En nyttokostnadsanalys av låga bullerskyddsskärmar i urbana områden

Tillämpning och analys av Trafikverkets nyttokostnadsanalysmodell ASEK

Kandidatarbete inom Samhällsbyggnadsteknik

ANDREAS EKLUND
WILLIAM ELIASSON
JOHANNA JONASSON
TUVE MÖLLER
GUSTAV NILSSON

INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH SAMHÄLLSBYGGNAD
AVDELNINGEN FÖR TEKNISK AKUSTIK

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2022
www.chalmers.se

BACHELOR'S THESIS 2022: ACEX10-22-61

A Cost-benefit Analysis of Low Noise Barriers in Urban Areas

Application and analysis of the Swedish Transport administration's cost-benefit analysis model ASEK

ANDREAS EKLUND
WILLIAM ELIASSON
JOHANNA JONASSON
TUVE MÖLLER
GUSTAV NILSSON

CHALMERS

Institute of Architecture and Civil Engineering
Department of Applied Acoustics at Chalmers
Chalmers University of Technology

Gothenburg, Sweden 2022

En nyttokostnadsanalys av låga bullerskyddsskärmar i urbana områden

Tillämpning och analys av Trafikverkets nyttokostnadsanalysmodell ASEK

ANDREAS EKLUND
WILLIAM ELIASSON
JOHANNA JONASSON
TUVE MÖLLER
GUSTAV NILSSON

© ANDREAS EKLUND, 2022
© WILLIAM ELIASSON, 2022
© JOHANNA JONASSON, 2022
© TUVE MÖLLER, 2022
© GUSTAV NILSSON, 2022

Handledare: Krister Larsson, Avdelningen för teknisk akustik vid Chalmers
Examinator: Jens Forssén, Avdelningen för teknisk akustik vid Chalmers

Kandidatarbete 2022: ACEX10-22-61
Institutionen för Arkitektur och Samhällsbyggnad
Avdelningen för teknisk akustik
Chalmers tekniska högskola
412 96 Göteborg
Telefon +46 31 772 1000

Omslag: Delsjövägen, Göteborg (egen bild)

Göteborg, Sverige 2022

Sammanfattning

Buller är ett omfattande miljöproblem som påverkar människors hälsa negativt. Exempelvis ökar höga ljudnivåer risken för inlärningssvårigheter men även sömnstörningar som kan leda till exempelvis hjärtinfarkt. Totalt dör ungefär 12 000 personer i förtid i Europa varje år på grund av bullerrelaterade hälsoeffekter. I Sverige är trafikbuller den bullertyp som stör flest människor och totalt berörs ungefär 2 miljoner svenskar av buller av höga nivåer. I Sverige finns krav på hur mycket det får bullra vid bostäder. Kraven varierar beroende på bostädernas storlek och ålder, men de generella kraven är mellan 60–65 dB som högsta tillåtna ekvivalent ljudnivå.

Dock finns påvisade effekter av negativ hälsopåverkan även vid lägre nivåer och vissa av dem finns värdesatta i Trafikverkets nyttokostnadsverktyg ASEK. Det finns sätt att sänka ljudnivåerna, bland annat med hjälp av bullerskyddskärmar, som i vissa fall kan reducera ljudnivåerna i vägars omgivning avsevärt. Det finns dock målkonflikter med dessa, exempelvis skymmer det sikten, vilket kan försämra tryggheten samt vara estetiskt oönskat i området. Då kan låga skärmar på runt 1 meter utgöra ett alternativ, dock med försämrad bullerreduktion jämfört med höga skärmar. Bullerskärmar innebär även en kostnad, för att installeras och underhållas, och kostnaderna måste då vägas mot nyttorna för att säkerställa att investeringarna är samhällsekonomiskt lönsam, exempelvis med hjälp av Trafikverkets ASEK-modell.

Syftet med den här studien är att undersöka hur väl ASEK-modellen fungerar genom att testa den på ett teoretiskt 3-våningshus längs Delsjövägen i Göteborg. För att kunna göra det har beräkningar enligt Nordiska beräkningsmodellen utförts i Matlab, ljudnivåerna har mätts på plats för att få en referens och beräkningar och utvärderingar har gjorts i Excel enligt ASEK-modellen. För att få in bakgrundsfakta och hur beräkningar ska göras har litteraturstudier gjorts. Resultatet visar att investeringen över en 40-års period skulle vara mycket lönsam, trots att nämnvärd bullerreduktion endast uppnåddes på bottenvåningen och ljudnivåerna från början var relativt låga.

Samtidigt konstateras det att modellen har brister då den endast tar hänsyn till människor som bor i de bullerutsatta byggnaderna Effekten som buller har på människor som inte bor vid ett bullerutsatt område, men som passerar eller vistas utomhus i närheten, kan inte analyseras med dagens modell. Det finns därför heller inga möjligheter att kvantifiera samhällskostnaden till följd av bullerexploatering av denna grupp.

Ytterligare en aspekt är att människor eventuellt väljer bort vissa aktiviteter om ljudmiljön inte anses vara god. Exempelvis kanske man väljer att cykla en annan sträcka för att undvika buller eller till och med väljer bilen framför cykeln då ljudmiljön inte är tillfredställande. Effekterna av en bullerskärm kan alltså påverka människors beteende och val, och inte bara för de människor som redan befinner sig i ett område.

Slutsatsen är att det kan vara mycket lönsamt att investera i bullerskyddskärmar även vid relativt låga ljudnivåer, men att ASEK-modellen behöver utvecklas. För att göra den mer verklighetstrogen anser vi att parametrar för hur människor som vistas utomhus och människors beteende i ett område bör inkluderas i analysmodellen.

Abstract

Noise is an extensive environmental issue that affects the health and wellbeing of people negatively. High level of noise can for example result in learning difficulties as well as sleep disturbance which in the long run can cause ischemic heart disease. In total there are about 12 000 annual premature deaths in Europe caused by noise. In Sweden road traffic noise is the most widely spread type of noise and about 2 million Swedes are living in homes with high levels of noise. In Sweden there are regulations on allowed noise levels at housing facades. If an apartment does not have a less noisy side the highest accepted 24-hour equivalent sound pressure level is 65 dB and for apartments larger than 35 square meters 60 dB are the highest allowed level.

There is evidence of negative impacts on health of people even at lower noise levels than the ones of the regulation. The Swedish Transport Administration (Trafikverket) has a guideline for how to calculate socioeconomic costs and benefits of a project, a cost-benefit analysis tool. The guideline is called ASEK and includes estimated healths cost for a person living with noise levels down to 50 dB (24-hour equivalent level).

There are several ways to decrease noise levels, for example by using noise screens, that in some cases can reduce the noise levels significantly. Noise screens can cause conflicts of interest, for example they may reduce the visibility in an area, which could mean that the area feels less secure for people visiting the area. One way to solve that is to have low screens, about 1 meter tall, that most people have free line-of-sight above. Screens also brings costs, to install and to maintain. Those costs must be compared to the benefits they bring, to ensure that the investment has socioeconomic benefits that are higher than the cost, for example by the ASEK cost-benefit analysis tool from the Swedish Transport Administration.

The purpose of this report is to evaluate how well the ASEK tool works by testing it on a theoretical three story apartment building along a road in Gothenburg, Sweden, called *Delsjövägen*, which has a speed limit of 50 km/h. To enable this, calculations have been made in Matlab using the Nord2000 method, a prediction method for road traffic noise. Also, noise levels have been measured on site for reference, cost-benefit calculations have been made in Excel, and a literature study has been conducted. The results show that an investment would be highly beneficial and profitable over a 40-year period, despite initial noise levels being relatively low and that the screen only reduced noise levels on the ground floor.

In this report it is also pointed out that the cost-benefit analysis tools only take into consideration people living in noise affected buildings, not people visiting noise affected areas. Outdoor visitors of the area can also benefit from less noise pollution, both in terms of likely health benefits and from the likely more positive experience that a quieter area brings. Another aspect is that people may deselect an area with an

unsatisfying noise environment. For example, some may choose a different route for cycling to avoid a noisy area, and maybe even take the car instead of the bicycle because the noise environment is unsatisfying.

The conclusion of the report is that it can be greatly profitable to invest in noise screens already at relatively low noise levels, but that the cost-benefit analysis used in Sweden should be improved. To make the analysis more accurate we deem that the tools should include how people visiting an outdoor area are affected by noise, but also if the behaviour of people changes depending on how noisy different environments are.

Innehåll

1. Inledning 1
   1.1. Syfte 2
   1.2. Metod 2
   1.3. Avgränsningar 2
   1.4. Vald undersökningsplats för att representera urbana områden 3
2. Teori 6
   2.1. Bullers hälsoeffekter på människor 6
   2.2. Buller i samhället 7
   2.3. Krav gällande ekvivalenta ljudnivåer vid bostadsfasader 8
   2.4. Geometrisk akustik 9
   2.5. Akustiska modeller 10
3. Simulering 13
   3.1. Genomförande av simuleringar 13
      3.1.1. Modellering av ljudkällor 13
      3.1.2. Modellering av geometrin 15
      3.1.3. Simulering av ljudnivå på undersökningspunkterna och beräkning av bullerskyddsskärmars effekt 16
   3.2. Simuleringsresultat 18
4. Fältstudie på Delsjövägen 2022-03-07 20
   4.1. Genomförande av fältstudie 20
   4.2. Resultat av fältstudie 21
   4.3. Felkällor vid fältstudie 22
5. Nyttokostnadsanalys 23
   5.1. Utformning av teoretiskt flerbostadshus 24
   5.2. Utformning och kostnad av bullerskyddsskärm 26
   5.3. Beräkning av ljudnivåer vid lägenheternas fasader 27
   5.4. Beräkning av bullerskärmens nytta 31
   5.5. Nyttokostnadskalkyl 32
      5.5.1. Beräkningsmodell 32
      5.5.2. Beräkningar och resultat 33
      5.5.3. Känslighetsanalys beroende på förändrad diskonteringsränta 35

6. Diskussion 36
6.1. Placering av teoretiskt flerbostadshus 36
6.1.1. Motivering av bullerskyddsskärmens höjd 37
6.2. Felkällor vid simulering och modellering 37
6.2.1. Oskärmat bullerbidrag 38
6.2.2. Direktljud 38
6.2.3. Geometrisk akustik 40
6.3. Diskussion angående nyttokostnadsanalys och projektets genomförande 41
6.3.1. Angående ASEK-modellens samt projektets genomförbarhet 41
6.3.2. Brister hos ASEK-modellen 42
6.3.3. Brister i utförandet av nyttokostnadsanalys 43
6.3.4. Genomgående felkällor i nyttokostnadsanalysen 43
6.4. Elektrifiering av fordonstrafik 44
7. Slutsats 45
Litteraturförteckning 46
Bilagor 50

Figurförteckning

Figur 1. Satellitbild över undersökningsplats. 3
Figur 2. Skiss av undersökningsplats. 4
Figur 3. Illustration över ljudets olika utbredningsvägar. 10
Figur 4. Modell av hur ljudet sprids från en kontinuerlig linjekälla. 10
Figur 5. Modell av hur ljudet sprids från en inkoherent linjekälla. 10
Figur 6. Mätpunkt i förhållande till ljudkälla. 11
Figur 7. Ljudeffektnivåer hos respektive ljudkälla, beräknade i Matlab. 14
Figur 8. Modellering av ljudkällornas placering i vertikal- och horisontalled i relation till respektive körfält..... 15
Figur 9. Generell geometrisk modell av undersökningsplatsen. 16
Figur 10. Exempelmodell för undersökningsplatsens geometri, gjord i Matlab. 16
Figur 11. Bullerskärmens effekt 33,2m från mitten av närmsta körfält..... 17
Figur 12. Bullerskärmens effekt 14,1 m från mitten av närmsta körfält..... 17
Figur 13. Bullerskärmens effekt 7,5 m från mitten av närmsta körfält..... 18
Figur 14. Planvy av hus som används vid nyttokostnadsberäkning. Varje lägenhet antas vara kvadratisk, 7,6 m lång, och saknar tillgång till tyst sida. 24
Figur 15. Placering av teoretiskt flerbostadshus. 25
Figur 16. Bullerskydsskärmens placering. 26
Figur 17. Två exempel på ljud som passerar bullerskärmen och når flerbostadshusets fasad från en vinkel. 28
Figur 18. Illustration av flerbostadshusets antagna symmetri. 29
Figur 19. Illustration av exponeringspunkter motsvarande de tre yttersta lägenheterna på flerbostadshuset. 29
Figur 20: Illustration av ljudutbredningsvägar, från båda sidor av bullerskyddsskärmen, till en mottagarpunkt på flerbostadshusets fasad. 38
Figur 21:Direktljudet från ljudkällan till mottagaren. 39
Figur 22: Principen för hur bullerskyddsskärmen ger upphov till att en så kallad skuggzon uppstår för ett fall med tre mottagare. 39
Figur 23: Turbulens är ett meteorologiskt fenomen som resulterar i att ljudet kan reflekteras i en annan riktning än den initiala. Detta innebär att direktljud kan passera en bullerskyddsskärm och därav tränga in i den teoretiska skuggzonen. 41

Tabellförteckning

Tabell 1. Undersökningspunkternas anstånd från mitten av närmsta körfält. 5
Tabell 2. Sammanställning av data kopplat till berörd sträcka, Welandergatan - Kärralundsgatan..... 14
Tabell 3. Respektive ljudkällas höjd över vägen. 15
Tabell 4. Ljudnivåsänkning med 0,8–1,4 m höga bullerskärmar på 7,5–33,2 m från vägen, beräknat med 9400 fordonspassager per dygn. Mottagarhöjd 1,5 m. Avstånd från väg till skärm 0,6 m. 18
Tabell 5. Ljudnivåsänkning med 0,8–1,4 m höga bullerskärmar på 7,5–33,2 m från vägen, beräknat med 9400 fordonspassager per dygn. Mottagarhöjd 1,0 m. Avstånd från väg till skärm 0,6 m. 19
Tabell 6. Åtgärder för att minska ljudnivåerna utan skärmar. Sänkt hastighet och sänkt trafikmängd från 9400 till 4700 fordon per år. Mottagarhöjd 1,5 m. 19
Tabell 7. Resultat för det olika mätpunkterna. 22
Tabell 8. Ekvivalent ljudnivå vid det teoretiska flerbostadshusets fasad på exponeringshöjder motsvarande respektive våning, exkluderande samt inkluderande effekten av den modellerade bullerskyddsskärmen. 28
Tabell 9. De beräknade ekvivalenta ljudnivåerna på grund av oskärmat bullerbidrag. 30
Tabell 10. Beräkningarna av total ljudtrycksnivå för respektive undersökningspunkt på en av symmetrilinjens sidor..... 31
Tabell 11. Antalet lägenheter samt boende på bottenvåningen i det teoretiska flerbostadshuset, som utsätts för respektive ekvivalent ljudnivå med bullerskyddskärm. 31
Tabell 12 Känslighetsanalys beroende på förändrad diskonteringsränta. 35

Begrepp

A-vägd ljudnivå	En form av frekvensvägning, det vill säga ett sätt att anpassa ljudnivåmätning eftersom vissa frekvenser upplevs som mer störande och därav mer högljudda för människor. En A-vägd ljudnivå anges med enheten ”decibel-A” [dBA].
ASEK	Trafikverkets nyttokostnadsanalysmodell. Står för ”Analysmetod och samhällsekonomiska kalkylvärden för transportsektorn”.
Buller	Oönskat ljud exempelvis från trafik vilket refereras till som trafikbuller.
Bullerskyddsskärm trafikbuller.	Skärm som används för ljudreduktion av
Diskonteringsränta	Även kallat kalkylränta. De avkastningskrav som ställs på en investering. I rapporten används real ränta, dvs inflationsförändringar räknas.
Ljudnivå	Också kallat ljudtrycksnivå. Anges enligt en logaritmisk skala i enheten decibel [dB].
Ljudtryck	Det lufttryck som uppstår som i sin tur ger upphov till ljudvågor. Mäts i pascal [Pa].
Låg bullerskyddsskärm	Bullerskyddsskärm på omkring 1 meter.
Matlab	Står för Matrix Laboratory. Beräkningsprogram som bland annat används för numeriska simuleringar.
Nuvärdesanalys	Värden och kostnader som uppstår i framtiden men omräknat till den nytta de gör idag.
Nyttokostnadsanalys	Summan av alla kostnader jämfört med alla värden som genereras av en investering.

Root mean square	Kvadratiskt medelvärde (av ljudtrycksnivån).
Skuggzon	Det området bakom en bullerskyddsskärm som inte exponeras för direktljud.
Tyst sida	I en urban bostadsbebyggelse är en tyst sida <45 dB $L_{Aeq,24h}$.
ÅDT	Årsmedeldygnstrafik, genomsnittlig trafikmängd per dygn och år.

Beteckningar

Akustiska storheter

c	Ljudhastighet	[m/s]
d	Avstånd mellan bilar	[m]
I	Ljudintenstitet	[W/m^2]
L_{den}	Medelvärde för ljudnivån över dygnet	[dB]
L_{night}	Medelvärde för ljudnivån mellan kl. 22.00-06.00	[dB]
L_p	Ljudtrycksnivå	[dB]
$L_{p,A,eq}$	Ekvivalent ljudnivå (A-vägd)	[dBA]
p	Ljudtryck	[Pa]
r	Radie	[m]
S	Mantelyta	[m^2]
T	Lufttemperatur	[K]
W	Ljudeffekt	[W]
ρ	Luftdensitet	[kg/m^3]

Finansiella storheter

B_t	Nytta år t	[kr]
C_t	Kostnad år t	[kr]
r	Diskonteringsränta	[-] eller [%]
T	Kalkylperiodens längd	[å]

1. Inledning

Buller är ett utbrett problem i samhället och har negativa konsekvenser för folkhälsan (European Environment Agency, 2020). Samtidigt som städer förtätas och bilen fortsätter vara det dominerande transportslaget är ett av Sveriges miljömål God bebyggd miljö (Boverket, 2019). En metod för att åtgärda höga ljudnivåer från vägtrafik är att bygga bullerskyddsskärmar som blockerar och dämpar utbredningen av ljudet (Trafikverket, 2020f). Bullerskyddsskärmar förekommer i olika material och höjder. Bullerskärmar betraktas som höga vid höjder över 2 meter och låga vid höjder på ca en meter (Khalaj, 2011).

