



UPPSALA
UNIVERSITET

UPTEC W 18002

Examensarbete 30 hp
Augusti 2018

Framtagning av en ljudanalysmetod för bedömning av ljudkvalitet i urbana utomhusmiljöer

Developing of a sound analysis method for
assessment of acoustic quality

Simon Heitmann

REFERAT

Framtagning av en ljudanalysmetod för bedömning av ljudkvalitet i urbana utomhusmiljöer

- *Simon Heitmann*

Buller är en av de miljöföroreningar som har störst negativ påverkan på människors hälsa. Några av dessa effekter är sömnstörningar, stress och i vissa fall kan det leda till hjärt- och kärlsjukdomar. Problematiken kring detta växer med en ökande befolkningens mängd och urbanisering runt om i världen. Denna studie undersöker möjligheterna till att utveckla en ny ljudanalysmetodik för hållbara stadsmiljöer.

Idag utförs trafikbullerutredningar som en del i miljökonsekvensbeskrivningar. Dessa analyser innehåller i huvudsak en ljudnivåberäkning från de primära bullerkällorna och dessa kopplas till gällande riktvärden för A-vägda ljudnivåer vid uteplatser och fasader. Forskning kring urbana ljudmiljöer visar att endast ljudnivåerna från bullerkällor inte är tillräckligt för att avgöra ljudkvaliteten. Bullrets relativa inblandning i ljudmiljön, dess frekvensområde och tidsvariation samt platsens syfte och användning är faktorer som dels är kopplade till hur pass väl bullret maskeras, och dels hur pass störande ljudet faktiskt upplevs. Alla dessa faktorer behöver vägas in för att på bästa sätt kunna bedöma ljudkvaliteten.

Strategin som användes i denna studie bestod dels av en litteraturstudie där tillgänglig forskning kring urbana ljudmiljöer analyserades och dels i en fallstudie där tre olika typfall av urbana miljöer modellerades i det akustiska modelleringsprogrammet *Olive Tree Lab*. De tre fallen utgjordes av teoretiska platser, ett öppet gaturum, ett stängt gaturum samt ett gaturum med torg på ena sida. Utformningen av dessa valdes utifrån att det är några av de vanligast förekommande urbana miljöerna där höga ljudnivåer uppstår. Utifrån litteraturstudien togs en beskrivningsmall för ljudmiljöer som utgör den nya ljudanalysmetoden fram som sedan applicerades på fallstudien för analys och utvärdering. Mallens tyngdpunkt låg på att undersöka såväl goda som negativa ljud och att koppla det till den platsen som analysen avser. Resultaten visade på att användning av mallen leder till en bredare och mer detaljerad beskrivning av ljudmiljön som möjliggör flera olika typer av lösningar än de som föreslås idag.

Nyckelord: ljud, akustik, buller, ljudkvalitet, akustisk design, stadsplanering, miljökonsekvensbeskrivning

*Institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet (UU)
Villavägen 16, 752 36, Uppsala, Sverige*

ABSTRACT

Development of a sound analysis method for assessment of acoustic quality

- *Simon Heitmann*

Noise is one of the environmental pollutions that has the largest negative effect on human health. Some of these effects are stress, sleeping issues and in some cases it can cause cardiovascular diseases. The problem about this is growing as a result from an increasing population and an increasing urbanization. This study investigates the possibilities to develop a new sound analysis method for urban environments.

Today traffic noise investigations are performed as a part of environmental impact assessments. These analyses comprise most of sound level calculations from the primary noise sources, which are then connected to the existing benchmarks for A-weighted sound levels at patios and facades. Research around urban sound environments shows that only taking the sound levels exceeded from the primary noise sources in consideration is an insufficient method for estimating the sound quality. The relative involvement of the noise, the range of frequencies and the variation in time as well, as the purpose and use of the area, are factors which are all connected to how well the noise is masked, as well as how disturbing the noise is actually perceived as. All these factors have to be taken into consideration in order to assess the sound quality in the best possible way.

The method used in this study consisted of two main parts; one literature study, where available research around urban sound environments was analysed; and one case study where three different cases of urban environments were analyzed in the acoustic modeling program *Olive Tree Lab*. The three cases consisted of theoretical locations, one open street canyon, one closed and one street canyon with a square on one side. Based on the literature study a description template for sound environments was developed and applied to the cases from the case study for analysis and evaluation. The main focus of the template was to investigate both positive and negative sounds and relate them to the site of which the sound analysis is intended for. The results showed that use of the template resulted in a broader and more detailed description of the sound environment, which enabled different kinds of solutions that are not commonly used today.

Keywords: sound, acoustics, noise, acoustic quality, acoustic design, urban planning, environmental impact assessment

*Department of Earth Sciences, Uppsala University (UU)
Villavägen 16, SE 752 36, Uppsala, Sweden*

FÖRORD

Det här examensarbetet motsvarar 30 hp och är utfört som en del av Civilingenjörsprogrammet i miljö- och vattenteknik vid Uppsala universitet och Sveriges lantbruksuniversitet. Handledare var Gunilla Sundin, akustiker på Norconsult. Ämnesgranskare var Monica Mårtensson, universitetsadjunkt vid Institutionen för geovetenskaper, Luft-, vatten- och landskapslära, Uppsala universitet. Examinator för examensarbetet var Björn Claremar, vik. universitetslektor vid Institutionen för geovetenskaper, Luft-, vatten- och landskapslära, Uppsala universitet.

Jag vill framförallt tacka min ämnesgranskare Monica Mårtensson och min handledare Gunilla Sundin för all återkoppling och hjälp jag har fått under examensarbetets gång.

Tack till Norconsult som låtit mig arbeta med detta examensarbete och bidragit med arbetsplats och utrustning.

Jag vill även tacka Johan Portström och Petra Sandberg för stöd och goda råd under arbetets gång.

Tack till Mediterranean Acoustics Research & Development som bidragit med licens till modelleringsprogrammet *Olive Tree Lab*.

Simon Heitmann
Uppsala, juni 2018

Copyright ©Simon Heitmann och institutionen för geovetenskaper, Luft- vatten- och landskapslära, Uppsala universitet. UPTECW 18002, ISSN 1401-5765
Publicerad digitalt vid Institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet, Uppsala, 2018.

POPULÄRVETENSKAPLIG SAMMANFATTNING

Buller påverkar människor i hela världen och utmaningen med att hantera detta är stor. I takt med att befolkningen ökar och fler flyttar till städerna ökar också svårigheterna med att på bästa sätt utforma städerna på ett sätt som skapar en ljudmiljö som vi trivs i. I denna studie undersöktes vilka faktorer som påverkar hur vi uppfattar ljudmiljön på olika platser. Resultaten visade att införande av ett nytt synsätt på ljud, i form av en beskrivningsmall där både positiva och negativa ljud tas med i analysen, skulle leda till en bredare och mer korrekt analys av ljudkvaliteten.

Buller är ett stort problem i hela världen då det leder till ökad stress och sömnsvårigheter. Dessa problem ökar i takt med att befolkningen ökar och att fler flyttar till städerna vilket leder till att fler människor vistas på mindre ytor. Detta i sin tur leder till en tätare bebyggelse och högre ljudnivåer som en följd av mer trafik och mer stängda stadsrum där ljudet stannar kvar. Dessa förändringar ökar utmaningen med att utforma stadsmiljöer på ett sätt som gynnar en god vistelsemiljö. I denna studie undersöktes hur sättet vi ser på och analyserar ljud idag kan utvecklas för att på ett bättre sätt kunna beskriva ljudmiljön.

Idag ingår arbetet med att skapa en god ljudmiljö i Sveriges nationella miljöarbete. Det miljömål som innefattar detta är *God bebyggd miljö* där det uttrycks att ljudmiljön ska medföra så få negativa konsekvenser på hälsan som möjligt. För att uppnå detta har riktvärden för hur höga ljudnivåerna får vara införts. För utomhusmiljöer innefattar dessa vilka ljudnivåer som får förekomma vid husfasader och uteplatser samt även vissa vistelseytor som skolgårdar. Forskare har riktat kritik mot att dessa typer av riktvärden inte är tillräckliga eller tillräckligt effektiva för att bedöma ljudkvalitet. En analys av fler ljudkällor än de som undersöks idag som redan befintliga ljud samt ett större fokus på ljudens karaktär, hur det varierar skulle skapa fler möjligheter att skapa en bättre ljudmiljö, menar forskarna.

Metoden som användes i studien var dels en analys av tillgänglig forskning och dels en modelleringsstudie där forskningsteorierna applicerades. Denna forskning innefattade vad människor upplever som störande och mindre störande ljud i olika miljöer, hur olika ljudmiljöer kan skapas och förändras genom olika metoder samt hur modelleringar och beräkningar av ljudmiljöer kan utvecklas. Forskningen visar på att större hänsyn till andra ljudkällor samt ljudens karaktär skulle leda till att bättre lämpade lösningar skulle kunna föreslås. Detta eftersom samspelet mellan olika ljud påverkar hur pass stor inverkan exempelvis en bilväg har på ljudmiljön. Att undersöka hur detta samspel påverkar och kan påverkas samt ta hänsyn till vad platsen är avsedd för skulle leda till en bättre helhetsbild av ljudmiljön.

Den andra delen av metoden bestod av en fallstudie där ljudet från en väg vid tre olika utomhusmiljöer modellerades för att visa hur olika stadsmiljöer påverkar ljudutbred-

ningen. Dessa tre fall bestod av ett öppet respektive stängt gaturum samt ett stängt gaturum med ett torg vid den ena sidan av vägen. Ljudnivåerna från en genomgående bilväg modellerades och ljudets vägar samt ljudets dominerande frekvenser analyserades. Forskningen från litteraturstudien sammanställdes och applicerades på dessa tre fall för att analysera hur de framkomna teorierna och metoderna kunde appliceras i praktiken.

Utvärderingen av hur väl de nya teorierna och metoderna applicerades på de tre fallen resulterade i en beskrivningsmall. Beskrivningsmallen bestod av ett antal frågor som, utifrån den forskning som presenterats, bör besvaras då ljudkvalitet på en plats ska bedömas. Dessa frågor utgick i huvudsak från vilka ljudnivåer och frekvenser som återfanns, vilken karaktär de olika ljuden hade samt platsens syfte och utformning. Detta för att på ett effektivt sätt, både ur ett ekonomiskt, socialt och hälsomässigt perspektiv, kunna åtgärda eller forma omgivningen och därmed skapa en så god ljudmiljö som möjligt. Den resulterande beskrivningsmallen ger, utifrån den teoretisk applicering som utförts i denna studie, en bredare analys av ljudmiljön men den behöver även valideras mot verkliga fall. Även en standardiserad metodik kring hur mallen ska implementeras i verkligheten behöver tas fram för att den ska kunna användas.

ORDLISTA

Akustisk design	Ett hjälpmedel för att begränsa oönskade ljud och förstärka positiva ljud, både i planerings- och driftsfasen.
Akustisk impedans	Hur mycket rörelse en ljudvåg skapar på ett material. Är det en stor skillnad mellan två medium reflekteras en stor andel av ljudet.
A-vägda ljudnivåer	Ljudnivåer där frekvenser viktas olika baserat på det mänskliga örat.
Diffraction	Fenomenet då ljudvågorna böjs av då de träffar ett hinder.
Efterklangstid	Den tid det tar för ljudet att sjunka 60 dB efter att ljudkällan stängts av.
Interferens	Då flera ljudvågor påverkar varandra, antingen förstärkande eller försvagande.
Ljudkvalitet	En bedömning av ljudmiljön. God ljudkvalitet innebär att inverkan av önskvärda ljud överväger ljud från buller.
Ljudtransmissionsförluster	Energiförluster då ljudet färdas i ett medium. I denna rapport innefattar detta endast friktion för motsvarande stillastående luft.
Okulärbesiktning	Platsbesök för att bedöma platsens ljudlandskap och arkitektur.
Refraktion	Ljudets vertikala riktningsförändring på grund av atmosfärens temperaturprofil.

Innehåll

1	INLEDNING	1
1.1	SYFTE	2
1.2	MÅL	2
1.3	FRÅGESTÄLLNINGAR	2
1.4	AVGRÄNSNINGAR	2
1.5	STRATEGI FÖR ATT UPPNÅ MÅLET	3
2	LJUD I SAMHÄLLET	3
2.1	BULLER	3
2.1.1	Hälsoeffekter	3
2.1.2	Riktvärden	4
2.1.3	Ljudklasser	6
2.1.4	Samhällsakustiska beräkningar	6
2.2	JURIDIK VID ANLÄGGNING	7
2.2.1	Detaljplan	7
2.2.2	Miljökonsekvensbeskrivning	7
2.2.3	Kritik mot hälsans roll i MKB:er	8
2.3	LJUDKVALITET	8
2.3.1	Åtgärdsprogram för omgivningsbuller	9
2.3.2	Åtgärdsmetoder	9
2.3.3	Maskering	10
2.3.4	Akustisk design	12
3	LJUDETS EGENSKAPER	14
3.1	LJUDETS HASTIGHET	15
3.2	LJUDTRYCKSNIVÅ	16
3.2.1	Olika beskrivningar av ljudtryck	17
3.3	LJUDFREKVENSNIVÅ OCH TONALITET	17
3.3.1	Det mänskliga örat	17
3.3.2	Vägningsmått	18
3.4	LJUDETS SPRIDNING	19
3.4.1	Ljudkällan	19
3.4.2	Ljudfält	20
3.4.3	Absorption	20
3.4.4	Impedans	21
3.4.5	Diffusion	22
3.4.6	Diffraction	22
3.4.7	Efterklang	22
3.4.8	Interferens	22
3.4.9	Resonans	23
3.4.10	Luftljud och stomljud	23
3.5	METEOROLOGISKA EFFEKTER PÅ LJUD	24
3.5.1	Refraktion	24
3.5.2	Markimpedans	24

4	TIDIGARE STUDIER	25
4.1	STUDIER KRING AKUSTISK DESIGN	25
4.1.1	Modellering av shoppinglandskapet	25
4.1.2	Ljud och andra rum	27
4.1.3	Akustiska designartifakter och metoder för urbana ljudlandskap	28
4.2	STUDIER KRING UPPLEVELSEN AV OLIKA LJUDMILJÖER	29
4.2.1	Ljudlandskapskvalitet i urbana miljöer	29
4.2.2	Psykofysik och ljudlandskap	29
4.2.3	Bullerstörningar och rekreation i olika innergårdsmiljöer	30
4.2.4	Störningar från lågfrekvent buller	31
4.3	MODELLERINGSSTUDIER KRING URBANA LJUDMILJÖER	31
4.3.1	Strålgångs- och vågbaserade beräkningsmetoder	32
4.3.2	Numeriska modelleringar av ljudutbredning till stängda innergårdar	33
5	METOD	33
5.1	LITTERATURSTUDIE	34
5.1.1	Källtyper	34
5.2	FALLSTUDIE	34
5.2.1	Olive Tree Lab	35
5.3	INDATA <i>OLIVE TREE LAB</i>	36
6	RESULTAT	39
6.1	FALLSTUDIE	39
6.1.1	Fallstudie 1: Gaturum med en öppen sida (ursprunglig utformning av området)	39
6.1.2	Fallstudie 2: Stängt gaturum	42
6.1.3	Fallstudie 3: Stängt gaturum med inneslutet torg med öppning mot vägen . .	46
6.2	RESULTERANDE BESKRIVNINGSMALL	49
6.2.1	Framtagande av beskrivningsmall	49
6.2.2	Beskrivningsmall	49
6.2.3	Tolkning och implementering av beskrivningsmallen	51
6.2.4	Implementering av beskrivningsmallen på fallstudien	52
7	DISKUSSION	57
7.1	MODELLERINGSRESULTATEN	58
7.1.1	Fall 1	58
7.1.2	Fall 2	58
7.1.3	Fall 3	59
7.1.4	Osäkerheter i modellen	59
7.2	DISKUSSION OM UTFORMNINGEN AV BESKRIVNINGSMALLEN	59
7.3	FÖRSLAG TILL FORTSATTA STUDIER	62
8	SLUTSATSER	64
	REFERENSER	65
	BILAGOR	70
	BILAGA A: UTDRAG UR TIDIGARE MKB:ER	70
	BILAGA A1: MKB Arenastaden, Järva och Råsunda, Solna stad	70
	BILAGA A2: MKB kv. Kapplöpningen mm. Ulriksdal, Solna stad	71
	BILAGA B: INSTÄLLNINGAR I OLIVE TREE LAB	72

1 INLEDNING

Buller är ett stort miljöproblem i världen och världshälsoorganisationen WHO uppskattar att buller från trafik är den miljöaspekt som har näst störst negativ påverkan på människors hälsa efter luftföroreningar från små partiklar (European Environment Agency, u.å.). Buller definieras som oönskat ljud och vid för höga nivåer eller lång exponering kan det leda till hälsomässiga besvär såsom stress, sömnbrist och förhöjt blodtryck (ibid.). I Sverige har regeringen tagit fram en förordning (2015:216) med stöd av miljöbalken med bestämmelser om trafikbuller (Boverket, 2017). Det finns också riktvärden gällande industribuller som Boverket har listat och dessa tillämpas och tolkas av den aktör som tillämpar plan- och bygglagen (Boverket, 2015b).

Arbetet med för att skapa en god ljudmiljö är en del i det övergripande miljöarbete som utförs nationellt. Riksdagen i Sverige har infört ett miljömålssystem som innefattar ett generationsmål, 16 miljö kvalitetsmål och ett tjugotal etappmål. Generationsmålet är övergripande och vägledande för miljöarbetet på alla nivåer och formuleras som: *Det övergripande målet för miljöpolitiken är att till nästa generation lämna över ett samhälle där de stora miljöproblemen är lösta, utan att orsaka ökade miljö- och hälsoproblem utanför Sveriges gränser* (Miljömål, 2016). Miljö kvalitetsmålen beskriver det önskvärda tillstånd som miljön ska befinna sig i och detta följs upp årligen av respektive myndighet. Det miljö kvalitetsmålet som berör ljudmiljö är *God bebyggd miljö* som Boverket ansvarar för (Miljömål, 2017). En del i miljö kvalitetsmålet *God bebyggd miljö* är att *Städer, tätorter och annan bebyggd miljö ska utgöra en god och hälsosam livsmiljö samt medverka till en god regional och global miljö* (Naturvårdsverket, 2017b). Detta innefattar att ljudmiljön ska medföra så få negativa hälsoeffekter som möjligt och detta benämns i projektet som en hållbar stadsmiljö med avseende på ljud.

Städerna i Sverige växer snabbt och det finns ett stort behov av ett mer utförligt tillvägagångssätt vad gäller planering av ljudmiljö. Bara under det andra halvåret 2017 ökade antalet invånare i Stockholm, Göteborg och Malmö med 20 193 (+0.9 %), 4167 (+0.7 %) respektive 2432 (+0.7 %) (SCB, 2018). Befolkningsökningen leder till en tätare bebyggelse och förhöjda ljudnivåer vilket försvårar stadsplaneringen. Tidigare forskning visar att endast värdera ljud utifrån ljudstyrka inte är tillräckligt för att bedöma ljudkvaliteten (Berglund, Nilsson och Axelsson, 2007) utan att även ljudens karaktär och stadsrummens positiva ljudkvaliteter bör tas med i beaktning (Dyrssen m. fl., 2014).

Detta projekt syftar till att undersöka möjligheterna att utveckla en ny ljudanalysmetod för utformning av hållbara stadsmiljöer ur ett ljudtekniskt och hälsomässigt perspektiv. Detta inbegriper att undersöka mer än bara ljudnivåerna från bullerkällan samt att även värdera ljudmiljön hos vistelsemiljöer som idag inte faller under några riktvärden. Tillvägagångssättet för att uppnå detta inbegrep en analys av till-

gänglig forskning inom akustisk design samt en modelleringsstudie med det akustiska modelleringsprogrammet *Olive Tree Lab*.

1.1 SYFTE

Syftet med projektet var att ta fram en arbetsmetod i form av en mall där även rum-sakustiska beräkningsmetoder för stadsrum och okulärbesiktning på plats används i bedömningen av utomhusmiljöer.

1.2 MÅL

Målet med studien var att den nya metoden ska tillföra en djupare och bredare analys av ljudmiljön och att denna ska falla inom ramarna för miljöbalken och plan- och bygglagen.

1.3 FRÅGESTÄLLNINGAR

Projektet syftar till att besvara följande frågeställningar:

- Finns det aspekter som kan förändra hur samhället och människor ser på och upplever buller?
- Vilka nya aspekter kan införas vid standardiserade bullerutredningar för att förbättra ljudanalyser?
- Kan motivering för införande av dessa nya aspekter leda till att den nya ljudanalysen utgör en del i miljökonsekvensbeskrivningar?
- Vilka skillnader i utformning av hållbara stadsmiljöer skulle en ny ljudanalysmetod medföra?

1.4 AVGRÄNSNINGAR

Följande avgränsningar gjordes för att säkerställa att endast relevant information presenteras med avseende på studiens syfte:

- Fenomen som uppstår som en följd av att ljudkällorna är rörliga är idag inte en del i beskrivningen av ljudmiljön och kommer heller inte att beaktas i denna rapport. Exempel på dessa är ljudbang och Dopplereffekt vilka inte anses ha en stor relativ effekt på ljudmiljön.
- Studien fokuserar inte på att utreda potentialen i rent ljuddämpande lösningar som bullerplank, absorberande material eller avskärmning från bullerkälla av själva huset. Detta anses redan vara en del av dagens ljudanalysmetodik och rapporter kring olika åtgärders potential bedömdes vara tillräckligt utrett. Dessa åtgärder nämns som förslag i resultatet men effekten av dessa utreds inte i detalj.

- Validering av metoden mot verkliga fall utfördes inte. Endast validering mot teoretiska fall utfördes i studien.

1.5 STRATEGI FÖR ATT UPPNÅ MÅLET

För att kunna ta fram en ny ljudanalysmetod för utveckling av hållbara stadsmiljöer utfördes en djupgående litteraturstudie kring ljudets egenskaper, akustisk design, det vill säga hur ljudet upplevs och påverkar människor i olika miljöer och sammanhang samt utformning och implementering av detaljplaner och miljökonsekvensbeskrivningar. Litteraturstudien kompletterades med en fallstudie genom det akustiska modelleringsprogrammet *Olive Tree Lab*. Detta användes för att analysera olika ljudtekniska parametrar i tre olika urbana miljöer som exempel där den nya ljudanalysmetoden är tänkt att implementeras. Förhoppningen är att högre krav ska kunna ställas på modellering av ljud i stadsmiljöer eftersom fler parametrar än ljudnivån kan belysas som avgörande för ljudmiljön. .

2 LJUD I SAMHÄLLET

Detta avsnitt behandlar ljud i samhället, vilket i detta fall innefattar hur ljud påverkar människor negativt och hur samhället hanterar problematiken, samt även hur ljud kan påverka upplevelsen av miljön på ett positivt sätt. Se avsnitt 3 för förklaring av införda akustiska begrepp.

2.1 BULLER

Buller definieras som oönskat ljud. Vilket ljud som anses vara oönskat varierar mellan olika personer och situationer vilket gör definitionen subjektiv. Exempelvis anser en majoritet att flygbuller är mer besvärligt än vägtrafikbuller som i sin tur är mer besvärligt än buller från tågtrafik. Vad som avgör bulrets störningsgrad varierar beroende på en mängd faktorer såsom ljudets styrka, frekvenser, tid på dygnet, var ljudet befinner sig och i vilken situation vi befinner oss i, orsaken till ljudet samt ljudets variation. Exempelvis är vi mer känsliga för ett ljud som på ett tydligt sätt sticker ut från övriga ljud eller om ljudkällan inte har något direkt värde för oss (Attefall och Rempler, 2014).

2.1.1 Hälsoeffekter

Buller påverkar oss dels genom tillfälligt höga ljudnivåer som kan ge upphov till hörselskador, allmänstörning och sömnstörning samt tillfälligt förhöjt blodtryck och hjärtfrekvens och dels genom långvarig exponering. Flera studier pekar på att en långvarig exponering för buller ökar risken för hjärt- och kärlsjukdomar (Naturvårdsverket, 2017a). Orsaken till att buller kan ge upphov till dessa hälsoutfall är dels den direkta skada som för höga ljudnivåer orsakar på trumhinnan och dels att buller är en

stressor. Att buller är en stressor innebär att det aktiverar det autonoma nervsystemet och det hormonella systemet som i sin tur frisätter stresshormoner. Stresshormoner, som till exempel kortisol, påverkar just blodtryck och immunförsvaret vilket är orsaken till en ökad risk (Karolinska Institutet, 2017).

2.1.2 Riktvärden

Vid byggnation av bullergenererande infrastruktur tillhandahåller Naturvårdsverket riktvärden för ljudnivåer som påverkar boende i närliggande områden. Dessa är en del i arbetet som ska leda till att den uppsatta miljö kvalitetsnormen för buller ska efterföljas. Normen formuleras av regeringen som *det ska eftersträvas att omgivningsbuller inte medför skadliga effekter på människors hälsa* och är uppsatt utifrån de miljökrav som följer av Sveriges medlemskap i den Europeiska unionen (Naturvårdsverket, 2017c). Samtliga riktvärden gäller alltså enbart infrastruktur och inte övriga ljudkällor såsom människor och djur.

De uppsatta riktvärdena varierar beroende på vilken typ av infrastruktur det handlar om, om den omgivande miljön eftersträvar låga ljudnivåer samt även delvis vilken typ av ljud det handlar om. De värden som nämns här är ekvivalenta ljudnivåer (medel ljudnivå över ett dygn). Ett exempel är riktvärdena för buller från spårtrafik och vägar vid nybyggnation som är satta till 60 dBA vid husfasad och uteplats (65 dBA om bostaden är mindre än 35 m²) samt 50 dBA ekvivalent ljudnivå och 70 dBA maximal ljudnivå vid uteplats. I detta fall finns också bestämmelser utifall de satta riktvärdena skulle överskridas. Dessa säger att minst hälften av rummen ska ligga mot en sida, en så kallad tyst eller bullerdämpad sida, där den ekvivalenta ljudnivån underskrider 55 dBA samt att den maximala inte överstiger 70 dBA mellan 22:00 och 06:00. För uteplatsen gäller att den maximala ljudnivån på 70 dBA inte bör överskridas med mer än 10 dB fem gånger per timme mellan 06:00 och 22:00 (Riksdagen, 2017). För befintlig infrastruktur ligger riktvärdet för buller vid fasad och uteplats på 65 dBA dygnsekvivalent ljudnivå. Riktvärden från spår- och vägtrafik för bostäder respektive skolgårdar presenteras i tabell 1 respektive 2.

Tabell 1: *Regeringens framtagna riktvärden med avseende på väg- och spårtrafik. Riksdagen, 2017*

Avsedd plats	Riktvärde
Ekvivalentnivå inomhus	30 dBA
Maximalnivå inomhus nattetid	45 dBA
Ekvivalentnivå utomhus vid fasad och uteplats	60 dBA
Ekvivalentnivå utomhus vid fasad (bostäder upp till 35 m ²)	65 dBA
Maximalnivå utomhus vid uteplats i anslutning till bostad	70 dBA

Tabell 2: *Naturvårdsverkets riktvärden för skolgårdar med avseende på väg- och spårtrafik (ekvivalenta ljudnivåer för dygn). Naturvårdsverket, 2017d*

Del av skolgård	Riktvärde	Maxnivå
De delar av gården som är avsedda för lek, vila och pedagogisk verksamhet	50 dBA	70 dBA
Övriga vistelseytor inom skolgården	55 dBA	70 dBA

När det gäller industribuller bör bostadsbebyggelse accepteras vid ljudnivåer som underskrider värdena i tabell 3. Det ska tilläggas att maximala ljudnivåer nattetid inte bör överskrida 55 dBA mer än ett fåtal gånger, vilket i första hand gäller bullerdämpad sida. I de fall då ljudet består av tydligt återkommande impulser eller tydligt hörbara tonkomponenter såsom vid nitningsarbete bör värdena i tabellen sänkas med 5 dBA (Boverket, 2015a). I de fall då ljudnivåerna är höga under en kort period kan den ekvivalenta ljudnivån bestämmas som medelvärdet över som lägst en tidsperiod på en timme. Dessa riktvärden för trafik- och industribuller sammanfattas i tabell 1 till 3. I tabell 4 presenteras exempel på några ljudnivåer för att få en förståelse kring ungefär vilka nivåer det handlar om. Observera att de sistnämnda ljudnivåerna inte är frekvensvägda.

Tabell 3: *Boverkets riktvärden för bostäder med avseende på industribuller (ekvivalenta ljudnivåer). Boverket, 2015a*

Avsedd plats	Riktvärde kl. 06-18	Riktvärde kl. 18-22, helg 06-18	Riktvärde kl. 22-06	Maxnivå kl. 22-06
Utomhus vid fasad	50 dBA	45 dBA	45 dBA	55 dBA
Utomhus vid fasad med ljuddämpad sida	60 dBA	55 dBA	50 dBA	55 dBA

Tabell 4: *Exempel på ljudnivåer.*

Ljudkälla	Ljudnivå
Andetag	10 dB
Blåsande löv	20 dB
Viskning	40 dB
Normal konversation	60 dB
Vanlig gräsklippare	90 dB
Siren från utryckningsfordon (smärtgränsen)	120 dB
Pistolskott	160 dB

Denna rapport syftar till att undersöka dels behovet och dels möjligheterna till att även värdera ljudmiljön på vistelseytor som inte betraktas som bostad eller uteplats.

2.1.3 Ljudklasser

I byggprojekt för lokaler och bostäder används ljudklasser för att definiera vilka ljudkrav som ska uppnås för inomhusmiljön. De ljudklasser som används är:

- Ljudklass A: Högsta möjliga kvalitet på ljudmiljön som mycket få människor kan förväntas bli besvärade av.
- Ljudklass B: Högre krav ställs än för ljudklass C och är lämplig där god ljudmiljö eftersträvas.
- Ljudklass C: Avser ge ljudkvalitet som uppfyller minimikraven i Boverkets byggregler (BBR).
- Ljudklass D: Tillämpas endast då ljudklass C inte kan uppnås, exempelvis för vissa ombyggnadsfall.

