



CHALMERS



Hur korrugering i Göteborgs spårvagnssystem påverkar ljudbuller

Analys av samband mellan rälets kvalitet och akustiska emissioner i urban miljö

Kandidatarbete inom MMSX21

HUGO BÖÖK
RUBEN LINUSSON FOLLIN
ROBIN OSKARSSON

LUDVIG SPARF
PHILIP TRÅNGTEG
MUNIRA YASSIN

INSTITUTIONEN FÖR MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2026
www.chalmers.se

KANDIDATARBETE I MMSX21

Hur korrugering i Göteborgs spårvagnssystem påverkar ljudbuller

Analys av samband mellan rälsens kvalitet och
akustiska emissioner i urban miljö

HUGO BÖÖK
RUBEN LINUSSON FOLLIN
ROBIN OSKARSSON
LUDVIG SPARF
PHILIP TRÅNGTEG
MUNIRA YASSIN



CHALMERS

Institutionen för Mekanik och Maritima Vetenskaper
Avdelningen för dynamik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg 2026

Hur korrugering i Göteborgs spårvagnssystem påverkar ljudbuller.

Analys av samband mellan rälets kvalitet och akustiska emissioner i urban miljö.

HUGO BÖÖK
RUBEN LINUSSON FOLLIN
ROBIN OSKARSSON
LUDVIG SPARF
PHILIP TRÅNGTEG
MUNIRA YASSIN

© HUGO BÖÖK, RUBEN LINUSSON FOLLIN, ROBIN OSKARSSON,
LUDVIG SPARF, PHILIP TRÅNGTEG, MUNIRA YASSIN, 2026.

Handledare:

Björn Pålsson, Mekanik och Maritima Vetenskaper
Mimmi Mickelsen, Stadsmiljöförvaltningen Göteborgs Stad

Examinator:

Anders Ekberg, Mekanik och Maritima Vetenskaper

Kandidatarbete 2026

Institutionen för Mekanik och Maritima Vetenskaper

Chalmers Tekniska Högskola

SE-412 96 Göteborg

Telefon +46 31 772 1000

Omslagsbild: Spårvagn av modell M31B. Foto: (Škoda Group/Ekova, 2024). Återgi-
ven med tillstånd. På framsidan.

Typsatt i L^AT_EX

Göteborg 2026

Sammandrag

Denna rapport undersöker rälskorrugering och dess påverkan på ljudmiljön i anslutning till Göteborgs spårvägsnät. Rälskorrugering, ett vågformigt slitage på rälen, är ett problem i samhället då det genererar betydande rullbuller och vibrationer som stör omgivningen. Syftet med studien har varit att identifiera och kvantifiera samband mellan graden av korrugering och de resulterande ljudnivåerna.

Metoden har innefattat fältmätningar på ett flertal utvalda platser i Göteborg där ljuddatan samlas in. De insamlade ljudfilerna efterprocesseras digitalt i Python eller Matlab för att isolera ljudbullrets bidrag till den totala ljudbilden. Denna process tar hänsyn till osäkerhetsfaktorer och är nödvändig för att skapa jämförbara mätningar vid olika mätplatser. Den färdigställda datan analyseras vidare tillsammans med mätdata av korrugeringen på räls tillhandahållet av Göteborgs Spårvägar för att besvara frågeställningen.

Resultaten visar att ökad korrugering är en mycket bidragande faktor till ökade bullernivåer, det kan ses som en övergripande trend men andra faktorer kan även ha en stor påverkan på ljudbilden. Efter att ha jämfört nyslipad räl med kraftigt korrugerad räl på samma mätplats har en sänkning av ljudnivån med ca 7 dB kunnat konstaterat. Efter slippning blir även variansen i ljudmätningarna mindre. Det kan ses att ökade hastigheter leder till ökad bullernivå. De olika modellerna på spårvagnsystemet uppför sig olika där M32 har högst enskilda ljudtoppar och även det högsta genomsnittliga bullret beräknat över ett tidsfönster på tre sekunder runt ljudtopp. Därefter kommer M29 med näst högsta medelvärden och sedan resterande modeller med genomsnittliga värden cirka 2 dB lägre än M32.

Utifrån detta kan skillnader i ytråhet konstateras vara viktigt för ljudbilden men det är inte ensamt den drivande faktorn. Korrugering är alltså en viktig bidragande faktor till ljudproblem i Göteborgs spårvägsnät och att gå till ett mer frekvent och datadrivet underhållsarbete är en effektiv strategi för spårförvaltare att minska buller.

Nyckelord: korrugering, ljudbuller, spårvagnstrafik, spårväg, akustik, Göteborg

Förord

Detta kandidatarbete har genomförts under vårterminen 2026 vid institutionen för Mechanical Engineering på Chalmers tekniska högskola inom kursen MMSX21. I arbetet med rapporten och utvecklingen av den digitala efterprocesseringen har generativ AI använts som ett stödverktyg. Verktöget har använts för språklig bearbetning och kodutveckling. Allt genererat innehåll har granskats, faktrakontrollerats och verifierats av författarna för att säkerställa att slutsatser och tekniska beräkningar är korrekta och vilar på vetenskaplig grund. Författarna bär det fulla ansvaret för rapportens slutgiltiga innehåll och resultat.

Vi skulle vilja tacka våra handledare Anders Ekberg och Björn Pålsson från Chalmers tekniska högskola samt Mimmi Mickelsen från Stadsmiljöförvaltningen på Göteborgs Stad för deras kunskap och kontakter. Vi vill också tacka Fredrik Holmström från Göteborgs Spårvägar för allt material och data vi fått tillgång till. Vi vill slutligen tacka Louise Thörn, Sven-Ivar Karlsson och Tilda Antonsson från InTransit för deras hjälp med bevakning och bollande av idéer.

Göteborg, maj 2026

Hugo Böök, Ruben Linusson Follin, Robin Oskarsson, Ludvig Sparf, Philip Trångteg, Munira Yassin,

Innehåll

1	Inledning	2
1.1	Bakgrund	2
1.2	Syfte och mål	4
1.3	Avgränsningar	4
1.4	Problemställning	4
2	Teori	5
2.1	Spårvägssystem och spårvagnsmodeller	5
2.2	Slitageprocesser, resonanser och deformationer	7
3	Metod	9
3.1	Studieområde och mätplatser	9
3.2	Bullermättningsmetod	10
3.2.1	Mätutrustning	11
3.3	Efterbearbetning av ljudsignal	12
3.3.1	Signalbearbetning	12
3.4	Statistisk metod	13
3.4.1	Datavalidering	13
3.4.2	Regressionsmodell	13
3.4.3	Modellvalidering	14
4	Resultat	15
4.1	Explorativ dataanalys	15
4.2	Statistisk analys	20
4.2.1	Regressionsmodeller	22
4.2.2	Valideringsanalys	25
5	Diskussion	27
5.1	Resultatdiskussion	27
5.1.1	Tolkning av uppmätta samband	27
5.1.2	Inverkan av slitage och rälsens tillstånd	27
5.1.3	Fordonens betydelse för bulleralstring	28
5.1.4	Statistisk diskussion	28
5.1.5	Jämförelse med tidigare studier	29
5.2	Osäkerheter	30

5.2.1	Metodosäkerhet	30
5.2.2	Mätosäkerhet	30
5.2.3	Efterprocesseringsosäkerhet	31
6	Slutsatser	32
7	Förslag till fortsatt arbete	34
	Litteraturförteckning	35

1

Inledning

När en spårvagn passerar hörs ibland ett gnisslande ljud kombinerat med dovt mul-
ler. Detta är ett problem i det befintliga spårvägssystemet i Göteborg. Men ett
fungerande spårvägssystem är avgörande för att hundratusentals göteborgare ska ta
sig runt i staden dagligen. Den regelbundna spårvagnstrafiken leder till att rälerna
slits och korrugering sker. Korrugering innebär att stålet slits ojämnt så att ett våg-
mönster av räfflor uppstår i rälshuvudet. Hur påverkar korrugering ljudbuller och
kan statistik utifrån detta hjälpa att förbättra spårvägsnätet?

Då spårvagnarnas hjul rullar över räfflorna uppstår vibrationer. Detta orsakar buller
och markvibrationer som kan vara både irriterade och hälsostörande för människor
som bor och rör sig i närheten. Avsikten med detta arbete är att undersöka om
det finns ett samband mellan korrugering på rälerna och den faktiska bullernivån som
uppstår när olika spårvagnstyper passerar. Utifrån detta diskuteras även lösningar
till problemet och hur implementering av lösningar kan förbättra dagens spårvagns-
system.

1.1 Bakgrund

Under hösten 2025 genomfördes en manuell inspektion av rälskorruering vid Red-
bergsplatsen (Ekberg & Pålsson, 2025). De preliminära slutsatserna visade att upp-
mätta bullernivåer tydligt skiljer sig mellan korrugerad och ickekorrugerad räl. In-
spektionen kunde även visa att korrugeringstypen varierade beroende på inbroms-
ning, acceleration samt vid kurvtagning. Vid inspektionen noterades även att spår-
vagnsmodellen M32 verkade bullra mest.

Tidiga studier av korrugering visar att fenomenet inte är ett problem kopplat till en
enskild slitagefaktor utan det uppkommer av flera orsaker. Fenomenet styrs alltid av
två samverkande faktorer, en våglängdsfixerande mekanism och en skademekanism
(Grassie & Kalousek, 1993). Skademekanismen är ofta i form av nötning eller plastisk
deformation och den våglängdsfixerande mekanismen ger upphov till periodiciteten.
Nötning är den mekaniska process där material gradvis slits bort från rälshuvudet
genom kontakten med hjulet. Vid uppkomsten av korrugering är nötningen ojämn
(periodisk), vilket innebär att mer material försvinner i de dalar som bildas på rälerna

medan topparna slits mindre.

(Grassie, 2009) vidareutvecklar tidigare teori och betonar samspelet mellan fordon och spår, vilket fungerar som en självförstärkande kedjereaktion. En liten ojämnheter i rälen skapar vibrationer i fordonet. Detta ökar krafterna mot spåret och leder till att korrugering växer snabbare över tid.

Medan den tidigare forskningen fokuserade på teoretiska modeller och kategorisering av korrugeringsuppkomst betyder arbetet (Thompson, 1996) ett genombrott för att säkerställa tidigare teorier i praktiken. (Thompson, 1996, s. 149) fastställde ett direkt linjärt samband mellan rälets ytråhet och genererat rullbuller och skriver det som ”experimental evidence from a number of sources is presented to confirm the linear relation between roughness and noise”. Studien visade att ojämnheter för våglängder mellan 10 och 300 mm är det mest kritiska för ljudutbredningen. Thompson (1996, s. 151) betonade även vikten av att se till hela systemet då ojämnheter på hjul respektive räl beskrivs som matematiskt ekvivalenta. Detta innebär att det är den totala ojämnheten som är avgörande för bullret oavsett om den härstammar från fordonets hjul eller räl.

Så korrugering är inte endast ett mekaniskt och strukturellt problem som sliter på räl och hjul utan även en av den viktigaste faktorerna för spårsystemets bullernivåer. När Thompson (1996) kunde säkerställa detta blir teorin till ett konkret verktyg för att beräkna bulleremissioner. Detta skifte från teoretiska antagande till empiriska bevis lade grunden för dagens precisionsunderhåll och kravställning.