Utöver användning av bullerskyddsskärmar finns flera, mer eller mindre genomförbara metoder att tillämpa, som också leder till minskade ljudnivåer. Om trafikmängden halveras sänks ljudnivån med 3 dB (se Tabell 6). Att sänka hastighetsgränsen på vägar i tätorter kan också resultera i betydande ljudnivåsänkning i närområdet. Ett annat sätt att reducera ljudemissionerna från vägtrafik är att byta till en tystare vägbeläggning. Enligt en rapport från Trafikverket samt en rad entreprenörer kan den initiala bullerreduktionen av tyst asfalt bli 2-9 dB (Nilsson, 2010). Den tysta asfalten innehåller porer som kan absorbera ljud. Dock sjunker reduktionen med tiden på grund av slitage, som gör att porerna sätts igen, något som sker extra snabbt om dubbdäcksanvändningen är stor. Effekten kan delvis bibehållas med hjälp av rengöring, men hur snabbt slitaget går påverkas även av exempelvis kornstorleken i asfalten. Porös asfalt, även kallad tyst asfalt, har även andra fördelar, som att den absorberar vatten från vägbanan, till skillnad från vanlig tät asfalt. Noterbart är dock att trafiken på Delsjövägen endast går i 50 km/h. Enligt Trafikverket är det motorljudet som dominerar från lätt trafik upp till 30-50 km/h (Trafikverket, 2020d).

I rapporten utreds effekten av låga bullerskyddsskärmar i urbana område. Då en bullerskyddsskärm är en ekonomisk investering kan en nyttokostnadsanalys användas som stöd vid beslut om att investera i en bullerskärm. I en nyttokostnadsanalys vägs ett projekts totala nytta mot dess totala kostnader. Det finns olika modeller för nyttokostnadsanalyser. Trafikverket har en utarbetad modell som kallas ASEK. Denna kan användas till att göra nyttokostnadsanalysmodeller för projekt som rör hantering av buller. För att utföra Trafikverkets nyttokostnadsanalysmodell har en verklig plats i Göteborg valts ut för att representera urbana områden.

1.1. Syfte

Syftet med arbetet är att utföra en nyttokostnadsanalys av låga bullerskyddsskärmar i urbana områden med hjälp av Trafikverkets nyttokostnadsanalysmodell. Vidare syftar arbetet till att undersöka genomförbarheten hos modellen, från insamling av data genom mätningar och simuleringar, till genomförandet och slutsatsen av själva nyttokostnadsanalysen.

1.2. Metod

Metoderna som ligger till grund för detta arbete var ljudmätning på plats, beräkningar och simuleringar samt Trafikverkets nyttokostnadsanalysmodell ASEK. Ljudmätningen skedde i form av en fältstudie, vars syfte var att samla in verkliga data på ljudnivårelaterade parametrar för att få en tydligare bild av verklig ljudmiljö. Fältstudien utfördes en eftermiddag med hjälp av en ljudmätare på tre olika avstånd från vägen. I kapitel 204.1 beskrivs förutsättningarna samt hur mätningen gick till. Beräkningar och simuleringar av ljudnivåer och bullerskyddsskärmars effekter gjordes i datorprogrammet Matlab. Detta i syfte att senare kunna använda beräkningsresultaten under nyttokostnadsanalysen. I kapitel 3.1 återfinns de modellverktyg som användes för simulering. Slutligen gjordes en nyttokostnadsanalys enligt Trafikverkets modell. I kapitel 5 redovisas nyttokostnadsanalysmodellen som användes vid beräkning, samt resultatet av den.

1.3. Avgränsningar

Då projektets syfte och metoder gett utrymme till olika angreppsperspektiv och omfattning har avgränsningar gällande bland annat beräkningar, simulationer och akustiska teorier gjorts. Beräkningar och simuleringar i projektet har avgränsats till att enbart utföras i Matlab. Användning av mer avancerade program avsedda för bullerutredningar hade riskerat att oproportionerligt stor del av arbetet hade gått åt till att bemästra datorprogrammen. Dessutom har beräkningsmodeller som tillämpats i Matlab antagits vara tillräckligt verklighetstrogna för att resultaten ska kunna användas vid analys. Vidare har beräkningarna avgränsats till att enbart behandla analysmetoder för geometrisk akustik. Beräkningar och simuleringar har endast utförts på en specifik plats och inte ett helt område. Vidare har alla bullerskärmar som modellerats varit av hårda material, på grund av Matlab-scriptens begränsningar. Alltså inkluderas inte mjuka, absorberande skärmar i analysen.

Nyttokostnadsanalysen handlar primärt om bullerskärmars nytta för närliggande bostäder. Detta eftersom analysmodellen som använts fokuserar på samhällskostnad

kopplat till människor boende i bullerexponerade bostäder. Nyttokostnadsanalysen har enbart gjorts angående bulleraspekten ur ett mänskligt perspektiv.

1.4. Vald undersökningsplats för att representera urbana områden

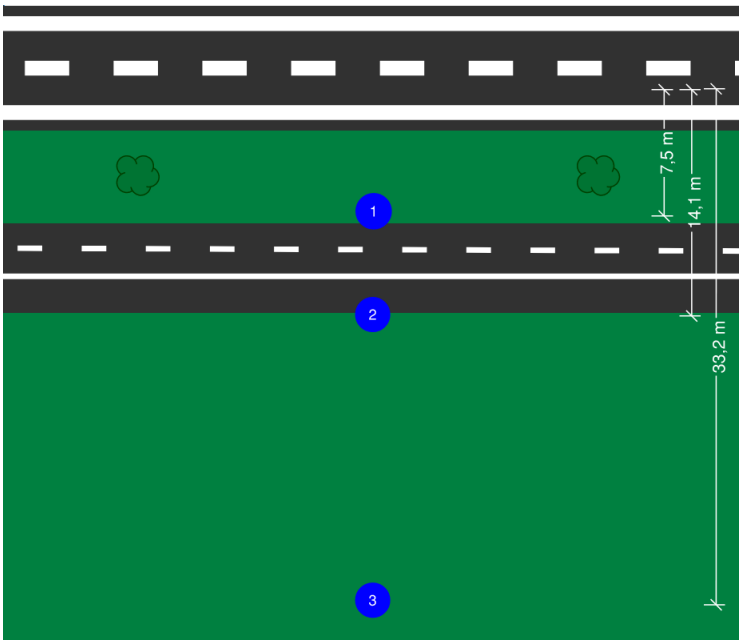
Då arbetet syftar till att analysera bullerproblematik inom urbana områden har ett sådant valts ut för att representera miljötypen. Då projektarbetet utförts i Göteborg har en plats i Göteborgsområdet valts. Platsen som valts är belägen på östra sidan av Delsjövägen.

Längs med hela Delsjövägen löper en parallell cykel- och gångbana, och längs stora delar finns bostadsbebyggelse. På den utvalda platsen finns däremot inte någon byggnad i nära anslutning till bilvägen. Detta har ansetts vara lämpligt för studien med tanke på att reflektioner därmed inte förekommer i så stor utsträckning. I stället finns där en skog som kan tänkas ha ljudabsorberande effekter. Detta gör att ljudmätningarna under fältundersökningen bättre representerar det direkta ljudet från ljudkällan, samt underlättar modellering och beräkning vid datorsimuleringar. I Figur 1 visas en översiktsbild på den undersökta platsen.

Figur 1. Satellitbild över undersökningsplats.
Kommentar: Bilder ©2022 Google, Bilder ©2022 Aerodata International Surveys, CNES / Airbus, Lantmäteriet/Metria, Maxar Technologies, Kartdata ©2022.

Platsen har bedömts vara intressant för bullerutredningar av flera anledningar. Dels eftersom cyklister och fotgängare intill Delsjövägen ständigt utsätts för buller av biltrafiken, dels för att gräsplanen kan utgöra en lämplig plats för människor att vistas på i rekreationssyften, och dels för att platsen eventuellt skulle kunna vara lämplig för framtida bebyggelser.

I och med att projektet syftar till att undersöka en verklig plats finns det givna förutsättningar och begränsningar att förhålla sig till. Tre specifika punkter på platsen har valts att undersökas i fält samt i datorsimuleringar. Detta för att utvärdera ljudtrycksnivåer, där vägtrafiken antas vara den huvudsakliga ljudkällan, på olika intressanta punkter. Efter platsbesök samt studie av kartor har en förenklad teoretisk modell gjorts, där de olika mätpunkterna markerats, se Figur 2.



Figur 2. Skiss av undersökningsplats.

Punkt 1, som är belägen närmast ljudkällan, och punkt 2 som är bakom cykel- och gångbanorna har valts då punkterna på bästa sätt representerar de, av cykel- och gångtrafikanternas, upplevda ljudnivåer. Punkt 3 är belägen på gräsplanen och undersöks dels i egenskap av möjlig plats för rekreation, dels för att framtida byggnader kan tänkas ha en fasad på detta avstånd från vägen. Detta antagande baseras på att de omkringliggande husen har sina närmsta fasader på detta avstånd från vägen. Tabell 1 redovisar de olika undersökningspunkternas avstånd från mitten av närmsta körfält.

Tabell 1. Undersökningspunkternas anstånd från mitten av närmsta körfält.

Undersökningspunkt	Avstånd från mitten av närmsta körfält [m]
1	7,5
2	14,1
3	33,2

2. Teori

I kommande kapitel beskrivs bullerproblematiken i Sverige och Europa, samt akustiska teorier som använts mer detaljerat.

2.1. Bullers hälsoeffekter på människor

Långtidsexponering av buller kan leda till sömnstörningar och stress, som på sikt kan leda till stroke och diabetes (European Environment Agency, 2020). Sömnstörningarna är ofta olika typer av sömnrubbningar, alltså att man vaknar på natten. Detta leder till minskad total mängd sömn. Sömnen är vital för att människokroppen ska fungera, och sömnbrist kan leda till bland annat försämrad livskvalité och försämrad förmåga att fokusera. Långvarig sömnbrist leda till en försämring av blodkärlens funktion, samt en ökad risk för hjärt- och kärlsjukdomar. Sömnkvaliteten kan även påverka metabolismen.

Att buller upplevs som störande påverkar människor negativt på flera sätt (European Environment Agency, 2020). Buller kan orsaka stressreaktioner som leder till negativa känslor och försämrat fokus. Detta förklaras av att buller får stresshormoner i kroppen att utsöndras, vilket i sin tur kan orsaka förändringar på hjärtrytm och blodtryck. Även detta innebär en ökad risk för hjärt- och kärlsjukdomar.

Dessutom kan barns kognitiva utveckling kan även försämras av buller, i det fallet är det i första hand flygbuller och inte vägbuller som ställer till problem. Barns kognitiva utveckling kan försämras av buller (European Environment Agency, 2020). Barn som utsätts för buller i klassrum kan komma att uppleva problem med försämrad motivation, rastlöshet och försämrad hörförståelse. Bullerinducerade sömnstörningar hos barn kan orsaka försämrad inlärningsförmåga.

Världshälsoorganisationen, WHO (2018), har riktlinjer som säger att buller från vägtrafik i vid bostäder ej bör överskrida 53 dB dygnsekvivalent ljudnivå eller 45 dB ekvivalent ljudnivå nattid. De konstaterar också att buller på 40 dB leder till stora sömnstörningar för 3–4% av befolkningen. I förlängningen leder sömnstörningar och andra bullerrelaterade problem till att ungefär 12 000 européer dör i förtid varje år (European Environment Agency, 2020).

Enligt Regeringskansliets rapport *Hälsa på lika villkor - nationella mål för folkhälsan* (2000) kan vistelse i naturen dämpa stresstillstånd och är viktigt för människors rekreation och välmående. Exempel på rekreation kan vara promenader eller andra prestationslösa utevistelser. För att grönområdena ska fylla sin funktion är det viktigt att de är bullerfria, alltså att det inte finns ljud som är störande. Vidare fastslås att tillgång till gröna utemiljöer är viktigt för barns utveckling, det minskar bland annat

stress och infektioner hos förskolebarn. Även för äldre är det viktigt att komma ut utomhus i bra miljöer. För så väl barn som äldre är det viktigt att dessa miljöer finns i närhet till bostaden, då de sällan kommer ifrån sina bostadsområden.

2.2. Buller i samhället

I Sverige bor ca 20 % av befolkningen i bostäder, där ljudnivåer överskrider 55 dB vid fasad (Folkhälsomyndigheten, 2021). Andelen barn boende i bullerutsatta flerfamiljshus i Sverige har varierat historiskt (Folkhälsomyndigheten, 2021). Från 40-talet fram till 70-talet minskade andelen, men efter 70-talet har den ökat igen. Idag bor runt 30 % av de barn som bor i flerfamiljshus i bullerutsatta bostäder. Andelen barn boende i bullerutsatta flerfamiljshus är högre än andelen boende i bullerutsatta småhus. Av barnen boende i flerfamiljshus har 12 % sovrumsfönster som vetter direkt mot en högljudd väg, järnväg eller industri. För barn boende i småhus är andelen 5%.

Liknande historiskt mönster går att finna för barn boende i småhus (Folkhälsomydligheten, 2021). Den lägsta andelen bullerutsatta småhus vände uppåt först på 90-talet och är nu knappt 15 %, att jämföra med 40-talets dryga 20 %. Av 12-åringar störes ungefär 6 % av vägtrafikbuller i hemmet år 2019, en fördubbling sedan år 2011. Folkhälsomyndigheten konstaterar slutligen att en ökning även skett i skolmiljön, från ungefär 2,5 % till runt 4 %.

Europeiska miljömyndigheten (2020) konstaterar att 13,2 % av befolkningen i tätbebyggda områden och 3,3 % av befolkningen på landsbygden utsätts för vägbuller av höga nivåer. Med höga nivåer avser Europeiska miljömyndigheten ljudnivåer över 55 dB L_{den}, där L_{den} är en vägd ljudnivå över dag, natt och kvällstid. Måttet är A-vägt och har som viktning 5 dB ökning kvällstid och 10 dB nattetid. Motsvarande exponering för spårtrafik är 2,9 % i tätbebyggt område och 2,7 % på landsbygden. För flygtrafik är det troligen runt 0,2 % som har höga ljudnivåer i såväl tätbebyggda som lantliga miljöer, och för industrier är det praktiskt tagen ingen som utsätts för höga ljudnivåer.

Trafikverket har riktlinjer för hur mycket buller som människor får utsättas för, på grund av Trafikverkets egna förvaltade infrastruktur (Trafikverket, 2019). De har som mål att år 2030 ska antalet som utsätts för buller över riktvärdena ha halverats sedan 2015. Vidare finns en målsättning att ingen ska utsättas för ljudnivåer högre än 10 dB över riktvärdena som Trafikverket har att förhålla sig till (55 dB $L_{A,eq,24h}$) (Trafikverket, 2019). Ett annat mål som finns är att ingen ska skadas allvarligt eller omkomma till följd av transportsystemets bulleremissioner. Detta mål ska vara uppfyllt år 2050.

Samtidigt som Trafikverket jobbar mot sina mål får kostnaderna för att skydda enskilda individer från bulleremissioner inte bli oproportionerligt stora (Trafikverket, 2020e). för att undvika detta görs samhällsekonomiska beräkningar och analyser. Dessa används, tillsammans med annat beslutsunderlag, som stöd vid beslut av åtgärder. Hur

bullerproblematiken förväntas förändras i framtiden, samt påverkan från andra bullerkällor beaktas också vid besluttaganden. I första hand gör Trafikverket åtgärder vid stora ombyggnationer och nybyggnationer, men för bostäder och skolor ska åtgärder utredas och genomföras då den dygnsekvivalenta ljudnivån, $L_{eq,24h}$, överskrider 40 dBA inomhus, den maximala ljudnivån, L_{max}, 55 dBA, eller den dygnsekvivalenta ljudnivån utomhus överskrider 65 dBA för bostäder och 60 dBA för skolor.

Sverige har implementerat ett EU-direktiv i en förordning, *Förordning (2004:675) om omgivningsbuller*, som säger att bullerkartläggningar ska genomföras av kommuner med över 100 000 invånare vart femte år (SFS 2004:675). Även Trafikverket ska göra detta för den transportinfrastruktur ansvarar för. Förordningen avser omgivningsbuller, alltså buller från vägar, järnvägar, flygplatser samt industriell verksamhet. För Trafikverket innebär förordningen att kartläggningar ska göras längs järnvägar med fler än 30 000 tågpassager per år, för vägar med minst 3 miljoner fordonspassager per år och runt flygplatser med minst 50 000 årliga flygrörelser. Den infrastruktur som Trafikverket kartlägger behöver kommunerna inte kartlägga. Den som ansvarar för att ta fram bullerkartor är även skyldig att uppdatera dem vid behov även om det inte gått fem år sedan förra kartläggningen.

De mått som används i bullerkartläggningar är L_{den}, det vill säga den A-vägda ljudtrycksnivån där ljudtrycksnivån kvällstid viktas med 5 dB och ljudtrycksnivån nattetid med 10 dB, samt L_{night}, som är den A-vägda ljudtrycksnivån fastställd med ett års samtliga nattperioder (SFS 2004:675). I kartläggningen ska beräkningar av antal människor, boende i bostäder med ljudnivåer inom intervallen 55–59, 60–64, 65–69, 70–74 och >75 dB för L_{den} redovisas. För L_{night} gäller lika stora intervaller men den lägsta nivån är då 50–54 och den högsta >70 dB. Beräkningarna ska göras separat för respektive trafikslag, och beräknings- eller mätmetoder ska redovisas. Dessutom ska bullerkartor upprättas, samt prioriteringar av åtgärder och samhällslönsamhetanalyser göras.