Alla ljudklasser har olika krav på ljudnivå, efterklangstid och ljudisolering och dessa definieras i två svenska standarder, SS 25268 för lokaler och SS 25267 för bostäder (Gustafson, 2017). Dessa krav presenteras i tabell 5 men ljudisolering utesluts eftersom det inte ansågs vara relevant för denna studie. För beskrivning av stegljud, se avsnitt 3.4.10.

Tabell 5: *Ljudkrav från Svensk standard för bostäder samt lokaler (SS 25267 och SS 25268) för ljudklass A-D. För Lokaler gäller olika ljudkrav för olika rumstyper och de som anges här avser de hårdaste kraven. (Sjödahl, 2011)*

Ljudkrav avser	A	B	C	D
Stegljudsnivå Bostad	48 dB	52 dB	56 dB	60 dB
Stegljudsnivå Lokal	48 dB	56 dB	56 dB	64 dB
Installationsbuller Bostad, L_A/L_C	22/42 dB	26/46 dB	30/50 dB	30/- dB
Installationsbuller Lokal, L_A/L_C	30/50 dB	30/50 dB	30/50 dB	35/55 dB
Trafikbuller Bostad, L_A/L_C	22/37 dB	26/41 dB	30/45 dB	34/49 dB
Trafikbuller Kontor, L_A/L_C	30/45 dB	30/45 dB	30/45 dB	35/55 dB

2.1.4 Samhällsakustiska beräkningar

Med samhällsakustiska beräkningar avses beräkningar av ljud i utomhusmiljöer. I dagsläget appliceras detta främst på fasader, skolgårdar och uteplatser, vilket grundar sig i de riktvärden som är framtagna, se avsnitt 2.1.2. Detta görs vanligen via modelleringsprogram likt *Olive Tree Lab* som används i denna studie. Underlag för miljökonsekvensbeskrivningen ges vanligtvis dels i form av bullernivåer vid berörda fasader, och dels som en ljudutbredningskarta med ljudnivåer en bit över marken över det berörda området. Som underlag till detta ligger byggnadernas och terrängens utformning, eventuella bullerplank eller liknande samt ljudkällornas typ och placering. Med ljudkällans typ menas om det är en punkt- eller linjekälla samt även utsänd

ljudnivå vid olika frekvenser. Informationen kring denna process är framtagen genom en bred studie av bullerkartläggningar i miljökonsekvensbeskrivningar, bland annat de som presenteras i bilaga 8. Vid rumsakustiska beräkningar finns vanligtvis ett större fokus på fler ljudparametrar såsom efterklangstid, frekvensområde och hur jämnt ljudet fördelas i rummet. Ibland utförs även så kallad okulärbesiktning, det vill säga att platsen besöks och undersöks. Detta beror dels på att området som analyseras är mindre, vilket underlättar för en högre detaljnivå men också att det ofta eftersträvas en större noggrannhet vid anläggning av exempelvis konsertsalar. En del av denna kunskap kring hur ljud kan mätas och värderas skulle kunna implementeras även i utomhusmiljöer där en god ljudkvalitet prioriteras. Dock kräver många rumsakustiska beräkningsprogram att det beräknade området kan betraktas som ett slutet rum med stängda ytor i tre dimensioner vilket gör modelleringar utomhus med dessa metoder svåra att utföra.

2.2 JURIDIK VID ANLÄGGNING

2.2.1 Detaljplan

En detaljplan är ett dokument som reglerar vilka byggåtgärder som aktörer får vidta, med syftet att mark- och vattenområden används till de ändamål området är mest lämpat för. Den består alltid av ett avgränsat område på en plankarta med en tillhörande beskrivning. I beskrivningen ingår syfte och mål med planen samt ibland även andra handlingar som en illustrationskarta eller en MKB. Det ska också framgå vilka tekniska, ekonomiska och fastighetsrättsliga åtgärder som behövs för att planen ska kunna genomföras på ett ändamålsenligt och samordnat sätt. När en detaljplan ska tas fram och vad som ska beskrivas i den bestäms av plan- och bygglagen (Boverket, 2014).

Bullerkartläggningar görs idag som en obligatorisk del i planbeskrivningen vid upprättande av en eller flera bostäder. Detta enligt *Plan- och bygglagen* (2010:900) 4 kap. 33a § som lyder (ibid.): *Om en detaljplan avser en eller flera bostadsbyggnader ska planbeskrivningen, om det inte kan anses obehövt med hänsyn till bullersituationen, innehålla en redovisning av beräknade värden för omgivningsbuller*

1. *vid bostadsbyggnadens fasad, och*
2. *vid en uteplats om en sådan ska anordnas i anslutning till byggnaden. Lag (2014:902).*

2.2.2 Miljökonsekvensbeskrivning

Detaljplanen innehåller en så kallad miljökonsekvensbeskrivning (MKB) i de fall en specifik miljöbedömning krävs. En MKB är en del i det beslutsunderlaget för prövning av verksamheter och åtgärder. Den omfattar en sammanfattning av planens innehåll och syfte, en beskrivning av nuvarande miljö, en utvärdering av alternativ och dess

miljöpåverkan, beaktande av miljö kvalitetsmål, eventuella åtgärder för att minska negativ miljöpåverkan, sammanfattning samt åtgärder för uppföljning (Boverket, 2006).

Juridiskt specificeras omfattningen i 6 kap. 35-37 §§ miljöbalken samt i miljöbedömningsförordningen (2017:966) 16-19 §§. En MKB ska upprättas om genomförande av planen kan leda till betydande miljöpåverkan och omfattningen anges av Naturvårdsverket (2017c). Det finns inga fasta bestämmelser kring hur omfattande varje punkt ska beaktas utan detta formuleras av Naturvårdsverket (2017c) som att MKB:en ska ha en omfattning som är rimlig med hänsyn till rådande kunskaper och bedömningsmetoder och som möjliggör en samlad bedömning av väsentliga miljöeffekter. Detta projekt ämnar att utifrån dessa formuleringar ställa högre krav på ljudanalyser i MKB:er.

I samtliga MKB:er som undersökts där buller har beaktats har endast ljudnivåerna kopplats till de riktvärden som föreligger beaktats, se bilaga A för utdrag. Andra akustiska parametrar som ljudets karaktär och frekvensområde beaktas ej, även om vägningsmått A används som standard.

2.2.3 Kritik mot hälsans roll i MKB:er

I Kågströms rapport (2009) beskrivs en problematik kring hur hälsa ska beskrivas och tas hänsyn till i miljökonsekvensbeskrivningar. Hon nämner att flera forskare påtalar att synen på hälsa är för snäv, vilket innebär att endast ett fåtal faktorer styr bedömningen. Andra problem som ofta betonas är att det saknas fokus på jämlik hälsa samt att bedömningarna oftast stannar vid hälsoutfall, till exempel att människor kommer störas, och inte tar upp hälsoeffekter. Anledningar till detta anses vara otydliga lagkrav och bristfälliga metoder för att bedöma hälsa som är ett komplext begrepp. Ofta läggs liten vikt på sociala effekter och istället fokuseras det på miljömässiga besvär, vilket av flera forskare anses vara bristfälligt. Rikt- och gränsvärden är inte alltid baserade på hälsa utan är ofta ett resultat av kompromisser mellan myndigheter, vilket innebär att de inte garanterar en god hälsa (Kågström, 2009).

2.3 LJUDKVALITET

Med god ljudkvalitet (eller god akustisk kvalitet) menas att byggnaden, stadsrummet eller omgivningen är konstruerad så att ljudmiljön blir gynnsam för det ändamål som området avser. Exempelvis ska en kontorsmiljö skapa en helt annan ljudbild än en konserthall där det ofta är önskvärt med längre efterklangstid. Sammanfattningsvis kan det beskrivas som att önskvärda ljud överväger icke önskvärda. (Kropp, 2013e). Det går alltså inte alltid att eftersträva samma typ av karaktäristik utan en unik analys behöver göras i varje enskilt fall. Denna analys kan vara svår att utföra och vilka aspekter som ska tas i beaktning samt vilka ljud som anses vara önskvärda varierar beroende på vem som tillfrågas. På grund av detta syftar denna rapport till att ta fram en objektiv beskrivningsmall för att värdera ljudmiljön.

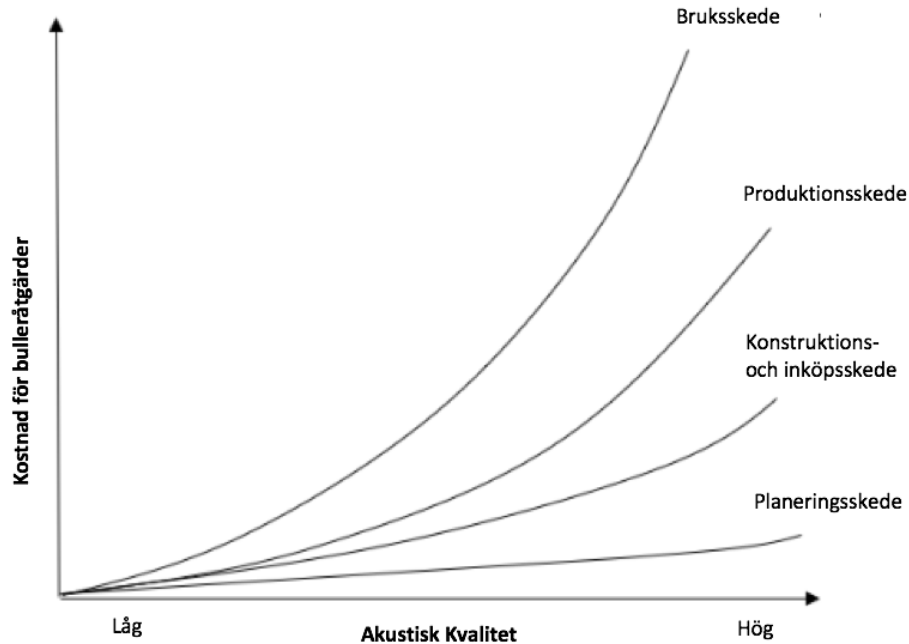
2.3.1 Åtgärdsprogram för omgivningsbuller

Enligt förordning (2004:675) om omgivningsbuller är Trafikverket och samtliga kommuner med mer än 100 000 invånare skyldiga att var femte år genomföra bullerkartläggningar och att ta fram åtgärdsprogram. Syftet med detta är att samordna och ta fram de mest kostnadseffektiva och de i övrigt mest lämpade åtgärderna så att miljö kvalitetsnormer följs. Dessa kartläggningar och åtgärdsprogram ska i dagsläget innefatta buller från vägar, järnvägar och flygplatser i hela landet samt även större hamnar och vissa industrigrenar i de större kommunerna (Naturvårdsverket, 2017e). I förordningen om omgivningsbuller samt 5 kap. miljöbalken beskrivs vilka uppgifter som ska ingå i åtgärdsprogrammet varav följande är några exempel på de som är relevanta för denna studie (ibid.):

- *beskrivning av vilka bullerkällor som myndigheten eller kommunen ska kartlägga*
- *sammanfattning av bullerkartläggningen, som ska innefatta en uppskattning av det antal personer som beräknas vara utsatta för buller*
- *beskrivning av situationer som behöver förbättras samt problem som bedöms vara prioriterade och kriterierna för hur dessa valts ut*
- *beskrivning av åtgärder för att skydda områden där ljudnivån ansetts utgöra en särskild kvalitet såsom parker, rekreationsområden, friluftsområden och andra natur- och kulturmiljöer*
- *en långsiktig strategi för hantering av buller och effekten av buller, vid behov även minskning av buller*
- *eventuell miljöbedömning enl. 6 kap. miljöbalken*

2.3.2 Åtgärdsmetoder

Den här studien fokuserar på att utveckla analysen i planeringsfasen av ett projekt vilket leder till en bättre utvärdering av om åtgärdsmetoder är nödvändiga och i så fall vilka som bör användas. Att göra en grundlig analys i ett tidigt skede i ett projekt är oftast det mest kostnadseffektiva sättet att uppnå en god ljudmiljö, vilket illustreras i figur 1. Detta delavsnitt presenterar kort några av de vanligaste åtgärdsmetoderna.



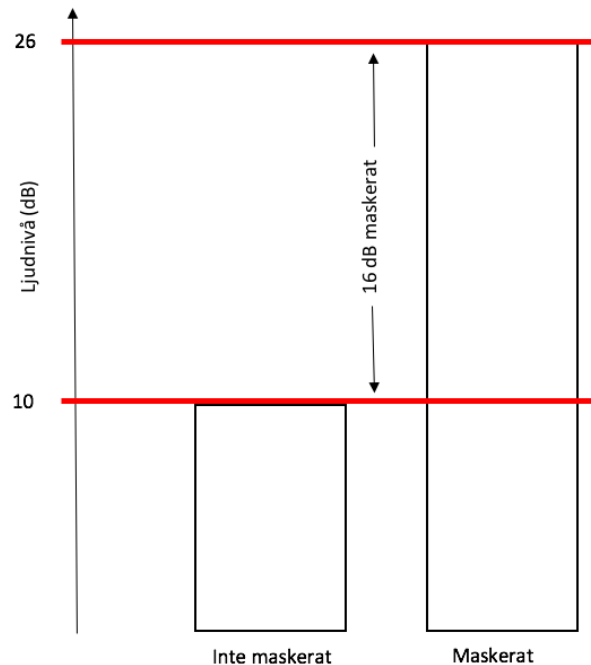
Figur 1: *Relationen mellan kostnad och ljudkvalitet i olika faser av ett anläggningsprojekt. Koncept från Kihlman, Kropp och K. Larsson, 2013.*

Det finns ett antal åtgärdsmetoder för att uppnå en god ljudmiljö bortsett från att minska eller avlägsna själva ljudkällan. En av de vanligaste är dämpning. Detta utförs främst genom användning av absorbenter i inomhusmiljöer, se avsnitt 3.4.3 för exempel. En annan typ av åtgärd som också är vanlig, framförallt i mer storskaliga projekt, är bullerskydd i form av bullerskärmar eller bullervallar. Syftet med dessa är helt enkelt att skärma av och därmed reflektera ljudvågor.

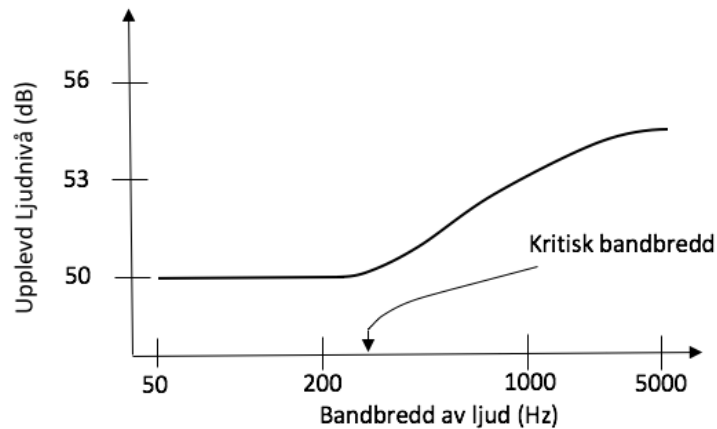
2.3.3 Maskering

Ytterligare en åtgärdsmetod är maskering, vilket är den som är starkast sammankopplad med akustisk design, se avsnitt 2.3.4. Det går ut på att addera positiva ljud som maskerar andra ljud inom samma frekvensområde som upplevs som mer negativa. Effekten blir särskilt påtaglig då det maskerande ljudet har en lägre frekvens än det maskerade. Ljud med låga frekvenser har också en större tendens att bilda stående vågor och resonanser i rum vilket gör att dessa ljud hänger kvar längre i tid (Akustikmiljö, 2013), se avsnitt 3.4.9 för mer om resonans. Gelfand (2010) utförde ett test i en studie där han jämförde vid vilken ljudnivå ett visst ljud kunde detekteras i en helt tyst miljö respektive en miljö där ljudet maskerades av en dammsugare. Resultatet visade att det krävdes en höjning av ljudstyrkan med 16 dB för att ljudet skulle kunna uppfattas i den maskerade miljön, vilket illustreras i figur 2. Denna skillnad varierar dock beroende på vem det är som lyssnar samt ljudnivån och utsänt frekvensområde hos källan och det maskerade ljudet (Gelfand, 2010).

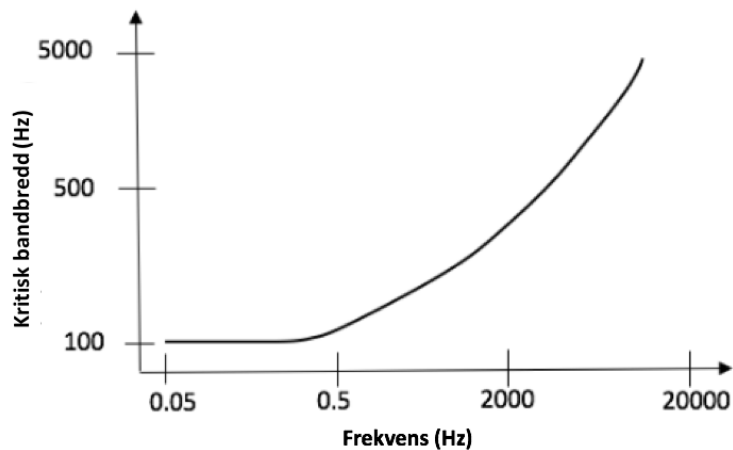
Vilka ljud som maskerar vilka kan estimeras genom att analysera de kritiska banden. De kritiska banden kan grovt sett beskrivas som de frekvensområden där en ton påverkar en annan ton (framförallt av högre frekvens) genom maskering. I figur 3 illustreras hur den totala upplevda ljudnivån av befintligt ljud på 50 dB med olika bandbredd påverkas av att ett ljud på 50 dB vid 2kHz adderas. En adderad upplevd ljudstyrka erhålls först då det befintliga ljudet har en bandbredd som är större än den kritiska bandbredden för den adderade ljudet. Detta illustrerar hur höga frekvenser maskerar ljudet sämre än låga. I figur 4 illustreras den kritiska bandbreddens beroende av frekvensen hos det befintliga ljudet. Ett ljud med en hög frekvens har en större kritisk bandbredd vilket gör det lättare att maskera (Fridrich, 1990). Ett exempel på när maskering visade sig vara en fungerande metod är i en studie av Garca m.fl. (2016) som utfördes i Monterrey, Mexiko. I studien upprättades ett antal fontäner längs en strandpromenad som är utsatt för mycket trafikljud. Resultatet visade att fontänerna minskade den hörbara andelen av oönskat ljud samt att det rent estetiska tillägget minskade uppfattningen om att området var ljudförorenat. Författarna understryker dock att hänsyn behöver tas till den nya upprättade ljudmiljön i form av placering och utformning av de befintliga och nya ljudkällorna (Garca m.fl., 2016). En studie av Al-Musawi (2012) visade dock att vattnet i en fontän snarare tenderar att maskeras av trafikljud än tvärt om. Effekten kan dock förbättras om flödet på vattnet höjs eftersom bandbredden då minskar (Al-Musawi, 2012). Begränsningarna med maskering är att det måste vara arkitektoniskt fördelaktigt samt att den nya ljudbilden inte får upplevas som kaotisk.



Figur 2: Ljudnivå för vilket ett specifikt ljud är hörbart i en tyst respektive maskerad miljö. Koncept från Gelfand, 2010.



Figur 3: Den upplevda ljudnivån (*y*-axeln) från ett ljud på 50 dB med olika bandbredd med inverkan på ett ljud på 50 dB på 2 kHz, observera den icke linjära *x*-axeln. Koncept från Fridrich, 1990.

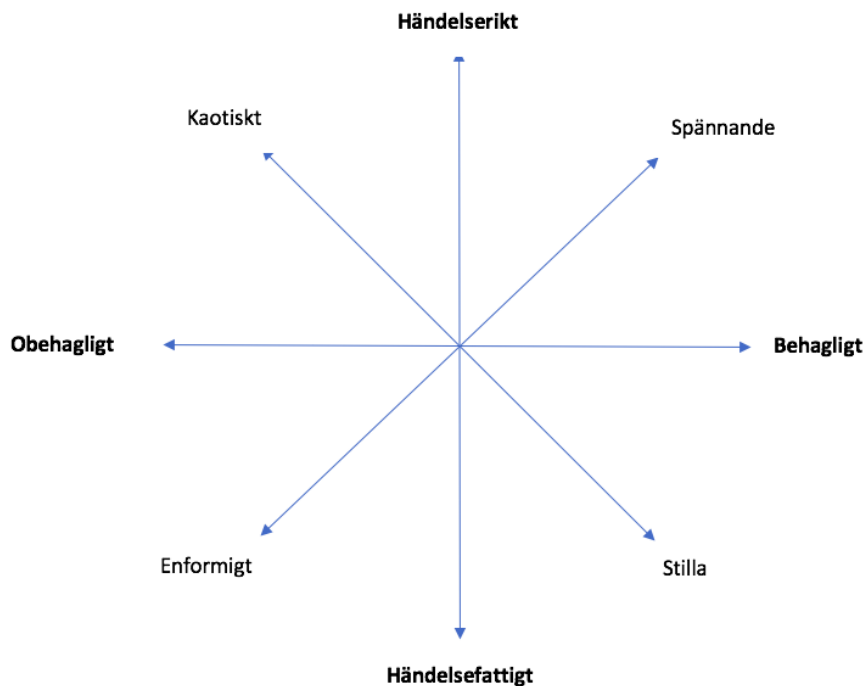


Figur 4: Den kritiska bandbredden för ljud vid olika frekvenser, observera de icke linjära skalorna. Koncept från Fridrich, 1990.

2.3.4 Akustisk design

Akustisk design används för att maskera/reducera negativa ljud och förstärka positiva ljud för att på så sätt förbättra ljudmiljön. Ett exempel på detta är som nämnt ovan då en porlande fontän maskerar trafikljud utan att det upplevs som störande. Andra exempel är då vegetation kan öka förekomsten av fåglar eller att spelning av musik i butiker eller på torg förändrar ljudmiljön. Detta medför dock inte att kraven för bullernivåer uppnås utan akustisk design kan i fall med för höga ljudnivåer utföras som komplement till ljudreducerande åtgärder (Göteborgs Stad, 2014).

Vad som uppfattas som positiva och negativa ljud är ibland svårt att bedöma då det har att göra med psykologiska aspekter som kan variera från individ till individ. I ett forskningsprojekt av Göteborgs Stad (2014) delas ljud in i tre huvudkategorier; naturljud, ljud från människor och teknologiska ljud. Dessa i sin tur placeras in i ett antal upplevelsedimensioner, se figur 5. Mänskliga ljud hamnade främst i den första kvadranten, alltså behagligt och händelserikt (spännande) men hamnade även delvis i den andra kvadranten (kaotiskt). Naturljud hamnade främst i den fjärde kvadranten och ansågs mest vara stilla ljud. Den ljudformen som upplevdes mest störande och därmed gav det högsta stresspåslaget var teknologiska ljud som främst hamnade i den andra eller tredje kvadranten och klassades alltså som kaotiskt eller enformigt (Göteborgs Stad, 2014). En tredje dimension till denna modell i form av lämpligheten av ljudmiljön för platsens syfte och utformning föreslås av Axelsson, Kang och Aletta (2016). Detta skulle bidra med mer information än den som kan upplevas direkt. För att föra metodiken kring ljudanalyser mot detta krävs att det internationella ljudlandskapssamfundet kommer överens om standardiserade numeriska skalor och bedömningsmetoder (Axelsson, Kang och Aletta, 2016).



Figur 5: Övergripande upplevelsedimensioner för olika ljudlandskap. Koncept från Göteborgs Stad, 2014.

3 LJUDETS EGENSKAPER

Den teori som beskrivs i detta avsnitt ligger till grund för de antaganden och de beräkningar som utförs genom hela studien och utgör en bas för att den grundläggande förståelsen kring ljud. Avsnittet ger också en introduktion till några av de fenomen som påverkar ljud och bidrar därmed till en förståelse kring komplexiteten i att utföra noggranna ljudanalyser. Införda storheter förklaras i tabell 6.

Tabell 6: Förklaring av införda storheter

Storhet	Förklaring	Enhet
c	Ljudets hastighet	$[m/s]$
f	Frekvens	$[Hz](= [1/s])$
λ	Våglängd	$[m]$
κ	Konstant (C_P/C_V)	-
P	Tryck	$[Pa]$
ρ	Densitet	$[kg/m^3]$
$L_{vagning}$	Ljudtrycksnivå (olika viktat)	$[dB](teoretisk)$
T	Temperatur	$[^\circ C]$
t	Tid	$[s]$
r	Avstånd	$[m]$
V	Volym	$[m^3]$
m	Massa	$[kg]$
A	Amplitud	$[m]$
ϕ	Fasvinkel	$[rad]$
ω	Vinkelhastighet	$[rad/s]$
q	Specifik fuktighet	$[kg/kg]$
Z	(Akustisk) Impedans	$[kg/m^2 s]$
u	Partikelhastighet	$[m/s]$
v	Vindhastighet	$[m/s]$
A_{abs}	Absorption	$[m^2 \cdot Sabine]$
p	Ljudeffekt	$[W]$

Ljud är en longitudinell eller transversell vågrörelse hos det medium genom vilket ljudet fortplantas. Dessa ljudvågor är mekaniska och elastiska och består av olika snabba expansioner och kompressioner av mediet. Dessa expansioner och kompressioner kan också beskrivas som tryckförändringar som skapas av mekaniska processer som vibrerande ytor, accelererande partiklar eller värmetransport. Villkoret för att dessa ska kunna uppstå är att mediet har en massa och en elasticitet och kan därför inte uppstå i vakuum (C. Larsson, u.å.). Det finns ett antal parametrar som idag används för att beskriva ljudmiljöer. Exempel på dessa är den A-vägda maximala ljudnivån, de ekvivalenta A-vägda ljudnivåerna över en viss tid och det frekvensområde som ljudet befinner sig inom (Kropp, 2013e). Alla dessa parametrar beskrivs mer ingående i detta avsnitt.

3.1 LJUDETS HASTIGHET

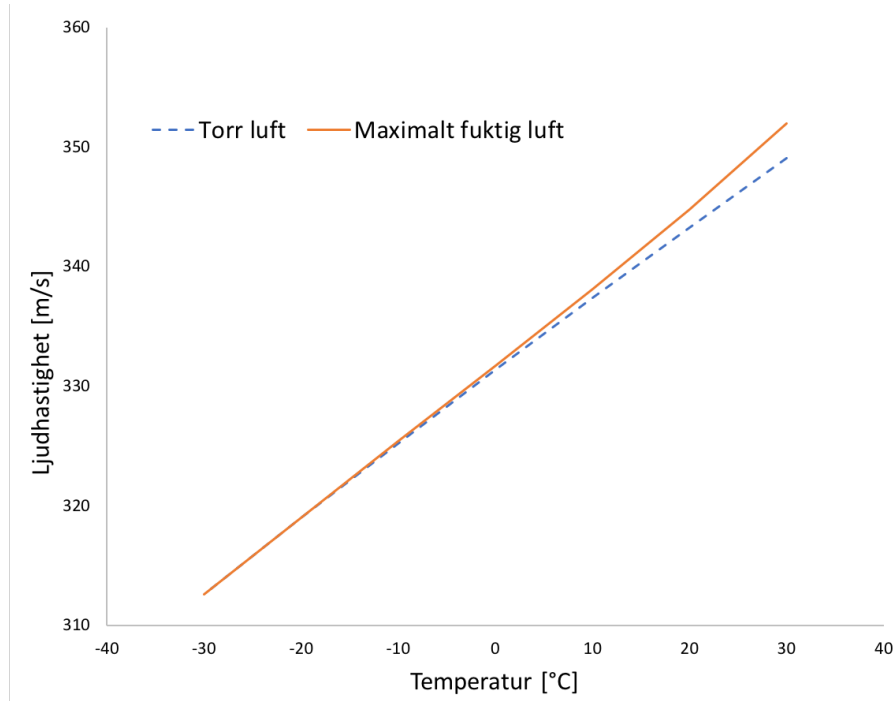
Ljudet rör sig med olika hastighet i olika medium. Detta beror på att det ursprungliga trycket och den ursprungliga densiteten varierar mellan olika medium vilket påverkar hastigheten på kompressionerna och expansionerna som uppkommer i det. Relationen mellan ljudets hastighet och mediets fysikaliska egenskaper beskrivs av ekvation (1). Det ska tilläggas att detta förutsätter att mediet är en ideal gas, det vill säga att ingen intermolekylär påverkan sker (C. Larsson, u.å.).

$$c_0 = \sqrt{\frac{\kappa p_0}{\rho_0}} \quad (1)$$

Där $\kappa = \frac{c_p}{c_v} = 1.4$ och p_0 och ρ_0 är det ursprungliga trycket respektive den ursprungliga densiteten hos mediet. Ljudets hastighet beror inte bara på mediets fysikaliska egenskaper utan också på yttre parametrar som andra rörelser i mediet såsom vind i luft, inblandning av andra ämnen samt temperaturen. Ju tätare medium och ju högre temperatur desto snabbare fortplantar sig ljudet. Exempelvis beror ljudets hastighet i luft på fuktigheten och temperaturen enligt ekvation (2) (Sengpielaudio, u.å.). Denna relation illustreras i figur 6 och det är kan utläsas att temperaturen har en större påverkan på ljudets hastighet än fuktigheten.

$$c_0 = 20.05\sqrt{(1 + 0.61q)T}, \quad (2)$$

där den specifika fuktigheten, q , definieras som kvoten massan vattenånga och massan våt luft.



