



UPPSALA
UNIVERSITET

W 19 024

Examensarbete 30 hp
April 2019

Trafikinducerade vibrationer

En studie om busskuddars påverkan på
vibrationsnivåer i mark och byggnader.

Erika Johansson Kling

REFERAT

Trafikinducerade vibrationer: En studie om busskuddars påverkan på vibrationsnivåer i mark och byggnader.

Erika Johansson Kling

I Uppsala används busskuddar som en form av medveten ojämnheter i vägbanan för att sänka hastigheten och öka trafiksäkerheten på olycksdrabbade vägsträckor. Boende i bostäder belägna nära busskuddar har dock rapporterat att de ibland kan uppleva vibrationer kopplade till då tunga fordon passerar busskuddar som störande. Denna studie syftade till att kvantifiera vibrationsnivåer i mark och byggnader nära busskuddar samt utreda centrala faktorer som kan påverka vibrationsnivån och vibrationsutbredningen. Genom vibrationsmätningar i fält på fyra platser i Uppsala samlades data in och analyserades utifrån angivna frågeställningar.

Resultatet bekräftade det som litteraturstudien belyste, att det är svårt att på ett generellt sätt beskriva vibrationsutbredningen och att den tydligt är platspecifik. Vid samtliga undersökta platser kunde dock konstateras att vibrationsnivån i marken tenderar att vara en faktor mellan 2,5–32 högre då ett tungt fordon passerar en busskudde, jämfört med då det passerar en opåverkad referenspunkt längs med samma väg. Generellt avtog dessutom vibrationsnivån i marken med ökat avstånd från källan. Vilken vibrationsled som dominerade varierade dock både mellan platserna och för olika avstånd från källan. Vid en av de fyra mätplatserna förstärktes vibrationsnivån i byggnaden, jämfört med i marken utanför. Vid samma mätplats överskreds dessutom känsletröskeln inomhus, och en skyddsvibrationsnivå på 0,5 mm/s kan behöva tillämpas vid busskudden för att förhindra detta.

Mätningarna visade att både vibrationer med låga och höga frekvenser kan uppstå i marken nära busskudden då tunga fordon passerar. Dock var det enbart vibrationer med låga frekvenser som spreds vidare i marken vid ett ökat avstånd från källan. Studien visade dessutom att det kan krävas ett skyddsavstånd mellan busskudde och byggnad på cirka 100 meter för att känsletröskeln inte ska riskera att överskridas inomhus. Trots att ett sådant avstånd är plats specifikt, belyser det vilka krav det skulle kunna ställa på samhällsbyggnaden i ett växande Uppsala.

Det faktum att busskuddar kan förhöja vibrationsnivån i marken vid passage av tunga fordon ter sig något märkligt, då busskuddarna ska vara utformade på ett sätt som tillåter tunga fordon att passera relativt obehindrat. Fler studier kring busskuddarnas utformning och/eller grundläggning är därför av stor relevans. Det är vidare relevant att exempelvis utreda hur fordonens hastighet över busskuddar påverkar vibrationsnivån i marken, då litteraturstudien belyser att det främst är då tunga fordon passerar ojämnheter med hög hastighet som betydande vibrationer kan uppstå. Busskuddar anses vara en av de mest effektiva hastighetssänkande åtgärderna, men studien visar att det kan ske på bekostnad av ökade vibrationsnivåer. En grundläggande helhetsbedömning bör därför göras av busskuddarnas lämplighet vid kommande stadsplanering.

Nyckelord: markvibration, vibrationsmätning, busskudde, trafik, samhällsbyggnad.

Institutionen för geovetenskaper, Uppsala Universitet, Villavägen 16, SE-752 36 Uppsala. ISSN 1401–5765.

ABSTRACT

Traffic induced vibrations: A study on the effect of speed control cushions on vibration levels in surrounding land and buildings.

Erika Johansson Kling

In Uppsala, speed control cushions are used as a form of conscious unevenness in the road surface to reduce speed and increase road safety on accident-affected road sections. However, housing in residences located near speed control cushions have reported that they can sometimes experience vibrations linked to when heavy vehicles pass speed control cushions as disturbing. This study aimed to quantify vibration levels in land and buildings near speed control cushions and to investigate key factors that can affect the vibration level and vibration propagation. Through vibration measurements at four places in Uppsala, data was collected and analyzed based on the stated research questions.

The result confirmed what the literature study highlighted, that it is difficult to describe the propagation of vibrations in a general way and that it is clearly site-specific. However, it was found at all the measurement sites that the vibration level in the ground tends to be a factor between 2.5 and 32 higher when a heavy vehicle passes a speed control cushion, compared to when it passes an unaffected reference point along the same road. Generally, the vibration level in the ground also decreased with increased distance from the source. However, the level of vibration that dominated varied between the locations and for different distances from the source. At one measurement site, the vibration level in the building was amplified compared to in the ground outside. At the same measurement site, the sensing threshold was also exceeded indoors, and a protection vibration level of 0.5 mm/s may have to be applied nearby the speed control cushions to prevent this from happening.

The measurements showed that both vibrations with low and high frequencies can occur in the ground near the speed control cushions when heavy vehicles pass. However, it was only vibrations with low frequencies that propagated further in the ground at an increased distance from the source. The study also showed that a safety distance between speed control cushions and buildings of approximately 100 meters may be required in order for the sensitivity threshold not to be exceeded indoors. Although such a distance is site-specific, it highlights what requirements it could put on the urban planning in a growing Uppsala.

The fact that speed control cushions can increase the level of vibration in the ground when heavy vehicles pass seems somewhat strange, since the speed control cushions are supposed to be designed in a way that allows heavy vehicles to pass relatively unobstructed. Additional studies on the design and/or foundation of the speed control cushions are therefore of great relevance. It is furthermore relevant to investigate, for example, how the speed of the vehicles when passing over speed control cushions affects the vibration level in the ground, since the literature study highlights that it is primarily when heavy vehicles pass an unevenness in the road surface at high speed that significant vibrations can occur.

Speed control cushions are considered to be one of the most effective speed reducing measures, but the study shows that they may lead to increased vibration levels. An overall

evaluation should therefore be made regarding the suitability of speed control cushions in future urban planning.

Keywords: ground vibration, vibration measurement, speed control cushion, traffic, urban planning.

Department of Earth Sciences, Uppsala University, Villavägen 16, SE-752 36 Uppsala.
ISSN 1401–5765.

FÖRORD

Under de senaste åren har jag studerat till Civilingenjör inom miljö- och vattenteknik, nio terminer i Uppsala och en termin i Vancouver. Det har varit en lång, rolig och utmanande resa som nu avslutas med detta examensarbete. Ett examensarbete som, så många andra sådana, stundvis har varit tufft men självklart även väldigt lärorikt. Min självständighet som ingenjör har satts på prov, något jag tycker har gått väldigt bra. Jag är dock mer övertygad än någonsin om hur viktigt och underlättande det är att ha inspirerande människor omkring sig när kluriga problem behöver diskuteras eller då idéer behöver bollas. Jag vill därför rikta ett stort tack till mina fina kursare och vänner, Elin och Anna, som de senaste åren har varvat problemlösningen med minnesvärda skratt.

Under examensarbetet har jag samarbetat med Sweco Environment i Uppsala, där Henrik Naglitsch har varit min handledare. Genom Sweco Civil i Stockholm kunde jag dessutom låna de instrument som användes under arbetet. Ett stort tack till min handledare och andra inblandade på Sweco för att ni var nyfikna på mina frågeställningar och ville samarbeta med mig. Vidare vill jag tacka Saga Hävermark från Stadsbyggnadsförvaltning på Uppsala kommun för hjälp med att ta fram diverse information och för bra inputs. Ett ytterligare stort tack ska ges till min hjälpsamma ämnesgranskare Monika Ivandic, forskare inom geofysik vid Institutionen för geovetenskaper på Uppsala universitet.

Slutligen, men troligen viktigast av allt, vill jag tacka min familj, mina vänner och min sambo som stöttat mig under utbildningens gång. Min sambo, Simon, involverades dessutom direkt i mitt examensarbete genom att han assisterade under alla mätningar, något som var en förutsättning för att de skulle kunna utföras överhuvudtaget.

Tack allesammans!

Erika Johansson Kling

Uppsala, april 2019

POPULÄRVETENSKAPLIG SAMMANFATTNING

Att beskriva utbredningen av vibrationer i mark och byggnader är komplext, något som i denna studie belyses av resultatet från vibrationsmätningar runt om i Uppsala samt litteraturstudien. Vid fyra mätplatser har vibrationsnivån vid så kallade busskuddar utvärderats, med slutsatsen att vibrationsnivån i närliggande mark blir högre då ett tungt fordon passerar en busskudde jämfört med då det passerar en opåverkad punkt längs med samma väg. Detta trots att en busskudde är en typ av vägbula som ska verka som hastighetsänkande ojämnheter för vanliga bilar, men som ska låta tyngre fordon passera relativt obehindrat. Den faktor med vilken vibrationsnivån ökar varierar mellan 2,5–32. Trots den stora variationen tyder resultatet på att det åtminstone kan förväntas en drygt dubblad vibrationsnivå i marken nära en busskudden, jämfört med i marken vid en opåverkad punkt, då ett tungt fordon passerar den.

Vid samtliga mätplatser gjordes vibrationsmätningar i marken nära busskudden samt på ett känt avstånd från den. Vibrationsmätaren var placerad på ett jordspett i marken och registrerade vibrationsnivåer i vertikal, longitudinell och transversell led. Vilken vibrationsled som var mest framträdande vid de respektive mätpunkterna skiljde sig åt mellan mätplatserna, men för samtliga gällde att vibrationsnivån i marken minskade med ökat avstånd från busskudden. Baserat på mätningarna skapades vidare ekvationer, vilka kan användas för att uppskatta vibrationsnivån på olika avstånd från busskudden vid de respektive mätplatserna. Utifrån dessa kunde konstateras att vibrationerna främst sprids i marken som en så kallad Rayleighvåg, en ytvåg vilken är den vanligaste typen av våg vid vibrationer orsakade av vägtrafik.

I regel gäller det att tunga fordon som kör med en hög hastighet inducerar högre vibrationsnivåer än lätta fordon som kör med en låg hastighet. Det är dessutom främst då dessa färdas på vägar med ojämnheter som vibrationer i marken uppstår. Vibrationerna kan sedan spridas i marken och i vissa fall vidare till närliggande byggnader, där de kan påverka och/eller störa de boende. Förutom faktorer kopplade till fordonen och vägkvaliteten, beror vibrationsnivån i mark och byggnad på faktorer kopplade till exempelvis marksammansättning och byggnadskonstruktion. Busskuddar är ett exempel på en form av medveten ojämnheter i syfte att sänka hastigheten, bland annat vid olycksdrabbade övergångsställen. Resultaten från denna studie visar dock att det ibland sker på bekostnad av ökade vibrationer både i närliggande mark och i byggnader, med störningar hos de boende som följd.

För att undersöka vibrationsnivåer i byggnader, kopplade till då tunga fordon passerar över busskuddar, gjordes det vid tre av de fyra mätplatserna, förutom mätningar i marken, även mätningar inomhus. Ett värde som beskriver vid vilken vibrationsnivå som en människa riskerar att uppfatta en vibration är den så kallade känseltröskeln, vilken har ett värde på 0,28 mm/s. Vid en av de tre mätplatserna överskreds detta värde inomhus vid ett flertal tillfällen. Även värdet 0,4 mm/s, vilket är gränsen för vad som riskerar måttlig störning, överskreds där vid fler än ett tillfälle. Det skall nämnas att byggnaden vid denna mätplats förstärkte vibrationerna i marken, det vill säga att vibrationsnivån inomhus var högre än vibrationsnivån i marken intill husväggen.

För den mätplats där känseltröskeln överskreds vid ett flertal gånger togs två förslag till skyddsåtgärder fram baserat på resultatet från vibrationsmätningarna. Dels en så kallad skyddsvibrationsnivå och dels ett så kallat skyddsavstånd. Bägge syftar till att undvika att

känsltröskeln överskrids inomhus. En skyddsvibrationsnivå på 0,5 mm/s vid ett avstånd på 5 meter från busskudden, respektive 0,17 mm/s vid husväggen, bör tillämpas för att undvika att vibrationsnivån inomhus blir högre än 0,28 mm/s. Avståndet mellan busskudde och husvägg är i det fallet cirka 25 meter. Om vibrationsnivån vid ett avstånd på 5 meter från busskudden är 1 mm/s krävs ett skyddsavstånd på cirka 100 meter till husväggen för att känsltröskeln inomhus inte ska överskridas vid denna mätplats. Trots att mätresultaten skiljer sig mycket åt mellan de respektive mätplatserna, visar detta att det är av högsta vikt att ytterligare utreda hur vibrationer orsakade av vägtrafik vid vägbulor sprids i närliggande mark och byggnader, detta för att underlätta val vid framtida trafik- och bostadsplanering och förhoppningsvis undvika störning för de boende.

ORDLISTA

BUSSKUDDE

En busskudde är en typ av vägbula vilken har som syfte att sänka hastigheten för bilar. Den låter dock tunga fordon passera relativt obehindrat för att underlätta framkomligheten och för att ge en bättre arbetsmiljö för föraren. Busskuddar placeras ofta innan busshållplatser eller övergångsställen där kraven på farddämpning är höga.

TRAFIKINDUCERAD VIBRATION

En vibration som uppstår då ett fordon inducerar dynamiska krafter i marken vilka kan sätta den i rörelse.

GEOFON

Ett instrument som mäter vibrationshastigheter.

DATALOGER

Ett instrument som lagrar data, i detta fall vibrationshastigheter.

TRIGGNING

En triggning innebär att dataloggern, då geofonerna uppmäter ett värde över vald vibrationsnivå, lagrar en transient.

TRANSIENT

En transient betyder att dataloggern, istället för att exempelvis enbart lagra det maximala värdet per minut, lagrar all mätdata kontinuerligt under två sekunder från och med det att den valda vibrationsnivån överskrids. Transienterna ger mätdata både i tids- och frekvensdomänen.

REFERENSPUNKT

En referenspunkt definieras som en ostörd punkt längs med samma väg som busskudden. Den ska representera ett trafikflöde som är helt opåverkat av busskudden.

KÄNSELTRÖSKEL

Ett snittvärde för den vibrationsnivå vid vilken en vibration kan kännas av människor.

SKYDDSAVSTÅND

Ett avstånd mellan mätpunkt vid busskudde och mätpunkt vid husvägg vilket undviker att känseltröskeln överskrids vid mätpunkt inomhus, vid en vald maximalt tillåten vibrationsnivå vid busskudden.

SKYDDSVIBRATIONSNIVÅ

En maximalt tillåten vibrationsnivå vid mätpunkt vid busskudde, vilken undviker att känseltröskeln överskrids inomhus.

Innehållsförteckning

REFERAT	1
ABSTRACT	2
FÖRORD.....	4
POPULÄRVETENSKAPLIG SAMMANFATTNING	5
ORDLISTA	7
1. BAKGRUND	10
1.1 SYFTE	10
1.2 FRÅGESTÄLLNINGAR.....	10
2. TEORI	11
2.1 FARTHINDER	11
2.2 VIBRATIONER.....	12
2.2.1 Svängningsrörelse	12
2.2.2 Markvibration och vågtyper.....	12
2.2.3 Utbredning och dämpning	13
2.2.4 Interferens och resonans	14
2.3 VIBRATIONSMÄTNINGAR	14
2.3.1 Geofon	15
2.4 TRAFIKINDUCERADE MARKVIBRATIONER.....	15
2.4.1 Uppkomst.....	15
2.4.2 Egenskaper.....	15
2.4.3 Vägbanans påverkan	16
2.4.4 Marksammansättningens påverkan	16
2.4.5 Byggnadskonstruktionens påverkan	16
2.4.6 Riktvärden	17
2.5 VIBRATIONERS PÅVERKAN.....	18
2.5.1 Byggnader.....	18
2.5.2 Människor	18
2.6 ÅTGÄRDER.....	19
3. METOD.....	20
3.1 VAL AV MÄTPLATSER.....	20
3.1.1 Kartläggning av busskuddar	20
3.1.2 Kartläggning av jordart och grundläggning	20
3.1.3 Urval	20
3.2 UTFÖRANDE AV MÄTNINGAR	21
3.2.1 Mätinstrument.....	21
3.2.2 Mätförarande.....	21
3.2.3 Mätpunkter.....	21
3.2.4 Presentation av mätplatser	22
3.3 FÖRBEHANDLING AV MÄTDATA	25

3.3.1 Sortering	25
3.3.2 Formulering av summa	26
3.3.3 Korrelation.....	26
3.4 BERÄKNING BASERAT PÅ MÄTDATA	27
3.4.1 Vibrationsnivå.....	27
3.4.2 Vibrationsutbredning	27
3.4.3 Säkerhetsåtgärder.....	29
4 RESULTAT.....	31
4.1 VIBRATIONSNIVÅ	31
4.2 VIBRATIONSUTBREDNING.....	34
4.3 FREKVENSPANALYS	36
4.4 ÖVERFÖRINGSFUNKTION MELLAN MARK OCH BYGGNAD.....	37
4.5 SKYDDSVIBRATIONSNIVÅ.....	38
4.6 SKYDDSAVSTÅND.....	38
5 DISKUSSION	39
5.1 VIBRATIONSNIVÅ	39
5.2 VIBRATIONSUTBREDNING OCH FREKVENSPANALYS.....	39
5.3 VIBRATIONER I BYGGNAD OCH SKYDDSAÅTGÄRDER.....	41
5.4 PÅVERKANDE FAKTORER OCH VIDARE STUDIER	43
6 SLUTSATSER	45
7 REFERENSER.....	46
8 APPENDIX	50
A. GEOMETRISK DÄMPNING.....	50
B. SERIENUMMER GEOFONER.....	50
C. FOTON FRÅN MÄTPLATSER.....	51
D. MÄTDATA.....	53
E. KORRELATION.....	65
F. BERÄKNING AV DIFFERENSER	67
G. BERÄKNING AV KVOTER	68
H. ITERATIV ANPASSNING	68
I. LAMB'S EKVATION.....	69
J. FREKVENSSPEKTRUM	70
K. BERÄKNING SKYDDSVIBRATIONSNIVÅ	74
L. BERÄKNING SKYDDSAVSTÅND.....	74
M. MATERIALDÄMPNING	74

1. BAKGRUND

Under våren 2018 anlätades Sweco av Uppsala kommun för att mäta om tung vägtrafik alstrade vibrationer i sju bostäder i Uppsala. I enlighet med SS 406 48 61 "Vibration och stöt – Mätning och riktvärden för bedömning av komfort i byggnader" avsågs att kontrollera och bedöma eventuella överskridanden av riktvärden (SIS Swedish Standards Institute, 2004). Anledningen till utredningen var att boende i olika områden av Uppsala hade upplevt störningar kopplade till vibrationer från vägtrafik. Utifrån de mätningar som Sweco utförde under år 2018 vid nyanlagda busskuddar utmed Vaksalagatan, kunde konstateras att busskuddarna kan påverka vibrationsnivåerna i närliggande bostäder negativt. En vidare utredning är därmed av relevans för att ytterligare kartlägga och kvantifiera vibrationsnivåer vid busskuddar. Genom ökad förståelsen om vibrationer orsakade av vägtrafik vid denna typ av vägbulor kan val vid framtida trafik- och bostadsplanering underlättas.

1.1 SYFTE

Syftet med denna studie är att kvantifiera vibrationsnivåer orsakade av vägtrafik vid busskuddar. Studien syftar därmed till att undersöka vibrationsutbredning i mark mellan busskudde och närliggande byggnad. Vidare syftar studien till att undersöka om vibrationsnivån i marken tenderar till att vara högre då ett tungt fordon passerar en busskudde, jämfört med då det passerar en opåverkad referenspunkt längs med samma väg. Centrala faktorer som påverkar vibrationsnivån och utbredningen ska dessutom, i den mån som är möjlig, kartläggas utifrån litteratur, tidigare studier samt mätresultat. Slutligen ska lämpliga skyddsåtgärder föreslås och utvärderas.

1.2 FRÅGESTÄLLNINGAR

- * Hur mycket kan en busskudde förhöja vibrationsnivån i marken jämfört med en opåverkad referenspunkt längs med samma väg?
- * Hur ser vibrationsutbredningen ut mellan busskudde och byggnad?
- * Vilka faktorer kan medföra en ökad risk för att boende i byggnader belägna nära busskuddar kan uppleva störning?
- * Vilken skyddsvibrationsnivå bör tillämpas vid busskudde för att inte överskrida vibrationsnivån för känseltröskeln i byggnad vid respektive mätplats?
- * Vilket skyddsavstånd till byggnad bör, vid en utifrån mätningarna vald maximal vibrationsnivå vid busskudde, tillämpas för att inte överskrida känseltröskeln i byggnad vid respektive mätplats?

2. TEORI

Följande avsnitt behandlar grundläggande teori om hur vibrationer kan uppstå, spridas och påverka omgivningen. Vidare presenteras hur vibrationer i mark och byggnad kan mätas samt riktvärden och eventuella åtgärder. Då vibrationer är ett för många nytt område, som dessutom inte tidigare behandlats under utbildningen för civilingenjörer i miljö- och vattenteknik, är teoridelen extra väl tilltagen för att möjliggöra en grundlig förståelse inom ämnet.

2.1 FARTHINDER

Det kan vara en konst att kombinera en god tillgänglighet, vad gäller exempelvis transporter, med en hög trafiksäkerhet och en trevlig miljö för de oskyddade trafikanterna (Vägverket och Uppsala kommun, 2009). I Uppsala kommun är den förväntade befolkningstillväxten 3800 personer per år till och med år 2021. Den totala folkmängden förväntas passera 300 000 personer innan slutet av år 2050 (Uppsala kommun, 2017). Enligt den senaste statistiken från SCB (2018) var 219 914 personer folkbokförda i Uppsala kommun år 2017. Utvecklingen av stadens trafiksystem kopplas till efterfrågan hos invånare, samtidigt som utformningen måste främja en hållbar utveckling och ta hänsyn till omgivande bebyggelse (Vägverket och Uppsala kommun, 2009).

Några typiska problem i växande städers vägtransportsystem är exempelvis trafikolyckor, med allvarliga personskador samt begränsad tillgänglighet för oskyddade och skyddade trafikanter (Svensson & Hedström, 2003). En förutsättning för en säker stadsgata är att fordonen på vägen håller hastighetsbegränsningar och förarna är uppmärksamma på oskyddade trafikanter. På långa och raka gator kan åtgärder behöva vidtas för att inte bjuda in till höga hastigheter. Ett exempel på en sådan åtgärd är införandet av vägbulor (Vägverket och Uppsala kommun, 2009). Farthinder i form av vägbulor anses vara en effektiv åtgärd både för att sänka hastigheten och för att minska antalet olyckor på vägar (Kennedy et al., 2004). Av andra tänkbara åtgärder, såsom exempelvis portar, sidoförskjutning och smal körbana, är vägbulor det mest effektiva för fartdämpning (Vägverket & Svenska Kommunförbundet, 2004).

Det finns olika typer av vägbulor, där busskudde en av de vanligt förekommande (Vägverket & Svenska Kommunförbundet, 2004). En busskudde är ett alternativ som främst används på vägar som trafikeras av bussar, då dessa är utformade så att tunga fordon ska ges möjlighet att passera relativt obehindrat i syfte att underlätta framkomlighet och att ge en bättre arbetsmiljö för föraren. En busskudde har en trapetsformad längd- och tvärprofil, med en höjd av ca. 8 cm (Trafikverket, 2010). Se figur 1 för foto på busskuddar.



Figur 1. Två parallella busskuddar.

Vägbulor och busskuddar fungerar som en form av medveten ojämnheter i vägbana i syfte att sänka hastigheten på vägar där detta är nödvändigt (Watts, 2000). De placeras ofta innan busshållplatser eller övergångsställen där kraven på fartdämpning är höga (Trafikverket, 2010). Se figur 2. I tätbefolkade områden har antalet klagomål angående markvibrationer från bussar ökat de senaste åren, där ökad användning av vägbulor kan vara en bidragande faktor (Coquela & Fillola, 2017).



Figur 2. Busskudde placerad innan ett övergångsställe.

2.2 VIBRATIONER

I detta avsnitt beskrivs teorin bakom hur en vibrationsvåg uppstår och sprids i marken.

2.2.1 Svängningsrörelse

En vibration kan förklaras som en cyklisk svängningsrörelse runt ett jämviktsläge (Möller et al., 2000). Det finns vidare i huvudsak tre olika sätt att beskriva en vibration på; som en hastighet, som en acceleration eller som en förskjutning (Ögren, 2016). Genom den enkla harmoniska rörelsen, sinusvibrationen, kan en vibration uttryckas enligt följande (ekvation 1–3):

$$A = \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$v = A\omega * \cos(\omega t) \quad (2)$$

$$a = A\omega^2 * \sin(\omega t) \quad (3)$$

Där: A, förskjutningsamplitud [m]; ω , vinkelfrekvens [rad/s]; t, tid [s]; v, hastighet [m/s]; a, acceleration [m/s²].