2.3. Krav gällande ekvivalenta ljudnivåer vid bostadsfasader

Ett av de krav som finns gällande buller från spår- och vägtrafik är att den ekvivalent ljudnivå inte får överskrida 60 dBA vid bullerexponerad bostadsbyggnads fasad, om bostaden är över 35 kvadratmeter (SFS 2015:216). Om bostaden däremot är under 35 kvadratmeter gäller i stället högst 65 dBA ekvivalent ljudnivå vid byggnadens fasad. Om ljudnivån ändå överstiger kraven ska minst hälften av bostadens rum vara vända mot en sida där den ekvivalenta ljudnivån inte är mer än 55 dBA vid fasaden. Det finns även krav på ljudmiljön vid bostäders uteplatser, men det är kraven gällande ekvivalent ljudnivå vid fasad som är mest relevant inom projektet, och därav det enda som behandlats.

2.4. Geometrisk akustik

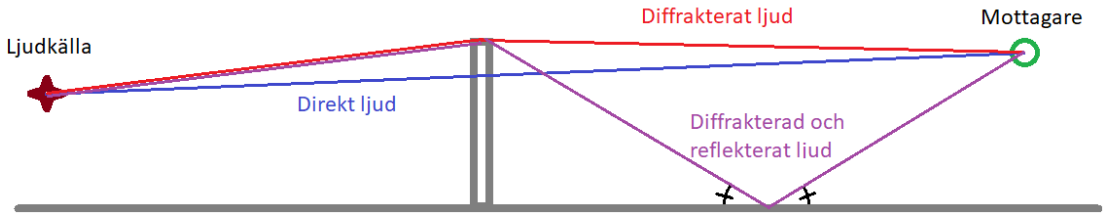
Ljudlandskap är i allmänhet komplexa och för att kartlägga dem kräver djupgående analyser. För att på ett trovärdigt sätt representera verkligheten kan förenklade modeller användas. Förenklingarna baseras på en gren inom geometriska analysmodeller, i vilken spridning av ljud modelleras som strålar från källan. Teorin går i viss mån att likställa med ljusets spridning från en glödlampa, där eventuella objekt som infinner sig i strålarnas bana bidrar till skuggzoner bakom. Inom den geometriska akustiken modelleras ljudets utbredning som strålar, eller linjer, från källan till mottagaren (European Commission, 2011). Ljudet från en källa sprids normalt sett i alla riktningar, och således kan en mottagare nås av olika ljudstrålar vars vägar skiljer sig från varandra. Därför talas det om olika typer av utbredningsvägar, där de olika vägarna beror på reflektioner och diffraktioner.

Den mest intuitiva vägen ljudet kan färdas kallas för den direkta utbredningsvägen (European Commission, 2011). Den direkta utbredningsvägen avser den raka linje som kan dras mellan en källa och en mottagare. Eventuella avskärmande och absorberande objekt som är placerade mellan källan och mottagaren, och därmed träffas av det direkta ljudet, påverkar inte den direkta utbredningsvägens bana, utan tas i stället i beaktande genom beräkningar av objektets ljudreducerande förmåga. Ett konkret exempel på objekt som kan stå i vägen för det direkta ljudets bana är bullerskärmar, vilkas syfte till största delen är att hindra det direkta ljudet från att nå mottagare på andra sidan.

Den andra typen av utbredningsväg förekommer i olika former och kallas för reflekterad utbredningsväg (European Commission, 2011). Den reflekterade utbredningsvägen avser de raka linjer som kan dras från källan till reflekterande yta och vidare till mottagaren. Vid modellering av reflekterade utbredningsvägar tillämpas principen om speglande reflektion, vilken innebär att infallsvinkel och reflexionsvinkel är lika. Detta avgränsar de reflekterande utbredningsvägarna till att enbart hantera den delen av reflexionen som har störst påverkan på ljudtrycksnivån vid mottagaren. De reflekterade utbredningsvägarna kan förekomma i form av enfaldigt, tvåfaldigt, eller ännu mer flerfaldigt reflekterade utbredningsvägar. Antalet reflektioner som vid analys kan komma att vara intressant beror på geometriska förutsättningar.

Den tredje utbredningsvägen är den diffrakterade utbredningsvägen (European Commission, 2011). Denna berör den delen av ljudet som exempelvis vid passage förbi en bullerskyddsskärm ändrar riktning på grund av diffraktion. Slutligen talar man om utbredningsvägar, inom vilka både reflexioner och diffraktioner förekommer. Alla de ovan presenterade typerna av utbredningsvägar kommer var för sig att ha en påverkan på ljudtrycksnivån vid mottagaren. Vid beräkning av den totala ljudtrycksnivån vid mottagaren kommer alla förekommande utbredningsvägar att ge ett bidrag.

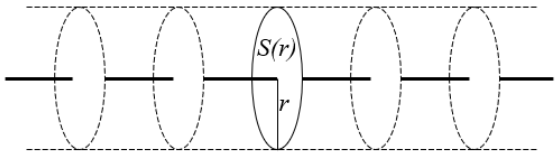
Figur 3 exemplifierar de olika typerna av ljuds utbredningsvägar som presenterats i kapitlet.



Figur 3. Illustration över ljudets olika utbredningsvägar.

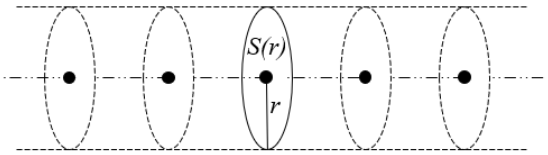
2.5. Akustiska modeller

Ljudutbredning kan beskrivas som vågor som sprider sig i luften ifrån en ljudkälla och därav ger upphov till ett ljudfält (Höstmad & Kropp, 2017). En linjekälla ger upphov till en cylindrisk vågutbredning till skillnad från en punktkälla, eller monopol, där ljudet sprids så att det bildas ett sfäriskt fält. En kontinuerlig linjekälla likt figur 4 kan användas som modell för att beskriva ljud från till exempel en rörledning, en vibrerande balk eller någon annan typ av axel- eller linjeliknande ljudkälla.



Figur 4. Modell av hur ljudet sprids från en kontinuerlig linjekälla.

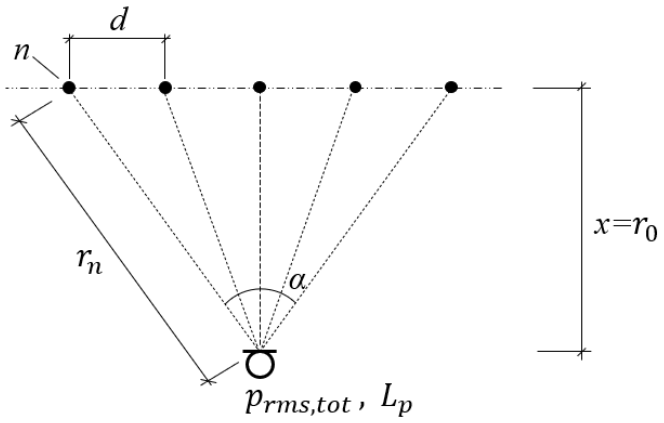
För en bilväg är det bättre att anta en så kallad inkoherent linjekälla likt figur 5 (Höstmad & Kropp, 2017). I stället för en kontinuerlig linjekälla så antas bilarna representeras av okorrelerade punktkällor. Approximativt kan då flera bilar i rad tillsammans antas ge upphov till ett cylindriskt ljudfält och därav betraktas som en linjekälla.



Figur 5. Modell av hur ljudet sprids från en inkoherent linjekälla.

Utifrån figur 5 kan figur 6 visa hur mätpunkten beror av en enskild punktkällas (bils) position. Detta bygger vidare på modellen om geometrisk akustik där ljudvågorna tolkas spridas som linjer eller strålar snarare än vågor i planet. Utifrån denna

förenklade modell ignoreras därför interferens av ljudvågorna vilket hade komplicerat modellen.



Figur 6. Mätpunkt i förhållande till ljudkälla.

Dessa modeller kan nu användas för att beskriva ljudtrycksnivån. Det kvadratiska medelvärdet – root mean square (rms) av ljudtrycket:

$$p_{rms,tot}^2 = \rho c \frac{W_{bil}}{4\pi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{r_n^2} \quad (1)$$

Där W_{bil} ljudeffekten från varje bil och beskrivs:

$$W_{bil} = I_r(r) S(r) \quad (2)$$

$I_r(r)$ är den radiella intensiteten och $S(r)$ mantelytan för en bil/monopol.
Antas vidare att $r_0 \geq d/\pi$ (det vill säga att mätpunkten från vägen är på ett förhållandevis stort avstånd) så kan ekvation 2 förenklas till:

$$p_{rms,tot}^2 \approx \rho c \frac{W_{bil}}{4 d r_0} = \left[\frac{W_{bil}}{d} = W'\right] = \rho c \frac{W'}{4 r_0} \quad (3)$$

Detta samband ger i sin tur att ljudtrycksnivån L_p kan skrivas som:

$$L_p \approx L_{W'} + 10 log_{10}\left(\frac{r_{ref}}{4 r_0}\right) + 10 log_{10}\left(\frac{\alpha}{\pi}\right) \quad (4)$$

$L_{W'}$ går att räkna ut med hjälp av:

$$L_{W'} = \frac{10log_{10}\left(\frac{W_{bil}}{W_{ref}}\right)}{d} \quad (5)$$

med W_{ref} = 10^{-12} [W].

Om en jämförelse av ekvation 4 med ljudtrycksnivån från en enskild punktkälla görs fås:

$$L_p \approx L_W + 10log_{10}\left(\frac{1}{4\pi r^2}\right) \quad (6)$$

L_W i ekvation 6 räknas ut med hjälp:

$$L_W = 10log_{10}\left(\frac{W_{bil}}{W_{ref}}\right) \quad (7)$$

Ekvation 4 är således den ljudnivån som uppstår från *en* linjekälla det vill säga *ett* körfält. Eftersom vägen som mätningarna görs på består av två körfält så fås följaktligen två linjekällor. Samma princip gäller dock som för figur 6 och ljudnivån fås analogt som från ekvation 4. Härledningarna och modellerna är hämtade från och inspirerade av *3. Wave motion* (Höstmad & Kropp, 2017).

3. Simulering

Simuleringar av ljudnivåer på den valda undersökningsplatsen intill Delsjövägen har gjorts med hjälp av information om trafikflödet på berörd sträcka på Delsjövägen och hastighetsgränsen. Syftet med simuleringen är dels att utreda den rådande ljudmiljön på vald plats, dels att med hjälp av resultaten kunna uppskatta effekten av bullerskyddsskärmar längs vägen.

Beräkningar har gjorts i Matlab med hjälp av tillhandahållna och anpassade koder, där teorin om geometrisk akustik tillämpas på ljudkällor som modelleras som inkoherenta linjekällor. Denna typ av modellering har valts dels på grund av att den i sammanhanget antas ge en tillräckligt rättvis bild av ljudmiljön för att beräkningarna ska vara relevanta, dels för att detta arbete inte ger utrymme för mer komplexa modeller. Dessutom är beräkningsmetoder utgående från geometrisk akustik och diskontinuerliga punktkällor i allmänhet vedertagna vid förutsägelse av buller i urbana utomhusmiljöer (Kragh, Jonasson, & Plovsing, 2006).

3.1. Genomförande av simuleringar

Inom projektet har ett flertal simuleringar utförts i syfte att uppskatta rådande ljudmiljö och utreda effekten av eventuella låga bullerskyddsskärmar. Alla simuleringar utgår från samma plats och huvudsaklig ljudkälla, med samma trafikmängd och andel tung trafik. Det som skiljer dem åt är undersökningspunkt, alltså var mottagaren placerats i förhållande vägen, samt förekomst av teoretisk bullerskyddsskärm och dess utformning. Samtliga simuleringar är utförda i datorprogrammet Matlab. De koder som använts baseras på modellverktyget NORD2000, och bygger därmed på teorin om geometrisk akustik. Metrologiska förhållanden, såsom luftrörelser, temperatur och nederbörd är inget som behandlas i simuleringarna.

3.1.1. Modellering av ljudkällor

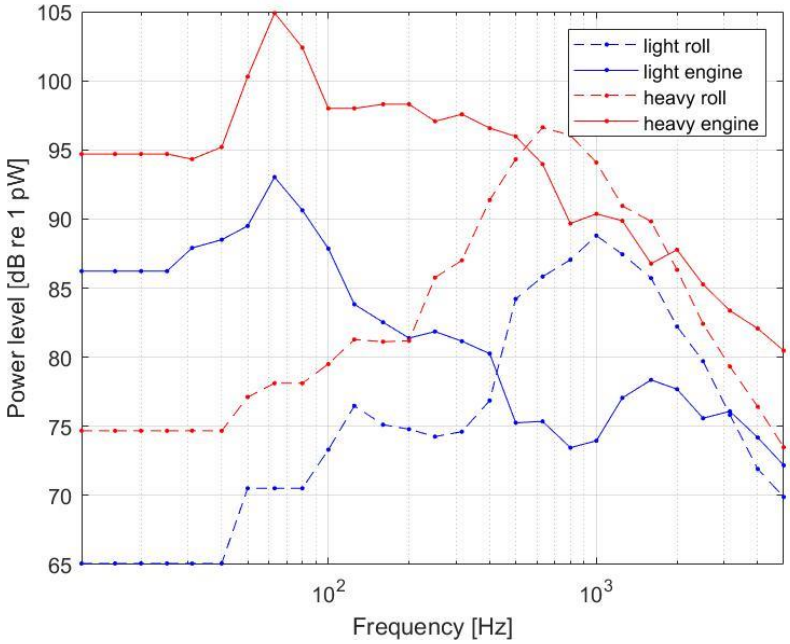
För uppskattning av ljudnivå till följd av vägtrafik krävs information om trafikmängd och andel tunga fordon (Göteborgs Stad, u.å.). Den delsträcka av Delsjövägen som undersöktes i detta projekt var Welandergatan–Kärralundsgatan, där hastighetsgränsen är 50 km/h. Den senaste tillgängliga statistiken för gatan (från 2016) visar att den totala trafikmängden per dygn på denna sträcka är i genomsnitt 9400 fordon, varav 6 % är av typen tung trafik. På websidan (Göteborgs Stad, u.å.) finns även information om antal bilar i respektive körriktning under den hårdast belastade timmen på dygnet. Då passerar 370 respektive 660 fordon i riktning mot centrum respektive från centrum. En sammanställning av dessa data presenteras i Tabell 3.

Tabell 2. Sammanställning av data kopplat till berörd sträcka, Welandergatan - Kärralundsgatan.

Hastighetsgräns [km/h]	Antal fordon/dygn	Andel tung trafik [%]	Antal fordon under maxtimmen, mot centrum	Antal fordon under maxtimmen, från centrum
50	9400	6	370	660

Vid modellering av ljudkällor har standardiserade modelleringsmetoder beskrivna i NORD2000 använts. Varje fordon har delats upp i två separata ljudkällor, ett som representerar däck-vägljud och ett som representerar motorljud (Jonasson, 2006). Däck-vägljudet antogs vara beläget på samma höjd över vägnivån oavsett fordon, medan motorljudets höjd över vägen skiljer sig åt mellan lätta och tunga fordon. Sammantaget förekommer alltså totalt fyra olika ljudkällor per körfält, däck-vägljud samt motorljud för respektive fordonstyp, vilka sedan reduceras till tre separata ljudkällor då däck-vägljuden från de olika fordonstyperna sammanslås till en gemensam ljudkälla.

I Figur 7 visas de olika ljudkällornas respektive ljudnivåeffekter i frekvensspektret innan sammanslagning av de olika fordonstypernas däck-vägljud, beräknade i Matlab utifrån data angående vägsträckans belastning och hastighetsgräns.



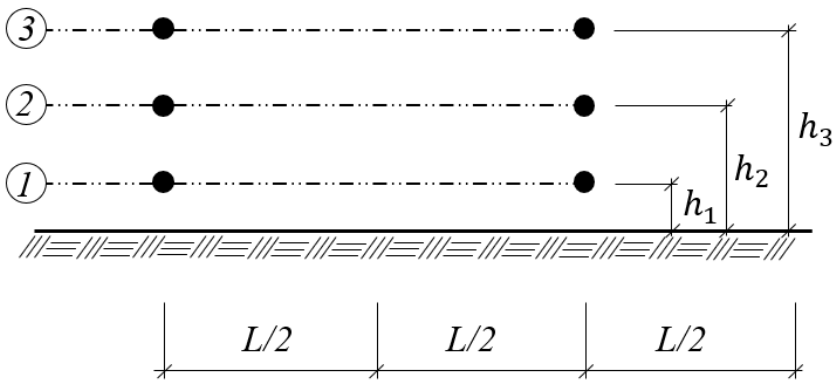
Figur 7. Ljudeffektnivåer hos respektive ljudkälla, beräknade i Matlab.

3.1.2. Modellering av geometrin

Även modelleringen av geometrin har utgått från NORD2000, och ljudkällorna beskrivna i föregående kapitel har använts. De olika ljudkällornas höjd över vägbanan redovisas i Figur 8 som h_1 (däck-vägljud), h_2 (lätta fordons motorljud) och h_3 (tunga fordons motorljud). I den geometriska modellen har ljudkällornas placering i horisontalled enligt NORD2000 placerats i mitten av respektive körfält. Körfältens bredd på undersökningsplatsen är 3,4 m och representeras i Figur 8 av L. I Tabell 3 presenteras de modellerade ljudkällornas höjd över vägen.

Tabell 3. Respektive ljudkällas höjd över vägen.

