små städer i hela Sverige.

För höga ljudnivåer är skadligt för hälsan då det leder till stress och sömnsvårigheter, så det är av stor vikt att goda ljudmiljöer kan skapas. Det är dock inte så enkelt som att bara följa den totala ljudnivån eftersom typen av trafikbuller också påverkar. Ett konstant bakgrundsbrus från en motorväg är mer störande än enstaka bilpassager fastän det ger samma ljudnivån på kartan, så därför är det viktigt att kunna lyssna på hur störande en plats skulle låta. För att möjliggöra detta har trafikbuller skapats av befintliga ljudinspelningar av vägtyperna motorväg, landsväg, stadsgata och lokalgata. Genom dämpa ljudinspelningarna och skapa en ljudmix specifik för varje plats på kartan har trafikbuller auraliserats, alltså skapats med hjälp av datorn. Med bakgrundsljud i form av fågelsång och med ett förklarande samtal ihop med det auraliserade trafikbullret blir det lättare att tolka ljudnivån och hur störande det skulle vara.

Dämpningen av ljudfilerna baserades på avståndet mellan en plats och de närmsta vägarna av varje vägtyp. Med atmosfärsdämpning, alltså att ljudnivån dämpas av luftens molekyler, dämpas främst de höga frekvenserna och ljudet låter mer avlägset. Med geometrisk spridning dämpas den totala ljudnivån eftersom ljudet sprids till en större area. Genom att dämpa varje väg individuellt och sedan mixa dem i en ny ljudfil går det att höra vilken typ av trafikbuller som skulle höras mest på vardera plats. Med värdet på ljudnivån från bullerkartläggningen säkerställs att det auraliserade trafikbullret håller rätt ljudnivå. Svagheten med denna metod är att för lugna bostadsområden som inte ligger nära några större vägar riskerar trafikbullret från de stora vägarna att överskattas och ge en missvisande trafikmix. Ljudnivån på lugna områden är dock så pass låg att det inte skapar några större problem.

För att det skulle gå snabbt och enkelt att skapa det auraliserade trafikbullret så var vissa parametrar tvungna att exkluderas, så därför är meteorologins påverkan av bullret inte med. I verkligheten förekommer det en stor variation av hur det skulle låta beroende på årstid och väder, men liksom i en traditionell bullerutredning har standardvärden använts av på de parametrarna. Att säkerställa att rätt ljudnivå ställs in på den högtalare eller hörlurar som används för att lyssna på det auraliserade trafikbullret är också en utmaning. Ett samtal i början av varje ljudfil fungerar som en kalibreringsnivå som användaren får anpassa ljudnivån efter. Spelas samtalet upp i normal samtalsvolym är ljudnivån korrekt inställd, men kan bli problematiskt om användaren är van vid en högre eller lägre samtalsvolym än vanligt.

De lyssningsbara bullerutredningarna går att utveckla genom att använda fler trafikljudinspelningar för fler vägtyper. Den går också att anpassa till en speciell plats för genom att använda en trafikinspelning för en liknande plats, eller att exkludera lokaltrafiken i en bullerkartläggning för att få en korrekt ljudmix av de större vägarna. Om bullerkartläggningen beräknas med en metod som ger en mer detaljerad beskrivning av frekvensinnehållet i ljudnivån, skulle auraliseringsmetoden i framtiden gå att utveckla för att kunna utnyttja den mer detaljerade ljudnivån och ge ett mer korrekt frekvensinnehåll. Denna metod har dock skapat för att kunna fungera med alla bullerkartläggningar oavsett vilken metod de har beräknats med för att alltid vara ett lättillgängligt alternativ till traditionella bullerkartläggningar.

Innehåll

1	INLEDNING	1
1.1	SYFTE	1
1.2	AVGRÄNSNINGAR	1
2	Teori	2
2.1	FREKVENNS	2
2.2	Ljudets spridning	4
2.2.1	Geometrisk spridning	4
2.2.2	Atmosfärisk absorption	4
2.2.3	Refraktion	6
2.2.4	Reflektion	6
2.2.5	Turbulens	7
2.3	TRAFIKBULLER	7
2.3.1	Bullermått	7
2.3.2	Bullerkartläggning	8
2.4	FUNKTIONELLA VÄGKLASSER	9
2.5	LJUDINSPELNINGAR	9
2.6	TIDIGARE AURALISERINGAR	9
3	METOD	11
3.1	OMRÅDESBESKRIVNING	11
3.2	VÄGFILER OCH KLASSNING	12
3.3	SOUNDPLAN	13
3.4	GIS	13
3.5	DÄMPNING	14
3.5.1	Uträkning av atmosfärsdämpning	14
3.5.2	Uträkning av geometrisk spridning	15
3.6	LJUDUTBREDNING	16
3.6.1	Ljudfiler	16
3.6.2	Kalibrering av ljudnivån	16
3.6.3	Auralisering	16
3.6.4	Avgränsningar av vägtyper i ljudmixen	18
3.6.5	Tillgänglighet	19
4	RESULTAT	20
4.1	EXEMPEL PÅ LYSSNINGSPUNKTER	23
4.2	KARTAN	26
4.3	TIDSÅTGÅNG	26
5	DISKUSSION	27
5.1	ANALYS AV DÄMPNINGEN	27
5.2	FÖRENKLINGAR	28
5.3	Kalibrering av ljudnivån	29
5.4	METEOROLOGISKA FAKTORER	29
5.5	TILLGÄNGLIGHET	30
5.6	FRAMTIDA STUDIER	30

6 SLUTSATS	32
REFERENSER	33
BILAGOR	35
BILAGA A: Pythonscript för atmosfärsdämpning och geometrisk spridning .	36
BILAGA B: Pythonscript för auralisering	38

1 INLEDNING

Höga bullernivåer blir ett allt större problem när vägtrafiken ökar och förtätningar av städer sker. Vid nybyggnation utförs bullerutredningar för att beräkna den förväntade bullernivån, och ljudnivån presenteras sedan i siffror i decibel med A-vägning (dBA) som representerar dess ekvivalensnivå och maxnivå. Många har dock svårt att relatera till siffrorna i dB, och från enbart siffror går det inte att förstå hur störande ljudet kommer vara. En motorväg med ett jämt trafikflöde uppfattas annorlunda mot en vägkorsning precis utanför bostaden, även om de har samma ekvivalenta ljudnivå. Detta beror på att ekvivalentnivån enbart presenterar medelnivån av ljudet och inte dess variation. På längre avstånd försvinner högfrekventa ljud och det låter mer som ett brus medan från en närliggande vägkorsningen kan varje passage höras. Frekvensen av bilar påverkar också hur störande det är, där ett jämt trafikflöde uppfattas som mer störande än ett där bilarna kommer i kluster (Kaczmarek och Preis 2010).

Om bullerutredningarna kunde göras lyssningsbara skulle de bli betydligt lättare att förstå, och detta är möjligt med auralisering. En auralisering är ett digitalt skapat ljud som låter verkligt, vilket möjliggör att lyssna hur det skulle låta på en plats innan den är byggd. Effekten av bullerskyddsåtgärder skulle kunna undersökas, likaså hur en förändring av hastigheten skulle påverka ljudnivån. Risken med auraliseringar är dock att det kan uppfattas annorlunda mot verkligt trafikbuller när det spelas upp i tyst miljö utan exempelvis vindbrus och svårigheten att ställa in en korrekt ljudnivån på olika ljudenheter.

1.1 SYFTE

Syftet med detta examensarbetet är att auralisera trafikbullret vid bullerutredningar för att de ska bli lyssningsbara och lättare att tolka. Målet är ta fram en karta där användaren kan klicka på en punkt vid fasaden för att lyssna på hur det skulle låta på den platsen. Fokus ligger på att ta fram en metod som går att applicera över större områden, och noggrannheten i ljudets karaktär ska vara trovärdig men inte nödvändigtvis helt korrekt med det verkliga fallet. Detta för att auraliseringen är tänkt att vara ett lättillgängligt verktyg som ska kunna vara en självklarhet vid bullerutredningar.

1.2 AVGRÄNSNINGAR

Ljudet behöver inte vara helt verklighetstroget, men det ska vara tillräckligt bra för att vara trovärdigt och ge en bild av verkligheten. Det viktigaste är att få fram en fungerande metod som sedan kan vidareutvecklas. Endast ett mindre område i en stad och ljud som kommer från vägtrafiken kommer behandlas i examensarbetet. Hänsyn till olika förhållanden i atmosfären kommer inte tas med i beräkningarna. Detta kommer göra att ljudet inte blir helt verklighetstroget och kommer behöva förbättras när modellen utvecklas vidare. Auraliseringen sker med monoljud för att minska beräkningskomplexiteten då det annars är krävande att beräkna ljudkällorna och dämpningen individuellt för vardera öra.

2 Teori

Det örat uppfattar som ljud är vibrationer i luften, som kallas ljudvågor. Ljudvågorna är förtätningar och förtunningar av luftens molekyler vilket ger tryckskillnader Dessa uppfattas av örat som sedan skickar vidare signalen till hjärnan som ljud. Ljudvågorna kan genereras från vibrationer av ljudkällan, till exempel från ett membran på en högtalare eller bilmotor. De kan också genereras av snabba accelerationer av luften som exempelvis sker när luften flödar in mot lågtrycket som skapas bakom en körande bil eller ett vindkraftverks roterande vingar. Längden på ljudvågen bestäms av hur snabbt vibrationen sker, alltså dess frekvens. Våglängden beror också på ljudets hastighet som inte är konstant utan beräknas enligt ekvation 1:

$$c = 20.05 \cdot \sqrt{(1 + 0.61q)T} \quad (1)$$

där c är ljudets hastighet i m/s, q är den specifika luftfuktigheten i kg/kg och T är luftens temperatur i K. En högre temperatur och luftfuktighet ger en snabbare ljudhastighet. Våglängden kan då beräknas enligt ekvation 2:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2)$$

där λ är våglängden i meter (m) och f är frekvensen i 1/sekund (1/s). En kort våglängd orsakas en snabb vibration och ger en hög frekvens, medan en lång våglängd orsakas av en långsam vibration och ger en låg frekvens.

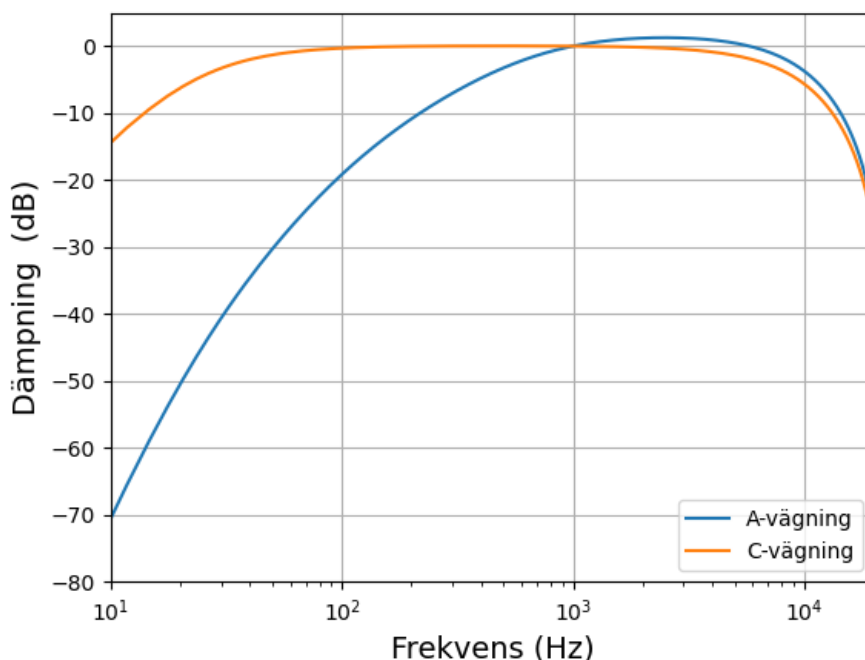
En ljudvåg som når ett hinder kan i viss mån färdas runt hindret då vågens riktning förändras när den träffas hindret. Ett stort hinder i förhållandet till våglängden ger en effektiv dämpning, men vid ett hinder som är mindre än våglängden kan ljudvågen ändå färdas runt och över hindret. Detta medför att skärmande hinder som exempelvis bullerskärmar är mest effektiva mot höga frekvenser. (Nilson et al. 2005).

2.1 FREKVENNS

Människans öra kan uppfatta ljud inom frekvensområdet 20 - 20000 Hz, och är känsligast för de ljud som ligger inom 2000 - 4000 Hz. Hörfrekventa ljud är de ljud som har en frekvens mellan 2000 och 20000 Hz, och lågfrekventa ljud ligger inom 20 - 200 Hz. Är frekvensen lägre än 20 Hz uppfattas de som vibrationer. En ren ton består av ett ljud med enbart en frekvens, men ofta innehåller ljud många fler frekvenser (Salomons 2001). För att förenkla ljudanalysen delas frekvenserna in i oktavband och tersband för att kunna uppskatta energin eller effekten inom det bandet. Oktavbanden definieras av deras mittfrekvenser samt har en undre och övre frekvensgräns. För varje oktavband dubblas mittfrekvensen, vilket gör att vid låga frekvenser är oktavbanden smala och vid högre frekvenser är oktavbanden bredare. Inom teknisk akustik används ofta 1/3 oktavband, även kallat tersband, istället för oktavband för att få en mer detaljerad fördelning av ljudets frekvenser. (Murphy & King 2014).

Eftersom örat är mer känsligt för ljud i frekvensområdet 2000-4000 Hz används filter för att anpassa ljudmätningarna. Det vanligaste filtret som används vid bullermätningar är A-filtret, som dämpar låga frekvenser under 1000 Hz och över 5000 Hz enligt fi-

gur 1. När A-filtret används anges ljudnivån i dBA. Ett annat filter som kan användas är C-vägningsfiltret som enbart påverkar låga och höga frekvenser, men med mindre omfattning än A-filtret. (Beranek & Mellow 2019).



Figur 1: Dämpningseffekten av A- och C-vägningsfilter på frekvensspektrumet.

Hur högt ett ljud uppfattas beror på dess tryckförändring. Ljudtrycksnivån mäts i Pa men ljudnivån uttrycks vanligen i dB eller dBA. Den minsta hörbara ljudet har en tryckförändringen på $2 \cdot 10^{-5}$ Pa vilket också är referensnivån P_{ref} och motsvarar 0 dB (Murphy & King 2014). Inom det hörbara intervallet skiljer sig ljudtrycksnivån stort, vilket är anledningen till att dB istället används för att beskriva ljudnivån. Ljudnivån beräknas som ett förhållande mellan den aktuella ljudtrycket och referensnivån enligt

$$L_P = 10 \cdot \log \frac{P^2}{P_{ref}^2} = 20 \cdot \log \frac{P}{P_{ref}} \quad (3)$$

där L_P är ljudnivån i dB och P är ljudtrycket i Pa (Murphy & King 2014). En fördubbling av ljudtrycksnivån innebär en ökning med 6 dB. Det krävs dock en ökning med 10 dB för att örat ska uppfatta det som en fördubbling av ljudnivån, och 3 dB krävs för att örat ska uppfatta att ljudnivån förändras (Murphy & King 2014). Om två ljudkällor adderas dubblas inte ljudtrycket eftersom ljudkällorna oftast inte är korrelerade, utan ljudnivån ökar enligt följande

$$L_P = 10 \cdot \log(10^{L_{P1}/10} + 10^{L_{P2}/10}) \quad (4)$$

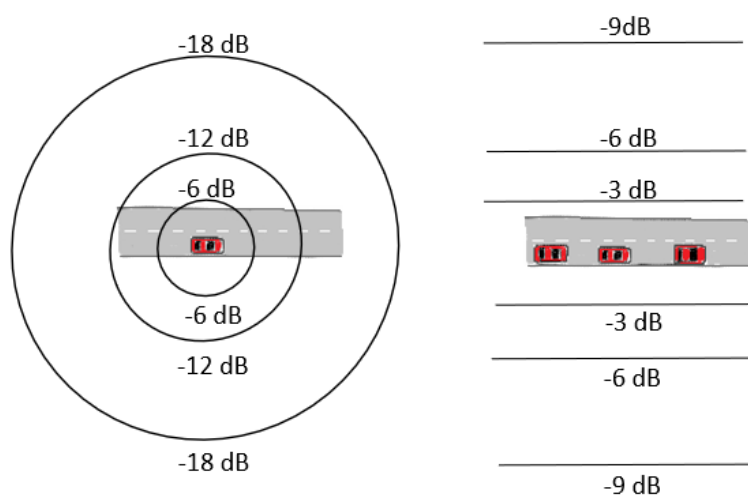
där L_{P1} och L_{P2} är ljudnivån för de två källorna. Om ljudkällorna har samma ljudnivå ökar den totala ljudnivån med ungefär 3 dB (Murphy & King 2014).

2.2 Ljudets spridning

Denna rapport fokuserar på hur ljud sprids genom luften och tar inte upp hur de sprids genom andra medier. När ljudet sprids avtar ljudtrycket med avståndet av flera anledningar som presenteras nedan.