Figur 6: *Ljudhastighetens beroende av temperaturen och fuktigheten. Maximalt fuktig luft=mättad luft.*

3.2 LJUDTRYCKSNIVÅ

Ljudtrycksnivån eller ljudstyrkan är ett mått på hur stora tryckförändringarna som uppstår vid ljudvågens utbredning är och det är också den parametern som används mest vid beskrivning av ljud. Atmosfärstrycket på jorden är under vanliga förhållanden $1 \cdot 10^5$ Pa och på detta adderas ljudtrycket. De lägsta ljuden som det mänskliga örat kan uppfatta har en ljudstyrka omkring $2 \cdot 10^{-5}$ Pa vilket också används som referenstrycket P_{ref} vid beräkningar. Referensvärdet kan dock variera beroende på användningsområdet, exempelvis kan ljudtryck beskrivas i form av volt i ett mätinstrument genom en omvandlingsfaktor. Det totala hörbara ljudtrycksområdet ligger mellan $2 \cdot 10^{-5}$ och 60 Pa. På grund av det stora spannet och att våra öron inte uppfattar ljudtrycket linjärt så beskrivs ljudstyrkan logaritmiskt enligt ekvation (3) där det också går att utläsa att den är enhetslös (Kropp, 2013d). På grund av denna definition av ljudstyrka följer att addition av flera ljudkällor sker enligt ekvation (4). En dubbling av ljudstyrkan, det vill säga då $L_{P1} = L_{P2}$ ger således en ökning på 3 dB (D. Davis och C. Davis, 1987).

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

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

3.2.1 Olika beskrivningar av ljudtryck

Den momentana ljudnivån är ofta inte tillräcklig för att beskriva fluktuerande ljudnivåer. I flera fall är det intressant att undersöka ljudnivåer som överskrider en viss del av tiden. Detta kan göras genom att koppla en ljudnivåmätare till en statistisk fördelningsanalysator och på så sätt se hur ljudet varierar med tiden. Vanliga måttal som används är L_{10}, L_{50} och L_{90} som anger den ljudnivå som överskridits 10, 50 respektive 90 procent av tiden (C. Larsson, u.å.). Ofta eftersträvas ett medelvärde av ljudnivån över en viss tid för att exempelvis kunna jämföras med riktvärden och detta benämns som den effektiva ljudnivån, P_{eff} eller rms-värde (root mean square-värde) och beräknas genom ekvation (5). För att karakterisera ljudnivån över en viss mätserie används den ekvivalenta ljudnivån, L_{eq} . Den beräknas vanligtvis över 12 eller 24 timmar beroende på syftet och svarar mot den mot den konstanta ljudnivå som under denna tid har samma energi som det mätta bullret. Denna beräknas genom ekvation (6). Det finns standarder för vad integrationstiden ska vara och de vanligaste är F(Fast, 0,125s) som används vid impulsljud och S(Slow, 1s) som används vid mer jämnt fördelat ljud. Det finns också olika sätt att värdera ljudnivåer under olika delar av dygnet varav L_{DEN} (Level Day-Evening-Night) är ett av de vanligare. Det måttet adderar 5 dB under kvällen mellan kl. 18 och 22 och 10 dB under natten mellan 22 och 06 och beskrivs genom ekvation (7) (World Health Organisation, 2009).

$$P_{eff} = \sqrt{\frac{1}{t} \int_0^T P^2(t) dt} \quad (5)$$

$$L_{eq} = 10 \log\left(\frac{1}{t_1 + t_2 + \dots + t_n} (t_1 10^{0.1L_{P1}} + t_2 10^{0.1L_{P2}} + \dots + t_n 10^{0.1L_{Pn}})\right) \quad (6)$$

$$L_{DEN} = 10 \log\left(\frac{1}{24} (t_D 10^{L_{PD}/10} + t_E 10^{(L_{PE}/10)+5} + t_N 10^{(L_{PN}/10)+10})\right) \quad (7)$$

3.3 LJUDFREKVENSN OCH TONALITET

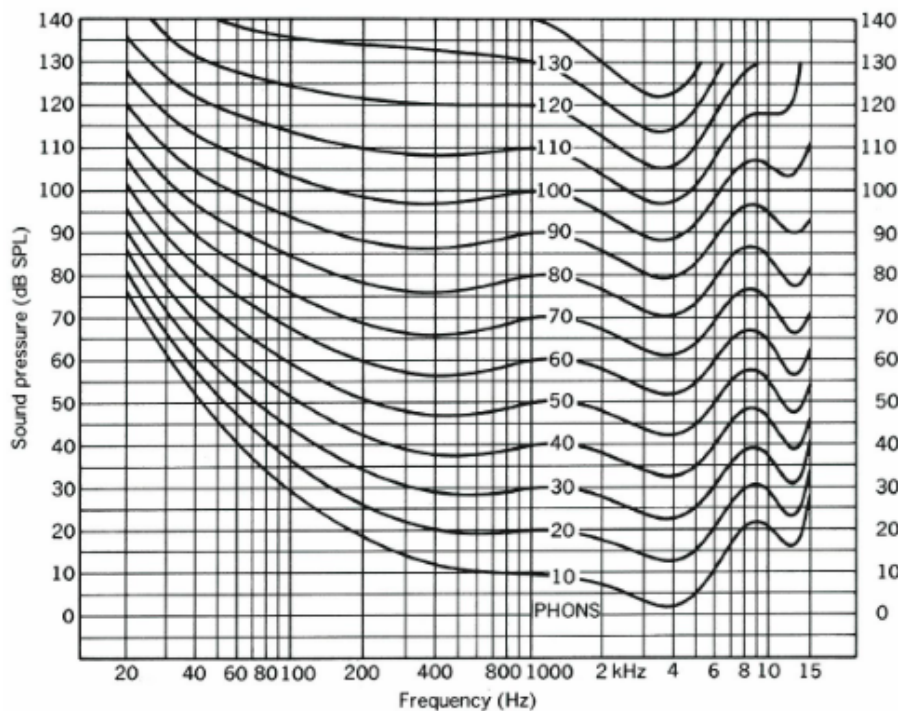
Det finns ett samband mellan ljudets utbredningshastighet, ljudets våglängd och ljudets frekvens. Detta samband beskrivs med ekvation (8). Ljudet har en konstant hastighet utifrån yttre fysikaliska förutsättningar. De inneboende parametrar som varierar är frekvensen och våglängden vilka har en stor påverkan på hur ljudet sprids och upplevs.

$$c = f\lambda \quad (8)$$

3.3.1 Det mänskliga örat

Människans öra kan uppfatta frekvenser omkring 20–20 000 Hz (Kropp, 2013e). Beroende på vilken frekvens ljudet har upplevs det olika starkt trots att ljudtrycksnivån är densamma (Karlsson, 2000). En upplevd fördubbling av ljudstyrkan sker generellt

sett inom ett mindre ljudtrycksintervall vid låga frekvenser än vid höga frekvenser (Persson, Smith och Ögren, 2017), vilket beror på örats fysiska utformning. Längden på örats kanal är genomsnittligen omkring 25 mm där en ände är öppen och den andra kan anses vara stängd. För att den första resonansen (grundtonen) ska passa där bör våglängden vara fyra gånger större (Se avsnitt 3.4.9) Detta betyder att den optimala frekvensen för det mänskliga örat ligger omkring 3400 Hz (2000-5000 Hz). Hur starkt olika frekvenser upplevs kan beskrivas med så kallade Fletcher-Munson kurvor, se figur 7. Den nedersta linjen beskriver den minsta hörbara ljudnivån för respektive frekvens och siffran på varje linje står i enheten *Phon* vilket innebär hur mycket ljudet uppfattas, vilket motsvarar samma ljudnivå vid 1 kHz. Detta illustrerar vilken ljudnivå som ljud vid olika frekvenser kan jämföras med. Variationen mellan höga och låga frekvenser avtar med ökande uppfattas ljudstyrka.



Figur 7: Fletcher-Munson kurvor med olika hörnivåkurvor (Karlsson, 2000) (Tagen med tillstånd från Boverket).

3.3.2 Vägningmått

Eftersom ljudstyrkan upplevs olika beroende på vilket frekvensområde det befinner sig inom har ett antal standardiserade filtervärden tagits fram, så kallade vägningmått. Dessa filter betecknas L_A , L_B , L_C och L_D där L_A är baserat på Fletcher-Munson kurvorna som kan ses i figur 7. Observera att dessa beteckningar inte är samma som för ljudklasserna, se tabell 5. I de allra flesta fallen används den A-vägda ljudnivån då den anses spegla människans hörsel bäst, även om den C-vägda ljudnivån har

börjat användas mer på senare tid eftersom lågfrekventa ljud i samhället förekommer i allt högre grad. Om skillnaden mellan A-vägd och C-vägd ljudnivå är mer än 15 dB är det lämpligt att utföra en oktavbandsanalys. B-filtret är tänkt att användas vid medelhöga nivåer och D-filtret för flygbuller men de används sällan (Kropp, 2013e). Dessa filter är framtagna för att framhäva specifika frekvenser som är dominerande för den bullerkälla som undersöks. Några exempel på hur ljudnivåer filtreras i olika oktavband redovisas i tabell 7.

Tabell 7: *Filtervärden för olika oktavband. En oktav=fördubbling av frekvens. (C. Larsson, u.å.)*

Filter/Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
A	-26.2	-16.1	-8.6	-3.2	0	1.2	1.0	-1.1
B	-9.3	-4.2	-1.3	-0.3	0	-0.1	-0.7	-2.9
C	-0.8	-0.2	0	0	0	-0.2	-0.8	-3.0
D	-11.0	-6.0	-2.0	0	0	8.0	11.0	-6.0

3.4 LJUDETS SPRIDNING

Ljudets vågutbredning i tre dimensioner kan i det homogena fallet beskrivas genom ekvation (9), också i det sista steget kallad Helmholtz ekvation som används för att lösa många akustiska problem (Kropp, 2013d). Hur ljudet sprids i verkligheten beror på ett antal parametrar såsom ljudkällans utformning samt omgivningen och dessa beskrivs i detta avsnitt.

$$\frac{\delta^2 P}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 P}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 P}{\delta z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\delta^2 P}{\delta t^2} = \nabla^2 P - \frac{1}{c^2} \frac{\delta^2 P}{\delta t^2} = 0 \quad (9)$$

Om det utnyttjas att hastighetsfältet för akustiska vågor, \underline{v} , är icke-roterande kan en akustisk potential, Φ , definieras som

$$\underline{v} = \text{grad}\Phi \quad (10)$$

Denna akustiska potential kan sedan ersätta ljudtrycket P i ekvation (9) och genom fouriertransformering erhålls Helmholtz ekvation

$$\nabla^2 \hat{\Phi} + k^2 \hat{\Phi} = 0, \quad (11)$$

där k är vågtalet associerat till Φ .

3.4.1 Ljudkällan

Ljudkällans utformning påverkar hur ljudet sprids och därmed också avtar med avståndet. De primära geometriska typerna av spridning är från en punktkälla och en linjekälla (C. Larsson, u.å.).

Punktkälla

Från en punktkälla sprids ljudet med hastigheten c i alla riktningar och den utsända ljudeffekten är fördelad över ytan $4\pi r^2$, vilket ger ekvation (12).

$$L_p = \frac{p}{4\pi r^2} \quad (12)$$

Kvadraten i nämnaren ger genom logaritmlagarna faktorn 20 i ekvation (13) vilket i sin tur ger att ljudet avtar med 6dB per avståndsdubbling för en punktkälla (Kropp och K. Larsson, 2013).

$$L_p = L_{o,p} - 20 \log \frac{r}{r_0} \quad (13)$$

Linjekälla

Från en linjeformad källa, vilket vanligtvis är en sammanlänkning av flera punktkällor såsom en trafikled, integreras uttrycket för en punktkälla vilket ger ekvation (14) som ger att ljudet avtar med 3 dB per avståndsdubbling (ibid.).

$$L_l = L_{o,l} - 10 \log \frac{r}{r_0} \quad (14)$$

3.4.2 Ljudfält

Vid mätning av ljud då reflektionsytor har en stor inverkan uppstår så kallade diffusa ljudfält. I dessa fall brukar ljudet på olika avstånd från ljudkällan delas upp i tre olika typer av ljudfält: närfält, efterklangsfält och frifält. Närfältet sträcker sig till ett avstånd lika stort som ljudkällan själv och inom det området sprids inte ljudet enligt avståndslagarna (13) och (14). Efterklangsfältet är beläget en bit från ljudkällan nära reflektionsytor. Ljudet där har en stor inblandning av reflekterat ljud vilket gör att en medelvärdesbildning i flera punkter är nödvändig för att kunna uppskatta ljudnivån. Dessa fält blir mer dominerande ju lägre absorptionen i rummet är, se avsnitt 3.4.3 för mer om absorption. Ett diffust ljudfält uppstår också när flera ljudkällor sammanfaller och varje enskild ljudkälla blir svår att urskilja. Frifältet är beläget mellan dessa fält och är det området där det är enklast att uppskatta ljudnivån eftersom den generellt sätt följer avståndslagarna. Denna ljudmiljö anses föreligga vid utomhusmiljö då ljudet ofta anses vara tillräckligt långt från reflekterande ytor (Akustikmiljö, 2013).

3.4.3 Absorption

Ljudabsorption innebär energiförluster hos en ljudvåg till förmån för värmeutveckling som en följd av friktionskrafter. Det sker också en viss energiförlust i mediet som ljudet färdas i, i form av relaxation, det vill säga återgående av energin till ett slags grundtillstånd som kallas Maxwell-Boltzmann fördelning. Denna är svår att påverka då det skulle innebära en ändring av de inneboende parametrarna hos mediet

som påverkar absorptionen, som fuktighet och temperatur (Kropp, 2013a). Istället används olika material för att ändra ljudnivån och efterklangstiden. Olika material har olika absorberande förmåga vilket brukar benämnas som att material har olika absorptionsfaktor. Absorptionsfaktorn, α , är ett tal mellan 0 och 1 där 1 innebär att allt infallande ljud absorberas, vilket inte är möjligt i praktiken. När ljud går från ett medium till ett annat reflekteras alltid en del och den andra delen bryts av olika mycket beroende på hastigheten för ljud i de olika medierna enligt Snells lag, ekvation 15 (Kropp, 2013b). Den totala absorptionen beräknas genom absorptionsfaktorn multiplicerat med den synliga arean, S ($A_{abs} = \alpha \cdot S$) (Akustikmiljö, 2013).

$$\frac{\sin(\theta_1)}{v_1} = \frac{\sin(\theta_2)}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (15)$$

Det finns i huvudsak två typer av absorberare; porösa och resonans-absorberare. En porös absorberare strävar efter att maximera antalet friktionsytor samtidigt som den minimerar reflektionen på ytan. Partikelhastigheten hos luften har ett maximum på en fjärdedels våglängd från väggen vilket innebär att optimal absorption erhålls vid frekvenser $f \geq c/4d$ där d är tjockleken på det absorberande materialet (ibid.). Detta är avgörande för att låga frekvenser sprids över längre avstånd som exempelvis en basgång i ett lägenhetshus eller att åska låter mullrande. De flesta porösa absorberarna verkar bra vid medelhöga och höga frekvenser men sämre vid låga. Istället används vanligtvis resonansabsorberare som främst förekommer i två huvudtyper, Helmholtzabsorberare och membranabsorberare. Helmholtzabsorberaren är utformad som en kammare och utnyttjar fenomenet om resonanssvängningar, men endast då den infallande ljudvågen har samma frekvens som kammarens egenfrekvens, den verkar således selektivt. Egenfrekvensen bestäms av dimensionerna på halsen och kammaren i Helmholtzabsorberaren. (Kropp, 2013a). Membranabsorberare fungerar på ett liknande vis då en tät skiva utgör den svängande massan mellan luft eller annat absorberande material och väggen. Egenfrekvensen avgörs av skivans massa och avstånden från väggen (Akustikmiljö, 2013).

3.4.4 Impedans

Akustisk impedans definieras som skillnaden mellan tryck och partikelhastighet och talar om hur mycket rörelse i vågmediet som ett visst ljudtryck ger upphov till. För en plan våg gäller även att impedansen kan beskrivas som densiteten gånger ljudhastigheten enligt ekvation 16 och eftersom även sfäriska och cylindriska vågor kan ses som plana vågor om de befinner sig tillräckligt långt ifrån källan kan det sambandet anses gälla i de flesta fallen (Kropp, 2013f).

$$Z = \frac{P}{u} = \frac{\omega \rho}{\kappa} = \rho_0 c \quad (16)$$

När en ljudvåg möter ett medium med högre impedans reflekteras en stor del och endast en liten del transmitteras. Det motsatta gäller för ett medium med lägre im-

pedans, exempelvis har luft lägre impedans än vatten. Impedansskillnaden påverkar även fasvinkeln, en transport från låg till hög impedans ger en positiv reflektionskoefficient, R , det vill säga avvikelser uppåt, och vice versa för andra hållet (Kropp, 2013f).

3.4.5 Diffusion

Akustisk diffusion är spridning av ljud, alltså en omfördelning av ljudvågens energi, i flera olika riktningar som sker som en följd av att ljudet träffar ytor med geometriska irreguläriteter. Detta fenomen utnyttjas genom så kallade diffusionspaneler för att uppnå en jämnt fördelad ljudnivå i till exempel konsertsalar. Motsatt effekt kan fås av så kallade fokuserande ytor som istället samlar ljudenergin, vilket kan utnyttjas om åhörarna är samlade på en viss plats (GIK Acoustics, 2009).

3.4.6 Diffraction

Diffraction är ett fenomen som uppstår när ljud träffar kanterna eller en öppning av ett objekt och då delvis ändrar riktning. Detta sker då våglängden är i samma storleksordning som öppningen eller den kant som ljudet träffar och då anpassar sig efter den/de riktningar som det påträffade objektet har. Detta medför att endast några frekvenser från samma ljudkälla sprider sig via diffraction vid kontakt med ett visst objekt. Vanligtvis sker mer diffraction vid lägre frekvenser då våglängderna då är mer i den storleksordning som de objekt som ljudet träffar (Kropp, 2013b).

3.4.7 Efterklang

Efterklangstiden (ET) är en viktig parameter för att bestämma ljudkvalitet, framförallt inom rumsakustik. Den kvantifierar hur länge ljud stannar kvar i ett rum med avseende på reflektionsytorna och definieras som den tid det tar för ljudet att minska med 60 dB från det att ljudkällan stängs av (Löllman och Vary, u.å.). Det finns ett samband mellan absorption och efterklang som beskrivs med Wallace Clement Sabine's formel, ekvation (17). Den beskriver hur snabbt ljudvolymen minskar med 60 dB baserat på rummets volym och den totala absorptionen. Om absorption, reflektion och impedans inkluderas i beräkningar på ett korrekt sätt inkluderas efterklangstiden i ekvivalenta ljudnivåer över tid (Kropp, 2013c).

$$t = 0.161 \frac{V}{A_{abs}} \quad (17)$$

3.4.8 Interferens

Med interferens menas samverkan mellan ljudvågor, antingen från samma källa eller olika källor. Interferens brukar delas upp i två huvudtyper: konstruktiv och destruktiv. Dessa definieras utifrån principen för harmonisk oscillation enligt ekvation (18).

Observera att T här är periodtiden som vid omvandling enligt ekvation (19) ger ekvation (20). Vid konstruktiv interferens skiljer sig vinkelfrekvensen mellan de olika vågorna med $2\pi n$ ($n=1,2,3\dots$) och vid destruktiv interferens skiljer sig vinkelfrekvensen med $2\pi n + \pi$ ($n=1,2,3\dots$) vilket motsvarar att vågorna är i fas respektive ofas (NDT Resource Center, u.å.).

$$P(x, t) = A \sin\left(\frac{2\pi}{T}t - \frac{2\pi}{c}x + \phi\right) \quad (18)$$

Där

$$\frac{2\pi}{T} = \omega \quad (19)$$

Vilket ger

$$P(x, t) = A \sin\left(\omega t - \frac{\omega}{c}x + \phi\right) \quad (20)$$

3.4.9 Resonans

Stående vågor är oftast ickeresonanta men resonans kan uppstå i specialfall, exempelvis då ljud reflekteras mot två parallella ytor som i de typer absorberer som är placerade mot en fast vägg. Resonansfrekvensen, f_{res} , definieras som den frekvens som uppfyller att ekvationerna för en stående våg, ekvation (21) och (22) är lika med noll, det vill säga $f_{res} = \frac{n\lambda}{2}$ för svängning med två fasta ändar och $f_{res} = \frac{n\lambda}{4}$ för svängning med en fast ände.

$$y(x, t) = (A_{SW} \sin(kx)) \sin(\omega t) \quad (21)$$

$$y(x, t) = (A_{SW} \sin(2kx)) \sin(\omega t) \quad (22)$$

Den frekvensen som ges då $n=1$ kallas grundtonen och $n=2$ ger första övertonen och så vidare. Anledningen till att resonansfrekvensen skiljer sig från de två fallen är att vågreflekteringen inverteras vid en fast ände men inte vid en öppen varav en faktor 2 införs, jämför ekvation (21) (stängda ändar) och (22) (en öppen ände). I rum finns teoretiskt sätt sex reflekterande ytor som stående vågor kan bildas mellan i olika frekvenser (Paulsson, 2010).

3.4.10 Luftljud och stomljud

Ljud brukar delas in i två primära kategorier, luftljud och stomljud. Luftljud är ljud som uppstår och sprids i luften. Exempel på detta är musik, tal och trafikljud men också när ljud sätter en vägg i svängning vilket alstrar ljud i luften på andra sidan. Det är oftast luftljud som avses då ljud benämns i vanligt tal. Stomljud uppstår när ljud fortplantas i ett materials stomme. Exempel på detta är vibrationer från en fläkt eller en dörr som stängs. Denna typ av ljud kan spridas väldigt långt i exempelvis en armerad betongstomme. Stegljud är en typ av stomljud som uppstår när människor

går på ett golv eller bjälklag. Stegljud kan också betraktas som luftljud ifall det sprider sig vidare ut i luften mellan olika rum (Byggipedia, 2018).

3.5 METEOROLOGISKA EFFEKTER PÅ LJUD

Meteorologin har en stor inverkan på ljudets spridning men eftersom många meteorologiska fenomen är stokastiska och komplexa är dess effekter svåra att prediktera och utelämnas ofta i akustiska modeller (Forssén, 2007). Ett av de modelleringsprogrammen som används i detta projekt, *Olive Tree Lab*, tar dock hänsyn till en del av dessa faktorer som också därför förklaras i detta avsnitt.

3.5.1 Refraktion

Ljudrefraktion, det vill säga krökning av ljud nedåt eller uppåt, påverkas främst av temperaturgradienten i atmosfären och vindförhållandena. Detta följer av att ljudhastigheten varierar mest av dessa parametrar, se figur 6 för ljudhastigheten beroende av temperaturen, samt följer ekvation (23) där c_S är hastigheten i horisontalled. Denna relation medför att om temperaturen ökar med höjden kommer ljudet att böjas av nedåt och vice versa (C. Larsson, u.å.).

$$\frac{c(z)}{\sin(\theta(z))} = c_S = \text{Konstant} \quad (23)$$

Vinden påverkar krökningen på så sätt att motvind böjer ljudet uppåt och medvind nedåt. Vanligtvis är det eftersträvansvärt att kombinera effekten av vind och temperatur för att då få den slutgiltiga krökningen på ljudet. Detta kan beskrivas matematiskt genom ekvation (24).

$$\frac{1}{r} = \frac{T^{20} \frac{dT}{dz} (1 + \frac{v}{c_0}) + \frac{dv}{dz} (1 + \frac{v}{c_0})}{c_0 (1 + \frac{2v}{c_0} + (\frac{v}{c_0})^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (24)$$

Denna ekvation kan inverteras och resultatet, $1/r$ ger då krökningsriktningen. Ett positivt värde på $1/r$ medför en krökning av ljudet nedåt och ett negativt värde medför en krökning uppåt (ibid.). Detta är av särskilt intresse då ljud kan förstärkas eller ljudskuggor kan uppstå enbart på grund av meteorologiska effekter. Även turbulens, det vill säga tredimensionella virvlar, påverkar ljudets spridning i atmosfären. Denna effekt är mer svåröversäglig på grund av turbulensens stokastiska natur (ibid.).

3.5.2 Markimpedans

Precis som väggar i ett rum har marken en impedans som är olika stor beroende på marktypen. En snö- eller grästäck mark har en högre absorptionsförmåga än till exempel asfalt. Denna effekt förstärks ifall ljudstrålarna böjs av uppåt eftersom ljudet då har en större kontakttid med marken på grund av att ljudstrålarna då är horisontella vid markytan. Effekten av markimpedansen samverkar alltså med de meteorologiska förutsättningarna (ibid.).

4 TIDIGARE STUDIER

Detta avsnitt sammanfattar ett antal tidigare studier kring upplevelsen av ljud och vilka olika aspekter som kan spela in. Det som beskrivs under varje underrubrik är författarnas forskningsresultat och detta används som motiveringsunderlag till denna rapports resultat.

4.1 STUDIER KRING AKUSTISK DESIGN

Studierna i detta avsnitt behandlar hur ljudmiljön kan förändras genom akustisk design i någon form, vilket är en av de metoder som skulle kunna föreslås att införas i ljudanalyser.

4.1.1 Modellering av shoppinglandskapet

I en studie av Persson, Smith och Ögren (2017) undersöktes möjligheten att installera en platsspecifik ljudkonstinstallation på en allmän plats för att förbättra miljön med avseende på perceptuella, sociala, estetiska och rumsliga kriterier. Detta gjordes genom att installera högtalare i köpcentret *Gallerian* i Stockholm. Studien är mer inriktad på inomhusmiljöer men behandlar en del koncept som är intressanta även med avseende på urbana utomhusmiljöer.

Den allmänna uppfattningen om ljud beskrivs som någonting homogent och ogenomträngligt, uppbyggt av oupphörligt trafikljud och konstanta ljud från fläktsystem och musik. I själva verket är ljud uppbyggt av en mängd maskerade ljud som bidrar med nyanser och detaljer. Dessa nyanser beskrivs som viktiga i vår uppfattning om den omgivande miljön och bidrar till ett nätverk av relationer som är vitala för vårt beteende och välmående. Dagens urbana landskap domineras av en shoppingkultur då butiker, såväl fysiska som digitala, går att finna överallt, och detta var grunden till valet av plats för ljudinstallationen. I köpcentrum utsätts vi för en mängd olika ljud i form av människor, publika högtalare, mobilsignaler och andra tekniska installationer. Många av dessa ljudkällor ges inte en visuell kontakt vilket ger upphov till en så kallad *akusmatisk miljö*, en miljö där ljudkällorna och aktiviteterna inte beaktas som individuella utan snarare som en ensemble. Denna ljudmiljö är problematisk av ett antal anledningar. Det största anledningen till det är att de flesta ljuden inte är relaterade till personliga aktiviteter eller associerade till nyttjandet av den allmänna platsen. En annan anledning är att bristen på visuell kontakt med ljudskapande objekt blir förvirrande och kan bidra till ökade stressnivåer (Persson, Smith och Ögren, 2017).

Ett annat koncept, liknande den *akusmatiska miljön*, som också låg till grund för valet av plats, är att ett köpcentrum har en så kallad *metabolisk ljudmiljö*. Konceptet beskrivs kortfattat som en ljudmiljö som är stabil över tid men individuella ljud varierar konstant. Denna ljudmiljö är typiskt för platser som ständigt är befolkade

och har en lång efterklangstid som flygplatser och köpcentrum. På dessa platser kan det vara svårt att kommunicera eftersom våra röster är en del av den metaboliska ljudmiljön och ju mer talaren höjer rösten, desto mer bidrar personen till att karaktistiken hos den metaboliska ljudmiljön förstärks (Persson, Smith och Ögren, 2017).

Syftet med ljudinstallationen i Gallerian var att skapa en mötesplats med en identitet och en varm atmosfär som skulle uppmuntra människor att stanna och koppla av där, men inte för länge eftersom de också skulle uppmuntras att gå vidare och shoppa. Platsen skulle ha en egen karakteristik utan att störa shoppingaktiviteterna och utan att ha fysiska gränser i form av väggar eller liknande. Detta tillsammans med den mångfacetterade ljudmiljön bidrog till att uppgiften blev komplex ur ett teknikakustiskt perspektiv. Tre platser valdes ut, två gåingar mot den huvudsakliga mötesplatsen samt den tilltänkta mötesplatsen belägen under en kristallkrona. Ljudet i gångarna skiljde sig på så sätt att de hade en mer framåt-ledande musikstruktur med olika artikulationer mellan ljudlagren. De huvudsakliga ljuden som användes var ljud från rinnande vatten, regnskog och vind med inslag av flöjtljud vid mötesplatsen. Detta ligger i linje med vad forskningsprojektet av Göteborgs Stad (2014) kom fram till, att naturliga ljud bidrar till en mer avslappnande miljö, se avsnitt 2.3.4. För att få ljudet att differentiera sig från resten av gallerian användes ett något högre ljudfrekvensspektrum, vilket också bidrog till en tydligare avgränsning av ljudinstallationen då hörfrekventa ljud sprider sig mindre och absorberas snabbare (ibid.).

Resultaten visade att fler människor vistades på platsen med kristallkronan och de som vistades där betedde sig i högre utsträckning på ett avslappnat vis än tidigare. Vid förfrågan om vad människor tyckte om ljudinstallationen svarade 70-80 %: "Vilken ljudinstallation?". Författarnas teorier kring detta var att ljudinstallationen främst bidrog till ett bakgrundsljud som i sin tur också kan beskrivas som metaboliskt, det vill säga att individuella ljud kan vara svåra att urskilja. Den ökade andelen avslappnade aktiviteter antydde en passiv uppfattning av de nya ljuden. Syftet med detta var att få ljudet att låta mer naturligt och inte på ett tydligt sätt konstgjort. Följande slutsatser om vilka nyckelaspekter som bör beaktas vid liknande ljudinstallationer (ibid.):

1. Att noggrant men inte för uppenbart skapa en koppling till miljön.
2. Att välja och skapa en sonisk grundatmosfär för den specifika platsen.
3. Att införa nån eller några referenspunkter i den rumsliga designen.
4. Att addera en viss heterogenitet i ljuddesignen för att förstärka känslan av urban kvalitet.
5. Att noggrant ta hänsyn till ljudets inneboende karaktär som ger upphov till vad det relateras till för typ av plats.