Fordonstyp	**Lätta fordon**	**Tunga fordon**
Däck-vägljud, höjd över vägen (h_1) [m]	0,01	0,01
Motorljud, höjd över vägen (h_2) (h_3) [m]	0,3	0,75

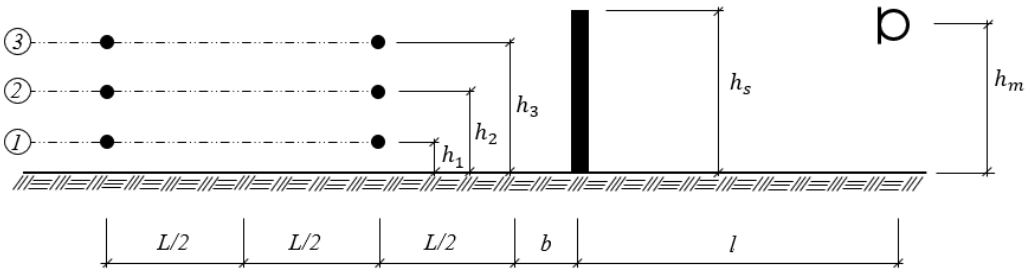


Figur 8. Modellering av ljudkällornas placering i vertikal- och horisontalled i relation till respektive körfält.

Höjden för mottagaren har valts till 1,5 m över vägbanans nivå enligt rekommendationer i användarmanualen till NORD2000 (Kragh, Jonasson, & Plovsing, 2006). I projektet har dock även höjden 1 m över vägbanans nivå använts i simuleringar, i syfte att undersöka mottagarhöjdens känslighet.

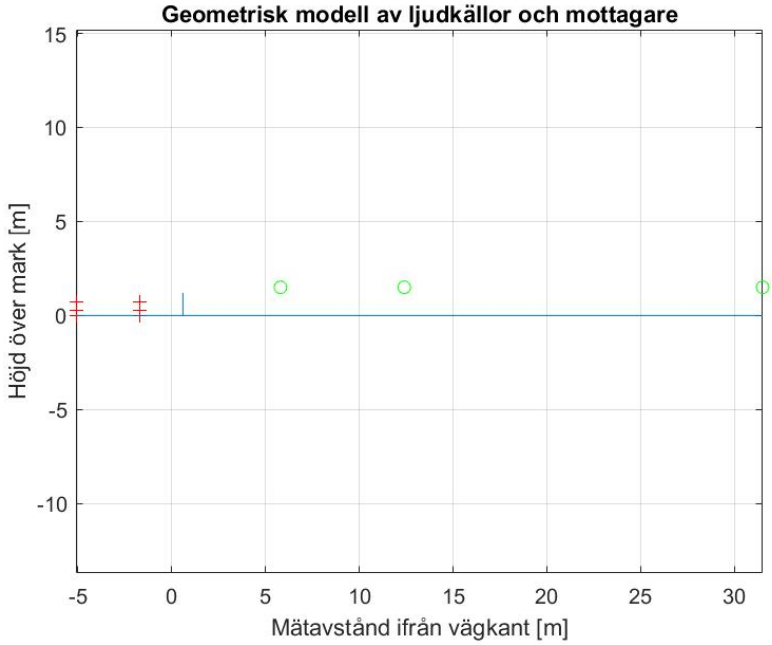
Avståndet mellan vägkant och teoretisk bullerskyddsskärm (b) är satt till 0,6 m med hänsyn till säkerhetsaspekter gällande utrymningsmöjligheter och framkomlighet. Den teoretiska bullerskyddsskärmens höjd (h_s) har i simuleringarna varierat mellan 0,8 m och 1,4 m. Avståndet mellan den teoretiska bullerskyddsskärmen och mottagaren (l) har utifrån de olika mottagaravstånden bestämts med hjälp av värdena i Tabell 1.

I Figur 9 redovisas en generell geometrisk modell av undersökningsplatsen, innehållande de presenterade parametrarna.



Figur 9. Generell geometrisk modell av undersökningsplatsen.

I Figur 10 visas ett exempel på en geometrisk modell gjord i Matlab, med mottagarhöjden på 1,5 meter över vägbanans nivå. Ljudkällorna representeras i figur 10 av röda kors, den teoretiska bullerskyddsskärmen representeras av en vertikal blå linje, och de tre mottagarpositionerna på 1,5 meters höjd representeras av gröna cirklar.



Figur 10. Exempelmodell för undersökningsplatsens geometri, gjord i Matlab.

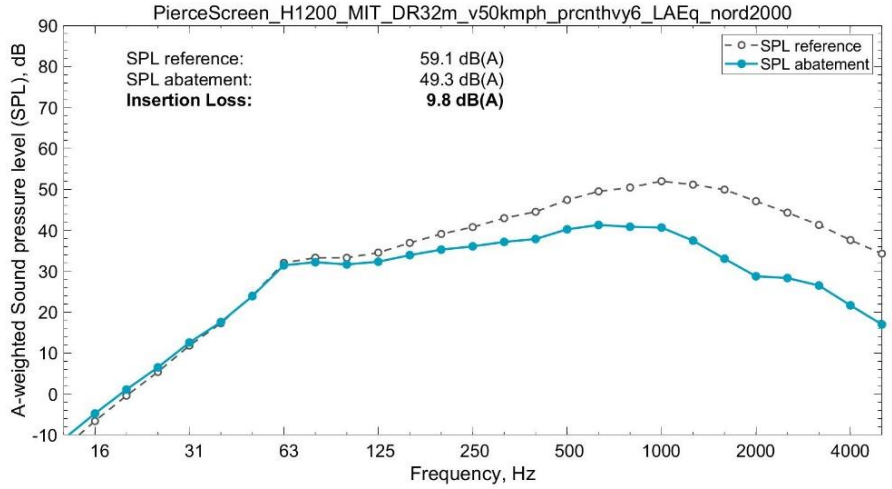
3.1.3. Simulering av ljudnivå på undersökningspunkterna och beräkning av bullerskyddsskärmars effekt

Simuleringar av ljudmiljön intill Delsjövägen, samt teoretiska bullerskyddsskärmars effekt har utförts i Matlab. Matlab-scriptet som använts i detta arbete omvandlar information om vägens geometriska utformning, hastighetsgräns, antal fordon per dygn och andel tung trafik till en simulering av ljudnivån som trafiken genererar. Vidare kan en simulerad ljudnivå vid valfri mottagarposition undersökas. Vid simulering av en bullerskyddsskärms effekt används, utöver redan presenterade parametrar, även

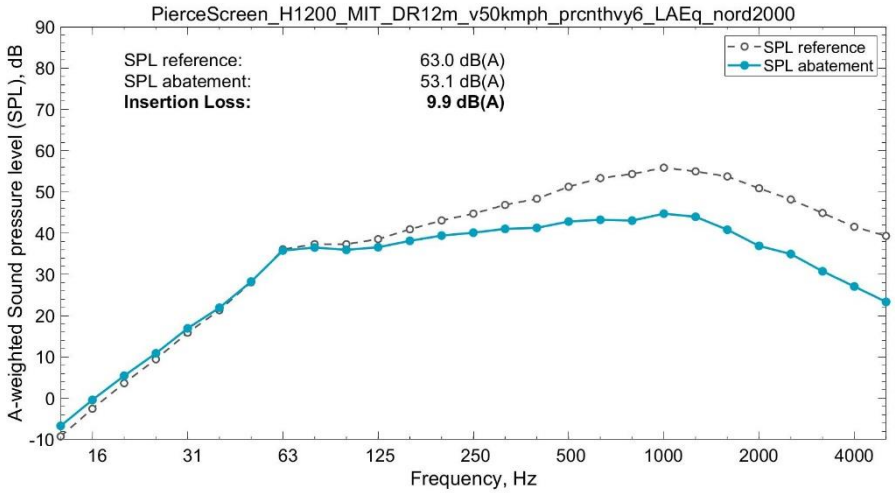
information om bullerskyddsskärmens geometri. Med hjälp av geometriska akustikmodeller genereras i Matlab matriser, innehållande information om bullerskyddsskärmens effektivitet inom olika frekvensband.

Avstånden som undersökts är specificerade i Tabell 1. Olika höjder på bullerskärmen har undersökts för att utvärdera effektskillnaden mellan de olika höjderna.

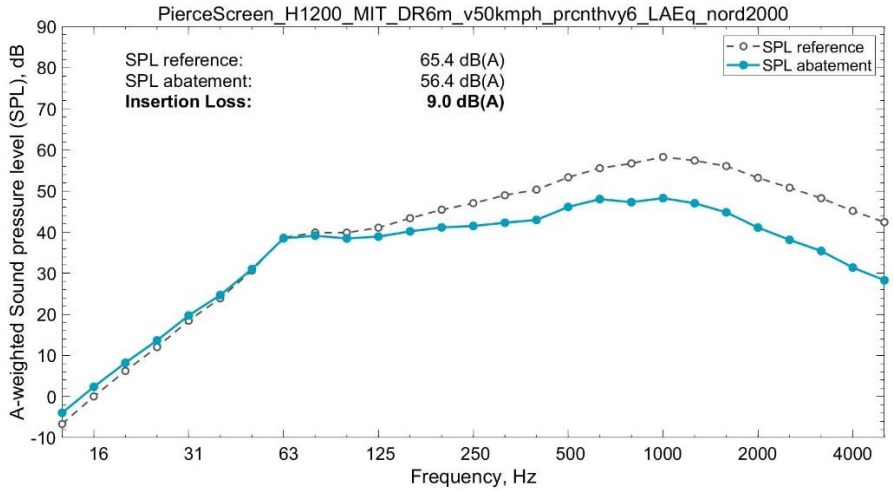
I Figur 11, Figur 12 och Figur 13 visas effekten av en teoretisk bullerskyddsskärm med höjden 1,2 m på tre olika avstånd från mitten av närmsta körfält. Trafikmängden är satt till 9400 fordon per dygn, varav 6 % antas vara tunga fordon (Göteborgs Stad, u.å.).



Figur 11. Bullerskärmens effekt 33,2m från mitten av närmsta körfält.



Figur 12. Bullerskärmens effekt 14,1 m från mitten av närmsta körfält.



Figur 13. Bullerskärmens effekt 7,5 m från mitten av närmsta körfält.

En simulering utan bullerskyddsskärm har gjorts i syfte att i stället undersöka alternativa metoder för att minska bulleremissioner. De alternativa metoderna som undersökts är dels sänkningar av hastighetsgränsen, dels en minskning av trafikmängden till hälften av den nuvarande. Resultaten av dessa undersökningar redovisas i Tabell 6.

3.2. Simuleringsresultat

Nedan presenteras effekten av olika höga bullerskyddsskärmar på de tre undersökningsavstånden för mottagarhöjderna 1,5 m och 1,0 m (Tabell 4 och Tabell 5), samt resultat av undersökta hastighetssänkningar och trafikminskningar (Tabell 6).

Tabell 4. Ljudnivåsänkning med 0,8–1,4 m höga bullerskärmar på 7,5–33,2 m från vägen, beräknat med 9400 fordonspassager per dygn. Mottagarhöjd 1,5 m. Avstånd från väg till skärm 0,6 m.

Avstånd till mitten av närmsta körfält [m]	**Ljudnivåsänkning Skärm 0,8 m hög [dB]**	**Ljudnivåsänkning Skärm 1,0 m hög [dB]**	**Ljudnivåsänkning Skärm 1,2 m hög [dB]**	**Ljudnivåsänkning Skärm 1,4 m hög [dB]**
7,5	6,9	7,8	9,0	10,3
14,1	7,6	8,6	9,9	10,9
33,2	7,4	8,4	9,8	11,2

Tabell 5. Ljudnivåsänkning med 0,8–1,4 m höga bullerskärmar på 7,5–33,2 m från vägen, beräknat med 9400 fordonspassager per dygn. Mottagarhöjd 1,0 m. Avstånd från väg till skärm 0,6 m.

Avstånd till mitten av närmsta körfält [m]	**Ljudnivåsänkning Skärm 0,8 m hög [dB]**	**Ljudnivåsänkning Skärm 1,0 m hög [dB]**	**Ljudnivåsänkning Skärm 1,2 m hög [dB]**	**Ljudnivåsänkning Skärm 1,4 m hög [dB]**
7,5	7,6	8,6	9,9	11,0
14,1	7,3	8,6	10,0	11,1
33,2	6,4	7,9	9,2	10,5

Tabell 6. Åtgärder för att minska ljudnivåerna utan skärmar. Sänkt hastighet och sänkt trafikmängd från 9400 till 4700 fordon per år. Mottagarhöjd 1,5 m.

Avstånd till mitten av närmsta körfält [m]	**$L_{p,A,eq}$ 50 km/h ingen skärm [dB]**	**$L_{p,A,eq}$ 40 km/h ingen skärm [dB]**	**$L_{p,A,eq}$ 30 km/h ingen skärm [dB]**	**$L_{p,A,eq}$ 50 km/h halverad trafik-mängd, ingen skärm [dB]**	**$L_{p,A,eq}$ 40 km/h halverad trafik-mängd, ingen skärm [dB]**	**$L_{p,A,eq}$ 30 km/h halverad trafik-mängd, ingen skärm [dB]**
7,5	65,4	63,5	61,7	62,4	60,5	58,7
14,1	63,0	61,1	59,4	60,0	58,1	56,4
33,2	59,1	57,3	55,7	56,1	54,3	52,7

4. Fältstudie på Delsjövägen 2022-03-07

Det huvudsakliga syftet med fältundersökningen är att kunna jämföra utförda simuleringar med förhållanden som observerats i verkligheten. Genom att jämföra simuleringarna med observerade förhållanden kan slutsatser angående simuleringarnas tillförlitlighet dras. Fältstudien har för projektgruppen bidragit till större kunskap om undersökningsplatsen, samt utökad verklighetsförankring under arbetets gång.

4.1. Genomförande av fältstudie

De valda mätpunkterna (1, 2, 3) presenteras i figur 2, där mätpunkt 1 har valts till 7,5 m från närmaste körfälts mitt, mätpunkt 2 på avståndet 14,1 meter från närmaste körfältets mitt, precis bakom cykel- och gångbanan, och mätpunkt 3 på avståndet 33,2 meter från närmaste körfältets mitt. Dessa val har gjorts eftersom resultaten av mätningarna på dessa punkter har ansetts vara av intresse av olika anledningar. Mätpunkt 1 och mätpunkt 2 är tänkta att representera gång- och cykeltrafikanternas upplevda buller och mätpunkt 3, som är placerad på gräsplanen bakom cykelvägen, är intressant av åtminstone två anledningar. Dels kan denna yta lämpa sig väl till rekreationssyften, en plats där människor kan vistas på för att umgås och leka, dels för att eventuella framtida byggnader kan tänkas ha en fasad på detta avstånd från vägen. Detta antagande baseras på att de omkringliggande husen har sina närmsta fasader på detta avstånd från vägen.

Undersökningen utfördes måndagen den 7e mars 2022, mellan 14:25 och 15:00. En förhållandevis klar och solig eftermiddag med svag vind och en temperatur på omkring 7 °C. Under dagen hade det inte förekommit någon nederbörd i området, så asfalten och den omkringliggande marken var inte våt eller fuktig. Mättillfället valdes till stor del på grund av att projektgruppen vid denna tid hade tillgång till mätutrustningen och möjlighet att genomföra undersökningen. Resultatet av mätningarna har sedan korrigerats med avseende på differensen mellan ÅDT beräknat utifrån mätningar och ÅDT utifrån Trafikverkets uppgifter om den berörda vägsträckan (se Tabell 2).

ÅDT utifrån mätningar har tagits fram genom att beräkna antalet uppmätta fordonspassager per minut och sedan extrapolera resultatet över ett helt år. Korrektionen med avseende på ÅDT, ΔL_{korr}, har beräknats enligt ekvation 8:

$$\Delta L_{korr} = L_{A,eq,mixed,meas} - L_{A,eq,mixed,TRV} \quad (8)$$

där $L_{A,eq,mixed,meas}$ är den sammanslagna ljudnivån till följd av både lätta och tunga fordon, med ett ÅDT beräknat utifrån mätdata och $L_{A,eq,mixed,TRV}$ är den sammanslagna ljudnivån till följd av både lätta och tunga fordon, med ett ÅDT utifrån

Trafikverkets uppgifter om den berörda vägsträckan. $L_{A,eq,mixed,meas}$ och $L_{A,eq,mixed,TRV}$ har beräknats i Matlab enligt ekvation 9 och ekvation 10:

$$L_{A,eq,mixed,meas} = \log\left(10^{\frac{L_{A,eq,Light,meas}}{10}} + 10^{\frac{L_{A,eq,Heavy,meas}}{10}}\right) \quad (9)$$

$$L_{A,eq,mixed,TRV} = \log\left(10^{\frac{L_{A,eq,Light,TRV}}{10}} + 10^{\frac{L_{A,eq,Heavy,TRV}}{10}}\right) \quad (10)$$

För att utföra mätningen användes en ljudmätare på stativ av modellen B&K 2260. Detta är en ljudmätare som enligt standarden IEC 61672:2002 uppfyller kraven för prestandaklass 1 (Brüel & Kjær, u.å.). I IEC 61672:2002 specificeras två olika prestandaklasser, klass 1 och klass 2, där klass 1 innebär lägre toleransgränser än klass 2 gällande operativ temperatur (International Electrotechnical Commission, 2002). Ljudmätaren kalibrerades i tyst inomhusmiljö ca 30 minuter före att mätningarna utfördes.

Med hjälp av måttband kunde avstånd från närmsta körfälts mitt till mätpunkterna 1, 2 och 3 och lämplig höjd för mottagare uppmätas. Höjden för mottagaren har valts till 1,5 m över vägbanans nivå enligt rekommendationer i användarmanualen till NORD2000 (Kragh, Jonasson, & Plovsing, 2006). Med hjälp av ljudmätaren kunde relevanta parametrar undersökas. Särskilt relevant är den A-vägda ekvivalentnivån, då den kan jämföras med en simulerad ekvivalentnivå från trafiken.