För att kunna tillämpa Thompson fastställda linjära samband och se om den stämmer på Göteborgs spårvägsnät har tillgång beviljats för data från de årliga korrugeringsmätningarna. Mätningarna för år 2025 och 2026 är framställda av Göteborgs Spårvägar, GS.

Idag används teknik för att upptäcka korrugering och hjulskador för att aktivt förhindra dess uppkomst. Det kan hanteras genom tekniska specifikationer och användning av friktionsmodifierare i stället för att endast behandla uppstådd korrugering genom slipning. I vissa projekt, som Klang Valley Mass Rapid Transit i Kuala Lumpur, har korrugering framgångsrikt minimerats under de första driftåren (Grassie, 2023). Det gjordes genom att ställa specifika krav på spårstyvhet, materialval och användning av friktionsmodifierare. Detta visar på att korrugering idag inte längre behöver ses som ett oundvikligt problem utan snarare som en konsekvens av designval.

Denna systemövergripande syn bekräftas Internationella järnvägsunionens, rapport *Harmonization-Running Behaviour and Noise on Measurement Sites*, HRMS, (UIC, 2014) som beskriver hur teknisk förståelse omsätts i praktiken genom mätstationer. Rapporten poängterar att genom integration av fasta mätplatser för buller kan systemägare, som Stadsmiljöförvaltningen på Göteborgs Stad, gå från reaktivt underhåll till en datadriven strategi.

Därmed konstateras att modern rälshantering inte längre handlar om en enskild åtgärd, utan en effektiv kombination av preventiv design av spårvagnar och spår, precisionslipning och automatiserad fordonskontroll (Grassie, 2023).

1.2 Syfte och mål

Syftet med detta projekt är att undersöka samband mellan korrugering och bullernivå mellan olika vagnstyper. Vidare ska analysen och diskussionen av resultaten kunna användas som underlag för att få en förståelse i vilken betydelse korrugering har på bullernivån.

1.3 Avgränsningar

Detta arbete är avgränsat till ljudmätningar utifrån korrugering på räler som används i spårvägstrafik i Göteborg. Studien omfattar enbart spårvägstrafik och inkluderar därmed inte järnvägstrafik. Mätningarna genomförs på ett begränsat antal mätplatser på grund av begränsning av tid och tillgång till insamlade data från mätvagn, vilket beskrivs vidare i kapitel 3. Detta innebär att resultaten inte är generaliserbara för hela spårvägsnätet. Samtliga mätningar genomförs utomhus under dagtid. Inomhusmätningar eller laboratoriemätningar ingår inte i studien.

Vidare bidrag från andra bullerkällor såsom vägtrafik, vind och övrigt omgivande stadsljud kommer påverka i begränsad omfattning. Fokus för studien ligger på det ljud som kan kopplas till rälsens korrugering, snarare än fullständig kartläggning av bullerkällor i miljön. Notera att "skriklyd" från till exempel en kurvtagning ej är aktuellt utan det är det dova ljudet i frekvensområdet under 200 Hz från korrugering som studeras.

1.4 Problemställning

- Undersöka korrelationen mellan uppmätt bullernivå och korrugering.
- Utvärdera hur korrugeringsnivå och vagnstyp påverkar bullernivå.
- Undersöka om Thompssons linjära samband stämmer överens med mätresultaten.

2

Teori

För att förstå arbetet behövs en viss förståelse av teorin som ligger till grund för ljudbuller och hur systemet för spårvagnar är uppbyggda.

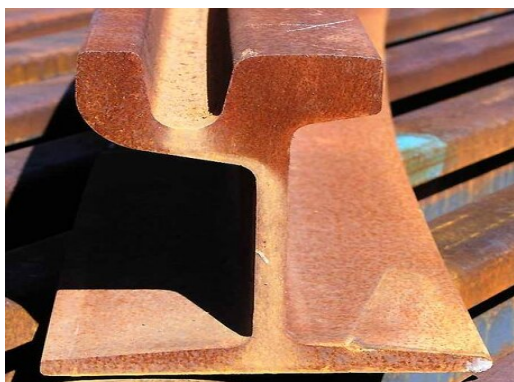
2.1 Spårvägssystem och spårvagnsmodeller

Spårvägssystem är ett rälsburet transportsystem där fordon, likt järnväg, kör på och guidas av två räler.

		
Räl, dvs enskild stålprofil som hjulen rullar på.	Plural, två räler.	Spår eller räls, dvs två parallella räler som binds samman med till exempel slipers.

Figur 2.1: Benämning av metallprofiler som används för spårväg.

Till skillnad från järnväg interagerar spårväg ofta med andra transportslag i stadsmiljö. Spårvagnar tillåter mindre kurvradier och har vanligtvis lägre tillåtna hastigheter än järnväg. Spårvägen kan byggas med antingen vignolräl för egen banvall eller med gaturäl för gatumiljö eller gräsklädda spår (Moriðpour & Hesami, 2015)



(a) Gaturäl



(b) Vignolräl

Figur 2.2: Profiler på två olika räiltyper. (Emdx, 2005; Meggar, 2007). CC By-SA. CC0

Göteborgs spårvägsnät består i huvudsak av gaturäl med asfalt mellan rälerna i de centrala delarna av staden medan stadsbanorna ut mot stadens ytterkanter i huvudsak är vignolräl med trä- eller betongslipers mellan rälerna. Hela nätet är byggt med spårvidden 1435 mm och har kurvorna i nätet har kurvradier mellan 20 och 159 meter där de snävare kurvorna generellt består av gaturäl och de större kurvorna gatu- eller vignolräl (Stadsmiljöförvaltningen, Göteborgs Stad, personlig kommunikation, 27 feb 2026)

Idag trafikeras Göteborgs spårvägsnät av sex spårvagnsmodeller (Göteborgs Spårvagnar, u. å.). Den äldsta modellen, M29 (Hägglunds), är en höggolvsvagn byggd mellan 1969 och 1972. Vagnen består endast av en 15 meter lång del med två pivotboggier (rörliga boggier) och körs vanligen som par i multipelkörning. Den andra modellen, M31 (ASEA/ABB och MGB), är en ombyggd M21, en tidigare modell som byggdes mellan åren 1984–1989 och var en höggolvsvagn i två delar med pivotboggier. 1998–2002 skedde ombyggnationen genom att en låggolvsdel med två fasta hjulaxlar infogades mellan de två höggolvsdelarna. Den tredje modellen är en version av M31 som genomgått en revision av Škoda Ekova och benämns M31B. Revisionen pågår mellan åren 2024 och 2028. I detta arbete behandlas M31 och M31B som samma modell då skillnaderna inte bör påverka resultaten i arbetet och antalet M31B i trafik vid tidpunkten för mätningarna är få. Den fjärde modellen, M32 (Sirio, AnsaldoBreda), tillverkades mellan åren 2004–2013 och är den första fulla låggolvsvagnen i Göteborg och den enda med endast fasta boggier inbyggda i chassit. Vagnstypen tillverkades av italienska AnsaldoBreda och kallas ofta i folkmun ”italienska vagnar”. Den femte modellen, M33 (Flexity Göteborg, Bombardier/Alstom), byggdes mellan åren 2020 och 2023 och är 33 meter lång (Västtrafik, 2024). Modellen är en låggolvsmodell med pivotboggier och tre delar och förekommer i två versioner, enkelriktade och dubbelriktade vagnar. De dubbelriktade vagnarna benämns M33B. Den senaste modellen, M34 (Flexity Göteborg, Alstom), tillverkas mellan åren 2024 och 2027. Modellen skiljer sig mot M33 genom att vara 45 meter lång och består av fem delar. Samtliga M34 levereras som enkelriktade vagnar.



Figur 2.3: Bildmontage över spårvagnsmodeller i Göteborg. Högst upp från vänster: M29, M31, M31B, M32, M33, M34. (AleWi, 2025; Bahnfreund, 2019a, 2019b; ChrisPsi, 2025; Ragdoll4467, 2025; Sekreterare, 2020). CC BY-SA. CC0

2.2 Slitageprocesser, resonanser och deformationer

Korrugering uppstår med nötning då hjul och räl slirar mot varandra. När dessa två kroppar glider mot och pressas in i varandra uppstår fasthäftning vilket främjar plastisk deformation. Nötning i kombination med den varierande dynamiska lasten är det som leder till de vågformiga räfflorna.

Ytterligare slitageprocess är när rälsen utsätts för höga spänningar som skapar mikrosprickor i stålet. Fenomenet kallas i järnvägssammanhang för rullkontaktsutmattning (rolling contact fatigue). Dessa sprickor växer och kan ytterligare förvärras av att vatten och fukt tar sig in. Det kan slutligen leda till att metallflakor lossnar vilket i sin tur leder till ytterligare räfflor (Grassie & Kalousek, 1993)

När ett hjul rullar över korrugering på rälsytan exciteras hjul och räl. Med P2-resonans oscillerar hjul och räl i fas med underlagstyvheten och frekvensen är mellan 50–100 Hz. Medan P1-resonans orsakas av att vagnen fjädrar mot den stumma rälen och är ur fas på kontakstyvheten vilket sker i frekvensområdet 500 - 1000 Hz. Dessa leder till att rälen börjar oscillera vertikalt vilket förstärker kontaktkraften mellan vagn och räl (Thompson, 1996). När en räl är fast inspänd mellan två slipers kan ett annat fenomen pinned-pinned resonans uppstå. Det innebär att rälen beter sig som en fast inspänd balk mellan två slipers. När rälen exciteras av hjulen så börjar den vibrera vilket i vissa frekvenser resulterar i resonans. Dessa frekvenser ligger oftast mellan 500 – 1500 Hz.

När hjulen på en stel hjulaxel inte har samma hastighet så uppstår ett vridmoment i axeln. Om detta vridmoment exciteras i samma frekvens som hjulsetets egenfrekvens

så kommer det uppstå resonans. För vridresonansen ligger frekvenserna ofta runt 100 – 400 Hz (Grassie, 2009).

Dessa skademekanismer beskriver hur rälen fysiskt förändras beroende på de dynamiska lasterna som uppstår till följd av de våglängdsfixerade mekanismerna. De främsta nedbrytningsfenomenen är alltså nötning, sprickbildning och plastisk deformation. Vidare beror våglängden λ för räfflorna som uppstår på spårvagnens hastighet v och frekvensen f för de våglängdsfixerade mekanismerna enligt formeln $\lambda = \frac{v}{f}$. (Grassie & Kalousek, 1993)

3

Metod

Arbetet genomförs som en fältstudie där mätning av bullernivå på utvalda spårvagnsträckor utförs. Räffloras amplitud inhämtas från Göteborgs Spårvägars mätvagn. Bullernivåer mäts ute i fält med decibelmätare enligt metod som beskrivs i 3.2. Mätsträckor och mätplatser väljs ut med målsättningen att de sammanvägt ska ge en representativ bild av skick på räls i Göteborgsområdet. Mätplatser och mätsträckor väljs därför i både områden med gynnsamma förhållanden och med mindre gynnsamma förhållanden avseende slitage, mängd räfflor och upplevda bullernivåer. Mätdata samlas in och analyseras statistiskt för att om möjligt se samband som besvarar frågeställningarna.