6. Tids- och upprepningsaspekter; precis som små ljudfragment kan göra skillnad kan även sparsamma repetitioner ha en störande effekt.
7. Varje ljudinstallation behöver bli noggrant utformad efter tid, rum, användare och avsedda aktiviteter.

4.1.2 Ljud och andra rum

Dyrssen m.fl. (2014) samlar i sin bok reflektioner från ett antal olika forskningsprojekt från *Urban Sound Institute (USIT)*. Gruppen startade 2005 för att utveckla konstnärlig forskning över gränserna mellan musik, ljudkonst, akustik, arkitektur, design och samhällsbyggnad. Urbana ljudrum såsom stadsmiljöer beskrivs som komplexa med många olika typer av ljudkällor och olika typer av rum som parker, gator och torg. Denna kombination av ljud ger stadsrummet sin igenkännbara accent. Författarna menar att en miljöns accent signalerar ofta det vi människor uppfattar som trygghet eftersom den typiska ljudbilden är en del i hur vi identifierar en plats. En viss kritik riktas mot att debatten kring ljudfrågor inte beaktar stadsrummets positiva ljudkvaliteter och att dessa borde belysas mer.

Buller beskrivs som ljud som tar uppmärksamhet från en aktivitet till en inkräktande aktivitet. Författarna menar att det inte finns någon direkt relation mellan ljudstyrka och vad som definieras som oljud, även om en högre ljudstyrka gör ljudet mer benäget att överta koncentrationen. Det som har störst inverkan på hur ljudet upplevs är människors förväntningar. Detta exemplifieras med att hög musik på ett diskotek inte stör besökarna då ljudbilden tillhör deras förväntningar, till skillnad från närliggande grannar som försöker sova. Ett annat exempel är att andetag på ett bibliotek kan uppfattas som störande trots att ljudnivån är väldigt låg. Forskningsgruppen testade genom ljudinstallationen *Transmission Lund* på Lunds konsthall hur ljudets karaktär påverkade upplevelsen. Detta gjordes genom att åtta olika typer av ljud spelades upp i lika många hörlurar. Alla ljuden kalibrerades till 55 dBA. Detta gjordes för att diskutera Europarådets direktiv angående ljudmiljöer (EU direktiv 2002/49/EC). Slutsatsen av experimentet var att en bedömning av ljudkvalitet endast baserat på ljudnivåer framstår som ett aningen trubbigt tillvägagångssätt då de olika ljuden upplevdes olika (Dyrssen m. fl., 2014).

Tekniken att skapa en önskad ljudmiljö genom att addera ljudkällor diskuteras i boken. Detta beskrivs som en komplex och svårförutsägbar metod. Att addera ljud till en redan komplex ljudbild kräver en god kunskap om platsens kulturella värden och syften. Blir det en tydlig diskrepans mellan det adderade ljudet och den förväntade ljudbilden på platsen kan metoden förvärpa situationen och det adderade ljudet upplevs som störande. Om det adderade ljudet lyckas förstärka den positiva bilden av platsen som människan har kan det dels maskera oönskade ljud och dels verka som en trygghetsfaktor. Att lyckas med att skapa positiva ljud på det här sättet ställer även stora krav på den akustiska kompetensen. Rätt typ av ljudkälla, placering, frekvens-

område och ljudnivå behöver uppskattas. Exempelvis skapas ett tydligare gränsskikt mellan det artificiella ljudrummet och det naturliga då höga frekvenser används då de är enklare att rikta och absorberas snabbare (Dyrssen m. fl., 2014).

4.1.3 Akustiska designartifakter och metoder för urbana ljudlandskap

Hellström (2008) utforskade i sin studie olika strategier för att förbättra ljudkvaliteten på platser som är ämnade för vila, rekreation och social interaktion. Utförandet kombinerade arkitektonisk analys och artistiska experiment tillsammans med psykoakustisk metodik för att utvärdera estetiska, känslomässiga, perceptuella och rumsliga effekter. Detta gjordes genom en fallstudie där en ljudinstallation i form av tre separata enheter på Mariatorget i Stockholm uppfördes. Mariatorget är ett populärt torg där mycket människor möts och passerar förbi dagligen. Ytterligare ljud introducerades även i form av högtalare som satt en bra bit längre bort. Målet var att utveckla en modell för hållbara ljudinstallationer i öppna och ljudliga urbana landskap. Detta genom att stärka redan befintliga ljud, huvudsakligen från natur och aktiviteter, och genom att ta fokus från trafikljud mot mer önskvärda ljud. Även denna studie behandlar akusmatik, det vill säga hur ljud från ljudkällor som inte kan ses uppfattas, se avsnitt 4.1.1.

En av installationens primära syften var att maskera ljudet från Hornsgatan som går precis bredvid torget. Detta kunde, rent teoretiskt, ha gjorts genom så kallad *energi-baserad maskering* som går ut på att den tillagda ljudnivån är tillräckligt hög för att göra att trafikljuden helt enkelt inte hörs. Detta hade dock krävt så höga ljudnivåer att det antagligen bara hade förvärrat situationen varav så kallad *informationsmaskering* användes istället. Det går ut på att avleda lyssnaren från buller och rikta uppmärksamheten mot de installerade ljuden. De ljud som valdes var blåsande löv, vind, havsljud samt fågelljud (Hellström, 2008).

21 respondenter frågades ut om vad de tyckte om ljudinstallationen. Majoriteten av svarade att de antingen föredrog den nya ljudmiljön eller att de inte hade noterat att ljudmiljön förändrats vilket får anses vara en förbättring, även om det handlar mycket om personliga preferenser och hur frågan är ställd när antalet respondenter är så pass få. En möjlig anledning till att ett antal av de tillfrågade inte hade noterat ljudinstallationen kan ha varit att de tillagda ljuden låg nära de omgivande ljuden i frekvens varvid de kan vara svåra att uppfatta. Projektet syftade till att analysera hur människor påverkas av en kombination av trafikljud och naturliga ljud och betonar att ljudinstallationer på alla urbana platser med höga trafiknivåer inte är en hållbar lösning. Författaren påpekar att mer kunskap behövs kring hur hållbara ljudmiljöer i städer kan skapas (ibid.).

4.2 STUDIER KRING UPPLEVELSEN AV OLIKA LJUDMILJÖER

Studierna i detta avsnitt har undersökt hur människor uppfattat och reagerat på olika typer av ljudmiljöer.

4.2.1 Ljudlandskapskvalitet i urbana miljöer

Nilsson (2007) utförde två studier i Stockholm 2004 respektive 2006 med syfte att undersöka hur olika ljudmiljöer upplevdes hos människor. Detta gjordes genom att fråga människor på olika platser hur de upplevde ljudmiljön med svarsalternativ på en femgradig ljudkvalitetsskala. Frågor ställdes även kring detaljerade ämnen som hur ofta olika ljudkällor uppfattats och hur detta upplevdes. Skillnaden mellan studie 1 och 2 var dels att studie 2 innefattade fler platser och fler respondenter (från 286 till 1116) men också att frågan om hur ofta vissa ljud hade uppfattats hade ändrats till i vilken grad vissa ljud dominerade ljudbilden på en femgradig skala. Resultatet visade på att alla platser med bra ljudkvalitet (mer än 80 % av respondenterna svarade 4 eller 5 på frågan om den generella ljudkvaliteten) var belägna utanför staden och långt ifrån vägar. Vidare visade resultatet att vilken typ av ljudkälla (teknologisk eller naturlig) bättre förutsåg ljudkvaliteten än uppmätta ljudnivåer. Ljudkvalitet var positivt korrelerat till naturliga ljud och negativt korrelerat till teknologiska ljud (som trafikbuller). Sammanfattningsvis pekade resultaten mot att god ljudkvalitet erhålls vid trafikljud under 50 dBA, att inblandning av positiva ljud genom ljuddesign kan vara effektivt vid trafikbullernivåer på 50–60 dBA och att ljuddämpande åtgärder krävs vid bullernivåer över 60 dBA (Nilsson, 2007).

4.2.2 Psykofysik och ljudlandskap

Berglund, Nilsson och Axelsson (2007) kritiserar i sin artikel metodiken att endast värdera ljud utifrån ljudstyrka. Detta då författarna anser att den typen av energimedelvärden inte tar hänsyn till olika ljudkomponenter eller ljudets struktur och dynamik. Kritik riktas exempelvis mot införandet av bullerplank då de ökar den relativa inblandningen av lågfrekvent ljud och även gör trafikljudet mindre variabelt vilket är effekter som kan göra ljudet mer störande i vissa fall. Mot bakgrund av detta argumenterar författarna för att ett huvudsakligt forskningsmål borde vara att införa akustiska metoder, inte bara för att minska ljudnivåer, utan också för att karakterisera ljudmiljön genom akustisk design. Vidare argumenteras det kring att ljudets källa identifieras genom dess spektrala egenskaper och karaktär, och detta spelar stor roll för hur människor uppfattar det. Enligt utfrågade respondenter så upplevdes en sida mot vägen i ett hus mycket mer störande än den tysta sidan, trots att ljudnivåerna på båda sidor låg under riktvärdena och att skillnaden mellan sidorna endast var 5 dB. Däremot var inblandningen av trafikljud mycket större på sidan mot vägen vilket ansågs vara anledningen till att ljudet där upplevdes som mer störande. Maskering av ljud tas också upp som ett argument till varför ljudnivåer inte är tillräckliga för

att beskriva ljudmiljön. Kontinuerligt trafikbuller tenderar att maskera det mesta av de positiva ljud som finns, exempelvis porlande vatten eller fågelkvitter. Trafikljud kan också upplevas som delvis positivt om det är en del i en ljudbild som anses vara positiv, exempelvis på avstånd från en fontän där trafikljudet gör att ljudet från fontänen inte blir lika distinkt. Vilken aktivitet som utförs och vilka förväntningar människor har av platsen påverkar också hur olika ljud uppfattas, vilket komplicerar definitionen av buller än mer (Berglund, Nilsson och Axelsson, 2007).

Som lösning på den beskrivna problematiken har en metod tagits fram, *The Soundscape Walk*. Metoden är tänkt att användas på platser där ljudnivåerna anses vara av mindre betydelse, exempelvis på platser ämnade för vila eller rekreation. Metoden går ut på att en panel fyller i ett protokoll för specifika platser, både utomhus och inomhus. Protokollet valideras för tillfället i ett antal urbana områden i Sverige. Protokollet använder sig av grönmarkering av ljud och beskriver positiva ljud som njutbara (naturliga) och stimulerande (ljud från mänsklig aktivitet) (ibid.).

4.2.3 Bullerstörningar och rekreation i olika innergårdsmiljöer

I en studie av Gidlöf-Gunnarsson, Ögren och Öhrström (2007) undersöktes ljud-visuella samband i två olika testmiljöer; en attraktiv och en oattraktiv innergård. Den attraktiva var inredd med växtlighet och den oattraktiva var något nedgången och helt i betong. Testet utfördes genom att tolv kvinnor och tolv män, där de flesta var studenter med normal hörsel, fick lyssna på sex olika ljudinspelningar i den attraktiva respektive den oattraktiva innergårdsmiljön med en veckas mellanrum. Ljuden bestod av trafikljud på 43, 50 respektive 55 dBA ekvivalent över de sex minuter som ljudet spelades upp samt samma ljud fast med fågelkvitter adderat. Ljuden spelades upp i slumpmässig ordning vid båda tillfällena så att respondenterna inte skulle veta vilka ljud det var som spelades upp. Samtliga respondenter fick svara på följande sex frågor (Gidlöf-Gunnarsson, Ögren och Öhrström, 2007):

1. Hur de upplevde ljudlandskapet
2. Hur pass störda de var av trafikljud
3. Hur de upplevde den visuella upplevelsen
4. Om de skulle kunna tänka sig att besöka innergården
5. Om de tyckte att det var en plats för vila och rekreation
6. Vilket humör de var på för tillfället

Resultaten visade på att starkare trafikljud ledde till en mindre trivsamt miljö men att inblandning av fågelsång gjorde det lite bättre. Den attraktiva innergården var också den som upplevdes mest trivsamt förutom vid trafikljud på 55 dB, då föredrogs den oattraktiva. Den visuella upplevelsen var mer positiv för den attraktiva innergården

i samtliga fall och önskan att besöka gården minskade med högre ljudnivåer och var lägre för den oattraktiva innergården. De huvudsakliga slutsatserna från studien var att en attraktiv omgivning tillsammans med låga ljudnivåer upplevdes som mest positivt, helst med inblandning av naturligt ljud (fågelkvitter). En avvikelse var att fler kände sig stressade vid höga ljudnivåer i den attraktiva miljön, vilket kan ha att göra med att dessa ljudnivåer inte förväntades där (Gidlöf-Gunnarsson, Ögren och Öhrström, 2007).

4.2.4 Störningar från lågfrekvent buller

Levenhall (2004) diskuterar i sin artikel hur pass störande lågfrekvent ljud är jämfört med annat ljud samt hur pass bra dagens metoder är på att lokalisera och vikta detta. Detta gör han genom att utgå från en mängd tidigare studier som han sammanställt.

Lågfrekventa ljud tenderar att underskattas genom användning av den A-vägda ljudnivån. I ett försök med ljud med en bandbredd från 0 till 80, 250, 500 respektive 1000 Hz med samma A-vägda ljudnivå tenderade de lågfrekventa ljuden att upplevas som mer störande, även om det fanns en viss variation mellan individer. Underskattningen låg omkring 3 dB för nivåer på 65 dB och 6 dB för nivåer på 70 dB. Flera studier har visat på liknande resultat, där ungefär 6 dB underskattas per sänkt oktav med det A-vägda filtret. Den främsta anledningen till att det A-vägda filtret ändå används är att vad som uppfattas ljud är som tydligast mellan 1 och 4 kHz vilket illustreras i Fletcher-Munson kurvorna i figur 7. Detta kritiserar i artikeln då flera studier visat att lågfrekventa ljud upplevs som mer störande på grund av andra effekter än de som upplevs som rena ljud, exempelvis vibrationseffekter (Leventhall, 2004).

En åtgärd som föreslås är att addera 6 dB för de A-vägda ljudnivåerna i de fall skillnaden mellan de A- och C-vägda nivåerna är mer än 15 dB. Problematiken i detta ligger dock i att vid låga ljudnivåer så kan de lågfrekventa ljudet vara så lågt att det inte ger någon störning och kan med den föreslagna metoden då överskattas. På grund av detta föreslås att skillnaden mellan filternivåerna ska användas som en indikator på om vidare undersökningar bör utföras. Som en slutgiltigt förslag skriver Levenhall att undersökning av ljudets karaktär och tidsvariation skulle kunna vara en väg framåt (ibid.).

4.3 MODELLERINGSSTUDIER KRING URBANA LJUDMILJÖER

Dessa studier behandlar olika sätt att modellera och prediktera urbana ljudlandskap. Resultaten som presenteras i detta avsnitt användes framförallt som grund då modelleringsresultaten tolkades och analyserades.

4.3.1 Strålgångs- och vågbaserade beräkningsmetoder

I en studie av Siltanen, Lokki och Savioja (2010) jämfördes olika tekniker att modellera rumsakustik med. Teknikernas styrkor och svagheter i sig är relevanta även för samhällsakustik då samma metoder används i beräkningsprogram som exempelvis *Olive Tree Lab*.

De två huvudmetoderna som diskuteras i studien är vågbaserade metoder, att lösa vågekvationen numeriskt, och geometriska metoder där ljud behandlas som strålar. Den förstnämnda metoden kräver ofta mycket beräkningskraft som ökar som en funktion av våglängden. Detta gör att denna metod är lämpligast för låga frekvenser. Metoden delar vanligtvis in element som rum eller objekt i diskreta delar och modellerar interaktioner mellan dessa delar. Den geometriska metoden kräver mindre beräkningskraft och det är också ofta tydligare att se exakt vad som har beräknats. Nackdelarna med metoden är att våglängder helt bortses från varav fenomen som diffraktion och interferens inte tas med (Siltanen, Lokki och Savioja, 2010).

Vidare diskuteras och jämförs tre tekniker; *Image Source Methods (ISM)*, *Boundary Element Methods (BEM)* och *Radiance Transfer Methods (RTM)*. *Image Source Methods* använder sig av principen att en reflekterande yta är en spegelbild av det infallande ljudet och blir i princip en ny källa. Antalet spegelbilder ökar med ökande reflektionsordning men denna ökning sker exponentiellt vilket gör att den beräkningskraft som krävs ökar snabbt. I fall då de reflekterande ytorna inte är oändligt långa uppkommer diffraktion, särskilt vid låga frekvenser, varav en separat diffraktionsmodell bör användas för att inte erhålla felaktiga resultat. *Boundary Element Methods* använder sig av att numeriskt lösa lämpliga vågekvationer på ytorna av den modellerade geometrin. Den akustiska kvantitet som beräknas är vanligen tryck eller partikelhastighet. Styrkan med metoden är att den är fysikaliskt korrekt även för låga frekvenser och vågfenomen som diffraktion tas med i beräkningarna. Metoden kan appliceras på två sätt, antingen i frekvensdomänen (vilket är den domän som ges direkt) eller i tidsdomänen (som ges via fouriertransformering av frekvensdomänen) där vilka element som når vilka element i varje tidssteg modelleras och där ljudets hastighet antas vara konstant. Teoretiskt sett är den senare metoden snabbare men är i praktiken mer numeriskt instabil med avseende på indata. Den sista metoden, *Radiance Transfer Methods*, är elementbaserad precis som *Boundary Element Methods*, men den akustiska kvantiteten som modelleras är i form av energi. Detta gör att våglängdsinformation inte tas med i beräkningarna eftersom energi inte har någon fas, vilket gör att metoden, precis som strålbaserade metoder, är mest effektiv vid höga frekvenser. Metoden utgår från att om elementen är tillräckligt små så varierar inte ljudet över elementet. Utifrån detta kan sedan en interaktionsmatris mellan elementen skapas där energitransporter mellan elementen beskrivs. Detta gör metoden tids-iterativ, varje överföring av energi mellan element i varje tidssteg modelleras tills dess att överföringarna är försumbara (ibid.).

Slutsatserna av studien var att de tre metoderna hade sina styrkor och svagheter, men också sina likheter. En hybridmetod föreslås där de olika metoderna används vid olika tillfällen eller olika områden i modelleringen för att optimera prestandan och precisionen. Tabell 8 sammanfattar styrkorna och svagheter hos metoderna. *Olive Tree Lab* använder sig av en egen metod som närmast liknar ISM med en adderad metod för diffraktion (Siltanen, Lokki och Savioja, 2010).

Tabell 8: *Jämförelse av rumsakustiska modelleringsmetoder. Ref.=Reflektioner, rikt.=riktningar, f=frekvens. Siltanen, Lokki och Savioja, 2010*

Metod	Låg f	Hög f	Tidiga ref.	Sena ref.	Fas	Ref. rikt.
ISM	Ingen diffraktion	Bra	Bra	Långsam	Ja	Ja
BTM	Bra	Långsam	Bra	Bra	Ja	Nej
RTM	Ingen diffraktion	Bra	Okej	Bra	Nej	Ja

4.3.2 Numeriska modelleringar av ljudutbredning till stängda innergårdar

I avhandlingen av Hornikx (2009) belyses en problematik kring att de modelleringsverktyg som används för att prediktera ljudets spridning är bristfälliga när det kommer till att beräkna spridningen av ljud till stängda innergårdar. Avhandlingen syftade till att utveckla en ny metod för detta, vilken han kallar *the 3-D extended Fourier pseudospectral time-domain (PSTD) method*. Det är en utveckling av *the Fourier PSTD method* där den främsta skillnaden är möjligheten att modellera spridningsmedier med diskontinuerliga egenskaper. Detta betyder att modellen kan, med god noggrannhet, beräkna spridning av ljud som påverkas av atmosfärisk turbulens. Modellen anses också vara mer beräkningseffektiv än liknande modeller då den endast kräver två rumsliga punkter per våglängd. Modellen visar på att ekvivalenta ljudnivåer på stängda innergårdar är relativt konstanta i tid och rum (diffust ljudfält) och beror mycket på trafikljud från långt håll som via meteorologiska effekter och diffraktion når innergården. Detta förklarades via mätningar och beräkningar som visade att en högre ordning på fasadreflektionerna hade en stor effekt på de ekvivalenta ljudnivåerna och ljudets dämpning. Med en högre ordning menas ett större antal reflektionsstrålar (returstrålar) per reflekterad (infallande) ljudstråle.

Studien visar dels på komplexiteten i att modellera stängda utomhusmiljöer och behovet av att utveckla detta och dels på effekten av reflektionsordningen, vilket påverkar modelleringarna gjorda i andra beräkningsprogram, exempelvis *Olive Tree Lab*, se avsnitt 5.2.1 (Hornikx, 2009).

5 METOD

I detta avsnitt beskrivs metoden som användes för att ta fram den nya ljudanalysmetoden för urbana utomhusmiljöer. Metoden är uppdelad i två huvuddelar; en

litteraturstudie och en fallstudie med modelleringar i programmet *Olive Tree Lab*. Även indata till *Olive Tree Lab* presenteras.

5.1 LITTERATURSTUDIE

Forskning kring akustisk design, ljudkvalitet och modellering av urbana ljudmiljöer sammanställdes och analyserades. Detta låg som grund för framtagandet av den resulterande beskrivningsmallen.

5.1.1 Källtyper

De typer av källor som använts i denna studie är:

Böcker.

Myndighetspublicerade rapporter. Rapporter som publicerats av myndigheter och instanser. Exempel på några av dessa är Boverket och Naturvårdsverket.

Referensgranskade artiklar. Oberoende granskade rapporter för akademisk publicering.

Webbsidor. Webbsidor som bedömts vara tillförlitliga, mestadels myndigheters eller forskares.

5.2 FALLSTUDIE

Fallstudien utfördes i det akustiska modelleringsprogrammet *Olive Tree Lab*. De olika miljöerna som modelleras i typfallen är en gata med en sida öppen (fall 1), vilket också illustrerar den ursprungliga bebyggelsen, ett stängt gaturum (fall 2) och ett stängt gaturum med ett inneslutet torg med öppning mot gatan (fall 3). Fall 2 och 3 representerar de förslag på förändring av området som utreds. Dessa typfall är valda utifrån att det är en typisk bebyggelse i urbana miljöer som är utsatt för buller. Fokus låg på att analysera ljudnivåerna kring en av byggnaderna eftersom samma mönster uppstår vid liknande byggnader. Utifrån dessa modeller applicerades de teorier om ljudkvalitet som beskrivits i avsnitt 4. De olika aspekterna som ämnas att analyseras utgår också från teorin om ljudets egenskaper som beskrivits i avsnitt 3. Dessa analyser ämnar att belysa en eventuell potential och ett eventuellt behov av att utveckla den nuvarande ljudanalysmetoden som går ut på att endast utgå från ljudnivåer från en viss typ av ljudkälla, i detta fallet trafikljud. Även möjligheterna för att utföra mer utförliga ljudanalyser utifrån en modellering av ljudnivåer undersöks. Indata för modelleringarna presenteras i avsnitt 5.3. Nedan följer en beskrivning av programmet.

5.2.1 Olive Tree Lab

Olive Tree Lab är ett 3D-akustiskt program utvecklat av *Mediterranean Acoustics Research and Development (PEMARD)*. Programmet kan beräkna såväl inomhus- som utomhusakustik och några av nyckelfunktionerna som listas på *PEMARDs* (u.å.) officiella hemsida är:

- 3D-akustisk mjukvara integrerad i en arbetsmiljö.
- Vågbaseerade geometriska akustiska beräkningar.
- Sfärisk ljudtrycksvågutbredning över impedansytor.
- Beräknar ytimpedans, ljudabsorptionskoefficienter och ljudtransmissionsförluster för 3D-strukturer.
- Tar hänsyn till atmosfärisk refraktion och turbulens i en ickehomogen atmosfär.

Mer detaljerad information kring hur beräkningarna utförs stod inte explicit på hemsidan men några metoder förklaras i rapporter som återfinns på *PEMARDs* officiella hemsida.

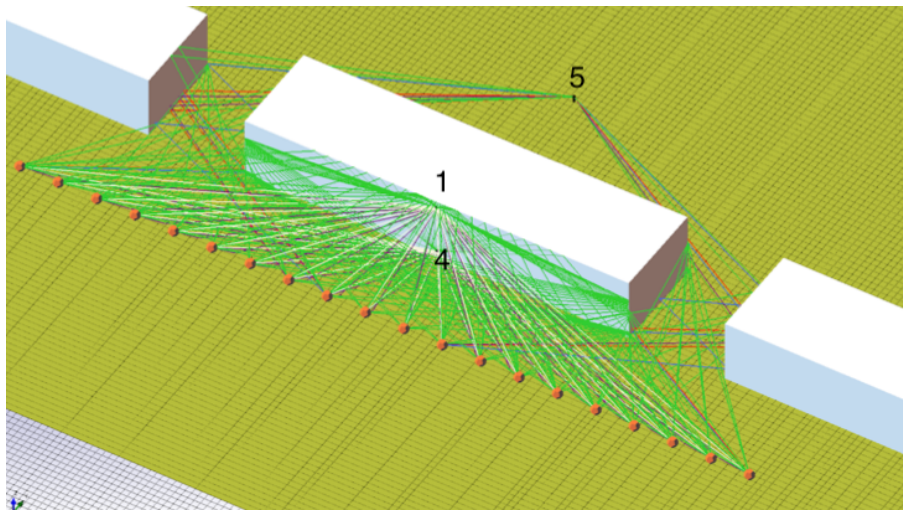
Olive Tree Lab-Terrain (utomhusmodellen) använder sig av strålningsberäkningar (ljudet beskrivs som strålar) som löser Helmholtz ljudvågsekvation (se ekvation (11)) och rekursiv diffraktion och reflektioner av vilken ordning som helst (det vill säga oändligt många strålar kan bildas vid varje träff av en reflekterande yta). Vidare beräknas reflektion från ändliga ytor med ändlig impedans genom användning av så kallade Fresnelzoner. Programmet använder sig också av sammanhängande/icke-sammanhängande ljudkällor som antingen bildar en rad av punktkällor eller en lång linjekälla. Avståndsavtagande av ljudnivåer samt atmosfärisk absorption och turbulens används också i beräkningarna. Vilka koefficienter som används och hur dessa metoder implementeras baseras på tidigare forskningsresultat. Bland annat baseras ljudvägsdetekteringen på *the image source method* (Lehmann, u.å.) samt *the Geometrical Theory of Diffraction* (Keller, 1962, Economou och P Charalampous, 2014). Vilken indata som valdes vid modelleringarna beskrivs i avsnitt 5.3.

I en rapport av Economou och Charalampous (2014) jämförs den vågbaserade beräkningsmetoden som används i *Olive Tree Lab* med metoden som definieras av ISO 9613-2. Detta är en standard som specificerar beräkningsmetoden för ljudutbredning utomhus för att förutse den ekvivalenta A-vägda ljudnivån från olika ljudkällor på olika avstånd (ISO.org, 1996). Kritik har dock riktats mot precisionen hos algoritmerna som används för att beräkna markeffekter, såsom markimpedans och även mot de som beräknar reflektioner. ISO 9613-2 har inte heller några algoritmer för turbulens, fas eller våglängder (förutom vid reflektion från barriärer). *Olive Tree Lab* använder sig av en ny vågbaserad beräkningsmetod som även tar hänsyn till reflektioner från ytor med ändlig impedans och objekt med ändlig volym såväl som diffraktion av oändlig

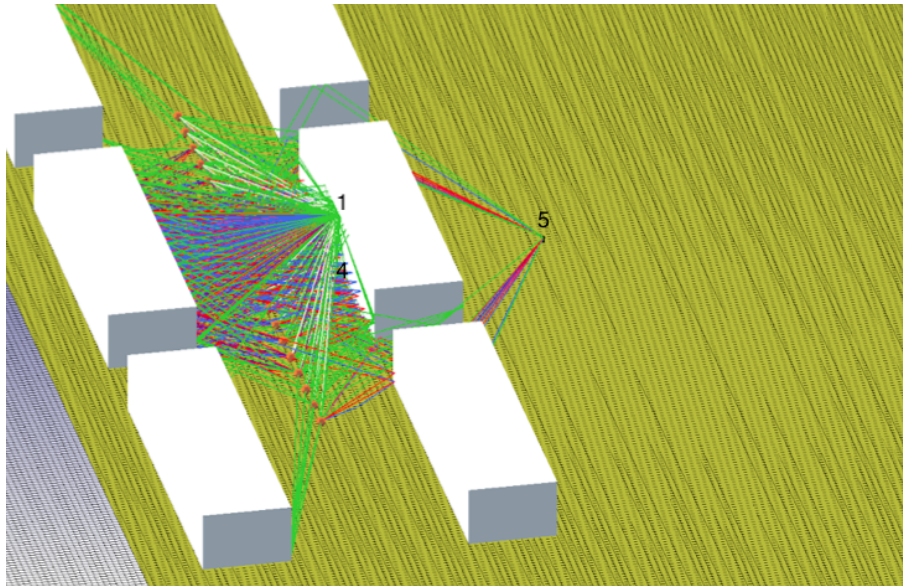
ordning från kanter (de teoretiska ljudstrålarna sprids utan gräns vid kontakt med kanter). Modellen beräknar även konstruktiv och destruktiv interferens vilket inte är möjligt med simplare algoritmer. Författarna menar att de metoder som används i *Olive Tree Lab* är mer verklighetstroga än de som används i ISO 9613-2 (Economou och P. Charalampous, 2014). För jämförelse med vanliga metoder, se avsnitt 4.3.1.