En svängningsrörelse kan antingen karakteriseras genom en beskrivning av tidsförloppet i tidsdomänen eller som ett frekvensspektrum i frekvensdomänen. Beroende på val av domän kan olika typer av utvärdering ske. Tidsdomänen lämpar sig för utvärdering av exempelvis min- och maxvärden för en vibration, medan frekvensdomänen främst kan användas för att utläsa den dominerande frekvensen (Möller et al., 2000).

2.2.2 Markvibration och vågtyper

Markvibrationer är den tekniska termen som används för att beskriva mänskligt orsakade vibrationer. Motsatt behandlar seismologi naturliga vibrationer orsakade av jorden.

Vibrationer orsakade av vägtrafik faller därmed under området markvibrationer. Att beskriva uppkomst och utbredning av markvibrationer är dock komplext. En källa, vilken exempelvis kan vara en bil som kör över en ojämnhet i vägbanan, kan inducera dynamiska krafter i marken. Dessa krafter genererar i sin tur rörelser i jordlagren vilka kan spridas vidare i marken som spänningsvågor (SGF, 2013). Vid beskrivning av vågor delas de vanligtvis upp i två olika kategorier: volymvågor och ytvågor. Inom kategorien volymvågor finns därefter två underkategorier: kompressionsvågor och skjuvvågor. (Möller et al., 2000).

Volymvågor kan färdas i markens alla riktningar medan ytvågor, utifrån namnet, enbart uppkommer i de översta jordlagren närmast markytan. Beroende på markens styvhet varierar utbredningsfarten och därmed transporten av energi i jorden. Kompressionsvågor benämns ofta primärvågor (P-vågor) då dessa har den högsta utbredningshastigheten (SGF, 2013). En kompressionsvåg består av förtätningar och förtunningar av det material den färdas i. Den enskilda partikelns rörelse är parallell med utbredningsriktningen och vågens benämns därmed som longitudinell (Möller et al., 2000).

Skjuvvågor, vilket är den andra typen av volymvågor, benämns ofta sekundärvågor (S-vågor). I motsats till kompressionsvågor sker rörelsen vinkelrätt mot utbredningsriktningen. De benämns därmed som transversella vågor (Möller et al., 2000). Den vågtyp som främst dominerar vid trafikinducerade vibrationer är dock Rayleighvågor, vilket är så kallade ytvågor med en cylindrisk vågfront (Hunaidi, 2000).

2.2.3 Utbredning och dämpning

Under sin färd genom jorden modifieras vågorna, beroende på jordens materialegenskaper, genom reflektion, refraktion och dämpning (SGF, 2013). När en våg reflekteras tillbaka, då den träffar gränsen i ett annat material, benämns detta som reflektion. När en våg bryts och fortsätter med en ny hastighet, då den träffar ett annat material med annan densitet och/eller styvhet, benämns detta som refraktion. Beroende på material och hastighet reflekteras och bryts vågor i olika stor utsträckning. Eftersom reflektion och refraktion endast uppstår i gränssytor är dessa fenomen enbart aktuella i skiktade material. Refraktion kan exempelvis användas för att få en uppfattning av skiktningen i en jordprofil (Möller et al., 2000).

När en våg går in i ett annat material sker, förutom reflektion och refraktion, även viss absorption. När en våg dämpas och vågenergi omvandlas till värme, enligt samma princip som då mikrovågor i en mikrovågsugn värmer något, benämns detta som absorption. Avgörande för vågens dämpning är dess frekvens och hastighet (Möller et al., 2000). Intensiteten hos vibrationer som sprids från en källa kommer att dämpas på två olika sätt med ökat avstånd från källan, genom materialdämpning och genom geometrisk dämpning. Materialdämpning orsakas av den inre friktionen i det material som vågorna färdas genom (SGF, 2013). Denna kan beskrivas som en materialdämpningskoefficient (α) vilken främst beror av jordmaterialet och skjuvdeformationens storlek, men även av vattenmättnadsgraden i jorden (Möller et al., 2000).

Den andra typen av dämpning, geometrisk dämpning (n), innebär att vågens amplitud minskar med ökat avstånd från källan då vibrationerna sprids över ett större område (SGF, 2013). Geometrisk dämpning kan liknas med hur vattenvågorna kring en sten som släpps på en vattenyta minskar med ökat avstånd från stenens träffpunkt (Hunaidi, 2000). I homogena jordar kan generella och enkla förhållanden för vibrationers utbredning och avtagande med avstånd tas fram. En jord är dock sällan homogen och ofta skiktad, vilket gör beskrivningen av vibrationsutbredningen mycket komplex och platspecifik

(Hunaidi, 2000). För analys av vibrationsutbredning kan Lamb's ekvation 4 användas (SGF, 2013).

$$M_{bZ} = M_{\text{summaY}} * \left(\frac{R_Y}{R_Z}\right)^n * e^{(-\alpha(R_Z - R_Y))} \quad (4)$$

Där: α , materialdämpningskoefficient, som varierar beroende på marktyp och vibrationsfrekvens [1/m]; n , konstant för geometrisk dämpning, som beror av vågtyp, källa och vågutbredning; M_{summaY} , uppmätt summa vid mätpunkt Y [mm/s]; R_Y , avstånd från mätpunkt X (källa) till mätpunkt Y; R_Z , avstånd från mätpunkt X (källa) till mätpunkt Z (SGF, 2013).

Ekvation 4 begränsas av att materialdämpningen enbart kan beräknas för en enskild frekvens. I tabell 1 presenteras materialdämpningskoefficient, α , för 50 Hz respektive 5 Hz vid olika marktyper (Ni et al., 2017; SGF, 2013). För den vågtyp som främst dominerar vid trafikinducerade vibrationer, Rayleighvågor, har konstanten för geometrisk dämpning (n) typiskt ett värde på 0,5 (Ni et al., 2017). För fler n -värden, se appendix A.

Tabell 1. Materialdämpningskoefficient α , vid olika marktyp, för vibrationsfrekvens 50 Hz respektive 5 Hz [1/m] (Ni et al., 2017; SGF, 2013).

Marktyp	50 Hz	α [m^{-1}]	5 Hz	α [m^{-1}]
Mjuka jordar (organiska jordar, mjuk till halvfast lera, sand)	0,1 ~ 0,3		0,01 ~ 0,03	
Fasta jordar (fast lera, friktionsjord)	0,03 ~ 0,1		0,003 ~ 0,01	
Hårda jordar (mycket fast lera, friktionsjord, vittrat berg)	0,003 ~ 0,03		0,0003 ~ 0,003	
Hårt berg (berggrund)	< 0,003		< 0,0003	

2.2.4 Interferens och resonans

En kombination av fenomenen reflektion, refraktion och interferens kan ge försvagning och förstärkning av vågor som färdas i skiktade material, vilka kan vara väldigt svåra att teoretiskt förutspå. Vågor kan inte kollidera, utan adderas istället till varandra vilket benämns interferens. Interferens kan således ge både försvagning och förstärkning. Om vågorna har samma amplitud, varav den ena är förskjuten en halv våglängd, kommer de att släcka ut varandra. Motsatt gäller att om vågorna ligger i fas, dvs. har samma frekvens och når maximum samtidigt, kommer de att förstärkas (Möller et al., 2000).

Vibrationer kan dessutom förstärkas genom så kallad resonans. Resonans uppstår om en eller flera egenfrekvenser för ett jordlager överensstämmer med frekvenser hos källan, vilket kan orsaka stora rörelser (SGF, 2013; Möller et al., 2000). Egenfrekvens definieras som den frekvens vilken en kropp "helst" svänger med när den exciteras från sitt jämviktsläge. I en byggnad beror egenfrekvensen bland annat på strukturens vikt, styvhet och dämpningsegenskaper (SGF, 2013). Ett system har flera egenfrekvenser, men oftast är den lägsta av dem mest tekniskt relevant eftersom den största förstärkningen uppstår vid den så kallade grundfrekvensen (Möller et al., 2000; SGF, 2013).

2.3 VIBRATIONSMÄTNINGAR

För omvandlingen av markvibrationer till elektriska signaler används olika instrument (SGI, 1969). Vid mätning av hastighet och förskjutning används en geofon (Ögren, 2016). De respektive storheterna anges sedan generellt triaxiellt, dvs. i tre led. En i vertikalled och två i horisontalled, transversellt och longitudinellt (Tholén, 1974). När vibrationer

mäts används vanligtvis en frekvensvägning som motsvarar människans känslighet, vilket medför att hastighet och acceleration anges som vägda storheter (Vägverket, 2004).

2.3.1 Geofon

En geofon består i regel av en elektrisk spole och en permanentmagnet, likt en mikrofon. Spolen är fixerad medan magneten är upphängd i en känslig fjäder i geofonens yttre hölje. När ytterhöljet, och därmed även magneten, rör sig till följd av markens rörelse induceras elektrisk ström i spolen. De elektriska impulserna skickas därefter vidare till dataloggern vilken registrerar och lagrar dem (SGI, 1969).

Vid analys av geologiska strukturer kan geofoner användas för att registrera hur konstgjorda ljudvågor förändras beroende på markens egenskaper. Geofoner kan därmed hjälpa till att ge en bild av hur marken ser ut i genomskärning (SGU, 2013).

2.4 TRAFIKINDUCERADE MARKVIBRATIONER

Detta avsnitt behandlar uppkomst av och egenskaper för trafikinducerade markvibrationer. Vidare presenteras hur marksammansättning och byggnadskonstruktion påverkar dess utbredning. Slutligen redovisas känsligränserna och riktvärdena.

2.4.1 Uppkomst

Tunga fordon som färdas på vägar med ojämnheter orsakar i vissa fall vibrationer (Ögren, 2016). En källa, i detta fall ett fordon, inducerar dynamiska krafter i marken vilka kan sätta jordlagren i rörelse (SFG, 2013). Vibrationerna kan därmed spridas via marken till närliggande byggnader och påverka både byggnader och de boende (Hunaidi & Tremblay, 1997; Lombaert, 2001). Vilken vibrationsnivå som genereras beror bland annat av marksammansättning, byggnadskonstruktion, vägkvalitet, fordonskaraktär och fordonets hastighet (Hunaidi & Tremblay, 1997). Generellt gäller att en större tyngd och/eller en högre hastighet hos ett fordon ger upphov till högre vibrationsnivåer (Ögren, 2016). Det gäller därmed att speciellt höga vibrationsnivåer främst uppstår när tunga fordon, i hög hastighet, färdas på vägar med ojämnheter (Lombaert, 2001).

2.4.2 Egenskaper

Som tidigare nämnts, utbreder sig en trafikinducerad vibration främst som en Rayleighvåg (Hunaidi, 2000). Nära vibrationskällan är vanligtvis den vertikala komponenten större, medan de horisontella komponenterna blir mer framträdande vid ökat avstånd från källan. Den roterande partikelrörelsen hos en Rayleighvåg kan dock ge såväl stora vertikala som stora horisontella komponenter nära källan (Hanneliuss, 1974).

Trafikinducerade markvibrationer har normalt sett en dominerande frekvens mellan 5–25 Hz och en amplitud, om mätt i hastighet, mellan 0,05–25 mm/s. Många samverkande faktorer påverkar den dominerande frekvensen och amplituden. Både faktorer kopplade till trafiken, markegenskaper och byggnadskonstruktionen. Genom att utifrån mätdata analysera spektrumet kan vibrationernas dominerande frekvens vid en mätplats bestämmas (Hunaidi, 2000). Generellt är frekvensen för vibrationer från vägbulor och busskuddar cirka 8–16 Hz (Watts, 2000).

I mjuka jordar har vibrationsmätningar visat två tydliga spektraltoppar, en med ett maximum vid något lägre frekvenser (5–10 Hz) och en med ett maximum vid något högre frekvenser (30–50 Hz). Ju mjukare jord, desto mer framträdande blir spektraltopparna vid de låga frekvenserna (Madshus et al., 1996). Högre frekventa vågor dämpas i större utsträckning snabbare än lågfrekventa vågor, som en effekt av materialdämpningen. Således kan lågfrekventa vågor spridas över större avstånd (SGF, 2013). Vibrationer vid

de låga frekvenserna tenderar dessutom att enklast förstärkas i byggnader, som en följd av resonans (Madshus et al., 1996).

2.4.3 Vägbanans påverkan

Vägbanans jämnhet påverkar både bland annat komfort i och slitage på fordon, samt ljud- och vibrationsnivåer genererade från fordon som kör på vägen. Faktorer som påverkar vägbanans jämnhet är exempelvis vägens materialtyp, ålder, underhållsintervall, underliggande markegenskaper, andel tung trafik och klimatet (Lak et al, 2011). Vägbanans egenskaper i sig fyller dessutom ett flertal funktioner vad gäller komfort och säkerhet vid färd på vägen. Exempelvis utformas vägytans textur för att ge ett bra väggrepp, minimera vattenstänk vid regn och minska blänk från helljus vid mörkerkörning. En nackdel med denna textur kan dock vara negativa effekter såsom minskad hållbarhet av både väg och däck. Vägskador i sin tur, till följd av exempelvis dubbdäck, tunga fordon och klimatet, kan ge upphov till ojämnheter i vägbanan vilka i sin tur kan orsaka vibrationer då tunga fordon passerar dessa (Vägverket, 2000). Som tidigare nämnts används exempelvis busskuddar som en medveten ojämnheter i vägbanan, med syfte att sänka hastigheten, vilket kan orsaka markvibrationer (Watts, 2000; Coquela & Fillola, 2017).

2.4.4 Marksammansättningens påverkan

Utbredningen av markvibrationer är, förutom till källans karaktär, kopplad till de geotekniska och geologiska förhållandena i omgivningen (Vägverket, 2004). Markvibrationer på en plats är normalt sett störst vid den platsspecifika naturliga frekvensen, vilken beror av jordens styvhet och skiktning. Vid grundfrekvensen är motståndet minst och därmed responsen störst för en vibration. Ju lägre en jords dämpning och styvhet är, desto större vibrationer (Hunaidi, 2000).

Vid bedömning om risk för störning och/eller skador orsakade av vibrationer är det av högsta relevans att utvärdera frekvensområdet inom vilken vibrationen uppstår. Klagomål från boende, relaterade till vibrationer, är vanligast i områden med kohesionsjordar (Hannelius, 1974), dvs. i områden med lerjordar (SGU, 2018B). Vibrationer i kohesionsjordar har typiskt en lågfrekvent karaktär (0–10 Hz), medan vibrationer i friktionsjordar karakteriseras av mer högfrekventa svängningar (Hannelius, 1974). En friktionsjord är grovkornig, så som exempelvis sand och grus, medan en kohesionsjord består av mer finkorniga jordpartiklar (SGU, 2018B).

Det är främst egenskaperna hos de översta jordlagren som påverkar de trafikinducerade markvibrationerna. Anledningen till detta är det faktum att trafikinducerade vibrationer främst färdas som ytvågor från källan (Hao et al., 2001). Generellt gäller att lösa mäktiga lerlager är känsliga för vibrationer (COWI, 2015). Problem med vibrationer är därmed ofta störst om väg och/eller byggnad är grundlagda på lera. Andra jordegenskaper som spelar roll är bland annat hållfasthet, lagringstäthet, mäktighet, packningsgrad och vatteninnehåll (Vägverket, 2004). Exempelvis kan det, på platser där det översta jordlagret är fruset under vintern, vara så att vibrationsnivåerna är mindre än hälften så stora som under övriga tiden på året (Hunaidi, 2000).

2.4.5 Byggnadskonstruktionens påverkan

Hur en byggnad reagerar på vibrationer beror, förutom på omgivande mark, bland annat på byggnadsmaterial, grundkonstruktion, stomstyvhet och våningshöjd (Vägverket, 2004). För en byggnad gäller generellt att minskade vibrationsnivåer ges om grunden är förankrad i styvare jordmaterial, exempelvis genom pålgrundläggning. Vidare kan tunga och styva byggnader lättare stå emot markvibrationer, än vad mjuka och lätta byggnader

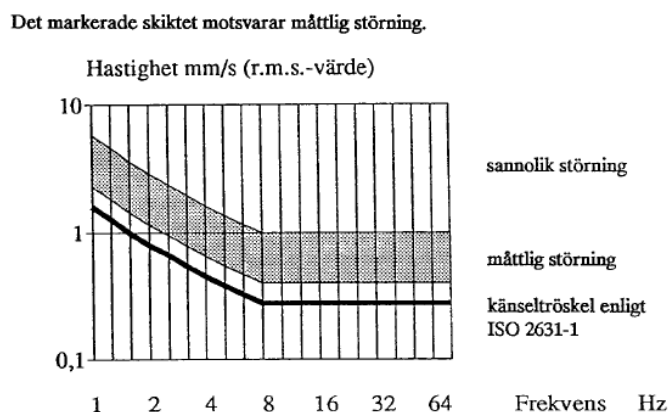
kan. Dock kan känsligheten för vibrations-skador vara större för en tung och styv byggnad, jämfört med för en mer flexibel byggnad (SGF, 2013).

Vanligtvis sker den huvudsakliga vibrationsrörelsen i en husgrund i vertikalled. Eventuella horisontella vibrationer i husgrunden kan dock förstärkas högre upp i byggnaden (Watts, 1990). Vibrationer i en byggnad kan, som tidigare nämnts, bli stora genom resonans om byggnadens egenfrekvens överensstämmer med den dominerande frekvensen i markvibrationen (SGF, 2013). Resonans av en hel byggnad tenderar, enligt Hannelius (1974) att ske vid frekvenser < 10 Hz, medan resonans av golv respektive väggar och fönster, enligt Jones (1994), tenderar att ske vid frekvenser mellan 20–30 Hz respektive > 40 Hz. Både såväl vertikala som horisontella vibrationskomponenter kan ge upphov till resonanseffekter i en byggnads övre delar, enligt resonemanget ovan (Hannelius, 1974).

2.4.6 Riktvärden

På vilket sätt människor upplever och/eller störs av trafikinducerade vibrationer beror till stor del på individen. Ett snittvärde för den nivå när en vibration kan kännas, kallad känseltröskeln, har ett värde mellan 0,1–0,3 mm/s (vägd RMS) i frekvensområdet 10–100 Hz (Banverket & Naturvårdsverket, 2006).

För känseltröskel, samt intervall för måttlig- respektive sannolik störning, se figur 3 (SIS Swedish Standards Institute, 2004).



Figur 3. Känseltröskel enligt ISO-2631-1, utifrån varierad frekvens [Hz] och vibrationshastighet (vägd RMS) [mm/s], är markerad med en svart linje. Det gråmarkerade området motsvarar ett intervall för måttlig störning. Ovan det gråmarkerade området gäller sannolik störning (SIS Swedish Standards Institute, 2004, med tillstånd).

Gränsen för vad som enligt SIS Swedish Standards Institute (2014) anses riskera måttlig störning är 0,4 mm/s (vägd RMS) i frekvensområdet 8–80 Hz. Sannolik störning för vibrationsnivåer > 1 mm/s. Vidare finns det inte några direkta gränsvärden för vibrationsnivåer i bostäder, men utifrån Trafikverkets riktlinje TDOK 2014:1021 (2017) anges riktvärden vilka ligger till grund för bedömning av behov för utredning och/eller genomförande av åtgärder. Angivet riktvärde i tabell 2 är därmed ett mål, vilket ligger inom en nivå som Trafikverket anser vara en god till godtagbar miljö med avseende på vibrationer. Detta riktvärde ska avses att uppnås vid en nybyggnation och/eller väsentlig ombyggnad av infrastruktur i den mån det är tekniskt möjligt och då kostnaden anses rimlig (Trafikverket, 2017).

Tabell 2. Riktvärden för vibrationer från väg- och spårtrafik, inomhus i bostad, angivet som vägd RMS-hastighet [mm/s]. * Innefattar bostadsrum i permanentbostad och fritidshus. ** Vibrationsnivå nattetid (22–06) som får överskridas högst fem gånger per trafikårsmedelnatt. Denna får dock aldrig överskrida 0,7 mm/s (Trafikverket, 2017).

	Maximal vibrationsnivå inomhus [mm/s]
Bostäder*	0,4 mm/s**

Vid befintlig infrastruktur kan åtgärder komma att bli aktuella vid åtgärdsnivåer enligt tabell 3. Dessa åtgärder ska då sträva efter att uppnå det riktvärde som är angivet i tabell 2 (Trafikverket, 2017).

Tabell 3. Maximal vibrationsnivå inomhus i bostad, angiven som vägd RMS-hastighet [mm/s]. * Innefattar bostadsrum i permanentbostad och fritidshus. ** Vibrationsnivå nattetid (22–06) som får överskridas högst fem gånger per trafikårsmedelnatt. Åtgärd övervägs dock längs järnväg om vibrationsnivån 0,7 mm/s överskrids fler än fem gånger per trafikårsmedelnatt, varav minst ett av dessa överskridanden överskrider 1,4 mm/s (Trafikverket, 2017).

	Maximal vibrationsnivå inomhus [mm/s]
Bostäder*	1,4 mm/s**

I tabell 2 och 3 avser “Maximal vibrationsnivå inomhus” den högst uppmätta vibrationsnivån i samband med en enskild vibrationshändelse under en viss tidsperiod. Dessa komfortvibrationer uttrycks i termer av det maximala effektivvärdet, dvs. RMS-värdet, med tidsvägning slow (enligt SS IEC 651) av den vägda hastighetsnivån [mm/s] vid 1–80 Hz (Trafikverket, 2017).

2.5 VIBRATIONERS PÅVERKAN

I följande avsnitt redogörs vibrationers eventuella påverkan på byggnader och människor.

2.5.1 Byggnader

Boende längs vägar särskilt vältrafikerade av tung trafik kan som tidigare nämnts bli mer eller mindre störda av både vibrationer och buller. Trots att boende ibland uttrycker oro över att byggnader direkt skulle kunna ta skada av vibrationer från vägtrafik tyder inget på att detta generellt är fallet. Vibrationshastigheter under 10 mm/s ska normalt sett inte ligga inom riskområdet för att orsaka byggnadsskador (Hannelius, 1974). Trafikinducerade vibrationer kan dock på sikt, i vissa fall, bidra till en byggnads försämrade skick om den utsätts för upprepade, tillräckligt stora, påfrestningar under lång tid (Hunaidi, 2000). Laborativa studier har dessutom visat att framförallt lösa sandjordar kan förtätas och ändra volym på grund av att partiklarna rör sig närmare varandra då marken utsätts för vibrationer (Linger, 1963). Indirekt kan vibrationer därmed orsaka sättningar i marken, vilket kan leda till skador på byggnader om det sker under grunden (Hunaidi, 2000). Risken för skadliga sättningar kan vara speciellt stor för hus grundlagda på lera, eftersom lera innehåller mycket vatten som kan avges vid belastning. Sättningskador kan även uppstå vid byggnation på silt och/eller dåligt packad sand eller grus (SGI, 2019).

2.5.2 Människor

Medvetenheten kring vibrationer har under den senaste tiden ökat. Trots det fanns det fram tills nyligen endast ett relativt litet utbud av studier kring hur människor påverkas av vibrationer (Trollé et al., 2015). Att utvärdera vibrationers påverkan på människor är komplext, då det exempelvis inkluderar både fysiska och psykiska aspekter (Trollé et al., 2015). Människor kan vara väldigt känsliga för vibrationer i en miljö som vanligtvis uppfattas som lugn. En person i sitt hem kan därmed tydligt märka och uppleva obehag

av en vibrationsrörelse, även av låg storleksordning, framförallt vid vibrationer med låga frekvenser (Hannelius, 1974).

Människor kan av vibrationer uppleva irritation med negativa effekter så som exempelvis ilska, oro och distraktion som följer (Trollé et al., 2015). Vibrationer kan dessutom påverka sömnen negativt (Ögren, 2016). Enligt en del folkhälsoexperter bör allvarliga former av irritation betraktas som ett verkligt miljö- och hälsoproblem, då det kan påverka både livskvalitet och välbefinnande. Förståelsen av och hänsyn till hur människor påverkas av vibrationer är därmed av största vikt för framtida samhällsplanering (Trollé et al., 2015).