Ljudmätaren har en paus-funktion som gör det möjligt att pausa ljudmätningen, för att sedan fortsätta vid bestämd tid. Paus-funktionen användes då icke-representativa, förhållandevis höga ljudvolymer uppkom av olika anledningar. Paus-funktionen användes totalt tre gånger under mättillfället. Anledningarna var två av gångerna att spårvagnar passerade mätplatsen, på spårvägen bortanför den undersökta bilvägen. Det tredje tillfället som paus-funktionen användes var när skällande hundar passerade mätplatsen.

4.2. Resultat av fältstudie

I Tabell 7 presenteras resultaten av mätningarna för de olika mätpunkterna. Mätningarna har utförts på minst 60 passerande bilar enligt Nordtest och redovisas som A-vägd ekvivalent ljudnivå (Nordtest, 2002).

Tabell 7. Resultat för det olika mätpunkterna.

Mätpunkt	Avstånd från källa till mottagare [m]	Mättid [min]	Antal pauser	Antal passerande fordon	$L_{p,A,eq}$ [dBA]	Ljudnivå korrigerad m.a.p. ÅDT [dBA]
1	7,5	07:21	1	63	64,9	63,7
2	14,1	05:39	2	64	60,8	59,6
3	33,2	06:03	0	62	53,3	52,1

4.3. Felkällor vid fältstudie

Det finns en rad felkällor som eventuellt skulle kunna påverka resultatet av undersökningen. Dels så riskerar själva undersökningen i sig att påverka den rådande trafiksituationen, dels så utgår hela mätningen och dess resultat från en mycket kort tid under ett enda tillfälle, vid en specifik tid på dygnet.

Under fältundersökningens gång kunde en mer eller mindre påverkan på rådande trafiksituation märkas. Vad som kunde märkas var att en del av de förbipasserande bilarna sänkte hastigheten när de passerade mätpunkten. Detta kan troligtvis förklaras av att det hos bilisterna kan ha förekommit osäkerheter och funderingar över vad det var som skedde intill vägen de åkte på när mätningarna utfördes. En ljudmätning skulle kunna misstas för att vara en mätning av hastigheter hos de förbipasserande fordonen och därmed kan det tänkas att bilisterna medvetet har saktat ner för att inte riskera att köra snabbare än tillåten hastighet.

Då fältundersökningen endast pågick i några minuter på en enda dag och tid på dygnet är det möjligt att den vid mättillfället rådande trafiksituationen var icke-representativ för vägens normala trafikbelastning. Detta har korrigerats med hjälp av en faktor som beräknats utifrån jämförelse med ÅDT. Dock råder mer eller mindre osäkerheter på grund av detta eftersom den beräknade faktorn eventuellt kan vara icke-representativ.

Något annat som påverkar mätningsresultaten är de metereologiska förutsättningarna under mättillfället. Förekomst av våta ytor, vind och termiska förhållanden påverkar ljudets förmåga till utbredning och reflektion etcetera. Inför fältundersökningen gjordes kontroller av vindhastighet och markens fuktighet, men trots att förutsättningarna ansågs vara goda gäller det att dessa parametrar påverkar resultaten på sätt som kan vara svåra att förutse.

5. Nyttokostnadsanalys

ASEK står för *Analys och Samhällsekonomiska Kalkylvärden för transportsektorn* och är en analysmetod för samhällsekonomiska analyser, framtagen av Trafikverket (Trafikverket, 2020a). Analysmodellen är anpassad för tillämpning på anläggningar inom transportsektorn, och innefattar bland annat infrastrukturanläggningars effekter på människor. Analysmodellen går att använda vid analys av en rad olika aspekter. Några av dessa är värdering av restid, kostnad för trängsel och förseningar, kostnad för buller, kostnad för luftföroreningar, kostnad för klimateffekter, etcetera.

ASEK-modellen preciserar fem steg för utförandet av en nyttokostnadsanalys (Trafikverket, 2020a). Dessa är följande:

1. Definiera och avgränsa
2. Identifiera prissatta och ej prissatta effekter (i detta projekt enbart buller)
3. Kvantifiera och värdera
4. Sammanställning av kalkyl och tolkning av resultat
5. Göra känslighetsanalyser

Under kommande delkapitel avhandlas dessa steg, i den ovan presenterade ordningen. Det första steget, ”definiera och avgränsa”, behandlas primärt i kapitel 5.1. Då det enbart är trafikbullers effekter som är av intresse i detta projekt, kommer steg nummer två, ”identifiera prissatta och ej prissatta effekter”, ej att behandlas ytterligare. Det tredje steget, ”kvantifiera och värdera”, avhandlas i kapitel 5.1, 5.2, 5.3 och 5.4. ”Sammanställning av kalkyl och tolkning av resultat” presenteras i kapitel 5.5. Känslighetsanalyser kommer primärt att avhandlas i kapitel 6, som innehåller diskussioner angående arbetets resultat kopplat till projektets syfte.

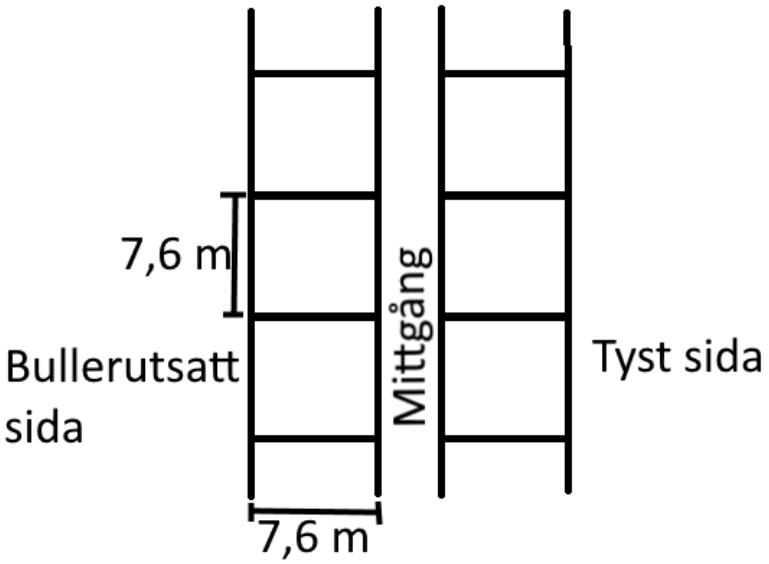
Då simuleringar och fältundersökningar enbart har utgått från en endimensionellt utsträckt linje vinkelrätt Delsjövägen krävs det vid en nyttokostnadsanalys att resultaten omtolkas till att gälla en sträcka längs Delsjövägen omkring undersökningspunkten. Vidare har nyttokostnadsanalysen gjorts på ett teoretiskt flerbostadshus intill vägen. Det teoretiska flerbostadshusets utformning har tagits fram med hjälp av statistik tillhandahållen av Statistikmyndigheten SCB, samt ingenjörsmässiga antaganden.

Angreppssättet till nyttokostnadsanalysen har valts dels av praktiska skäl, då relevant data har kunnat antas på detta sätt, dels på grund av att analysen eventuellt skulle kunna komma att vara relevant då utbyggnad intill Delsjövägen är en tänkbar utveckling i framtiden.

5.1. Utformning av teoretiskt flerbostadshus

Enligt Statistikmyndigheten SCB bor det i genomsnitt två personer per hyreslägenhet i Sverige (Statistikmyndigheten SCB, 2018). Den vanligaste lägenhetstypen är tvårumslägenheter och en genomsnittlig lägenhet är 57 m^2 stor till ytan (Statistikmyndigheten SCB, 2016). Det teoretiska flerbostadshuset som använts i nyttokostnadsanalysen är utformat utefter denna information. Vidare har antaganden angående lägenheterna i flerbostadshusets geometriska utformning gjorts. Lägenheterna har för enkelhetens skull antagits vara kvadratiskt utformade, och då den totala ytan för varje lägenhet antas vara 57 m^2 har samtliga lägenhetsavgränsande sidor beräknats vara 7,6 meter långa. I likhet med omkringliggande hus antas det teoretiska lägenhetshuset ha 3 våningar. Husets bullerexponerade fasad antas vara belägen på avståndet 16 m från Delsjövägens närmaste körfälts mitt, eftersom detta avstånd har ansetts vara det minsta lämpliga att bygga huset på. Detta innebär ett avstånd på 2 meter mellan cykel-gångbanan och fasaden.

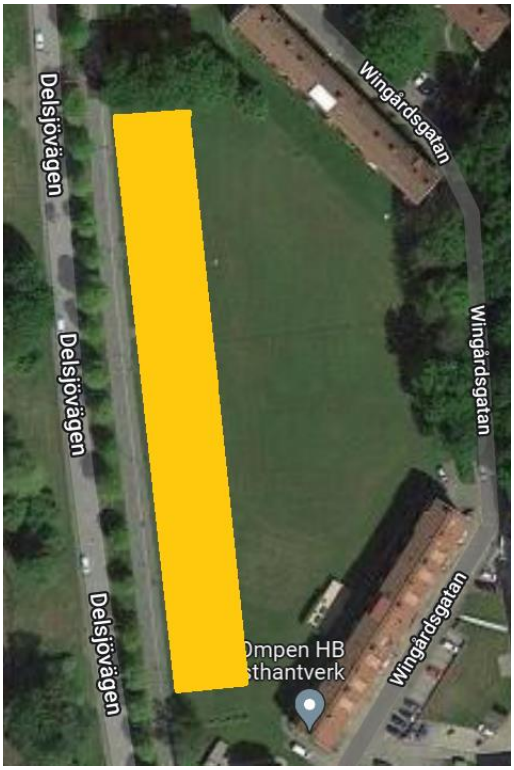
De presenterade antagandena ger en situation där 6 personer (två personer per lägenhet och tre våningar) blir utsatta av trafikbuller per varje 7,6 m längd på den bullerutsatta sidan av det teoretiska flerbostadshuset. I Figur 14 visas en enkel planvy över det teoretiska flerbostadshuset. De lägenheter som har fasad mot Delsjövägen antas vara bullerutsatta, medan de lägenheter som är belägna på andra sidan av bygganden antas vara skyddade då flerbostadshuset antas verka som en ljudavskärmande konstruktion.



Figur 14. Planvy av hus som används vid nyttokostnadsberäkning. Varje lägenhet antas vara kvadratisk, 7,6 m lång, och saknar tillgång till tyst sida.

Flerbostadshuset antas totalt bestå av 120 lägenheter, varav hälften är belägna på den bullerutsatta sidan. De 60 lägenheter som är belägna på den bullerutsatta sidan antas vara jämnt fördelade på de tre våningarna. Detta ger att flerbostadshusets totala längd motsvarar längden av 20 lägenheter, alltså 152 meter. Vidare gäller som tidigare nämnts att det antas bo 2 personer i varje lägenhet, alltså bor totalt 120 personer i lägenheter på den bullerutsatta sidan av det teoretiska flerbostadshuset.

Figur 15 visar placeringen av det teoretiska flerbostadshuset, med skalenliga längder. Husets bredd har bestämts utifrån lägenheternas kvadratiska utformning, samt att det antas finnas en genomgångskorridor som löper genom hela byggnaden, vilken utökar byggnadens bredd.

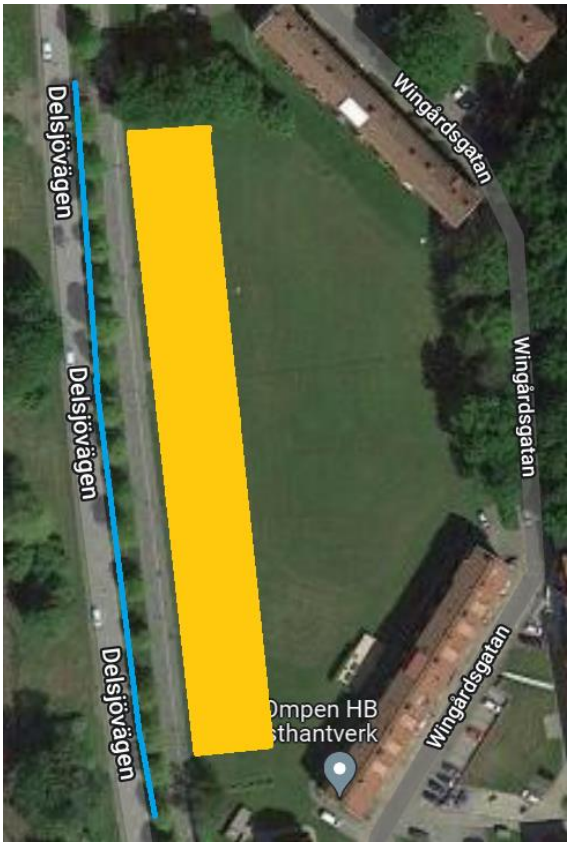


Figur 15. Placering av teoretiskt flerbostadshus.

Huset antas ha en fasadreduktion på 27 dBA i enighet med Trafikverkets nyttokostnadsanalysmetod ASEK 7.0 (Trafikverket, 2020b).

5.2. Utformning och kostnad av bullerskyddsskärm

Bullerskyddsskärmen som användes för nyttokostnadsanalysen är 1,0 meter hög och placeras på avståndet 0,6 meter från Delsjövägens kant. Då skärmens syfte är att skydda det teoretiska flerbostadshuset från bulleremissioner från Delsjövägen har bullerskärmen utformats så att den löper längs med hela byggnaden. Dock gäller det att buller från Delsjövägen kan komma att nå de lägenheterna som är placerade på flerbostadshusets kanter från en vinkel. För att undvika denna problematik har bullerskyddsskärmens längd utökats. Enligt rekommendationer från Göteborgs Stads Trafikkontor har bullerskyddsskärmens längd utökats med avståndet från vägen till huset, på båda sidor om huset (M. Ekstrand, personlig kommunikation, 31 mars, 2022). Detta motsvarar en utökning av $2 \times 16 = 32$ meter och ger således en bullerskyddsskärm som är totalt 184 meter lång. Figur 16 visar bullerskyddsskärmens placering och utsträckning längs Delsjövägen.



Figur 16. Bullerskydsskärmens placering.

Vid beräkning av kostnaden för bullerskyddsskärmen har en överslagsberäkning utgående från schablonsiffror som Göteborgs stad använder sig av gjorts. Den typ av bullerskyddsskärm som valts är låg modell i trä. Utifrån beräkningar gjorda av Göteborgs Stad (2014) för tidigare projekt har investeringskostnaden för låga bullerskyddsskärmen av trä uppskattats vara 8300 kr/m år 2014. Enligt Statistikmyndigheten SCBs prisomräknare (2022) har inflationen sedan helåret 2014 till

mars 2022 varit 14,78 %, vilket get en prisomräkning av skärmarna till 9500 kr/m. Det förekommer dock osäkerheter angående tillförlitligheten hos denna siffra, då bland annat platsspecifika omständigheter kan komma att påverka kostnader för grundläggning med mera. Därför har den förväntade kostnaden för bullerskyddsskärmen avrundats uppåt till 10 000 kr/m.

Utgående från presenterade siffror kan nu en beräkning av bullerskyddsskärmens förväntade investeringskostnad att göras med hjälp av ekvation 11.

$$Kostnad\ [kr] = Längd\ [m] \times Kostnad\ per\ meter\ \left[\frac{kr}{m}\right] \quad (11)$$

Insättning av presenterade värden ger en investeringskostnad för bullerskyddsskärmen på 1 840 000 kr. Dock råder det osäkerheter gällande den beräknade kostnadens tillförlitlighet då bullerskyddsskärmen vid djupare analys kan visa sig vara antingen mer eller mindre kostsam.

Bullerskyddsskärmens livslängd och underhållskostnader under dess livstid är något som bör tas i beaktande för att kunna fastslå den totala kostnaden för bullerskyddsskärmen under hela dess livslängd. Vidare kan då en årlig kostnad för bullerskyddskärmen uppskattas.

Livslängden som antagits för bullerskyddsskärmen i denna nyttokostnadsanalys är 40 år i enighet med Trafikverkets krav (Trafikverket, 2021). På marknaden finns dessutom produkter med en specificerad teknisk livslängd på 40 år (Bra bullerplank AB, u.å). Underhållskostnader för redan uppsatta bullerskyddsskärmar av trä bedöms vara obetydligt små i förhållande till investeringskostnaden (Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut, 2005). Då trämaterialen kan angripas av nedbrytande mikroorganismer kan delar av bullerskärmen så småningom att behöva bytas ut. Någon exakt förväntad underhållskostnad är svår att förutse, men med tanke på att underhållskostnaderna antas utgöra en väldigt liten andel av totalkostnaden försummas de i denna analys.

5.3. Beräkning av ljudnivåer vid lägenheternas fasader

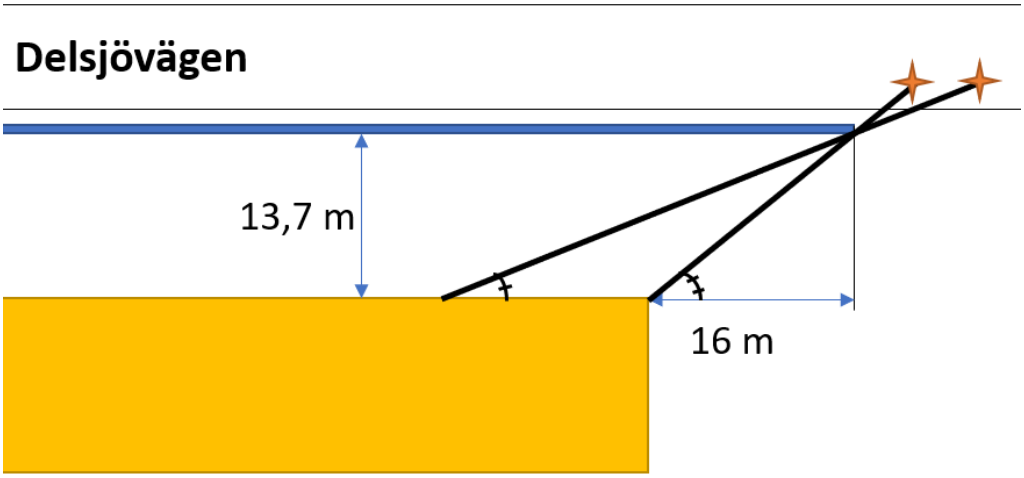
För att uppskatta bullerskyddsskärmens nytta har ekvivalenta ljudnivåsänkningar på grund av bullerskyddsskärmen beräknats för exponeringshöjder motsvarande de tre bebodda våningarna i det teoretiska flerbostadshuset. Den första våningens golvnivå antas vara belägen på samma nivå som marken utanför. Golvnivån för den andra och den tredje våningen antas vara 3 respektive 6 meter över marknivå. Exponeringshöjder för respektive våning har enligt NORD2000 valts till 2 meter över golvnivå (Kragh, Jonasson, & Plovsing, 2006). Antalet boende personer antas vara jämnt fördelat per våning, det vill säga totalt 80 personer per våning varav 40 personer per våning på den

bullerutsatta sidan av huset. Bullerskyddsskärmens effekt på respektive vånings exponeringshöjd har beräknats och presenteras i Tabell 8 nedan.