5.3 INDATA *OLIVE TREE LAB*

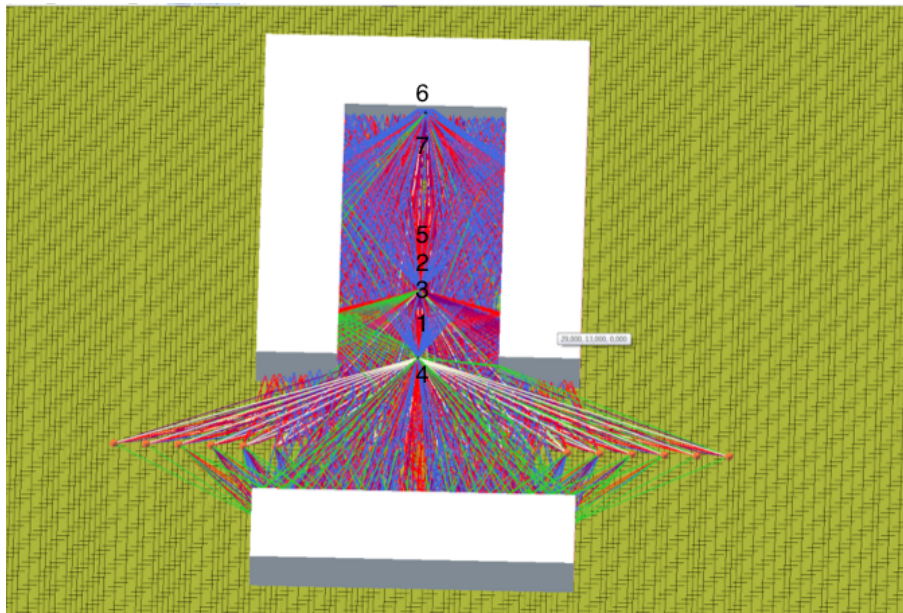
Indata för modelleringarna är gemensam för alla fall men utformningen av miljön varierar. Fall 1 representerar den nuvarande situationen och fall 2 och 3 representerar de två nya alternativen som utreds. Dessa illustreras i figur 8, 9 och 10. Dessa figurer återanvänds i resultatet där vidare förklaring kring strålgångarna ges. Miljön och dimensionerna är baserade på verkliga byggnader och gaturum men inget specifikt fall.



Figur 8: *Fall 1, det öppna gaturummet, i Olive Tree Lab. Siffrorna representerar mottagare som beskrivs nedan.*



Figur 9: *Fall 2, det stängda gaturummet, i Olive Tree Lab. Siffrorna representerar mottagare som beskrivs nedan.*



Figur 10: *Fall 1, gaturummet med ett torg på ena sidan, i Olive Tree Lab.*

Den sista punkten gäller för framtagna referensfall där ljudutbredningen från utplacerade punktkällor utreds. Följande data implementerades:

- Avstånd mellan bilar: 6 meter (För att skapa en homogen linjekälla av en rad punktkällor).

- Höjd på ljudkällor: 1 meter (approximation av höjden på ljudkällan på en bil).
- Antalet ljudkällor: 20 stycken (En avvägning mellan påverkan från ljudkällan (som avtar med avstånd och vinkel) och beräkningstid. Ett ökat antal ljudkällor ökar beräkningstiden.).
- Husets längd mot vägen: 60 meter.
- Avstånd mellan vägens mitt (ljudkällor) och husfasad (Långsida): 15 meter.
- Avstånd mellan husen (Kortsida): 15 meter.
- Husdjup: 15 meter.
- Hushöjd (tre plan): 10 meter.
- Torgdjup: 55 meter (fall 3).
- Placering av punktkällor: Mellan hus en meter upp (ena kortsidan) samt mitt på långsidan 9 meter upp (fall 1 och 2). Mitt på torget en meter upp (fall 3).

Ett antal mottagare placerades också ut för att analysera hur ljudstyrkan vid olika frekvenser varierade. Placering av mottagare vid fasad är också det tillvägagångssätt som används när ljudnivåer på fasader ska beräknas i *Olive Tree Lab*. En meter upp (i z-led) motsvarar ett fönster på plan 1 och en placering nio meter upp motsvarar en mottagare på tredje plan. Placeringen av dessa var följande:

- Mottagare 1: Placerad vid fasad mot vägen (främre huset), 9 meter upp. Färg i figur 14 och 19: röd. Färg i figur 23: mörkblå.
- Mottagare 2: Placerad vid fasad på baksidan av huset (främre huset), 9 meter upp. Färg i figur 14 och 19: turkos. Färg i figur 23: Ljusgrön
- Mottagare 3: Placerad vid fasad på baksidan av huset (främre huset), 1 meter upp. Färg i figur 14 och 19: lila. Färg i figur 23: röd.
- Mottagare 4: Placerad vid fasad mot vägen (främre huset), 1 meter upp. Färg i figur 14 och 19: ljusgrön. Färg i figur 23: turkos.
- Mottagare 5: Placerad 20 meter bakom huset (mitt på innergården/torget) Färg i figur 14 och 19: mörklila. Färg i figur 23: lila.
- Mottagare 6: Placerad vid fasad mot vägen (bortre huset), 9 meter upp. Färg i figur 23: grön.
- Mottagare 7: Placerad vid fasad mot vägen (bortre huset), 1 meter upp. Färg i figur 23: mörklila.

Mottagare 1–4 är av mindre intresse för fall 3 då det främre huset är borttaget. Mottagare 6 och 7 används endast för fall 3 då det borte huset parallellt med vägen införts. Färgerna avser vilken mottagare som representeras i respektive figur i resultatet men det går också att utläsa från ljudutbredningskartorna i resultatet var de högsta ljudnivåerna återfinns.

De materialval som gjordes och dess egenskaper i form av ljudkällornas utsända nivåer i olika frekvenser och ytors absorption och impedans presenteras i bilaga (avsnitt 8) i form av skärmavbilder från *Olive Tree Lab*. Samtliga parametrar var förvalda i programmet och de material och ljudkällor som valdes var de som ansågs mest representativa.

6 RESULTAT

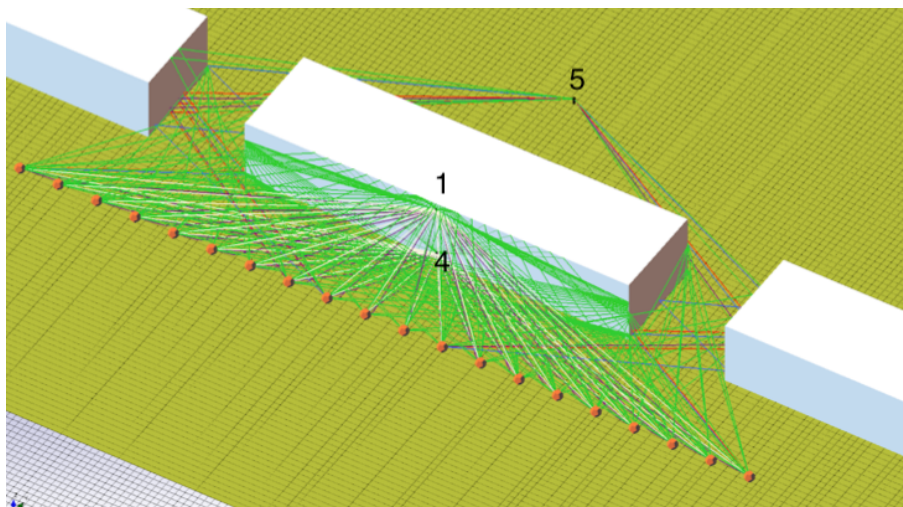
I detta avsnitt presenteras de modellerade ljudnivåerna för de olika fallen samt ljudnivåerna vid olika frekvenser vid de utplacerade mottagarna. Utöver detta presenteras också hur andra typer av ljudkällor som inte är riktvärdesbundna skulle påverka den relativa inverkan av det modellerade trafikljudet. Detta tillsammans med resultaten från de presenterade studierna ligger till grund för den beskrivningsmall som presenteras i detta avsnitt.

6.1 FALLSTUDIE

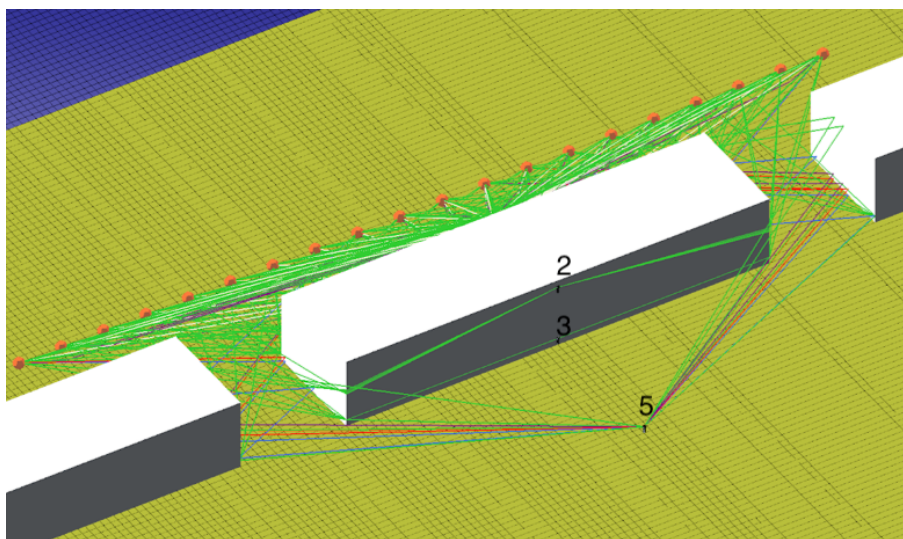
I detta avsnitt presenteras resultaten från de genomförda modelleringarna för de olika fallen samt modelleringar där ljudkällorna byts ut mot punktkällor för att se hur spridningen från dessa ser ut. Ljudnivån vid olika frekvenser vid de olika mottagarna presenteras också för att kunna göra en analys av detta. De starkaste ljudstrålarna mellan ljudkällorna och mottagarna presenteras också för att ge en överblick av hur ljudet sprider sig i modellen. Dessa ska inte förväxlas med ljudutbredningskartorna där många fler ljudstrålar tas med i beräkningen och där inte mottagarna har någon inverkan. Alla ljudnivåer är presenterade i dygnsekvivalent dBA.

6.1.1 Fallstudie 1: Gaturum med en öppen sida (ursprunglig utformning av området)

I figur 11 och 12 illustreras de vägar som ljudet färdas mellan ljudkällorna och de utplacerade mottagarna. Antalet strålar begränsas av att antalet starkaste vägar per mottagare, det vill säga de strålar som innehåller mest ljud, är satt till 200 och därmed representerar de svagaste strålarna (de med lägst ljudstyrka) den väg som ljudet färdas till någon av mottagarna med lägst ljudstyrka. Detta förklarar varför vissa mottagare mottar färre strålar än andra.



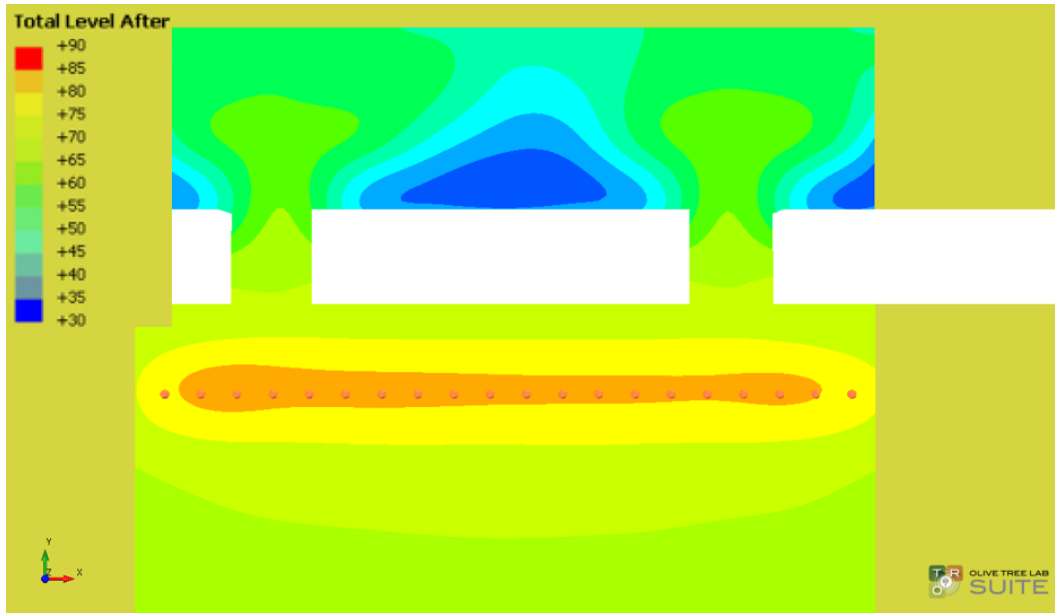
Figur 11: De ljudstrålar som bidrar mest till ökade ljudnivåer från ljudkällan till mottagarna för det öppna gaturummet i Olive Tree Lab. Ljudkällorna ses på en rad på framsidan av byggnaden och punktkällorna är markerade med siffror.



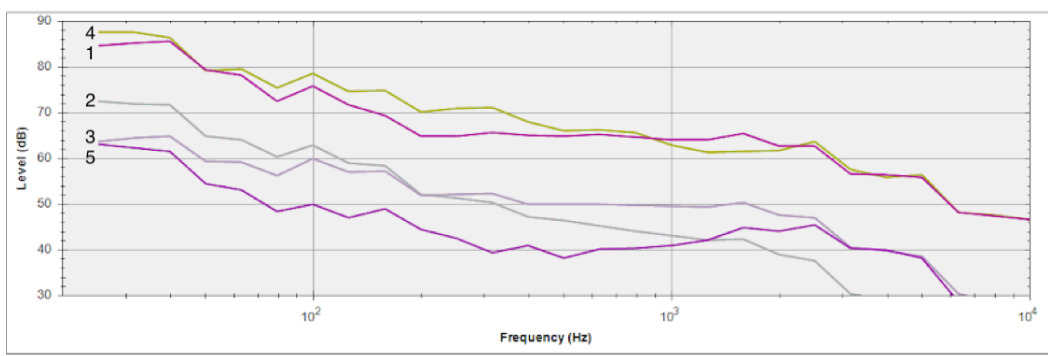
Figur 12: De ljudstrålar som bidrar mest till ökade ljudnivåer från ljudkällan till mottagarna för det öppna gaturummet i Olive Tree Lab. Ljudkällorna ses på en rad på baksidan av byggnaden och punktkällorna är markerade med siffror.

I figur 13 illustreras ljudutbredningen från vägen över det öppna gaturummet. Ljudnivån avtar med avståndet i den öppna riktningen och ljudskuggor uppstår bakom husen i andra riktningen. Ljudnivåerna vid fasaden mot vägen och på sidorna ligger på mellan 60 och 75 dBA och överskrider därmed riktvärdena för trafikljud som ligger på 60 dBA, se tabell 1 för riktvärden. I figur 14 redovisas ljudnivåerna vid olika frekvenser för de olika mottagarna. Ljudnivåerna från trafikljudet är högst vid låga

frekvenser för att sedan sjunka med ökande frekvens. De mottagare som nås av ljudnivåer vid höga frekvenser (10 kHz) är de som nås av högst nivåer vid alla frekvenser, vilket är de två mottagarna som ligger på sidan mot vägen. Vilken mottagare som representeras av vilken färg beskrivs i avsnitt 5.3.



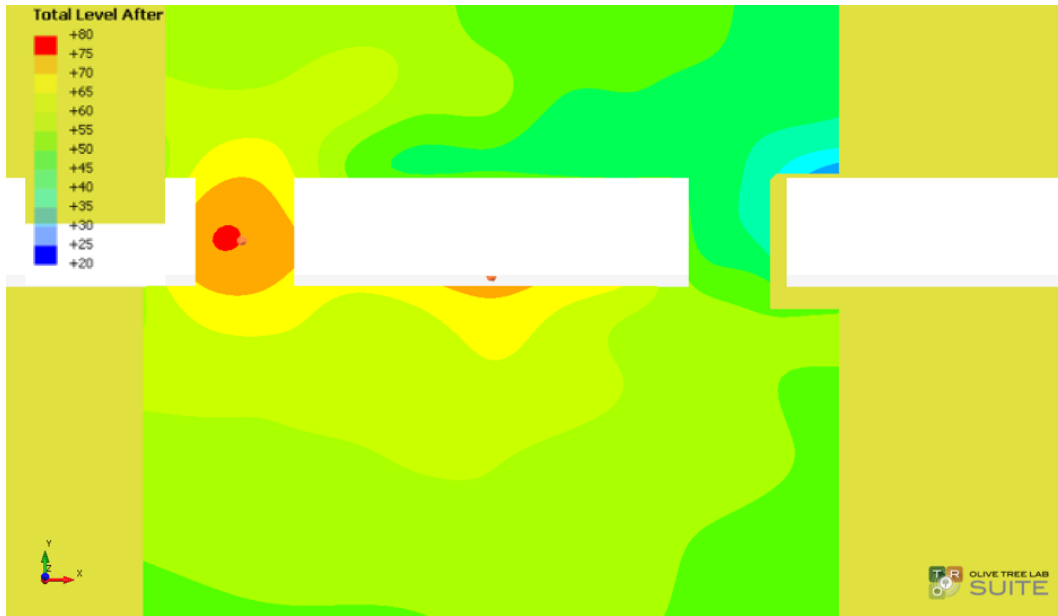
Figur 13: Ljudutbredningskarta för ekvivalenta ljudnivåer från ljudkällan för det öppna gaturummet (Olive Tree Lab).



Figur 14: Ekvivalenta ljudnivåer vid olika frekvenser vid de olika mottagarna för det öppna gaturummet. Mottagarna är markerade med nummer, se avsnitt 5.3 för info om placering av mottagarna (Olive Tree Lab). Vilken mottagare som är vilken beskrivs i avsnitt 5.3.

I figur 15 redovisas hur ljudet sprids från två punktkällor (med samma utsända ljudnivå som de som bildar linjekällan i figur 13) som är placerade en meter upp mitt i mellan husen samt en placerad mitt på långsidan 9 meter upp (vilket motsvarar det

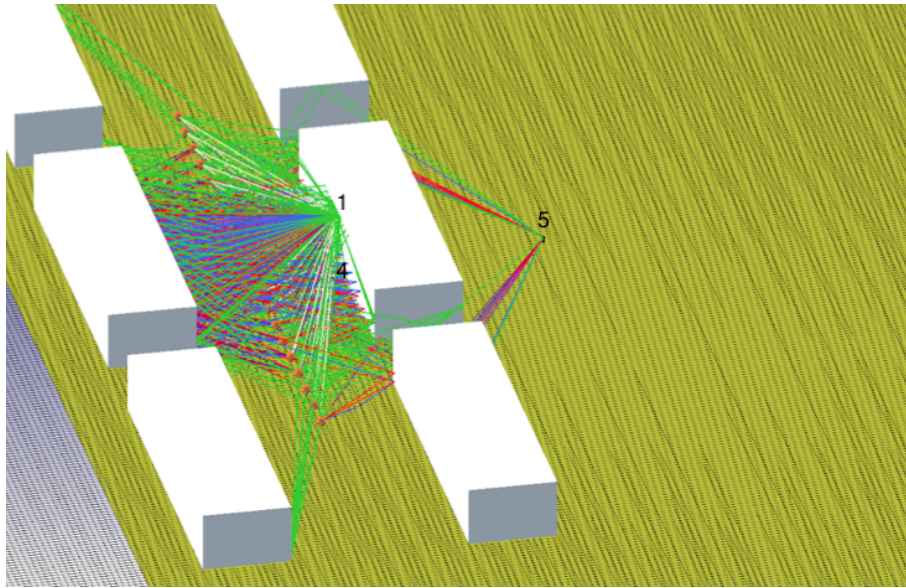
tredje våningsplanet). Den punktkälla som bidrar med högst ljudnivåer är den mellan husen.



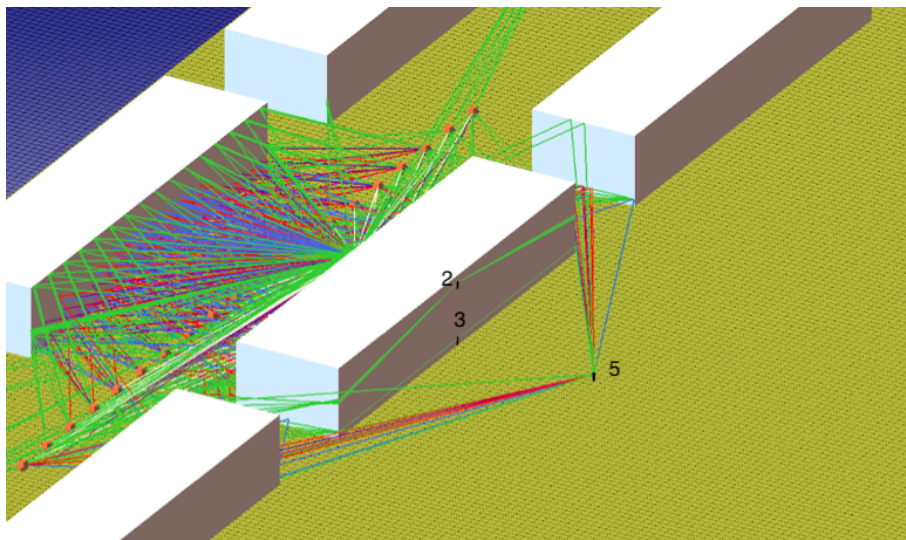
Figur 15: *Ljudutbredningskarta för ekvivalenta ljudnivåer från två utplacerade punktkällor för det öppna gaturummet (Olive Tree Lab).*

6.1.2 Fallstudie 2: Stängt gaturum

I figur 16 och 17 illustreras de vägar som ljudet tar mellan ljudkällorna och de utplacerade mottagarna.



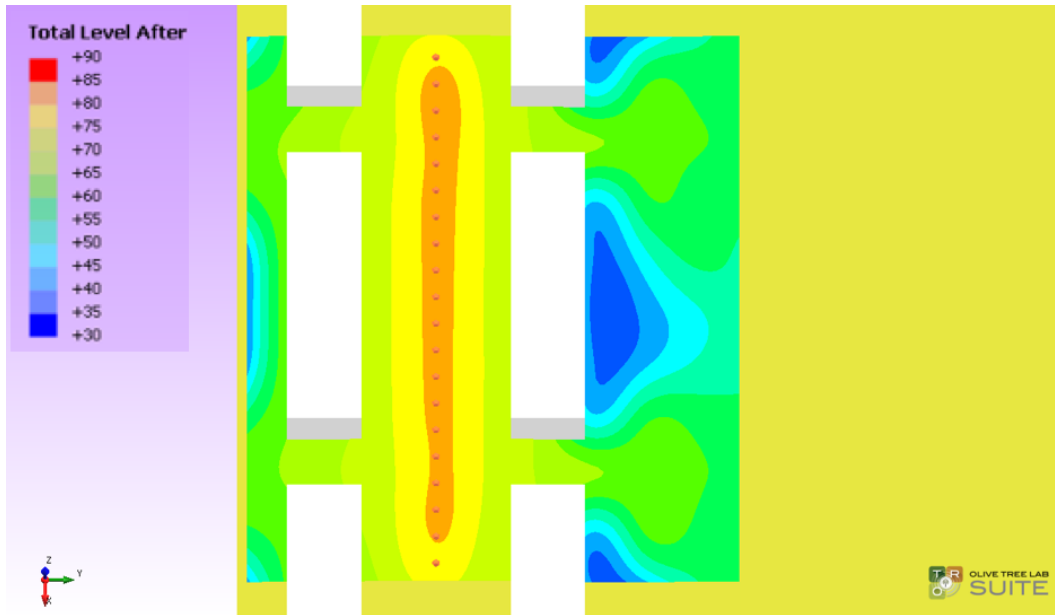
Figur 16: De ljudstrålar som bidrar mest till ökade ljudnivåer från ljudkällan till mottagarna för det stängda gaturummet i Olive Tree Lab. Ljudkällorna ses på en rad på framsidan av byggnaden och punktkällorna är markerade med siffror.



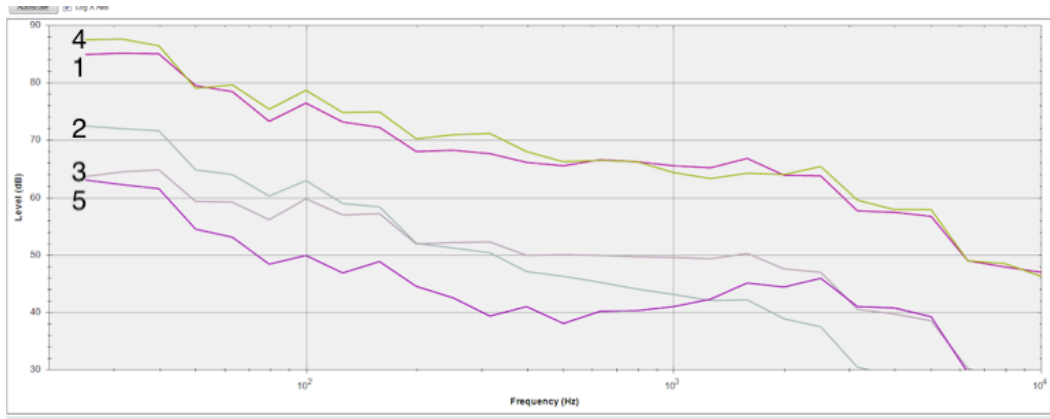
Figur 17: De ljudstrålar som bidrar mest till ökade ljudnivåer från ljudkällan till mottagarna för det stängda gaturummet i Olive Tree Lab. Ljudkällorna ses på en rad på baksidan av byggnaden och punktkällorna är markerade med siffror.

I figur 18 illustreras ljudutbredningen från vägen över det stängda gaturummet. Ljudnivåerna avtar med avståndet och ljudskuggor uppstår bakom husen. Denna ljudskugga är dock inte lika tydlig på båda sidorna då ljudnivån ligger kring 50 dBA precis bakom huset på de ena sidan och kring 60 dBA på den andra sidan precis bakom

huset. Ljudnivåerna vid fasaden mot vägen och på sidorna ligger på mellan 60 och 75 dBA och överskrider därmed riktvärdena för trafikljud som ligger på 60 dBA, se tabell 1 för riktvärden. Även ljudnivåerna mot den ena skyddade fasaden ligger på 60 till 65 dBA. I figur 19 redovisas ljudnivåerna vid olika frekvenser för de olika mottagarna. Ljudnivåerna från trafikljudet är högst vid låga frekvenser för att sedan sjunka. De mottagarna som nås av ljudnivåer vid höga frekvenser (10kHz) är de som nås av högst nivåer vid alla frekvenser, vilket är de två mottagarna som ligger på sidan mot vägen, som i fall 1. Vilken mottagare som representeras av vilken färg beskrivs i avsnitt 5.3.

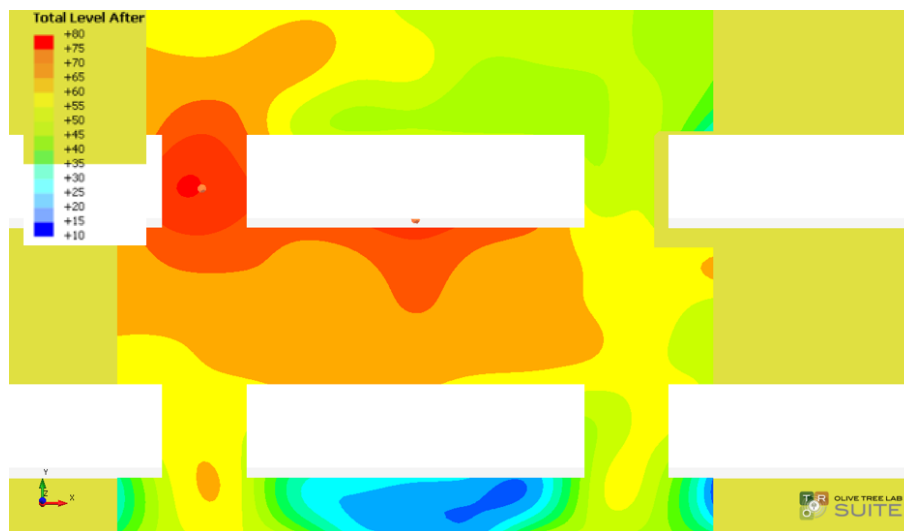


Figur 18: ljudutbredningskarta för ekvivalenta ljudnivåer från ljudkällan för det stängda gaturummet (Olive Tree Lab).



Figur 19: Ekvivalenta ljudnivåer vid olika frekvenser vid de olika mottagarna för det stängda gaturummet. Mottagarna är markerade med nummer, se avsnitt 5.3 för info om placering av mottagarna (Olive Tree Lab). Vilken mottagare som är vilken beskrivs i avsnitt 5.3.

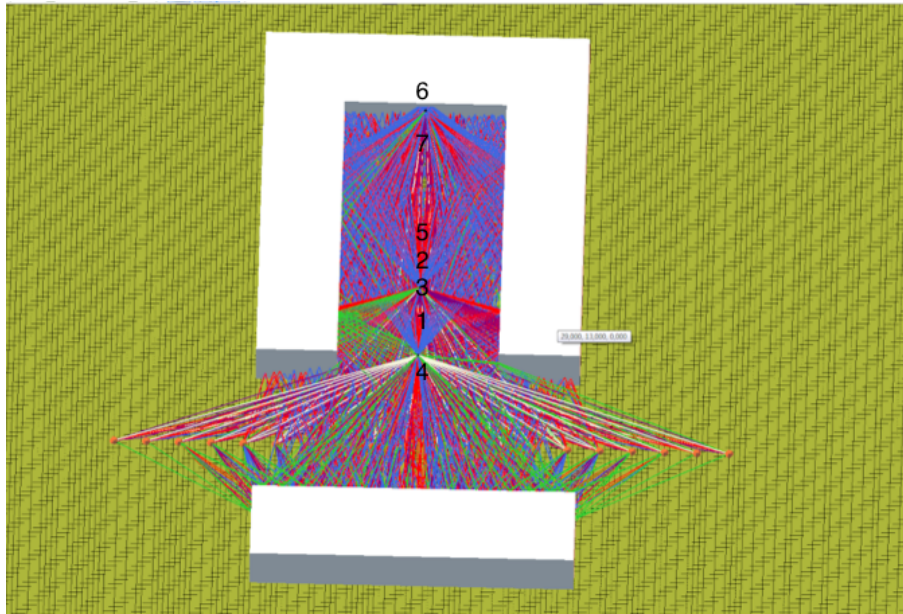
I figur 20 redovisas hur ljudet sprids från två punktkällor (med samma utsända ljudnivå som de som bildar linjekällan i figur 18) som är placerade en meter upp mitt i mellan husen samt en placerad mitt på långsidan 9 meter upp (vilket motsvarar det tredje våningsplanet). Den punktkälla som bidrar med högst ljudnivåer är den mellan husen på kortsidan, även om punktkällan på långsidan bidrar med högre nivåer i detta fall än vid fall 1.