2.2.1 Geometrisk spridning

Från en punktkälla, till exempel en bil, sprids ljudet sfäriskt åt alla riktningar (figur 2, vänster). Energin bevaras i vågfronten men minskar i ljudnivån på grund av att det sprids till en större area, och för varje dubbling av avståndet minskar ljudnivån med 6 dB (Nilson et al. 2005). Om det är fler punktkällor, till exempel bilar utefter en väg, räknas det istället som en linjekälla och ljudet sprids cylindriskt (figur 2, höger). Vid en avståndsdubbling minskar ljudet med 3 dB (Nilson et al. 2005). Beroende på trafikflödet och vägsträckan utformning övergår linjekällan till en punktkälla vid tillräckligt stora avstånd, där en lång sträcka utan avbrutet trafikflödet och utan att vägen svänger ökar avståndet. Om exempelvis en motorväg låter 76 dB på 30 m avstånd skulle 1000 meters avstånd innebära fem fördubblingar av avståndet, vilket leder till att motorvägen skulle låta 61 dB om ljudet sprids cylindriskt och 46 dB om ljudet sprids sfäriskt.

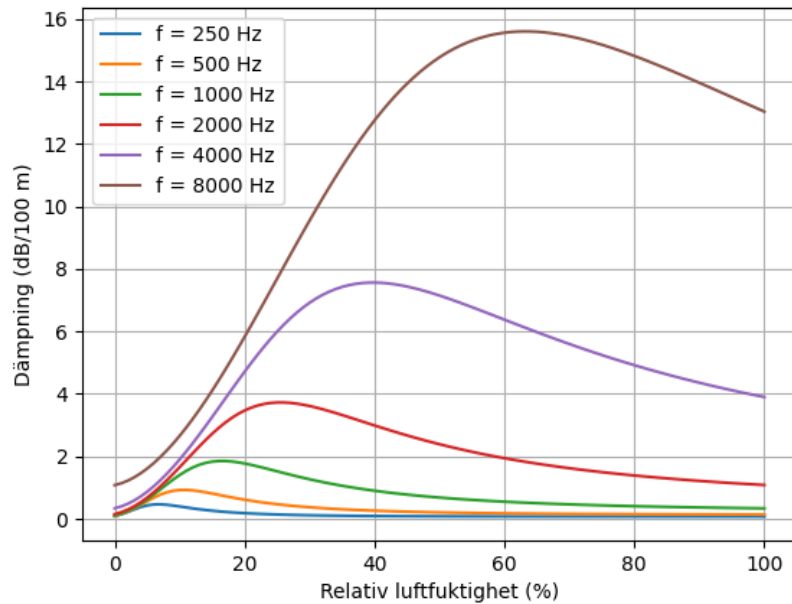


Figur 2: Geometrisk spridning från en punktkälla (vänster) och en linjekälla (höger). För punktkällan minskas ljudnivån med 6 dB för varje avståndsdubbling och linjekällan 3 dB per avståndsdubbling. Ljudkällorna är markerade med bilar.

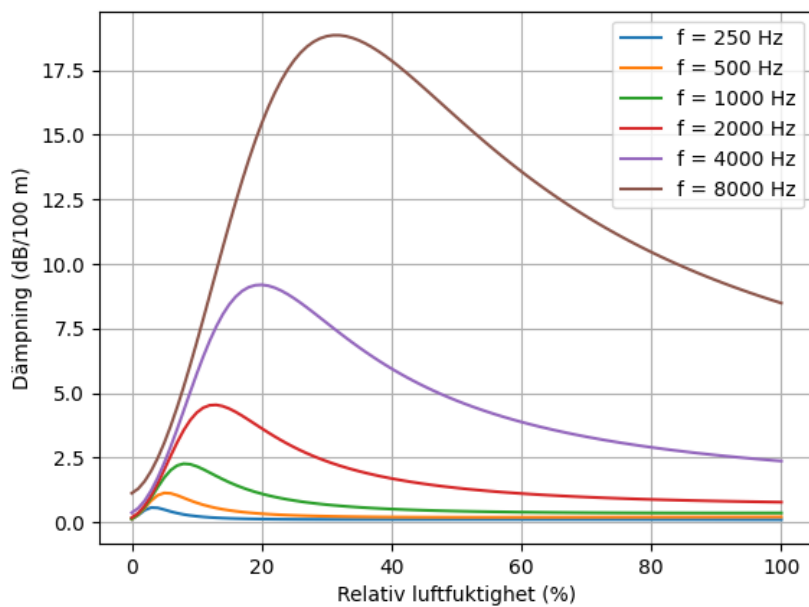
2.2.2 Atmosfärisk absorption

När ljudvågorna färdas genom luften absorberar luftens molekyler en del energi som går förlorad som värme (Larsson 1996). Vid längre avstånd blir den atmosfäriska absorptionen en viktig faktor för ljudnivåns dämpning, och olika frekvenser minskar olika mycket i styrka (Muphy & King 2014). I figur 3 och 4 visas hur mycket av ljudnivån som minskas på grund av atmosfärisk absorption vid 0 och 15 grader C. Det är främst höga frekvenser som förlorar energi eftersom de gör fler svängningar per avstånd än låga frekvenser. Atmosfärsdämpningen är anledningen till att högfrekventa ljud dämpas mer på avstånd och att en åskknall endast låter som ett dovt buller när den är långt borta fastän den låter som en knall när den är nära. Ljudstyrkan minskar på grund av

atmosfärisk absorption linjärt med avståndet, men påverkas också av luftfuktigheten och luftens temperatur. (Larsson, 1996). På 1000 meters avstånd minskar ljudnivån vid 1000 Hz med ungefär 4 dB (Muphy & King 2014).



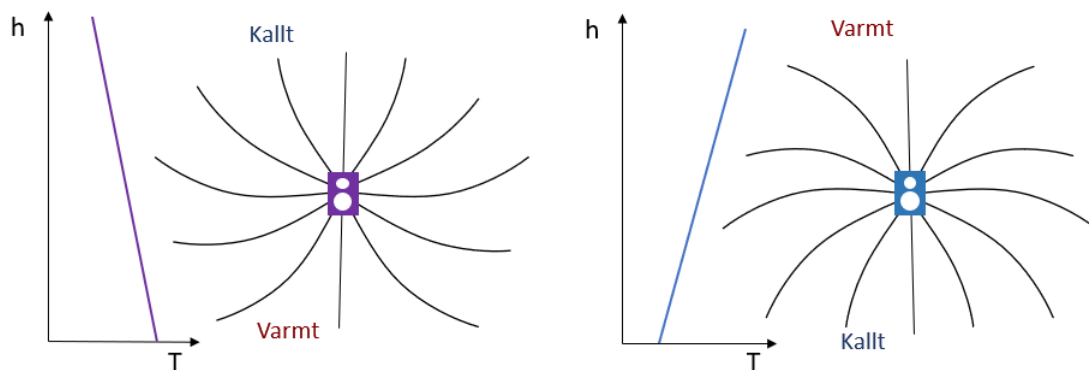
Figur 3: Dämpning i dB/100 m orsakat av atmosfärsabsorption för frekvenser mellan 250 Hz och 8000 Hz vid 0 °C.



Figur 4: Dämpning i dB/100 m orsakat av atmosfärsabsorption för frekvenser mellan 250 Hz och 8000 Hz vid 10 °C.

2.2.3 Refraktion

I en homogen atmosfär skulle ljudet spridas jämt i alla riktningar. I atmosfären finns dock temperatur- och vindgradienter som påverkar ljudets utbredning, vilket gör att ljudet böjs av och förstärks/försvagas på vissa områden (Salomons 2001). Detta kallas refraktion och vid avstånd på över 100 m blir det en viktig faktor att ta hänsyn till vid ljuduträkningar (Salomons 2001), men kan vara en viktig källa redan vid kortare avstånd såsom mellan vägar och hus. Ljudet färdas snabbare vid högre temperaturer (ekvation 1) vilket medför att när temperaturen är varmare vid marken och minskar med höjden, böjs ljudet uppåt (figur 5, vänster). Under dagtid och främst under sommaren är atmosfären instabil och ljudet på marknivå på avstånd blir mindre på grund av att ljudvågorna böjs uppåt. Vid en stabil atmosfär, alltså då temperaturen ökar med höjden, böjs ljudvågorna istället nedåt (figur 5, höger). En stabil atmosfär inträffar främst på nätter och medför att ljudet vid marknivån ökar (Salomons 2001).



Figur 5: Vänster: Ljudets utbredning där temperaturen minskar med höjden i atmosfären. Höger: Ljudets utbredning i en stabil atmosfär där temperaturen ökar med höjden. De svarta strecken som utgår från högtalaren i mitten föreställer ljudvågornas utbredning.

Ljudets utbredning påverkas också av vindgradienten då vindhastigheten ökar med höjden i atmosfären även vid tillfällen då det är vindstilla vid marknivån (Salomons 2001). En ökad vindhastighet gör att ljudet färdas snabbare i medvind och långsammare i motvind, vilket medför att ljudnivån vid markytan ökar vid medvind och minskar vid motvind. Effekten av vindgradienten är som starkast vid stabil skiktning och svagast vid instabil skiktning och kan skapa stora variationer av ljudnivån uppvind jämfört med medvinds (Salomons 2001).

2.2.4 Reflektion

Mot marken, väggar och andra ytor reflekteras ljudvågor, och hur mycket som reflekteras beror på vad för typ av yta. Vid en hård yta såsom asfalt eller vatten reflekteras nästan all energi i ljudvågen medan vid en porös och ojämn yta såsom gräs absorberas en del av energin (Salomons 2001). Detta medför att områden med mycket ytor som absorberar ljud ger en lägre ljudnivå, vilket gör att stora grönytor ger en tystare miljö än asfalterade ytor. Det reflekterande ljudet kan på grund av den längre färdvägen mellan ljudkällan och mottagaren orsaka både destruktiv interferens, alltså att

ljudvågorna försvagar varandra, och positiv interferens, alltså att ljudvågorna förstärker varandra (Salomons 2001). Över en hård markyta dominerar positiv interferens då ingen fasförskjutning sker, och markreflektionen kan ses som en till ljudkälla och förstärker ljudets låga frekvenser med cirka 6 dB och ljudets höga frekvenser med cirka 3 dB (Salomons 2001). Över en mjuk absorberande markyta sker däremot en fasförskjutning vilket innebär en negativ interferens för många frekvenser, även om det kan ske en positiv interferens för vissa frekvenser. Detta resulterar i en minskning av ljudnivå av den absorberande markytan (Salomons 2001).

2.2.5 Turbulens

I atmosfären orsakas små slumpartade rörelser i luften av turbulens. Dessa varar i sekunder till minuter och sker åt alla riktningar, vilket påverkar hur ljudvågorna färdas. Turbulensen kan både förstärka och försvaga ljudnivån och sprida ljudet till områden som annars skulle ligga i ljudskugga (Salomons 2001). Både den destruktiva och den positiva interferensen som sker vid markreflektion är till exempel inte lika stark på grund av turbulensen, eftersom de slumpartade luftrörelserna gör att ljudvågorna inte alltid tar ut varandra (Salomons 2001).

2.3 TRAFIKBULLER

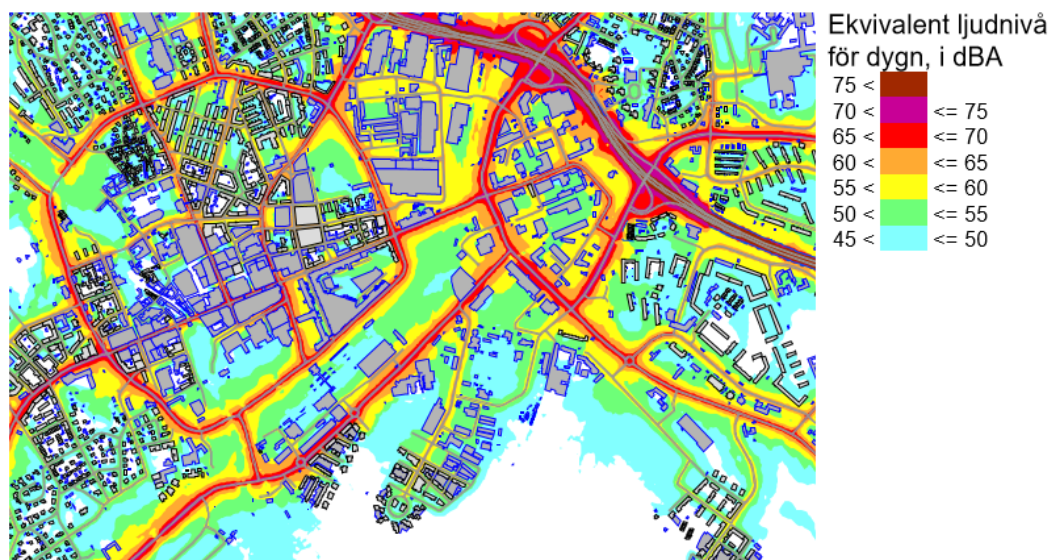
Det buller som uppstår från trafiken beror av flera faktorer, där de viktigaste är trafikmängd, hastighet, fordonstyp, vägtyp, vilka däck som används och körsätt (Trafikverket 2020a). Inom intervallet 30-70 km/h orsakar en hastighetsökning med 10 km/h en ökning av ljudnivån med ungefär 2 dBA, och ett tyngre fordon orsakar högre bullernivåer än lätta fordon (Trafikverket 2020a). Med elfordon minskar ljudnivån från motorn, men vid hastigheter över 30-50 km/h är det inte längre motorn som är den dominerande ljudkällan utan väg/däckljudet tar över (Trafikverket 2020a). För trafikbuller vid hastigheter 30-50 km/h är det frekvenserna mellan 630 och 1250 Hz som dominerar, med den högsta toppen vid 1000 Hz (Berge & Olsen 2021), (Olafsen & Killengreen 2021), och samma gäller för tung trafik i 90 km/h (Salomons 2001). För personbilar i 120 km/h är det de frekvenserna 1000 - 2000 Hz som dominerar, men toppen ligger även i detta fall på 1000 Hz (Salomons 2001).

2.3.1 Bullermått

I Sverige redovisas bullernivån med två mått, ekvivalenta ljudnivån över 24 timmar ($LA_{eq,24}$) och maximala ljudnivån (LA_{max}) (Trafikverket 2018). $LA_{eq,24}$ är den genomsnittliga ljudnivån över ett årsmedeldygn och ger en beskrivning av hur bullret låter under en längre tid, men ger ingen information av plötsliga höga ljud som kan vara störande. Därför används även L_{max} för att få information om de högsta bullernivåerna (Trafikverket 2018). Inom EU används istället L_{den} och L_{night} (Trafikverket 2020c). L_{den} är liknande $LA_{eq,24}$ då den räknar ut ekvivalent ljudnivå för ett dygn, men extra hänsyn tas till värden för kvällen och natten som adderas med 5 dB respektive 10 dB (Trafikverket 2020c). L_{night} redovisar den ekvivalenta ljudnivån nattetid (Trafikverket 2020c).

2.3.2 Bullerkartläggning

Bestämmelser om bullernivåer återfinns i plan- och bygglagen, miljöbalken och i förordningar (Boverket 2020). Vid behov ska bullernivåer redovisas i planbeskrivning till detaljplanen eller vid bygglovets nybyggnation, och miljöbalken styr att de redovisade nivåerna gäller vid tillsyn (Boverket 2020). Vid en förordning till miljöbalken anges riktvärden för bullernivåerna utomhus vid bostadsbyggnader (Boverket 2020). Bullermåtten anger riktvärden för $LA_{eq,24}$ vid fasader, och för uteplatser och bullerskyddad sida anges värden för $LA_{eq,24}$ och LA_{max} (Boverket 2020). I figur 6 visas ett exempel på hur en bullerkarta kan se ut och där $LA_{eq,24}$ har använts för att beskriva bullernivån. Strategiska bullerkartläggningar styrs av EUs bullerdirektiv som kräver att bullerkartläggningar och åtgärdsprogram ska genomföras var femte år för kommuner med fler än 100 000 invånare (Naturvårdsverket 2021). Ett normalt tillvägagångssätt vid en bullerkartläggning är att beräkna bullernivåerna, och enbart vid specialfall utförs mätningar (Trafikverket 2021).



Figur 6: Exempel på en bullerkartläggning (återpublicerad med tillstånd från ÅF ljud och vibrationer 2016).