Tabell 8. Ekvivalent ljudnivå vid det teoretiska flerbostadshusets fasad på exponeringshöjder motsvarande respektive våning, exkluderande samt inkluderande effekten av den modellerade bullerskyddsskärmen.

Våning	Exponerings-nivå över marken [m]	Antal buller-utsatta personer	$L_{p,A,eq}$ utan bullerskydds-skärm [dB]	$L_{p,A,eq}$ med bullerskydds-skärm [dB]	Sänkning av ekvivalent ljudnivå på grund av bullerskydds-skärm [dB]
1	2	40	62,3	53,7	8,7
2	5	40	61,8	61,8	0
3	8	40	61,5	61,5	0

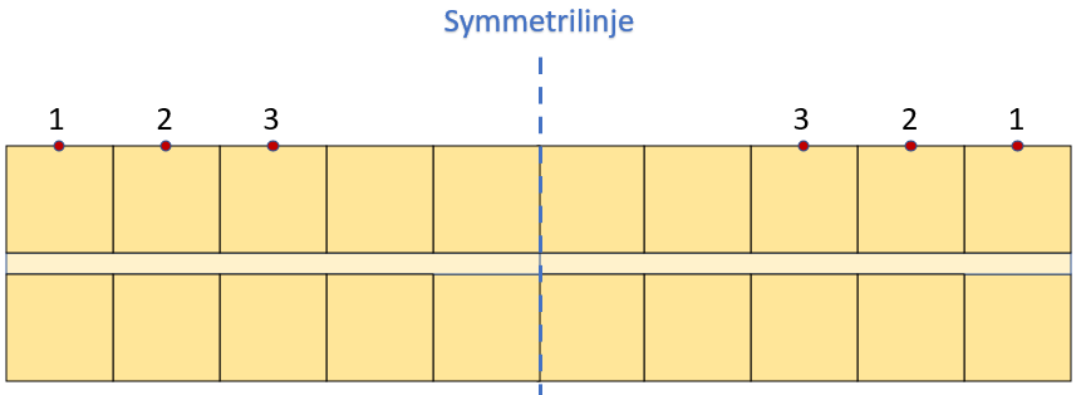
De beräknade ekvivalenta ljudnivåerna i Tabell 8 tar inte hänsyn till oskärmat ljud som når fasaden från en vinkel. Ljudet som passerar skärmen och når fasaden från en vinkel bidrar till en ökad ekvivalent ljudnivå. Figur 17 visar en illustration av problematiken.



Figur 17. Två exempel på ljud som passerar bullerskärmen och når flerbostadshusets fasad från en vinkel.

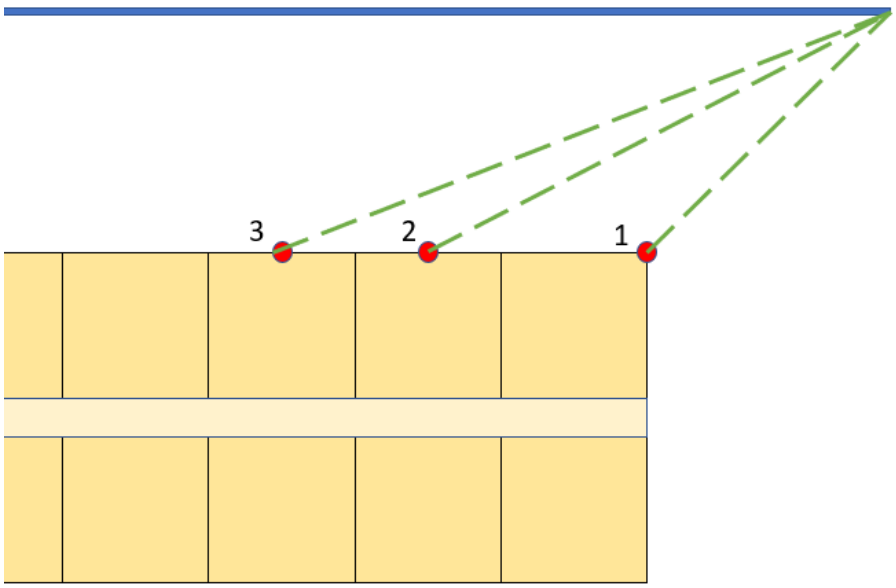
Beräkningar av ljudtrycksnivåer på grund av ljud som passerar bullerskärmen från en vinkel har utförts i Matlab. Vinkeln mellan undersökningspunkt på fasaden och närmsta oskärmade källa har beräknats genom trigonometriska samband. Undersökningspunkterna som valts på fasaden representerar exponeringspunkter som antagits vara representativa för respektive lägenhet. Baserat på antagandet att geometrin för huset och skärmen är symmetrisk (se Figur 18) har ekvivalenta ljudnivåer vid undersökningspunkter, för de från kanten 10 första lägenheterna

beräknats. Resultaten antas på grund av symmetri kunna representera båda sidor av huset, och därmed alla 20 lägenheter på den bullerutsatta sidan.



Figur 18. Illustration av flerbostadshusets antagna symmetri.

Undersökningspunkten för de yttersta lägenheterna har valts till hörnet mellan fasaden på husets långsida och fasaden på husets kortsida, eftersom båda dessa fasader utsätts för vägtrafikbuller. För de övriga 9 undersökningspunkterna (motsvarande resterande lägenheter på respektive sida om symmetrilinjen) har motsvarande lägenhets mittpunkt valts. Undersökningspunkter motsvarande de tre yttersta lägenheterna illustreras i Figur 19.



Figur 19. Illustration av exponeringspunkter motsvarande de tre yttersta lägenheterna på flerbostadshuset.

De ekvivalenta ljudnivåerna på grund av det sidoinkommande ljudet, L_{sida}, beräknas med hjälp av ekvation 12:

$$L_{sida} = L_{Aeq_OT} + \Delta L_a \quad (12)$$

Där L_{Aeq_OT} är den ekvivalenta ljudnivån utan bullerskärm och ΔL_a är en korrektionskoefficient (<0) som tar hänsyn till vinkeln mot oskärmat ljud. ΔL_a beräknas med hjälp av ekvation 13:

$$\Delta L_a = 10 \cdot log_{10}(\frac{a}{180}) \quad (13)$$

Där a är vinkeln i grader mot oskärmat ljud inkommande ljud. De beräknade ekvivalenta ljudnivåerna på grund av ljud som passerar bullerskärmen och når fasaden från en vinkel presenteras nedan i Tabell 9.

Tabell 9. De beräknade ekvivalenta ljudnivåerna på grund av oskärmat bullerbidrag.

Exponeringspunkt motsvarande lägenhet från yttre kant	**Vinkel mot oskärmad väg [°]**	**Ekvivalent ljudnivå på grund av oskärmat bullerbidrag [dBA]**
1	40,6	55,8
2	26,6	54,0
3	21,4	53,0
4	17,8	52,3
5	15,3	51,6
6	13,3	51,0
7	11,8	50,5
8	10,6	50,0
9	9,6	49,6
10	8,8	49,2

Den totala ekvivalenta ljudnivån vid respektive exponeringspunkt (motsvarande lägenheterna) ges av summan av energin hos det av bullerskyddsskärmen reducerade ljudet och det oskärmade bullerbidraget. Den totala ekvivalenta ljudnivån vid respektive lägenhets exponeringspunkt, på en av symmetrilinjens sidor har beräknats med hjälp av ekvation 14:

$$L = 10 \cdot log_{10}(\sum_{i=1}^{n} 10^{\left(\frac{L_i}{10}\right)}) \quad (14)$$

Resultatet av beräkningarna av total ljudtrycksnivå med skärm för respektive undersökningspunkt på en av symmetrilinjens sidor redovisas i Tabell 10.

Tabell 10. Beräkningarna av total ljudtrycksnivå för respektive undersökningspunkt på en av symmetrilinjens sidor.

Lägenhet från yttre kant av flerbostadshuset (för respektive sida om symmetrilinje)	Ljudtrycksnivå vid respektive lägenhets exponeringspunkt [dBA]
1	57,9
2	56,9
3	56,5
4	56,0
5	55,8
6	55,6
7	55,4
8	55,2
9	55,1
10	55,0

Utifrån informationen i Tabell 10 samt antagandet om flerbostadshusets symmetri har antalet lägenheter som är utsatta för respektive ljudtrycksnivåer summerats och presenteras i Tabell 11. De ekvivalenta ljudnivåernas styrka i dBA har i Tabell 11 avrundats till närmsta heltal. Tabell 11 visar även antalet personer boende i flerbostadshuset (två personer i varje lägenhet) som inuti sin bostad utsätts för respektive ekvivalent ljudnivå.

Tabell 11. Antalet lägenheter samt boende på bottenvåningen i det teoretiska flerbostadshuset, som utsätts för respektive ekvivalent ljudnivå med bullerskyddskärm.

Ljudnivå [dBA]	Antal lägenheter utsatta för respektive ekvivalent ljudnivå	Antal personer boende i lägenheter utsatta för respektive ekvivalent ljudnivå
58	2	4
57	4	8
56	6	12
55	8	16

5.4. Beräkning av bullerskärmens nytta

Den ekonomiska nyttan av bullerskärmen har beräknats med hjälp av data om vad buller kostar för bullerutsatta bostäder enligt Trafikverkets ASEK-modell (2020b). Presenterade värden för samhällskostnad med och utan bullerskyddsskärm med given effekt har jämförts och använts vid beräkning. Då Trafikverkets värden gäller 2017 har de räknats om med hjälp av Statistikmyndigheten SCBs prisomräknare (2022) till att gälla mars 2022. Beräkningar av bullerskärmens nytta har gjorts i Excel och återfinns som bilaga 1 och bilaga 2. Enligt beräkningar blir samhällskostnaden 2,32 miljoner kr/år utan bullerskyddsskärm och 1,78 miljoner kr/år med bullerskyddskärm.

Samhällsnyttan som bullerskärmen resulterar i representeras av differensen, och blir således 541 000 kr/år.

5.5. Nyttokostnadskalkyl

Värdet av kostnaderna och nyttorna som beräknats i kapitel 5.2 och kapitel 5.4 har använts för att göra en ekonomisk kalkyl, där nyttorna och kostnaderna, under hela den teoretiska bullerskyddsskärmens tekniska livslängd, vägs emot varandra. I följande kapitel redovisas utförda beräkningar.

5.5.1. Beräkningsmodell

Nyttokostnadsberäkningar har gjorts för bullerskyddsskärmens antagna tekniska livslängd, alltså 40 år. Trafikmängden på berörd sträcka på Delsjövägen har i analysen antagits vara konstant under bullerskärmens tekniska livslängd. För att uttrycka projektets summerade nyttor och kostnader under dess livstid i nuvärde har diskontering använts. Nuvärdessumma av kostnader och nyttor har i enighet med ASEK-modellen beräknats med ekvation 15 (Trafikverket, 2020a):

$$Summa\ nuvärde = \sum_{t=0}^{T} B_t \left[\frac{1}{(1+r)^t}\right] - \sum_{t=0}^{T} C_t \left[\frac{1}{(1+r)^t}\right] \quad (15)$$

Där C_t = kostnaden år t [kr]
B_t = nyttan år *t* [kr]
r = diskonteringsräntan [-]
T = kalkylperiodens längd, [år]

Då underhållskostnaden antas vara 0 kr/år (se avsnitt 5.2) blir C_t=0 för alla år utom det första, där investeringskostnaden är inräknad.
Nyttan, beräknad och presenterad i avsnitt 5.4 (541 000 kr), ger B_t=541 000.
Trafikverket rekommenderar att en diskonteringsränta på 3,5 % (*r*=0,035) används under de 30 första åren (Trafikverket, 2020c). På grund av det används 3,5 % diskonteringsränta för hela bullerskärmens tekniska livslängd i denna analys.
Kalkylperiodens längd har i avsnitt 5.3 bestämts till 40 år, vilket ger *T*=40.

5.5.2. Beräkningar och resultat

Över 40 års tid omräknat till nuvärde ges enligt ekvation (11) en kostnad på 1,84 miljoner. Det kan jämföras med nyttor som beräknats i

				2022	2040 (2017)
	Bullernivå utomhus	**16 m Före:** Boende resp bullernivå	**16 m Efter:** Boende resp ljudnivå	Total kostnad 2022 [kr]	Total kostnad prognos 2040
Källa inflation	50			188	238
SCB prisomräknare	51			586	740
2017-mars 2022	52			1196	1510
1,117	53			2015	2544
	54			3045	3844
	55		16	4285	5409
	56		12	5735	7239
	57		8	7396	9335
	58		4	9349	11802
	59			11497	14513
	60			13888	17531
	61			16507	20837
	62	120	80	19369	24449
	63			22473	28368
	64			25806	32575
	65			29364	37066
	66			33168	41868
	67			37214	46975
	68			41502	52390
	69			46024	58096
	70			50807	64136
	71			55820	70461
	72			61073	77093
	73			66571	84033
	74			72312	91281
	75			78315	98857
	Totalkostnad:	2324254	1783438		
	Nytta/år (differens):		540816		

Bilaga 1 och

	År	Nytta (Bt)	Nytta nuvärde	Kostnad	Kostnad nuvärde	Summa nuvärde
Indata	1	540816	522527	1840000	1840000	-1317473
Diskonterings-ränta:	2	540816	504857	0	0	504857
0,035	3	540816	487785	0	0	487785
	4	540816	471290	0	0	471290
	5	540816	455352	0	0	455352
	6	540816	439954	0	0	439954
	7	540816	425076	0	0	425076
	8	540816	410702	0	0	410702
	9	540816	396813	0	0	396813
	10	540816	383394	0	0	383394
	11	540816	370429	0	0	370429
	12	540816	357903	0	0	357903
	13	540816	345800	0	0	345800
	14	540816	334106	0	0	334106
	15	540816	322808	0	0	322808
	16	540816	311892	0	0	311892
	17	540816	301345	0	0	301345
	18	540816	291154	0	0	291154
	19	540816	281308	0	0	281308
	20	540816	271795	0	0	271795
	21	540816	262604	0	0	262604
	22	540816	253724	0	0	253724
	23	540816	245144	0	0	245144
	24	540816	236854	0	0	236854
	25	540816	228845	0	0	228845
	26	540816	221106	0	0	221106
	27	540816	213629	0	0	213629
	28	540816	206405	0	0	206405
	29	540816	199425	0	0	199425
	30	540816	192681	0	0	192681
	31	540816	186165	0	0	186165
	32	540816	179870	0	0	179870
	33	540816	173787	0	0	173787
	34	540816	167910	0	0	167910
	35	540816	162232	0	0	162232
	36	540816	156746	0	0	156746
	37	540816	151445	0	0	151445
	38	540816	146324	0	0	146324
	39	540816	141376	0	0	141376
	40	540816	136595	0	0	136595
			Summa nytta nuvärde		**Summa kostnad nuvärde**	**Summa nuvärde (Resultat)**
	Summa:		**11549157**		**1840000**	**9709157**

Bilaga och gett resultatet att nyttor på 11,55 miljoner kr för ett hus placerat 16 m från mitten av närmsta körfält genereras. I detta räkneexempel blir alltså investeringen

lönsam och går plus 9,71 miljoner kr. Nyttokvoten (genererad nytta delat med kostnaden) för investeringen blir 5,2.

5.5.3. Känslighetsanalys beroende på förändrad diskonteringsränta

Förändrad diskonteringsränta gör att det beräknade ekonomiska resultat förändras. I **Fel! Hittar inte referenskälla.** redovisas för hur resultatet varierar, beroende på vilken diskonteringsränta som antagits. Känslighetsanalysen har gjorts med diskonteringsräntor mellan 1 % och 7 %.

Tabell 12 Känslighetsanalys beroende på förändrad diskonteringsränta.

Diskonteringsränta	**Resultat nuvärde [miljoner kr]**	**Kvot**
1 %	15,9	8,6
2 %	13,0	7,1
3 %	10,7	5,8
3,5 %	9,7	5,3
4 %	8,9	4,8
5 %	7,4	4,0
6 %	6,3	3,4
7 %	5,4	2,9

6. Diskussion

Syftet med detta projekt var att utföra en nyttokostnadsanalys av låga bullerskyddsskärmar i urbana områden med hjälp av Trafikverkets nyttokostnadsanalysmodell ASEK. Samt att pröva genomförbarheten hos modellen, från insamling av data genom mätningar och simuleringar, till genomförandet och slutsatsen av själva nyttokostnadsanalysen. Under kommande delkapitel kommer diskussioner föras angående resultat, iakttagelser och brister kopplat till projektets syfte.