3.1 Studieområde och mätplatser

Efter granskning av Göteborgs Spårvägars kartläggning av korrugering från år 2025 och 2026 så valdes mätplatser för att få förutsättningar med olika amplitud på korrugering. I beaktande är mätplatserna (se tabell 3.1) även valda så att variation i underlag ska uppstå i form av att rälsen är på ballast eller i asfalt. Hårda ytor har stor påverkan på reflektion av ljud och detta gäller framför allt närliggande byggnader (Kropp m. fl., 2016) Därför genomfördes en mängd mätningar i projektet för att försöka få en uppfattning hur mycket det påverkar i resultaten. Totalt valdes 12 platser varav fyra mättes med trafik i båda riktningar och en plats före och efter slipning av rälerna, se tabell 3.1.

Sträcka	Typ av räl
Wavrinskys Plats - Doktor Fries Torg	Vignolräl
Ejdergatan - Redbergsplatsen	Gaturäl
Redbergsplatsen - Stockholmsgatan	Gaturäl
Redbergsplatsen - Olskrokstorget (vid signal)	Gaturäl
Musikvägen - Positivgatan	Vignolräl
Hinsholmen - Långedrag	Gaturäl
Wavrinskys Plats - Medicinaregatan	Vignolräl
Sahlgrenska/Linnéplatsen - Botaniska Trädgården	Gaturäl
Marklandsgatan - Botaniska Trädgården	Vignolräl
Chalmers - Wavrinskys Plats	Gaturäl
Domkyrkan/Stenpiren - Brunnsparken	Gaturäl
Redbergsplatsen - Olskrokstorget (vid Olskrokstorget före slipning)	Gaturäl
Redbergsplatsen - Olskrokstorget (vid Olskrokstorget efter slipning)	Gaturäl

Tabell 3.1: Utvalda sträckor för mätning av buller samt typ av spår för respektive plats.

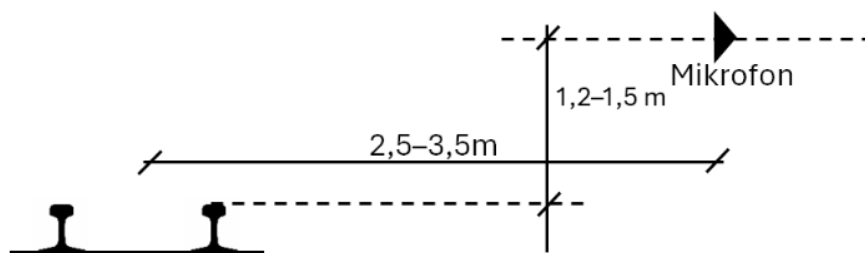
3.2 Bullermätningssmetod

Det finns beprövade metoder för mätning av buller från spårtrafik som regleras av standarder till exempel ISO 3095. Det finns däremot inga standarder som är fullt ut tillämpliga för det aktuella projektet. Befintliga standarder såsom ISO 3095 är huvudsakligen framtagna för buller från tåg på järnväg och de innehåller krav på bland annat mikrofonhöjd, avstånd från spår, markförhållanden, hastighetskontroller och väderförhållanden.

I detta arbete genomförs mätningar i tät stadsmiljö och mätningarna avser buller från spårvagnar snarare än tåg vilket gör att det praktiska förutsättningarna för uppställning av mätning skiljer sig från de som beskrivs i förekommande standarder. I stadsmiljö finns det begränsningar i tillgängligt avstånd från räls, andra närliggande störande bullerkällor, reflektioner från husfasader och variationer i markbeskaffenhet vilket gör att det inte går att tillämpa dessa standarder fullt ut.

Därför har en metod för projektet arbetats fram som utgår ifrån principerna bakom gällande standarder men som har anpassats till de praktiska förutsättningarna som råder vid mätning i stadsmiljö. Vissa avsteg från gällande standarder görs till exempel avseende avstånd från räls och krav på mätutrustning. Mätningarna genomförs på ett systematiskt och reproducerbart sätt för att säkerställa att resultaten blir jämförbara mellan mätplatser.

Mikrofonens uppställning görs med utgångspunkt i standarden ISO 3095 men placeras på 1,2–1,5 meters höjd över rälsens ovkant och 2,5–3,5 meters avstånd från rälsens mitt, se figur 3.1. En fri linje mot passerande fordon säkerställs också.



Figur 3.1: Placering av mätmikrofon i förhållande till spår.

Efter mätning lyssnas alla mätningar igenom och vid upplevda störande händelser som till exempel ljudsignaler från bilar, mötande spårvagnar, höga röster eller liknande kasseras mätningen. Krav sätts även på att markytan vid mätplatsen inte får vara snötäckt vilket annars skulle ge påverkan genom ljudabsorption.

Mätningen startas manuellt då spårvagnen närmar sig den aktuella mätplatsen och mätningen stoppas 10 sekunder efter start. Inspelningen sparas som en WAV-fil med en tidsstämpel för spårbarhet. Information om mätplats, fordonmodell, uppmätt hastighet på fordonet och uppskattad passagerarmängd dokumenteras också i samband med passagen. I efterbearbetningen av signalen bestäms sedan ett tidsfönster runt max-värdet för ljudnivå i den aktuella inspelade filen. Detta gör det möjligt att identifiera den mest bullerintensiva delen av varje passage och jämföra tidsvägda bullernivåer mellan dem.

3.2.1 Mätutrustning

Bullermätningarna genomförs med en mikrofon av typen UMIK-1 från tillverkaren MiniDsp. Mikrofonen levereras med individuellt framtagna kalibreringsfil som används vid efterbearbetning av den inspelade signalen för att kompensera för variationer i mikrofonens tonkurva. Detta möjliggör en korrekt återgivning av det inspelade ljudets spektrala innehåll över hela det aktuella frekvensområdet 20 Hz till 10 kHz. Mikrofonen har ett inbyggt USB-gränssnitt och ansluts direkt till en dator och inspelning sker i WAV-format med fast samplingsfrekvens på 20 kHz och bitdjupet på 16 bit.

För att säkerställa att mätsystemet visar rätt absolutnivå av det uppmätta ljudet görs en kalibrering gentemot en klass-1-godkänd kalibrator och en jämförelse med klass-1-godkänd decibelmätare som är kalibrerad och uppfyller kraven i IEC 61672. Jämförelsen ger en avvikelse mellan systemen som används för att i efterhand vid efterbearbetningen justera nivån på den inspelade signalen.

Mikrofonen är kalibrerad vid ett antal fasta frekvenser i det hörbara området varpå denna kalibreringsfil behöver interpoleras och extrapoleras för att täcka hela det frekvensområde som analyseras. Den inter- och extrapolerade kalibreringskurvan adderas sedan till den inspelade signalen.

3.3 Efterbearbetning av ljudsignal

Den inspelade WAV-filen bearbetas enligt behandlingsprogrammet som arbetats fram inom projektet i Matlab eller Python. Bearbetningen kompenserar för mikrofonens frekvensgång, tar fram en definition av maxnivå för respektive passage, beräknar ett tidsvägt medelvärde runt denna maxnivå och analyserar frekvensinnehållet i den inspelade signalen. I projektet tillämpas A-vägning på signalen före beräkning av maxvärden och tidsvägda nivåer för att approximera örats känslighet vid olika frekvenser och på så vis bättre spegla de upplevda nivåerna (International Electrotechnical Commission, 2013). För att säkerställa att de absolutnivåer som mäts upp är korrekta justeras amplituden för hela den inspelade, tonalitetskalibrerade och A-vägda signalen utifrån den absolutnivåkalibrering som gjorts och redovisas i 3.2.

3.3.1 Signaltbearbetning

Ljudsignalen är inspelad i stadsmiljö och innehåller, utöver hjulrälsbuller från spårvagnen, även kortvariga ljud som skrap, slag och varningssignaler. För att minska påverkan från dessa transienter, plötsliga förändringar, utjämnas signalen. Denna utjämnning motsvarar det standardiserade tidsfiltret "Fast (125 ms)" som används vid mer traditionella bullermätningar enligt IEC61672.

Utgjämningen görs genom att kvadrera signalen och därefter beräkna ett glidande medelvärde över ett tidsfönster på 125 ms för den kvadrerade tidssignalen. Detta innebär att ljudenergin medelvärdesbildas över en kort men ändå tillräckligt lång tidsperiod för att reducera effekten av snabba isolerade toppar i nivå men ändå bevara den övergripande nivåutvecklingen under en passage för en spårvagn. Sammanfattningsvis ger detta behandlingssteg en mer stabil signal som är lättare att jämföra mellan olika mätningar. Denna mätstorhet kallas $L_{Aeq,0.125s}$.

Maxnivån definieras som det högsta värdet av den glidande ekvivalentnivån $L_{Aeq,0.125s}$. Denna maxnivå används för att genom signalbehandlingsprogrammet automatiskt identifiera själva spårvagnspassagen och dess mest bullerintensiva tidpunkt i den inspelade signalen. När den mest bullerintensiva tidpunkten i respektive inspelade passage har identifierats, skapas ett tidsfönster med en varaktighet på 3 sekunder som centreras runt tidpunkten för maxnivån. Därefter beräknas ett tidsvikat medelvärde, $L_{Aeq,3s}$, som syftar till att representera hur bullernivån uppfattas för hela spårvagnens passageförlopp.

För att analysera frekvensinnehållet i den del av signalen som är mest representativ för passagen utförs en oktav- och tersbandsanalys på samma tresekundersfönster som används för att beräkna $L_{Aeq,3s}$. Denna analys görs på signalen utan A-vägningsfiltret. Signalen bandpassfiltreras, delas in i respektive frekvensband, och nivån beräknas som energimedelvärde för innehållet i respektive band. Branthet för bandpassfiltreringen sätts till 36 dB per oktav. Genom att analysera frekvensinnehållet i den inspelade signalen och identifiera dominerande frekvenser kan de

inspelade passager som efter filtrering visar avvikande dominerande frekvensband kasseras från mätserien då dessa bedöms innehålla störande ljud som inte kommer från hjul-räls-interaktion.

3.4 Statistisk metod

För att utveckla den statistiska metoden har boken ‘An intro to statistical learning’ (James m. fl., 2013) används som teoretisk grund. Python-biblioteken Statsmodels (Seabold & Perktold, 2010) och Seaborn (Waskom, 2021) har använts för att genomföra den statistiska analysen.

3.4.1 Datavalidering

För att säkerställa att de olika mätplatserna ska kunna ses som en homogen mätgrupp genomfördes ett levene-test. Testet utförs för att bestämma om variansen i mätningarna är lika för de olika mätplatserna och att de kan bedömas som en statistisk likvärdig mätgrupp. Testet innebär att en nollhypotes definieras som att variansen är lika mellan mätplatserna. Om testet ger ett p-värde $<0,05$ förkastas nollhypotesen och variansen i LAeq bedöms som olika. (Volk-Jesussek, 2025)

Boxplot-diagram används sedan för att visualisera datafördelningen samt upptäcka eventuella extremvärden. Eventuella extremvärden undersöks och bedöms individuellt om de ska vara kvar i mätdata efter extra genomlysning av ljudfil.

Sedan används en spridningsmatris (pairplot) där hastighet, max ytråhet, LAeq och LAFmax plottas mot varandra för att få första indikation till linjära samband och multikollinearitet. Det vill säga att oberoende variabler är linjärt relaterade till varandra. Multikollinearitet kan leda till att det blir svårt att avgöra vilka variabler som faktiskt driver förändringen i ljudnivån. Plotten visar även fördelningen av variablerna.