SoundPLAN är en programvara för att beräkna bland annat trafikbuller. För att göra en beräkning krävs en beräkningsmodell, och det finns flera beräkningsmodeller för att beräkna bullernivåer utomhus. I Sverige används nordisk beräkningsmodell vid beräkning av vägtrafikbuller (Naturvårdsverket, Vägverket, Nordiska ministerrådet 1996). Det är en geometrisk spridningsmodell som modellerar ljudkällan som en punktkälla och beräknar spridningen genom att korrigera för geometrisk spridning och andra dämpande faktorer mellan källan och mottagaren. Resultatet redovisas i $LA_{eq,24}$ och LA_{max} . I Danmark används Nord2000 Road som beräkningsmodell, vilken bygger uträkningarna på en geometrisk strålningsmodell. Fler parametrar är möjliga att variera och den kan ta hänsyn till fler meteorologiska förhållanden än Nordisk beräkningsmodell. Uträkningarna är mer tidskrävande men ger resultatet i tersbandsnivåer (The Danish Environmental Protection Agency u.å.). Vid strategiska bullerkartläggningar ska Cnossos-EU användas (Larsson & Jonasson 2015). Cnossos-EU baseras också på en strålningsmodell likt Nord2000 men ger ljudnivån i oktavbandsnivåer (Kephalopoulos, Paviotti & Anfosso-Lédée 2012).

Gemensamt för alla modeller är att många parametrar behöver ställas in för att erhålla ett bra resultat. Trafikflöde av lätta och tunga fordon, hastighet, vägens placering i förhållande till lyssnaren, markyta och reflekterande föremål mellan lyssnaren och vägen såsom hus och bullerskärmar är några av parametrarna för nordisk beräkningsmodell (Naturvårdsverket, vägverket och nordiska ministerrådet, 1996). Till viss del går också de meteorologiska parametrarna att variera. I SoundPLAN med Cnossos-EU som beräkningsmetod är de förinställda meteorologiska parametrarna $T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p = 1013,3\text{ hPa}$ och $rh=70\%$, men går att anpassa till andra förhållanden.

2.4 FUNKTIONELLA VÄGKLASSER

Trafikverket har kategoriserat Sveriges vägar i 10 funktionella vägklasser beroende på hur viktiga vägarna är för det totala vägnätet. Klass 0 innebär de viktigaste vägarna och klass 9 de minst viktiga vägarna. Till vägklass 0 och 1 ingår europavägar, motorvägar och vägar som förbinder dessa med varandra. Vägklass 2 inkluderar nationella vägar med vägnummer under 100 men som inte ingår i vägklass 0 eller 1. Vägnummer 100-499 är vägar på regional nivå och inkluderas i vägklass 3, och i vägklass 4 ingår andra landsvägar som ofta har en hastighet på 90 km/h. Mindre landsvägar och större stadsgator ingår i vägklass 5 respektive 6. Övriga lokalgator, skogsvägar och småvägar som normalt inte trafikeras utom vid specialbehov ingår i vägklass 7-9 (Trafikverket 2020b).

2.5 LJUDINSPELNINGAR

Inspelade ljudfiler består av värden för ljudtryck, och dess upplösning bestäms av dess inspelningshastighet. En vanlig upplösning är 48000 Hz, alltså 48000 värden/s. Om ljudet presenteras i en kanal kallas det monoljud och upplevs komma framifrån. Om det istället är uppdelat på två kanaler är det ett stereoljud och ger en bredare ljudupplevelse. Genom amplitudskillnad och fasförskjutning mellan de två kanalerna går det att lokalisera var ljudet kommer ifrån (Chun & Kim 2016).

I tidsplanet presenteras ljudtryck som en variabel mot tiden. För att undersöka ljudets frekvenser behöver en transform utföras till frekvensplanet, vilket kan göras med snabb fouriertransform (Giannakopoulos & Pikrakis 2014). Ljudet presenteras då i ett spektrum som visar amplituden som funktion av frekvenserna, och det går att utläsa vilka frekvenser som är dominerande i ett ljud.

2.6 TIDIGARE AURALISERINGAR

Flera olika metoder har tillämpats för att skapa auraliseringar för vägtrafiken (Forssén et al. 2009; Finne Fryd 2016; Thomas et al. 2016; Fu & Murphy 2018). En gemensam faktor hos de tidigare varianterna är att de är beräkningstunga och tidskrävande. Vissa metoder har helt skapat ett syntetiserat ljud som ska föreställa en bilpassage medan andra metoder är baserade på inspelningar av vägtrafiken. Fu och Murphy (2018) har sammanfattat flera auraliseringar baserade på syntetiserade ljud och kategoriserat dem i mikroskala, mesoskala och makroskala. I mikroskala och mesoskala auraliseras varje bilpassage för sig, i mikroskala i en så pass detaljerad nivå att till exempelvis växel och typ av däck kan urskiljas medan mesoskala inte är lika detaljerad. Makroskalan auraliserar en väg som en linjekälla istället för enskilda bilar, och fungerar för att ge ett bakgrundsljud på långt avstånd. Auraliseringar på mikroskalan och mesoskalan

är mycket beräkningstunga, men de på makroskalan är betydligt snabbare att beräkna. De har också föreslagit en auraliseringsmetod som använder trafikljud skapat i mesoskala, och använder dopplereffekt, avståndsdämpning och markdämpning för att dämpa för den specifika platsen. Atmosfärsdämpning, turbulens och skärmning av byggnader och växter inkluderas inte. Auralisering i mesoskala ansåg de vara en bra avvägning för bibehållen flexibilitet men inte allt för beräkningstung. (Fu & Murphy 2018).

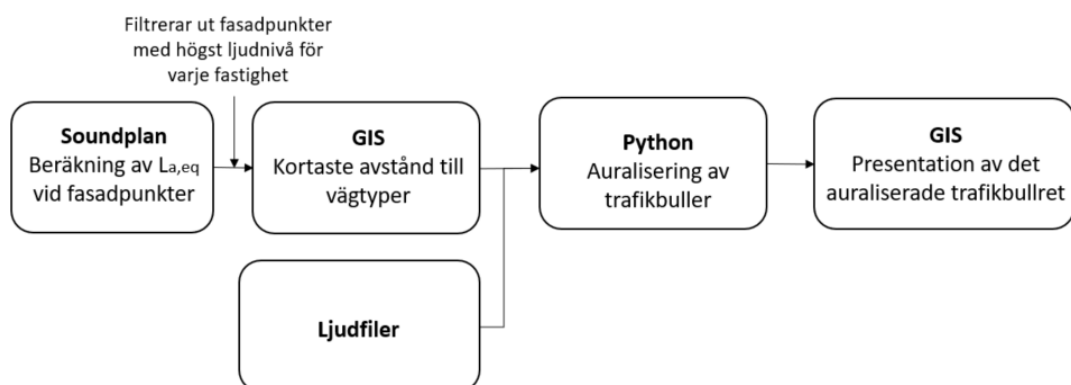
Finne och Fryd har gjort stora framsteg vad det gäller auralisering med inspelade trafikljud. De använde ett objekt format som ett huvud och en kropp, där två mikrofoner var placerade på var sida av huvudet. Med den spelade de in flera bilpassager av olika fordonstyper i en tyst omgivning för att undvika störande bakgrundsljud. Från SoundPLAN användes bullermodeller över området och trafikbullrets spridning beräknades med Nord2000. Varje inspelad bilpassage delades in i tidsintervall med överföringsfunktionen för den sträckan, och bilpassagerna kombinerades för att erhålla en trafikmix som skulle passa in i området. Beroende på typ av område användes passande bakgrundsljud för att få det mer verkligt. Kalibreringsmetoden de använde för att lyssnaren skulle ställa in rätt ljudvolym var att lyssnaren först skulle lyssna på ett inspelat samtal och anpassa ljudnivån till normal samtalsnivå. Mycket manuellt arbete krävs för auraliseringen och den är dyr att använda, men många förbättringar finns för att få den mer kostnadseffektiv. (Finne Fryd 2016)

Även Thomas et al. (2016) baserade auraliseringarna på inspelat trafikbuller för att få med alla naturliga bakgrundsljud som annars saknas i det syntetiserade trafikbullret. Ljudet spelades in med en klot med 32 mikrofoner som kunde fånga upp ljudet från olika riktningar, och genom att vikta ljudet och frekvensinnehållet från mikrofonerna erhöles en modell för att efterlikna huvudet. Med tre olika beräkningsmetoder, ISO 9613-2, Pierce's barrier diffraction model och Harmonoise model, dämpades ljudet när det färdades över en L-formad vall. Fokus på auraliseringen var enbart på dämpningen över en vallen och inga andra fall. Genom ett lyssningstest visades det att det var svårt att skilja auraliseringen från riktigt trafikbuller för det exempel som de hade skapat. (Thomas et al. 2016)

Redan år 2009 gjorde Forssén et al. (2009) auralisering av enstaka bilpassager där även den psykoakustiska delen undersöktes. Auraliseringen gjordes för två ljudkällor, dels motorn, avgasrör, luftintag med mera där ljudkällan låg på 0.3 m höjd, dels väg/däckljud som låg på 0.01 m höjd. Vid beräkning av ljudets spridning och avtagande beräknades geometrisk spridning, atmosfärsdämpning och markdämpning i 1/3 oktavband i frekvensplanet, och en modell för hur huvudet och kroppen dämpar ljudet (HRTF) och dopplereffekten beräknades i tidsplanet. Ljudfilerna baserades på inspelningar av en rak bilpassage i en monofil. Lyssningstestet undersökte hur verkligt auraliseringen uppfattades, om det gick att höra skillnad mellan den och en riktig inspelning och om den uppfattades som lika störande som ett riktigt vägljud. Hörlurarna som användes vid lyssningstestet var redan kalibrerade vid testets start. Resultatet visade att auraliseringarna lät realistiska och var svåra att skilja från verkliga inspelningar, men vid lägre hastigheter hördes det ändå en skillnad. Det auraliserade ljudet uppfattades i vissa fall som mer störande. Användningen av HRTF och hur det påverkar upplevelsen av trafikbullret har också Fu och Murphy (2018) undersökt och deras resultat visade på att trafikbullret upplevs som skarpare när det lyssnas på i hörlurar.

3 METOD

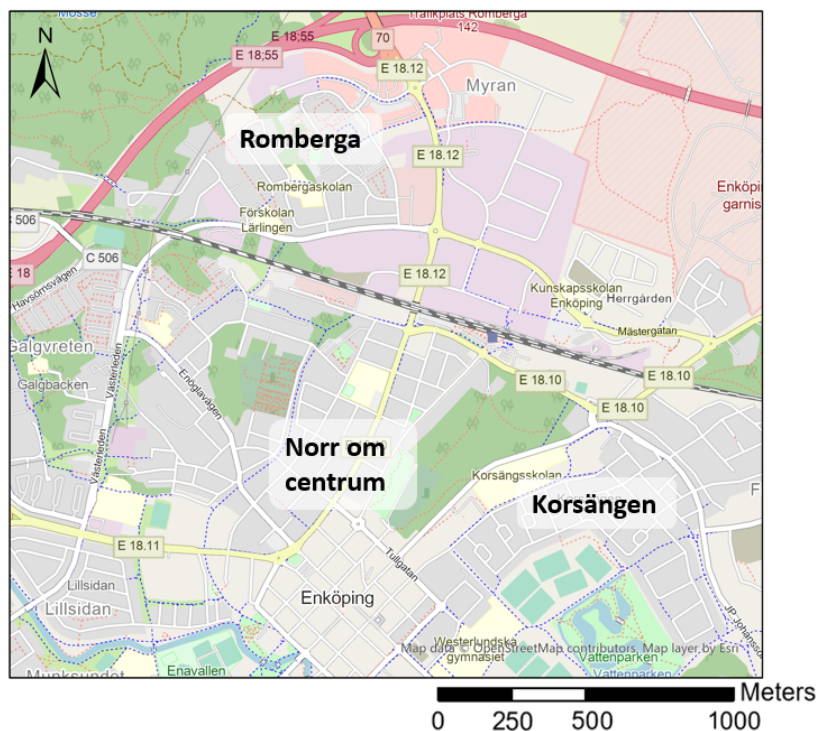
För att kunna applicera auraliseringar på flera typer av bullerkartläggningen utvecklades en metod som enbart var beroende på avståndet och den totala ljudnivån $LA_{eq,24}$. De meteorologiska parametrarna kunde varieras om det önskades, men de hölls konstanta som en standardberäkning vid en bullerkartläggning. Med trafikinspelningar för fyra olika vägar kunde auraliseringen beräknas för husfasader i en stad. Den totala ljudnivån baserades på resultat från SoundPLAN. I figur 7 visas den övergripande metoden för auraliseringen.



Figur 7: Övergripande metod för auraliseringen.

3.1 OMRÅDESBESKRIVNING

I projektet har tre områden i Enköping undersökts, se figur 8. Det ena området var runt Romberga och valdes då det ligger i närheten av en motorväg och andra större gator, och metoden kunde utvärderas för hur väl den kunde auralisera större vägar. Det andra området som undersöktes var Korsängen som är ett villaområde på större avstånd till stora vägar. Vid Korsängen kunde lyssningsexemplen utvärderas för hur väl lugna områden kunde auraliseras. Även trafikbuller för området norr om Enköping centrum auraliserades för öka mängden auraliseringspunkter och undersöka hur modeller klarar av större skalor.



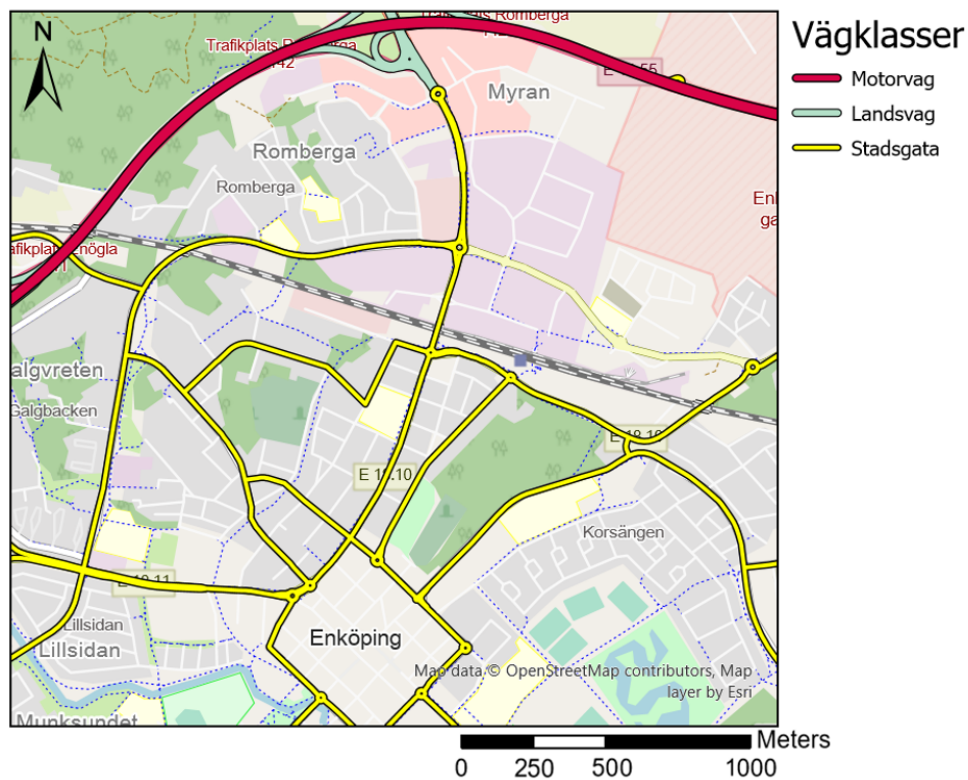
Figur 8: De undersökta områdena i Enköping som inkluderar Romberga, Korsängen och Norr om centrum.

3.2 VÄGFILER OCH KLASSNING

Metoden för auraliseringarna byggde på trafikverkets funktionella klasser, som användes för att klassificera vägarna i klasserna *motorväg*, *landsväg*, *stadsgata* och *lokalgata*. Från trafikverkets tjänst lastkajen (u.å) hämtades en geodatabas innehållande trafiknätet för Uppland, där vägarna hade information om vilken funktionell vägklass de tillhörde. Trafikverkets funktionella vägklasser delades in i följande vägklasser för detta projekt:

- Motorväg inkluderar de vägar med trafikverkets funktionella vägklasser 0.
- Landsväg inkluderar de vägar med trafikverkets funktionella vägklasser 1, 2, 3 och 4.
- Stadsgata inkluderar de vägar med trafikverkets funktionella vägklasser 5 och 6.
- Lokalgata inkluderar de vägar med trafikverkets funktionella vägklasser 7, 8 och 9.

Uppdelningen visas i figur 9 där motorväg, landsväg och stadsgata är markerade i Enköping. Alla övriga vägar tillhör kategorin lokalgata.