6.1. Placering av teoretiskt flerbostadshus

Under planeringsfasen av projektet var den initiala tanken att nyttokostnadsanalysen skulle göras för en teoretisk byggnad på avståndet 33,2 meter från närmsta körfälts mitt (beskrivet som undersökningspunkt 3 i kapitel 1.4). Detta motiveras under kapitel 1.4 genom jämförelse med omgivande byggnaders avstånd från vägen. Riktvärdena angående tillåtna ljudnivåer vid bostäder har dock förändrats sedan de omkringliggande byggnaderna byggdes, vilket innebär att placeringen av det teoretiska flerbostadshuset enligt gällande riktvärden kan göras närmare vägen. Vid analys av ljudmiljön på platsen, genom simulationer och mätningar, visade det sig att ljudnivåerna på detta avstånd troligtvis inte skulle komma att överskrida de riktlinjer eller krav som finns gällande ljudnivåer vid fasad. Därmed antogs nyttan av att bygga en bullerskärm för liten för att en nyttokostnadsanalys av ett hus på avståndet 33,2 meter skulle vara intressant (antagandet baseras på kostnaden för respektive ljudnivå och antal exponerade människor). På grund av detta valdes det teoretiska flerbostadshuset att placeras på ett närmare avstånd (16 meter från närmsta körfälts mitt), så att ljudnivåerna intill fasaden var högre. Denna närmare placering går även i linje med rådande förtätningstrender och är därmed också relevant att analysera (Boverket, 2016). Att placera huset närmare vägen ger en större yta bakom huset från vägen sett, och utökar därmed möjligheterna att nyttja den. Genom att placera bullerskyddsskärmen närmare vägen gjordes dess nytta större.

Det avstånd som i kapitel 1.4 benämns som undersökningspunkt 2 (14,1 meter från närmsta körfälts mitt) hade varit fördelaktigt att välja med tanke på att den undersökts i fältstudier och simuleringar. Problemet med att placera ett hus där är att fasaden då hamnar i direkt anslutning till cykel/gång-banan. För att undvika detta valdes därför en placering av flerbostadshuset på avståndet 16 meter från närmsta körfälts mitt, samt ca 2 meter från cykel/gångbanan. Att placera flerbostadshuset på det valda avståndet innebär att gällande krav på ljudnivåer vid fasad ej längre uppfylls utan bullerskyddsskärm med vald planlösning.

6.1.1. Motivering av bullerskyddsskärmens höjd

Trafikverket (2020f) har vissa krav på hur bullerskyddskärmar ska utformas för att skapa trygga miljöer. I vårt projekt har vi valt en 1 m hög bullerskyddskärm för att den ska gå att se över och på så sätt behålla känslan av ett öppet landskap. Det bedömer vi kan göra att tryggheten och välbefinnandet för människor i området ökar. Resultatet av beräkningarna visade på att bullerskyddsskärmens effekt var som störst då dess höjd sattes till 1,4 meter. Det framgick även att ökningen av dess effektivitet minskade efter 1,2 meters höjd, se Tabell 4 och Tabell 5. För att sänka ljudnivåerna på våning två och tre skulle en betydligt högre skärm behövas vilket vi bedömde ej var rimligt i området.

6.2. Felkällor vid simulering och modellering

Simuleringarna har gjorts i Matlab med ett script utvecklat av Jens Forssén (2012) som endast fungerar i vissa specifika fall med begränsad flexibilitet. Exempelvis är det ej möjligt att analysera modeller där mottagaren nås av direktljud. Därav gjordes beräkningar med en egenkonstruerad Matlab-kod som tar hänsyn till direktljudet.

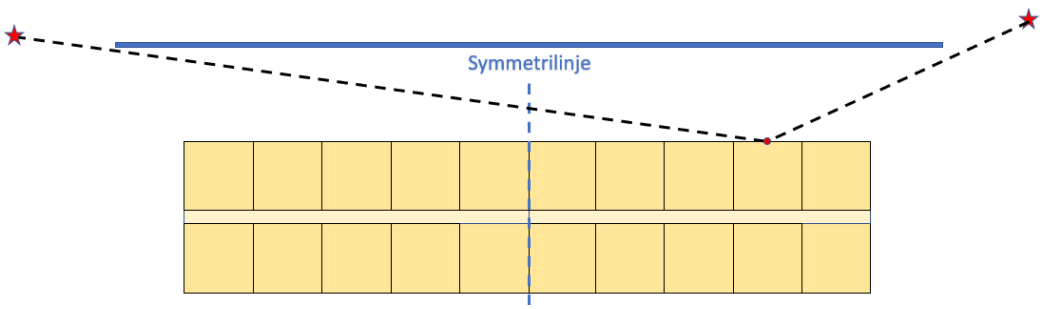
En annan nackdel med den använda Forsséns Matlab-kod är att det endast är möjligt att räkna på en typ av skärm. Vi har inte haft möjligheten att jämföra olika typer av skärmar, som skärmar av absorberande material eller skärmar med gröna ytor med sedumväggar eller klätterväxter, med klassiska hårda skärmar av trä eller betong. Den stora nackdelen med detta är att jämförelsen mellan olika typer av bullerskärmar för att se vilka som ger bäst nytta kontra pris inte har kunnat ske.

På samma sätt som enbart ett typ av material använts för modellering av skärmen så har simuleringarna gjorts med utgångspunkten att all den intilliggande marken är av ett homogent hårt material. Detta är dock inte fallet för grönytorna vilket räknas som mjuk mark medan bilvägen och gång- och cykelbanan räknas som hård mark. Markens hårdhet har egentligen en betydande roll för ljudets utbredning och mjuk mark absorberar mer ljud än hård mark. Det innebär att beräknad ljudnivå riskerar vara högre än den är i praktiken. Detta fenomen är dock beroende av avståndet mellan ljudkälla och mottagare - ju längre avstånd mellan dessa ju större absorption sker och ju större betydelse har detta fenomen (Höstmad, 2018).

6.2.1. Oskärmat bullerbidrag

De beräknade ljudnivåerna i kapitel 5.3 tar hänsyn till ljudstrålar som passerar bullerskyddsskärmen och når flerbostadshusets fasad från en vinkel. I beräkningarna har dock enbart den närmsta vinkelns påverkan beaktats trots att ljudkällor från båda sidorna kan förväntas ha en viss påverkan på ljudnivån. Detta gäller framför allt de lägenheter som är belägna nära mitten av flerbostadshusets fasad.

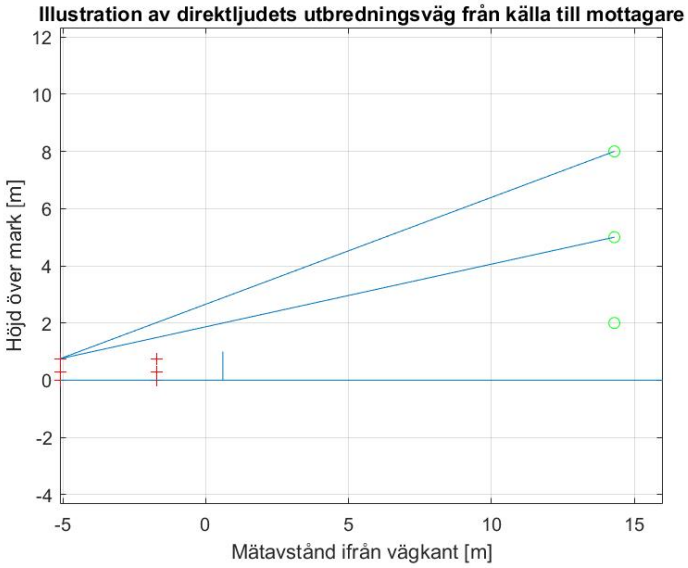
På grund av osäkerheter angående simuleringsmodellens precision har den bortre vinkelns påverkan försummats, då den antagits ge upphov till en mycket liten ljudnivåökning i relation till de osäkerheter som finns. I Figur 20 visas en illustration av utbredningsvägar från båda sidor av bullerskyddsskärmen till en av lägenheternas fasad, varav enbart den enes påverkan tagits i beaktande i detta projekt.



Figur 20: Illustration av ljudutbredningsvägar, från båda sidor av bullerskyddsskärmen, till en mottagarpunkt på flerbostadshusets fasad.

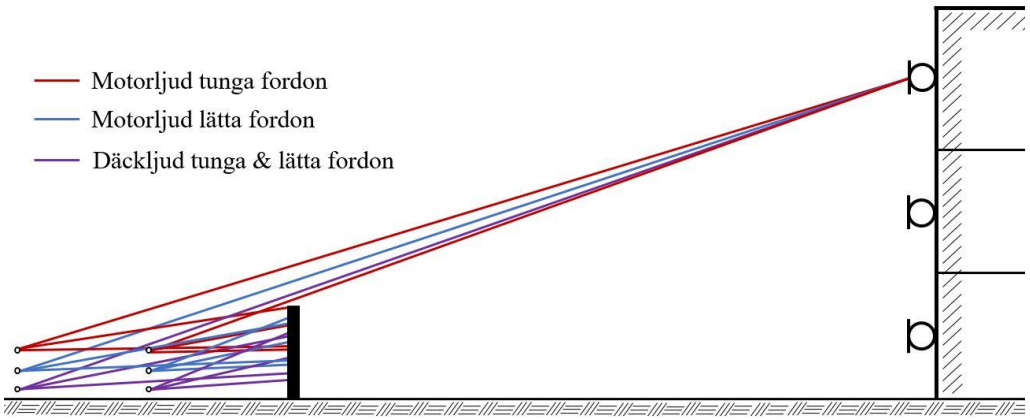
6.2.2. Direktljud

Våra beräkningar och simuleringar är gjorda med en mottagarhöjd på 1–2 m. När vi räknade ut ljudnivåerna för den teoretiska byggnaden så räknade vi på 3 olika våningar med en mottagarhöjd på 2, 5 och 8 m. Resultaten som presenteras i Tabell 8 visar en ljudnivåsänkning på bottenplan men de andra våningarna har samma ljudnivå med och utan skärm. Detta beror på direktljudet från ljudkällan som illustreras i Figur 21.



Figur 21:Direktljudet från ljudkällan till mottagaren.

I Figur 21 illustreras ett exempel på direktljudet från en källa, i stället för från de 6 källor som användes. I Figur 22 så visas ett mer generellt exempel på hur det kan se ut. Eftersom bullerskärmen inte ger någon effekt på våning 2 eller 3 så kan andra åtgärder behöva implementeras ifall kraven för byggnaden inte uppnås. En rad åtgärder kan utföras för biltrafiken så som minskad trafikmängd och sänkt hastighet vilket återfinns i Tabell 6. Lösningar för att minska ljudnivån inne i byggnaden kan vara fönster med bättre ljudisolering.



Figur 22: Principen för hur bullerskyddsskärmen ger upphov till att en så kallad skuggzon uppstår för ett fall med tre mottagare.

6.2.3. Geometrisk akustik

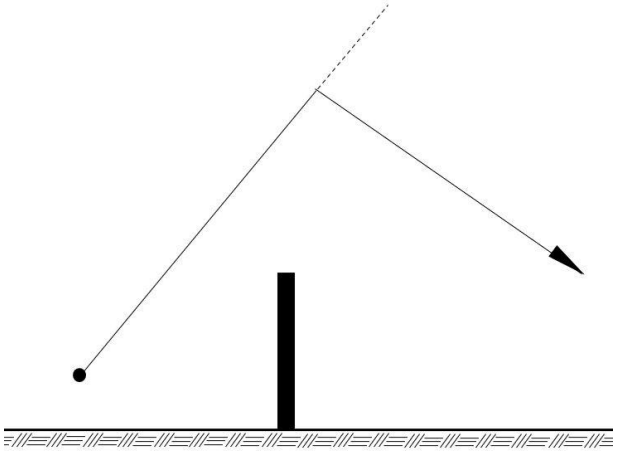
I arbetet har enbart modeller baserade på geometrisk akustik legat till grund för simuleringar och beräkningar. Modellerna beskriver ljudets spridning som linjer eller strålar (se kapitel 2.3) vilket innebär att ett flertal akustiska fenomen försummas. Meteorologiska yttre förhållanden, så kallade atmosfäriska inhomogeniteter, är någonting som kan ha markant effekt på ljudets utbredning och som inte alltid är försumbart. En sådan inhomogenitet kan till exempel vara att vindhastigheten ökar med höjden ovan marken, vilket kan leda till att ljudet bryts och dess utbredning ändrar riktning (Höstmad, 2018). Effekten av fenomenet har dock försummats, då den på grund av de förhållandevis korta avstånden som analyserats inte förväntas ge märkbara bidrag.

Ett annat meteorologiskt intressant fenomen är att lufttemperaturen sjunker med höjden vilket i sin tur också påverkar ljudhastigheten (Höstmad, 2018). Detta beskrivs enligt ekvation 16, där ljudhastigheten *c* beror av lufttemperaturen *T:*

$$c = \sqrt{401{,}37 \cdot T} \tag{16}$$

Till skillnad från hur vindhastigheten får ljudhastigheten att öka med höjden (i medvind) så får lufttemperaturens tendens att sjunka med höjden följaktligen ljudhastigheten att minska med höjden. Detta resulterar i att ljudvågorna kan beskrivas som att de böjs upp mot himlen och på liknande sätt som en bullerskyddsskärm skapa en skuggzon. Under vissa förhållanden kan dock motsatsen uppstå, det vill säga att luften är kallare nära marken än högre upp vilket gör att ljudvågorna i stället bryts nedåt. Detta kallas för inversion och kan till exempel uppstå under vintern på morgonen (Höstmad, 2018). Fenomenet ger effekt på längre avstånd än de som analyserats och har därmed försummats i detta projekt.

Ytterligare ett relevant meteorologiskt fenomen som ger en liknande effekt som inversion är turbulens (Höstmad, 2018). Turbulens innebär att ljud på grund av densitet- och hastighetsskillnader i luften sprids nedåt och därav på samma sätt som inversion kan direktljud ta sig förbi en bullerskärm och tränga sig in i den annars teoretiska skuggzonen (se Figur 23).



Figur 23: Turbulens är ett meteorologiskt fenomen som resulterar i att ljudet kan reflekteras i en annan riktning än den initiala. Detta innebär att direktljud kan passera en bullerskyddsskärm och därav tränga in i den teoretiska skuggzonen.

Det är alltså uppenbart att geometrisk akustik har tydliga begränsningar när det gäller hur väl modellen kan förväntas representera verkligheten. På samma sätt som med markförhållanden så beror också detta i hög grad på avståndet mellan ljudkälla och mottagare. Eftersom avståndet mellan ljudkälla och mottagare, det vill säga avståndet mellan vägen och byggnadens fasad, i detta fall är relativt litet (16 meter) så förutsätts de meteorologiska effekterna försumbara och således antas den geometriska modellen för ljudets spridning relevant och tillämpbar. För en mer generell studie av bullerskärmars nytta hade det å andra sidan funnits värde i att använda mer avancerade beräkningsmodeller.

6.3. Diskussion angående nyttokostnadsanalys och projektets genomförande

Under genomförande av nyttokostnadsanalysen för den teoretiska bullerskärmen framför det teoretiska flerbostadshuset fick projektgruppen en djupare inblick i ASEK-modellens uppbyggnad och syfte. Brister i analysmodellen och i utförandet av den har identifierats under arbetets gång. Analyser av modellen, samt arbetet att samla in data i syfte att kunna utföra den, presenteras under följande delkapitel.

6.3.1. Angående ASEK-modellens samt projektets genomförbarhet

För att kunna utföra en nyttokostnadsanalys enligt ASEK-modellen krävs stor kunskap om ljudmiljön på den berörda platsen. Detta är något som begränsar genomförbarheten, då insamling och tolkning av ljudnivådata kräver vissa

förkunskaper. Vidare finns i ASEK-modellen inga anvisningar eller rekommendationer för hur bullerdata ska samlas in.

Det finns datorprogram som kan göra mer korrekta och avancerade beräkningar av ljudmiljö än det Matlab-script som använts till denna rapport. Då projektgruppen saknade förkunskap om dessa program ansågs det generera för stor arbetsbörda. Om dessa program hade använts hade komplexare miljöer kunnat analyseras på ett mer korrekt sätt. Med andra ord krävs relativt stora förkunskaper för att generera indata som behövs för att göra en korrekt analys med hjälp av ASEK-modellen.

6.3.2. Brister hos ASEK-modellen

Vid analys av ASEK-modellens utformning har brister angående dess förhållningssätt till rådande krav kontra människors upplevelser upptäckts. Kraven angående ljudnivåer i urban miljö fokuserar näst intill uteslutande på hur människor drabbas vid vistelse inne i sina bostäder. Det framgår relativt tydligt att ASEK-modellen likt kraven, endast tar hänsyn till vilka ljudnivåer människor utsätts för inuti sina bostäder.

Detta innebär till exempel att bullerskärmens effekt på förbipasserande människor på gång- och cykelbanan inte tas i beaktande. Detta är något som projektgruppen hade velat se var möjligt. En analysmodell med möjligheter till djupare analyser av fler aspekter skulle kunna bidra med kunskap som krävs för att bygga ett samhälle med en mer hälsosam och tillfredsställande ljudmiljö. Enligt simuleringar presenterade i kapitel 3.2 har bullerskärmar relativt god effekt vid gång- och cykelbanan. Därmed är ett ökat välbehag för gång- och cykeltrafikanter att förvänta.

För att problematisera denna brist ytterligare kan spekulationer angående människors villighet att gå eller cykla på berörd sträcka göras. Det kan finnas människor som undviker områden med dålig ljudmiljö. Detta skulle kunna leda till att cyklister väljer en annan en annan väg, eller väljer att åka bil i stället. Att i ett miljömedvetet samhälle bygga infrastruktur som uppmuntrar hållbara beteenden, är något som projektgruppen tycker bör prioriteras.

Även människors villighet att utnyttja den befintliga gräsytan intill Delsjövägen kan möjligtvis påverkas av rådande bullersituation. Vad detta innebär i form av samhällsnytta går inte att analysera med hjälp av ASEK-modellen, men skulle vara intressant att ha med i modellen då det kan påverka resultatet.