I motsats till ljud, som uppfattas av hörseln, och ljus, som uppfattas av synen, uppfattar människan vibrationer i omgivningen med hjälp av ett flertal nervsystem. Vibrationer kan exempelvis uppfattas både genom deformationer på huden, balanssystemet och genom synbara rörelser. Kroppsställning och/eller kroppens kontakt med ytor kan dessutom vara av stor relevans för hur en vibrations upplevs. Exempelvis kan en vibration som är kännbar av fingertopparna på en yta uppfattas vid lägre vibrationsnivåer än en vibration som via fotsulorna når kroppen. Känseltröskeln, och hur den varierar med varierad frekvens, har undersökts i många studier. Resultatet visar dock, som tidigare nämnts, att det är komplext att bedöma och presentera hur människor upplever och/eller störs av vibrationer (Ögren, 2016).

I en studie från Göteborgs Universitet, utförd av Smith et al. (2015), presenteras resultatet från sömnförsök där försökspersoner exponerats för vibrationer vid frekvensen 10 Hz med hjälp av ett elektrodynamiskt skakdon, vilket vibrerade sängen i den horisontella axeln i riktning mellan huvud och fot. Vibrationsnivån varierades mellan 0,2 – 0,4 mm/s, där maximal komfortvägd vibrationshastighet med tidsvägning S användes enligt SS 460 48 61 (SIS Swedish Standards Institute, 2004; Smith et al., 2015). Vid 0,4 mm/s observerades en statistiskt signifikant ökning av sannolikheten för förändring i sömndjup och för uppvaknande, något som dock var observerbart redan vid 0,3 mm/s. För förändringar i hjärtfrekvens fanns en signifikant ökning i sannolikhet vid både 0,3 och 0,4 mm/s (Smith et al., 2015). Enligt ISO 2631-1, är känseltröskeln 0,28 mm/s vid frekvenser mellan 8–80 Hz. Vid lägre frekvenser ökar värdet för känseltröskeln (SIS Swedish Standards Institute, 2004).

2.6 ÅTGÄRDER

Vibrationer kan generellt minskas på tre olika sätt: genom att minska vibrationerna vid källan; genom att påverka vibrationsutbredningen i marken; genom att påverka resonans i byggnaden. Vid källan handlar det om vibrationsdämpande åtgärder, så som exempelvis förbättrad kvalitet av vägbana och/eller sänkt hastighet. För att minska vibrationsutbredningen i marken kan olika typer av vibrations-skärmar användas, vilka har till syfte att skärma av vibrationsvågorna och därmed hindra utbredningen. I byggnaden kan vibrationer främst minskas genom en förstyvning av grundläggningen, något som dock är svår genomfört i efterhand. Det finns dessutom möjligheter till att påverka resonanserna i en byggnad genom någon form av tillförd dämpning (Ögren, 2016).

3. METOD

I detta avsnitt presenteras tillvägagångssättet för val av mätplatser, genomförande av mätningar samt behandling av mätdata.

3.1 VAL AV MÄTPLATSER

Följande avsnitt presenterar hur busskuddar kartlades och hur lämpliga mätplatser valdes utifrån uppsatta kriterier.

3.1.1 Kartläggning av busskuddar

Arbetet med att välja ut lämpliga mätplatser började med en kartläggning av var det finns busskuddar i Uppsala. Då det inte fanns något register över detta att tillgå hos Uppsala kommun, gjordes kartläggningen genom en manuell inventering ute i fält. Vid de busskuddar som, enligt givna kriterier, identifierades som lämpliga mätplatser dokumenterades och fotograferades omgivningen. Följande kriterier bedömdes vara en förutsättning för att en mätplats skulle vara lämplig:

* Närhet mellan en busskudde och en gräsyta/jordyta där jordspett för mätinstrument kan monteras. Max 5 meter. Att föredra < 1 meter. Busskudden ska vara ostörd av närliggande busshållplatser och/eller korsningar, vilka kan påverka trafikens flöde.

* Närhet mellan en busskudde och en byggnad. Max 30 meter. Att föredra < 20 meter. En gräsyta/jordyta ska finnas i direkt anslutning till byggnaden, på den sida av byggnaden som ligger närmast busskudden. Byggnad har helst minst två våningsplan.

* Möjlighet till placering av referenspunkt längs med samma väg som busskudden. Denna punkt ska vara ostörd av busskudde och/eller närliggande busshållplatser, vilka kan påverka trafikens flöde. Lämpligt avstånd från busskudde är > 60 meter och en gräsyta/jordyta ska finnas i direkt anslutning till vägen, på samma avstånd från vägen som vid mätpunkt vid busskudde.

* Kontinuerlig busstrafik, i detta fall definierat som minst en busspassage per 10 minuter.

3.1.2 Kartläggning av jordart och grundläggning

Vid de busskuddar som identifierades som lämpliga, utvärderades jordarten genom användning av en geologisk karta från Sveriges Geologiska Undersökning (2018A). Följande inställningar användes: Tema, Jordarter; Karta, Jordartskarta 1:25 000–1:100 000. Att jordarten vid busskudden, byggnaden och referenspunkten är postglacial lera och/eller glacial lera bedömdes vara en förutsättning för att en mätplats skulle antas som lämplig.

Vid samtliga mätplatser undersöktes dessutom jordjupet genom användning av en geologisk karta från Sveriges Geologiska Undersökning (2018A), dock utan några krav vad gäller lämplighet av mätplats.

För de byggnader som var aktuella för mätningar användes den information om grundläggning som kunde hittas genom hjälp från kontaktperson på Stadsbyggnadsförvaltningen på Uppsala Kommun.

3.1.3 Urval

Efter kartläggning av busskuddar och jordart återstod ca. 10 lämpliga mätplatser med busskuddar i Uppsala. Eftersom mätningarna planerades att utföras både utomhus och inomhus utgjordes nästa steg i processen av att kontakta respektive fastighetsägare. Efter dessa samtal återstod fyra mätplatser, mätplats A–D. En av de fyra mätplatserna, D, hade ingen lämplig byggnad i närheten, men på grund av goda möjligheter till mätning av

vibrationernas utbredning i sidled bedömdes denna mätplats ändå som lämplig. Av de tre resterande mätplatserna har de boende vid två av dem, främst vid C men även vid B, upplevt vibrationer i byggnaden vilka de anser är kopplade till införandet av busskuddar. Utöver antalet lämpliga mätplatser, begränsades antalet mätdagar av att de mätinstrument som fanns att tillgå hos Sweco Civil enbart var tillgängliga under fyra dagar.

En mer detaljerad beskrivning av mätplatserna följer i avsnitt 3.2.4. För exempelfoton från mätplats A–D, se appendix C. Mätplatsernas exakta placering i Uppsala redovisas inte, med hänsyn till de boende.

3.2 UTFÖRANDE AV MÄTNINGAR

Följande avsnitt presenterar använda mätinstrument samt mätpunkternas placering och mätförfarandet. Vidare presenteras de fyra mätplatserna.

3.2.1 Mätinstrument

Mätningar av komfortvibrationsnivåer utfördes i enlighet med Svenska Standard SS 460 48 61. Vibrationens effektivvärde (RMS) redovisas därmed med tidsvägning S (SIS Swedish Standards Institute, 2004). En geofon, som registrerade vibrationsnivåer i vertikal (V), longitudinell (L) och transversell (T) led, monterades vid respektive mätpunkt. Varje geofon var i sin tur kopplad till en fjärrstyrd datalogger vilken lagrade mätdata.

De geofoner som användes var *INFRA V12 Triaxial Geophone* från Sigicom. En geofon av denna typ mäter inom frekvensintervallet 1 – 500 Hz och har, vid vald standard (07 Komfort RMS 20 mm/s), mätintervallet 0,005 – 25 mm/s. Den kalibrerade känsligheten är +/- 2 % (Sigicom, 2016A). De dataloggers som användes var *INFRA 4100 Master Data logger with GSM/GPRS* från Sigicom. Detta system, INFRA Systemet, är utvecklat för mätning av trafikinducerade vibrationer (Sigicom, 2016B). För serienummer på använda geofoner, se appendix B. Mätarna var fabrikskalibrerade.

3.2.2 Mätförfarande

Geofonerna mätte kontinuerligt under hela mätperioden, men enbart det högst uppmätta värdet i V-, L- och T-led under varje minut lagrades i dataloggern. Systemet var dock inställt på att trigga vid vibrationsnivåer högre än 0,2 mm/s. Detta gällde samtliga geofoner vid samtliga mätplatser. En trigging innebar att dataloggern, då geofonerna uppmätte värden över vald vibrationsnivå, lagrade en transient. En transient betydde i detta fall att dataloggern, istället för att enbart lagra det maximala värdet per minut, lagrade all mätdata kontinuerligt under två sekunder från och med det att vibrationsnivån 0,2 mm/s överskreds. Detta möjliggjorde en detaljerad utvärdering av signalen i både tids- och frekvensdomänen. Att notera är att mätarna inte var sammankopplade med varandra, vilket innebar att respektive mätare enbart lagrade en transient då mätvärdet överskred 0,2 mm/s för just den mätaren.

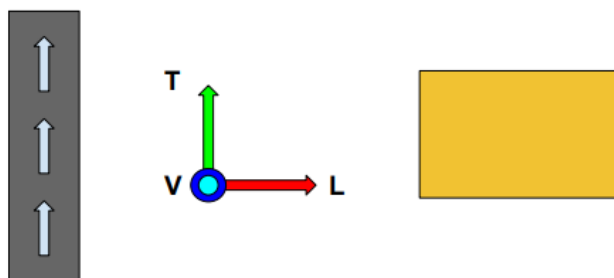
Mätningarna vid de fyra mätplatserna pågick under den tidsperiod som krävdes för en passage av minst 20 tunga fordon. Under hela mätperioden noterades typ av tungt fordon samt tidpunkt för varje passage.

Mätningarna utfördes under oktober månad år 2019.

3.2.3 Mätpunkter

Vid mätplats A–C användes tre mätpunkter i marken: referenspunkt (mätpunkt 1); vid busskudde (mätpunkt 2); vid husvägg (mätpunkt 3). Vibrationsmätarna, med mätriktningarna vertikal (V), longitudinell (L) och transversell (T), monterades på jordspett vilka placerades i marken vid respektive mätpunkt. De jordspett som användes

var 0,125 meter långa, en påbyggnadssats specifikt utformad för mätning av markvibrationer med de använda mätinstrumenten, tillhandahållna av Sigicom. De triaxiella vibrationsmätarna placerades i riktning enligt figur 4, i förhållande till väg och byggnad, vid respektive mätpunkt.



Figur 4. Placering av triaxiell vibrationsmätare med mätriktningarna vertikal (V), longitudinell (L) och transversell (T), i förhållande till väg och byggnad, sett uppifrån vid respektive mätpunkt. Pilarna i vägbanan visar körriktningen. V-led har riktning uppåt, ut ur bilden.

I byggnad användes en mätpunkt, inomhus (mätpunkt 4). Vibrationsmätaren monterades på golvet i det rum som låg närmast vägen, föredragsvis i ett sovrum/gästrum på det övre våningsplanet. För placering av mätpunkt 1–4 vid respektive mätplats A–C, se figur 5–7.

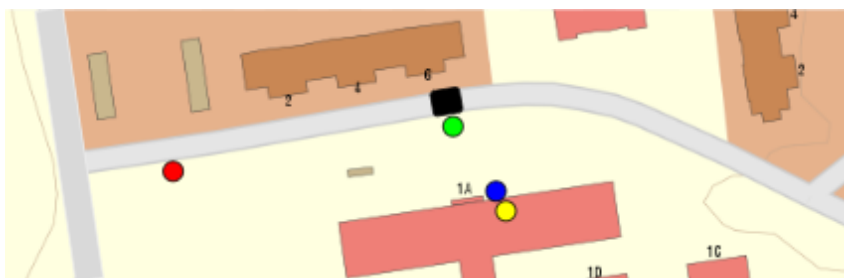
Vid mätplats D användes tre mätpunkter i marken: vid busskudde (mätpunkt 2a); 15 meter från busskudde (mätpunkt 2b); 30 meter från busskudde (mätpunkt 2c). Den triaxiella vibrationsmätaren placerades i riktning enligt figur 4, i förhållande till väg, vid respektive mätpunkt. Ingen vibrationsmätare monterades i byggnad. För placering av mätpunkt 2a–2c vid mätplats D, se figur 8.

3.2.4 Presentation av mätplatser

Följande avsnitt presenterar mätplats A–D. Mätplatsernas exakta position utges och namnges ej av hänsyn till de boende.

Mätplats A

Byggnaden vid mätplats A är en stor enplansbyggnad, vars grundläggning inte kunnat fastställas. Jordarten vid busskudde, byggnad och referenspunkt är en kombination av postglacial sand och glacial lera. Jorddjupet är cirka 5–10 meter (SGU, 2018A). Vägen i anslutning till byggnaden är enfilig och trafikeras av bussar i båda riktningarna. Två busskuddar, en i vardera körfält, är placerade parallellt med varandra. Mellan referenspunkt och busskuddarna finns en busshållplats placerad på samma sida som byggnaden. I motsatt körfält finns en busshållplats placerad i kurvan före busskuddarna. Mätarna var placerade enligt figur 5.



Figur 5. Placering av mätpunkt 1–4 vid mätplats A. Mätpunkt 1, referenspunkt, har färgen röd. Mätpunkt 2, vid busskudde, har färgen grön. Mätpunkt 3, vid husvägg, har färgen blå. Mätpunkt 4, inomhus, har färgen gul. Två parallella busskuddar är markerade med en svart rektangel. Ursprunglig karta från Lantmäteriet (2018).

Mätpunkt 4 (inomhus) var placerad på entréplan, i det rum som är beläget närmast busskuddarna. Avstånd från busskudde till respektive mätpunkt 1–4 vid mätplats A, presenteras i tabell 4.

Tabell 4. Avstånd från busskudde, $R_{\text{mätpunkt}_A}$, till mätpunkt 1–4 vid mätplats A.

Avstånd från busskudde [m]	Mätpunkt 1 (röd)	Mätpunkt 2 (grön)	Mätpunkt 3 (blå)	Mätpunkt 4 (gul)
$R_{\text{mätpunkt}_A}$	80	1	25	~ 25

Mätplats B

Fristående tvåvåningshus i trä, grundlagd på armerade balkar på plintar. Jordarten vid busskudde, byggnad och referenspunkt är postglacial sand, glacial lera och sandig morän. Jorddjupet är cirka 1–5 meter vid busskudden och cirka 5–10 meter vid referenspunkten (SGU, 2018A). Vägen i anslutning till byggnaden är enfilig och trafikerades av bussar i båda riktningarna. Två busskuddar, en i vardera körfält, är placerade parallellt med varandra. En busshållplats finns i nära anslutning efter referenspunkt, på samma sida som byggnaden. Mätarna var placerade enligt figur 6.



Figur 6. Placering av mätpunkt 1–4 vid mätplats B. Mätpunkt 1, referenspunkt, har färgen röd. Mätpunkt 2, vid busskudde, har färgen grön. Mätpunkt 3, vid husvägg, har färgen blå. Mätpunkt 4, inomhus, har färgen gul. Två parallella busskuddar är markerade med en svart rektangel. Ursprunglig karta från Lantmäteriet (2018).

Mätpunkt 4 (inomhus) var placerad på våningsplan två, i ett sovrum/gästrum som är beläget i den del av huset som är närmast busskuddarna. Avstånd från busskudde till respektive mätpunkt 1–4 vid mätplats B, presenteras i tabell 5.

Tabell 5. Avstånd från busskudde, $R_{\text{mätpunkt}_B}$, till mätpunkt 1–4 vid mätplats B.

Avstånd från busskudde [m]	Mätpunkt 1 (röd)	Mätpunkt 2 (grön)	Mätpunkt 3 (blå)	Mätpunkt 4 (gul)
$R_{\text{mätpunkt}_B}$	65	1	15	~ 15

Mätplats C

Sammanhängande radhus i trä med två våningsplan. Radhuset är grundlagt på underbyggnad med grundelement och betongplatta. Jordarten vid busskudde, byggnad och referenspunkt är postglacial lera. Jorddjupet är mellan 20–30 meter (SGU, 2018A). Vägen i anslutning till byggnaden är tvåfilig och trafikerades av bussar i båda riktningarna. Ett grässtråk separerar vägbanornas olika riktningar. Fyra busskuddar, två i vardera

körfält, är placerade med en viss förskjutning från varandra. Mätning utfördes enbart vid de två busskuddar som är placerade på samma sida som byggnaden. Mellan referenspunkt och mätpunkt vid busskuddarna finns en busshållplats. I direkt anslutning efter busskuddarna finns ett övergångsställe. Mätarna var placerade enligt figur 7.



Figur 7. Placering av mätpunkt 1–4 vid mätplats C. Mätpunkt 1, referenspunkt, har färgen röd. Mätpunkt 2, vid busskudde, har färgen grön. Mätpunkt 3, vid husvägg, har färgen blå. Mätpunkt 4, inomhus, har färgen gul. Två parallella busskuddar är markerade med en svart rektangel. Ursprunglig karta från Lantmäteriet (2018).

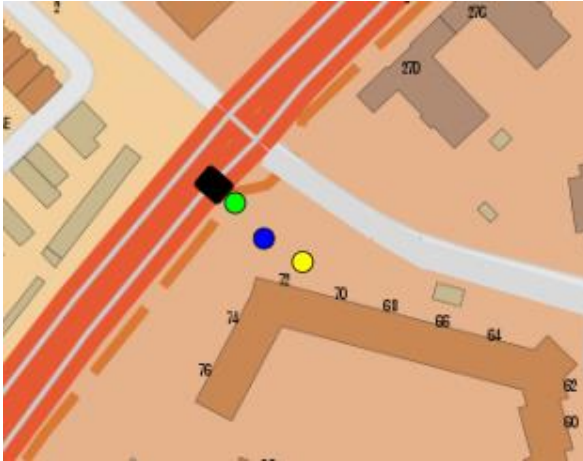
Mätpunkt 4 (inomhus) var placerad på våningsplan två, i det sovrum/gästrum som är närmast busskuddarna. En smal korridor separerar dock sovrummet/gästrummet från den yttervägg som är belägen närmast busskuddarna. Avstånd från busskudde till respektive mätpunkt 1–4 vid mätplats C, presenteras i tabell 6.

Tabell 6. Avstånd från busskudde, $R_{\text{mätpunkt}_C}$, till mätpunkt 1–4 vid mätplats C.

Avstånd från busskudde [m]	Mätpunkt 1 (röd)	Mätpunkt 2 (grön)	Mätpunkt 3 (blå)	Mätpunkt 4 (gul)
$R_{\text{mätpunkt}_C}$	60	5	25	~ 25

Mätplats D

Vid mätplats D utfördes mätning enbart i marken, ej i byggnad. Jordarten vid busskudde, byggnad och referenspunkt är glacial- och postglacial lera. Jorddjupet varierar från mellan 10–20 meter kring mätpunkt 2a och 2b till mellan 5–10 meter kring mätpunkt 2c (SGU, 2018A). Vägen i anslutning till mätpunkterna är tvåfilig och trafikeras av bussar i båda riktningarna. Fyra busskuddar, två i vardera körfält, är placerade med en viss förskjutning från varandra. Mätning utfördes enbart vid de två av de fyra busskuddar, och ingen referenspunkt användes. I direkt anslutning efter busskuddarna finns ett övergångsställe. Mätarna var placerade enligt figur 8.



Figur 8. Placering av mätpunkt 2a–2c vid Mätplats D. Mätpunkt 2a, vid busskudde, har färgen grön. Mätpunkt 2b, 15 meter från busskudde, har färgen blå. Mätpunkt 2c, 30 meter från busskudde, har färgen gul. Två parallella busskuddar är markerade med en svart rektangel. Ursprunglig karta från Lantmäteriet (2018).

Avstånd från busskudde till respektive mätpunkt 2a–2c vid mätplats D, presenteras i tabell 7.

Tabell 7. Avstånd från busskudde, $R_{\text{mätpunkt}_D}$, till mätpunkt 2a–2c vid mätplats D.

Avstånd från busskudde [m]	Mätpunkt 2a (grön)	Mätpunkt 2b (blå)	Mätpunkt 2c (gul)
$R_{\text{mätpunkt}_D}$	1	15	30

3.3 FÖRBEHANDLING AV MÄTDATA

Följande avsnitt beskriver den förbehandling av data som gjordes innan vidare beräkningar kunde utföras.

3.3.1 Sortering

Mätdata från mätplats A-D laddades ned från INFRA Net (2019), varefter den data som ansågs felaktig sorterades bort. Felaktiga data innebar i detta fall den mätdata som blivit påverkad av annat än trafiken, så som exempelvis människor som rört sig i närheten av geofonerna under mätning. För att sortera bort felaktig data beräknades en kvot K , enligt ekvation 5 för mätplats A–C och enligt ekvation 6 och 7 för mätplats D.

$$\frac{M_2}{M_3} = K \quad (5)$$

Där: M_2 , mätvärden vid mätpunkt 2 (busskudde) [mm/s]; M_3 , mätvärden vid mätpunkt 3 (husvägg) [mm/s].

$$\frac{M_{2a}}{M_{2b}} = K_{ab} \quad (6)$$

Där: M_{2a} , mätpunkt 2a (busskudde) [mm/s]; M_{2b} , mätpunkt 2b (15 meter) [mm/s].

$$\frac{M_{2b}}{M_{2c}} = K_{bc} \quad (7)$$

Där: M_{2b} , mätvärden vid mätpunkt 2b (15 meter) [mm/s]; M_{2c} , mätvärden vid mätpunkt 2c (30 meter) [mm/s].

Ovanstående beräkningar gav ett K -värde, respektive ett K_{ab} - och ett K_{bc} -värde, kopplat till varje lagrat mätvärde under den tidsperiod som mätningarna pågick. Vidare antogs att vibrationsnivån bör minska med ökat avstånd från källan, med undantag för vibrationsnivån inomhus. De mätvärden som var kopplade till ett K , K_{ab} och/eller $K_{bc} \leq 1$ antogs därmed vara felaktiga, eftersom ovanstående antagande då inte stämmer. Dessa mätvärden sorterades därför bort och användes inte i den vidare analysen. Vidare sorterades de mätvärden som avvek kraftigt från de resterande bort.

För att sortera ut enbart de mätvärden som representerade en passage av ett tungt fordon, så som en buss eller en lastbil, användes information från triggingar vid mätplats 2 respektive 2a, dvs. vid busskudden. Då studien främst syftade till att utreda vibrationer kopplade till när tunga fordon passerar busskuddar, var det nödvändigt att urskilja dessa passager i mätdata. Ytterligare en sortering, utöver de två presenterade i föregående avsnitt gjordes därmed, där alla de mätvärden som inte korresponderade till en trigging sorterades bort. Mer än en trigging kan ske under en minut, men sorteringen använde endast det högsta värdet som sparades per minut då den applicerades på standardmätdata med ett sådant mätintervall. För antal ursprungliga-, bortsorterade- och kvarstående triggade mätvärden, se tabell 8.

Tabell 8. Totalt antal uppmätta mätvärden redovisas i kolumn två. Antal bortsorterade mätvärden, efter sortering med K -värde för mätplats A–C respektive K_{ab} - och ett K_{bc} -värde för mätplats D samt efter borttagande av kraftigt avvikande mätvärden (+), redovisas i kolumn tre. Kvarstående antal mätvärden redovisas i kolumn fyra. De mätvärden som, av de presenterade i kolumn fyra, motsvarade en triggad passage av ett tungt fordon redovisas i kolumn fem.

Antal mätvärden	Ursprungligt	Bortsorterade	Kvarstående	Triggade
Mätplats A	125	66	59	16
Mätplats B	109	35 + 1	73	27
Mätplats C	56	4 + 2	50	13
Mätplats D	58	9	49	23

Antalet ursprungliga mätvärden korresponderar till den totala mätperioden i minuter vid respektive mätplats. All vidare analys baserades dock enbart på de triggade mätvärdena.

3.3.2 Formulering av summa

Då mätningarna utfördes med en triaxiell mätare, var mätdata presenterad med en V-, L- och T-komponent. För analys av den sammanlagda vibrationsnivån M_{summa_i} vid varje mätplats, vid respektive mätplats (i), beräknades summan av dessa tre komponenter enligt ekvation 8. M_{summa_i} benämns i vidare analys som summa, presenterad i appendix D.

$$M_{\text{summa}_i} = \sqrt{V_i^2 + L_i^2 + T_i^2} \quad (8)$$

Där: M_{summa_i} , sammanlagda vibrationsnivån [mm/s]; V_i , vertikal vibrationsnivå [mm/s]; L_i , longitudinell vibrationsnivå [mm/s]; T_i , transversell vibrationsnivå [mm/s].