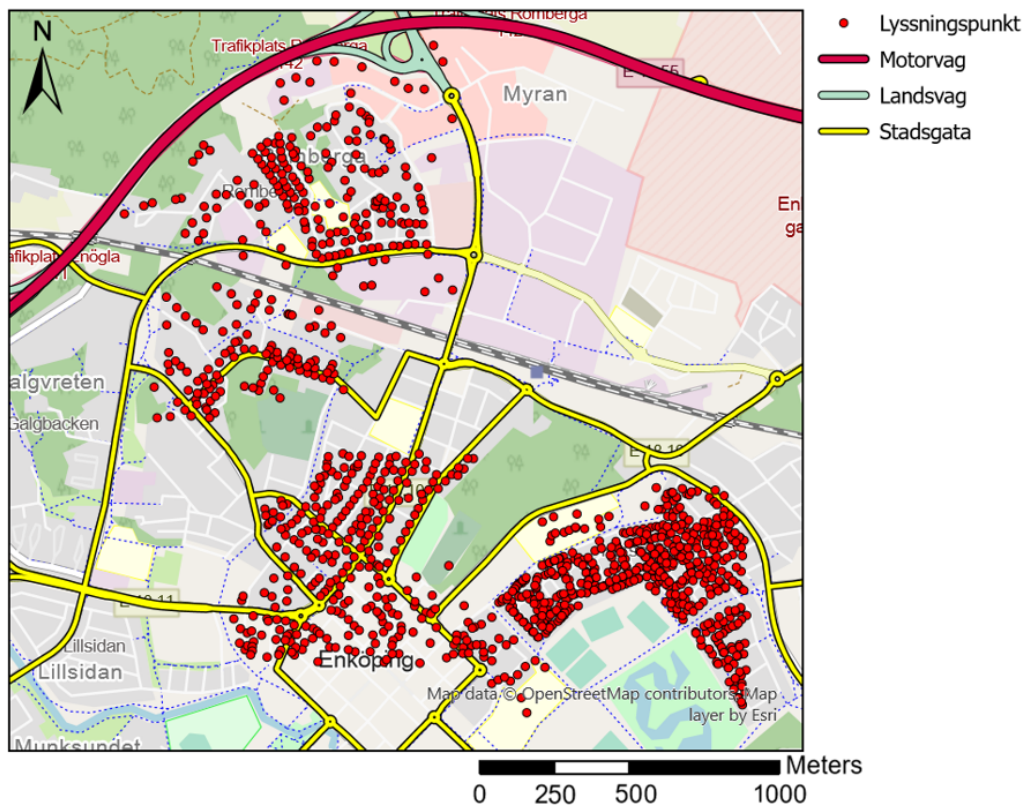
Figur 9: Uppdelning av vägnätet i vägklasserna motorväg, landsväg och stadsgata. Omarkerade gator klassificeras som lokalgator.

3.3 SOUNDPLAN

I SoundPLAN beräknades ljudnivån vid byggnaders fasader genom att trafikflöden ställdes in på alla vägar. De beräknade ljudnivåerna användes som exempel för att testa modellen och enbart uppskattade trafikflöden ställdes in. I detta projekt användes Cnossos-EU som beräkningsmetod, men auraliseringsmetoden går lika bra att använda med andra beräkningsmetoder då den enbart beror av den slutgiltiga ljudtrycksnivån. Från SoundPLAN kunde ett resultat exporteras som innehöll ett specifikt husnummer, fasadnummer, x- och y-koordinater för fasadpunkterna och LA_{eq} .

3.4 GIS

Till ArcGIS Pro importerades resultatet från SoundPLAN, men med en filtrering för att enbart behålla den fasadpunkt med högst ljudnivå för varje hus för att minimera datamängden. För varje fasadpunkt beräknades avståndet till den närmaste väg klassificerad som motorväg och som låg inom 1000 m, närmaste väg klassificerad som landsväg inom 500 m och närmaste väg klassificerad som stadsgata inom 300 m. Dessa avstånd benämns fortsättningsvis som sökradie, och användes för att beräkna avståndet till de vägar som skulle ge störst bullerpåverkan. Om det inte fanns en väg inom en vägklassen inom det sökta avståndet till en fasadpunkt markerades avståndet istället som -1 och den vägklassen exkluderades för beräkning vid den fasadpunkten. Lokalgator antogs det alltid finnas i närheten av fasaderna så inget avstånd beräknades till dem. I figur 10 visas de fasadpunkter som en auralisering beräknades för, totalt 1116 fasadpunkter.



Figur 10: Markering av de punkter som har högsta fasadvärdet för LA_{eq} och där trafikbullret skulle auraliseras.

3.5 DÄMPNING

Den dämpning som beräknades var atmosfärsdämpning, geometrisk spridning, avståndsbaserad extradämpning och dämpning av totalnivån för att uppfylla resultatet från SoundPLAN.

3.5.1 Uträkning av atmosfärsdämpning

Dämpning av ljudets frekvenser beräknades med ekvationer från ISO 9613-1:1993. Dämpningen beror av frekvens, temperatur, relativa luftfuktighet och lufttryck, och ger en dämpning i dB/m. Ekvationerna är följande:

Förhållandet mellan det omgivande atmosfärstrycket i hPa och referenstrycket p_{ref} på 1013.225 hPa räknas ut och benämns p_r :

$$p_r = \frac{p_{omgivning}}{p_{ref}} \quad (5)$$

Det mätade ångtrycket p_{sat} beräknas enligt

$$p_{sat} = 10^{-6.8346 \cdot (T_{01}/T)^{1.261} + 4.6151} \quad (6)$$

där $T_{01} = 237.16$ K och är trippelpunkten för vatten och T är den omgivande temperaturen i K. Med det mätade ångtrycket kan den specifika luftfuktigheten (h) i kg/kg

beräknas enligt

$$h = rh \cdot \frac{p_{sat}}{p_{omgivning}} \quad (7)$$

där rh är den relativa luftfuktigheten i omgivningen.

För att skriva ekvationerna på samma form som iso-standardens beräknades relaxionsfrekvensen för syre (fr_O) och för kväve (fr_N), vilken beror av lufttrycket, temperaturen och den specifika luftfuktigheten. Relaxionsfrekvensen för (fr_O) beräknades med ekvation 8 och för (fr_N) med ekvation 9, där $T_0=273.15$ K.

$$fr_O = pr \cdot (24 + 40400 \cdot h \cdot \frac{0.02 + h}{0.391 + h}) \quad (8)$$

$$fr_N = pr \cdot \frac{T^{-1/2}}{T_0} \cdot (9 + 280 \cdot h \cdot \exp(-4.17 \cdot (\frac{T^{-1/3}}{T_0} - 1))) \quad (9)$$

Konstanterna $b1$ och $b2$ införs i ekvation 10 och 11 för att förenkla beräkningen av atmosfärsdämpningen.

$$b1 = 0.1068 \cdot \exp\frac{-3352/T}{fr_N + f^2/fr_N} \quad (10)$$

$$b2 = 0.01275 \cdot \exp\frac{-2239.1/T}{fr_O + f^2/fr_O} \quad (11)$$

Det slutgiltiga atmosfärsdämpningen α i dB/m kan då beräknas med ekvation 12

$$\alpha = 8.686 \cdot f^2 \cdot (\frac{T}{T_0})^{1/2} \cdot (1.84 \cdot \frac{10^{-11}}{pr} + (\frac{T}{T_0})^{-3} \cdot (b1 + b2)) \quad (12)$$

och vara applicerbar på alla ljudfiler i beräkning i frekvensplanet för frekvenser mellan 50 och 10000 Hz.

3.5.2 Uträkning av geometrisk spridning

Dämpningen som orsakades av den geometriska spridningen beräknades i tidsplanet genom att använda relationen mellan ljudtrycksnivån vid inspelningspunkten och ljudtrycksnivån för den beräknade punkten. Eftersom ljudtrycket i kvadrat är omvänt proportionellt mot avståndet (Nilson et al. 2005) kunde följande ekvation härledas:

$$p_{mottagare} = p_{inspelning} \cdot \sqrt{\frac{x_{inspelning}}{x_{mottagare}}} \quad (13)$$

där $p_{mottagare}$ är ljudtrycket på det beräknade avståndet från ljudkällan, $x_{inspelning}$ är avståndet mellan ljudkällan och inspelningen och $x_{mottagare}$ är avståndet från ljudkällan till mottagaren.

3.6 LJUDUTBREDNING

3.6.1 Ljudfiler

För varje vägklass fanns en inspelad trafikljudfil som representerade trafikflödet. För motorvägen användes en inspelning gjord av Efterklang (Friman, 2015) från Värmdöleden inspelat på 30 m avstånd på en sträcka med 90 km/h och uppskattad årsdygnstrafik till 53000. Stadsgatan spelades in på 10 m avstånd på en vägsträcka med 50 km/h och där flera bilpassager kunde höras, men varje enskild passage kunde ändå urskiljas. Lokalgatan spelades in på en lokalgata med hastighetsbegränsningen 30 km/h, också på 10 m avstånd. Både stadsgatan och lokalgatan spelades in med inspelningsutrustning av låg kvalitet vilket påverkar upplevelsen av det auraliserade trafikbullret. För landsvägen saknades det en inspelning, men metoden utformas för att även landsvägen ska kunna användas i auraliseringen.

Utöver de inspelade ljudfilerna användes också en ljudfil med ett förklarande samtal och en ljudfil med fågelljud. Samtalet hade flera funktioner, dels som referenspunkt för kalibrering av ljudnivån men också för att förklara för lyssnaren vad den skulle tänka på när den lyssnade på den slutgiltiga auraliseringen. De 9.5 första sekunderna av auraliseringen var det enbart samtalet som skulle höras för att ge lyssnaren möjlighet att ställa in ljudnivån till en normal samtalsvolym. Samtalet fortsatte sedan när även trafikbuller och fågelljud hördes för att lyssnaren skulle kunna bedöma hur störande trafikbullret var. Fågelljudet spelades in i en skogsdunge i Enköping precis i utkanten av ett bostadsområde. På inspelningen hörs en nötväcka, en koltrast och en blåmes. Denna ljudfil användes som bakgrundsljud till de andra vägfilerna för att skapa dynamik och också för att kunna ge lyssnaren någonting att jämföra bullernivån mot utöver samtalet.

Ljudfilerna var i WAV-format och hade en samplingsfrekvens på 48 000 Hz. Dessa bearbetades med Python i både tidsplanet och i frekvensplanet. Ljudfilen för motorväg, landsväg och stadsgatan var i mono, och bakgrundsljuden lokalgata, fågelljud och samtal var i stereo. Ljudfilerna från motorvägen, landsvägen och stadsgatan gjordes om till stereo innan de andra filerna adderades till ljudmixen genom att dubblera antalet kanaler utan fasförskjutning eller amplitudskillnad. Det gav samma ljud på höger och vänster kanal från de tidigare monofilerna, och gjordes för att kunna ha alla ljudfiler i samma ljudmix. Anledningen till den slutgiltiga auraliseringen gjordes om till stereo var för att få ett mer dynamiskt ljud från bilpassagen på lokalgatan då den kan höras passera från höger till vänster. Den totala ljudnivån påverkades inte av att kanalerna dubblerades.

3.6.2 Kalibrering av ljudnivån

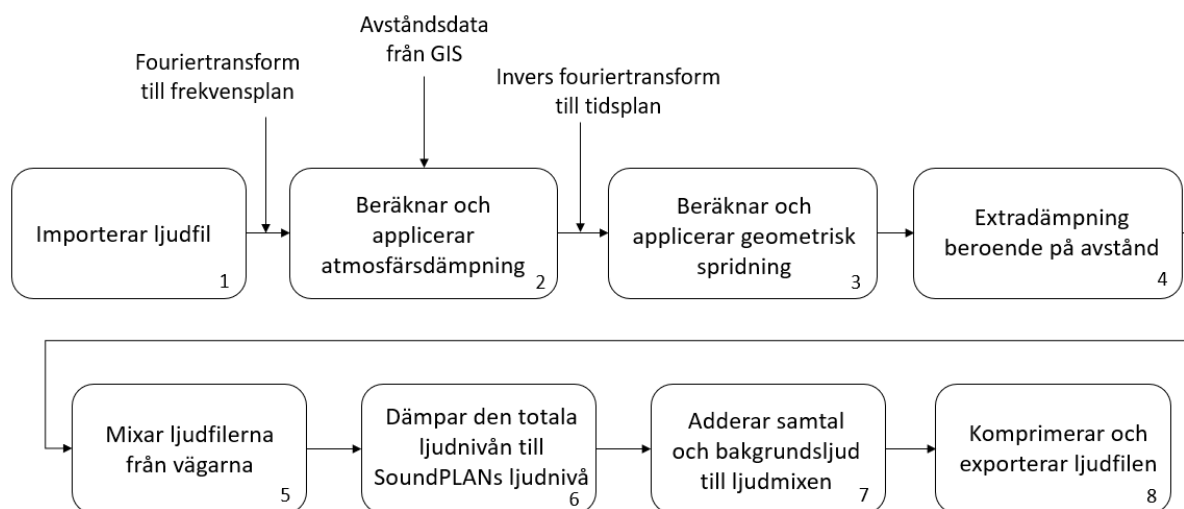
Ljudfilen med samtalet antogs vara $L_{max} = 60$ dBA och användes som referenspunkt vid kalibreringen av ljudnivån. Motorvägens ljudnivå innan dämpning var 76 dB, landsvägen var $L_{max} = 74$ dBA, stadsgatan var $L_{max} = 72$ dBA, lokalgatan var $L_{max} = 55$ dBA och fågelljudet var $L_{max} = 50$ dBA.

3.6.3 Auralisering

För varje punkt markerad i figur 10 beräknades en auralisering av trafikbullret. Detta gjordes enligt processen i figur 11, där den övre raden beskriver processen för varje

trafikljudfil och den nedre raden beskriver hur flera ljudfiler mixas för att ge en korrekt ljudmix för platsen.

Efter att en trafikljudfil importerats i Python (figur 11, ruta 1) omvandlas den från tidsplanet till frekvensplanet med en fouriertransform. Med hjälp av avstånden mellan fasadpunkten och den specifika vägen som beräknades i GIS kunde atmosfärsdämpningen appliceras för att dämpa främst de höga frekvenserna (figur 11, ruta 2). Med en invers fouriertransform transformerades väg ljudet åter till tidsplanet och den geometriska spridningen kunde beräknas och appliceras för att ytterligare dämpa ljudnivån (figur 11, ruta 3). Denna process applicerades på ljudfilen från respektive vägtyp som låg inom sökradien för fasadpunkten, och mixades ihop till en ny ljudfil innehållande de aktuella vägarna (figur 11, ruta 5).



Figur 11: Mer detaljerad metod för auraliseringen.

Eftersom det fanns fler dämpande faktorer än enbart atmosfärsdämpning och geometrisk spridning, så som markdämpning och avskärmning från andra hus, erhöles inte ett tillräckligt låg ljudnivå. För att kompensera för den ofullständiga dämpningen användes resultatet för den totala ljudnivån uträknad i SoundPLAN (figur 11, ruta 6). Ljudnivån för auraliseringen dämpades till den nya ljudnivån genom att med ekvation 3 beräkna relationen mellan den nya och den gamla ljudnivån:

$$\Delta L = L_{ny} - L_{gammal} = 20 \cdot \log\left(\frac{p_{ny}}{p_{ref}}\right) - 20 \cdot \log\left(\frac{p_{gammal}}{p_{ref}}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{p_{ny}}{p_{gammal}}\right) \quad (14)$$

där ΔL är skillnaden i ljudnivå, L_{ny} är den nya ljudnivån från SoundPLAN och L_{gammal} är den gamla ljudnivån för auraliseringen. Från ekvation 14 isolerades p_{ny} för att beräkna den faktorn som det gamla auraliserade ljudtrycket behövdes multipliceras med enligt ekvation 15:

$$p_{ny} = 10^{\Delta L/20} \cdot p_{gammal} \quad (15)$$

där p_{ny} blir det nya ljudtrycket för den auraliserade ljudnivån. Denna metod användes enbart för minska ljudnivån och användes alltså inte för att öka ljudnivån. Detta för att riktiga ljudnivån oftast inte är högre än den auraliserade då enbart atmosfärsdämpningen och geometriska spridningen hade tagits hänsyn till. Undantagsfall finns dock när ljudet färdats över reflekterande ytor såsom asfalt, men den positiva interferensen från reflekterande ytor bedömdes dock vara mindre än dämpningen från andra byggnader och valdes därför att bortses ifrån. Det är också möjligt att den uträknade ljudnivån är högre från SoundPLAN än de auraliserade vägarna på grund av lokaltrafiken.

I de fall som fasadpunkterna förekommer inne i bostadsområden längre ifrån motorvägar, landsvägar och stadsgator kommer den totala ljudnivån uträknat i SoundPLAN att återspegla ljudnivån av lokalgatorna, eftersom de då är den högsta ljudkällan. Att enbart dämpa ljudmixen från de större vägarna är av den anledningen inte tillräckligt och en extradämpning behövde göras (figur 11, ruta 4). Från en diskussion med akustiker inom samhällsbuller bestämdes extradämpningen för motorvägen och landsvägen till -5 dBA för de fasadpunkter inom 200-399 m från motorväg eller landsväg och -10 dBA för de fasadpunkter på större avstånd än 300 m. För stadsgatan bestämdes värdena till -5 dB för avståndet 100 - 199 m och -10 dB för avstånd över 200 m. Detta ger en grov uppskattning av den dämpningen som uppstår av bland annat skärmande hus mellan fasadpunkten och vägen och bidrar till ett mer rättvisande lyssningsexempel.