Figur 20: Ljudutbredningskarta för ekvivalenta ljudnivåer från två utplacerade punktkällor för det stängda gaturummet (Olive Tree Lab).

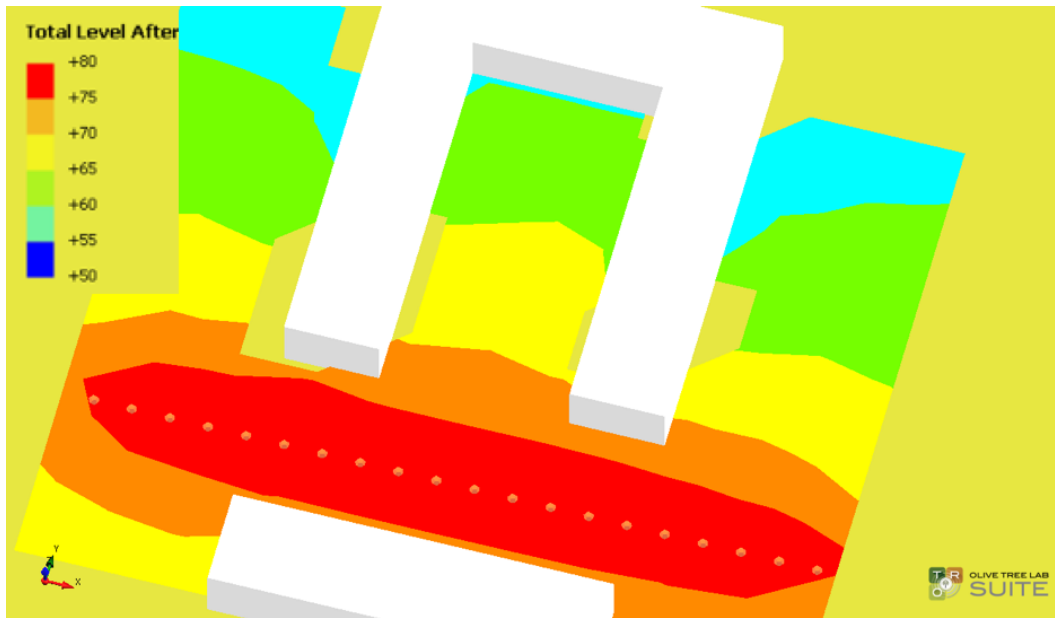
6.1.3 Fallstudie 3: Stängt gaturum med inneslutet torg med öppning mot vägen

I figur 21 illustreras de vägar som ljudet tar mellan ljudkällorna och de utplacerade mottagarna för det stängda gaturummet med torg på ena sidan. I detta fall var det svårare att urskilja strålarna till de olika mottagarna eftersom antalet strålar på torget blir så många på grund av tätt sittande reflektionsytor.

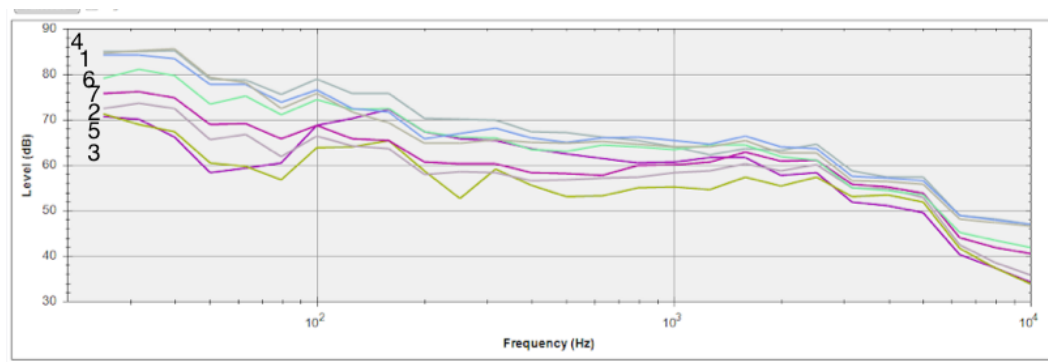


Figur 21: De ljudstrålar som bidrar mest till ökade ljudnivåer från ljudkällan till mottagarna in på torget i Olive Tree Lab. Ljudkällorna ses på en rad framför torget och punktkällorna är markerade med siffror.

I figur 22 illustreras ljudutbredningen från vägen över gatan och på torget. Ljudnivån avtar med avståndet i den öppna riktningen och ljudskuggor uppstår bakom husen i andra riktningen. Ljudnivåerna vid fasaden mot vägen och på sidorna ligger på mellan 70 och 75 dBA och överskrider därmed riktvärdena för trafikljud som ligger på 60 dBA, se tabell 1 för riktvärden. Ljudnivåerna minskar sedan med avståndet och ljudnivåerna inne på torget är något högre än utanför och ligger precis på gränsen för riktvärdet med en ljudnivå kring 60 dBA. I figur 23 redovisas ljudnivåerna vid olika frekvenser för de olika mottagarna. Ljudnivåerna från trafikljudet är högst vid låga frekvenser för att sedan sjunka. I detta fall är ytterligare två mottagare adderade, en respektive nio meter upp vid den bortre fasaden mot vägen. Samtliga mottagare nås av ljudnivåer över 30 dBA vid höga frekvenser (10kHz). Vilken mottagare som representeras av vilken färg beskrivs i avsnitt 5.3. I figur 24 redovisas hur ljudet sprids från en punktkälla (med samma utsända ljudnivå som de som bildar linjekällan i figur 22) som är placerad en meter upp mitt på torget. Ljudnivåerna från denna är högre nära den stängda delen av torget.

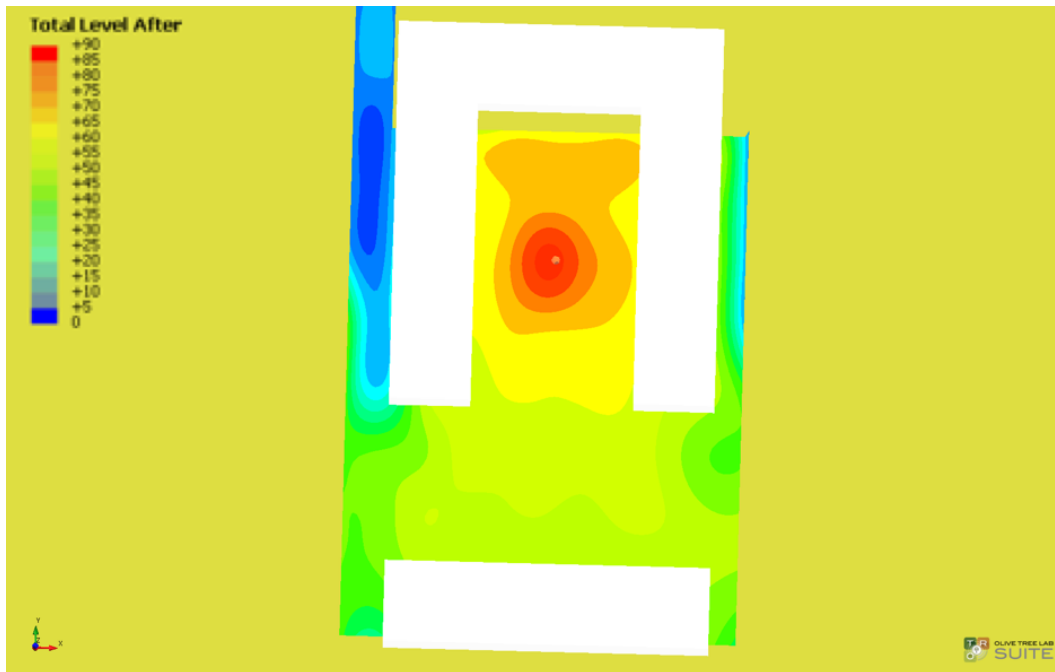


Figur 22: Ljudutbredningskarta för ekvivalenta ljudnivåer från ljudkällan för gatan mot torget (Olive Tree Lab). De olivgröna områdena beräknade inte modellen men dessa går att uppskatta genom extrapolering.

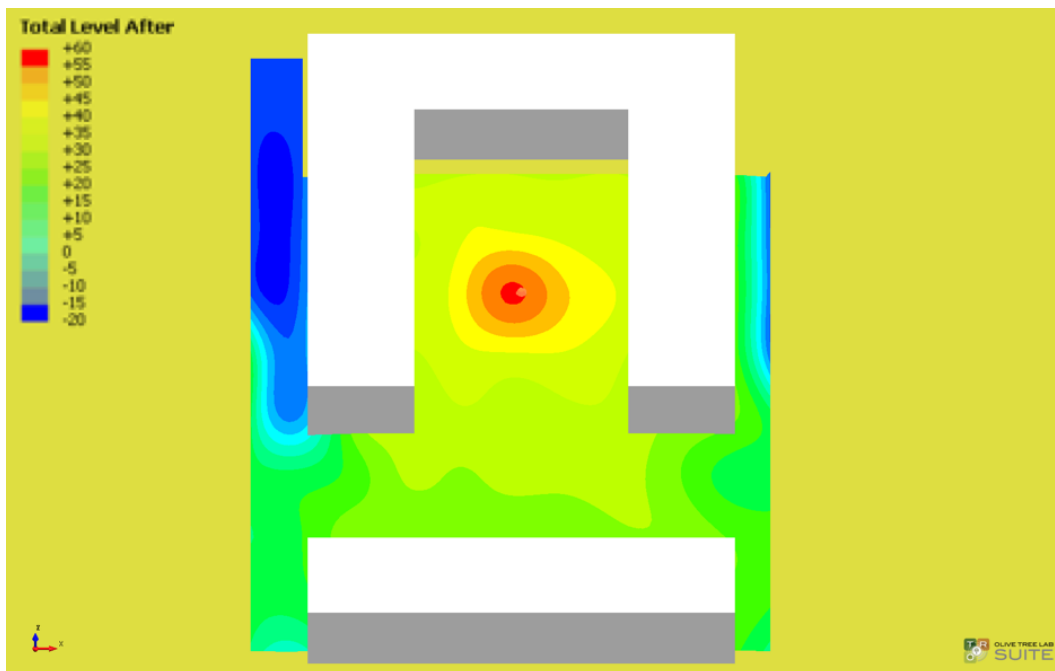


Figur 23: Ekvivalenta ljudnivåer vid olika frekvenser vid de olika mottagarna in mot torget. Mottagarna är markerade med nummer, se avsnitt 5.3 för info om placering av mottagarna (Olive Tree Lab). Vilken mottagare som är vilken beskrivs i avsnitt 5.3.

I figur 25 redovisas ljudnivåerna från en punktkälla med samma placering men med utsända ljudnivåer som motsvarar vanligt tal i *Olive Tree Lab*, se figur B.2 och B.1 i Bilaga 8 för info om källorna. Skillnaden i ljudnivå mot den inre fasaden mellan källorna är 25 dBA, 60 dBA för den som motsvarar trafikljud och 35 för den som motsvarar vanligt tal.



Figur 24: Ljudutbredningskarta för ekvivalenta ljudnivåer från en utplacerad punktkälla på torget (Olive Tree Lab).



Figur 25: Ekvivalenta ljudnivåer vid olika frekvenser vid de olika mottagarna in mot torget. Se avsnitt 5.3 för info om placering av mottagarna (Olive Tree Lab).

6.2 RESULTERANDE BESKRIVNINGSMALL

I detta avsnitt presenteras den nya ljudanalysmetoden i form av en beskrivningsmall för ljudmiljöer utomhus samt vad denna grundas på. Beskrivningsmallen avses vara ett komplement till det som redan idag ingår i de flesta miljökonsekvensbeskrivningar med avseende på buller. Mallen kommer därför inte att beakta rent bullerdämpande åtgärder som bullerskärmar eller ökad absorption. Dessa åtgärder rekommenderas endast om de metoder som beskrivs i mallen inte anses vara möjliga med avseende på ekonomi och ljudkvalitet.

6.2.1 Framtagande av beskrivningsmall

Den resulterande beskrivningsmallen för ljud utomhus grundar sig på den forskning kring alternativa synsätt på ljudmiljöer som presenteras i avsnitt 4 (exempelvis Persson, Smith och Ögren (2017) och Berglund, Nilsson och Axelsson (2007)) och teorin om ljudets uppkomst och spridning som presenteras i avsnitt 3. Resultaten från modelleringarna som presenteras i avsnitt 6.1 användes som referensfall och exempel som mallen appliceras på. Som helhet utgår utformningen av mallen från de paragrafer som avser innehållet i en miljökonsekvensbeskrivning som presenteras i avsnitt 2.2.2.

6.2.2 Beskrivningsmall

I detta avsnitt presenteras den resulterande beskrivningsmallen i form av ett antal frågeställningar. Utifrån den forskning, exempelvis Gidlöf-Gunnarsson, Ögren och Öhrström, 2007, Dyrssen m. fl., 2014 och Glebe, K. Larsson och Persson, 2016, och den teorin som presenterats tidigare i rapporten bör följande parametrar utredas som komplement till dagens utformning av MKB:er med avseende på ljudmiljön:

1. Hur ser den befintliga ljudmiljön ut på platsen?
 - (a) Vilka ljudnivåer återfinns på området?
 - i. Varierar ljudnivåerna mellan olika platser på området?
 - ii. Överskrids riktvärden för några platser på området?
 - iii. Varierar ljudnivåerna mellan olika tider på dygnet? Förslagsvis kan de ekvivalenta ljudnivåerna jämföras mellan dag och natt, alternativt kan L_{DEN} användas, se ekvation (6) och (7).
 - (b) Vilka frekvenser dominerar ljudbilden? Förslagsvis bör de A-vägda ljudnivåerna jämföras med de C-vägda, se tabell 7.
 - (c) Vilken typ av ljudkällor återfinns (mänskliga/naturliga/mechaniska, se avsnitt 2.3.4)?
 - (d) Vilka typer av ljudkällor (mänskliga/naturliga/mechaniska) är mest framträdande?
 - (e) Påverkas upplevelsen av ljudmiljön av visuella aspekter (exempelvis synligheten av ljudkällorna eller deras estetiska utformning)?

- (f) Finns det ett behov av att förbättra ljudmiljön med avseende på platsens syfte, användning eller målgrupp? Området kan innefatta flera platser med olika syften och därmed bör olika krav på ljudmiljön ställas. Denna bedömning görs utifrån ovanstående punkter.
2. Hur förändras ljudmiljön med den planerade nya utformningen av anläggningen/platsen (endast om utformningen av platsen avses att förändras)?
- (a) Förstärks/försvagas några typer (mänskliga/naturliga/mechaniska) av ljud? Leder detta till att riktvärden överskrids?
- (b) Blir någon typ av ljud (mänskliga/naturliga/mechaniska) mer eller mindre framträdande i ljudbilden?
- (c) Ändras syftet av platsen på ett sätt som gör att kraven på ljudmiljön bör ändras?
- (d) Finns det ett behov av att förbättra ljudmiljön med avseende på platsens nya utformning? Området kan innefatta flera platser med olika syften och därmed bör olika krav på ljudmiljön ställas. Denna bedömning görs utifrån ovanstående punkter.
- (e) Finns det ett behov av att förbättra ljudmiljön med avseende på platsens eventuella nya syfte, användning eller målgrupp? Området kan innefatta flera platser med olika syften och därmed bör olika krav på ljudmiljön ställas. Denna bedömning görs utifrån ovanstående punkter.
3. Kan den planerade ändringen av området utformas på ett annat vis för att förbättra ljudmiljön (endast om utformningen av platsen avses att förändras)?
- (a) Kan platser som är känsliga för ljudnivåer som uteplatser eller rekreationsutrymmen placeras i ljudskugga/långt ifrån oönskade ljud eller nära positiva ljud?
- (b) Kan den arkitektoniska utformningen av området göras på ett sådant vis att den nya ljudbilden på ett bättre sätt överensstämmer med vad som kan förväntas?
- (c) Kan valet av plats omvärderas?
4. Om inte anläggningens utformning anses kunna anpassas, hur kan ljudmiljön förbättras på annat vis?
- (a) Finns det möjlighet till maskering av oönskat ljud?
- i. Finns det möjlighet att införa maskerande ljud? Om ja, gå vidare med 4.(a) ii.-iv.
- ii. Vilken typ av maskering anses vara bäst lämpad ur ett arkitektoniskt perspektiv med avseende på placering och utformning?

- iii. Vilken typ av maskering anses vara bäst lämpad ur ett akustiskt perspektiv med avseende på placering och utformning?
 - iv. Vilken är den bäst lämpade maskeringstypen för området? (Sammanvägning av 4 ii och 4 iii).
- (b) Kan andra materialval förbättra ljudmiljön?
- i. Kan material med högre absorptionsförmåga väljas, exempelvis mjukare mark eller växtlighet längs fasader?
 - ii. Kan andra materialval väljas på ett sådant sätt att den arkitektoniska upplevelsen förändras så att upplevelsen av ljudbilden förbättras? Exempelvis genom att synliggöra/osynliggöra olika ljudkällor eller att använda transparenta material.
- (c) Kan införande av nya objekt förbättra ljudmiljön?
- i. Kan införande av objekt som inte enbart fyller ett bulleravskärmande syfte minska ljudnivåerna? Exempelvis vegetation eller multifunktionella reflektionsytor mot bullerkällan.
 - ii. Kan införande av nya objekt väljas på ett sådant sätt att den arkitektoniska upplevelsen förändras så att upplevelsen av ljudbilden förbättras? Exempelvis genom att synliggöra/osynliggöra olika ljudkällor eller ändra förväntningarna av ljudbilden till att bättre överensstämmer med den befintliga ljudbilden.
 - iii. Kan införande av bulleravskärmande åtgärder förbättra ljudkvaliteten mer än övriga åtgärder?

6.2.3 Tolkning och implementering av beskrivningsmallen

Beskrivningsmallen är avsedd att användas av akustiker med erfarenhet av att mäta, tolka och bedöma ljud. Mallen är tänkt att implementeras som en obligatorisk del i miljökonsekvensbeskrivningar, inte bara av platser som omfattas av riktvärden utan samtliga områden där människor vistas. En implementering i samtliga områden får stöd i miljömålet *God bebyggd miljö* samt i 6 kap. 35-37 §§ miljöbalken och i miljöbedömningsförordningen 16-19 §§, framförallt punkt 6 som hänvisar till miljö kvalitetsnormen för omgivningsbuller, se avsnitt 2.2.2. Samtliga föreslagna åtgärder ska ta hänsyn till djur och natur med stöd av miljöbalken.

Nedan följer en teoretisk implementering av beskrivningsmallen på de tre modellerade fallen i fallstudien. Fall 1 är den nuvarande situationen och de två alternativen på ändringar av området representeras av fall 2 och 3. I samtliga fall utgår implementeringen från att byggnaderna är avsedda för bostäder. Eftersom ingen detaljerad specificering om platsens utformning gjorts lämnas ett antal frågor öppna. Dessa diskuteras i avsnitt 7.

6.2.4 Implementering av beskrivningsmallen på fallstudien

Då beskrivningsmallen implementeras på fallstudien skulle följande svar/resonemang kunna ges:

1.(a) i.) Ljudnivåerna över området från vägen beskrivs av ljudutbredningskartan. Från modelleringen ges ingen information kring andra befintliga ljud än de som kommer från vägen. En okulärbesiktning och mätningar krävs för att utreda de faktiska ljudnivåerna.

1.(a) ii.) Det konstaterades att riktvärdena för ljudnivåer från trafik vid bostadsfasaden överskreds på fasaden mot vägen och på kortsidorna med ekvivalenta ljudnivåer på 60 till 75 dBA.

1.(a) iii.) Ingen information kring ljudnivåernas variation över dygnet finns, men avståndet mellan ljudkällorna (bilarna) är baserat på en lägre trafikintensitet nattetid. Statistik för den enskilda vägen kan eventuellt erhållas från Trafikverket, annars kan mätning dag/natt göras.

1.(b) De frekvenser som dominerar ljudbilden då endast trafikljudet beaktas är de låga, vilket kan ses i figur 14. För att kunna uppskatta den verkliga ljudbilden bör mätning och okulärbesiktning på plats göras. Utifrån detta kan den c-vägda ljudnivån jämföras med den a-vägda och om skillnaden är stor bör en oktavbandsanalys utföras.

1.(c) Okulärbesiktning samt mätning på plats krävs.

1.(d) Okulärbesiktning samt mätning på plats krävs.

1.(e) Visar det sig att trafikljuden är framträdande kan en analys av vägens tydliga synlighet i dagsläget värderas. Andra ljudkällor kräver okulärbesiktning.

1.(f) Utifrån de riktvärden som föreligger finns inget behov av förändringar av området med avseende på ljudnivåerna om lägenheterna är genomgående, det vill säga har en tyst sida, samt om de har en privat eller gemensam uteplats på den skyddade sidan. Utrymmet på andra sidan vägen är utsatt för höga ljudnivåer från vägen (runt 70 dBA) vilket gör detta området olämpligt att vistas på. Andra ljudkällor än vägen behöver analyseras för att kunna göra en slutgiltig bedömning.

2.(a)

Fall 2

Något högre nivåer erhålls på den ena skyddade sidan av husen men ingen större skillnad på själva gaturummet kan ses. Båda sidorna av vägen får en skyddad del bakom hus. Förändringar av andra ljudkällor är helt beroende på vilka som återfanns

från början. Den oexploaterade sidan av vägen är den som påverkas och om denna användes som park eller liknande innan kan inverkan av naturliga och mänskliga ljud minskas.

Fall 3

Nivåerna i gaturummet är likvärdiga men en ny ljudmiljö skapas på torget där de dygnsekvivalenta ljudnivåerna från trafiken ligger mellan 60 och 75 dBA och därmed överskrids riktvärdena om inte lägenheterna är genomgående eller om inte skyddade uteplatser finns. Förändringar av andra ljudkällor är helt beroende på vilka som återfanns från början. Den skyddade sidan av huset som blir torg kan eventuellt leda till minskade naturliga/mänskliga ljud om den platsen tidigare använts som exempelvis park.

2.(b)

Fall 2

Baseras på den okulärbesiktning samt mätning på plats som utförs. Uppskattning och analys av den nya situationen utförs av akustiker.

Fall 3

Baseras på den okulärbesiktning samt mätning på plats som utförs. Uppskattning och analys av den nya situationen utförs av akustiker.

2.(c)

Fall 2

Den tidigare oexploaterade sidan avses för bostäder och sidan bakom huset blir skyddad från vägen. Krav på fasadnivåer ställs på båda sidor om vägen.

Fall 3

Torg upprättas på den oexploaterade delen och en ny mötesplats skapas på den sida där det tidigare bara var ett gaturum vilket ställer nya krav på ljudmiljön.

2.(d)

Fall 2

Ljudmiljön försämras antagligen inte av den nya utformningen, även en minskning av mänskliga/naturliga ljud kan ske om de nya husen upprättas på bekostnad av en eventuell park.

Fall 3 I detta fall skapas en ny mötesplats som är utsatt för ekvivalenta ljudnivåer mellan 60 och 75 dBA. Detta bör värderas och åtgärder bör utredas.

2.(e)

Fall 2

Nej, platsen avser fortfarande bostäder.

Fall 3

Ja, en ny mötesplats skapas mot bullerkällan (vägen).

3.(a)

Fall 2

Uteplatser bör placeras på den skyddade sidan av husen för att riktvärdena ska underskridas.

Fall 3

Uteplatser bör placeras på den skyddade sidan av husen för att riktvärdena ska innehåsa. Torget skulle kunna vändas så att det blir skyddat av huset eller vara helt inneslutet, det sistnämnda kan dock påverka möjligheten till skyddade uteplatser för de som bor i huset närmast vägen.

3.(b)

Fall 2

Den arkitektoniska utformningen anses inte ha en stor effekt på upplevelsen av ljudmiljön i detta fallet.

Fall 3

Utformningen av torget skulle exempelvis kunna uppmuntra till aktivitet snarare än rekreation för att skapa mindre fokus på trafikljudet.

3.(c)

Fall 2

Valet av plats bedöms från fall till fall av anläggaren och ingen sådan bedömning kan göras här.

Fall 3

Valet av plats bedöms från fall till fall av anläggaren och ingen sådan bedömning kan göras här.

4.(a) i.)

Fall 2

Möjligheten för maskering anses vara begränsad och inte särskilt effektivt då det endast är gaturummet som omfattas av höga ljudnivåer från vägen. Om eventuell maskering skulle införas är den lämpligast att placera mellan husen på kortsidan där utrymme finns och där maskeringen ger effekt både på gaturummet och på baksidan av husen.

Fall 3

I detta fall skulle det kunna vara intressant att införa maskerande ljud på torget för att minska den relativa inverkan från trafikljudet.

4.(a) ii.)

Fall 2

En arkitektonisk bedömning behöver göras utifrån områdets utformning och utseende vilket inte specificeras i detta fall.

Fall 3

En arkitektonisk bedömning behöver göras utifrån områdets utformning och utseende vilket inte specificeras i detta fall. Utrymmet begränsas inte på torget.

4.(a) iii.)

Fall 2

I figur 20 illustreras hur ljudet från en punktkälla mellan husens kortsidor respektive mitt på långsidan av huset sprider sig. I detta fall påverkar en källa på långsidan ljudmiljön endast på gaturummet medan en punktkälla mellan kortsidorna påverkar ljudmiljön även bakom husen. De exakta ljudnivåerna är inte relevanta eftersom källtypen i illustrationen motsvarar trafikljud. Vilket frekvensområde som det maskerande ljudet bör ligga inom kan bestämmas utifrån de utsända ljudnivåerna från den ljudkälla som ska maskeras, se figur 19, tillsammans med den teori kring maskering som presenteras i avsnitt 2.3.3. Då ljudnivåerna från trafiken är höga även vid väldigt låga frekvenser behöver det maskerande ljudet ha en låg bandbredd (~ 100 Hz) (Gelfand, 2010). Med en så låg bandbredd är det svårt att skapa positiva ljud vilket gör att en total maskering av trafikljudet är närmast uteslutet. Istället skulle en delvis maskering kunna vara uppnåeligt. Eftersom ljudnivåerna från trafiken är så pass höga rekommenderas inte att det maskerande ljudet överskrider dessa.

Fall 3

I figur 24 illustreras hur ljudet från en punktkälla mitt på torget sprider sig. Ljudet sprider sig på hela torget med högre nivåer mot den slutna delen där ljudet från trafiken är som lägst. De exakta ljudnivåerna är inte relevanta eftersom källtypen i illustrationen motsvarar trafikljud. Vilket frekvensområde som det maskerande ljudet bör ligga inom kan bestämmas utifrån de utsända ljudnivåerna från den ljudkälla som

ska maskeras, se figur 23, tillsammans med den teori kring maskering som presenteras i avsnitt 2.3.3. Då ljudnivåerna från trafiken är höga även vid väldigt låga frekvenser behöver det maskerande ljudet ha en låg bandbredd (~ 100 Hz) (Gelfand, 2010). Med en så låg bandbredd är det svårt att skapa positiva ljud vilket gör att en total maskering av trafikljudet är närmast uteslutet. Istället skulle en delvis maskering kunna vara uppnåeligt. På torget skulle effekten av exempelvis en fontän eller vegetation, både akustiskt och arkitektoniskt, kunna vara fördelaktigt. Fontäner tenderar dock att maskeras av trafikljudet snarare än tvärtom på grund av en högre bandbredd. Dock så kan bandbredden sänkas och den maskerande effekten höjas om vattenflödet ökar (Al-Musawi, 2012). Eftersom ljudnivåerna från trafiken är så pass höga rekommenderas inte att det maskerande ljudet överskrider dessa.

4.(a) iv.)

Fall 2

Maskering rekommenderas ej som åtgärd.

Fall 3

En fontän mitt på torget skulle kunna minska den relativa inblandningen av trafikljud och på så sätt förbättra ljudmiljön.

4.(b) i.)

Fall 2

I fallstudien användes hård mark respektive betonghus vilket båda har en låg absorption. I detta fall är det framförallt närheten till ljudkällan på sidan av husen mot vägen som är avgörande varvid inga ändringar av materialval påverkar ljudmiljön nämnvärt.

Fall 3

I fallstudien användes hård mark respektive betonghus vilket båda har en låg absorption. I detta fall spelar reflektionerna på torget stor roll för ljudmiljön, vilket kan ses då ljudnivåerna innanför och utanför torget på samma avstånd från bullerkällan jämförs, se figur 22. En mjukare markyta eller vegetation längs fasaderna mot torget med högre absorption skulle kunna ha en effekt på ljudnivåerna, ytterligare undersökning kring detta krävs.

4.(b) ii.)

Fall 2

Bedöms inte vara aktuellt.

Fall 3

Bedöms inte vara aktuellt.

4.(c) i.)

Fall 2

En trädallé mitt i vägen skulle kunna dämpa ljudnivåerna mot fasaderna mot vägen, framförallt på övre plan.

Fall 3

Även här skulle en trädallé mitt i vägen kunna vara ett alternativ. På torget finns det möjlighet att upprätta vegetation eller skyddade uteplatser som exempelvis en paviljong som kan skydda en del mot ljudet från vägen.

4.(c) ii.)

Fall 2

Bedöms inte vara aktuellt.

Fall 3

Införandet av objekt på torget som uppmanar till aktivitet snarare än rekreation skulle kunna skapa en arkitektonisk miljö som sammankopplas med mer ljud och därmed skulle högre ljudnivåer kunna accepteras.

4.(c) iii.)

Fall 2

Bullerskärmar mellan vägen och husen skulle sänka ljudnivåerna mot husen, framförallt på de lägre planen. Denna åtgärd bedöms inte vara aktuell eftersom riktvärdena underskrids och en sådan åtgärd skulle begränsa rörligheten i gaturummet samt skapa en instängdhet.