3.4.2 Regressionsmodell

En multivariabel linjär regressionsmodell upprättas med hjälp av Statsmodels för att analysera sambanden mellan den beroende variabeln ekvivalent ljudnivå LAeq och de förklarande variablerna hastighet, spårvagnstyp och max ytråhet. Spårvagnstypen modelleras som en kategorisk variabel. Regressionsmodellen ger ett R^2 -värde 0 och 1 som visar på hur stor del av variansen som förklaras av variablerna. Modellen ger sedan ett p-värde som visar hur signifikant variabeln är. Det vill säga sannolikheten att det uppmätta sambandet beror på slumpen snarare än en faktisk underliggande fysikalisk effekt. Om p-värdet är mindre än signifikanskriteriet, som sätts till 0,05, så är variabeln signifikant. Slutligen ges även en koefficient som visar hur mycket LAeq ökar per enhet av variabeln.

Modellen byggs fram stegvis där hastighet först analyseras sedan hastighet + spårvagnstyp och slutligen hastighet + spårvagnstyp + max ytråhet. Att göra analysen

i flera steg isolerar varje variabels bidrag och ger möjlighet att se hur R^2 och koefficienter förändras när modellen byggs ut. Hastighet och råhet centreras genom att deras medelvärde subtraheras.

3.4.3 Modellvalidering

Vidare beräknas Variance Inflation Factor, VIF, för varje variabel för att undersöka om det finns problematisk multikollinearitet (James m. fl., 2013). Om VIF-värdet överstiger 5 så indikerar det potentiella problem och över 10 allvarliga problem med multikollinearitet.

VIF	Innebär
1–2	Ingen multikollinearitet
2–5	Acceptabelt
5–10	Oroande
> 10	Allvarligt problem

Tabell 3.2: Tolkning av VIF-värden och graden av multikollinearitet.

Slutligen genomförs en residualanalys för att validera resultatet från regressionsmodellen. Residualen är skillnaden mellan observerade och de av modellen förutspådda värden, det vill säga felet mellan modell och verklighet. En välanpassad modell uppvisar slumpmässigt fördelade residualer och en dålig modell ger upphov till systematiska mönster. En quantile-quantile-plot, Q-Q-plot, upprättas också där residualernas kvantiler jämförs med normal fördelningen. En bra anpassning följer referenslinjen.

Den statistiska analysen resulterar i följande estimerade samband för att bestämma ekvivalent ljudnivå:

$$\text{LAeq} = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{Hastighet} + \beta_2 \cdot \text{Råhet} + \beta_3 \cdot \text{Fordonstyp} + \varepsilon \quad (3.1)$$

Där β_0 är modellens intercept, β_1 , β_2 och β_3 är koefficienterna för respektive variabel, och ε är feltermen som representerar den variation i LAeq som inte förklaras av modellen. Interceptet är grundvärdet för LAeq när alla variabler är 0.

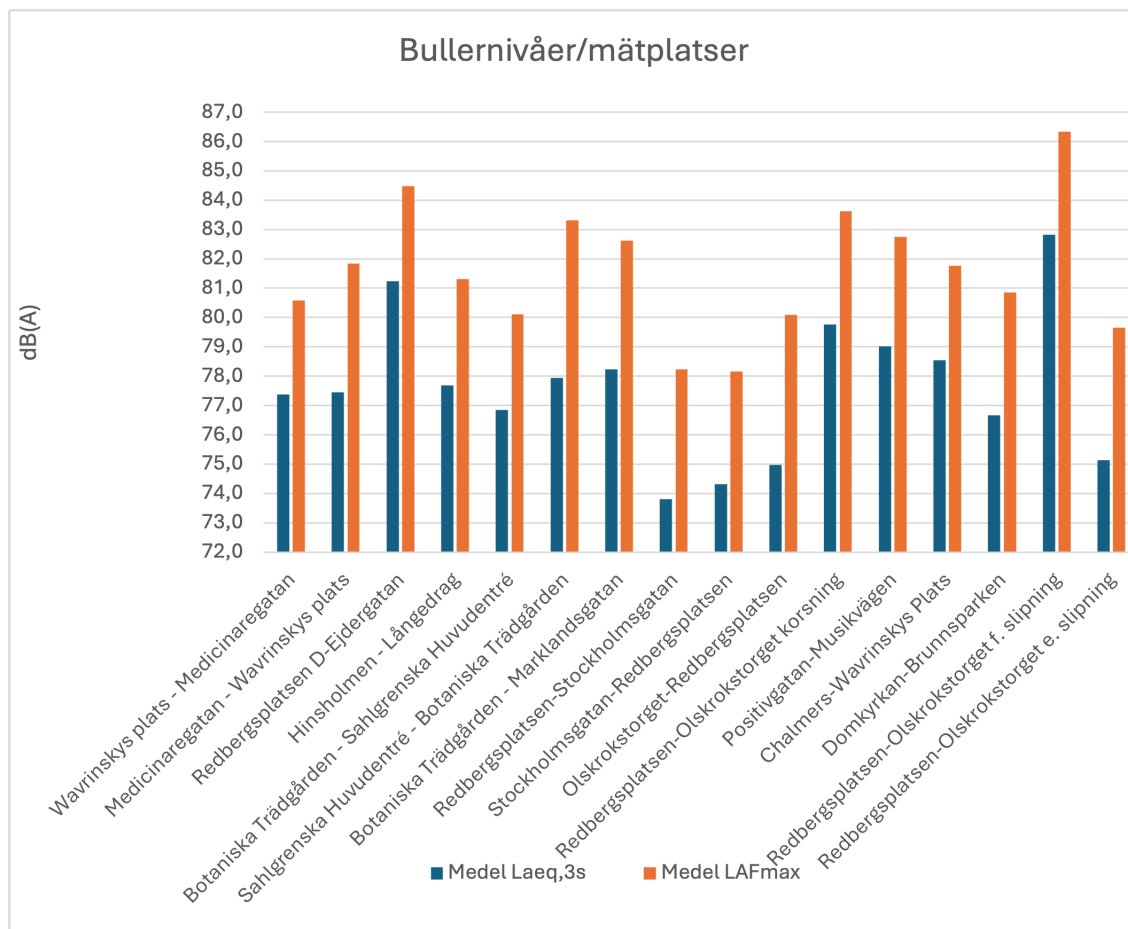
4

Resultat

Genomförda mätningar i arbetet resulterade i totalt 235 spårvagnspassager som kunde mätas upp och dokumenteras enligt kraven som satts och redovisas i kapitel 3. Utöver dessa passager gjordes 34 mätningar vars resultat kasserades på grund av avvikelser. Mätning har utförts på totalt 12 platser varav fyra mättes i båda riktningar och en plats före och efter slipning av rälerna.

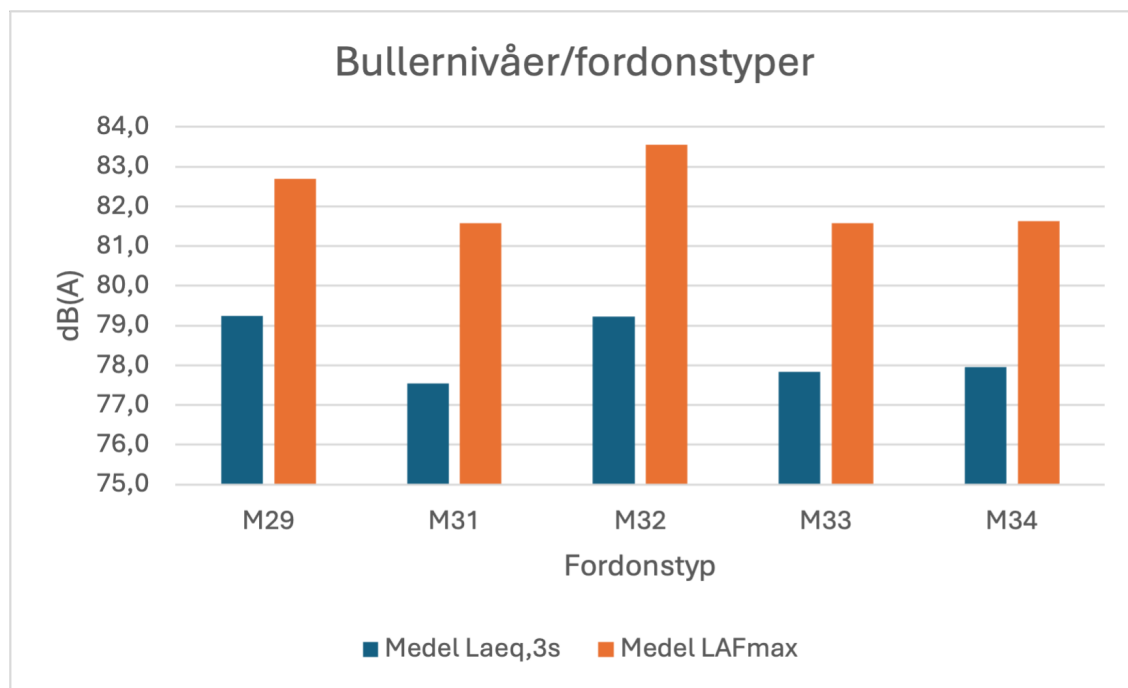
4.1 Explorativ dataanalys

Resultaten visar en tydlig variation i bullernivå mellan olika mätplatser. De högsta nivåerna mättes upp vid sträckan Redbergsplatsen-Olskrokstorget strax innan slipning av räler genomfördes. Efter genomförd slipning på samma sträcka mättes betydligt lägre bullernivåer upp vilket indikerar att det finns ett starkt beroende mellan bulleremissioner och spårskick. Generellt ligger LAFmax konsekvent flera decibel högre än LAeq vid samtliga mätplatser vilket tyder på återkommande kortvariga bullertoppar. Se figur 4.1



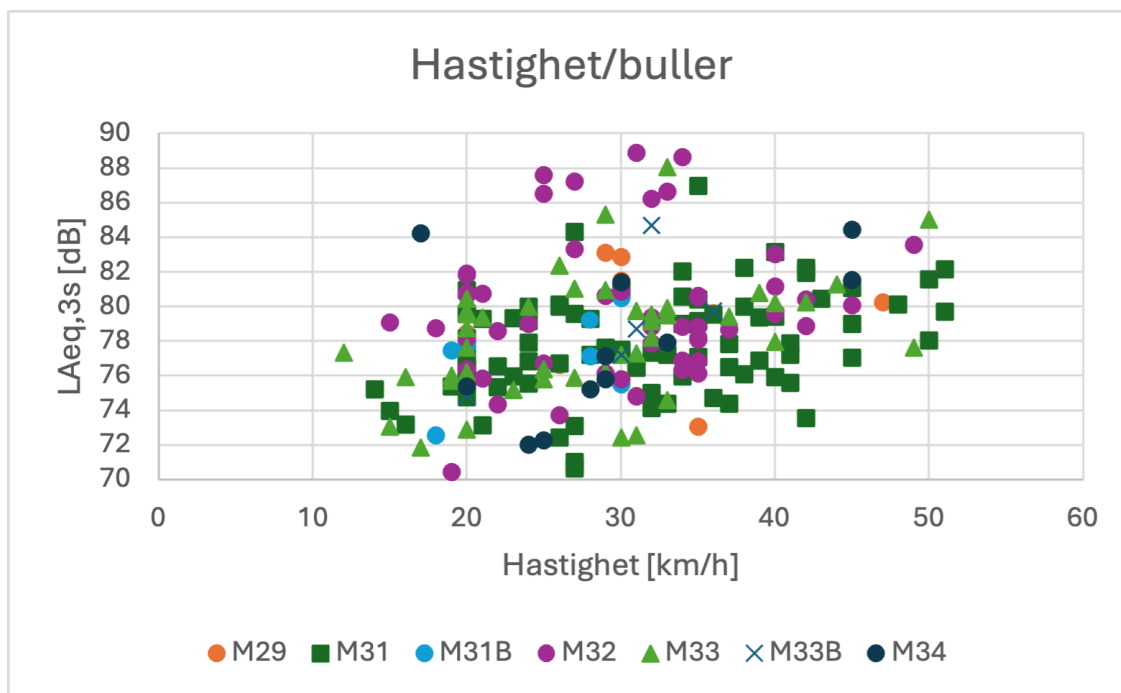
Figur 4.1: Uppmätta bullernivåer som medelvärden vid respektive mätplats.