När en ljudmix hade skapats där de enskilda ljudfilerna hade dämpats med atmosfärsdämpning, geometrisk spridning och extradämpning, och den totala ljudnivån hade dämpats till SoundPLANs ljudnivå, adderades bakgrundsljud till ljudmixen (figur 11, ruta 7). Den färdiga auraliseringen komprimerades för att ta mindre lagringsplats och exporteras (figur 11, ruta 8) för att kunna laddas upp till en karta. Pythonskripten för figur 11 finns i bilagorna, där beräkningarna för atmosfärsdämpningen och geometriska spridningen finns i bilaga A och övriga processen i bilaga B.

3.6.4 Avgränsningar av vägtyper i ljudmixen

För att minimera beräkningstiden användes inte alltid alla tre vägklasser motorväg, landsvägen och stadsgata vid auraliseringen även då de alla ingick inom sökradien från fasadpunkten. Om det finns en motorväg nära bostaden och en stadsgata långt ifrån fastän den var inom sökradien, skulle bullret från motorvägen dominera och ljudet från stadsgatan skulle inte höras lika tydligt. En prioritetsordning utvecklades därför enligt följande punktlista.

- Om det fanns en motorväg inom sökradien var den alltid med i ljudmixen
- Om det fanns en landsväg inom sökradien och den var på samma avstånd eller närmre än motorvägen inkluderades det i ljudmixen
- Om det fanns en stadsgata inom sökradien och den låg på samma avstånd eller närmre än motorvägen och landsvägen inkluderades den i ljudmixen.

Om det enbart fanns en vägtyp inom begränsningen var den alltid med i ljudmixen, prioritetsordningen gällde alltså bara då det fanns flera vägar inom avgränsningen. I de fall det inte fanns någon väg inom avgränsningen bestod ljudmixen av bakgrundsljud och samtal.

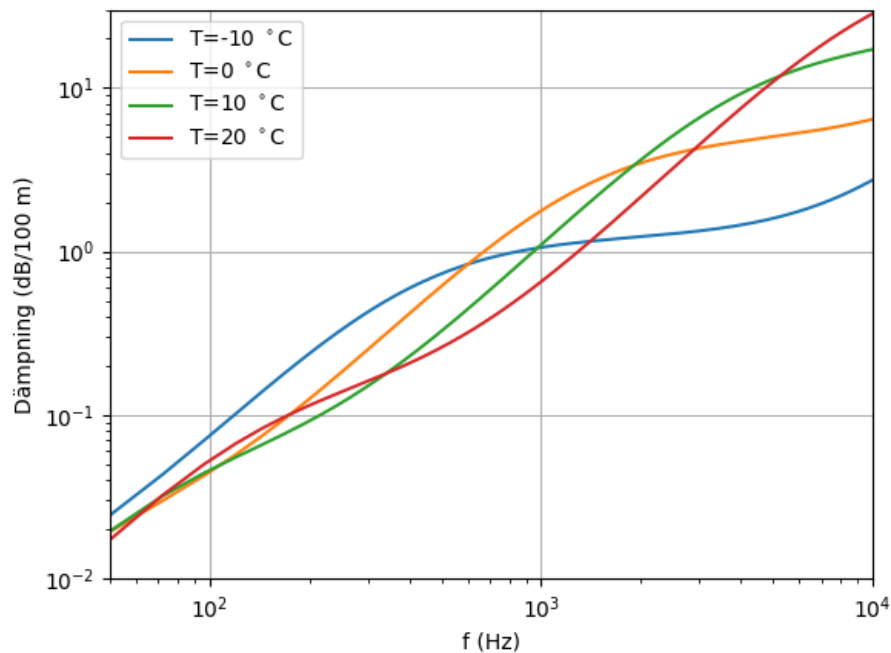
3.6.5 Tillgänglighet

Eftersom det blir många punkter i en storstad att skapa auraliserat trafikbuller för var det av stor vikt att auraliseringsprocessen inte skulle vara för tidskrävande. Beräkningarna utfördes på en bärbar dator med Windows 10 64bit med processorn Intel(R) Core(TM) i7-7820HQ, 2.9 GHz och 32 GB installerat RAM-minne. Genom att ta tid på auraliseringen av trafikbullret på alla fasadpunkter och räkna ut medeltiden per auralisering kunde det bedömas om det var en rimlig tid. Ljudfiler i Wav-format är relativt stora och tar upp mycket lagring, så för att minska lagringskapaciteten konverterades de till mp3-format med datahastigheten 112 kilobit per sekund.

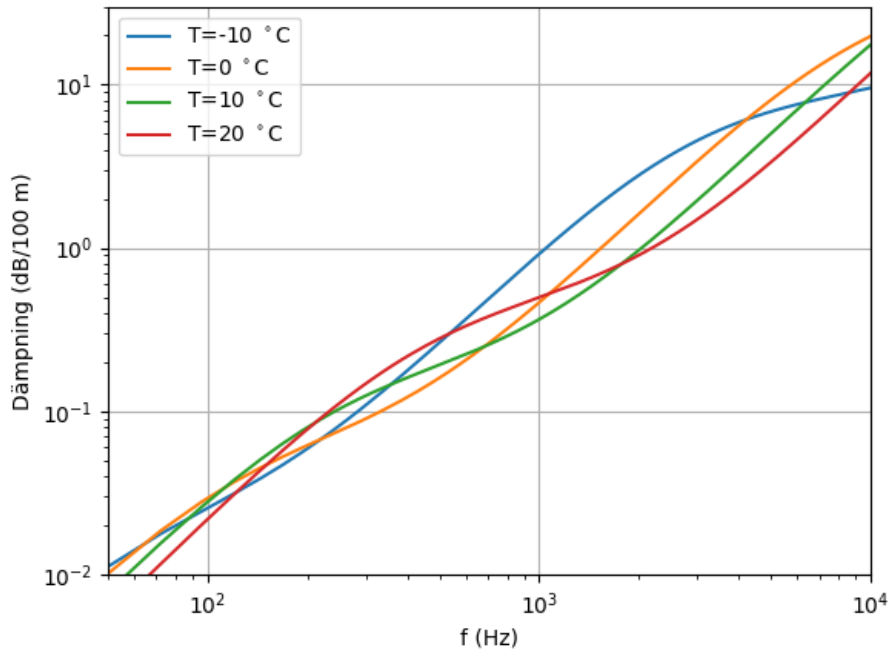
4 RESULTAT

Atmosfärsdämpningen som beräknades med ekvation 5 - 12 visas i figur 12 då den relativa luftfuktigheten (rh) var 20 % och i figur 13 när rh var 70 %. Vid frekvenser under 1000 Hz är dämpningen försumbar, men vid högre frekvenser påverkas ljudet mer. När den relativa luftfuktigheten var 20 % (figur 12) dämpas de höga frekvenserna mer vid högre temperaturer, men när den relativa luftfuktigheten var 70 % (figur 13) dämpas de höga frekvenserna mer vid låga temperaturer. Vid 1000 Hz, 10 °C och $rh=20$ % dämpas ljudet med 1 dB/100 m, men vid $rh=70$ % dämpas ljudet enbart med 0.4 dB/100 m. Den högsta dämpningen för 1000 Hz sker vid nollgradig temperatur vid $rh=20$ %, och vid $rh=70$ % är det vid -10 °C som den största dämpningen sker.

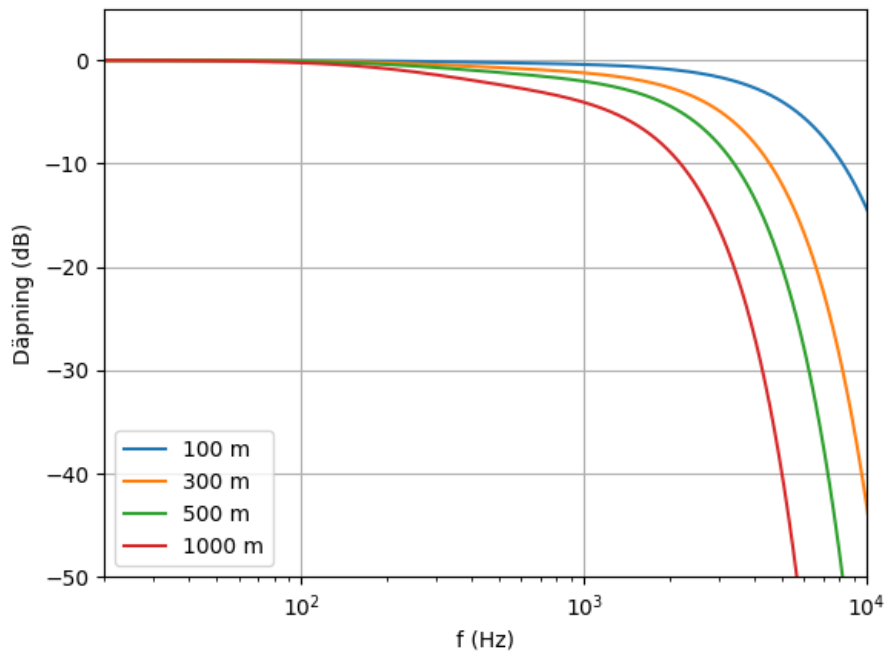
Atmosfärsdämpningen med de meteorologiska parametrarna inställda enligt projektet redovisas i figur 14. Det är främst de höga frekvenserna som påverkas, men på 1000 m avstånd har även frekvenserna runt 1000 Hz dämpats en del.



Figur 12: Atmosfärsdämpning vid temperaturer mellan -10 °C och 20 °C när den relativa luftfuktigheten är 20 %.



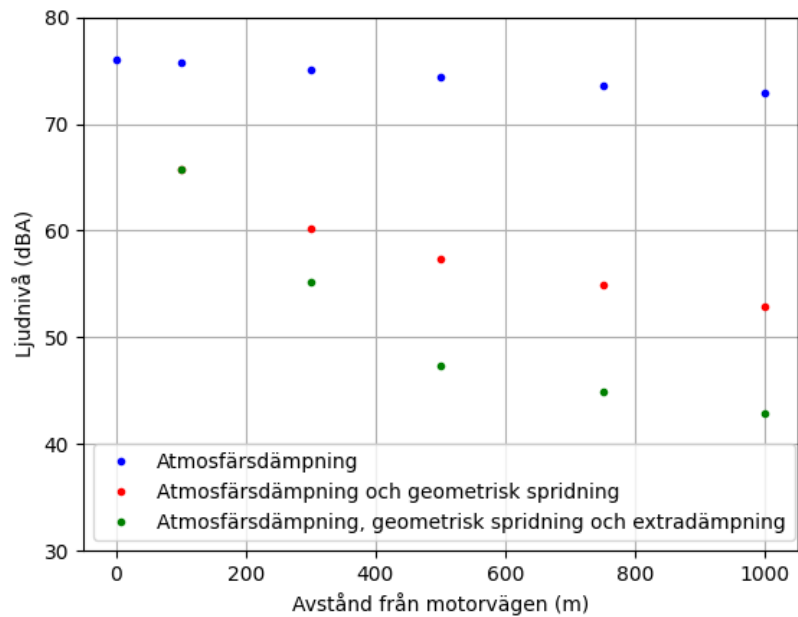
Figur 13: Atmosfärsdämpning vid temperaturer mellan -10 °C och 20 °C när den relativa luftfuktigheten är 70 %.



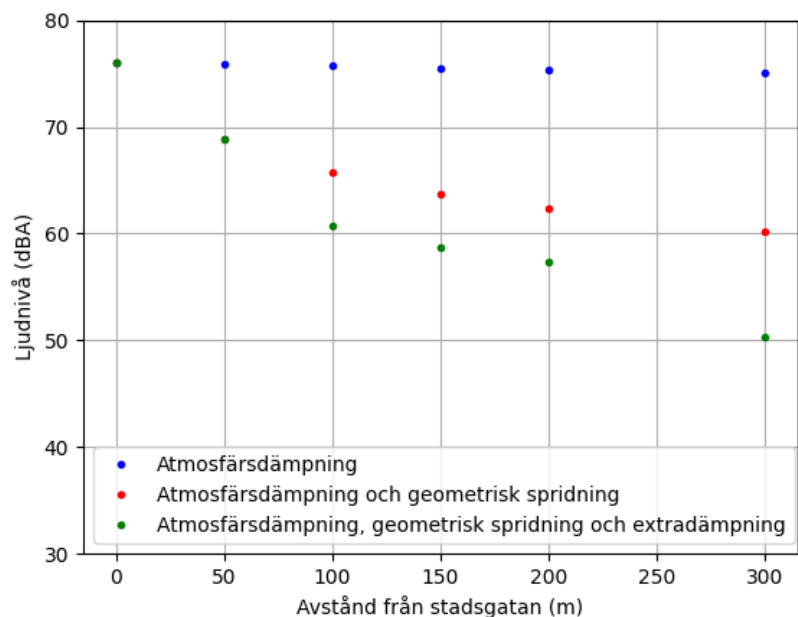
Figur 14: Atmosfärsdämpningen beräknad med temperaturen 10 °C, relativa luftfuktigheten 70 % och lufttrycket 1013 hPa. Dämpningen för varje frekvens visas för avstånden 100 - 1000 m.

Enbart atmosfärsdämpning gav ingen större påverkan på den totala ljudnivån (figur 15 och 16), men när den geometriska spridningen också beräknades gav det större effekt på den totala ljudnivån. I figurerna 15 och 16 visas också resultatet av den extradämpning som sker för att kompensera för den dämpning som inte ingår i atmo-

sfärddämpningen eller geometriska spridningen. Motorvägen och stadsgatan dämpas ungefär lika mycket, det enda som skiljer är att ljudnivån nära vägen är högre vid motorvägen. Den största minskningen av ljudnivån sker nära ljudkällan, men när den extra dämpningen appliceras minskar ljudnivån på längre håll också snabbare än när bara atmosfärsdämpningen och geometriska spridningen beräknas. Skalan på x-axeln i figur 15 och 16 har anpassats till sökradien som används för att inkludera vägarna i auraliseringarna och är därmed olika.



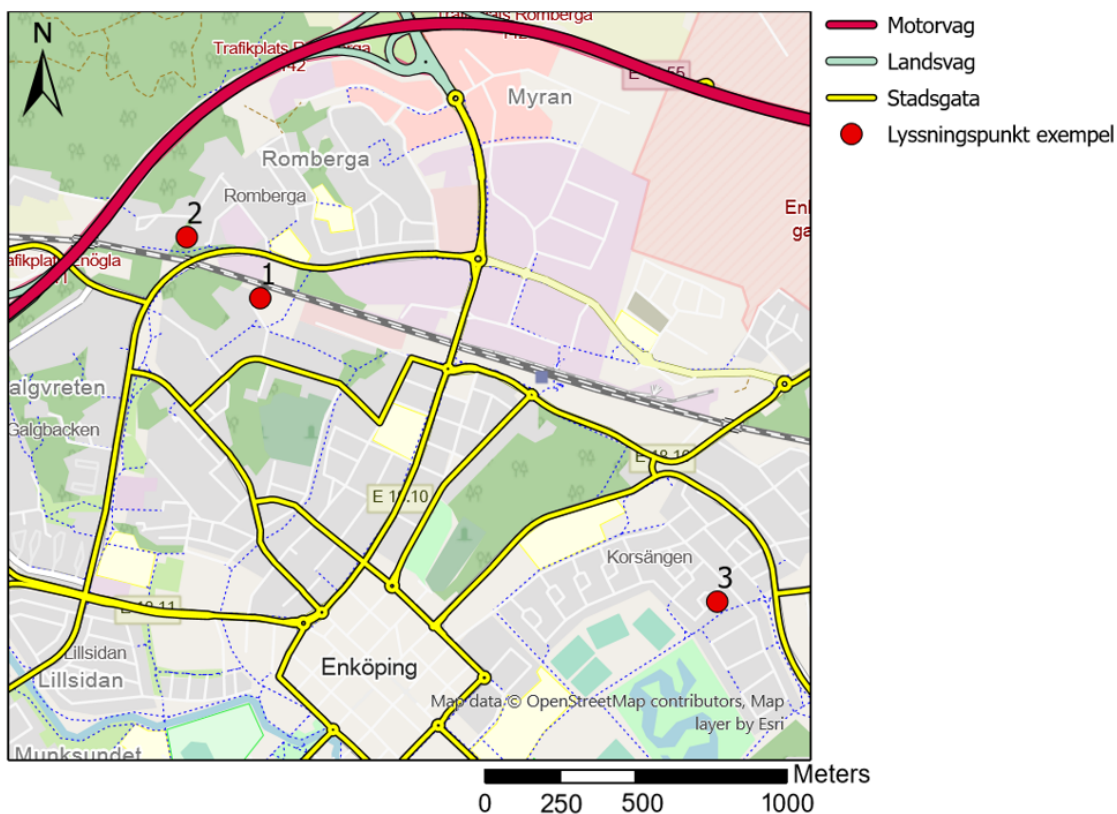
Figur 15: Minskning av ljudnivån från motorvägen med avseende på atmosfärsdämpning, geometrisk spridning och extradämpning.



Figur 16: Minskning av ljudnivån från stadsgatan med avseende på atmosfärsdämpning, geometrisk spridning och extradämpning.