3.3.3 Korrelation

För att på ett visuellt sätt säkerställa att sorteringen av mätdata fungerade och för att utvärdera sambandet mellan vibrationsnivån vid busskudde, husvägg och inomhus skapades korrelationsplottar baserade på de triggade mätvärdena. För mätplats A–C plottades triggade mätvärden vid mätplats 2 (busskudde) mot triggade mätvärden vid mätplats 3 (husvägg). För mätplats D plottades på samma sätt triggade mätvärden vid

mät punkt 2a (busskudde) mot triggade mätvärden vid mät punkt 2b (15 meter) samt triggade mätvärden vid mät punkt 2b mot triggade mätvärden vid mät punkt 2c (30 meter). För mätplats B och C plottades dessutom triggade mätvärden vid mät punkt 3 mot triggade mätvärden vid mät punkt 4 (inomhus). En rät linjens ekvation anpassades i samtliga fall, med tillhörande R^2 -värde, vilket presenteras i appendix E. Då mätvärden vid mät punkt 4 vid mätplats A låg på gränsen till mätarnas känslighet, kunde dessa ej användas vid analys.

3.4 BERÄKNING BASERAT PÅ MÄTDATA

Följande avsnitt presenterar de beräkningar som utfördes i syfte att besvara de givna frågeställningarna.

3.4.1 Vibrationsnivå

Huvudsyftet med denna analys var att utreda om, och i så fall hur mycket, en busskudde kan förhöja vibrationsnivån i marken jämfört med en opåverkad referenspunkt längs med samma väg. Analysen bidrog dessutom till ökad förståelse för vibrationsutbredningen.

Medel- och maxvärden

För sorterad, triggad mätdata beräknades max- och medelvärden för V-, L- och T-led, vilket vidare sammanställdes och presenterades tillsammans med beräknad summa (appendix D).

Differens- och kvotberäkningar

För analys av om/hur vibrationsnivån mellan de respektive mätpunkterna skiljde sig åt, beräknades differenser samt kvoter, enligt appendix F respektive appendix G.

3.4.2 Vibrationsutbredning

Syftet med denna analys var att, utifrån uppmätt data, få förståelse för hur vibrationsutbredningen i marken såg ut vid mätplats A-D.

Lamb's ekvation för vibrationsutbredning

För analys av geometrisk dämpning och materialdämpning användes ekvation 9 för mätplats A–C (i) och ekvation 10 och 11 för mätplats D, utifrån Lamb's ekvation 4.

$$M_{e3i} = M_{\text{summa}2i} * \left(\frac{R_{2i}}{R_{3i}}\right)^n * e^{(-\alpha(R_{3i}-R_{2i}))} \quad (9)$$

Där: M_{e3i} , beräknad vibrationsnivå vid mät punkt 3 [mm/s]; $M_{\text{summa}2i}$, uppmätt summa vid mät punkt 2 [mm/s]; R_{2i} , avstånd mellan busskudde och mät punkt 2 [m]; R_{3i} , avstånd mellan busskudde och mät punkt 3 [m], n, konstant för geometrisk dämpning; α , koefficient för materialdämpning [1/m].

$$M_{e2bD} = M_{\text{summa}2a} * \left(\frac{R_{2a}}{R_{2b}}\right)^n * e^{(-\alpha(R_{2b}-R_{2a}))} \quad (10)$$

Där: M_{e2bD} , beräknad vibrationsnivå vid mät punkt 2b [mm/s]; $M_{\text{summa}2a}$, uppmätt summa vid mät punkt 2a [mm/s]; R_{2a} , avstånd mellan busskudde och mät punkt 2a [m]; R_{2b} , avstånd mellan busskudde och mät punkt 2b [m], n, konstant för geometrisk dämpning; α , koefficient för materialdämpning [1/m].

$$M_{e2cD} = M_{\text{summa}2a} * \left(\frac{R_{2a}}{R_{2c}}\right)^n * e^{(-\alpha(R_{2c}-R_{2a}))} \quad (11)$$

Där: M_{e2cD} , beräknad vibrationsnivå vid mät punkt 2c [mm/s]; $M_{\text{summa}2a}$, uppmätt summa vid mät punkt 2a [mm/s]; R_{2a} , avstånd mellan busskudde och mät punkt 2a [m]; R_{2c} , avstånd mellan busskudde och mät punkt 2c [m], n, konstant för geometrisk dämpning; α , koefficient för materialdämpning [1/m].

M_e är en beräknad vibrationsnivå vid mätpunkt 3 (busskudde) respektive 2b (15 meter) och 2c (30 meter), och därmed inte det faktiskt uppmätta värdet. Genom anpassning av n och α minimerades differensen mellan den beräknade vibrationsnivån M_{e3i} respektive M_{e2bD} samt M_{e2cD} och den faktiskt uppmätta vibrationsnivån $M_{\text{summa}3i}$ respektive $M_{\text{summa}2bD}$ samt $M_{\text{summa}2cD}$ (appendix H). Därmed anpassades ekvation 9–11 för att på bästa sätt beskriva vibrationsutbredningen vid respektive mätplats A–D.

En iterativ process användes för att anpassa n respektive α , vilket innebar att värdet för konstanten respektive koefficienten stegades upp och/eller ner tills maximal minimering av differensen mellan beräknad- och uppmätt vibrationsnivå gavs. Då konstanten n anpassades hölls koefficienten α konstant, och då α anpassades hölls n konstant. Startvärden för n och α valdes utifrån tabell 1. För konstanten m valdes 0,5 som startvärde, vilket motsvarar värdet för en Rayleighvåg. För koefficienten α valdes 0,03 som startvärde, vilket motsvarar värdet för en fast lera.

Avtagande per meter

För mätplats A–C (i) användes ekvation 12 vid beräkning av vibrationsavtagandet per meter, U_i , mellan mätpunkt 2 (busskudde) och 3 (husvägg).

$$U_i = \frac{M_{\text{medel}2i} - M_{\text{medel}3i}}{R_{3i} - R_{2i}} \quad (12)$$

Där: $M_{\text{medel}2i}$, medelvärdet vid mätpunkt 2 (busskudde) [mm/s]; $M_{\text{medel}3i}$, medelvärdet vid mätpunkt 3 (husvägg) [mm/s]; R_{2i} , avståndet till mätpunkt 2 [m]; R_{3i} , avståndet till mätpunkt 3 [m].

För mätplats D användes ekvation 13 respektive ekvation 14 vid beräkning av vibrationsavtagandet per meter, U_{abD} resp. U_{bcD} , mellan mätpunkt 2a (busskudde) och 2b (15 meter) respektive 2b och 2c (30 meter).

$$U_{abD} = \frac{M_{\text{medel}2a} - M_{\text{medel}2b}}{R_{2b} - R_{2a}} \quad (13)$$

Där: $M_{\text{medel}2a}$, medelvärdet vid mätpunkt 2a (busskudde) [mm/s]; $M_{\text{medel}2b}$, medelvärdet vid mätpunkt 2b (15 meter) [mm/s]; R_{2b} , avståndet till mätpunkt 2b [m]; R_{2a} , avståndet till mätpunkt 2a [m].

$$U_{bcD} = \frac{M_{\text{medel}2b} - M_{\text{medel}2c}}{R_{2c} - R_{2b}} \quad (14)$$

Där: $M_{\text{medel}2b}$, medelvärdet vid mätpunkt 2b (15 meter) [mm/s]; $M_{\text{medel}2c}$, medelvärdet vid mätpunkt 2c (30 meter) [mm/s]; R_{2c} , avståndet till mätpunkt 2c [m]; R_{2b} , avståndet till mätpunkt 2b [m].

Frekvensanalys

För mätplats A–D gjordes en frekvensdomänanalys för att utläsa de dominerande frekvenserna med hjälp av de frekvensspektrum som, för triggade mätdata, fanns tillgängliga på INFRA Net (Sigicom, 2019). Denna analys baserades på mätdata från mätpunkt 2 respektive 2a (busskudde) vid samtliga mätplats. Vid mätplats C respektive D analyserades dessutom mätpunkt 3 (husvägg) och 4 (inomhus) respektive 2b (15 meter) och 2c (30 meter). Tersband med oktavtyp RMS 1s användes vid samtliga analyser.

Överföringsfunktion mellan mark och byggnad

Utifrån den linjära ekvation som vid mätplats C anpassades utifrån triggade mätvärden vid husvägg mot triggade mätvärden inomhus, kunde vibrationsöverföringen mellan mark och byggnad studeras (figur 32, appendix E). Den linjära anpassningen följde formen enligt ekvation 15.

$$M_4 = kM_3 + m \quad (15)$$

Där: M_4 , vibrationsnivå vid mätpunkt 4 (inomhus) [mm/s]; M_3 , vibrationsnivå vid mätpunkt 3 (husvägg) [mm/s]; k , lutningen; m , skärning med y-axel [mm/s].

3.4.3 Säkerhetsåtgärder

Baserat på mätdata, följer två möjliga säkerhetsåtgärder för att undvika ett överskridande av känseltröskeln inomhus.

Skyddsvibrationsnivå

För mätplats C gjordes en beräkning av en möjlig skyddsvibrationsnivå (M_{F2C}) vid mätpunkt 2 (busskudde), vilken undviker ett överskridande av känseltröskeln vid mätpunkt 4 (inomhus). Enligt teorin (figur 3), användes värdet 0,28 mm/s som riktlinje för känseltröskeln (M_{k4}). Detta värde gäller därmed som en maximalt tillåten vibrationsnivå inomhus, det vill säga för mätpunkt 4. En maximalt tillåten vibrationsnivå vid husvägg, M_{F3C} , beräknades med ekvation 16.

$$M_{F3C} = \frac{M_{F4C} - m}{k} \quad (16)$$

Där: M_{F3C} , maximalt tillåten vibrationsnivå vid mätpunkt 3 (husvägg) [mm/s]; M_{F4C} , maximalt tillåten vibrationsnivå vid mätpunkt 4 (inomhus) [mm/s]; k , lutningen från överföringsfunktion; m , skärning med y-axel [mm/s]

Vidare användes M_{F3C} för att beräkna den maximalt tillåtna vibrationsnivån vid mätpunkt 2, M_{F2C} , vilken benämns skyddsvibrationsnivå (ekvation 17).

$$M_{F2C} = \frac{M_{F3C}}{\left(\frac{R_{2C}}{R_{3C}}\right)^n * e^{(-\alpha(R_{3C}-R_{2C}))}} = \frac{\left(\frac{M_{F4C} - m}{k}\right)}{\left(\frac{R_{2C}}{R_{3C}}\right)^n * e^{(-\alpha(R_{3C}-R_{2C}))}} \quad (17)$$

Där: M_{F2C} , maximalt tillåten vibrationsnivå vid mätpunkt 2 (busskudde) [mm/s]; M_{F3C} , maximalt tillåten vibrationsnivå vid mätpunkt 3 (husvägg) [mm/s]; α , materialdämpningskoefficient [1/m]; n , konstant för geometrisk dämpning; R_{2C} , avstånd från busskudde till mätpunkt 2 (busskudde) [m]; R_{3C} , avstånd från busskudde till mätpunkt 3 (husvägg) [m]; M_{F4C} , maximalt tillåten vibrationsnivå vid mätpunkt 4 (inomhus) [mm/s]; k , lutningen från överföringsfunktion; m , skärning med y-axel [mm/s].

Ingen skyddsvibrationsnivå beräknades vid mätplats A eller B. Vid mätplats A var de uppmätta vibrationsnivåerna under mätinstrumentens känslighet och vid mätplats B kunde inte en tillförlitlig överföringsfunktion mellan mark och byggnad anpassas (figur 30, appendix E).

Skyddsavstånd

För mätplats C gjordes en beräkning av ett möjligt skyddsavstånd, utifrån en vald maximal vibrationsnivå M_{G2C} vid mätpunkt 2 (busskudde), vilket undviker ett överskridande av känseltröskeln vid mätpunkt 4 (inomhus). På samma sätt som tidigare, användes värdet $M_{F4C} = 0,28$ mm/s som riktlinje för känseltröskeln med tillhörande

maximalt tillåten vibrationsnivå M_{F3C} vid husvägg. Ett skyddsavstånd R_{G3C} , mellan busskudde och mätpunkt 3 (husvägg), beräknades därefter med ekvation 18.

$$R_{G3C} = \frac{R_{2C}}{\left(\frac{M_{F3C}}{M_{G2C}}\right)^{1/n}} = \frac{R_{2C}}{\left(\frac{\left(\frac{M_{F4C} - m}{k}\right)}{M_{G2C}}\right)^{1/n}} \quad (18)$$

Där: M_{G2C} , vald maximal tillåten vibrationsnivå vid mätpunkt 2 (busskudde) [mm/s]; M_{F3C} , maximalt tillåten vibrationsnivå vid mätpunkt 3 (husvägg) [mm/s]; n , konstant för geometrisk dämpning; R_{2C} , avstånd från busskudde till mätpunkt 2 [m]; R_{G3C} , skyddsavstånd mellan busskudde och mätpunkt 3 [m]; M_{F4C} , maximalt tillåten vibrationsnivå vid mätpunkt 4 (inomhus) [mm/s]; k , lutningen; m , skärning med y-axel [mm/s].

Ekvation 18 är en förenklad version av den tidigare använda ekvation 17, där materialdämpning antas vara liten i förhållande till den geometriska dämpningen, eftersom lösningen för R_{G3C} annars är icke-linjär.

4 RESULTAT

I följande avsnitt presenteras resultatet av mätningar och beräkningar som syftar till att besvara givna frågeställningar.

4.1 VIBRATIONSNIVÅ

Följande stycken behandlar utvärdering av relevans för analysen med hjälp av appendix D vid mätplats A, tabell 9 samt tabell 13–14: Vibrationsmätningarna från mätplats A visar att vibrationsnivån i marken minskade med ökat avstånd från källan, både i V-, L- och T-led. Medeldifferensen mellan mätpunkten vid busskudden och referenspunkten var 0,4 mm/s. Vibrationsnivån vid referenspunkten var 6 gånger lägre än vibrationsnivån vid busskudden.

Vid referenspunkten skiljde sig maxvärdet kraftigt från medelvärdet. Maxvärdet skiljde sig dessutom kraftigt från övriga mätvärden vid samma mätpunkt. I övrigt var vibrationsnivåerna vid referenspunkten av samma storleksordning som vibrationsnivåerna vid husväggen.

Vid både referenspunkten och mätpunkten vid busskudden var vibrationsnivån i V-led störst. Vid husväggen var dock vibrationsnivån i V-led minst. Vibrationsnivå minskade snabbast i V-led, jämfört med övriga led, mellan mätpunkten vid busskudden och husväggen. Inomhus låg de uppmätta vibrationsnivåer i L- och T-led på gränsen för mätarnas detektionsnivå, vilket medförde att mätvärden vid denna mätpunkt inte användes för analys. Känseltröskeln (0,28 mm/s) inomhus vid mätplats A riskerade aldrig att överskridas.

Tabell 9. Medeldifferenser och kvoter för de inom parentes beskrivna mätpunkterna, för V-, L- och T-led samt summa [mm/s] vid mätplats A.

Mätplats A (mätpunkt)	V	L	T	Summa
	[mm/s]	[mm/s]	[mm/s]	[mm/s]
Medeldifferens (referenspunkt - busskudde)	-0,269	-0,205	-0,119	-0,357
Medeldifferens (husvägg - busskudde)	-0,303	-0,187	-0,120	-0,364
Medeldifferens (inomhus - husvägg)	-	-	-	-
	V	L	T	Summa
Kvot (busskudde/referenspunkt)	6,07	6,61	3,66	5,46
Kvot (busskudde/husvägg)	16,4	4,44	3,79	6,04
Kvot (husvägg/inomhus)	-	-	-	-

Följande stycken behandlar utvärdering av relevans för analysen med hjälp av appendix D vid mätplats B, tabell 10 samt tabell 13–14: Vibrationsmätningarna från mätplats B visar att vibrationsnivån i marken minskade med ökat avstånd från källan samt från mark till byggnad, både i V-, L- och T-led. Medeldifferensen mellan mätpunkten vid busskudden och referenspunkten var 0,6 mm/s. Vibrationsnivån vid referenspunkten var 32 gånger lägre än vibrationsnivån vid mätpunkten vid busskudden.

Vid referenspunkten låg ett flertal mätvärden i alla tre led på gränsen för mätarnas detektionsnivå. Vibrationsnivåerna inomhus var högre än vibrationsnivåerna vid referenspunkten. Vid alla mätpunkter var vibrationsnivån, både max- och medelvärde, minst i V-led. Trots detta minskade vibrationsnivån långsammast i V-led mellan mätpunkten vid busskudden och husväggen respektive husväggen och inomhus. Störst minskning skedde i L-led, den led som hade de dominerande vibrationsnivåerna vid

mätpunkten vid busskudden. Känseltröskeln (0,28 mm/s) inomhus vid mätplats B riskerade aldrig att överskridas.

Tabell 10. Medeldifferenser och kvoter för de inom parentes beskrivna mätpunkterna, för V-, L- och T-led samt summa [mm/s] vid mätplats B.

Mätplats B (mätpunkt)	V [mm/s]	L [mm/s]	T [mm/s]	Summa [mm/s]
Medeldifferens (referenspunkt - busskudde)	-0,181	-0,446	-0,297	-0,567
Medeldifferens (husvägg - busskudde)	-0,167	-0,399	-0,251	-0,500
Medeldifferens (inomhus - husvägg)	-0,004	-0,040	-0,038	-0,053
	V	L	T	Summa
Kvot (busskudde/referenspunkt)	26,1	36,9	26,9	31,5
Kvot (busskudde/husvägg)	8,78	7,69	5,36	6,80
Kvot (husvägg/inomhus)	1,26	3,10	2,93	2,60

Följande stycken behandlar utvärdering av relevans för analysen med hjälp av appendix D vid mätplats C, tabell 11 samt tabell 13–14: Vibrationsmätningarna från mätplats C visar att vibrationsnivån i marken minskade med ökat avstånd från källan, både i V-, L- och T-led. Mellan husväggen och inomhus ökade dock vibrationsnivån i L- och T-led. Medeldifferensen mellan mätpunkten vid busskudden och referenspunkten var 0,25 mm/s. Vibrationsnivån vid referenspunkten var 2,5 gånger lägre än vibrationsnivån vid mätpunkten vid busskudden.

Vid referenspunkten och mätpunkten vid busskudden dominerade vibrationsnivåerna i V- och L-led. Vibrationsnivån minskade mest i V- och L-led mellan mätpunkten vid busskudden och husväggen. Vid husväggen dominerade dock fortsatt vibrationerna i V-led. Att notera är, som tidigare nämnts, att vibrationsnivåerna i L- och T-led ökar mellan husvägg och inomhus, medan vibrationsnivåerna i V-led fortsätter att minska. Inomhus ges då lägst medelvibrationsnivå i L-led och högst i T-led, respektive lägst maxvärde i V-led och högst i T-led. Detta tyder på att vibrationer i vissa led förstärks i byggnaden. Känseltröskeln (0,28 mm/s) överskreds inomhus vid mätplats C vid fyra tillfällen för summan. Vid två av tillfällena överskreds nivån dessutom enskilt i T-led.

Tabell 11. Medeldifferenser och kvoter för de inom parentes beskrivna mätpunkterna, för V-, L- och T-led samt summa [mm/s] vid mätplats C.

Mätplats C (mätpunkt)	V [mm/s]	L [mm/s]	T [mm/s]	Summa [mm/s]
Medeldifferens (referenspunkt - busskudde)	-0,179	-0,152	-0,058	-0,241
Medeldifferens (husvägg - busskudde)	-0,180	-0,225	-0,051	-0,276
Medeldifferens (inomhus - husvägg)	-0,030	0,054	0,124	0,078
	V	L	T	Summa
Kvot (busskudde/referenspunkt)	2,33	2,35	2,41	2,32
Kvot (busskudde/husvägg)	2,36	6,57	2,05	2,87
Kvot (husvägg/inomhus)	1,30	0,43	0,28	0,66

Följande stycken behandlar utvärdering av relevans för analysen med hjälp av appendix D vid mätplats D, tabell 12 samt tabell 13 och 15: Vibrationsmätningarna från vid mätplats D visar att vibrationsnivån minskade med ökat avstånd från källan, generellt i både V-, L- och T-led, bortsett från en svag ökning i T-led mellan mätpunkten 15 meter

respektive 30 meter från busskudden. Summa minskar dock mellan alla mätpunkter, om än betydligt mer mellan mätpunkt 2a (busskudde) och 2b (15 meter) än mellan mätpunkt 2b och 2c (30 meter). För alla tre mätpunkter vid mätplats D gäller att vibrationsnivån i V-led dominerar, följt av L-led och sedan T-led. Vibrationsavtagandet är störst i V-led mellan mätpunkt 2a och 2b, men störst i L-med mellan mätpunkt 2b och 2c.

Maxvärdet för mätpunkten vid busskudden och 15 meter från busskudden sticker ut något i jämförelse med de andra mätvärdena vid respektive mätpunkt. Vid tidpunkten för maxvärdet vid mätpunkt 2a ges dock även maxvärdet vid mätpunkt 2b och 2c.

Tabell 12. Medeldifferenser och kvoter för de inom parentes beskrivna mätpunkterna, för V-, L- och T-led samt summa [mm/s] vid mätplats D.

Mätplats D (mätpunkt)	V [mm/s]	L [mm/s]	T [mm/s]	Summa [mm/s]
Medeldifferens (15 meter - busskudde)	-0,339	-0,043	-0,131	-0,344
Medeldifferens (30 meter - 15 meter)	-0,051	-0,083	0,008	-0,083
	V	L	T	Summa
Kvot (busskudde/15 meter)	2,75	1,28	3,54	2,35
Kvot (15 meter/30 meter)	1,36	2,16	0,868	1,49

I tabell 13 presenteras max- och medelvärden uppmätta vid busskudde för mätplats A–D, samt vid referenspunkt för mätplats A–C.

Tabell 13. Uppmätta max- och medelvärden för referenspunkt och mätpunkt vid busskudde, vid respektive mätplats. Vibrationshastigheter i V-, L- och T-led samt summa [mm/s].

Mätpunkt	Referenspunkt [mm/s]				Vid busskudde [mm/s]			
	V	L	T	Summa	V	L	T	Summa
Max A	0,295	0,160	0,200	0,391	0,500	0,440	0,250	0,711
Medel A	0,053	0,037	0,045	0,080	0,323	0,242	0,163	0,436
Max B	0,015	0,025	0,035	0,046	0,390	0,945	0,615	1,193
Medel B	0,007	0,012	0,011	0,019	0,189	0,458	0,309	0,586
Max C	0,350	0,300	0,090	0,466	0,480	0,400	0,135	0,639
Medel C	0,135	0,113	0,041	0,182	0,313	0,265	0,099	0,424
Max D	-	-	-	-	1,000	0,325	0,300	1,093
Medel D	-	-	-	-	0,533	0,198	0,182	0,598

I tabell 14 presenteras max- och medelvärden uppmätta vid husvägg och inomhus för mätplats A–C.

Tabell 14. Uppmätta max- och medelvärden för mätpunkt vid husvägg och mätpunkt inomhus, vid mätplats A–C. Vibrationshastigheter i V-, L- och T-led samt summa [mm/s].

Mätplats	Vid husvägg [mm/s]				Inomhus [mm/s]			
	V	L	T	Summa	V	L	T	Summa
Max A	0,025	0,070	0,060	0,096	0,010	0,005	0,005	0,012
Medel A	0,020	0,054	0,043	0,072	0,010	0,005	0,005	0,012
Max B	0,040	0,105	0,100	0,150	0,030	0,035	0,065	0,076
Medel B	0,021	0,060	0,058	0,086	0,017	0,019	0,020	0,033
Max C	0,250	0,085	0,090	0,275	0,195	0,240	0,360	0,425
Medel C	0,133	0,040	0,048	0,148	0,103	0,094	0,173	0,225

I tabell 15 presenteras max- och medelvärden uppmätta 15- respektive 30 meter från busskudde för mätplats D.

Tabell 15. Uppmätta max- och medelvärden för mätpunkt 15 meter från busskudde och mätpunkt 30 meter från busskudde, vid mätplats D. Vibrationshastigheter i V-, L- och T-led samt summa [mm/s].

Mätplats	15 meter [mm/s]				30 meter [mm/s]			
	V	L	T	Summa	V	L	T	Summa
Max D	0,370	0,295	0,075	0,479	0,230	0,135	0,090	0,281
Medel D	0,194	0,155	0,052	0,254	0,143	0,072	0,059	0,171

4.2 VIBRATIONSUTBREDNING

I tabell 16 respektive 17 presenteras konstanter n och koefficienter α för vibrationsutbredningen i marken enligt Lamb's ekvation (ekvation 4), mellan mätpunkt 2 (busskudde) och mätpunkt 3 (husvägg) vid mätplats A–C respektive mätpunkt 2a och 2b (15 meter) samt mätpunkt 2a och 2c (20 meter) vid mätplats D, utifrån optimering baserad på uppmätta vibrationsnivåer. Fullständiga ekvationer finns sammanställda i appendix I.