Resultaten visar tydliga skillnader i bullernivå mellan fordonstyperna. Fordonsmodellen M32 uppvisar de högsta nivåerna för både ekvivalent ljudnivå (L_{Aeq,3s}) och maximal ljudnivå (L_{AFmax}) vilket indikerar en generellt högre bulleremission. Övriga fordonstyper med undantag för M29 ligger relativt samlat ca 1,5 dB under M32 i genomsnitt. Se figur 4.2



Figur 4.2: Uppmätta bullernivåer som medelvärden för respektive fordonstyp

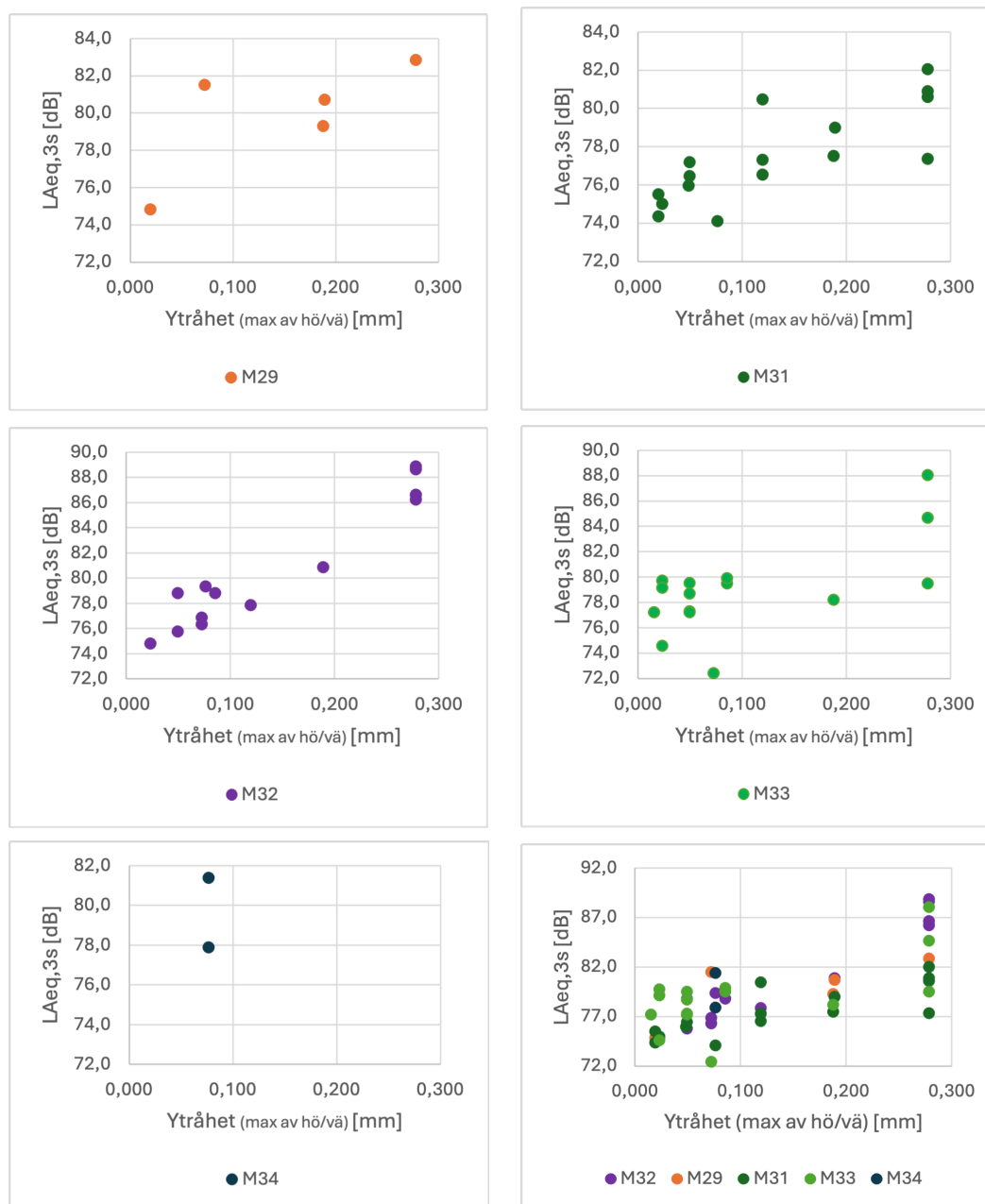
Resultaten visar ett samband mellan hastighet och bullernivå där högre hastigheter generellt tenderar att ge högre LAeq-värden. Spridningen i datapunkterna är dock stor vilket indikerar att det finns andra faktorer än hastighet som har stor betydelse för bulleremissionerna från spårvagnarna. För samma hastighetsintervall förekommer variationer på flera decibel vilket tyder på att andra parametrar har betydande inverkan. Sambandet kan beskrivas som en övergripande trend snarare än en strikt linjär relation. Se figur 4.3



Figur 4.3: Uppmätta bullernivåer för respektive spårvagnspassage visas i förhållande till uppmätt hastighet.

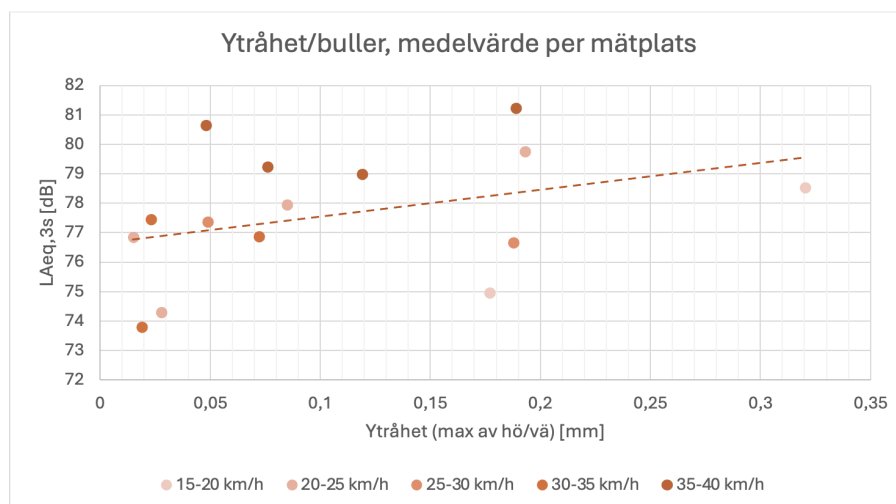
För att eliminera en av de mer betydelsefulla bidragande faktorerna till bulleremission har de uppmätta resultaten filtrerats efter hastighetsintervall och därefter jämförts avseende bullernivå i förhållande till ytråhet. Resultaten visar då ett tydligt positivt samband mellan spårets ytråhet och bullernivå för samtliga fordonsmodeller med undantag för M34 där datamängden är för liten för att ge tydliga resultat. Figur 4.4

Bullernivå i förhållande till ytråhet



Figur 4.4: Medelvärden av bullernivåerna för spårvagnspassager visas i förhållande till den största uppmätta ytråheten mellan höger och vänster räls vid respektive mätplats. Uppmätt bullernivå i förhållande till ytråhet är uppdelat per fordonstyp.

När medelvärden i uppmätt bullernivå per mätplats jämförs med ytråhet för respektive mätplats visas ett övergripande positivt samband. Trendlinjen indikerar att högre ojämnheter generellt ger högre bullernivåer även om spridningen i datapunkterna är relativt stor. Trenden visar att bullernivån ökar med knappt en decibel per tiondels millimeter i ytråhet på spåren. figur 4.5



Figur 4.5: Medelvärdet av bullernivåerna för spårvagnspassager visas i förhållande till den största uppmätta ytråheten mellan höger och vänster räls vid respektive mätplats. Färgsättningen i diagrammet representerar den genomsnittliga uppmätta hastigheten vid respektive mätplats.

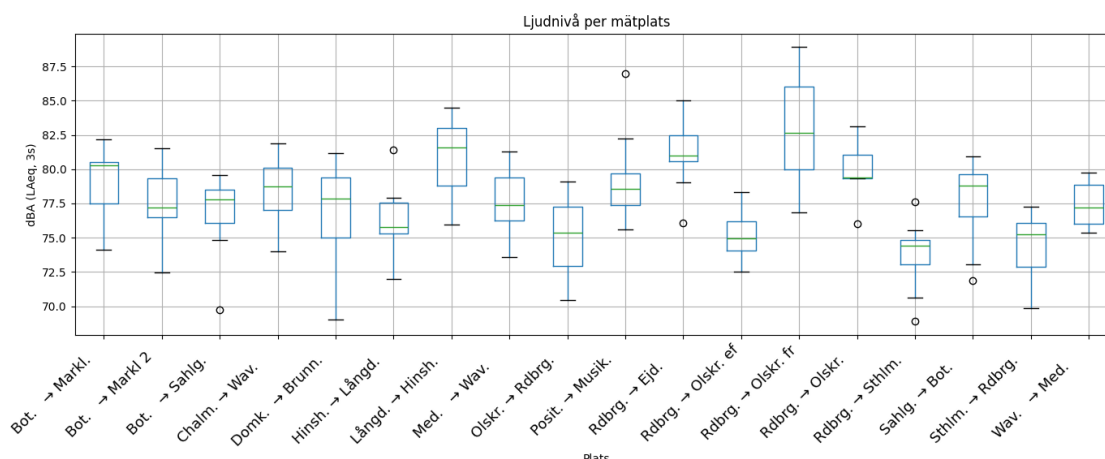
Vid sträckan Redbergsplatsen – Olskrokstorget genomfördes bullermätning i april 2026 strax före slipning av rälsen och sedan gjordes mätningen om efter genomförd slipning och en sänkning av ekvivalent ljudnivå med cirka 7 dB kunde mätas upp. Mätdata för korrugeringsamplitud kunde inte tillhandahållas i tid för sammanställning för denna sträcka efter genomförd slipning varför den direkta relationen mellan buller och korrugering inte kan visas i denna punkt.

4.2 Statistisk analys

Efter manuell genomlysning av alla passager och filtrering av störningspåverkade ljudfiler genomfördes den statistiska analysen.

Levene-testet gav ett p-värde på 0,113. Eftersom p-värdet överstiger signifikansnivån på 0,05 så stämmer nollhypotesen. Vilket innebär att variansen mellan mätplatserna bedöms som homogen. Mätplatserna kan därför ses som ett samlat dataset.