4.1 EXEMPEL PÅ LYSSNINGSPUNKTER

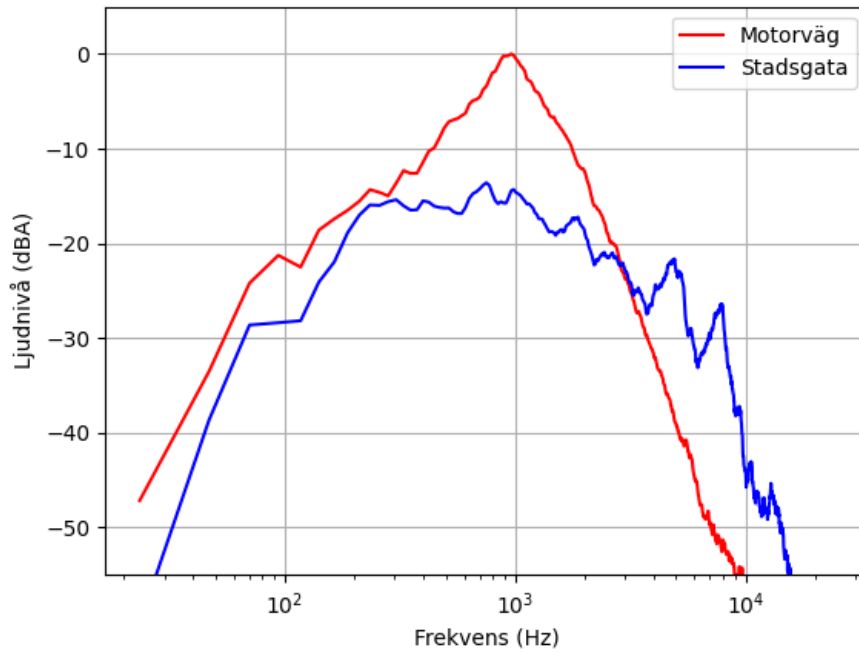
För att visa hur frekvensinnehållet och den totala ljudnivån förändras vid auraliseringspunkterna visas tre exempel på auraliseringar (figur 17). Punkt 1 är 571 m från motorvägen och 145 m från stadsgata, punkt 2 är 250 m från motorvägen och 80 m från stadsgatan och punkt 3 är 198 m från stadsgatan. Auraliserade ljudfiler till dessa tre punkter finns bifogade till rapporten som ljudfiler.



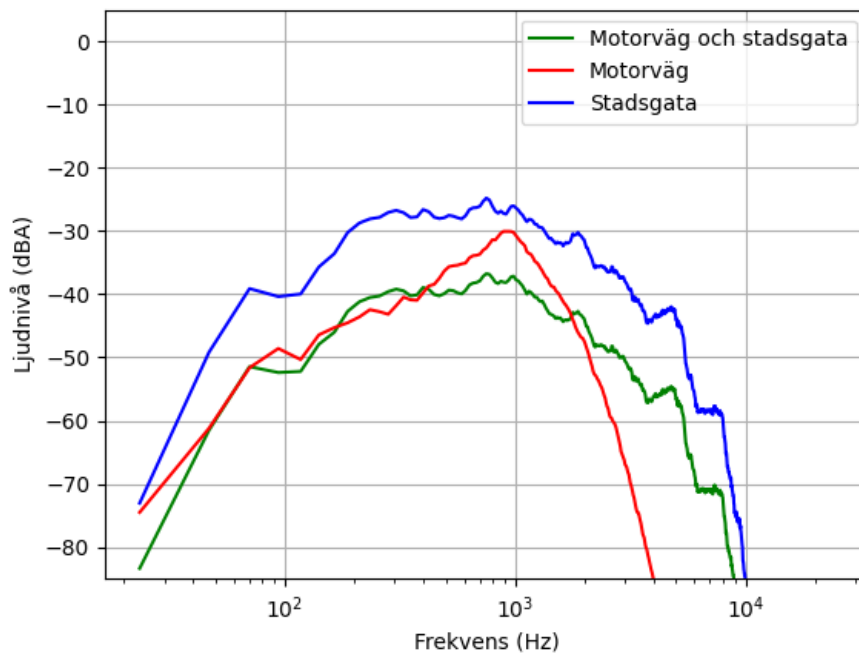
Figur 17: Tre exempelpunkter där trafikbuller auraliserats och det resulterande spektrumet och ljudfiler visas i resultatet.

Frekvensspektrumet för motorvägen och stadsgatan visas i figur 18. För motorvägen syns en topp vid 1000 Hz och en tydlig minskning av ljudnivån för de höga frekvenserna. Stadsgatans spektrum har också en topp vid 1000 Hz, men inte lika tydlig och den minskar inte lika snabbt i ljudnivå vid de högre frekvenserna.

För punkt 1 (figur 19) har frekvenserna från motorvägen under 1000 Hz minskat med ca 30 dBA, men ljudnivån för högre frekvenser har minskat mer. Vid 2500 Hz var minskningen på ca 40 dBA, och vid 4000 Hz var minskningen drygt 50 dBA. Stadsgatan minskade ca 10 dBA vid frekvenser lägre än 1000 Hz, vid 2500 Hz minskade den ca 15 dBA och vid 4000 Hz minskade den knappt 20 dBA. Ljudnivåerna för stadsgatan överstiger de från motorvägen, vilket också syns i det spektrum som inkluderar de båda vägtyperna då karaktäristiken från motorvägen inte går att urskilja. Spektrumet för de båda vägtyperna är efter dämpningen till SoundPLANs ljudnivå och är alltså dämpade mer än de individuella vägarna.

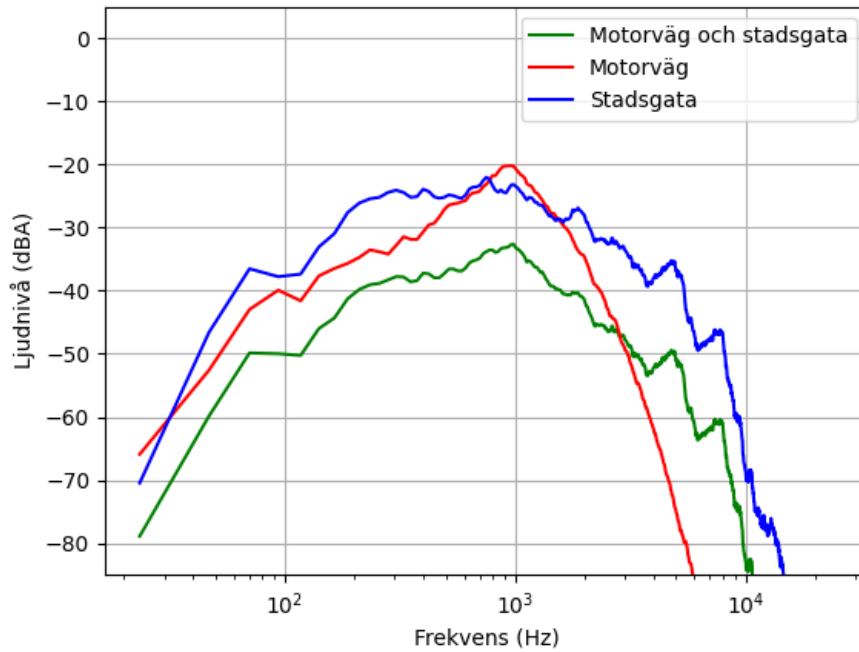


Figur 18: Frekvensspektrum för motorvägen på 30 m avstånd och stadsgatan på 10 m avstånd.

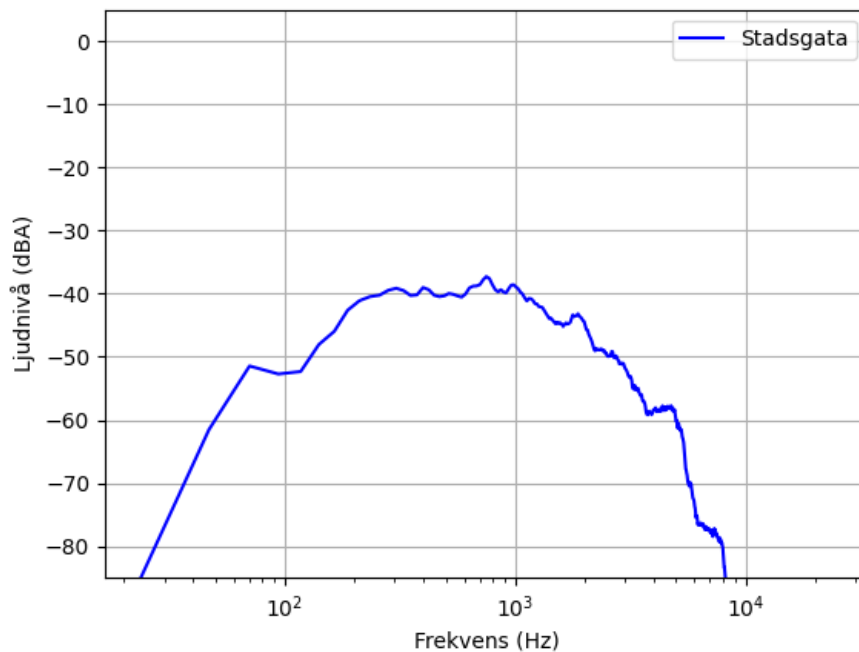


Figur 19: Frekvensspektrum för punkt 1.

Punkt 2 (figur 20) visar samma mönster som punkt 1, frekvenser under 1000 Hz dämpas lika mycket men de högre frekvenserna dämpas mer. Dämpningen av motorvägen är lägre i detta fall och frekvenstoppen vid 1000 Hz syns i trafikmixen.



Figur 20: Frekvensspektrum för punkt 2.

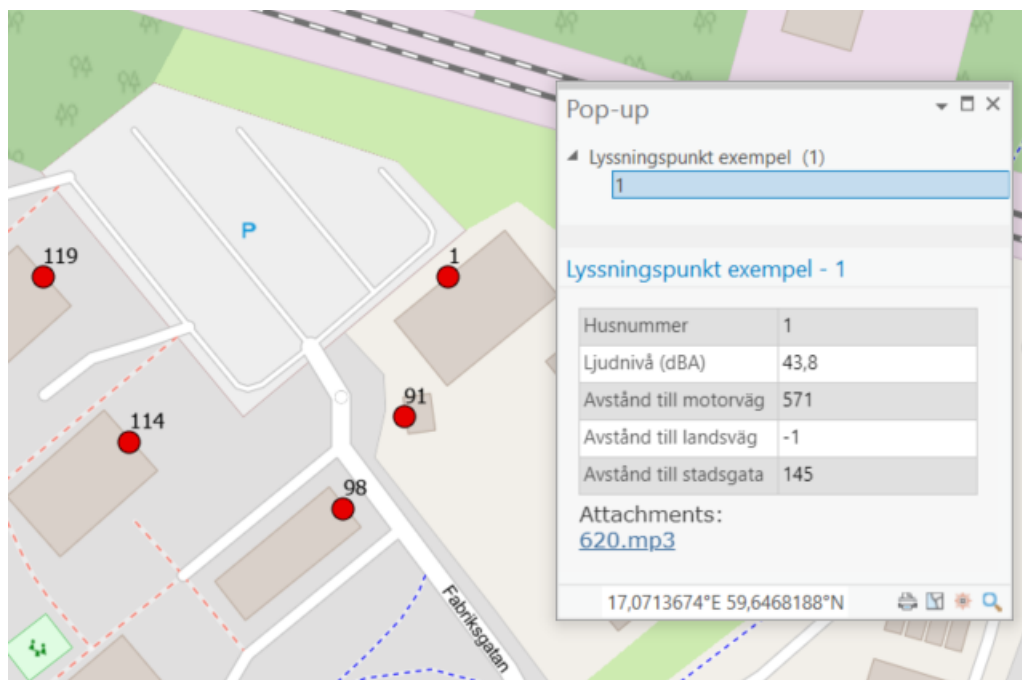


Figur 21: Frekvensspektrum för punkt 3.

Punkt 3 (figur 21) låg 198 m från stadsgatan och inte i närheten av några större vägar, så för den auraliseringen var det enbart stadsgatan som ingick i ljudmixen. Dämpningen även för denna punkt är konstant för frekvenserna under 1000 Hz, och ökar för de högre frekvenserna.

4.2 KARTAN

På kartan i ArcGIS Pro visas alla punkter med auraliserade ljudfiler. När en punkt markeras öppnas en ruta med information om husnummer, ljudnivå, avstånd till motorväg, landsväg och stadsgata och en bifogad fil under *Attachments*; vilket visas i figur 22. När den bifogade filen öppnas spelas den auraliserade trafikbullret upp på datorns inställda ljudfilshanterare. På kartan visas också på vilken av husets fasader som det auraliserade trafikbullret gäller för.



Figur 22: När användaren klickar på en punkt på kartan öppnas en ruta med information och en ljudfil.

4.3 TIDSÅTGÅNG

Auraliseringen av trafikbullret för 1112 punkter tar totalt 76 minuter, vilket ger en medeltid på 4,1 s/ljudfil. Lagringsutrymmet för en fil är 495 kilobyte.

5 DISKUSSION

Syftet med detta projekt var att skapa auraliseringar för punkter i en hel stad med en metod som inte var för tidskrävande. Många förenklingar var tvungna att göras för att minimera beräkningstiden och komplexiteten av beräkningarna, men resultatet behövde ändå vara verklighetstroget. Många parametrar var också okända, såsom antal hus och marktyp mellan mottagare och ljudkälla. Eftersom metoden skulle vara lätt att applicera för stora områden var det också orimligt att en användare skulle fylla i den informationen för varje beräkningspunkt. För att ändå göra en snabberäknad och automatiserad metod där enbart en vanlig bullerkartläggning krävdes, valdes att använda atmosfärsdämpningen till att dämpa de höga frekvenserna och geometrisk spridning för att dämpa med avseende på avståndet. En extradämpning av den totala ljudnivån valdes också att använda för att kompensera för de effekter som utelämnats.

I resultatet saknas frekvensspektrumet för landsvägen då det saknades en ljudinspelning av en landsväg med tillräckligt hög kvalitet, så studien fokuserade på stadsgatan och motorvägen. Metoden stödjer dock att landsväg också används i beräkningarna och inga problem väntas uppstå när den också inkluderas.

5.1 ANALYS AV DÄMPNINGEN

Frekvensspektrumet för stadsgatan som visas i figur 18 - 21 varierar en del i amplitud, främst bland de högre frekvenserna. Stadsgatan är inspelad med låg kvalitet och kan till exempel ha blivit störd av vind, men det kan även vara annat bakgrundsljud som syns på spektrumet. Enligt Berge och Olsen (2021) och Olafsen och Killengreen (2021) borde inte ljudet från bilen ha gett ett sådant spektrum. Spektrumet borde haft en tydligare topp vid 1000 Hz och inte de småtoppar som synd vid 5000 Hz och 7000 Hz. Motorvägen som var en starkare ljudkälla och inspelad med bättre kvalitet visar inte samma mönster som stadsgatan, och borde inte heller ha blivit påverkad av vind eller andra bakgrundsljud.

Atmosfärsdämpningen gav ingen större skillnad på den totala ljudnivån vilken syns på figur 15 och 16, men stor skillnad på hur ljudet upplevs eftersom det främst dämpar de högre frekvenserna. Det var dock den dämpningen som tog längst tid att beräkna vid auraliseringen, men den bedömdes vara så pass viktig då den var den bidragande faktorn till att ljudet upplevdes komma från en väg längre ifrån och inte enbart hade en lägre ljudnivå.

Den geometriska spridningen bidrog till en större skillnad på den totala ljudnivån, vilket var användbart för att erhålla relationen mellan ljudstyrkor från flera vägar. Exakt rätt relation blir den enbart om terrängen mellan mottagaren och ljudkällorna är exakt lika för de olika vägtyperna, men det ger en ungefärlig indikation om vilken vägtyp som dominerar bullret. Skulle dock fallet vara att det är en stort fält mellan mottagaren och ena vägen och bebyggelse med höghus mellan mottagaren och den andra vägen skulle inte det auraliserade bullret korrekt återspegla det riktiga bullret, utan fel vägtyp skulle kunna dominera.

För att kompensera för avsaknaden av skärmningen av hus, bullerskärmar och andra skärmande föremål i beräkningen tillämpades en extradämpning. Problem skulle annars uppstå i lugna bostadsområden där den största ljudkällan var lokaltrafiken. Rätt

ljudnivå skulle visserligen erhållas även utan extradämpningen, men det skulle vara fel trafikmix. Eftersom en motorväg uppfattas som mer störande än enstaka passager enligt (Kaczmarek och Preis, 2010) var det viktigt att trafikmixen bestod av trafiktyper med korrekta relativa ljudnivåer. Annars skulle både motorvägen och stadsgatan kunna låta 42 dBA när det i verkligheten var stadsgatan som var 45 dBA och motorvägen bara 35 dBA. Av den anledningen var det viktigt att inkludera en extra dämpning för att korrigera för avsaknaden av avskärmande föremål.