Fall 3

Bullerskärmar bedöms inte vara en lämplig åtgärd då torget är ämnat för att vara en öppen och fri del mot trottoaren längs väggkanten.

7 DISKUSSION

I detta avsnitt diskuteras utformningen av den framtagna beskrivningsmallen samt dess teoretiska implementering på fallstudien. Fördelar och svårigheter av implementeringen i allmänhet diskuteras också.

7.1 MODELLERINGSRESULTATEN

I detta avsnitt diskuteras resultaten från modelleringarna i *Olive Tree Lab*. Samtliga modelleringar gav ljudnivåerna över området och ljudnivåer vid olika frekvenser vid valda positioner (mottagarna). Detta gör att endast ett fåtal punkter i beskrivningsmallen kan besvaras endast utifrån detta och att en okulärbesiktning med mätning och/eller en utveckling av modelleringarna krävs för att ljudmiljön ska kunna beskrivas med den nya ljudanalysmetoden.

7.1.1 Fall 1

Ljudnivåerna som beräknades och redovisas i figur 13 visar att ljudnivåerna avtar med avståndet från källan enligt ekvation (14) som talar om ljudets spridning från en linjekälla som avtar med 6 dB per avståndsdubbling. Även marken, luften och ytorna har en absorption och impedans som tas med i beräkningen vilket gör att ljudet avtar något mer. Dessa resonansområden gäller för samtliga fall. Spridningen av ljudet når in mellan husen för att sedan utvidgas igen och en ljudskugga uppstår bakom huset vilket tyder på att det fungerar som bullerskydd. Ljudnivåerna vid samtliga mottagare är som högst vid 50 Hz, se figur 14, vilket tyder på att trafikljud bidrar med högst ljudnivåer vid låga frekvenser. Vid 5 kHz är ljudnivåerna vid samtliga mottagare på sidan mot vägen under 50 dBA och under 30 dBA för samtliga mottagare på den skyddade sidan. Vid resonansfrekvensen på 2 kHz (kring den frekvensen människor uppfattar bäst) är ljudnivåerna vid mottagarna på baksidan kring 45 dBA och på framsidan kring 63 dBA, vilket är ljudnivåer som klarar riktvärdena respektive precis överskrider dem. Det ska dock poängteras att detta hade varit av större vikt om förhållandet mellan frekvenser och ljudnivåerna var omvänt och de höga ljudnivåerna låg vid höga frekvenser. I det fallet hade låga ljudnivåer vid resonansfrekvensen antytt att de höga dBA-värdena indikerar att ljudet är högt vid de mindre störande höga frekvenserna som enklare maskeras eller dämpas. I figur 15 illustreras hur ljud från två olika punktkällor skulle spridas över området. Själva ljudnivåerna från punktkällorna är inte relevanta eftersom ljudkällan motsvarar trafikljud, vilket inte är ämnat att placeras i dessa positioner. Spridningen indikerar att en ljudkälla som placeras mellan husens kortsidor ger en effekt på ljudmiljön både i gaturummet och bakom huset, vilket då kan motivera en placering av maskerande ljud där snarare än mitt på långsidan mot vägen. En placering av en maskerande ljudkälla på långsidan på baksidan av huset anses inte vara relevant då ljudnivåerna från trafiken redan är så pass låga där.

7.1.2 Fall 2

Ljudnivåerna som beräknades och redovisas i figur 18 visar att ljudnivåerna avtar med avståndet från källan. Spridningen av ljudet når in mellan husen för att sedan utvidgas igen och en ljudskugga uppstår bakom huset vilket tyder på att det fungerar som bullerskydd. Ljudnivåerna är något högre på den ena sidan vilket talar för att det

stängda gaturummet bidrar med fler reflektioner. Att de enbart är ena sidan beror troligen på att *Olive Tree Lab* använder sig av stokastiska variabler som atmosfärisk turbulens. När det kommer till analysen av ljudnivåerna vid olika frekvenser vid mottagarna, se figur 19, gäller samma resonemang som för fall 1. För spridningen från punktkällorna gäller också samma samband, även om spridningen från båda blir något större i gaturummet, vilket troligen beror på ökade antal reflektioner, se figur 16 och 17.

7.1.3 Fall 3

Ljudnivåerna som beräknades och redovisas i figur 22 visar att ljudnivåerna även här avtar med avståndet från källan. Det som är intressant att analysera är skillnaden mellan ljudnivåerna utanför torget och innanför torget på samma avstånd från bullerkällan där en förskjutning av avtagandet av ljudnivåerna kan ses. Detta beror på ökade antal reflektioner på torget vilket kan ses i figur 21. Samtliga mottagare följer samma mönster som i tidigare fall med högre ljudnivåer vid lägre frekvenser. I detta fallet ligger alla mottagare oskyddat, vilket syns då ljudnivåerna ligger högre för de som låg skyddade i fall 1 och 2, se figur 23.

7.1.4 Osäkerheter i modellen

Det finns ett antal osäkerheter i modelleringsresultaten. Generellt sätt ökar säkerheten med en ökande ordning på diffraktionerna och reflektionerna, vilket framkom i avsnitt 4.3.2. I de modelleringar som utfördes valdes reflektionsordning 3 och diffraktionsordning 1, vilket kan ses i figur B.7. Detta är relativt låga ordningar vilket leder till att modellen är en förenklad bild av hur det skulle bli i verkligheten. Andra parametrar som bidrar till osäkerheter är *Olive Tree Labs* förinställda inställningar för ljudkällor, absorption och impedans, vilket presenteras i Bilaga B samt den indata som valdes, se avsnitt 5.3. Transparensen för programmets inbyggda algoritmer och beräkningsmetoder var låg vilket gör bedömningen av dessa svår. Den slutgiltiga värderingen av säkerheten i modellen blir ändå god eftersom programmet har ett gott rykte. Det är dock viktigt att vara medveten om den indata som valts för att tolka resultaten. I denna studie användes modelleringarna för att undersöka trender och samband och för att illustrera ljudutbredning i urbana miljöer varvid säkerheten för de exakta ljudnivåerna inte var avgörande.

7.2 DISKUSSION OM UTFORMNINGEN AV BESKRIVNINGSMALLEN

Den teoretiska implementeringen av beskrivningsmallen utifrån de utförda modelleringarna samt motivering till utformningen av mallen diskuteras punkt för punkt nedan:

1.(a) i.) Vilka ljudnivåer som återfinns på området är lätt att både mäta och modellera. Komplikationer kan uppstå då inte alla ljudkällor tas med i beräkningen vid en modellering och därmed fel/onödiga åtgärder föreslås. Detta kan exempelvis vara fallet då en bullerkälla befinner sig på långt avstånd men med öppen mark/vatten mellan sig och platsen. Inverkan från denna kan då vara minst lika stor som den bullerkälla som ligger nära och som beräkningar utförs på.

1.(a) ii.) Utvärdering mot riktvärden utförs idag på ett standardiserat vis och kan utföras på samma sätt även i den nya metoden.

1.(a) iii.) Dygnsvariationer av ljudnivåerna är relativt enkla att beräkna men det som kan diskuteras är hur dessa värderas. Idag används vanligtvis dygnsekvivalenta A-vägda ljudnivåer i värderingen. Att använda sig av exempelvis L_{DEN} för att vikta upp ljudnivåerna på natten skulle kunna vara lämpligt vid bostadshus men inte relevant vid kontorsbyggnader.

1.(b) Idag används den A-vägda ljudnivån vanligtvis vid bedömning av ljudnivåer utomhus. Eftersom oönskade ljud ofta har en hög energi vid låga frekvenser borde en diskussion föras kring att även undersöka på de C-vägda ljudnivåerna som tar bättre hänsyn till dessa frekvenser. Detta också dels eftersom låga frekvenser färdas längre sträckor på grund av längre våglängd och därmed mindre absorption och reflektion och dels att låga frekvenser maskeras sämre.

1.(c+d) Vilken typ av ljud som återfinns är avgörande för upplevelsen av ljudkvaliteten. Inverkan från samtliga ljudkällor, inte bara från bullerkällorna, är nödvändigt att ta hänsyn till för att dels kunna bestämma de totala ljudnivåerna och dels för att bestämma vilka ljud som faktiskt dominerar ljudbilden.

1.(e) De visuella aspekterna är något som idag inte beaktas vid ljudanalyser i MKB:er. Gidlöf-Gunnarsson, Ögren och Öhrström (2007) och Persson, Smith och Ögren (2017) har visat att det finns samband mellan hur omgivningen ser ut och vad vilka ljud som förväntas förekomma och därmed i högre utsträckning accepteras. Mer forskning kring detta krävs för att en tydlig metodik för att bedöma detta ska kunna utvecklas.

1.(f) Platsens syfte och användning är nära kopplat till vilka typer av ljud och vilka ljudnivåer som upplevs som störande eller givande. Olika bedömningar bör därför ske med avseende på detta, exempelvis kan högre ljudnivåer accepteras på platser som är avsedda för mer aktivt umgänge som genererar ljud i sig än för platser avsedda för vila eller fokus såsom vissa parker och innergårdar.

2. Samtliga motiveringar ovan gäller även för punkt 2. Skillnaden blir dock att mätningar och okulärbesiktning inte kan ge hela bilden av ett område som ännu inte är utformat. Här behöver detta kombineras med beräkningar och bedömningar av hur

området kommer att förändras ur ett akustiskt och arkitektoniskt perspektiv. Den framtagna beskrivningsmallen ställer därmed högre krav på dessa uppgifter hos utredarna.

3.(a) Idag prioriteras att anlägga uteplatser i skyddade lägen från bullerkällor, exempelvis bakom hus. Detta är en bra metod men behöver kompletteras med att inkludera positiva ljud, det vill säga att placera dessa platser nära ljud som förhöjer ljudmiljön utifrån platsens syfte, exempelvis vegetation eller vattendrag. Detta skulle kunna skapa möjligheter för nya typer av utformningar av urbana miljöer.

3.(b) Se punkt 1.(e).

3.(c) Valet av plats görs utifrån en mängd parametrar och att enbart ljudmiljön skulle påverka detta i ett sent skede är osannolikt. Däremot borde en diskussion finnas kring att införa analysen av ljudmiljön i ett tidigare skede i anläggningsprojekt för att kunna skapa ekonomiskt mer hållbara lösningar, se figur 1.

4.(a) i.) Maskering av ljud används framförallt i inomhusmiljöer men det finns en underliggande potential i att använda det i högre uträkning även i utomhusmiljöer. Att införa den aspekten redan i planeringsfasen i ett anläggningsprojekt och att även ta hänsyn till att redan befintliga ljudkällor kan fungera som maskerande av buller skulle skapa nya möjligheter i utformningen av hållbara stadsmiljöer. Att utnyttja redan befintliga ljudkällor istället för att upprätta bullerskydd skulle kunna spara pengar och förbättra estetiken i projekt. Ett exempel på detta är i studien av Berglund, Nilsson och Axelsson (2007) som visade att nyttjande av en befintlig fontän förbättrade upplevelsen av trafikljud samtidigt som trafikljudet maskerade en del av fontänljudet vilket även förbättrade upplevelsen av det ljudet.

4.(a) ii.) Se punkt 1.(e).

4.(a) iii.) I denna studie har ingen djupgående analys på olika typer av maskering och dess potential gjorts. Däremot har en del generella samband kartlagts (Gelfand (2010)) som, tillsammans med resultat från tidigare forskning (exempelvis Dyrssen m.fl. (2014) och Berglund, Nilsson och Axelsson (2007)), har visat att det finns goda möjligheter att använda sig av maskering för att minska inverkan från oönskade ljud. Problematiken ligger delvis i att buller ofta är lågfrekvent vilket är svårare att maskera än högfrekventa ljud.

4.(a) iv.) En sammanvägning av punkt 4.(a) ii.) och 4.(a) iii.) bör göras för att den lämpligaste typen av maskering ska väljas. Även ekonomiska och ekologiska aspekter spelar in som till exempel att upprättningen av den nya ljudkällan inte får störa omgivande djur på ett tydligt sätt, exempelvis när en ljudinstallation av fågelkvitter stör den naturliga kommunikationen för omgivande fåglar.

4.(b) i.+ii.) Valen av material görs med större noggrannhet med avseende på akustik i inomhusmiljöer. I utomhusmiljöer är det många andra faktorer som spelar in vilket leder till att akustiken är en parameter som inte beaktas i någon större uträkning. Det är dock en aspekt att ta hänsyn till, särskilt för miljöer som är särskilt utsatta för buller genom mycket reflektioner och där människor vistas, som torget i fall 3 där införande av mjukare ytor/underlag skulle kunna ha en effekt. Se punkt 1.(e). för hur estetiken hos materialvalen och dess inverkan på den estetiska upplevelsen samt hur denna kopplas till upplevelsen av ljudmiljön.

4.(c) i.) Införande av nya objekt som vegetation eller multifunktionella ytor i form av avskärmande uteplatser eller anslagstavlor kan vara ett alternativ då utrymme för dessa finns. Dessa objekt behöver vara i samklang med platsens övriga syfte och användningsområden. Den ljuddämpande effekten av växtlighet utan blad behöver undersökas vidare för att inte effekten ska bli årstidsbaserad. Forskning som presenterats i rapporten har visat att rent bullerdämpande åtgärder i vissa fall kan öka den relativa inblandningen av lågfrekventa ljud som en följd av att de högfrekventa i större grad reflekteras och absorberas. Detta kan i vissa fall försämra ljudmiljön trots att ljudnivåerna sjunker.

4.(c) ii.) Se punkt 1.(e).

4.(c) iii.) Denna typer av lösningar används idag i form av exempelvis bullerskärmar men är ofta kostsam och inte särskilt estetiskt tilltalande. Berglund, Nilsson och Axelsson (2007) menar exempelvis att rent bullerdämpande åtgärder i vissa fall kan öka den relativa inblandningen av lågfrekventa ljud som en följd av att de högfrekventa i större grad reflekteras och absorberas. Detta kan i vissa fall försämra ljudmiljön trots att ljudnivåerna sjunker. På grund av detta bedöms denna typer av lösningar vara ett alternativ som används då inte övriga lösningar bedöms vara otillräckliga.

7.3 FÖRSLAG TILL FORTSATTA STUDIER

Den framtagna beskrivningsmallen behöver utvärderas mot olika typer av verkliga projekt för att kunna utvecklas och fastställas. Genom att pröva metoden mot projekt med olika utformning såsom bostäder, kontor och parker i olika former kan styrkorna och svagheten med metoden analyseras på ett djupare sätt.

Ett tydligt och standardiserat upplägg för hur okulärbesiktningen ska utföras bör tas fram då den är en väsentlig del i den nya metoden. Detta bör göras för att skapa en tydlighet och en enhetlighet i utformningen av ljudanalyser.

I den forskning som beskrivningsmallen grundar sig på, det vill säga Göteborgs stad (2014), Persson, Smith och Ögren (2017), Gelfand (2010), Dyrssen m.fl. (2014), Hellström (2008), Nilsson (2007), Berglund, Nilsson och Axelsson (2007), Gidlöf-Gunnarsson, Ögren och Öhrström (2007) och Levenhall (2004) framkom att det finns ett samband mellan den visuella arkitekturen och upplevelsen av ljudmiljön. Denna samverkan behöver utredas vidare för att de delarna i beskrivningsmallen som behandlar dessa områden ska kunna utvecklas.

En ny metodik för hur modelleringar av urbana miljöer ska utföras bör utvecklas för att kunna utvärdera fler parametrar i det stadiet av utredningen. Flera olika typer av ljudkällor som värderas olika, maskering och en tydlig frekvensanalys är några av de saker som skulle kunna införas. Modelleringen kan sedan på ett bättre sätt jämföras med okulärbesiktning och mätningar på plats.

Utredningar kring vilka typer av maskeringsmetoder som är lämpliga i olika miljöer behöver utföras för att metoden ska kunna rekommenderas som en lämplig åtgärd. Detta bör göras ur flera olika aspekter såsom vilka ljudnivåer och vilka typer av ljud som sänds ut, hur människor men även natur reagerar på dessa ljud, hur stora kostnader specifika åtgärder kräver samt vilka åtgärder som är lämpliga i olika miljöer baserat på deras fysiska och estetiska utformning.

8 SLUTSATSER

Följande slutsatser kan dras från de erhållna resultaten som svar på studiens frågeställningar:

- Ett antal forskningsrapporter kring urbana ljudmiljöer visar att det finns ett behov av att utveckla dagens metod bestående av endast bullerberäkningar eftersom att endast utgå från ljudnivåer från trafik anses otillräckligt för att kunna bedöma ljudkvaliteten på ett område.
- En ljudanalysmetod där okulärbesiktning och mätningar ingår som en obligatorisk del är viktig för att ljudmiljön ska kunna analyseras och planeras på ett hållbart sätt.
- Ett bredare synsätt på ljudmiljön kan förändra utformningen av hållbara stadsmiljöer genom införandet av nya lösningar som grundar sig på akustisk design.
- Ett samarbete mellan arkitekter och akustiker krävs för att kunna skapa miljöer där visuella och akustiska parametrar samverkar och skapar en god bebyggd miljö. Genom detta kan den nya metoden utgöra en del av MKB:er.

REFERENSER

Allmänna referenser

- Akustikmiljö, (2013). *Introduktion till Akustik*. Brüel och Kjær. URL: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwiUx4XL8-7bAhUjQpoKHZ10A68QFggoMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.miljosamverkanstockholm.se%2Fgetfile.ashx%3Fcid%3D331411%26cc%3D3%26refid%3D10&usg=A0vVaw3kfIoi1i0ky9CgDPCmJ9QM>.
- Axelsson, Ö., J. Kang och F Aletta (2016). *Soundscape descriptors and a conceptual framework for developing predictive soundscape models*. Landscape och Urban Planning, ISSN 0169-2046, E-ISSN 1872-6062, Vol. 149, s. 65-74. URL: https://www.researchgate.net/publication/296192252_Soundscape_descriptors_and_a_conceptual_framework_for_developing_predictive_soundscape_models.
- Berglund, B., M. Nilsson och Ö. Axelsson (2007). *Soundscape psychophysics in place*. Proc. Inter-Noise 2007, s. IN07-114-. URL: https://www.researchgate.net/publication/290028059_Soundscape_psychophysics_in_place.
- Davis, D. och C. Davis (1987). *Sound System Engineering, second edition*. Howard W. Sams och Co. A Division of Macmillan, Inc. 4300 West 62nd Street, Indianapolis, IN 46268 USA.
- Dyrssen, C., A. Hultqvist, S. Mossenmark och P. Sjösten (2014). *Ljud och andra rum*. Bo Ejeby Förlag.
- Gelfand, S. (2010). *Hearing: An Introduction to Psychological and Physiological Acoustics, Fourth Edition (5th Edition)*. New York, Marcel Dekker. URL: <http://zhenilo.narod.ru/main/students/Gelfand.pdf>.
- Gidlöf-Gunnarsson, A., M. Ögren och E. Öhrström (2007). *Noise annoyance and restoration in different courtyard settings: Laboratory experiments on audio-visual interactions*. Inter Noise 2007, Istanbul 28-31 August. Paper IN07117. (Pdf). URL: <https://www.gu.se/english/research/publication/?publicationId=95928>.
- Glebe, D., K. Larsson och K. Persson (2016). *Comparisons of Various Approaches to Low Frequency In-Situ Measurements and Corresponding Models*. 45th International Congress, Exposition on Noise Control Engineering: Towards a Quieter Future, INTER-NOISE 2016 In Proceedings of the INTER-NOISE 2016 - 45th International Congress och Exposition on Noise Control Engineering: Towards a Quieter Future p.1154-1161.
- Göteborgs Stad, (2014). *Ljudmiljön i stadens offentliga rum*. Göteborgs Stad. URL: https://goteborg.se/wps/wcm/connect/146cc654-17b9-43d7-b7ed-6a0b965134d1/Rapport_ljudmilj%C3%B6n+i+stadens+offentliga+rum_G%C3%B6teborgs+stad_2014.pdf?MOD=AJPERES.
- Hellström, B. (2008). *Acoustic design artifacts and methods for urban soundscapes: a case study on the qualitative dimensions of sounds*. 15th International

- Congress on Sound och Vibration. URL: https://www.researchgate.net/publication/228359813_Acoustic_design_artifacts_and_methods_for_urban_soundscapes.
- Hornikx, M (2009). *Numerical modelling of sound propagation to closed urban courtyards*. Department of Civil och Environmental Engineering Division of Applied Acoustics, Vibroacoustic Group CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY Göteborg, Sweden. URL: https://www.researchgate.net/profile/Maarten_Hornikx/publication/215514803_Numerical_modelling_of_sound_propagation_to_closed_urban_courtyards/links/09e4151193f3ba5ae6000000/Numerical-modelling-of-sound-propagation-to-closed-urban-courtyards.pdf.
- Kågström, M. (2009). *Hur ska man hantera det här med hälsa? – en kunskapsöversikt om hälsans roll i konsekvensbeskrivning och transportplanering*. SLU, institutionen för stad och land, MKB centrum. URL: https://pub.epsilon.slu.se/9438/1/kagstrom_m_130211.pdf.
- Larsson, C. (u.å.). *BULLERUTBREDNING*. Uppsala universitet.
- Leventhall, HG. (2004). *Low frequency noise and annoyance (6th Edition)*, 59-72. Noise och Helath - A Biomonthly Inter-disiplinary International Journal. URL: <http://www.noiseandhealth.org/article.asp?issn=1463-1741;year=2004;volume=6;issue=23;spage=59;epage=72;aulast=Leventhall>.
- Al-Musawi, T (2012). *ACOUSTICAL DESIGN OF WATER FEATURES AND THEIR USE FOR ROAD TRAFFIC NOISE MASKING*. Heriot-Watt University, School of the Built Environment. URL: <http://www.ros.hw.ac.uk/handle/10399/2603>.
- Nilsson, M. (2007). *Soundscape quality in urban open spaces*. Proc. Inter Noise 2007, s. Paper IN07-115. URL: <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A186292&dswid=-1349>.
- Paulsson, R. (2010). *MEKANIK*. Pearson Education Limited, pp. 252-258. ISBN 978 1 84959 440 0.
- PEAB, (2008). *Miljökonsekvensbeskrivning Tillhörande detaljplanen för del av kvarteret Kapplöpningen mm Ulriksdal, Solna stad*. PEAB.
- Siltanen, S., T. Lokki och L. Savioja (2010). *Rays or Waves? Understanding the Strengths and Weaknesses of Computational Room Acoustics Modeling Techniques*. Proceedings of the International Symposium on Room Acoustics. URL: https://www.acoustics.asn.au/conference_proceedings/ICA2010/cdrom-ISRA2010/Papers/05a.pdf.

Hemsidereferenser

- Attefall, S. och K. Rempler (2014). *Samordnad prövning av buller enligt miljöbalken och plan- och bygglagen*. URL: <http://www.regeringen.se/contentassets/08ce865f20fb481ea575aee8913568bc/samordnad-provning-av-buller-enligt-miljobalken-och-plan--och-bygglagen> (hämtad 2018).

- Boverket, (2006). *Miljöbedömningar för planer enligt plan- och bygglagen – en vägledning*. URL: http://www.boverket.se/globalassets/publikationer/dokument/2006/miljobedomningar_for_planer_enligt_plan--och_bygglagen.pdf (hämtad 2018).
- (2014). *Planhandlingar för detaljplan*. URL: <http://www.boverket.se/sv/PBL-kunskapsbanken/planering/detaljplan/handlingar/> (hämtad 2018).
- (2015a). *Industri- och annat verksamhetsbullen vid planläggning och bygglovsprövning av bostäder – en vägledning*. URL: <http://www.boverket.se/globalassets/publikationer/dokument/2015/industri-och-annat-verksamhetsbullen-vid-planlaggning-och-bygglovsprovning-av-bostader2.pdf> (hämtad 2018).
- (2015b). *Riktvärden för buller utomhus*, URL: <http://www.boverket.se/sv/pbl-kunskapsbanken/allmant-om-pbl/teman/industribuller/riktvarden-for-buller-utomhus/> (hämtad 2018).
- (2017). *Regler om buller*. URL: <http://www.boverket.se/sv/samhallsplanering/sa-planeras-sverige/halsa-och-klimat-i-samhallsplaneringen/buller-beror-manga/buller-i-planeringen1/> (hämtad 2018).
- Byggipedia, (2018). *Ljud i byggnader*. URL: <https://byggipedia.se/ljud/> (hämtad 2018).
- Economou, P. och P. Charalampous (2014). *Accuracy of wave based calculation methods compared to ISO 9613-2*. URL: https://www.researchgate.net/profile/Panagiotis_Charalampous2/publication/291345801_Accuracy_of_wave_based_calculation_methods_compared_to_ISO_9613-2/links/56a130c208ae2afab8828fd2/Accuracy-of-wave-based-calculation-methods-compared-to-ISO-9613-2.pdf (hämtad 2018).
- Economou, P. och P. Charalampous (2014). *From Theory to Practice: Advanced calculation methods applied in OTL – Terrain*. URL: https://www.mediterraneanacoustics.com/uploads/7/3/3/2/73322645/from_theory_to_practice_advanced_calculation_methods_applied_in_otl_%E2%80%93_terrain_economou_charalampous.pdf (hämtad 2018).
- European Environment Agency, (u.å.). *Noise*. URL: <https://www.eea.europa.eu/themes/human/> (hämtad 2018).
- Forssén, J. (2007). *Meteorologi i stadsmiljö*. URL: http://www.ljudlandskap.acoustics.nu/ljudbok.php?del=nyfikna&kapitel=kapitel_6&rubrik=rubrik3_4 (hämtad 2018).
- Fridrich, R. (1990). *Estimation of Loudness by Zwicker's Method*. URL: <http://fridrichacoustical.com/media/5aab44bbc747b14ffff963cffffe417.pdf> (hämtad 2018).
- Garca, B., A. Mederez, C. Torres och D. Ledezma-Ramirez (2016). *Fountains as sound elements in the design of urban public walks soundscapes*. URL: <http://www.ica2016.org.ar/ica2016proceedings/ica2016/ICA2016-0075.pdf> (hämtad 2018).
- GIK Acoustics, (2009). *How Diffusion (audio) Works*. URL: <http://www.gikacoustics.com/how-diffusion-works/> (hämtad 2018).

- Gustafson, A. (2017). *Ljudklasser*. URL: <http://www.ljudlandskap.acoustics.nu/ljudbok.php> (hämtad 2018).
- ISO.org, (1996). *ISO 9613-2:1996*. URL: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9613:-2:ed-1:v1:en> (hämtad 2018).
- Iterio AB, (2014). *Miljökonsekvensbeskrivning (MKB) tillhörande detaljplan för del av Arenastaden inom stadsdelarna Järva och Råsunda, Solna stad*. URL: https://www.solna.se/Global/Utbildning%20och%20test/Arenastaden/MKB%20f%C3%B6r%20del%20av%20J%C3%A4rva%20_17%20mfl_granskningshandling_slutleverans%2020140219.pdf (hämtad 2018).
- Karlsson, H-O. (2000). *Lågfrekvent buller i boendemiljön*. URL: http://www.boverket.se/globalassets/publikationer/dokument/2000/lagfrekvent_buller_i_boendemiljon.pdf (hämtad 2018).
- Karolinska Institutet, (2017). *Buller*. URL: <http://ki.se/forskning/oonskat-ljud-negativt-for-halsan> (hämtad 2018).
- Keller, J. (1962). *Geometrical Theory of Diffraction*. URL: <https://www.osapublishing.org/josa/abstract.cfm?uri=josa-52-2-116> (hämtad 2018).
- Kihlman, T., W. Kropp och K. Larsson (2013). *The Importance of Engineering Acoustics*. URL: http://www.ljudlandskap.acoustics.nu/downloads/ljudbok/specialister/kapitel_3/rubrik1/1Introduction.pdf (hämtad 2018).
- Kropp, W. (2013a). *Absorbers*. URL: http://www.ljudlandskap.acoustics.nu/downloads/ljudbok/specialister/kapitel_3/rubrik9/9absorber.pdf (hämtad 2018).
- (2013b). *Physical phenomena influencing the sound propagation*. URL: http://www.ljudlandskap.acoustics.nu/downloads/ljudbok/specialister/kapitel_3/rubrik6/6Physical_phenomena.pdf (hämtad 2018).
- (2013c). *Statistic description of sound fields in cavities*. URL: http://www.ljudlandskap.acoustics.nu/downloads/ljudbok/specialister/kapitel_3/rubrik8/8Diffuse.pdf (hämtad 2018).
- (2013d). *The Fundamentals of air-borne sound*. URL: http://www.ljudlandskap.acoustics.nu/downloads/ljudbok/specialister/kapitel_3/rubrik2/2air_borne_sound.pdf (hämtad 2018).
- (2013e). *The human ear and its function*. URL: http://www.ljudlandskap.acoustics.nu/downloads/ljudbok/specialister/kapitel_3/rubrik3/3hearing.pdf (hämtad 2018).
- (2013f). *The wave equation for longitudinal waves*. URL: http://www.ljudlandskap.acoustics.nu/downloads/ljudbok/specialister/kapitel_3/rubrik4/longitudinal.pdf (hämtad 2018).
- Kropp, W. och K. Larsson (2013). *TSound propagation from point and line sources*. URL: http://www.ljudlandskap.acoustics.nu/downloads/ljudbok/specialister/kapitel_3/rubrik5/5point.pdf (hämtad 2018).
- Lehmann, E. (u.å.). *Image-source method for room acoustics*. URL: http://www.eric-lehmann.com/ism_bg.html (hämtad 2018).