Boxploten identifierade tydligt avvikande extremvärden vid 8 av mätplatserna (se figur 4.6). Variansen skiljer sig mellan mätplatserna, något som delvis förklaras av att antalet mätningar per plats är mellan 3 och 30 men som Levene-testet visar bedöms variansen dock vara homogen för hela mätgruppen. En tydlig minskning av variansen observerades på sträckan Redbergsplatsen – Olskrokstorget efter spårslipning. Standardavvikelsen minskade från 3,56 till 1,56. (se tabell 4.1). Det tyder på att ytråhet har en påverkan på ljudnivåns variation.



Figur 4.6: Boxdiagram

Plats	antal	medelvärde LAeq,3s	std	min
Botaniska Trädgården - Marklandsgatan	15	79,24	2,22	74,13
Botaniska Trädgården - Marklandsgatan 2	14	77,16	2,87	72,44
Botaniska Trädgården - Sahlgrenska Huvudentré	10	76,84	2,89	69,73
Chalmers - Wavrinskys Plats	19	78,53	2,25	74,0
Domkyrkan - Brunnsparken	8	76,66	4,1	69,03
Hinsholmen - Långedrag	7	76,41	2,88	72,01
Långedrag - Hinsholmen	3	80,67	4,31	75,98
Medicinaregatan - Wavrinskys plats	22	77,45	2,28	73,57
Olskrokstorget - Redbergsplatsen	3	74,98	4,32	70,47
Positivgatan - Muskvägen	14	79,01	2,93	75,58
Redbergsplatsen D - Ejdergatan	12	81,23	2,28	76,09
Redbergsplatsen - Olskrokstorget efter	23	75,13	1,57	72,52
Redbergsplatsen - Olskrokstorget före	30	82,83	3,56	76,85
Redbergsplatsen - Olskrokstorget korsning	5	79,77	2,62	76,0
Redbergsplatsen - Stockholmsgatan	9	73,8	2,61	68,92
Sahlgrenska Huvudentré - Botaniska Trädgården	16	77,94	2,67	71,85
Stockholmsgatan - Redbergsplatsen	7	74,32	2,6	69,86
Wavrinskys plats - Medicinaregatan	19	77,37	1,51	75,34

Tabell 4.1: Sammanställning av ljudnivåer per mätplats, medelvärde för LAeq, 3s.

Pairplot-analysen visar att hastighet, LAeq och LAFmax ser ut att vara normalfördelade (se Figur 4.7). En svag negativ korrelation observerades mellan hastighet och ytråhet vilket sannolikt reflekterar att hastighetsbegränsningar tillämpas på sträckor med hög ytråhet. Ytråhetens fördelning är mer viktad mot lägre värden, då flest mätningar har skett på platser där det är låg korrugering.

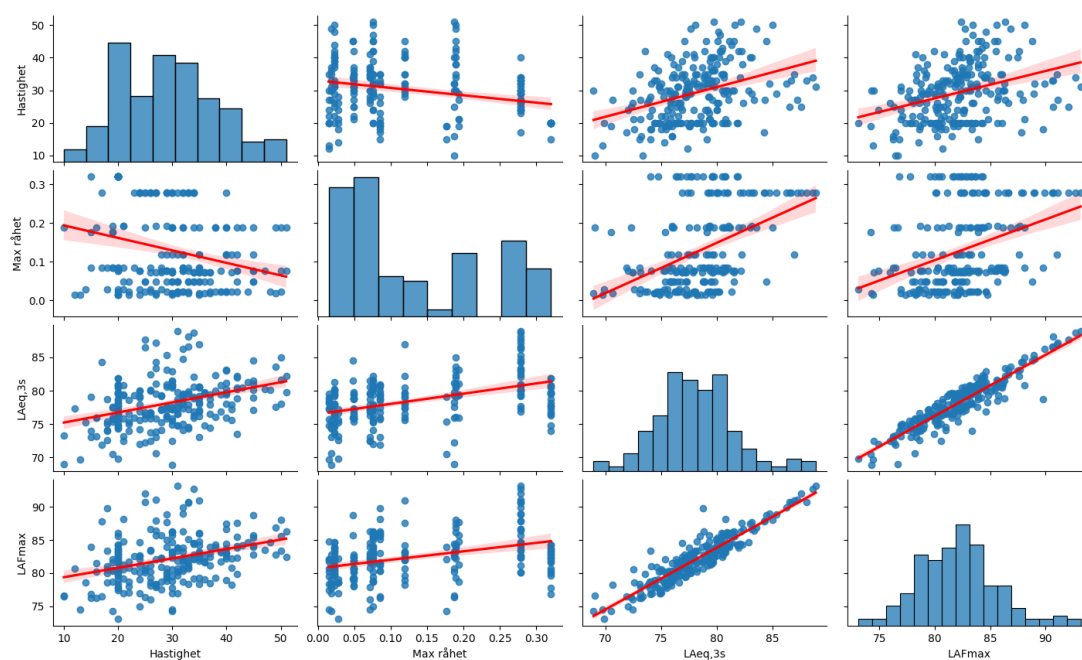


Figure 4.7: Pairplot, hastighet, Max yråhet, LAeq och LAFmax

4.2.1 Regressionsmodeller

Modell 1

Först upprättades en regressionsmodell med enbart centrerad hastighet som variabel. Detta resulterade i att R^2 blev 0,112. Det innebär att modellen förklarar 11 procent av variansen. Hastighet ensam är alltså en svag prediktor. Hastighet är signifikant med $p < 0,001$ och koefficienten 0,146 betyder att varje km/h extra ger +0,15 dBA på LAeq. (se Figur 4.8)

Figur 4.8: Terminalutskrift för Modell 1 (Endast hastighet)

```

=====
                        OLS Regression Results
=====
Dep. Variable:          LAeq      R-squared:          0.112
Model:                  OLS       Adj. R-squared:       0.106
Method:                 Least Squares   F-statistic:         18.68
Date:                  Mon, 04 May 2026   Prob (F-statistic):   2.83e-05
Time:                  14:38:54    Log-Likelihood:       -409.14
No. Observations:      150        AIC:                 822.3
Df Residuals:          148        BIC:                 828.3
Df Model:              1
Covariance Type:       nonrobust
=====

```

	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
Intercept	74.1341	1.088	68.143	0.000	71.984	76.284
Hastighet	0.1461	0.034	4.322	0.000	0.079	0.213

```

=====
Omnibus:                5.779    Durbin-Watson:        0.955
Prob(Omnibus):          0.056    Jarque-Bera (JB):      5.384
Skew:                   0.390    Prob(JB):              0.0678
Kurtosis:               3.502    Cond. No.              115.
=====

```

Modell 2

När modellen utvidgades genom att fordonstyp inkluderades som variabel, där de olika modellerna jämfördes med M31, ökade R^2 -värdet till 0,221 vilket är förbättring på 10 procentenheter. Valet av M31 som referens baseras på att den explorativa analysen visat att den orsakar lägst ljudvolym. Av de 4 fordonstyperna var det enbart M32 som hade ett p-värde som är signifikant ($p < 0,001$) vilket innebär att det med statistisk säkerhet inte kan sägas hur mycket de andra spårvagnstyperna påverkar ljudet. Enligt modellen ger M32 en ökning på 3,38 dBA jämfört med M31. Hastigheten är fortfarande signifikant och orsakar +0,147 dBA per km/h. (Se figur 4.9)

Figur 4.9: Terminalutskrift för Modell 2 (Hastighet + Fordonstyp)

OLS Regression Results						
=====						
Dep. Variable:	LAeq	R-squared:	0.221			
Model:	OLS	Adj. R-squared:	0.194			
Method:	Least Squares	F-statistic:	8.194			
Date:	Mon, 04 May 2026	Prob (F-statistic):	7.83e-07			
Time:	14:38:54	Log-Likelihood:	-399.28			
No. Observations:	150	AIC:	810.6			
Df Residuals:	144	BIC:	828.6			
Df Model:	5					
Covariance Type:	nonrobust					
=====						
	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]

Intercept	72.8502	1.124	64.828	0.000	70.629	75.071
('M31')) [T.M29]	1.1200	1.7419	0.643	0.521	-0.472	3.956
('M31')) [T.M32]	3.3807	0.762	4.439	0.000	1.875	4.886
('M31')) [T.M33]	1.3241	0.747	1.772	0.079	-0.153	2.801
('M31')) [T.M34]	0.5763	1.333	0.432	0.666	-2.058	3.211
Hastighet	0.1468	0.032	4.533	0.000	0.083	0.211
=====						
Omnibus:	0.493	Durbin-Watson:	1.001			
Prob(Omnibus):	0.781	Jarque-Bera (JB):	0.256			
Skew:	0.086	Prob(JB):	0.880			
Kurtosis:	3.106	Cond. No.	164.			
=====						

Modell 3

Slutligen adderades råhet till modellen vilket ledde till en ökning av R^2 till 0,565. Det innebär att modellen förklarar 57% av variansen i LAeq. Råheten är signifikant med ett p-värde $<0,001$ och en koefficient på 23,74 vilket blir den dominerade faktorn i modellen. Hastighetskoefficienten ökade från föregående modell från 0,146 till 0,241. Detta väcker misstankar om multikollinearitet vilket undersöks vidare i VIF-analys. I den tredje modellen är tre av spårvagnstyperna statistisk signifikanta jämfört med referensen M31: M29 ($p=0,003$, +2,6 dB), M32 ($p<0,001$, +2.8 dB) och M33 ($p=0,008$, +1.5 dB). M34 ($p=0,142$) är ej signifikant, (se Figur 4.10)

Figur 4.10: Terminalutskrift för Modell 3 (Hastighet + Fordonstyp + Råhet)

OLS Regression Results						
=====						
Dep. Variable:	LAeq	R-squared:	0.565			
Model:	OLS	Adj. R-squared:	0.547			
Method:	Least Squares	F-statistic:	30.94			
Date:	Mon, 04 May 2026	Prob (F-statistic):	1.26e-23			
Time:	14:38:54	Log-Likelihood:	-355.65			
No. Observations:	150	AIC:	725.3			
Df Residuals:	143	BIC:	746.4			
Df Model:	6					
Covariance Type:	nonrobust					
=====						
	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]

Intercept	66.4707	1.035	64.218	0.000	64.425	68.517
('M31') [T.M29]	2.5682	0.844	3.043	0.003	0.900	4.236
('M31') [T.M32]	2.8393	0.574	4.950	0.000	1.705	3.973
('M31') [T.M33]	1.5042	0.561	2.681	0.008	0.395	2.613
('M31') [T.M34]	1.4817	1.004	1.476	0.142	-0.502	3.466
Hastighet	0.2412	0.026	9.326	0.000	0.190	0.292
Q('Max råhet')	23.7496	2.236	10.621	0.000	19.330	28.169
=====						
Omnibus:	0.258	Durbin-Watson:	1.545			
Prob(Omnibus):	0.879	Jarque-Bera (JB):	-0.092			
Skew:	2.962	Prob(JB):	0.896			
Kurtosis:	0.220	Cond. No.	347.			
=====						