Värdena för extradämpningen bestämdes av att nära en motorväg eller landsväg kommer inte lokaltrafiken vara den dominerande ljudkällan och därför är resulterande ljudnivån från SoundPLAN från de större vägarna, men på avstånd större än 200 m är sannolikheten stor att det står flera hus mellan mottagaren och vägen som dämpar bullret från den stora vägen betydligt. Gränsen för extradämpningen för stadsgatan var på enbart 100 m eftersom en stadsgata inte låter lika mycket och därför snabbare minskar till låga ljudnivåer, och för att bostadshus oftast står närmre en stadsgata. Extradämpningen hjälper även i de fall som hus byggs bredvid en stor väg med ett öppet fält emellan och en stadsgata på andra sidan huset. Risken hade då varit att stadsgatan hade dominerat ljudmixen eftersom den är närmre, men i verkligheten hade den varit mer avskärmd än motorvägen som egentligen var den dominerande ljudkällan. Eftersom extradämpningen appliceras på kortare avstånd på stadsgatan förhindras den från att låta högre relativt andra ljudkällor på platser som den är avskärmd på.

5.2 FÖRENKLINGAR

Dämpningen av höga frekvenser skedde bara med atmosfärsdämpningen vilket antogs vara tillräckligt för att ge ett verklighetstroget ljud. Större skillnad i spektrumet hade det varit om dämpningen från byggnader och bullerskärmar också hade tagits hänsyn till, eftersom de också påverkar de högre frekvenserna mer än de lägre. För att metoden skulle vara applicerbar i stora städer med många beräkningspunkter gjordes dock avvägningen att inte inkludera fler beräkningar. Ett alternativ hade varit att beräkna dämpningen på både framsidan och baksidan av ett hus och använda mellanskillnaden som ett schablonvärde för hur stor dämpning skulle vara av ett hus. Problemet är dock att vägarna kan vara på flera sidor av huset så att ingen sida är helt avskärmd, och husets läge jämfört med andra byggnader påverkar hur stor dämpningen blir. Felkällorna är alltså stora och beräkningstiden skulle öka, så bedömningen gjordes att enbart använda atmosfärsdämpningen för att och att det skulle ge ett tillräckligt verklighetstroget resultat.

Markreflektionen och absorption hade också kunnat påverka spektrumet, men främst den totala ljudnivån. För att beräkna hur det skulle påverka krävdes dock mer information om marktyperna mellan ljudkällan och mottagaren och fler beräkningar. Forssén et al. (2009) använde markreflektion vid auraliseringen, men använde enbart värdet för asfalt över hela markytan. Det hade varit ett alternativ även i denna studie, men eftersom marktypen varierar i verkligheten var risken att på flera ställen istället ge ett mer felaktigt resultat. Eftersom markreflektionen är en del av bullerberäkningen i SoundPLAN så avspeglas den totala ljudnivån ändå av markeffekterna, och det ansågs vara en bra avvägning mellan tidseffektiva beräkningar och verklighetstroget resultat.

Dopplereffekten har inte tagits hänsyn till utan den dynamik som inkluderades med en trafikljudsinspelning har fått vara tillräcklig för ett verklighetstroget resultat. Att

använda dopplereffekten vid dessa auraliseringar hade varit krävande att applicera då mer information om vägens placering, riktning och hastighets hade behövts. Samma resonemang gäller användandet av HRTF, mer information hade krävt och resultatet från Fu och Murphy (2018) visade att resultatet av det kunde vara negativt om den inte var väl anpassad efter lyssnaren. Därför valdes att inte inkludera användandet av HRTF i detta projekt.

5.3 Kalibrering av ljudnivån

Ett problem med auraliseringar om de ska kunna spelas upp oavsett ljudenhet och av användare utan någon större kunskap om ljudnivåer är att bestämma ljudnivån på uppspelningen. I kontrollerade miljöer med kalibrerad utrustning skulle det gå att få exakt rätt ljudnivå på det auraliserade trafikbullret, men att kontrollera ljudvolymen på andra datorer i olika miljöer med olika högtalare och hörlurar är en stor utmaning. En vanlig metod var att använda ett samtal som referensnivå såsom Finne & Fryd (2016) gjorde, och denna metod tillämpades även på detta projekt. Metoden har osäkerheter, men vissa går att förebygga. Ett problem som skulle kunna uppstå är om lyssnaren har nedsatt hörsel och är van vid att människor pratar högre för att kunna höra bra. Risken är då att den personen skulle höja volymen på auraliseringen för att referenssamtalet skulle låta som en normal samtalsvolym, men då kommer också trafikbullret att höras mer. Om det är fler personer som lyssnar tillsammans skulle det vara lättare att jämföra referenssamtalet med en riktig samtalsvolym, och det blir lättare att ställa in en korrekt ljudnivå på det auraliserade trafikbullret.

5.4 METEOROLOGISKA FAKTORER

I auraliseringsmetoden finns möjlighet finns att variera temperatur, relativ luftfuktighet och lufttryck i beräkningen av atmosfärsdämpning/m. Detta skulle kunna göras för att anpassa frekvensspektrumet och efterlikna den plats som undersöks. Den totala ljudvolymen skulle fortfarande vara detsamma som i beräkningen från SoundPLAN, men det skulle låta mer likt den verkliga platsen eftersom dämpningen av höga frekvenser förändras. Om temperaturen 20 °C användes istället för 10 °C när den relativa luftfuktigheten var 20 % minskar dämpningen/100 m vid 1000 Hz med 0.4 dB och vid 2000 Hz med 1.5 dB, och bullret skulle låta mer högfrekvent.

Hur atmosfärens skiktning och stabilitet påverkar auraliseringen är inte med i beräkningarna och i dagsläget finns det inget stöd för att anpassa metoden efter det, men om det var inkluderat i bullerkartläggningen som gjordes i SoundPLAN skulle de parametrarna ändå räknas in i auraliseringen. Att lägga till de beräkningarna skulle göra att beräkningstiden skulle öka, och då syftet var att göra en typ av auralisering som skulle vara lättanvänd och snabberäknad för stora städer bedömdes det att det inte var värt den extra beräkningstiden.

Ljudnivåerna som auraliseringarna baseras på beräknas i SoundPLAN, och de beräkningsmodellerna använder standardvärden för de meteorologiska parametrarna temperatur, lufttryck, relativ luftfuktighet, vindhastighet och vindriktning. I verkligheten förekommer stor variation av de parametrarna och därmed även av ljudnivåerna. I figur 12 och 13 visas variation av temperaturen och den relativa luftfuktigheten, och dämpningen varierar en del när parametrarna ändras. Detta påverkar hur väl en bullerkartläggning stämmer överens med verkligheten, och därmed hur verklighetstro-

gen auraliseringen blir. Eftersom syftet med bullerkartläggningen är att kontrollera att riktvärdena inte överskrids och den ska beräknas med standardvärden kommer alltså inte auraliseringen att bli mer verklighetstrogen. Detta är en svaghet med denna metod ifall det önskas att få en helt korrekt bild av hur det skulle låta på en plats, men går att åtgärda med en mer anpassad bullerkartläggning. Ett alternativ är att skapa två scenarios, dels som den traditionella bullerkartläggningen, men också ett med större spridning av ljudet på grund av de meteorologiska förhållandena. Risken med att annars bara visa upp hur det låter under standardförhållanden är att det ofta låter annorlunda och högre. Om det gick att även lyssna på hur det kan låta på en viss plats när sämre förhållanden gäller skulle det ge en mer korrekt uppfattning om trafikbullret på den undersökta platsen.

5.5 TILLGÄNGLIGHET

Med den genomsnittliga tiden för att beräkna och spara ned ljudfilen för 100 000 punkter skulle beräkningen ta ungefär 5 dagar. Om bara den fasadsida med högst ljudnivå auraliseras räcker det utan problem för de största städerna i Sverige. Beräkningen behöver en fil som anger avstånd till de tre vägklasserna och total ljudnivå, samt ljudfiler till vägklasserna och bakgrundsljuden. Metoden är automatiserad och kräver enbart att indatan ställs in och startas, och är sedan självgående tills att den har slutfört beräkningarna för alla punkter. Grunden till beräkningen är den bullerkartläggning som normalt behöver genomföras vid nybyggnation eller den strategiska bullerkartläggningen som alla större kommuner behöver genomföra. Filstorleken var på 495 kilobyte vilket innebär att 100 000 punkter skulle kräva ungefär 50 gigabyte lagringsutrymme. Metoden verkar alltså vara tillräckligt snabb att använda även för stora städer och kan enkelt användas vid vanliga bullerkartläggningar.

Att dessa auraliseringar är baserade på inspelningar av trafikljud gör att det relativt enkelt går att utöka antalet vägtyper som auraliseringen bygger på, och det går att anpassa till speciella områden om det önskas. De inkluderar dynamiken för hur det låter vid en väg och variationen av fordonstyper. Det krävs dock att inspelningen är av hög kvalitet för att ge ett korrekt återspeglings av trafikbullret. Thomas et al. (2016) använde inspelat trafikbuller för att fånga dynamiken medan Finne och Fryd (2016) gjorde inspelningarna i tyst bakgrundsmiljö och använde sig av flera olika bakgrundsljud specifika för olika miljöer för att få med dynamiken. Eftersom denna studien fokuserade på att skapa en metod som var snabb och enkel valdes att använda ljudfiler som redan fångat en del av dynamiken. Det är dessutom lättare att addera fler ljudfiler till auraliseringen när de inte behöver spelas in i en tyst miljö. Om auraliseringen hade skett med syntetiserat trafikbuller hade det varit väldigt tidskrävande att skapa båda lätta och tunga fordon och med olika bränsletyper.

5.6 FRAMTIDA STUDIER

Ett problem som riskerar att uppstå är lagringskapaciteten inte räcker till när trafikbullret från flera stora städer auraliseras. Eftersom det finns flera liknande platser inom samma stad och mellan olika städer som ligger på liknande avstånd till motorväg, landsväg och stadsgata skulle en uppdelning istället kunna ske baserat på avstånd och ljudnivå. Alla auraliseringar skulle då beräknas från början och skapa ett bibliotek av trafikljudfiler, och innehålla information om ljudnivå och avstånd. Ljudpunkterna på

kartan kopplas till biblioteket baserat på ljudnivån och avstånden, och samma bibliotek skulle kunna användas till hela Sverige. För att göra det möjligt skulle avstånden till vägarna behöva delas upp i intervall, lämpligtvis med små intervall för korta avstånd och längre intervall för längre avstånd. Genom att också dela upp ljudnivån i intervall på exempelvis 2 dBA, och samtidigt ha alla avståndsintervall till respektive vägtyp, skulle trafikmixen fortfarande bli korrekt. Att göra uppdelningen som resulterar i 50 000 ljudfiler kan anses vara mycket, men om de ljudfilerna skulle fungera för hela Sverige skulle det spara både beräkningstid till att skapa auraliseringarna och lagringskapacitet.

Fördelen att använda metoden som beräknar auraliseringen för varje punkt på kartan istället för att använda ett färdigt bibliotek, är att det går att anpassa mer för den specifika miljön. Standardvärden för temperatur, relativ luftfuktighet och lufttryck är tillämpade i beräkningarna, men det är möjligt att ändra dem ifall det önskas. Om mindre områden undersöks är det också möjligt att göra finjusteringar, till exempel genom att exkludera lokaltrafiken från bullerberäkningarna och därmed erhålla ett resultat på ljudnivån som bara beror av de större vägarna. Experiment med bullerskärmar blir också lättare att genomföra när parametrarna fortfarande är möjliga att variera. Det är också möjligt att inkludera fler vägtyper vid auraliseringen genom att dela upp vägverkets funktionella vägklasser till fler klasser än motorväg, landsväg och stadsgata. Vid noggrannare auraliseringar skulle dessutom en inspelad trafikljudfil för en liknande plats kunna användas för att fånga dynamiken bättre på den undersökta platsen.

En svaghet med att enbart inkludera trafikbullret från en väg av respektive vägtyp istället för alla vägar i närheten av en beräkningspunkt är att det saknas en del bakgrundsljud. I verkligheten skulle fler bilar höras på avstånd som skapar ett basljud av trafikbuller. Det saknas också en varierad körstil med exempelvis korsningar, rödljus och rondeller. Till viss del kompenseras avsaknaden av basljud genom att de inspelningar används också inkluderar bilar på längre avstånd, men såvida inte trafikbullret spelas in vid till exempel en korsning eller ett rödljus kommer inte körstilen att vara så varierad som den är i vissa delar av en stad. En lösning på den problemet är att använda andra inspelade trafikljudfiler för de delar av staden där körstilen är mer varierad, till exempel i närheten av stadens centrum.

Med vissa beräkningsmetoder, till exempel Cnossos-EU, kan resultatet erhållas i både total ljudnivå och på oktavbandsnivå, och detta skulle kunna användas för att göra mer korrekta beräkningar. Med en dämpning på oktavbandsnivå skulle en del av problemet att frekvensspektrumet inte dämpas tillräckligt mycket på de höga frekvenserna lösas, och avsaknaden av dämpning med avseende på skärmar och markabsorption påverkar inte lika mycket. Denna metod skulle dock vara låst till att bullerkartläggningen genomfördes med en sådan beräkningsmetod och därför valdes att skapa en mer generell auraliseringsmetod som fungerar med alla bullerberäkningsmetoder. För att göra auraliseringen mer lik verkligheten skulle tåg- och flygtrafiken också behöva inkluderas.

6 SLUTSATS

En metod som gör traditionella bullerutredningar lyssningsbara har genomförts, och de auraliserade ljudfilerna går att ladda upp till en karta. Med information om ljudnivån som erhålls från SoundPLAN och avstånd till vägtyperna motorväg, landsväg och stadsgata som beräknas i ArcGIS Pro skapas auraliseringarna. Metoden är tillräckligt snabb för att kunna auralisera trafikbuller för 100 000 punkter på fem dagar, och är därmed tillgänglig att använda vid bullerkartläggningar även för de större städerna i Sverige. Ljudfilerna presenteras i en karta och användaren kan jämföra ljudnivån och trafiken på flera punkter och lyssna på i en egen ljudenhet, men en helt korrekt ljudnivå kan i vissa fall vara svårt att ställa in.

Metoden är tillämpbar på bullerutredningar oavsett vilken beräkningsmetod som bullerutredningen har beräknats med, eftersom auraliseringen är baserad på den totala ljudnivån. Med enbart fyra ljudinspelningar av vägtrafiken kan auraliseringen ske för en hel stad, men metoden tillåter att flera ljudfiler används om det önskas för specifika fall. För minska beräkningstiden gjordes många förenklingar som bidrar till osäkerheter. Skärmande föremål dämpar inte ljudnivån från de enskilda vägar, vilket riskerar att ge fel trafikmix på områden främst långt från större vägar. Användandet av standardvärden på meteorologiska förhållanden kan också ge en felaktig bild av trafikbullret eftersom det är vanligt att andra förhållanden än standardförhållandet gäller, och ljudnivån i auraliseringen underskattas. För ett exaktare resultat föreslås att metoden utvecklas för att kunna använda oktavbandsnivå på trafikbullret, men den skulle då bara vara kompatibel med de beräkningsmetoder som stödjer det.