Tabell 16. Anpassade konstanter n respektive koefficienter α [$1/m$] vilka, vid beräkning med ekvation 4, ger den bästa beskrivningen av vibrationsutbredningen i marken mellan mätpunkt 2 (busskudde) och 3 (husvägg) vid mätplats A–C. Differensen mellan uppmätt och beräknad vibrationsnivå betecknas Δd [mm/s].

Mätplats	Avstånd från busskudde till mätpunkt 2 resp. 3 [m]	n	α [m^{-1}]	Δd [mm/s]
A	0,1 resp. 25	0,15	0,039	$-4 \cdot 10^{-5}$
B	1 resp. 15	0,45	0,05	-0,0002
C	5 resp. 25	0,6	0,0044	$-3 \cdot 10^{-5}$

Tabell 17. Anpassade konstanter n respektive koefficienter α [$1/m$] vilka, vid beräkning med ekvation 4, ger den bästa beskrivningen av vibrationsutbredningen i marken vid mätplats D. Vid beteckning D.2b har optimering gjorts för att bäst beskriva vibrationsutbredningen mellan mätpunkt 2a (busskudde) och 2b (15 meter). Vid beteckning D.2c har optimering gjorts för att bäst beskriva vibrationsutbredningen mellan mätpunkt 2a (busskudde) och 2c (30 meter). Differensen mellan uppmätt och beräknad vibrationsnivå betecknas Δd [mm/s].

Mätplats	Avstånd från busskudde till mätpunkter (mätpunkt) [m]	n	α [m^{-1}]	Δd [mm/s]
D.2b	0,1 (2a) resp. 15 (2b)	0,15	0,007	0,0002
D.2b	0,1 (2a) resp. 30 (2c)	0,15	0,007	0,0353
D.2c	0,1 (2a) resp. 15 (2b)	0,2	0,0037	-0,0462
D.2c	0,1 (2a) resp. 30 (2c)	0,2	0,0037	0,0002

Utifrån ovanstående tabeller gäller generellt att konstanten n pendlar mellan 0,15 för mätplats A samt mätplats D (fall D.2b) och 0,6 för mätplats C. En Rayleigh våg/ytvåg från en punktkälla har typiskt ett n -värde på 0,5. En ytvåg från en linjekälla har n -värde 0 (SGF, 2013). Koefficienten α varierar mellan $0,0037 m^{-1}$ för mätplats D (fall D.2c) och $0,05 m^{-1}$ för mätplats B. α är cirka en faktor 10 mindre för mätplats D och C, jämfört med för mätplats A och B.

I tabell 18 beskrivs vibrationsavtagandet på meter i marken, mellan mätpunkt 2 (busskudde) och mätpunkt 3 (husvägg) vid mätplats A–C respektive mätpunkt 2a och 2b (15 meter) samt mätpunkt 2a och 2c (30 meter) vid mätplats D, utifrån uppmätta vibrationsnivåer. Att observera är att avståndet mellan mätpunkterna skiljer sig åt för de respektive mätplatserna. Resultatet indikerar att vibrationsavtagandet minskar med ökat avstånd från källan.

Tabell 18. Beräknat vibrationsavtagande per meter baserat på vibrationsmätningar vid mätplats A–D [mm/s]. Aktuella mätpunkter vid respektive mätplats är placerade inom parentes i anslutning till avståndet från busskudde till mätpunkt [m].

Mätplats	Avstånd från busskudde till mätpunkter (mätpunkt) [m]	Avtagande per meter [mm/s]
A	0,1 (2) resp. 25 (3)	0,015
B	1 (2) resp. 15 (3)	0,036
C	5 (2) resp. 25 (3)	0,014
D	0,1 (2a) resp. 15 (2b)	0,023
D	15 (2b) resp. 30 (2c)	0,006

4.3 FREKVENSPANALYS

I tabell 19 presenteras de framträdande frekvenserna vid mätplats A–D. Frekvensspektrum för de respektive mätplatserna presenteras i appendix J.

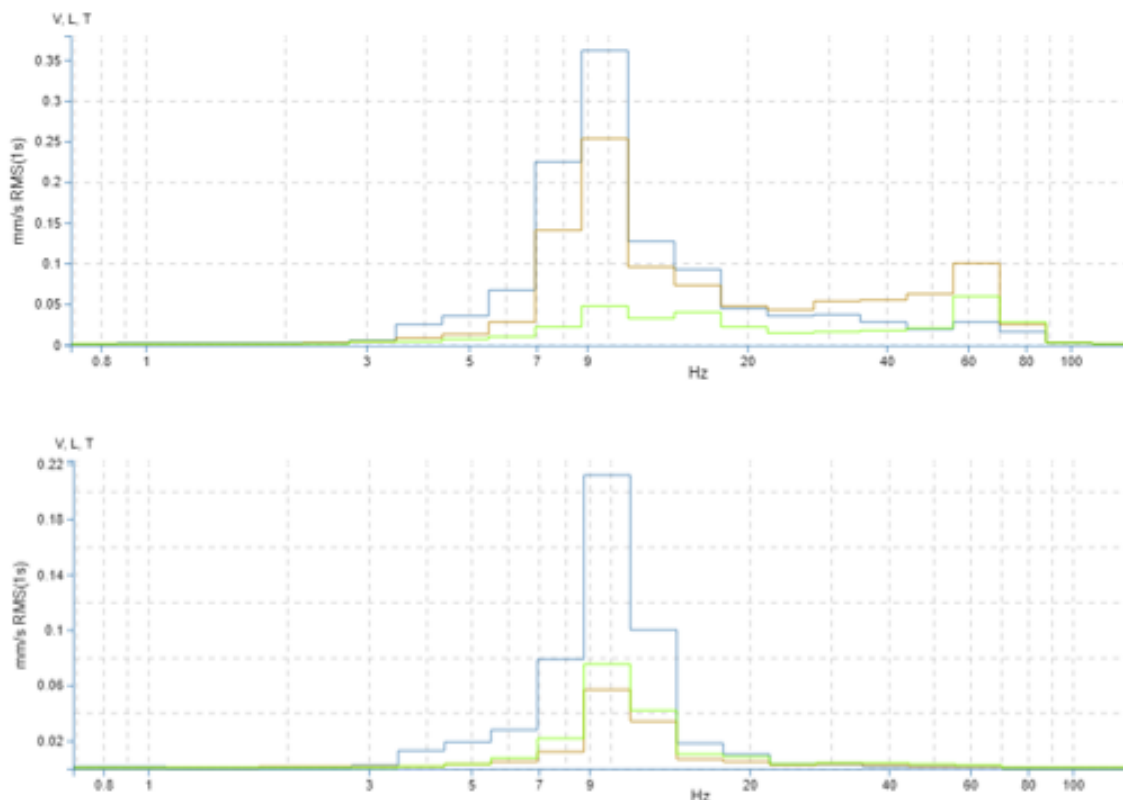
Tabell 19. Framträdande frekvenserna vid respektive mätpunkt { }, i V-, L- och T-led [Hz], vid mätplats A–D. De mest framträdande frekvenserna vid respektive mätplats är markerade med fet stil. Tydligt urskiljaktiga frekvenstoppar är separerad med "&". Mindre framträdande frekvenstoppar är placerade inom parentes.

Mätplats {mätpunkt}	V [Hz]	L [Hz]	T [Hz]
Mätplats A {2}	30–50	50–60	30–80
Mätplats B {2}	30–50	25 & 40–50	30–60
Mätplats C {2}	9–10 (& 60)	9–10 & 60	(10 & 60)
Mätplats C {3}	7–10	9–10	9–10
Mätplats C {4}	9–10	9–10	9–10
Mätplats D {2a}	9–10 (& 60)	9–10 & 60	10 & 60
Mätplats D {2b}	7–10	7–10	9–10
Mätplats D {2c}	7–10 (& 50)	7–10 (& 50)	9–10 (& 50)

Frekvensanalysen, vid respektive mätpunkt närmast busskudden, visar att det vid mätplats C och D generellt uppvisades något lägre frekvenser än vid mätplats A och B. Vid mätplats C och D fanns dessutom, mer framträdande än vid mätplats A och B, två tydliga frekvenstoppar: En vid något lägre frekvenser (~ 10 Hz) och en vid något högre frekvenser (~ 60 Hz). Frekvenser i V-led och L-led dominerade framför T-led. Resultatet indikerar dessutom att det i V-led generellt var något lägre frekvenser som dominerade, jämfört med i L-led där något högre frekvenser var mer framträdande. De något högre frekvenserna dämpades ut mellan mätpunkt 2 (busskudde) och mätpunkt 3 (husvägg), vid mätplats C. Se figur 9.

Vid mätpunkt 3 (husvägg) respektive mätpunkt 2b (15 meter) samt 2c (30 meter) vid mätplats C respektive D, var generellt enbart låga frekvenser framträdande. Vid mätplats C dominerade då frekvenser i V-led och vid mätplats D frekvenser i V- och L-led. För mätpunkt 2c kan en mycket liten, men urskiljaktig, frekvenstopp avläsas vid 50 Hz för samtliga vibrationskomponenter.

Vid mätpunkt 4 (inomhus) vid mätplats C, dominerade frekvenser i T-led. Detta motsatt till vid mätpunkt 2 (busskudde), där frekvenser i V- och L-led var mest framträdande. Vid mätplats 4 var dessutom enbart de låga frekvenserna framträdande, till skillnad från vid mätpunkt 2 där det fanns en frekvenstopp även vid något högre frekvenser. Se figur 9.



Figur 9. Två frekvensspektrum för mätplats C, för tidpunkt 14.03.08. Överst för mätpunkt 2 (busskudde), underst för mätpunkt 3 (husvägg). X-axel visar frekvens [Hz] och y-axel visar uppmätt vibrationsnivå [mm/s], där V-led presenteras i blått, L-led presenteras i rött och T-led presenteras i grönt. Vid busskudden kan två tydliga frekvenstoppar utläsas. Vid husväggen kan enbart en tydlig frekvenstopp utläsas.

4.4 ÖVERFÖRINGSFUNKTION MELLAN MARK OCH BYGGNAD

Utifrån figur 32, presenterad i appendix E, ges överföringsfunktionen mellan vibrationsnivå i mark och vibrationsnivå i byggnad för mätplats C enligt ekvation 19.

$$M_4 = kM_3 + m = 1,6093M_3 - 0,0124 \quad (19)$$

$$R = 0,9715$$

Där: M_4 , vibrationsnivå vid mätpunkt 4 (inomhus) [mm/s]; M_3 , vibrationsnivå vid mätpunkt 3 (husvägg) [mm/s]; k , lutningen; m , skärning med y-axel [mm/s]; R , mått för linjär anpassning.

4.5 SKYDDSVIBRATIONSNIVÅ

Utifrån beräkning krävs en skyddsvibrationsnivå vid busskudde på 0,5 mm/s, för att undvika ett överskridande av känseltröskeln i byggnad vid mätplats C. För fullständig uträkning, se appendix K. Vid beräkning försummas skärning med y-axel (0,0124), då värdet är litet och då ett försummande bidrar till en extra säkerhetsmarginal för den maximalt tillåtna vibrationsnivån.

Beräkningen visar att ett överskridande av en maximalt tillåten vibrationsnivån vid mätpunkt 4 (inomhus) på 0,28 mm/s kan undvikas om vibrationsnivån vid mätpunkt 2 (busskudde) inte överskrider 0,5 mm/s. Detta innebär att vibrationsnivån vid mätpunkt 3 (husvägg) inte kan överskrida 0,17 mm/s.

4.6 SKYDDSAVSTÅND

Beräkning av möjligt skyddsavstånd, utifrån en vald maximal vibrationsnivå vid mätpunkt 2 (busskudde), visar att ett skyddsavstånd mellan mätpunkt 2 och mätpunkt 3 (husvägg) på 96 meter kan undvika ett överskridande av känseltröskeln inomhus då vibrationsnivån vid mätpunkt 2 är 1 mm/s. Vald maximal vibrationsnivå vid mätpunkt 2 (1 mm/s) valdes utifrån maximalt uppmätta vibrationsnivåer vid mätplats D, då denna mätplats utifrån utvärdering av mätresultat uppvisade liknande egenskaper som mätplats C. För fullständig uträkning, se appendix L.

5 DISKUSSION

I följande avsnitt diskuteras resultaten i syfte att besvara frågeställningarna.

5.1 VIBRATIONSnivÅ

En viktig fråga som legat till grund för denna utredning är huruvida en busskudde på en väg kan förhöja vibrationsnivån i marken eller inte, i förhållande till vid en väg där det inte finns någon busskudde. Utifrån mätningar i denna studie kan konstateras att vibrationsnivån vid en busskudde är högre än vibrationsnivån vid en referenspunkt längs med samma väg. Den faktor med vilken höjningen sker då ett tungt fordon passerar skiljer sig markant mellan mätplatserna, enligt: 2,5 vid mätplats C; 6 vid mätplats A; 32 vid mätplats B (tabell 13). Avståndet mellan mätpunkten vid busskudden och referenspunkten varierade för de respektive mätplatserna, men eftersom referenspunkt valdes utifrån givna kriterier för att på bästa sätt motsvara en opåverkad punkt längs med samma väg bör detta ej ha påverkat faktorn.

I vilken led som vibrationen dominerar varierar mellan mätplatserna och även något mellan mätpunkterna, vilket kan ses i tabell 9–12. Vid mätplats A och C är vibrationer i V-led mest framträdande, både vid busskudden och vid referenspunkten. Så är även fallet vid busskudden vid mätplats D, vilken inte har någon referenspunkt. Vid mätplats B gäller dock det motsatta, att vibrationsnivån i V-led är minst framträdande. Mest framträdande, både vid referenspunkt och vid busskudden, är istället vibrationer i L-led. Enligt Hannelius (1974) kan dock den roterande partikelrörelsen hos en Rayleighvåg ge upphov till höga vibrationsnivåer nära källan i både vertikalled och horisontalled. I övrigt är ett grundare jorddjup, i förhållande till resterande mätplatser, utmärkande för mätplats B. Om detta är en bidragande orsak till att den vertikala vibrationskomponenten inte tillåts bli lika stor som vid övriga mätplatser, vilka har ett större jorddjup, är dock svårt att avgöra.

5.2 VIBRATIONSUTBREDNING OCH FREKVENSPANALYS

Vibrationsnivån minskar generellt i marken med ökat avstånd från källan vid alla mätplatser, vilket kan utläsas från tabell 9–12. Den dominerande vibrationsleden varierar dock mellan de respektive mätplatserna (tabell 13–15). Vid husväggen vid mätplats A är vibrationer i L-led mest framträdande, vilket kan jämföras med vid busskudden där V-led dominerar. Vid mätplats B är L-led dominerande vid husväggen, på samma sätt som vid busskudden. Likaså är vid mätplats C vibrationerna i V-led, som var mest framträdande vid busskudden, fortsatt mest framträdande vid husväggen. Vid mätplats D dominerar vibrationer i V-led vid alla mätpunkter, på avstånd 0,1, 15 och 30 meter från källan.

Enligt teorin gäller vanligtvis att den vertikala komponenten är större nära vibrationskällan, medan de horisontella komponenterna blir mer framträdande vid ökat avstånd från källan (Hannelius, 1974). Detta resonemang stämmer enbart helt för mätplats A, vilket belyser det faktum att beskrivandet av vibrationsutbredning i marken är komplext (SGF, 2013).

Komplexiteten belyses ytterligare av tabell 9–12, vilka visar att vibrationsavtagandet i de respektive vibrationsleden (V-, L- och T-led) varierar både mellan mätpunkter och mellan mätplatser. Mellan busskudde och husvägg avtar vibrationsnivån snabbast i följande led vid respektive mätplats: V-led, mätplats A; L-led, mätplats B; L- och V-led, mätplats C. Vid mätplats D avtar vibrationsnivån snabbast i V-led nära busskudden respektive i L-led längre bort från busskudden. Mellan mätpunkterna 15 och 30 meter från busskudden visar dock mätningarna att vibrationsnivån ökar marginellt i T-led vid mätplats D. Detta ter sig

märkligt, då de uppmätta vibrationsnivåerna inte är så pass låga att mätinstrumentens känslighet bör vara orsaken. En eventuell mätosäkerhet kan dock vara jordspetten, vilka mätarna var monterade på. Att jorddjupet snarare minskar än ökar med ökat avstånd från busskudden är en ytterligare indikator för att vibrationsnivån inte bör öka mellan de respektive mätpunkterna, eftersom mäktiga lerlager, enligt COWI (2015), är mer vibrationskänsliga än grunda.

Vidare indikerar tabell 18 att vibrationsavtagandet minskar med ökat avstånd från källan. För mätplats A och C är avståndet mellan mätpunkt vid busskudde och mätpunkt vid husvägg > 15 meter, vilket ger ett mindre avtagande per meter än för mätplats B där avståndet mellan mätpunkterna är < 15 meter. Liknande gäller att avtagandet per meter vid mätplats D är större mellan mätpunkt vid busskudde och mätpunkt 15 meter från busskudde, än mellan busskudde och mätpunkt 30 meter från busskudde. Att vibrationsutbredningen varierar med avståndet från källan belyses ytterligare av tabell 30, vilken visar att en optimerad anpassning för avståndet 0–15 meter från busskudden vid mätplats D inte stämmer lika bra för avståndet 0–30 meter vid samma mätplats.

Med utgång från Lamb's utökade version för vibrationsutbredning (ekvation 4), vilken tar hänsyn till både den geometriska dämpningen och materialdämpningen, bekräftar ytterligare att vibrationsnivån i marken avtar på olika sätt vid de fyra mätplatserna (appendix I). Sett till alla mätplatser, befinner sig dock den geometriska dämpningskonstanten (n) inom intervallet 0,15–0,6, vilket tyder på att vibrationsutbredningen i marken främst sker som en ytvåg. För n -värdet kring 0,5 är källan typiskt en punktlast, medan n -värdet kring 0 står för en linjelast (SGF, 2013). Vidare har en Rayleighvåg, vilket enligt Ni et al. (2017) är den vågtyp som främst dominerar vid trafikinducerade vibrationer, ett n -värde kring 0,5. Att notera i tabell 16 är att n -värdet tenderar att öka med ett ökat avstånd mellan busskudden och mätpunkten närmast busskudden (mätpunkt 2). De mätplatser, mätplats A och D, vilka har kortast avstånd mellan busskudde och mätpunkt 2 har samtidigt de minsta n -värdena. Vidare har mätplats C, där avståndet är längst, det största n -värdet.

Då jordarten vid samtliga mätplatser var lera, förväntades utifrån teorin att koefficienten för materialdämpning (α) skulle vara mellan 0,003 ~ 0,01 m^{-1} vid dominerande frekvenser kring 10 Hz och mellan 0,03 ~ 0,1 m^{-1} vid dominerande frekvenser kring 50 Hz (Ni et al., 2017; SGF, 2013). Tabell 16 och 17 visar att α varierar mellan 0,0037 m^{-1} (mätpplats D) och mellan 0,05 m^{-1} (mätpplats B). En förklaring till att α vid mätplats C och D är cirka en faktor 10 mindre än vid mätplats A och B, kan vara det faktum att de dominerande frekvenserna vid de respektive mätplatserna skiljer sig något åt. Vid mätplats C och D är de dominerande frekvenserna i regel lägre, cirka 9–10 Hz, medan de dominerande frekvenserna vid mätplats A och B i regel är något högre, cirka 30–60 Hz (tabell 19).

Vid tidigare studier har vibrationsmätningar i lösa jordar visat två tydliga spektraltoppar, en med ett maximum vid något lägre frekvenser (5–10 Hz) och en med ett maximum vid något högre frekvenser (30–50 Hz) (Madshus et al., 1996). Detta resonemang stämmer i denna studie främst för mätplats C och D, för mätpunkten närmast busskudden, där två mer tydligt urskiljaktiga frekvenstoppar kunde utläsas vid frekvensspektrumanalys. Vidare gäller enligt Madshus et al. (1996) att de låga frekvenserna blir mer framträdande desto lösare jorden är. Vid mätplats C och D är jorden generellt lösare än vid mätplats A och B, vilket ytterligare bekräftar teorin. Att jorddjupet vid mätplats C och D dessutom är större än vid mätplats A och B kan, likt tidigare resonemang, bidra till att vibrationerna blir kraftigare (COWI, 2015). Ytterligare faktorer, så som jordens skiktning samt

vägbanans skick och fordonsegenskaper kan dock också påverka vilken frekvens som dominerar och dess amplitud (Hunaidi, 2000). Kompletterande information om jordens skiktning skulle därmed kunna bidra till ökad förståelse.

Som en effekt av materialdämpningen dämpas vibrationsvågor med högre frekvens i större utsträckning än de med lägre frekvenser (SGF, 2013). Att lågfrekventa vibrationerna enklare sprids över ett större område kan bekräftas genom resultatet från frekvensanalysen av mätdata vid husvägg (mätplats C) samt 15 respektive 30 meter från busskudde (mätplats D). I tabell 19 framgår tydligt att spektraltopparna vid höga frekvenser, vilka var tydliga vid analys av mätdata vid busskudden, dämpas ut och försvinner med ökat avstånd från källan (figur 9). Vid mätpunkten 30 meter från busskudde ter sig mätdata, likt tidigare diskuterat, något avvikande. Om den spektraltopp som återuppstår vid de något högre frekvenserna beror på resonans i jordspettet eller något annat okänt mätfel är dock fortsatt svårt att avgöra. Att vibrationer av låg frekvens, enligt Madshus et al. (1996), både enklast sprider sig över stora avstånd och enklast förstärks i byggnader kan innebära en ökad risk för att boende noterar och/eller störs av vibrationer från en närliggande väg. Vid mätplats A och B saknades triggingar vid husväggen, dvs. att vibrationsnivåerna aldrig överskred 0,2 mm/s, vilket omöjliggjorde analys av frekvensinnehållet.

5.3 VIBRATIONER I BYGGNAD OCH SKYDDSÅTGÄRDER

Utifrån överföringsfunktionen mellan vibrationsnivå i mark och vibrationsnivå inomhus vid mätplats C (ekvation 19), sker en förstärkning av en vibration vid husväggen med en faktor $\sim 1,6$ genom byggnaden. Vibrationsnivån tenderar därmed att vara högre inomhus, på övre plan, än vid husväggen utanför byggnaden. På nedre plan har inga mätningar gjorts i denna studie. Vid framtagningen av överföringsfunktionen har dessutom avståndet mellan mätpunkten vid husväggen och mätpunkten inomhus försumrats. Att överföringsfunktionen har ett R^2 -värde ~ 1 innebär dock att anpassningen är så gott som helt linjär.

Vidare kan konstateras att det är de longitudinella och transversella komponenterna, det vill säga horisontella vibrationer, som förstärks i byggnaden (tabell 11). I T-led är vibrationsnivån inomhus högre än vibrationsnivån vid mätpunkten närmast busskudden. Enligt Watts (1990) sker den huvudsakliga vibrationsrörelsen i husgrunden i vertikalled, men eventuella horisontella vibrationer kan förstärkas högre upp i byggnaden. Hannelius (1947) belyser dessutom det faktum att både vertikala och horisontella vibrationskomponenter kan ge upphov till resonanseffekter i en byggnads övre delar. Utförd frekvensanalys visar att det är låga frekvenser som är framträdande inomhus (9–10 Hz). Enligt Hannelius (1974) kan resonans av en hel byggnad ske vid frekvenser < 10 Hz.

I denna studie har vibrationsmätningar enbart utförts i marken vid husväggen samt på byggnadens övre plan. Information om vibrationsnivån i husgrunden saknas därmed. Genom att öka antalet mätpunkter, med en ny mätpunkt i husgrunden, skulle ytterligare förståelse kring hur vibrationer förstärks i byggnaden ges. Att analys av vibrationsöverföringen mellan mark och byggnad enbart gjordes vid mätplats C beror på det faktum att det inte var möjligt att anpassa en linjär funktion till data vid mätplats B. Vidare var mätdata inomhus vid mätplats A redan utesluten för analys, med anledning av de låga och osäkra vibrationsnivåerna.

Känsltröskeln (0,28 mm/s) överskreds vid fyra tillfällen för summan vid mätplats C, vilket utgör en tredjedel av de för den mätplatsen använda mätvärdena (4 av 13). Vid två

av dessa tillfällen överskreds känseltröskeln dessutom enskilt i T-led. Vid samma två tillfällen överskreds, vad som enligt SIS Swedish Standards Institute (2014) anses vara, gränsen för måttlig störning (0,4 mm/s). Då uppmätta vibrationshastigheter kraftigt underskrider 10 mm/s, bör risken för byggnadsskador vara minimal (Hannelius, 1974). Enligt Hannelius (1974) kan dock även relativt låga vibrationsnivåer upplevas som märkbara och/eller störande i en miljö som vanligtvis uppfattas som lugn. Detta gäller framförallt vibrationerna med låga frekvenser, vilket är fallet vid mätplats C.