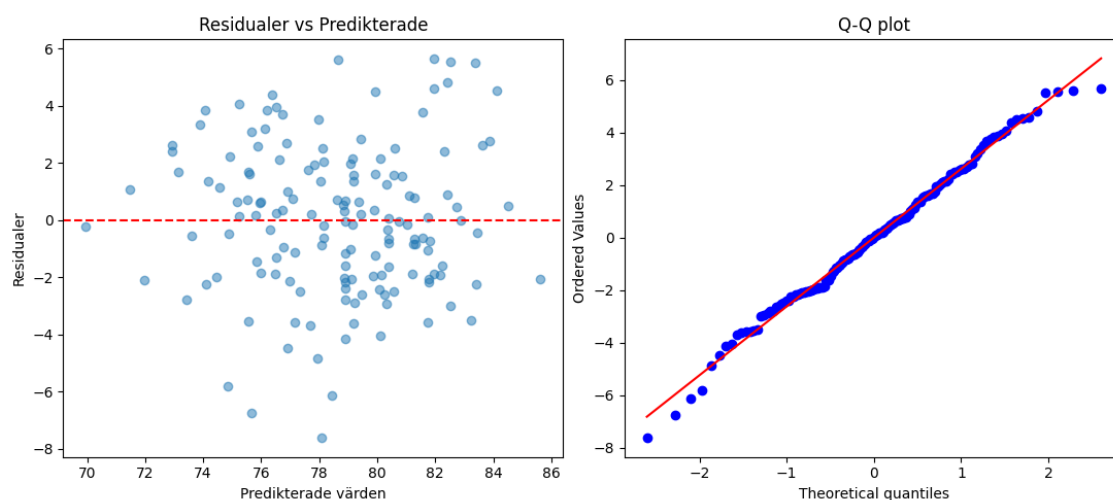
4.2.2 Valideringsanalys

VIF-analysen visar att hastighetensvariabeln har ett förhöjt värde på 6,47, vilket placerar den i riskintervallet (5-10) och klassas som oroande. (se tabell 4.2). Detta indikerar ytterligare på den multikollineariteten som observerades i den tredje regressionsmodellen. Övriga variabler hade ett VIF under 5, vilket är acceptabelt. Hastigheten behålls i modellen då den är teoretiskt motiverad och statistisk signifikant.

Variabel	VIF
Hastighet	6.471490
Fordonstyp_M31	4.238960
Fordonstyp_M32	3.005302
Fordonstyp_M33	2.787051
Max råhet	2.743771
Fordonstyp_M34	1.377352

Tabell 4.2: VIF-värden för de oberoende variablerna i regressionsmodellen.

Residualanalysen visade att residualerna är slumpmässigt fördelade kring noll utan några systematiska mönster, vilket indikerar att modellen är välanpassad. Q-Q-plotten visar god anpassning längs referenslinjen i det centrala intervallet men har avvikelser i svansarna. Modellen anses vara stark. (se figur 4.11)



Figur 4.11: Till vänster residualanalys med slumpmässigt fördelade residualer kring noll. Till höger Q-Q-plot med punkter nära referenslinjen.

5

Diskussion

I följande kapitel diskuteras och tolkas de samband som identifierats i mätningar utifrån frågeställningarna och tidigare forskning. Avslutningsvis diskuteras osäkerheter i metod och mätning som bör beaktas vid tolkning av resultaten.

5.1 Resultatdiskussion

5.1.1 Tolkning av uppmätta samband

De sträckor som uppvisade högst uppmätta bullernivåer var Redbergsplatsen - Olskrokstorget före slipning. Resultaten visar samtidigt att bullernivåerna minskade efter slipning på samma sträcka vilket tyder på ett samband mellan korrugering och buller. Även sträckorna Redbergsplatsen – Ejdergatan och Positivgatan – Musikvägen visade höga bullernivåer jämfört med exempelvis Redbergsplatsen - Stockholmsgatan och Wavrinskys plats – Medicinaregatan.

Flera av de mest bullrande sträckorna består av gaturäl. Till skillnad från vignörl är gaturälen oftast inspänd i asfalt, vilket ger en styv infästning. Detta medför att vibrationer från hjul och rälinteraktionen lättare överförs till mark och omgivning. I kombination med korrugering på rälen kan detta bidra till förstärkta vibrationer och högre upplevda bullernivåer.

5.1.2 Inverkan av slitage och rälsens tillstånd

Resultaten visar ett tydligt samband mellan rälsens ytråhet och uppmätta bullernivåer. Linjärisering av mätresultaten i figur 4.5 visar att bullernivåerna ökar med drygt 1 dB per tiondels millimeter i ökning av amplitud på ytråhet vilket motsvarar drygt 10 dB per millimeter. Även att relativt små förändringar i rälsens skick kan ha en märkbar påverkan på ljudmiljön.

Detta tyder på att ökande korrugering på rälen successivt orsakar mer buller när en spårvagn kör på den. Sambandet mellan ytråhet och bullernivå liknar Thompsons (1996) linjära modell då ingen tydlig kritisk nivå där bullernivån plötsligt ökar kunde observeras. Bullerökningen verkar istället ske gradvis i takt med att rälsens tillstånd försämras. Resultaten indikerar därför att kontinuerligt underhåll och förebyggande

slipning kan vara viktigt för att begränsa bullerutvecklingen över tid. Detta stärks ytterligare av mätningarna vid sträckan Redbergsplatsen–Olskrokstorget där den ekvivalenta ljudnivån minskade med ca 7 dB efter genomförd slipning, där övriga parametrar var så lika de kunde vara. Resultatet indikerar att underhållsåtgärder på korrugerade räler kan ge betydande reduktioner av bullernivån när spårvagnar kör på dem.

Regressionsmodellen gav en koefficient på 23,74 för variabeln ytråhet vilket innebär att modellen estimerar en ökning på ca 23,74 dB per millimeter ökad ytråhet. Trendlinjen i 4.5 baseras på medelvärden per mätplats och visar ett övergripande samband mellan buller och ytråhet utan att ta hänsyn till andra variabler. Skillnaden mellan resultaten uppstår delvis eftersom regressionsmodellen tar hänsyn till variationen mellan enskilda mätningar samt betraktar de tre variablerna (hastighet, fordonstyp och ytråhet) samtidigt. Koefficienten för ytråhet bör dock tolkas med en viss försiktighet eftersom VIF-analysen indikerade på multikollinearitet mellan hastighet och ytråhet, vilket kan försvåra separationen mellan effekter av hastighet och ytråhet.

5.1.3 Fordonens betydelse för bulleralstring

Både den explorativa och den statistiska analysen visar att M31 är systemets tystaste modell medan M32 och M29 är de mest högljudda. Att M32 är mest högljudd skulle kunna förklaras av att modellens hjulupphängning består av fasta boggier till skillnad från övriga modeller med pivotboggier och modellens hjulprofiler. M29 är den äldsta modellen och är den enda modell som körs i multipelkörning och skulle därför kunna skaka mer än andra modeller vilket orsakar dess högre buller. M33 är i den statistiska analysen aningen mer högljudd än M31, möjligen på grund av dess högre axellast, men den är samtidigt tystare än M32 och M29. Då få passager av M34 som registrerats finns det ingen statistisk signifikans. Analysen tyder dock på liknande ljudnivåer som M33 vilket är rimligt då M34 bör ha liknande egenskaper som M33 då båda vagnar i grunden är samma modell och har liknade axellast. För samtliga modeller krävs vidare undersökningar för att kunna slå fast exakt vad som orsakar skillnaderna i bullernivå mellan vagnstyperna.

5.1.4 Statistisk diskussion

Trots att de olika mätplatserna har olika förutsättningar gällande byggnadsakustik, trafikbuller, förekommande spårvagnsmodeller och hastigheter, så visar Levenetestet att variansen mellan mätplatserna är homogen och kan behandlas som en gemensam mätgrupp. Individuella mätplatser visade upp stor variation, men den stora variansen är dock förväntad då mätningarna är gjorda i en komplex miljö där många faktorer påverkar resultatet. Det stora antalet dokumenterade passager skapar dock ett tillräckligt statistiskt underlag för att kunna identifiera övergripande samband trots variation i mätmiljön.

De första två regressionmodellerna hade ett lågt R^2 -värde på 0,112 respektive 0,221

vilket indikerade att det saknas viktiga förklaringsvariabler. När ytråheten adderades så fick den tredje regressionsmodellen ett R_2 -värde på 0,565. Detta ses som en rimlig förklaringsgrad i den komplex akustiska miljö som mätningarna har utförts. En stor del av kvarvarande variansen beror troligen på mätosäkerheter, miljöfaktorer och att enskilda spårvagnar kan ge upphov till mer ljud på grund av slitna hjul eller andra mekaniska faktorer. I en vidare undersökning hade det varit intressant att få in typen av räls och omliggande miljö i modellen för att se om förklaringsgrader skulle öka ytterligare. Förslagsvis kategorisera vignolräl och gaturäl som en variabel i regressionsmodellen.

VIF analysen indikerar att det finns en korrelation mellan hastigheten och ytråheten vilket kan förklaras av flera faktorer. En trolig förklaring är att Stadsmiljöförvaltningen tillämpar hastighetsbegränsningar på sträckor med kraftigt slitna spår för att minska ljud och buller. Ytterligare orsak kan vara att spåren slits mer i kurvor och att spårvagnar naturligt får en lägre hastighet i dessa. Även att spårvagnar ofta bromsar in på samma sträcka orsakar ökat slitage på spåren kombinerat med låga hastigheter. Multikollineariteten bedöms vara ett verkligt fysikaliskt fenomen, snarare än ett metodproblem, det innebär att hastighet och råhetskoefficienterna i regressionsmodellen bör tolkas med en liten försiktighet.

5.1.5 Jämförelse med tidigare studier

Det linjära sambandet mellan bullernivå och ytråhet som (Thompson, 1996) fastställt för järnväg stämmer överens med resultaten som visas i denna studie gällande spårvagnsräls. Resultaten visar att samspelet mellan fordon och räl är en betydande bidragande faktor till buller. Grassies vidareutveckling om att korrugering växer snabbare över tid när väl korrugering har uppstått har inte behandlats i detta arbete. För att verifiera detta hade långtidsmätningar behövts som sträcker sig över flera underhållsperioder behövts.

Mätdata från samtliga platser i studien i kombination med underlag från Göteborgs Spårvägar bekräftar att korrugering i en viss mängd ses som oundvikligt då alla mätplatser har haft någon grad av korrugering. Som Grassie beskriver 2023 är korrugering ett resultat av designval som skulle kunna vara en förklaring till varför just Redbergsplatsen får högst uppmätt bullernivå före slipning. Det vill säga att mer korrugering hinner uppstå på kortare tid här. Ett konkret förslag är att införa fasta mätstationer för att kontinuerligt övervaka bullernivåer på kritiskt drabbade platser som till exempel sträckan Redbergsplatsen-Olskrokstorget. Detta möjliggör underhållsinsatser innan ytråheten orsakar en markant bullerökning. Genom att slipa förebyggande innan korrugering uppnår kritiskt djup kan förmodligen rälsens livslängd optimeras då mängden material som behövs avlägsnas vid varje slipning bör minska. Givetvis behövs en avvägning om hur många gånger man kan slipa en räl innan den behöver bytas ut.

5.2 Osäkerheter

Vid studier av rälskorrugering och dess akustiska påverkan finns flertal osäkerhetsfaktorer som kan påverka resultatets kredibilitet. För att säkerställa studiens validitet har osäkerheter och felkällor delats in i tre huvudkategorier: metodosäkerhet, mätosäkerhet och efterprocesseringsosäkerhet.