Referenser

- Beranek, L. & Mellow, T. (2019). *Acoustics: sound fields, transducers and vibration*. Andra upplagan. Academic press. eBook ISBN: 9780128152287
- Berge, T. & Olsen, H. (2021). Road traffic noise spectra – the need for update. *Baltic-nordic acoustics meeting*, 3-5 maj, Oslo, Norge.
- Boverket (2020). *Regler och riktvärden för buller*. <https://www.boverket.se/sv/PBL-kunskapsbanken/planering/detaljplan/temadelar-detaljplan/buller-vid-detaljplanering/regler-och-riktvarden-for-buller/> [2021-05-10]
- Chun, C. & Kim, H. K. (2016). Frequency-Dependent Amplitude Panning for the Stereophonic Image Enhancement of Audio Recorded Using Two Closely Spaced Microphones. *Applied Science*. 6(2), <https://doi.org/10.3390/app6020039>
- Finne, P. & Fryd, J. (2016). Road Noise Auralisation for Planning New Roads. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, InterNoise16, Hamburg Tyskland. s. 3222-3227(6). <https://www.ingentaconnect.com/contentone/ince/incecp/2016/00000253/00000005/art00041#Refs> [2021-06-15]
- Forssén, J., Kaczarek, T., Alvarsson, J., Lundén, P. & Nilsson, M. E. (2009). Auralization of traffic noise within the LISTEN project - Preliminary results for passenger car pass-by. *Euronoise 26-28 oktober 2019*, Edinburgh, Storbritannien. https://www.researchgate.net/publication/285173767_Auralization_of_traffic_noise_within_the_LISTEN_project_-_Preliminary_results_for_passenger_car_pass-by [2021-06-15]
- Fu, Y. & Murphy, D. (2018). A comparative overview of traffic flow modelling approaches for auralisation. *Euronoise*, 27-31 maj 2018, Heraklion, Kreta, Grekland. S. 273-278.
- Giannakopoulos, T. & Pikrakis, A. (2014). *Introduction to Audio Analysis : A MATLAB® Approach*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2012-0-03524-7>
- Kaczmarek, T. & Preis, A. (2010). of Time-Varying Road-Traffic Noise. *Archives Of Acoustics*, 35(3), s 383-393. DOI: 10.2478/v10168-010-0032-2
- Kephalopoulos, S., Paviotti, M. & Anfosso-Lédée, F. (2012). *Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS-EU)*. (EUR 25379 EN). Luxemburg: Publications Office of the European Union, 2012 European Commission Joint Research Centre. <http://dx.doi.org/10.2788/32029>
- Larsson, C. (1996). Atmospheric absorption conditions for horizontal sound propagation. *Applied acoustics*. 50(3), s 231-245. [https://doi.org/10.1016/S0003-682X\(96\)00068-0](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(96)00068-0)
- Larsson, K. & Jonasson, H. (2015). *Uppdaterade beräkningsmodeller för vägtrafikbuller*. (SP Rapport 2015:72) Borås: SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut https://www.trafikverket.se/contentassets/773857bcf506430a880a79f76195a080/forskningsresultat/sp_oppdaterade_bullerberakningar.pdf
- Murphy, E. & King, E. (2014). *Environmental noise pollution: noise mapping, public health, and policy*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2012-0-13587-0>

- Naturvårdsverket. (2021). *Resultat från bullerkartläggning enligt förordningen för omgivningsbuller*. <https://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Manniska/Buller/Resultat-fran-bullerkartlaggning-enligt-forordningen-for-omgivningsbuller/> [2021-06-16]
- Naturvårdsverket, Vägverket, Nordiska ministerrådet (1996). *Vägtrafikbuller. Nordisk beräkningsmodell, reviderad 1996*. (4653). Naturvårdsverket Förlag. <https://www.naturvardsverket.se/Om-Naturvardsverket/Publikationer/ISBN/4000/91-620-4653-5/>
- Nilson, E., Johansson, A-C., Brudskog, J., Sjökvist, L-G. & Holmberg, D. (2005). *GRUNDLÄGGANDE AKUSTIK*. Engineering Acoustics, LTH, Lund University. TVBA-3116, Tredje upplagan. https://www.akustik.lth.se/fileadmin/tekniskakustik/education/2020_VTAF01/SE-LTH-grundlaggande-akustik.pdf [2021-06-16]
- Nilsson, M. E., Forssén, J., Lundén, P., Peplow, A. & Hellström, B. (2011). *LISTEN Aurialization of Urban Soundscapes*. https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/232736/local_232736.pdf. [2021-06-16]
- Olafsen, S. & Killengreen, T. F. (2021). Spectrum shape och road traffic noise at 50 km/h, *Baltic-nordic acoustics meeting*, 3-5 maj, Oslo, Norge.
- Thomas, P., Wei, W., Renterghem, T. & Botteldooren, D. (2016). Measurement-based auralization methodology for the assessment of noise mitigation measures. *Journal of Sound and Vibration* 379(29), s 232-244. DOI:10.1016/j.jsv.2016.05.039
- Salomons, E. M. (2001). *Computational atmospheric acoustics*. Springer Science + Business Media, B.V. <https://doi.org/10.1007/978-94-010-0660-6>
- The Danish Environmental Protection Agency. (u.å.). *Nord2000: Nordic noise prediction method*. <https://eng.mst.dk/air-noise-waste/noise/traffic-noise/nord2000-nordic-noise-prediction-method/> [2021-05-26]
- Trafikverket (2018). *Trafikverkets åtgärdsprogram enligt förordningen om omgivningsbuller, 2019-2023*. (2018:196). Trafikverket. ISBN 978-91-7725-366-2. https://www.trafikverket.se/contentassets/5c921d9b1dcc40589757123250a400d2/atgardsprogram_fob_faststallt.pdf [2021-06-16]
- Trafikverket (2020a). *Buller från vägtrafik*. <https://www.trafikverket.se/for-dig-i-branschen/miljo---for-dig-i-branschen/buller-och-vibrationer---for-dig-i-branschen/Fakta-om-buller-och-vibrationer/buller-fran-vagtrafik/> [2021-02-11]
- Trafikverket (2020b). *Dataproduktspecifikation – Funktionell vägklass*. Version 9.0. https://www.trafikverket.se/TrvSeFiler/Dataproduktspecifikationer/V%C3%A4gklasser/DPS_E-G/1010funktionell_vagklass.pdf [2021-03-09]
- Trafikverket. (2020c). *Mått för ljudnivåer*. <https://www.trafikverket.se/for-dig-i-branschen/miljo---for-dig-i-branschen/buller-och-vibrationer---for-dig-i-branschen/Fakta-om-buller-och-vibrationer/matt-for-ljudnivaer/> [2021-02-11]

Trafikverket. (2021). *Beräkna och utreda buller och vibration*. <https://www.trafikverket.se/for-dig-i-branschen/Planera-och-utreda/Planerings--och-analysmetoder/Berakna-och-utreda-buller-och-vibrationer/> [2021-02-11]

Trafikverket. (u.å.). *Lastkajen*. <https://lastkajen.trafikverket.se/> [2021-03-09]

Opublicerat material

Figur 6: ÅF ljud och vibrationer. (2016). *Västerås Bullerkartläggning*. Personlig kommunikation med Friman, M 2021-06-07 [e-mail]

Ljudfil motorväg: Friman, M (2015). Personlig kommunikation 2021-01-27 [e-mail].

BILAGA A: Pythonscript för atmosfärsdämpning och geometrisk spridning

```
1 import numpy as np
2 from math import sqrt, exp
3
4 def atmosfarsdampning(f, T, rh, p_omgivning):
5     """
6     Beräknar atmosfärsabsorbktion med ISO standard
7
8     f:                Frekvens
9
10    T:                Temperatur (grader C)
11
12    hr:              Relativ luftfuktighet (%)
13
14    p_omgivning:     Lufttryck (hPA)
15
16    Output:         ljuddämpning (dB/m)
17    """
18    T=273.15 + T      # Konverterar från Celsius till Kelvin
19    T01=273.16       # Trippelpunkt i grader Kelvin
20    T0=293.15
21    p_ref=1013.25    # standardtryck i hPa
22
23    # Iso formel för specifik luftfuktighet
24    pr = p_omgivning / p_ref
25    p_sat=10**(-6.8346*(T01/T)**1.261+4.6151)
26    h=rh * p_sat/p_omgivning;
27
28    # ***** ISO standard *****
29    taur=T/T0
30    fr0=pr*(24+40400*h*(0.02+h)/(0.391+h))
31    frN=pr*(taur)**(-1/2)*(9+280*h*exp(-4.17*((taur)**(-1/3)-1)))
```

```

32     b1=0.1068*exp(-3352/T)/(frN+f**2/frN)
33     b2=0.01275*exp(-2239.1/T)/(fr0+f**2/fr0)
34     alpha=8.686*f**2*taur**(1/2)*(1.84*10**(-11)/pr+taur**(-3)*(b1+b2))
35
36     return alpha
37
38
39
40 def dampning(in_data, x, x_source, alpha):
41     """
42     Dämpar ljudet med atmosfärsdämpning och geometrisk spridning
43
44     x:          Avstånd mellan ljudkälla och mottagare
45
46     x_source:   Avstånd mellan ljudkälla till inspelningspunkt
47
48     alpha:      Ljudabsorbktion i (dB/meter) beräknat med ISO standard
49     """
50
51     # Transformerar ljudfilen till frekvensplanet
52     y=np.fft.rfft(in_data)
53
54     # Beräknas atmosfärsdämpning
55     alpha=[a*(x-x_source) for a in alpha] # Dämpningen per frekvens
56     y_atm=[y_i/np.sqrt(10**(alpha_i/10)) for y_i, alpha_i in zip(y, alpha)]
57     p_atm=np.fft.irfft(y_atm) # invers fouriertransform
58
59     # Dämpning på grund av geometrisk spridning (cylindrisk spridning)
60     p_atm_geo=[p*sqrt(x_source/x) for p in p_atm]
61
62     return p_atm_geo

```

BILAGA B: Pythonscript för auralisering

```
1 # -- coding: UTF-8 --
2 """
3 Author: Maria-Therese Carlsen <maria-therese.carlsen@efterklang.se>
4 Auraliserar trafikbuller som är baserade på ljudfiler från vägtrafiken.
5 Dämpar med atmosfärsdämpning och geometrisk spridning
6 """
7
8 import os, sys
9 from scipy.io.wavfile import read as wavread
10 from scipy.io.wavfile import write as wavwrite
11 import numpy as np
12 from air_iso import atmosfarsdampning, dampning
13
14 def p_ratio(L1, L2, L_amp):
15     """
16     L1 = ljudet som ska justeras
17
18     L2 = ljudet som L1 jämförs emot
19
20     L_amp = hur många dB som L1 ska höjas med fämfört mot L2
21     """
22     diff_L1_L2 = L1-L2
23     delta_L = L_amp - diff_L1_L2
24     return 10**((delta_L/20))
25
26 def extra_dampning(avstand, p, x10):
27     """
28     avstand = Avstånd till vägen
29
30     p = ljudvektorn
31 """
```

```

32     x10 = avstånd där 10 dB dämpning gäller
33     """
34     if avstånd >= x10 : extra_dampning = -10
35     else: extra_dampning = -5
36     p_ratio_extra = 10**(extra_dampning/20)
37     return [x*p_ratio_extra for x in p]
38
39 def open_file(filnamn):
40     with open(filnamn, "r") as tabell:
41         lines = tabell.readlines()
42         fasad_id = []      # id för fasadpunkten
43         hus_id = []       # id för huset
44         level_fasad = []  # Ljudvinån vid fasadpunkten
45         avstand_motorvag = []
46         avstand_landsvag = []
47         avstand_stadsgata = []
48         for line in lines:
49             as_list = line.split(";")
50             fasad_id.append(as_list[2])
51             hus_id.append(as_list[4])
52             level_fasad.append(float(as_list[-4].replace(',','.')))
53             avstand_motorvag.append(float(as_list[-3].replace(',','.')))
54             avstand_landsvag.append(float(as_list[-2].replace(',','.')))
55             avstand_stadsgata.append(float(as_list[-1].replace(',','.')))
56     return fasad_id, hus_id, level_fasad, avstand_motorvag, avstand_landsvag, avstand_stadsgata
57
58
59 # Laddar in textfilen från GIS med avstånd mellan fasader och vägar
60 fasad_id, hus_id, level_fasad, avstand_motorvag, avstand_landsvag, avstand_stadsgata = open_file(fasadfil)
61
62 fs_motorvag, in_data_motorvag = wavread('motorvag.wav')      # mono
63 fs_lv, in_data_landsvag = wavread('landsvag.wav')           # mono
64 fs_sg, in_data_stadsgata = wavread('stadsgata.wav')         # mono

```

```

65 fs_lg, in_data_lokalgata = wavread('lokalgata.wav')          # stereo
66 fs_fagel, in_data_fagel = wavread('faglar.wav')           # stereo
67 fs_samtal, in_data_samtal = wavread('samtal.wav')         # stereo
68
69 # Kontrollerar att det är samma samplerate på alla ljudfiler
70 if fs_motorvag == fs_lv == fs_sg == fs_lg == fs_fagel == fs_samtal:
71     fs = fs_motorvag
72 else:
73     print('\x1b[0;31;40m' + "Varning: Sample rate är inte samma på alla inladdade ljudfiler"+ '\x1b[0m')
74     sys.exit()
75
76 # Gör alla filer är lika långa (samtal är 9.5 s längre)
77 minlangd = min(np.size(in_data_motorvag,0), np.size(in_data_landsvag,0), \
78               np.size(in_data_stadsgata,0), np.size(in_data_lokalgata,0), \
79               np.size(in_data_fagel,0), np.size((in_data_samtal - fs*9.5),0))
80 in_data_motorvag = in_data_motorvag[ :minlangd]
81 in_data_landsvag = in_data_landsvag[ :minlangd]
82 in_data_stadsgata = in_data_stadsgata[ :minlangd]
83 in_data_lokalgata = in_data_lokalgata[ :minlangd, :]
84 in_data_fagel = in_data_fagel[ :minlangd, :]
85 in_data_samtal = in_data_samtal[ :(minlangd + int(fs*9.5)), :] # Samtalsfilen är 9.5 s längre
86
87 # Läger ihop fågel, lokalgata och samtal
88 f_lg = np.add(in_data_fagel, in_data_lokalgata )
89 nollor = np.zeros((int(fs*9.5), 2), dtype=int)
90 f_lg = np.concatenate((nollor, f_lg), axis=0)
91 s_f_lg = np.add(in_data_samtal, f_lg ) # Samtal, fåglar och lokalgata
92
93 # Beräknar ljudnivå
94 P_ref= 2*10**(-5)
95 L_samtal = 10*np.log10( (max(abs(in_data_samtal[:,0]))**2) / (P_ref**2) )
96
97 # RÄKNAR UT DÄMPNING PER METER PER FREKVENNS

```



```

98 T=10
99 hr=50
100 ps=1013.25 #hPa
101 f=np.fft.rfftfreq(len(in_data_motorvag),1/fs)
102 alpha_iso = []
103 for i in range(0,(len(f))):
104     alpha_iso_f = atmosfarsdampning(f[i], T, hr, ps) # Beräknar dämpningen
105     alpha_iso.append(alpha_iso_f)
106
107
108 # *****' DÄMPAR PÅ AVSTÅNDET *****'
109 for i in range(0, len(hus_id)):
110
111     # Skapar en tom ljudvektor att addera vägljud på
112     vagar = np.zeros((minlangd),dtype=int)
113
114     # MOTORVÄG
115     if avstand_motorvag[i] != -1:
116         p_motorvag = dampning(in_data_motorvag, fs, x=avstand_motorvag[i], \
117             x_source=30, alpha_iso=alpha_iso)
118         if avstand_motorvag[i] >= 200:
119             p_motorvag = extra_dampning(avstand_motorvag[i], p_motorvag, x10=300)
120         vagar = np.add(vagar,p_motorvag)
121     else: avstand_motorvag[i] = 1000 # Istället för -1 för att kunna kontrollera om andra vägar är närmre
122
123     # LANDSVÄG
124     if avstand_landsvag[i] != -1 and avstand_landsvag[i] < avstand_motorvag[i]:
125         p_landsvag = dampning(in_data_landsvag, fs, avstand_landsvag[i], x_source=10, alpha_iso=alpha_iso)
126         if avstand_landsvag[i] >= 200:
127             p_landsvag = extra_dampning(avstand_landsvag[i], p_landsvag, x10=300)
128         vagar = np.add(vagar, p_landsvag)
129     else: avstand_landsvag[i] = 1000 # Istället för -1 för att kunna kontrollera om andra vägar är närmre
130

```

```

131 # STADSGATA
132 if avstand_stadsgata[i] != -1 and avstand_stadsgata[i] < avstand_motorvag[i] \
133     and avstand_stadsgata[i] < avstand_landsvag[i]:
134     p_stadsgata = dampning(in_data_stadsgata, fs, avstand_stadsgata[i], x_source=10, alpha_iso=alpha_iso)
135     if avstand_stadsgata[i] >= 100:
136         p_stadsgata = extra_dampning(avstand_stadsgata[i], p_stadsgata, x10=200)
137     vagar = np.add(vagar, p_stadsgata)
138
139 # Justerar den totala ljudvolymen från vägarna så att den blir lika hög som värdet från Soundplan
140 # Beräknar den digitala ljudvolymen från vägarna
141 L_vag_digital = 10*np.log10( (max(abs(vagar))**2) / (P_ref**2) )
142 # Beräknad den riktiga ljudvolymen från vägarna. Utgår från att samtalet är 60 dB
143 L_vag_verklig = L_vag_digital - L_samtal + 60
144 # Skillnaden mellan den auraliserade ljudnivån och den beräknade ljudnivån från Soundplan
145 skillnad_auraliserad_Soundplan = L_vag_verklig - level_fasad[i]
146 # Om den auraliserade ljudnivån högre än den beräknade ska den dämpas mer
147 if skillnad_auraliserad_Soundplan > 0:
148     # Skillnad mellan den ljudnivån från Soundplan och referensnivån på 60 dBA
149     dB_skillnad_vag_samtal = level_fasad[i] - 60
150     # Beräknar förstärkningsfaktorn i relation til samtalet
151     road_amp = p_ratio(L_vag_digital, L_samtal, dB_skillnad_vag_samtal)
152     # Dämpar vägljudet
153     vagar = [x*road_amp for x in vagar]
154
155
156 # Lägger ihop alla ljudfiler
157 vag_stereo = np.array(list(zip(vagar, vagar))) # Gör monofil till stereofil
158 vag_stereo = np.concatenate((nollor, vag_stereo), axis=0)
159 vag_s_f_lg = np.add(vag_stereo, s_f_lg) # Lägger ihop vägfilen med bakgrundsljuden
160
161 # Sparar ljudfilen
162 wavwrite(fasad_id[i]+".wav", fs, vag_s_f_lg.astype(np.int16))

```