En ytterligare aspekt som ej går att analysera med hjälp av ASEK-modellen är förändringen i stadsmiljön som uppförandet av en bullerskärm innebär. Detta är något som försämrar nyttokostnadsanalysmetodens kvalitet, då den upplevda tryggheten i området inte tas i hänsyn.

6.3.3. Brister i utförandet av nyttokostnadsanalys

Då detta projekt begränsats till att isolera bullerproblematiken och att med hjälp av ASEK-modellen enbart analysera den ifrån människors perspektiv, försvinner en del intressanta aspekter. En bullerskärm på den undersökta platsen har bieffekter utöver dess ljuddämpande egenskaper. Exempelvis kan den, som nämnts i kapitel 6.3.2, förändra den upplevda stadsmiljön. En annan effekt, av en eventuell bullerskärm är att den kan verka eller upplevas som en skyddsbarriär mot trafikerande fordon på Delsjövägen. Listan på aspekter kan göras lång och för att göra en fullskalig analys enligt ASEK-modellen krävs det att alla relevanta aspekter analyseras. Ett sådant arbete är extremt omfattande och är inte heller projektets syfte, men för att kunna dra några välgrundade slutsatser av nyttokostnadsanalysen hade en fullskalig sådan varit nödvändig.

Avgränsningen att enbart simulera effekten av bullerskärmar utav hårda material har inneburit att vissa intressanta aspekter ej kunnat undersökas. Växtbeklädda bullerskärmar har positiva egenskaper då de bland annat kan bidra till minskad partikelspridning, förbättrad luftkvalitet och ökad biologisk mångfald (Stockholms Stad, 2019). Gröna bullerskärmar riskerar dock att innebära större kostnader, både vid investering och underhåll. På grund av växtbeklädda bullerskärmars positiva effekter hade en analys av sådana varit intressant i detta projekt.

För att utöka precisionen vid uppskattning av bullerskärmens nytta hade förändringen av fastighetspriserna, till följd av den förbättrade ljudmiljön kunnat beaktas. Detta har inte gjort i detta projekt.

6.3.4. Genomgående felkällor i nyttokostnadsanalysen

Då hela problemformuleringen, utformningen av flerbostadshuset och bullerskyddsskärmen, samt den ekonomiska kalkylen grundar sig i antaganden (angående husets och bullerskärmens utformning, antal bullerutsatta, ekonomiska prognoser etcetera), råder det genom hela nyttokostnadsanalysen relativt omfattande osäkerheter. Kostnaden för att bygga en bullerskärm på platsen kan visa sig vara annorlunda en den som antagits, nyttan likaså. Exempelvis så presenteras i kapitel 5.5.3 olika resultat av nyttokostnadsanalysen, på grund av olika ansatta diskonteringsräntor. Då diskonteringsräntan enbart är ett verktyg för att göra ekonomiska prognoser kan den inte förväntas ge helt trovärdiga resultat. Om det i framtiden skulle visa sig att den ansatta diskonteringsräntan inte stämmer, finns risken att resultatet av nyttokostnadsanalysen är missvisande med upp till flera miljoner kronor.

6.4. Elektrifiering av fordonstrafik

Arbetet har gjorts under förutsättningen att samtliga fordon som passerar den undersökta delsträckan längs Delsjövägen har fossilbränsledrivna motorer, det vill säga fordon med till exempel diesel- eller bensinmotorer. Detta uppskattas vara representativt i dagsläget men elbilar är någonting som blivit allt vanligare de senaste åren och som dessutom förväntas stiga i popularitet.

För fossilbränsledrivna fordon är motorn den dominerande ljudkällan upp till omkring 30 km/h, därefter börjar däck- och vägljud bli mer dominerande och vid hastigheter över 100 km/h är dessutom turbulensen från aerodynamiken från fordonet en markant ljudkälla (Forssén, 2021). Således kan det antas att elfordon och fossilbränslefordon har en betydande skillnad i ljudnivå på lägre hastigheter. Detta bekräftas av Strandberg, Goubert, & Mioduszewski (2010) i rapporten *Are vehicles driven in electric mode so quiet that they need acoustic warning signals?* där författarna kommer fram till att vid 30 km/h är skillnaden i ljudnivå mellan de två fordonstyperna liten (omkring 2–3 dB). Detta syns också i figur 7 som visar att ljudeffekten för däckljud är högre än för motorljudet vid högre frekvenser (vid omkring 0,5 kHz).

Källornas position ovan mark har betydelse för fallet med en bullerskärm (se tabell 3 och figur 8). Enligt modellen passerar dock större andel av motorns direktljud förbi bullerskärmen och har i detta fall större inverkan på ljudnivån vid fasaden än däckljudet. På grund av detta kan det vara relevant att undersöka hur stor inverkan elektrifiering kan ha på bullerreduktionen tillsammans med bullerreducerande åtgärder som bullerskyddsskärmar.

7. Slutsats

Syftet med projektet var att utföra en nyttokostnadsanalys av låga bullerskyddsskärmar i urbana områden med hjälp av Trafikverkets nyttokostnadsanalysmodell, samt att undersöka genomförbarheten hos modellen. Bullerproblematiken på den valda undersökningsplatsen analyserades med hjälp av insamlade data och simuleringar.

Det visade sig under arbetets gång att simuleringar och mätningar i fält gav aningen olika resultat gällande ekvivalenta ljudnivåer, trots att samma plats undersökts. Anledningen till detta tros vara dels brister i modelleringen av simuleringarna, dels eventuella icke-representativa förutsättningar under fältstudien. Att med hjälp av Matlab modellera ljudlandskap och generera data, kan inte förväntas ge helt realistiska värden. Akustiska modeller är i allmänhet extremt komplexa, vilket innebär att förenklingar av verkliga ljudlandskap är nödvändiga i de fall då avancerade modelleringsverktyg inte används.

Trafikverkets nyttokostnadsanalysmodell ASEK är utformad på ett sätt som fokuserar på samhällsnyttan av reducerade ljudnivåer vid bostäder. Modellen är inte lämplig att använda vid analys av bulleråtgärder i områden där bostäder ej förekommer.

För den utförda nyttokostnadsanalysen visade sig nyttorna av en bullerskärm vara mycket stora i förhållande till kostnaderna. Dock förekommer stora osäkerheter, då alla beräkningssteg innehåller flera felkällor. Uppskattning av både kostnader och nyttor innehåller antaganden som kan ha relativt stor påverkan på resultatet. Förändring av de använda ekonomiska prognoserna hade också genererat ett annorlunda resultat.

Litteraturförteckning

Boverket. (2016). *Rätt tätt - en idéskrift om förtätning av städer och orter.* https://www.boverket.se/globalassets/publikationer/dokument/2016/ratt-tatt-en-ideskrift-om-fortatning-av-stader-orter.pdf.

Boverket. (2019). *Fördjupad utvärdering av god bebyggd miljö.* https://www.boverket.se/globalassets/publikationer/dokument/2019/fordjupad-utvardering-av-god-bebyggd-miljo.pdf.

Bra bullerplank AB. (u.å). Bullerplank BPA 263L. https://brabuller.b-cdn.net/wp-content/uploads/2020/04/Absorberande-BPA263L-CE.pdf.

Brüel & Kjær. (u.å.). Modular Precision Sound Analyzer – 2260 InvestigatorTM including BZ 7206 and BZ 7210 Sound Analysis Softwarre [Produktblad]. https://www.bksv.com/media/doc/bp1750.pdf.

European Commission. (2011). *Common noise assessment methods in Europe (CNOSSOS-EU).* doi:10.2788/32029

European Environment Agency. (2020). *Environmental noise in Europe.* doi:10.2800/686249

Folkhälsomyndigheten. (2021). *Miljöhälsorapport.* https://www.folkhalsomyndigheten.se/publicerat-material/publikationsarkiv/m/miljohalsorapport-2021/?pub=88328.

Forssén, J. (2012). Script for calculation and plot of abetement effect 2012-08-21 (HOSANNA) [MATLAB-script]. Avdelningen för teknisk akustik, Chalmers Tekniska Högskola.

Forssén, J. (2021). Ljudmiljö i samhällsplanering. Avdelningen för teknisk akustik, Chalmers Tekniska Högskola.

Google. (2022). Bilder ©2022 Google, Bilder ©2022 Aerodata International Surveys, CNES / Airbus, Lantmäteriet/Metria, Maxar.

Göteborgs Stad. (2014). *Vad kostar det? En lathund för en första kostnadsbedömning av vanliga anläggningsprojekt.*

Göteborgs Stad. (u.å.). *Trafikmängder på olika gator.* https://goteborg.se/wps/portal/start/gator-vagar-och-torg/gator-och-vagar/statistik-om-trafiken/trafikmangder-pa-olika.

Höstmad, P. (2018). 4. Ljudutbredningar. Avdelningen för teknisk akustik, Chalmers Tekniska Högskola.

Höstmad, P., & Kropp, W. (2017). 3. Wave motion. Avdelningen för teknisk akustik, Chalmers Tekniska Högskola.

International Electrotechnical Commission. (2002). Electroacoustics – Sound level meters – Part 1: Specifications (IEC 61672–1). https://webstore.iec.ch/preview/info_iec61672-1%7Bed1.0%7Den_d.pdf.

Jonasson, H. G. (2006). *Acoustic Source Modelling of Nordic Road Vehicles.*

Khalaj, E. S. (2011). *Bullerskyddsåtgärder vid järnväg - Statusbeskrivning och förbättringsförslag.*

Kragh, J., Jonasson, H., & Plovsing, B. (2006). *User's Guide Nord2000 Road.* https://referencelaboratoriet.dk/metodeliste/2006_av117106-Users-Guide-Nord2000-Road.pdf.

Nilsson, R. (2010). *Funktionell renögering av bullerreducerande beläggningar - etapp 1.* https://fudinfo.trafikverket.se/fudinfoexternwebb/Publikationer/Publikationer_001101_001200/Publikation_001116/SBUF_TA_SPOL_Delrapport.pdf.

Nordtest. (2002). NORDTEST Method. *ROAD TRAFFIC: MEASUREMENT OF NOISE IMMISSION – ENGINEERING METHOD*.

Persson, M. (2000). *Hälsa på lika villkor - nationella mål för folkhälsan (SOU 2000:91).* https://www.regeringen.se/49b6c3/contentassets/064128c1fd3e4722b3769138f205ef46/halsa-pa-lika-villkor.

SFS 2004:675. (2014). *Förordning (2004:675) om omgivningsbuller*. Miljödepartementet: https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/forordning-2004675-om-omgivningsbuller_sfs-2004-675.

SFS 2015:216. (u.d.). *Förordning (2015:216) om trafikbuller vid bostadsbyggnader*. Finansdepartementet SPN: https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/forordning-2015216-om-trafikbuller-vid_sfs-2015-216.

Statistikmyndigheten SCB. (2016). *Vanligast med 2 rum och kök på 57 kvadratmeter*. Hämtat från https://www.scb.se/hitta-statistik/artiklar/2016/Vanligast-med-2-rum-och-kok-pa-57-kvadratmeter/#:~:text=I%20Sveriges%20tre%20storstadskommuner%20bor,Stockholm%20och%20l%C3%A4gst%20i%20G%C3%B6teborg den 11 april 2022

Statistikmyndigheten SCB. (2018). *Hushållens boende 2017: Vanligast för barn att bo i småhus*. Hämtat från https://www.scb.se/hitta-statistik/statistik-efter-amne/hushallens-ekonomi/inkomster-och-inkomstfordelning/hushallens-boende/pong/statistiknyhet/hushallens-boende/#:~:text=Det%20genomsnittliga%20antalet%20boende%20skiljer,personer%20per%20hush%C3%A5ll%20i den 11 april 2022

Statistikmyndigheten SCB. (2022). *Prisomräknare*. Hämtat från https://www.scb.se/hitta-statistik/sverige-i-siffror/prisomraknaren/ den 22 april 2022

Stockholms Stad. (2019). Gröna lösningar för en bättre ljudmiljö. https://miljobarometern.stockholm.se/content/docs/tema/buller/Grona-losningar-for-en-battre-ljudmiljo.pdf.

Strandberg, U., Goubert, L., & Mioduszewski, P. (2010). *Are vehicles driven in electric mode so quiet that they.* https://www.researchgate.net/publication/267802918_Are_vehicles_driven_in_electric_mode_so_quiet_that_they_need_acoustic_warning_signals.

Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut. (2005). *Bullerskärmar av trä.* https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:961332/FULLTEXT01.pdf.

Trafikverket. (2019). *Tillgänglighet i ett hållbart samhälle: Målbild 2030.* http://trafikverket.diva-portal.org/smash/get/diva2:1366742/FULLTEXT01.pdf.

Trafikverket. (2020a). *Analysmetod och samhällsekonomiska kalkylvärden för transportsektorn: ASEK 7.0.* https://www.trafikverket.se/contentassets/4b1c1005597d47bda386d81dd3444b24/asek-2021/asek-7_0-hela-rapporten-210601.pdf.

Trafikverket. (2020b). *Analysmetod och samhällsekonomiska kalkylvärden för transportsektorn: ASEK 7.0.* Kapitel 5 Tillämpade kalkylmodeller och generella kalkylvärden: https://bransch.trafikverket.se/contentassets/4b1c1005597d47bda386d81dd3444b24/asek-2021/05_modelltillampning_o_kalkylvarden_a70.pdf.

Trafikverket. (2020c). *Analysmetod och samhällsekonomiska kalkylvärden för transportsektorn: ASEK 7.0.* Kapitel 10 kostnad för buller: https://bransch.trafikverket.se/contentassets/4b1c1005597d47bda386d81dd3444b24/asek-2021/10_buller_a7.pdf.

Trafikverket. (2020d). *Buller från vägtrafik.* https://bransch.trafikverket.se/for-dig-i-branschen/miljo---for-dig-i-branschen/buller-och-vibrationer---for-dig-i-branschen/Fakta-om-buller-och-vibrationer/buller-fran-vagtrafik/.

Trafikverket. (2020e). *Buller och vibrationer från trafik på väg och järnväg.* https://trvdokument.trafikverket.se/fileHandler.ashx?typ=showdokument&id=1382f1e9-bae5-4bcb-ab4a-5809d72dd356.

Trafikverket. (2020f). *Krav - VGU, Vägars och gators utformning.* https://trafikverket.ineko.se/se/krav-vgu-v%C3%A4gars-och-gators-utformning.

Trafikverket. (2021). *Bro och broliknande konstruktion, Byggande.* https://puben.trafikverket.se/dpub/visa-dokument/83177c7c-9dea-4d47-ab1d-19ae1db9ccc3.

World Health Organisation. (2018). *World Health Organization Regional Office for Europe.* https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0009/383922/noise-guidelines-exec-sum-eng.pdf.

INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH
SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2022
www.chalmers.se

Bilagor

				2022	2040 (2017)
	Bullernivå utomhus	**16 m Före:** Boende resp bullernivå	**16 m Efter:** Boende resp ljudnivå	Total kostnad 2022 [kr]	Total kostnad prognos 2040
Källa inflation	50			188	238
SCB prisomräknare	51			586	740
2017-mars 2022	52			1196	1510
1,117	53			2015	2544
	54			3045	3844
	55		16	4285	5409
	56		12	5735	7239
	57		8	7396	9335
	58		4	9349	11802
	59			11497	14513
	60			13888	17531
	61			16507	20837
	62	120	80	19369	24449
	63			22473	28368
	64			25806	32575
	65			29364	37066
	66			33168	41868
	67			37214	46975
	68			41502	52390
	69			46024	58096
	70			50807	64136
	71			55820	70461
	72			61073	77093
	73			66571	84033
	74			72312	91281
	75			78315	98857
	Totalkostnad:	2324254	1783438		
	Nytta/år (differens):		540816		

Bilaga 1. Antal lägenheter på respektive ljudnivå, beräknade bullerkostnader för 2022 och 2040 samt kostnad före och efter installation av bullerskyddskärm samt differensen (genererad nytta) av skärmen).

	År	Nytta (Bt)	Nytta nuvärde	Kostnad	Kostnad nuvärde	Summa nuvärde
Indata	1	540816	522527	1840000	1840000	-1317473
Diskonterings-ränta:	2	540816	504857	0	0	504857
0,035	3	540816	487785	0	0	487785
	4	540816	471290	0	0	471290
	5	540816	455352	0	0	455352
	6	540816	439954	0	0	439954
	7	540816	425076	0	0	425076
	8	540816	410702	0	0	410702
	9	540816	396813	0	0	396813
	10	540816	383394	0	0	383394
	11	540816	370429	0	0	370429
	12	540816	357903	0	0	357903
	13	540816	345800	0	0	345800
	14	540816	334106	0	0	334106
	15	540816	322808	0	0	322808
	16	540816	311892	0	0	311892
	17	540816	301345	0	0	301345
	18	540816	291154	0	0	291154
	19	540816	281308	0	0	281308
	20	540816	271795	0	0	271795
	21	540816	262604	0	0	262604
	22	540816	253724	0	0	253724
	23	540816	245144	0	0	245144
	24	540816	236854	0	0	236854
	25	540816	228845	0	0	228845
	26	540816	221106	0	0	221106
	27	540816	213629	0	0	213629
	28	540816	206405	0	0	206405
	29	540816	199425	0	0	199425
	30	540816	192681	0	0	192681
	31	540816	186165	0	0	186165
	32	540816	179870	0	0	179870
	33	540816	173787	0	0	173787
	34	540816	167910	0	0	167910
	35	540816	162232	0	0	162232
	36	540816	156746	0	0	156746
	37	540816	151445	0	0	151445
	38	540816	146324	0	0	146324
	39	540816	141376	0	0	141376
	40	540816	136595	0	0	136595
			Summa nytta nuvärde		**Summa kostnad nuvärde**	**Summa nuvärde (Resultat)**
	Summa:		**11549157**		**1840000**	**9709157**

Bilaga 2. Beräkning av nytta, kostnad och resultat, omräknat till nuvärde med 3,5% diskonteringsränta.