I tidigare studier har Smith et al. (2015) visat att både förändring i sömndjup och uppvaknande samt förändring i hjärtfrekvens är observerbart för vibrationshastigheter vid 0,3 mm/s, vid frekvens 10 Hz. För att undvika att känseltröskeln (0,28 mm/s) överskrids inomhus vid mätplats C kan en skyddsvibrationsnivå på 0,5 mm/s appliceras för mätpunkten närmast busskudden, vilket i detta fall innebär en maximalt tillåten vibrationsnivå 5 meter från busskudden. Indirekt innebär det att vibrationsnivån vid husväggen, 25 meter från busskudden, inte får överskrida 0,17 mm/s. Resultat från denna studie visar att maxvärdet, men inte medelvärdet, vid husväggen vid mätplats C överskred detta värde med drygt 0,1 mm/s (tabell 14). Vid mätplats D överskreds värdet 0,17 mm/s, både vad gäller medel- och maxvärde, vid mätpunkterna belägna 15 respektive 30 meter från busskudden (tabell 15).

Analys av mätdata har visat att vibrationsförhållandena, vad gäller exempelvis vibrationsutbredning och frekvensinnehåll, är relativt lika vid mätplats C och D. Vid mätplats D har dock högre vibrationsnivåer uppmätts vid mätpunkten närmast busskudden, men denna mätplats är samtidigt belägen närmare busskudden än motsvarande mätplats C. För att beräkna ett skyddsavstånd för ett, utifrån mätdata sett, möjligt värst scenario vid mätplats C har därför den maximalt uppmätta vibrationshastigheten (1 mm/s) vid mätplats D använts. För att känseltröskeln inte ska överskridas inomhus, om vibrationsnivån 5 meter från busskudden vid mätplats C är 1 mm/s, krävs ett skyddsavstånd på 96 meter till husväggen. Totalt avstånd mellan busskudde och byggnad bör därmed vara ca. 100 meter. Denna beräkning inkluderar en extra säkerhetsmarginal i och med det faktum att en maximalt uppmätt vibrationsnivå 1 meter från en busskudde appliceras på en mätplats 5 meter från en busskudde. Vidare tar den något förenklade beräkningen inte hänsyn till materialdämpningen, vilket ger ytterligare en extra säkerhetsmarginal.

Återigen belyses komplexiteten med att utreda vibrationsutbredningen och hur den varierar mellan olika platser. Vid mätplats A respektive B är exempelvis avståndet mellan busskudde och husvägg, vilket är 25 respektive 15 meter, tillräckligt för att inte riskera att överskrida känseltröskeln inomhus. Detta gäller då för de respektive byggnaderna som finns på de respektive mätplatserna. Beräkningar av skyddsavståndet visar att det vid mätplats C kan krävas avstånd som är 4–5 gånger längre än vid mätplats A och B, för att känseltröskeln inte ska överskridas där. Likadant gäller vid mätplats D. Dessa uppskattningar gäller dock då för en byggnad lik den vid mätplats C. Det är viktigt att komma ihåg att en annan byggnad kan förstärka eller dämpa vibrationer på ett annorlunda sätt.

Sammanfattningsvis visar resultatet i denna studie att både vibrationer med låga- och höga frekvenser kan uppstå i marken nära busskudden då tunga fordon passerar. Det är dock enbart vibrationer med låga frekvenser som sprids vidare i marken vid ett ökat avstånd från källan. Dessa vibrationer har en frekvens som både gynnar spridning i marken och eventuell resonans i byggnader. Dessutom är frekvensen > 8 Hz, vilket ökar risken för störning för människor även vid relativt låga vibrationshastigheter (SIS

Swedish Standards Institute, 2004). Att huset är grundlagt på lera ökar därutöver även risken för sättningar i marken under byggnaden (SGI, 2019). En eventuell och relativt enkel åtgärd för att minska vibrationsnivåerna i mark och byggnad vid mätplats C, är en sänkt hastighet på den närliggande och vältrafikerade gatan med busskuddar. Just farthinder är dock, som tidigare nämnts, enligt Vägverket & Svenska Kommunförbundet (2004) den mest effektiva åtgärden för fartdämpning. Nackdelen är att de, som visats i denna studie, kan hamna i konflikt med de vibrationer som skapas av den medvetna ojämnheten.

5.4 PÅVERKANDE FAKTORER OCH VIDARE STUDIER

En aspekt som inte undersökts i denna studie är hur fordonens hastighet påverkar vibrationsnivån i marken. Enligt Lombaert (2016) är hastigheten en relevant faktor, då det generellt gäller att höga vibrationsnivåer främst uppstår när tunga fordon färdas i hög hastighet på vägar med ojämnheter. I Uppsala används busskuddar som en form av medveten ojämnhet i marken, i syfte att sänka hastigheten och därmed främst öka trafiksäkerheten för oskyddade trafikanter (Vägverket och Uppsala kommun, 2009). Utifrån resultaten kan dock konstateras att det ibland sker på bekostnad av att vibrationsnivåerna i marken och närliggande byggnader ökar (tabell 11). Coquela & Fillola (2017) bekräftar dessutom att antalet klagomål om markvibrationer från bussar tenderar att öka vid en ökad användning av busskuddar. Att så är fallet ter sig dock något förvånande, då busskuddar enligt Trafikverket (2010) ska vara utformade så att tunga fordon ska ges möjlighet att passera relativt obehindrat. Vidare studier kring om busskuddars utformning och/eller grundläggning påverkar vibrationsnivån i marken är därför av högsta relevans för att möjliggöra en bättre och mer hållbar stadsplanering i en växande stad som Uppsala.

Det krävs dessutom en ökad förståelse för om det eventuellt är körsättet hos förare med tunga fordon som bidrar till de ökade vibrationsnivåerna vid busskuddarna och/eller om den tillåtna hastigheten över busskuddarna är för hög. Busskuddarna och/eller dess grundläggning är kanske inte, med sin nuvarande utformning, tillräckligt anpassade för de hastigheter som tillåts när tunga fordon kan passera dem relativt obehindrat. Att med hjälp av hastighetsmätning styrka att busskuddar oavsett är den mest effektiva hastighetsdämpande åtgärden, vilket framförts av Vägverket & Svenska Kommunförbundet (2004), skulle dock ytterligare styrka vikten av att undersöka eventuella lösningar kopplade till dess utformning.

Studien har visat att ett skyddsavstånd på cirka 100 meter mellan busskudde och byggnad kan krävas för att undvika ett överskridande av känsletröskeln inomhus då vibrationsnivåerna vid busskudden är höga. Trots att detta avstånd endast gäller för en specifik plats, visar det på att avståndet mellan busskudde och byggnad är en viktig faktor för vibrationsnivån. Något som dessutom bekräftas av Hunaidi (2000). Skyddsavståndet är dock långt och skulle i dagens växande Uppsala ställa stora och ibland omöjliga krav på samhällsbyggnaden. Ytterligare studier om hur jordart, jorddjup och skiktning påverkar vibrationsutbredningen skulle troligen kunna ge ett mer generellt rekommenderat skyddsavstånd. Komplexiteten och svårigheten i att, på ett relativt enkelt och generellt sätt, beskriva vibrationsutbredningen har dock belysts vid ett flertal gånger under denna studie.

Hur hög vibrationsnivån inomhus slutligen blir beror, som tidigare nämnts, både på vibrationsnivån i marken och hur byggnaden tenderar till att förstärka eller dämpa vibrationer. Enligt Vägverket (2014) är byggnadsmaterial, grundkonstruktion, stomstyvhet och våningshöjd relevanta faktorer för vibrationernas utbredning i byggnaden. Trots försök, har det dock inte varit möjligt att dra några slutsatser kring hur

exempelvis grundläggningen påverkar vibrationsnivåerna vid de respektive mätplatserna. Dels på grund av att information om grundläggning enbart fanns för två av de använda byggnaderna (mätplats B och C), dels på grund av svårigheter med att ta fram en överföringsfunktion mellan mark och byggnad vid mätplats A och B. Enligt Ögren (2016) kan vibrationsnivån i en byggnad främst minskas genom en förstärkning av grundläggningen, något som ofta är svårt att genomföra då byggnaden redan är på plats. Ett ytterligare antal mätplatser skulle vara nödvändigt för att på ett mer grundligt sätt analysera hur överföringsfunktionen mellan mark och byggnad varierar med förändrade mark- och byggnadsförhållanden.

Generellt för hela studien gäller att analysen hade gynnats av en ökad mängd mätdata. En stor mängd data sorterades bort vid alla fyra mätplatser, dessutom var antalet triggningar färre än väntat. Vid alla mätplatser gjordes mätningar under passager av 30–40 tunga fordon, detta för att ha en rimlig marginal till de 20 passager per mätplats som bedömdes ge ett tillräckligt bra underlag för analys. Trots den tilltagna mätperioden underskred antalet triggnad mätdata som kunde användas för vidare analys det tänkta 20 passagera vid två av fyra mätplatser (mätplats A och C).

I denna studie begränsades den möjliga tiden för mätning av mätinstrumentens begränsade tillgänglighet. Ett något begränsat mätdataunderlag ger en ökad osäkerhet och därmed ett mindre säkert resultat. Vid alla fyra mätplatser ges dock en relativt god korrelation mellan mätvärden vid busskudden och mätvärden vid husväggen, med ett $R^2 > 0,75$ för samtliga linjära anpassningar. Vid en förbättring av denna studie bör dock längre mätperioder användas. En ytterligare möjlighet till att öka antalet triggnad mätdata är att dessutom sänka triggernivån, förslagsvis från 0,2 mm/s till 0,1 mm/s. Vidare bör om möjligt vibrationsmätarna sammankopplas, så att exempelvis en triggnad för mätaren närmast busskudden även ger en triggnad för de resterande mätarna. Detta skulle medföra ett ökat antal transienter och därmed ett ytterligare förbättrat mätunderlag.

6 SLUTSATSER

* Jämfört med en opåverkad referenspunkt längs med samma väg kan en busskudde, utifrån mätresultatet, förhöja vibrationsnivån i nära anslutning till busskudden med en faktor mellan 2,5–32 då ett tungt fordon passerar.

* Mätdata indikerar att vibrationsutbredningen i marken främst sker som en Rayleighvåg vid samtliga mätplatser. Vibrationsnivån i marken minskar generellt med ett ökat avstånd från källan, men vibrationsavtagandet tenderar till att minska med ett ökat avstånd från källan. Både vibrationer med låg och hög frekvens kan uppstå då ett tungt fordon passerar en busskudde, men det är enbart vibrationer av låg frekvens som sprids på större avstånd från källan. Vidare visar mätdata att horisontella vibrationer kan förstärkas i en byggnad.

* Det är, utifrån mätdata samt markegenskaper och grundläggningsinformation vid respektive mätplats, svårt att dra några generella slutsatser kring vilka faktorer som är avgörande för vibrationsnivån i mark respektive byggnad. Mätdata indikerar dock att mäktiga lerlager tenderar till att vara mer vibrationskänsliga, samt i större utsträckning bidra till vibrationer av låg frekvens vilka kan förstärkas i byggnader och öka risken för störning.

* Utifrån uppmätta vibrationshastigheter vid mätplats C, bör en skyddsvibrationsnivå på 0,5 mm/s tillämpas vid busskudden för att känseltröskeln (0,28 mm/s) inte ska riskera att överskridas inomhus.

* Vid ett tänkt värsta scenario vid mätplats C, baserat på maximalt uppmätta vibrationsnivåer vid mätplats D, krävs ett skyddsavstånd på cirka 100 meter mellan busskudde och husvägg för att känseltröskeln (0,28 mm/s) inte ska riskera att överskridas inomhus då vibrationsnivån vid busskudden är 1 mm/s.

7 REFERENSER

Banverket & Naturvårdsverket. (2006). *BULLER och VIBRATIONER från spårburen linjetrafik. Riktlinjer och tillämpning*. Dnr.S02- 4235/SA60. Tillgänglig: https://www.trafikverket.se/contentassets/91a9a5fa41d4449ea2c06512dfc63605/buller_vibr_riktlinj_omarb_version_20060201.pdf [2018-10-03]

COWI. (2015). *VIBRATIONSUTREDNING HALLSÅS 2:258 M FL*. Göteborg. Tillgänglig: https://www.lerum.se/globalassets/documents/forvaltningssidorna/bygga-bo-och-miljo/kommunens-planarbete/pagaende-planer-och-program/lerum/detaljplan-for-asenvagen/granskning/vibrationsutredning-cowi-20151026.pdf#80946-0_tmp.pdf [2019-01-16]

Coquela, G. & Fillola, C. (2017). *Analysis of ground-borne noise and vibration levels generated by buses*. Procedia Engineering. Volym 199. Sidor 2699-2704. DOI:10.1016/j.proeng.2017.09.564

Hao, H., Ang, T. C. Shen, J. (2001). *Building vibration to traffic-induced ground motion*. Building and Environment. Volym 36. Nummer 3. Sidor 321-336. DOI:10.1016/S0360-1323(00)00010-X

Hannelius, L. (1974). *Svängningsrörelser i jord genom tågtrafik*. Förnimmelser och effekter i byggnader. Nr. 56. Sidor 21–48. Statens Järnvägar. Geotekniska Kontoret, Stockholm. Tillgänglig: <http://www.swedgeo.se/globalassets/publikationer/sgi-sartryck-och-preliminara-rapporter/sgi-s56.pdf> [2018-11-19]

Hunaidi, O. & Tremblay, M. (1997). *Traffic-induced building vibrations in Montréal*. Can. J. Civ. Eng. 24. Sidor 736–753. NRC Kanada. Tillgänglig: <https://pdfs.semanticscholar.org/25f1/a3b8c8f8be57469a232d386ac7a7896d1d209.pdf> [2018-10-03]

Hunaidi, O. (2000). *Traffic vibrations in buildings*. Construction Technology Update. Nummer 39. Institute for Research in Construction. Tillgänglig: <https://pdfs.semanticscholar.org/7e44/ef248dada3a2ed234228d04c7197c3ed8735.pdf> [2018-10-03]

Jones, C. J. C. (1994). *Use of Numerical Models to Determine the Effectiveness of Anti Vibration Systems for Railways*. Proc. Instn Civ. Engrs Transp. Volym 105, feb. Sidor 43–51. DOI:10.1680/itrans.1994.25706

Kennedy, J., Oakley, C., Sumon, S., Parry, I., Wilkinson, E. & Brown, J. (2004). *Impact of road humps on vehicles and their occupants*. TRL Report TRL614. ISSN:0968–4107. Tillgänglig: <https://trl.co.uk/sites/default/files/TRL614%281%29.pdf> [2018-10-04]

Lak, M.A., Degrande, G. & Lombaert, G. (2011). *The effect of road unevenness on the dynamic vehicle response and ground-borne vibrations due to road traffic*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. Volym 31. Nummer 10. Sidor 1357-1377. DOI:10.1016/j.soildyn.2011.04.009

Lantmäteriet. (2018). *Kartsök och ortnamn*. Tillgänglig: <https://kso.etjanster.lantmateriet.se/> [2018-10-11]

Linger, D., A. (1963). *Effect of Vibration on Soil Properties*. Highway Research Record. Nummer 22. Highway Research Board, Washington DC. Tillgänglig: <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrr/1963/22/22-002.pdf> [2018-11-12]

- Lombaert, G., Degrande, G. & Clouteau, D. (2001). *The influence of the soil stratification on free field traffic-induced vibrations*. Archive of Applied Mechanics. Volym 71, Nummer 10. Sidor 661–678. DOI:10.1007/s004190100174
- Madshus, C., Bessason, B. & Hårvik, L. (1996). *PREDICTION MODEL FOR LOW FREQUENCY VIBRATION FROM HIGH SPEED RAILWAYS ON SOFT GROUND*. Journal of Sound and Vibration. Volym 193, Nummer 1. Sidor 195-203. DOI:10.1006/jsvi.1996.0259
- Möller, B., Larsson, R., Bengtsson, P-E. & Moritz, L. (2000). *Geodynamik i praktiken*. Statens Geotekniska Institut. Information 17. ISSN:0281–7578. Linköping. Tillgänglig: <http://www.swedgeo.se/globalassets/publikationer/info/pdf/sgi-i17.pdf> [2018-10-04]
- Ni, S-H., Kuo, H-H., Ju, S-H., & Guo, J-L. (2017). *IN-SITU MEASUREMENT OF THE VIBRATION DECAY CHARACTERISTICS OF ALLUVIAL SOIL DEPOSITS*. Journal of GeoEngineering. Volym 12, Nummer 3. Sidor 109–118. DOI:10.6310/jog.2017.12(3).2
- SCB, Statistiska Centralbyrån (2018). *Kommuner i siffror*. Uppsala, 2017. Tillgänglig: <http://www.scb.se/hitta-statistik/sverige-i-siffror/kommuner-i-siffror/#?region1=0380®ion2=> [2018-10-04]
- SGI, Statens Geotekniska Institut. (2019). *Sättningar i småhus*. Tillgänglig: <http://www.swedgeo.se/sv/kunskapscentrum/om-geoteknik-och-miljogeoteknik/geoteknik-och-markmiljo/sattningar-i-smahus/> [2019-02-01]
- SGU, Sveriges Geologiska Undersökning. (2013). *Naturen, Människorna, Tekniken. Verksamhetsberättelse 2013*. Tillgänglig: <http://resource.sgu.se/produkter/broschyror/verksamhetsberattelse-2013.pdf> [2018-10-04]
- SGU, © Sveriges geologiska undersökning. (2018A). *Kartgenerator*. Tillgänglig: http://apps.sgu.se/kartgenerator/maporder_sv.html [2018-10-10]
- SGU, Sverige geologiska undersökning. (2018B). *Kunskapscentrum*. Tillgänglig: <http://www.swedgeo.se/sv/kunskapscentrum/om-geoteknik-och-miljogeoteknik/geoteknik-och-markmiljo/jordmateriallara/> [2018-11-23]
- Sigicom. (2016A). *Produktblad: INFRA V12 Triaxial Geophone*. Tillgänglig: https://www.sigicom.se/cdn.triggerfish.cloud/uploads/2016/09/v12_ds089_d3112-enc.pdf [2018-11-28]
- Sigicom. (2016B). *Produktblad: INFRA 4100 Master Data logger with GSM/GPRS*. Tillgänglig: https://www.sigicom.se/cdn.triggerfish.cloud/uploads/2016/11/infra-master_datasheet_ds089_d4100lr-enb.pdf [2018-11-28]
- Sigicom. (2019). *INFRA Systemet. INFRA Net*. Tillgänglig: <https://www.sigicom.se/infra-systemet-omgivningspaverkan/> [2019-04-21]
- SIS Swedish Standards Institute. (2004). *SS 460 48 61. Vibration och stöt – Mätning och riktvärden för bedömning av komfort i byggnader*. SIS Förlag AB. Stockholm.

Smith, M., Ögren, M. & Persson Waye, K. (2015). *PHYSIOLOGICAL REACTION THRESHOLDS TO VIBRATION DURING SLEEP*. Unit of occupational and environmental medicine. Department of public health and community medicine. The Sahlgrenska Academy at The University of Gothenburg. Rapportnummer 2:2015. Göteborg. ISBN 978-91-86863-08-1. Tillgänglig: https://gupea.ub.gu.se/bitstream/2077/41118/1/gupea_2077_41118_1.pdf [2019-01-15]

Statens Geotekniska Institut, SGI. (1969). *Seismikdag 1969. Symposium anordnat av Svenska Geotekniska Föreningen den 22 april 1969*. Stockholm. Tillgänglig: <http://www.swedgeo.se/globalassets/publikationer/sgi-sartryck-och-preliminara-rapporter/sgi-s33.pdf> [2018-10-04]

Svenska Geotekniska Föreningen, SGF. (2013). *Informationsutskrift 1:2012. Markvibrationer*. SGF:s Markvibrationskommitté. Stockholm & Göteborg. Tillgänglig: https://www.researchgate.net/publication/322939605_SGF_Informationskrift_12012_Markvibrationer [2018-10-03]

Svensson, T. & Hedström, R. (2003). *Hastighetsdämpande åtgärder och integrerad stadsplanering. En litteraturstudie*. Väg- och transportforskningsinstitutet. TI meddelande 946 – 2003. Linköping. Tillgänglig: <http://vti.diva-portal.org/smash/get/diva2:673866/FULLTEXT01.pdf> [2018-10-04]

Tholén, O. (1974). *MARKVIBRATIONER ORSAKADE AV VÄGTRAFIK. Olika faktorerers inverkan på hastighetsamplituden. Studier genom körförsök*. STATENS VÄG- OCH TRAFIKINSTITUT. Rapport Nr. 53. Tillgänglig: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:674381/FULLTEXT01.pdf> [2018-10-11]

Trafikverket. (2010). *Bussar och gupp – Utgångspunkter, avsikter och fakta*. Publikation: 2010:052. ISBN:978-91-7467-024-0. Tillgänglig: <https://www.av.se/globalassets/filer/halsa-och-sakerhet/vibrationer-bussar-och-gupp-utgangspunkter-avsikter-och-fakta-broschyr.pdf> [2018-10-04]

Trafikverket. (2017). *Buller och vibrationer från trafik på väg och järnväg*. Riktlinjer: TDOK 2014:1021. Version 2.0. Tillgänglig: <http://trvdokument.trafikverket.se/Versioner.aspx?spid=3493&dokumentId=TDOK%202014%3a1021> [2018-10-03]

Trollé, A., Marquis-Favre, C. & Parizet, É. (2015). *Perception and Annoyance Due to Vibrations in Dwellings Generated from Ground Transportation: A Review*. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control. Volym 34, Nummer 4, Sidor 413-457. DOI: 10.1260/0263-0923.34.4.413

Uppsala Kommun. (2017). *Befolkningsprognos för Uppsala kommun 2017–2050*. Tillgänglig: <https://www.uppsala.se/contentassets/f09f9e6b994f41408c66064a2da8470b/befolkning-sprognos-for-uppsala-kommun-20172050.pdf> [2018-10-04]

Vägverket. (2000). *Helkroppsvibrationer vid färd på ojämna vägar. En skakande studie*. Publikation 2000:31. ISSN:1401-9612. Tillgänglig: https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/11122/RelatedFiles/2000_31_helkroppsvibrationer_vid_fard_pa_ojamna_vagar.pdf [2018-10-04]

Vägverket. (2004). *Miljökonsekvensbeskrivning inom vägsektorn, Del 3 Analys och bedömning*. Publikation 2002:43. ISSN:1401–9612. Borlänge.

Vägverket & Svenska Kommunförbundet. (2004). *Vägar och gators utformning Sektion tätort – gaturum*. Publikation: 2004:80. ISSN:1401–9612. Tillgänglig: https://www.trafikverket.se/TrvSeFiler/Foretag/Bygga_och_underhalla/Vag/Vagutformning/Dokument_vag_och_gatuutformning/Vagar_och_gators_utformning/Sektion_tatort-gaturum/sektion_tatort_gaturum.pdf [2018-10-04]

Vägverket och Uppsala kommun. (2009). *Stadsläkning kring trafikleder – Ett delprojekt inom Den Goda Staden, i Uppsala*. Publikation: 2009:70. ISSN:1401–9612. Tillgänglig: https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/11048/RelatedFiles/2009_70_stadslakning_kring_trafikleder_.pdf [2018-10-04]

Watts, G.R. (1990). *Traffic induced vibrations in buildings*. Transport and Road Research Laboratory. Research Report 246. ISSN:0266–5247. Storbritannien. Tillgänglig: <https://trl.co.uk/sites/default/files/RR246.pdf> [2018-10-03]

Watts, G.R. & Krylov, V.V. (2000). *Ground-borne vibration generated by vehicles crossing road humps and speed control cushions*. Applied Acoustics. Volym 59. Nummer 3. Sidor 221-236. DOI:10.1016/S0003-682X(99)00026-2.

Ögren, M. (2016). *Vibrationer inomhus från trafik*. Sahlgrenska Universitetssjukhuset. Västra Götalandsregionens Miljömedicinska Centrum (VMC). Göteborg. Tillgänglig: <https://www.naturvardsverket.se/upload/miljoarbete-i-samhallet/miljoarbete-i-sverige/buller/rapport-vibrationer-inomhus-fran-trafik-2016-05-27.pdf> [2018-10-03]

8 APPENDIX

Nedan följer appendix A–M.

A. GEOMETRISK DÄMPNING

I tabell 20 presenteras geometriska dämpningskonstanter, n .

Tabell 20. Konstant för geometrisk dämpning, n , för olika vågtyper, källor och vågutbredningar (SGF, 2013).

n	Vågtyp	Källa	Vågutbredning
0,5	Ytvåg	Punktlast	Längs yta
0	Ytvåg	Linjelast	Längs yta
2	Volymvåg	Punktlast	Längs yta
1	Volymvåg	Punktlast	I halvrymd
1	Volymvåg	Linjelast	Längs yta
0,5	Volymvåg	Linjelast	I halvrymd

B. SERIENUMMER GEOFONER

Serienummer för använda geofoner, vid mätpunkt 1–4, vid mätplats A–C presenteras i tabell 21.