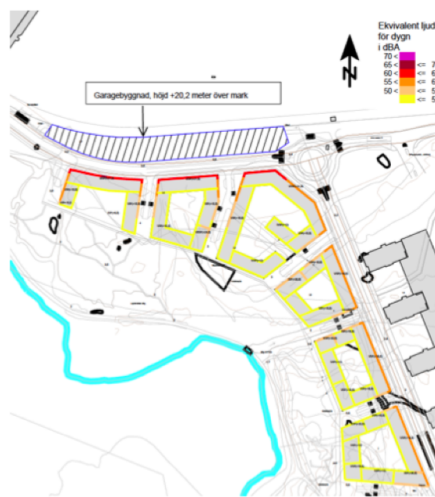
- Löllman, H. och P. Vary (u.å.). *ESTIMATION OF THE REVERBERATION TIME IN NOISY ENVIRONMENTS*. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.565.6625&rep=rep1&type=pdf> (hämtad 2018).
- Miljömål, (2016). *Generationsmålet*, URL: <https://www.miljomal.se/Miljomalen/Generationsmalet/> (hämtad 2018).
- (2017). *Sveriges miljömål*, URL: <https://www.miljomal.se/Miljomalen/> (hämtad 2018).
- Naturvårdsverket, (2017a). *Buller ger ohälsa*. URL: <https://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Manniska/Buller/> (hämtad 2018).
- (2017b). *God bebyggd miljö*, URL: <http://www.naturvardsverket.se/Miljoarbete-i-samhället/Sveriges-miljomal/Miljokvalitetsmalen/God-bebyggd-miljo/> (hämtad 2018).
- (2017c). *Miljökvalitetsnorm för buller*. URL: <http://www.naturvardsverket.se/Stod-i-miljoarbetet/Vagledning/Buller/Miljokvalitetsnorm-for-buller/> (hämtad 2018).
- (2017d). *Vägledning och riktvärden för buller på skolgård från väg- och spårtrafik*. URL: <http://www.naturvardsverket.se/Stod-i-miljoarbetet/Vagledning/Buller/Buller-pa-skolgard/> (hämtad 2018).
- (2017e). *Åtgärdsprogram för omgivningsbuller*. URL: <https://www.naturvardsverket.se/Stod-i-miljoarbetet/Vagledning/Buller/Atgardsprogram-for-omgivningsbuller/> (hämtad 2018).
- NDT Resource Center, (u.å.). *SOUND WAVE INTERFERENCE*. URL: <https://www.nde-ed.org/EducationResources/HighSchool/Sound/interference.htm> (hämtad 2018).
- Persson, K., M. Smith och M. Ögren (2017). *HÄLSOPÅVERKAN AV LÅGFREKVENT BULLER INOMHUS*. URL: https://gupea.ub.gu.se/bitstream/2077/53428/1/gupea_2077_53428_1.pdf (hämtad 2018).
- Riksdagen, (2017). *Förordning (2015:216) om trafikbuller vid bostadsbyggnader*. URL: http://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/forordning-2015216-om-trafikbuller-vid_sfs-2015-216 (hämtad 2018).
- SCB, (2018). *Andra halvåret 2017*. URL: <http://www.scb.se/hitta-statistik/statistik-efter-amne/befolkning/befolkningens-sammansattning/befolkningsstatistik/pong/tabell-och-diagram/kvartals--och-halvarsstatistik--kommun-lan-och-riket/andra-halvaret-2017/> (hämtad 2018).
- Sengpielaudio, (u.å.). *Calculation, Speed of sound in humid air (Relative humidity)*. URL: <http://www.sengpielaudio.com/calculator-airpressure.htm> (hämtad 2018).
- Sjödahl, E. (2011). *Akustisk dimensionering*. URL: http://www.kstr.lth.se/fileadmin/kstr/pdf_files/vbkf01/forelas/F5_2011_Akustisk_dimensionering_Eva_Sjoedahl.pdf (hämtad 2018).
- World Health Organisation, (2009). *NIGHT NOISE GUIDELINES FOR EUROPE*. URL: http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0017/43316/E92845.pdf (hämtad 2018).

BILAGOR

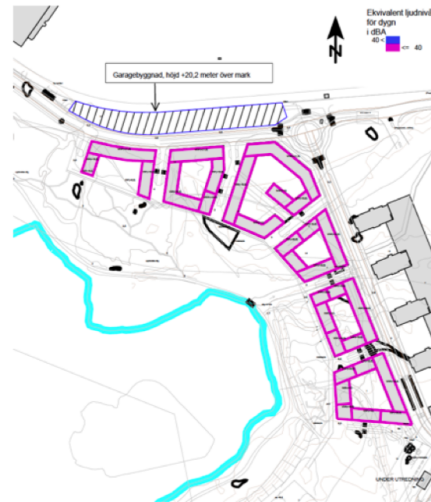
BILAGA A: UTDRAG UR TIDIGARE MKB:ER

Det material som redovisas i denna bilaga är en sammanfattning av den/de akustiska parametrar som beaktas i tillhörande miljökonsekvensbeskrivning från tidigare utredningar. Dessa fungerar som exempel på hur ljudmiljön utreds i anläggningsprojekt.

BILAGA A1: MKB Arenastaden, Järva och Råsunda, Solna stad



Figur 3.6.1 – Figuren visar ekvivalent ljudnivå trafikbuller vid fasader. Källa: ÅF 2014.



Figur 3.6.2 – Illustration över industribullernivåer. Källa ÅF 2014.

Figur A.1: *Ekvivalenta ljudnivåer från väg- och spårtrafik (vänster) och industri (höger) vid fasader (Iterio AB, 2014).*

BILAGA A2: MKB kv. Kapplöpningen mm. Ulriksdal, Solna stad

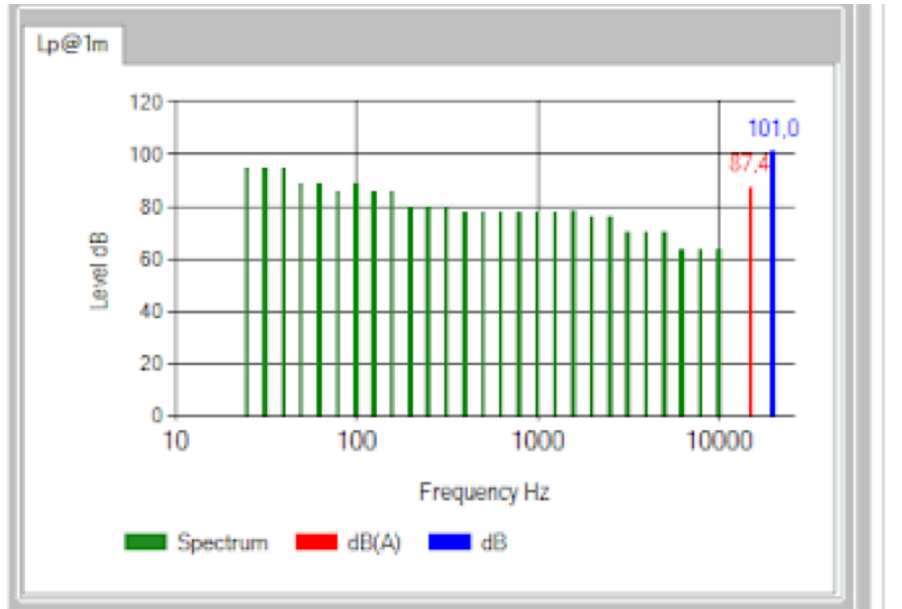


Figur A.2: Ekvivalenta ljudnivåer från väg- och spårtrafik vid fasader (PEAB, 2008).

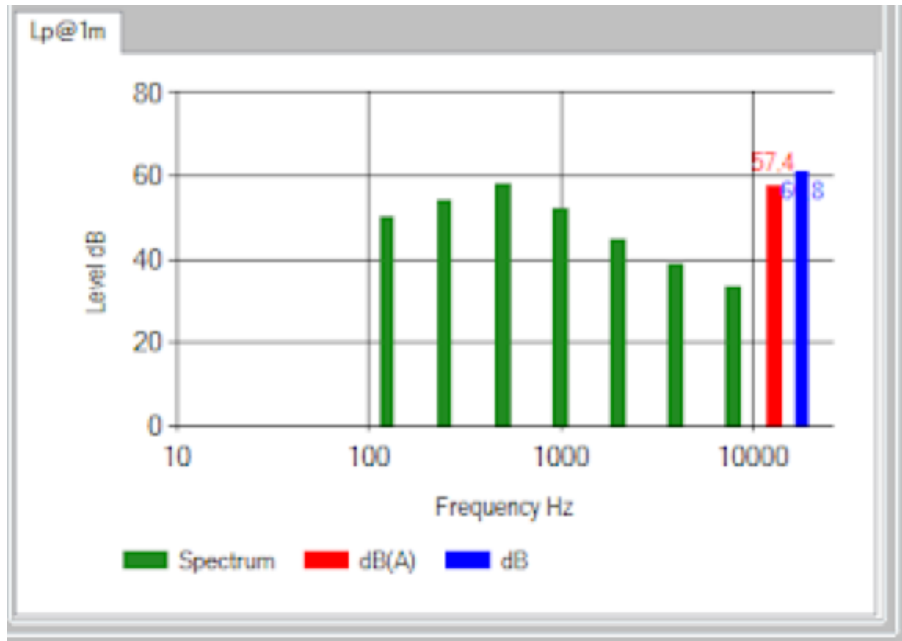
Liknande beräkningar för maximala nivåer samt beräkningar från industribuller redovisas också. Även kommentar kring inomhusnivåer görs där det yttras att byggnaderna kommer att utformas med isolering för att klara ljudkrav C.

BILAGA B: INSTÄLLNINGAR I OLIVE TREE LAB

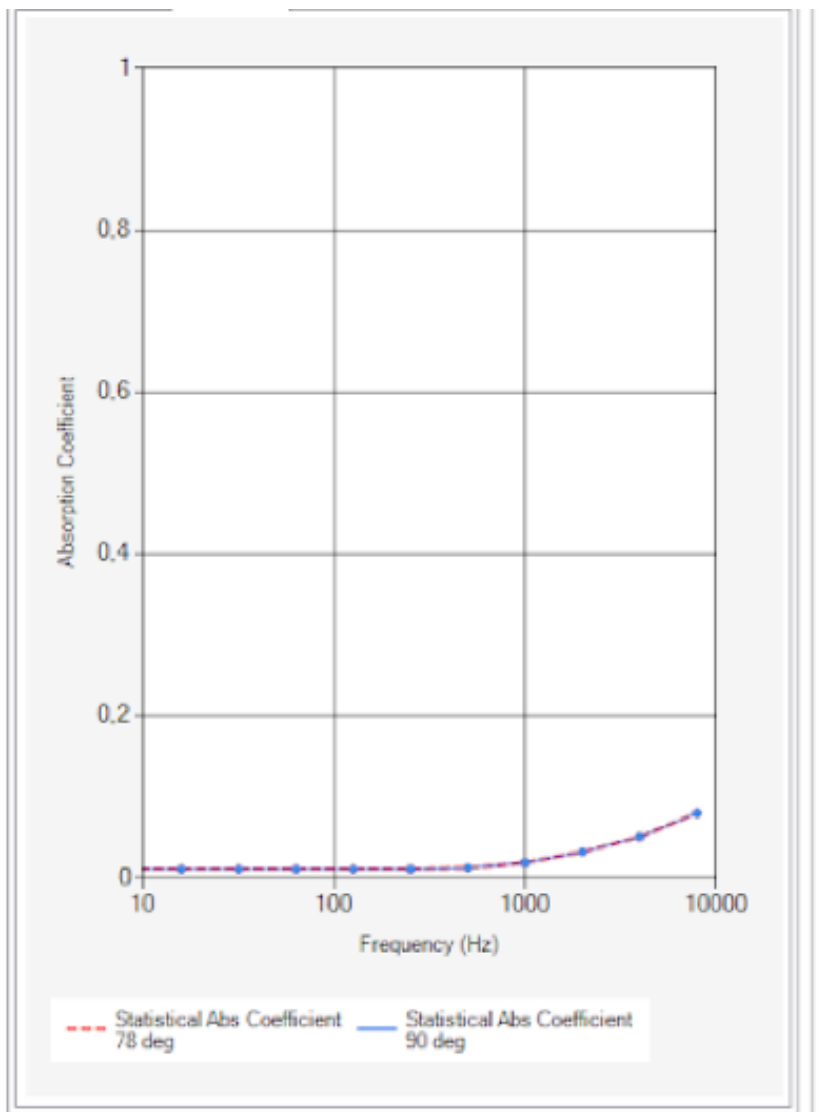
Följande figurer visar de beräkningsinställningar som valdes i *Olive Tree Lab* samt egenskaperna hos de material som valdes i form av absorption och impedans.



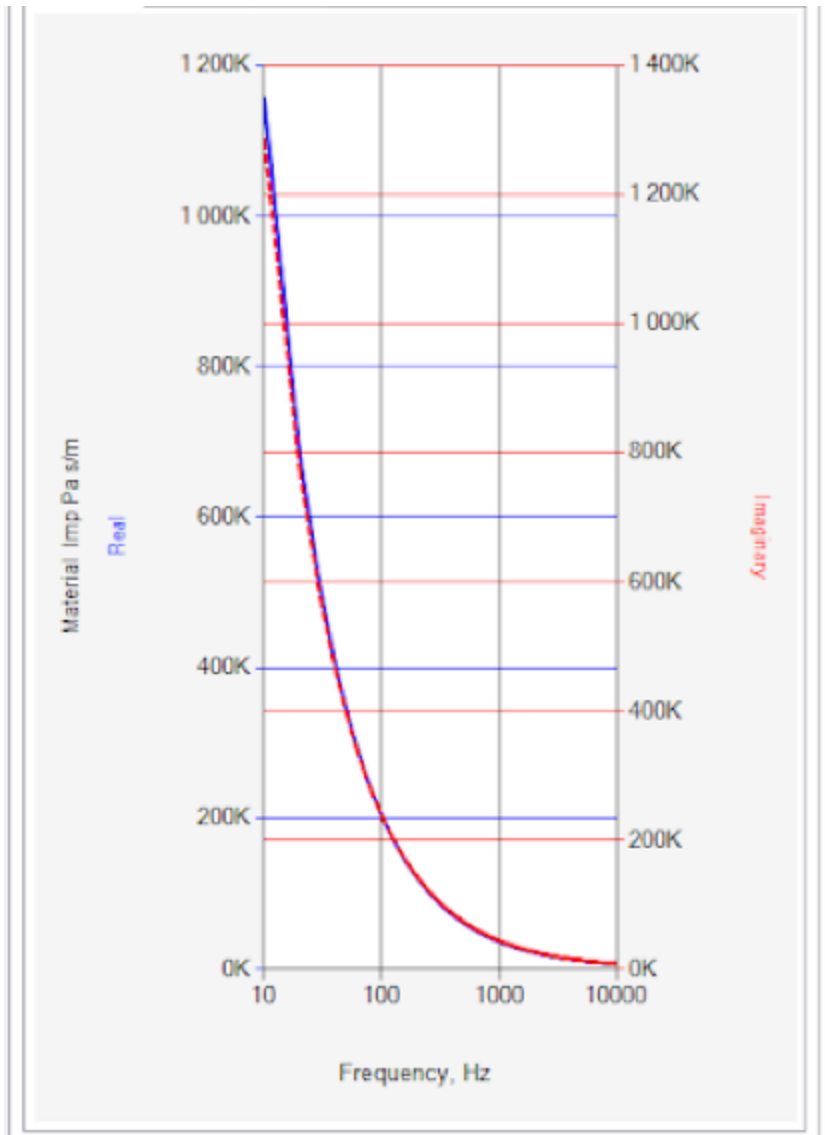
Figur B.1: Den valda ljudkällans (*custom traffic noise*) utsända ljudnivåer vid olika frekvenser samt A-vägd ljudnivå (*Olive Tree Lab*).



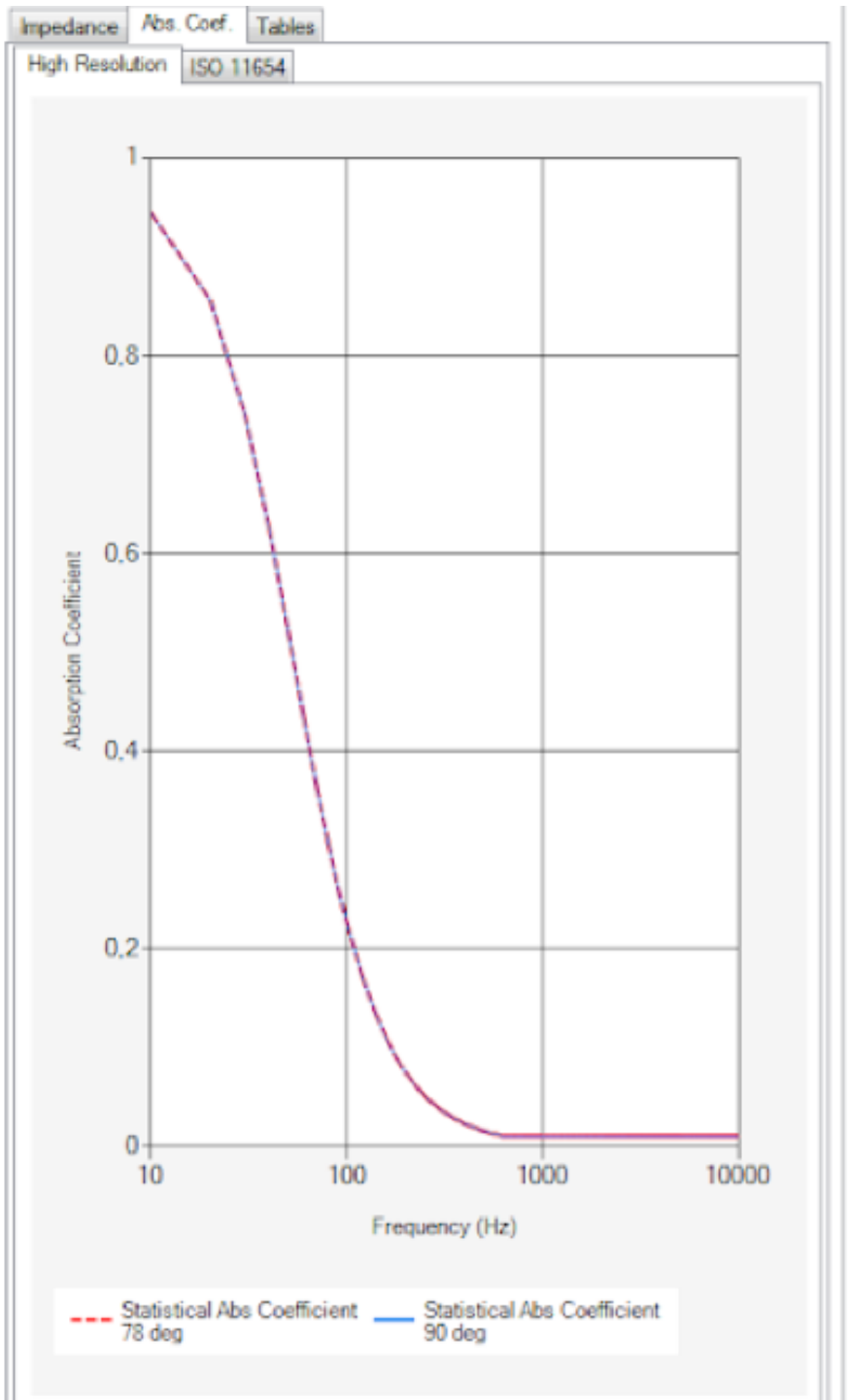
Figur B.2: Ljudkällan som användes som referens (Normal speech) utsända ljudnivåer vid olika frekvenser samt A-vägd ljudnivå (Olive Tree Lab).



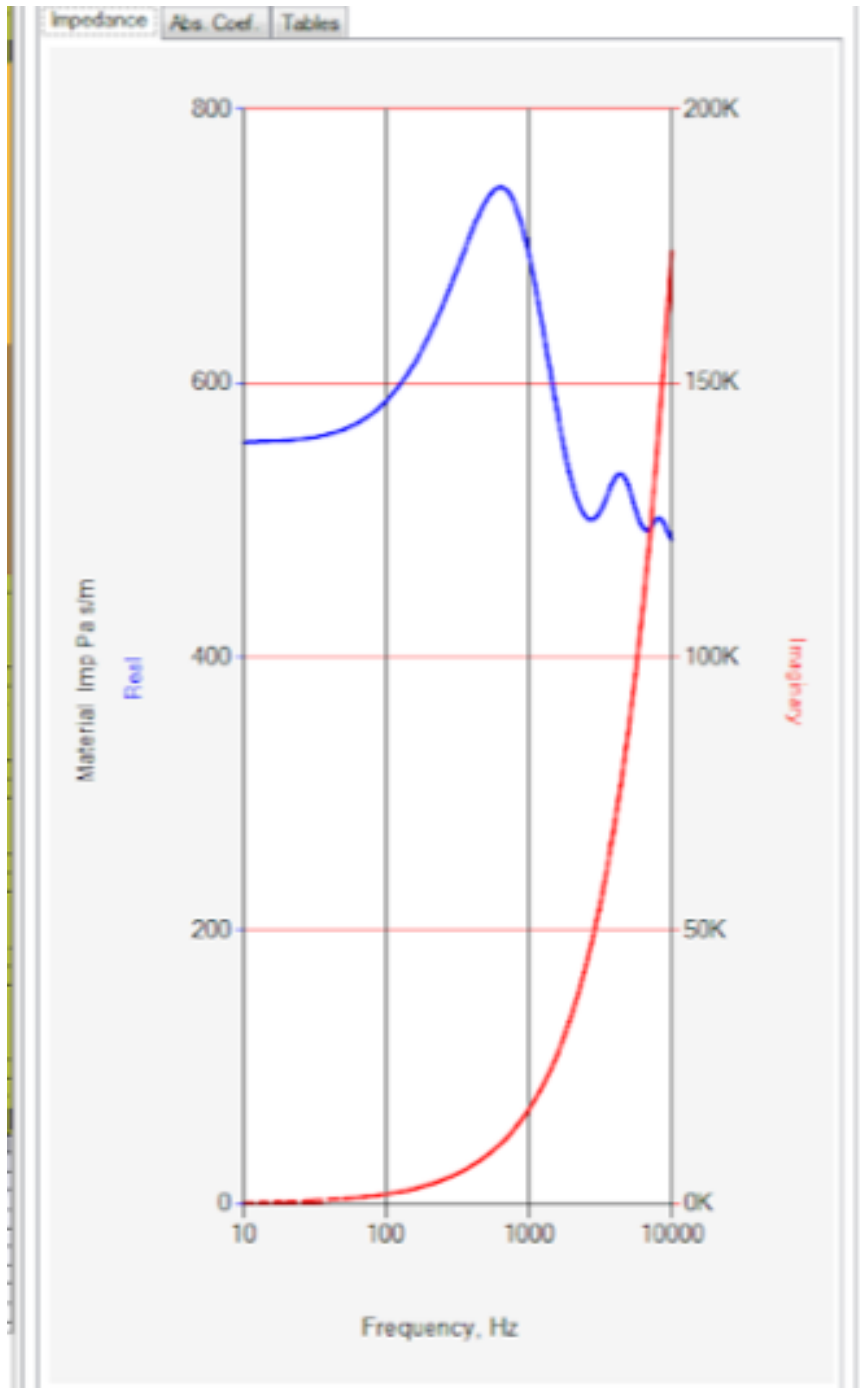
Figur B.3: *Markens absorptionskoefficient vid olika frekvenser i Olive Tree Lab.*



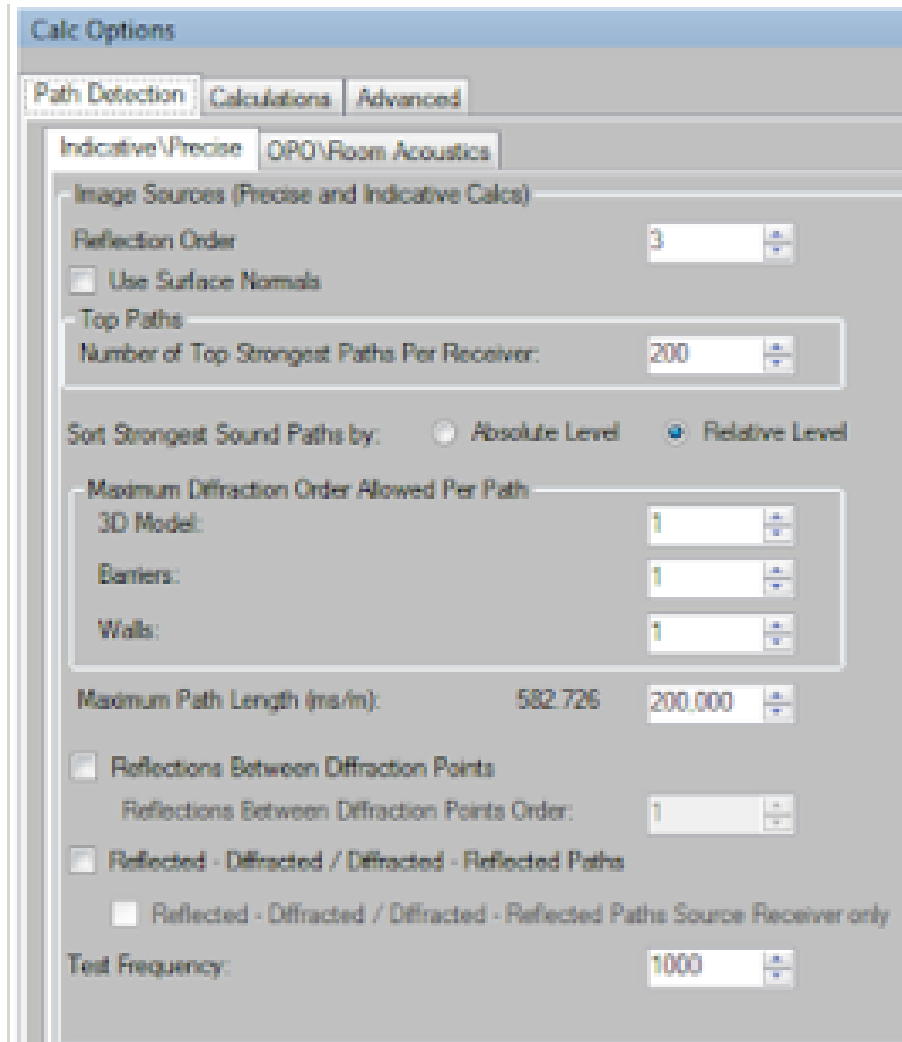
Figur B.4: *Markens impedans vid olika frekvenser i Olive Tree Lab*



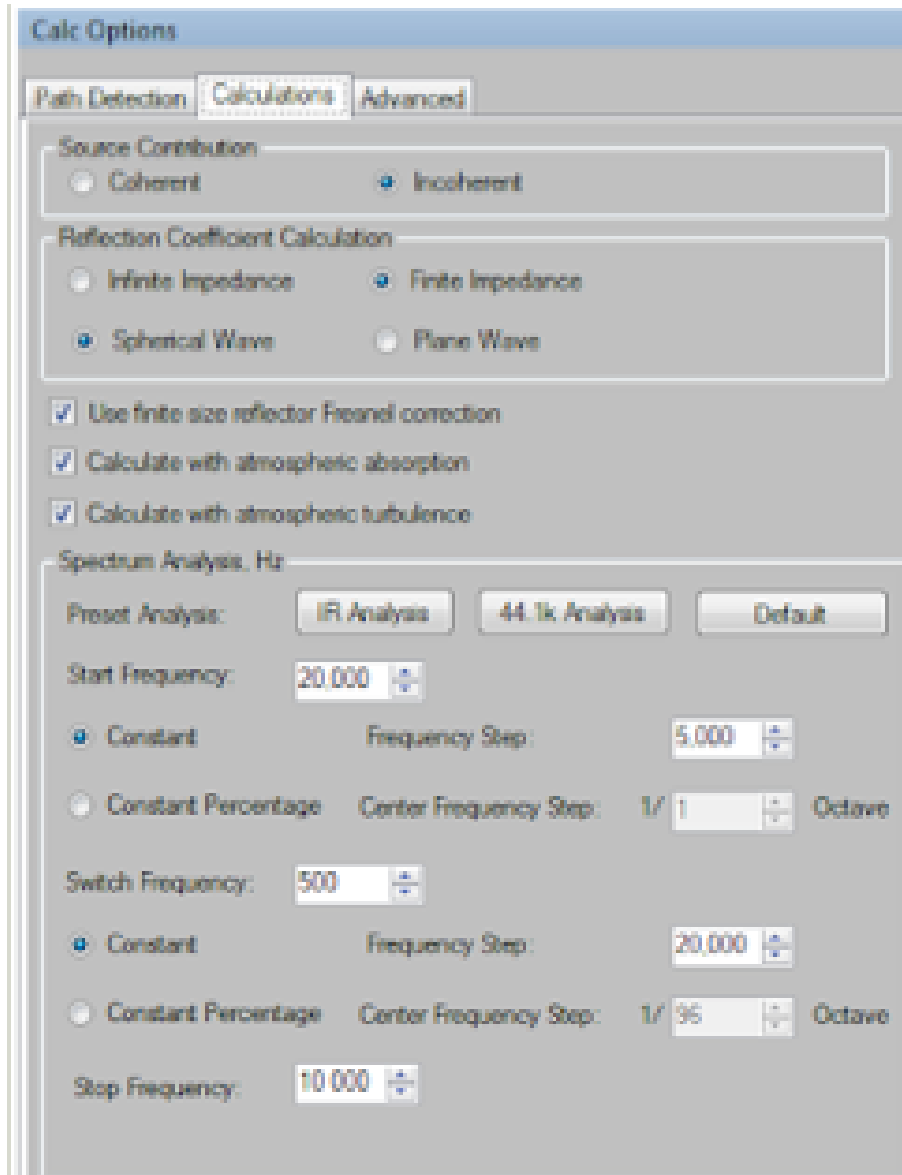
Figur B.5: Husens absorptionskoefficient vid olika frekvenser i Olive Tree Lab.



Figur B.6: *Markens impedans vid olika frekvenser i Olive Tree Lab (den blåa relevant).*



Figur B.7: *Inställningar för ljudvägsdetektion i Olive Tree Lab.*



Figur B.8: *Inställningar för beräkningar i Olive Tree Lab.*