5.2.1 Metodosäkerhet

En primär osäkerhet är om korrukeringsmätningar ensamt kan förklara det upplevda bullret. Eftersom ljudbilden är ett resultat av komplext samspel mellan spårgeometri, fordonets dynamik och den omgivande miljön är det svårt att helt isolera korrukeringsspecifika bidrag till buller.

På grund av arbetets korta varandetid genomfördes endast mätningar på en liten del av spårvägsnätet. Samtidigt kunde vissa delar av linjenätet inte heller analyseras då mätvagnen senast mätte korrukering på dessa sträckor mer än sex månader före bullermätningarna genomfördes.

5.2.2 Mätosäkerhet

Flest osäkerheter och felkällor uppkommer vid själva mättillfället på grund av yttre fysiska faktorer. Reflektioner från närliggande hårda ytor, byggnader eller dämpning från grön terräng skapar komplexa ljudmiljöer som påverkar den uppmätta ljudnivån med variation. Rälsens underlag ger en stor varians i ljudmätningen där exempelvis skillnaden mellan ballast och fasta underlag samt eventuell asfalt mellan rälerna påverkar vibrationsöverföring. Väder påverkar vad mikrofonen registrerar. För att minska dess påverkan har mätningar ej genomförts vid dåligt väder men vind kan fortfarande ha en betydelse. Detta leder till att placeringen av mikrofonen blir extra viktig. På grund av begränsningar i utrustningen och på de fysiska platserna har vi inte alltid kunnat vara konsekventa med mikrofonplacering, vilket gjorde att avstånden uppsatta i kapitel 3.2 snarare blev en rekommendation än ett exakt mått. Mikrofonens spektrum och dess avvikelser samt hur riktningsberoende mikrofonen är har också påverkat hur ljudet registreras.

Variationer i hjulslitage på de passerande spårvagnarna utgör en betydande felkälla då rullbullret är ett resultat av den kombinerade råheten hos både hjul och räl (Thompson, 1996). Spårvagnarna repareras och underhålls kontinuerligt varpå skillnader mellan olika spårvagnsexemplar av samma modell uppstår även om alla yttre förutsättningar är lika.

Passagerarmängden är en uppskattning av hur full vagnen är, uttryckt i procent, och görs på plats av den person som utför mätningen. Passagerarmängdsmätningarna användes dock inte i analysen på grund av för stora osäkerheter kring dessa och skulle därför möjligen påverka resultat något. Hastighet på fordonets mäts med en hastighetsmätare av lägre kvalitet och hastigheten kan därför inte sägas vara exakt.

5.2.3 Efterprocesseringsosäkerhet

Vid bearbetning av ljudfiler har små men mätbara skillnader noterats. En skillnad på 0,02 dB ekvivalent har noterats beroende på om beräkningar görs i Matlab eller i Python vilket sannolikt beror på olika algoritmer för applicering av A-vägningskurva. Studien fokuserar på rullbuller men i praktiken är det svårt att filtrera bort andra ljudkomponenter korrekt.

6

Slutsatser

Arbetet visar att korrugering på rälen har en tydlig påverkan på bullernivån från spårvagnstrafiken. Analysen visar att bullernivån generellt över samtliga mätplatser ökar med knappt 1 dB per tiondels millimeter ökad ytråhet vilket innebär att även små förändringar i rälets skick ger mätbara skillnader i ljudnivå. Den tydligaste effekten observerades på sträckan Redbergsplatsen - Olskrokstorget där ljudnivån minskade med cirka 7 dB efter rälslipning medan övriga parametrar var så lika de kunde vara.

Resultaten visar samtidigt att korrugering inte ensamt förklarar alla skillnader i bullernivå mellan mätplatser. Variationer på upp till 5 dB uppmättes mellan platser med liknande nivåer av korrugering och liknande hastigheter. Detta indikerar att även omgivande bebyggelse, markreflektioner och spårkonstruktion har påverkan på den uppmätta ljudnivån.

Analysen visar också att bullernivån varierar mellan olika spårvagnsmodeller. M32 uppvisade högst ljudnivåer i mätningarna följt av M29. För M29 och M34 är dock datamängden begränsad, vilket innebr att resultaten för dessa modeller bör tolkas med försiktighet.

Den statistiska analysen visar att hastighet, spårvagnstyp och ytråhet tillsammans förklarar 56% av variansen i den uppmätta ljudnivån. Ytråheten bidrog mest till modellens förklaringsgrad, vilket stärker slutsatsen att korrugering är en central faktor bakom buller från spårvägstrafik.

Metoden som använts i studien bedöms vara tillräckligt robust för att identifiera samband mellan korrugering, fordonstyp och bullernivå. Resultaten är däremot begränsade till de undersökta mätplatserna och kan därför inte generaliseras till hela Göteborgs spårvägsnät utan vidare undersökningar. För att öka säkerheten i resultaten krävs fler mätplatser, fler upprepade mätningar och mer uppdaterad korrugeringsdata.

Sammanfattningsvis visar studien att korrugering är en betydande bidragande orsak till buller från spårvägstrafik. Resultaten visar även att bullernivån påverkas av flera samverkande faktorer där rälsens ytråhet, hastighet, fordonstyp och omgivande miljö

är de mest framträdande. Ett mer datadrivet och frekvent underhåll av rälsens ytråhet bedöms därför kunna bidra till minskade bullernivåer i spårvägssystemet.

7

Förslag till fortsatt arbete

Under arbetet med att ta fram mätmetoden har flera frågeställningar identifierats som bedöms relevanta för fortsatt forskning och utveckling. Ett sådant område är processen för rälslipning och dess påverkan på spårets långsiktiga livslängd. Ett fortsatt arbete skulle därför kunna innefatta studier av praktiskt utförande av rälslipning. För att skapa förståelse för hur stora materialmängder som avverkas vid varje slipningstillfälle samt hur många slipcykler en räl kan genomgå innan utbyte krävs. Detta skulle möjliggöra en tydligare koppling mellan underhållsåtgärder, kostnader och livslängd för spåret. Vidare vore det relevant att undersöka Göteborgs Spårvägars arbete med mätvagn, avseende både nuvarande mätmetodik och möjligheter att öka frekvensen av mätningar på plats under året.

Enligt våra mätningar är det M32 som låter och uppfattas som mest bullrande. Ett fortsatt arbete skulle därför kunna fokusera på en fördjupad analys av varför denna spårvagnsmodell avger mest buller. En möjlig förklaring är att fordonen i högre grad blir flänsgående, vilket medför ökade laterala krafter vid kontaktytorna mellan hjul och räl vilket i sin tur ger kraftigare ljudemissioner tillsammans med en fast boggi. En relevant förutsättning vore därför att genomföra riktade bullermätningar på M32-vagnarna i kombination med mekaniska undersökningar av boggins rörelsemönster och kontaktpunkter i kurvor.

Vidare har M32-vagnarna upplevts av oss generera särskilt framträdande skriklyd vid låga hastigheter vid kurvor. Det vore därför intressant att genomföra detaljerade mätningar av dessa högfrekventa ljud och koppla resultaten till enkätundersökningar av hur människor upplever ljuden, både avseende störningsgrad och upplevd påverkan.

Ytterligare fördjupning på det olika spårvagnsmodeller hade kunnat leda till konkreta svar på varför modellerna beter sig olika. Förslagsvis kan ritningar och hjulprofiler undersökas för att försöka koppla till korrugeringsdynamiken.

Litteraturförteckning

- AleWi. (2025). Spårvagn, Göteborg, Norra hamngatan - 20250420 - 07. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=164147622>
- Bahnfreund. (2019a). GS 458, Kungsportsavenyn, 2019 (01). [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:GS_458,_Kungsportsavenyn,_2019_\(01\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:GS_458,_Kungsportsavenyn,_2019_(01).jpg)
- Bahnfreund. (2019b). GS 847, 707, Kungsportsavenyn, 2019 (01). <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=83278650>
- ChrisPsi. (2025). SpårvagnM31B. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=180053657>
- Ekberg, A., & Pålsson, B. (2025). *Rälkorrugering-en första inventering runt Redbergsplatsen* (tekn. rapport).
- Emdx. (2005). Tram rail. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tram_rail.jpg
- Grassie, S. L. (2009). Rail corrugation: Characteristics, causes, and treatments. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 223(6), 581–596. <https://doi.org/10.1243/09544097JRRT264>
- Grassie, S. L., & Kalousek, J. (1993). Rail Corrugation: Characteristics, Causes and Treatments. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 207(1), 57–68. https://doi.org/10.1243/PIME{_}PROC{_}1993{_}207{_}227{_}02
- Grassie, S. L. (2023). Rail corrugation: A problem solved? *Wear*, 530-531. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.205005>
- Göteborgs Spårvägar. (u. å). Spårvagnar - Göteborgs Spårvägar. <https://goteborgssparvagar.se/om-oss/sparvagnar/>
- International Electrotechnical Commission. (2013). IEC 61672-1:2013 Electroacoustics—Sound level meters—Part 1: Specifications.
- James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2013). *An Introduction to Statistical Learning* (1. utg.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7138-7>
- Kropp, W., Forssén, J., & Estévez-Mauriz, L. (2016). *Urban sound planning : the SONORUS project*. Chalmers University of Technology, Division of Applied Acoustics.
- Meggar. (2007). FT Rail. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:FT_Rail.jpg
- Moridpour, S., & Hesami, R. (2015). Degradation and performance specification of Melbourne tram tracks. *ICTIS 2015 - 3rd International Conference on Transportation Information and Safety, Proceedings*, 270–276. <https://doi.org/10.1109/ICTIS.2015.7232120>

- Ragdoll4467. (2025). Spårvagn M34 Invigning 20250117. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sp%C3%A5rvagn_M34_Invigning_20250117.jpg
- Seabold, S., & Perktold, J. (2010). statsmodels: Econometric and statistical modeling with python. I S. van der Walt & J. Millman (Red.), *Proceedings of the 9th Python in Science Conference* (s. 57–61).
- Sekreterare. (2020). M33 490. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:M33_490.jpg
- Škoda Group/Ekova. (2024). Škoda Group Reveals Final Design Visualisation as Gothenburg Tram Modernisation Began. <https://www.skodagroup.com/press-release/skoda-group-reveals-final-design-visualisation-as-göteborg-tram-modernisation-began>
- Thompson, D. J. (1996). *ON THE RELATIONSHIP BETWEEN WHEEL AND RAIL SURFACE ROUGHNESS AND ROLLING NOISE* (tekn. rapport Nr 1).
- UIC. (2014). *Harmonization-Running Behaviour and Noise on Measurement Sites* (tekn. rapport). Internationella järnvägsunionen, UIC.
- Waskom, M. L. (2021). seaborn: Statistical data visualization. *Journal of Open Source Software*, 6(60), 3021. <https://doi.org/10.21105/joss.03021>
- Volk-Jesussek, H. (2025 september). Levene Test: A Beginner's Guide [Hämtad 2026-05-12]. <https://numiqo.com/tutorial/levene-test>
- Västtrafik. (2024 oktober). *Förstudie ny spårvagn M35* (tekn. rapport). <https://www.vasttrafik.se/globalassets/media/dokument/styrelsehandlingar-och-protokoll/moten-2025/23-april/nr-10.5-forstudie-ny-sparvagn-m35.pdf>



CHALMERS