Tabell 21. Serienummer för geofoner, INFRA V12 Triaxial Geophone från Sigicom, använda vid mätpunkt 1–4 vid mätplats A–C.

Mätplats A–C	Mätpunkt 1	Mätpunkt 2	Mätpunkt 3	Mätpunkt 4
Geofon Nr.	26 710	26 730	26 880	27 140

Serienummer för använda geofoner, vid mätpunkt 2a–2c, vid mätplats D presenteras i tabell 22.

Tabell 22. Serienummer för geofoner, INFRA V12 Triaxial Geophone från Sigicom, använda vid mätpunkt 2a–2c vid mätplats D.

Mätplats D	Mätpunkt 2a	Mätpunkt 2b	Mätpunkt 2c
Geofon Nr.	26 730	26 880	26 710

C. FOTON FRÅN MÄTPLATSER

Följande avsnitt presenterar foton tagna vid någon av de fyra mätplatserna. Av hänsyn till de boende är mätplats ej angiven för de respektive mätpunkterna.

I figur 10 visas ett exempel på en referenspunkt.



Figur 10. Ett exempel på en mätpunkt vilken definieras som referenspunkt (mätpunkt 1). Mätaren är placerad på ett jordspett i marken och kopplad till en master.

I figur 11 visas en mätpunkt vid en busskudde.



Figur 11. Ett exempel på en mätpunkt vilken definieras som placerad vid busskudde (mätpunkt 2 eller 2a). Mätaren är placerad på ett jordspett i marken och kopplad till en master.

I figur 12 visas en mätpunkt vid en husvägg.



Figur 12. Ett exempel på en mätpunkt vilken definieras som placerad vid husvägg (mätpunkt 3). Mätaren är placerad på ett jordspett i marken och kopplad till en master.

I figur 13 visas en mätpunkt inomhus.



Figur 13. Ett exempel på en mätpunkt vilken definieras som inomhus (mätpunkt 4). Mätaren är placerad på en platta, vilken är placerad på golvet, och kopplad till en master.

D. MÄTDATA

Följande avsnitt presenterar de mätvärden vid mätplats A–D som användes vid beräkning.

MÄTPLATS A

I tabell 23 presenteras använd mätdata från mätplats A, för mätpunkt 1 (referenspunkt) och 2 (busskudde).

Tabell 23. Uppmätt vibrationsnivå i V-, L- och T-led samt beräknad summa [mm/s], för respektive tidpunkt, vid mätpunkt 1 (referenspunkt) och mätpunkt 2 (busskudde), vid mätplats A. Max- och medelvärden presenteras längst ned i tabell.

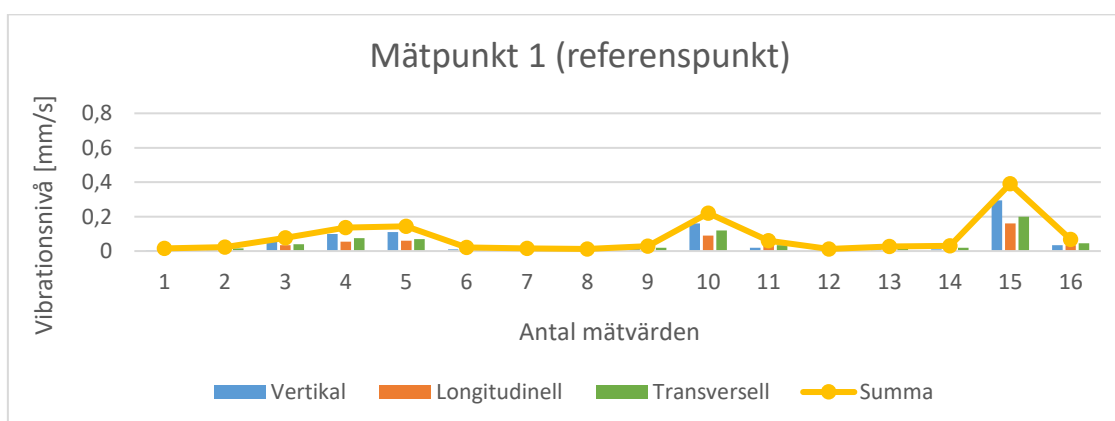
Mätplats A Mätpunkt	Referenspunkt [mm/s]				Vid busskudde [mm/s]			
	V	L	T	Summa	V	L	T	Summa
TID								
10:42:00	0,005	0,010	0,010	0,015	0,290	0,180	0,130	0,365
10:44:00	0,010	0,015	0,015	0,023	0,225	0,165	0,070	0,288
10:51:00	0,055	0,035	0,040	0,076	0,500	0,440	0,250	0,711
11:02:00	0,100	0,055	0,075	0,137	0,370	0,235	0,200	0,482
11:13:00	0,110	0,060	0,070	0,144	0,335	0,215	0,155	0,427
11:21:00	0,010	0,010	0,015	0,021	0,375	0,325	0,220	0,543
11:33:00	0,005	0,010	0,010	0,015	0,200	0,155	0,070	0,263
11:35:00	0,005	0,005	0,010	0,012	0,400	0,365	0,245	0,594
11:43:00	0,015	0,015	0,020	0,029	0,360	0,235	0,165	0,460
11:53:00	0,160	0,090	0,120	0,219	0,385	0,315	0,245	0,555
12:00:00	0,020	0,045	0,035	0,060	0,220	0,140	0,080	0,273
12:02:00	0,005	0,005	0,010	0,012	0,320	0,245	0,180	0,441
12:12:00	0,010	0,015	0,020	0,027	0,300	0,180	0,135	0,375
12:15:00	0,010	0,020	0,020	0,030	0,215	0,155	0,075	0,275
12:22:00	0,295	0,160	0,200	0,391	0,375	0,310	0,200	0,526
12:33:00	0,035	0,035	0,045	0,067	0,290	0,205	0,195	0,405
Max:	0,295	0,160	0,200	0,391	0,500	0,440	0,250	0,711
Medel:	0,053	0,037	0,045	0,080	0,323	0,242	0,163	0,436

I tabell 24 presenteras använda mätdata från mätplats A, för mätpunkt 3 (husvägg) och 4 (inomhus).

Tabell 24. Uppmätt vibrationsnivå i V-, L- och T-led samt beräknad summa [mm/s], för respektive tidpunkt, vid mätpunkt 3 (husvägg) och mätpunkt 4 (inomhus), vid mätplats A. Max- och medelvärden presenteras längst ned i tabell.

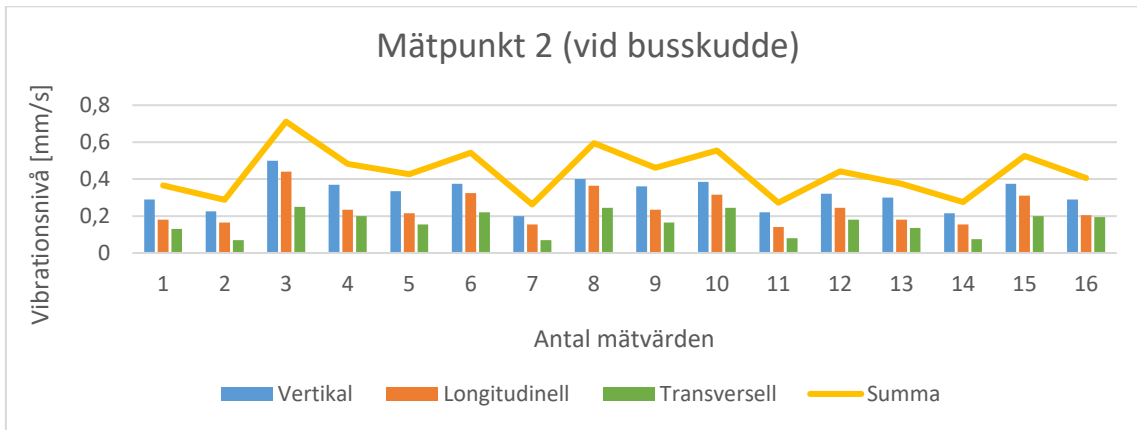
Mätplats A Mätpunkt	Vid husvägg [mm/s]				Inomhus [mm/s]			
	TID	V	L	T	Summa	V	L	T
10:42:00	0,015	0,045	0,035	0,059	0,010	0,005	0,005	0,012
10:44:00	0,025	0,050	0,040	0,069	0,010	0,005	0,005	0,012
10:51:00	0,025	0,070	0,055	0,092	0,010	0,005	0,005	0,012
11:02:00	0,025	0,060	0,045	0,079	0,010	0,005	0,005	0,012
11:13:00	0,015	0,050	0,040	0,066	0,010	0,005	0,005	0,012
11:21:00	0,020	0,060	0,050	0,081	0,010	0,005	0,005	0,012
11:33:00	0,015	0,045	0,035	0,059	0,010	0,005	0,005	0,012
11:35:00	0,025	0,070	0,060	0,096	0,010	0,005	0,005	0,012
11:43:00	0,015	0,050	0,040	0,066	0,010	0,005	0,005	0,012
11:53:00	0,020	0,070	0,050	0,088	0,010	0,005	0,005	0,012
12:00:00	0,020	0,050	0,035	0,064	0,010	0,005	0,005	0,012
12:02:00	0,020	0,050	0,045	0,070	0,010	0,005	0,005	0,012
12:12:00	0,020	0,045	0,035	0,060	0,010	0,005	0,005	0,012
12:15:00	0,015	0,050	0,035	0,063	0,010	0,005	0,005	0,012
12:22:00	0,020	0,055	0,045	0,074	0,010	0,005	0,005	0,012
12:33:00	0,020	0,050	0,045	0,070	0,010	0,005	0,005	0,012
Max:	0,025	0,070	0,060	0,096	0,010	0,005	0,005	0,012
Medel:	0,020	0,054	0,043	0,072	0,010	0,005	0,005	0,012

I figur 14 presenteras mätdata från mätplats A, för mätpunkt 1 (referenspunkt).



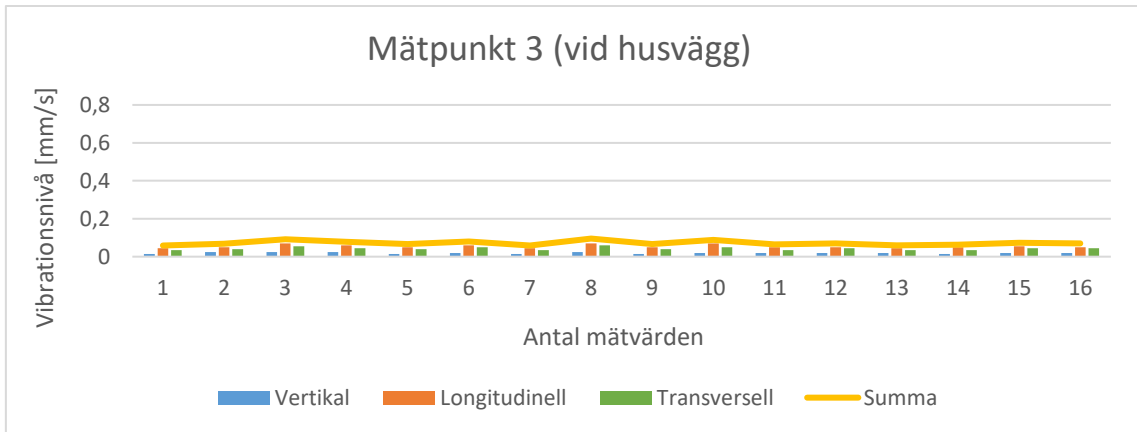
Figur 14. Uppmätt vibrationsnivå i V-, L- och T-led samt beräknad summa [mm/s], för respektive tidpunkt 1–16, vid mätpunkt 1 (referenspunkt) vid mätplats A.

I figur 15 presenteras mätdata från mätplats A, för mätpunkt 2 (busskudde).



Figur 15. Uppmätt vibrationsnivå i V-, L- och T-led samt beräknad summa [mm/s], för respektive tidpunkt 1–16, vid mätpunkt 2 (busskudde) vid mätplats A.

I figur 16 presenteras mätdata från mätplats A, för mätpunkt 3 (husvägg).



Figur 16. Uppmätt vibrationsnivå i V-, L- och T-led samt beräknad summa [mm/s], för respektive tidpunkt 1–16, vid mätpunkt 3 (husvägg) vid mätplats A.

MÄTPLATS B

I tabell 25 presenteras använd mätdata från mätplats B, för mätpunkt 1 (referenspunkt) och 2 (busskudde).

Tabell 25. Uppmätt vibrationsnivå i V-, L- och T-led samt beräknad summa [mm/s], för respektive tidpunkt, vid mätpunkt 1 (referenspunkt) och mätpunkt 2 (busskudde), vid mätplats B. Max- och medelvärden presenteras längst ned i tabell.

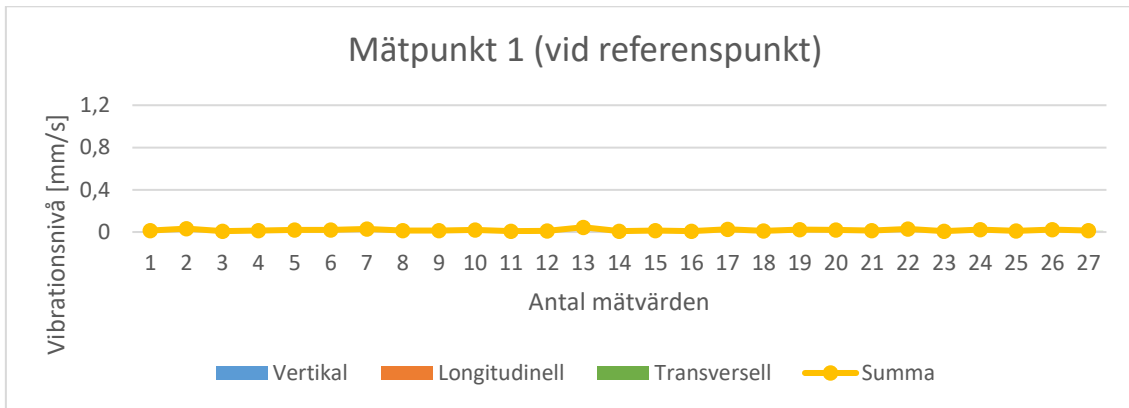
Mätplats B Mätpunkt	Referenspunkt [mm/s]				Vid busskudde [mm/s]			
	TID	V	L	T	Summa	V	L	T
10:39:00	0,005	0,010	0,010	0,015	0,100	0,225	0,140	0,283
10:40:00	0,010	0,025	0,020	0,034	0,200	0,505	0,340	0,641
10:41:00	0,005	0,005	0,005	0,009	0,105	0,270	0,185	0,344
10:42:00	0,005	0,010	0,010	0,015	0,095	0,210	0,160	0,281
10:44:00	0,010	0,015	0,010	0,021	0,185	0,400	0,385	0,585
10:52:00	0,010	0,015	0,010	0,021	0,270	0,700	0,420	0,860
11:04:00	0,010	0,020	0,020	0,030	0,210	0,520	0,330	0,651
11:05:00	0,005	0,010	0,010	0,015	0,170	0,490	0,200	0,556
11:06:00	0,005	0,010	0,010	0,015	0,225	0,505	0,260	0,611
11:08:00	0,010	0,015	0,010	0,021	0,325	0,695	0,550	0,944
11:17:00	0,005	0,005	0,005	0,009	0,105	0,240	0,185	0,321
11:22:00	0,005	0,010	0,005	0,012	0,175	0,385	0,210	0,472
11:23:00	0,015	0,025	0,035	0,046	0,390	0,945	0,615	1,193
11:25:00	0,005	0,005	0,005	0,009	0,110	0,270	0,245	0,381
11:27:00	0,005	0,010	0,010	0,015	0,185	0,435	0,365	0,597
11:38:00	0,005	0,005	0,005	0,009	0,110	0,220	0,145	0,286
11:41:00	0,010	0,015	0,020	0,027	0,195	0,505	0,325	0,631
11:44:00	0,005	0,010	0,005	0,012	0,145	0,315	0,160	0,382
11:45:00	0,010	0,015	0,015	0,023	0,330	0,845	0,555	1,063
11:51:00	0,005	0,015	0,010	0,019	0,235	0,680	0,480	0,865
12:00:00	0,005	0,010	0,010	0,015	0,100	0,250	0,165	0,316
12:04:00	0,010	0,020	0,020	0,030	0,335	0,735	0,480	0,940
12:07:00	0,005	0,005	0,005	0,009	0,100	0,220	0,185	0,304
12:09:00	0,010	0,015	0,015	0,023	0,165	0,380	0,255	0,486
12:21:00	0,005	0,010	0,005	0,012	0,140	0,375	0,285	0,491
12:23:00	0,010	0,015	0,015	0,023	0,180	0,455	0,295	0,571
12:24:00	0,005	0,010	0,010	0,015	0,210	0,600	0,415	0,759
Max:	0,015	0,025	0,035	0,046	0,390	0,945	0,615	1,193
Medel:	0,007	0,012	0,011	0,019	0,189	0,458	0,309	0,586

I tabell 26 presenteras använda mätdata från mätplats B, för mätpunkt 3 (husvägg) och 4 (inomhus).

Tabell 26. Uppmätt vibrationsnivå i V-, L- och T-led samt beräknad summa [mm/s], för respektive tidpunkt, vid mätpunkt 3 (husvägg) och mätpunkt 4 (inomhus), vid mätplats B. Max- och medelvärden presenteras längst ned i tabell.

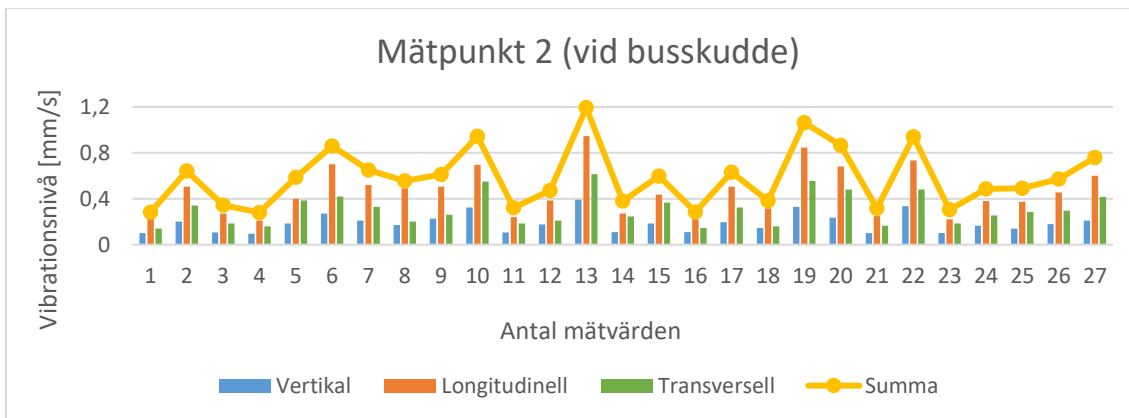
Mätplats B Mätpunkt	Husvägg [mm/s]				Inomhus [mm/s]			
	TID	V	L	T	Summa	V	L	T
10:39:00	0,015	0,050	0,035	0,063	0,010	0,005	0,010	0,015
10:40:00	0,020	0,060	0,065	0,091	0,020	0,020	0,015	0,032
10:41:00	0,020	0,045	0,040	0,063	0,015	0,005	0,010	0,019
10:42:00	0,010	0,020	0,025	0,034	0,010	0,005	0,010	0,015
10:44:00	0,025	0,070	0,060	0,096	0,010	0,015	0,010	0,021
10:52:00	0,030	0,075	0,085	0,117	0,015	0,020	0,015	0,029
11:04:00	0,020	0,060	0,060	0,087	0,020	0,035	0,065	0,076
11:05:00	0,020	0,050	0,060	0,081	0,025	0,035	0,020	0,047
11:06:00	0,030	0,085	0,085	0,124	0,025	0,030	0,030	0,049
11:08:00	0,040	0,105	0,100	0,150	0,030	0,035	0,055	0,072
11:17:00	0,020	0,065	0,040	0,079	0,010	0,010	0,010	0,017
11:22:00	0,020	0,050	0,060	0,081	0,020	0,035	0,040	0,057
11:23:00	0,030	0,105	0,085	0,138	0,030	0,035	0,030	0,055
11:25:00	0,015	0,035	0,040	0,055	0,005	0,005	0,005	0,009
11:27:00	0,020	0,055	0,045	0,074	0,010	0,015	0,015	0,023
11:38:00	0,015	0,025	0,040	0,049	0,010	0,015	0,010	0,021
11:41:00	0,015	0,055	0,055	0,079	0,015	0,015	0,010	0,023
11:44:00	0,020	0,050	0,050	0,073	0,020	0,020	0,020	0,035
11:45:00	0,030	0,095	0,075	0,125	0,015	0,020	0,020	0,032
11:51:00	0,025	0,075	0,055	0,096	0,015	0,015	0,015	0,026
12:00:00	0,015	0,030	0,055	0,064	0,015	0,020	0,015	0,029
12:04:00	0,030	0,090	0,080	0,124	0,030	0,035	0,025	0,052
12:07:00	0,015	0,030	0,045	0,056	0,010	0,015	0,010	0,021
12:09:00	0,020	0,045	0,050	0,070	0,020	0,020	0,015	0,032
12:21:00	0,025	0,060	0,055	0,085	0,010	0,005	0,010	0,015
12:23:00	0,015	0,055	0,055	0,079	0,020	0,020	0,025	0,038
12:24:00	0,020	0,070	0,055	0,091	0,025	0,015	0,015	0,033
Max:	0,040	0,105	0,100	0,150	0,030	0,035	0,065	0,076
Medel:	0,021	0,060	0,058	0,086	0,017	0,019	0,020	0,033

I figur 17 presenteras mätdata från mätplats B, för mätpunkt 1 (referenspunkt).



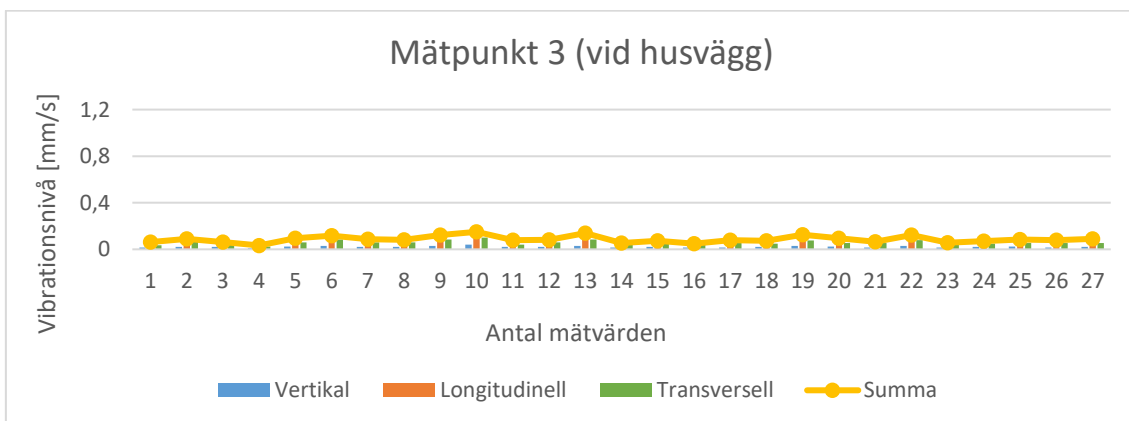
Figur 17. Uppmätt vibrationsnivå i V-, L- och T-led samt beräknad summa [mm/s], för respektive tidpunkt 1–27, vid mätpunkt 1 (referenspunkt) vid mätplats B.

I figur 18 presenteras mätdata från mätplats B, för mätpunkt 2 (busskudde).



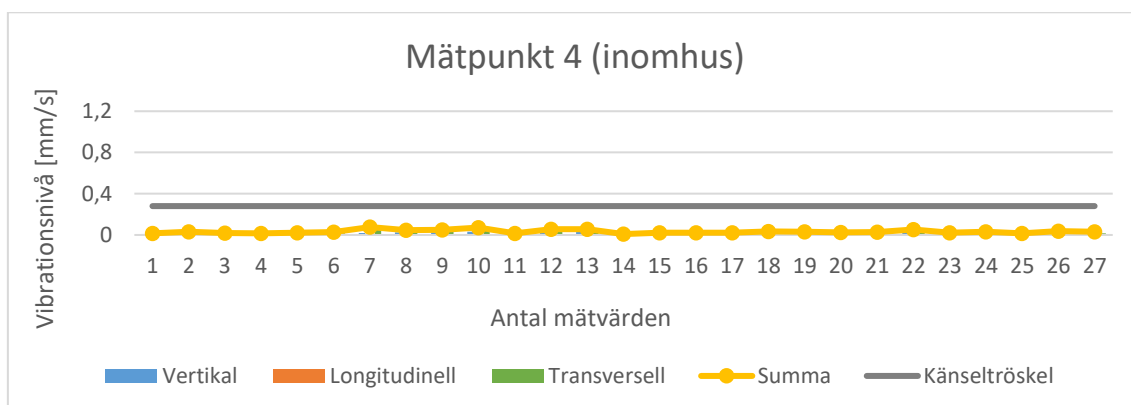
Figur 18. Uppmätt vibrationsnivå i V-, L- och T-led samt beräknad summa [mm/s], för respektive tidpunkt 1–27, vid mätpunkt 2 (busskudde) vid mätplats B.

I figur 19 presenteras mätdata från mätplats B, för mätpunkt 3 (husvägg).



Figur 19. Uppmätt vibrationsnivå i V-, L- och T-led samt beräknad summa [mm/s], för respektive tidpunkt 1–27, vid mätpunkt 3 (husvägg) vid mätplats B.

I figur 20 presenteras mätdata från mätplats B, för mätpunkt 4 (inomhus).



Figur 20. Uppmätt vibrationsnivå i V-, L- och T-led samt beräknad summa [mm/s], för respektive tidpunkt 1–27, vid mätpunkt 4 (inomhus) vid mätplats B.

MÄTPLATS C

I tabell 27 presenteras använd mätdata från mätplats C, för mätpunkt 1 (referenspunkt) och 2 (busskudde).

Tabell 27. Uppmätt vibrationsnivå i V-, L- och T-led samt beräknad summa [mm/s], för respektive tidpunkt, vid mätpunkt 1 (referenspunkt) och mätpunkt 2 (busskudde), vid mätplats C. Max- och medelvärden presenteras längst ned i tabell.

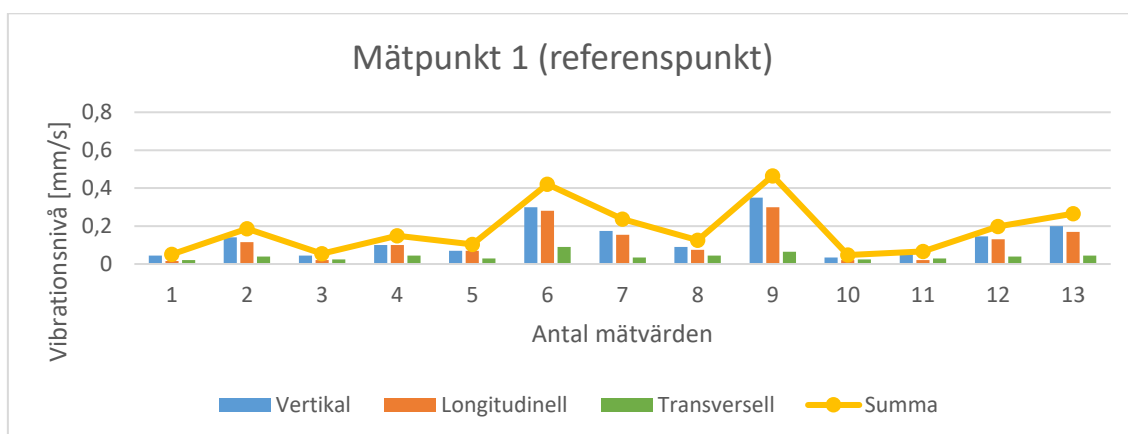
Mätplats C Mätpunkt	Referenspunkt [mm/s]				Vid busskudde [mm/s]			
	V	L	T	Summa	V	L	T	Summa
TID								
13:44:00	0,045	0,015	0,020	0,051	0,290	0,225	0,090	0,378
13:47:00	0,140	0,115	0,040	0,186	0,310	0,245	0,095	0,406
13:50:00	0,045	0,020	0,025	0,055	0,210	0,195	0,025	0,288
13:52:00	0,100	0,100	0,045	0,148	0,385	0,325	0,110	0,516
13:54:00	0,070	0,070	0,030	0,103	0,245	0,195	0,070	0,321
13:56:00	0,300	0,280	0,090	0,420	0,465	0,345	0,110	0,589
14:04:00	0,175	0,155	0,035	0,236	0,305	0,275	0,120	0,428
14:08:00	0,090	0,075	0,045	0,125	0,340	0,305	0,120	0,472
14:11:00	0,350	0,300	0,065	0,466	0,480	0,400	0,135	0,639
14:13:00	0,035	0,020	0,025	0,047	0,200	0,220	0,110	0,317
14:23:00	0,055	0,020	0,030	0,066	0,255	0,205	0,090	0,339
14:27:00	0,145	0,130	0,040	0,199	0,290	0,240	0,100	0,389
14:35:00	0,200	0,170	0,045	0,266	0,300	0,275	0,115	0,423
Max:	0,350	0,300	0,090	0,466	0,480	0,400	0,135	0,639
Medel:	0,135	0,113	0,041	0,182	0,313	0,265	0,099	0,424

I tabell 28 presenteras använda mätdata från mätplats C, för mätpunkt 3 (husvägg) och 4 (inomhus).

Tabell 28. Uppmätt vibrationsnivå i V-, L- och T-led samt beräknad summa [mm/s], för respektive tidpunkt, vid mätpunkt 3 (husvägg) och mätpunkt 4 (inomhus), vid mätplats C. Max- och medelvärden presenteras längst ned i tabell.

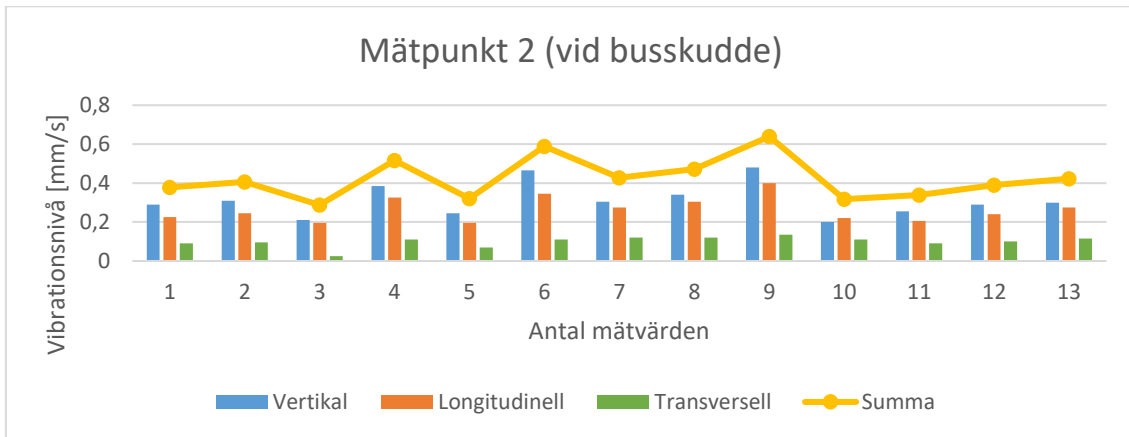
Mätplats C Mätpunkt	Vid husvägg [mm/s]				Inomhus [mm/s]			
	TID	V	L	T	Summa	V	L	T
13:44:00	0,090	0,020	0,030	0,097	0,070	0,040	0,110	0,136
13:47:00	0,115	0,040	0,035	0,127	0,075	0,130	0,140	0,205
13:50:00	0,095	0,035	0,030	0,106	0,080	0,075	0,155	0,190
13:52:00	0,165	0,085	0,075	0,200	0,165	0,240	0,180	0,342
13:54:00	0,105	0,030	0,035	0,115	0,075	0,070	0,145	0,178
13:56:00	0,250	0,070	0,090	0,275	0,195	0,115	0,360	0,425
14:04:00	0,105	0,035	0,045	0,119	0,075	0,065	0,130	0,164
14:08:00	0,185	0,045	0,070	0,203	0,130	0,095	0,240	0,289
14:11:00	0,240	0,070	0,085	0,264	0,195	0,185	0,310	0,410
14:13:00	0,080	0,020	0,035	0,090	0,060	0,040	0,085	0,111
14:23:00	0,100	0,020	0,030	0,106	0,065	0,045	0,130	0,152
14:27:00	0,100	0,030	0,035	0,110	0,070	0,075	0,135	0,170
14:35:00	0,100	0,025	0,035	0,109	0,080	0,050	0,125	0,157
Max:	0,250	0,085	0,090	0,275	0,195	0,240	0,360	0,425
Medel:	0,133	0,040	0,048	0,148	0,103	0,094	0,173	0,225

I figur 21 presenteras mätdata från mätplats C, för mätpunkt 1 (referenspunkt).



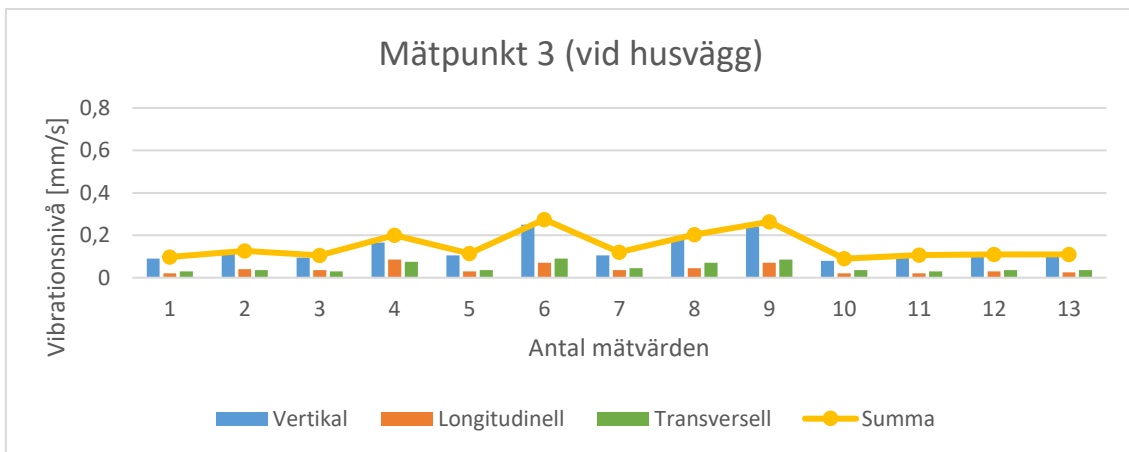
Figur 21. Uppmätt vibrationsnivå i V-, L- och T-led samt beräknad summa [mm/s], för respektive tidpunkt 1–13, vid mätpunkt 1 (referenspunkt) vid mätplats C.

I figur 22 presenteras mätdata från mätplats C, för mätpunkt 2 (busskudde).



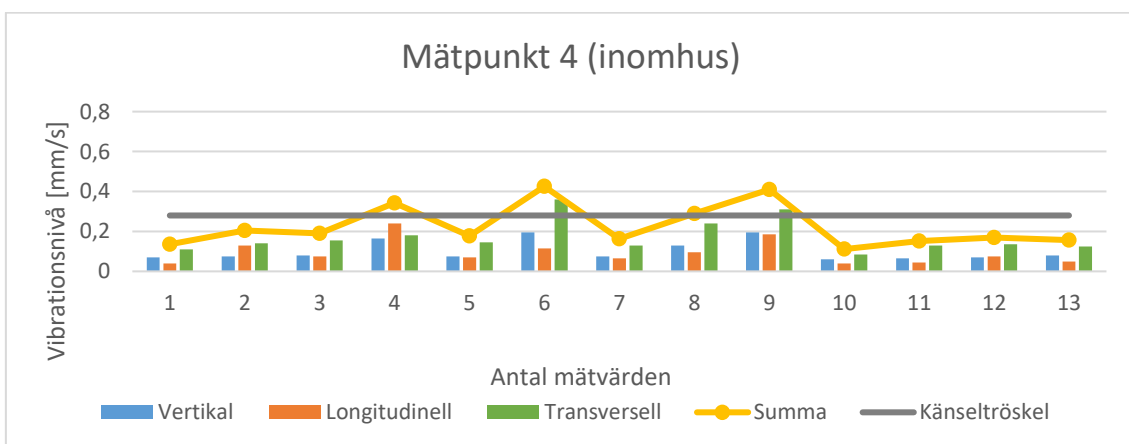
Figur 22. Uppmätt vibrationsnivå i V-, L- och T-led samt beräknad summa [mm/s], för respektive tidpunkt 1–13, vid mätpunkt 2 (busskudde) vid mätplats C.

I figur 23 presenteras mätdata från mätplats C, för mätpunkt 3 (husvägg).



Figur 23. Uppmätt vibrationsnivå i V-, L- och T-led samt beräknad summa [mm/s], för respektive tidpunkt 1–13, vid mätpunkt 3 (husvägg) vid mätplats C.

I figur 24 presenteras mätdata från mätplats C, för mätpunkt 4 (inomhus).



Figur 24. Uppmätt vibrationsnivå i V-, L- och T-led samt beräknad summa [mm/s], för respektive tidpunkt 1–13, vid mätpunkt 4 (inomhus) vid mätplats C.

MÄTPLATS D

I tabell 29 presenteras använd mätdata från mätplats D, för mätpunkt 2a (busskudde) och 2b (15 meter).

Tabell 29. Uppmätt vibrationsnivå i V-, L- och T-led samt beräknad summa [mm/s], för respektive tidpunkt, vid mätpunkt 2a (busskudde) och mätpunkt 2b (15 meter), vid mätplats D. Max- och medelvärden presenteras längst ned i tabell.

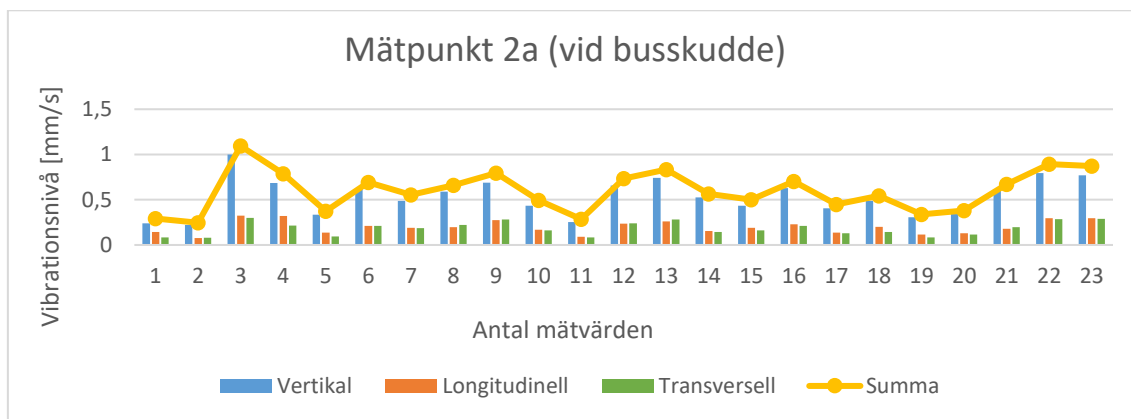
Mätplats D Mätpunkt TID	Vid busskudde [mm/s]				15 meter från busskudde [mm/s]			
	V	L	T	Summa	V	L	T	Summa
17:19:00	0,240	0,145	0,085	0,293	0,090	0,060	0,035	0,114
17:22:00	0,220	0,075	0,080	0,246	0,115	0,050	0,050	0,135
17:23:00	1,000	0,325	0,300	1,093	0,370	0,295	0,075	0,479
17:24:00	0,685	0,320	0,215	0,786	0,240	0,205	0,070	0,323
17:27:00	0,335	0,135	0,095	0,373	0,120	0,080	0,025	0,146
17:28:00	0,625	0,210	0,210	0,692	0,235	0,195	0,055	0,310
17:29:00	0,485	0,190	0,185	0,553	0,225	0,190	0,055	0,300
17:33:00	0,590	0,195	0,220	0,659	0,195	0,165	0,060	0,262
17:34:00	0,690	0,275	0,280	0,794	0,240	0,190	0,060	0,312
17:40:00	0,435	0,170	0,160	0,494	0,165	0,145	0,050	0,225
17:45:00	0,255	0,090	0,085	0,283	0,100	0,075	0,025	0,127
17:46:00	0,655	0,235	0,240	0,736	0,240	0,185	0,060	0,309
17:48:00	0,740	0,260	0,280	0,833	0,270	0,220	0,060	0,353
17:50:00	0,525	0,155	0,145	0,566	0,175	0,145	0,050	0,233
17:53:00	0,435	0,190	0,160	0,501	0,160	0,130	0,045	0,211
17:56:00	0,630	0,230	0,210	0,703	0,215	0,170	0,055	0,280
18:00:00	0,405	0,135	0,130	0,446	0,150	0,120	0,035	0,195
18:05:00	0,485	0,200	0,145	0,544	0,155	0,130	0,040	0,206
18:06:00	0,305	0,115	0,085	0,337	0,100	0,080	0,020	0,130
18:08:00	0,340	0,130	0,115	0,382	0,140	0,110	0,060	0,188
18:13:00	0,615	0,180	0,195	0,670	0,240	0,185	0,070	0,311
18:14:00	0,795	0,295	0,285	0,895	0,235	0,195	0,060	0,311
18:16:00	0,770	0,295	0,290	0,874	0,285	0,240	0,070	0,379
Max:	1,000	0,325	0,300	1,093	0,370	0,295	0,075	0,479
Medel:	0,533	0,198	0,182	0,598	0,194	0,155	0,052	0,254

I tabell 30 presenteras använd mätdata från mätplats D, för mätpunkt 2c (30 meter).

Tabell 30. Uppmätt vibrationsnivå i V-, L- och T-led samt beräknad summa [mm/s], för respektive tidpunkt, vid mätpunkt 2c (30 meter), vid mätplats D. Max- och medelvärden presenteras längst ned i tabell.

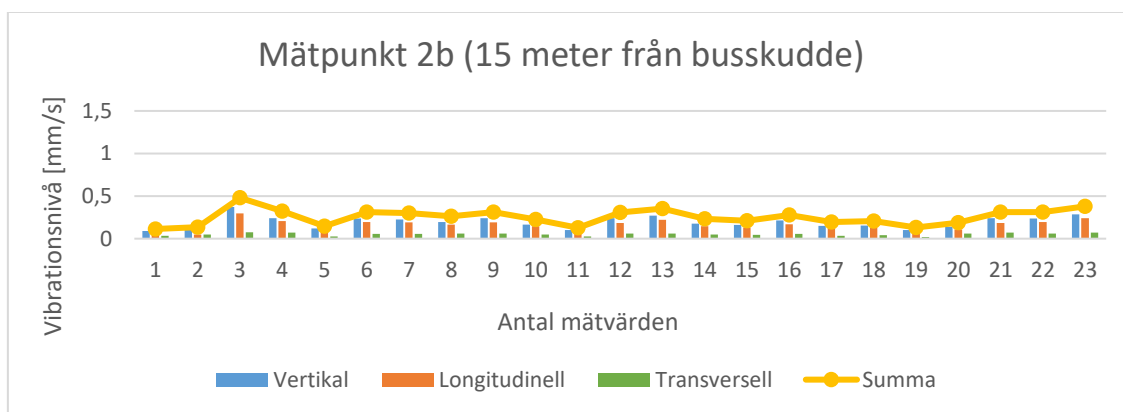
Mätplats D Mätpunkt	30 meter från busskudde [mm/s]			
	V	L	T	Summa
17:19:00	0,070	0,030	0,040	0,086
17:22:00	0,110	0,040	0,055	0,129
17:23:00	0,230	0,135	0,090	0,281
17:24:00	0,190	0,095	0,070	0,224
17:27:00	0,070	0,040	0,035	0,088
17:28:00	0,175	0,085	0,065	0,205
17:29:00	0,175	0,080	0,065	0,203
17:33:00	0,150	0,070	0,055	0,174
17:34:00	0,180	0,090	0,075	0,215
17:40:00	0,130	0,060	0,055	0,153
17:45:00	0,070	0,040	0,030	0,086
17:46:00	0,175	0,090	0,070	0,209
17:48:00	0,200	0,105	0,080	0,240
17:50:00	0,140	0,060	0,055	0,162
17:53:00	0,120	0,055	0,050	0,141
17:56:00	0,160	0,090	0,075	0,198
18:00:00	0,100	0,060	0,050	0,127
18:05:00	0,105	0,055	0,050	0,129
18:06:00	0,075	0,035	0,035	0,090
18:08:00	0,110	0,040	0,045	0,125
18:13:00	0,165	0,080	0,055	0,191
18:14:00	0,180	0,095	0,080	0,219
18:16:00	0,210	0,115	0,085	0,254
Max:	0,230	0,135	0,090	0,281
Medel:	0,143	0,072	0,059	0,171

I figur 25 presenteras mätdata från mätplats D, för mätpunkt 2a (busskudde).



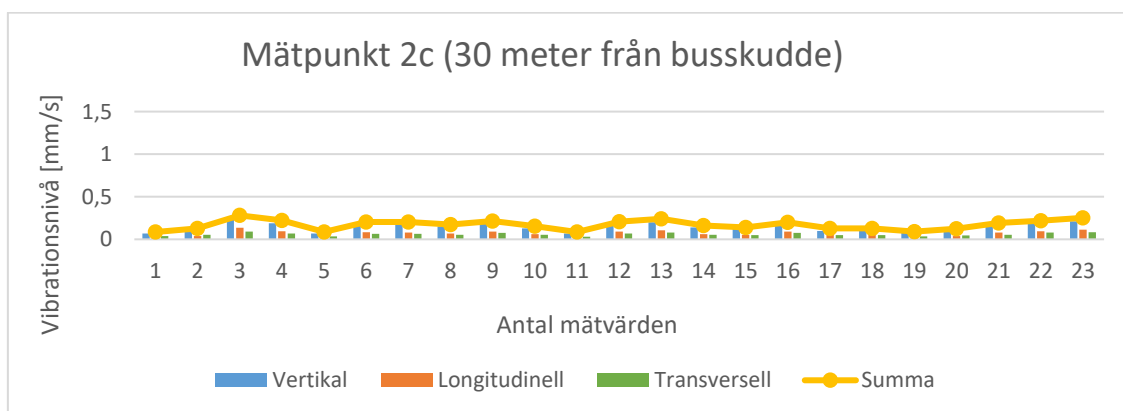
Figur 25. Uppmätt vibrationsnivå i V-, L- och T-led samt beräknad summa [mm/s], för respektive tidpunkt 1–23, vid mätpunkt 2a (busskudde) vid mätplats D.

I figur 26 presenteras mätdata från mätplats D, för mätpunkt 2b (15 meter).



Figur 26. Uppmätt vibrationsnivå i V-, L- och T-led samt beräknad summa [mm/s], för respektive tidpunkt 1–23, vid mätpunkt 2b (15 meter) vid mätplats D.

I figur 27 presenteras mätdata från mätplats D, för mätpunkt 2c (30 meter).



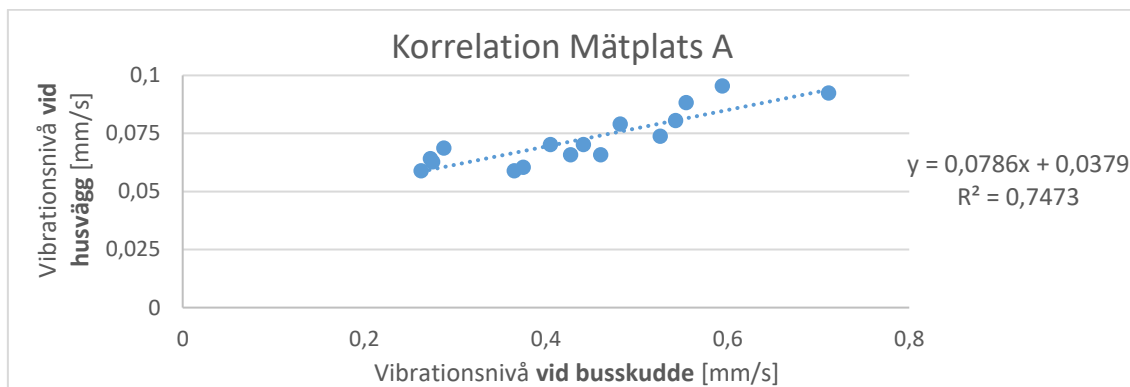
Figur 27. Uppmätt vibrationsnivå i V-, L- och T-led samt beräknad summa [mm/s], för respektive tidpunkt 1–23, vid mätpunkt 2c (30 meter) vid mätplats D.

E. KORRELATION

Följande avsnitt presenterar korrelationsfigurer för mätplats A–D, samt överföringsfunktioner för mätplats B och C.

MÄTPLATS A

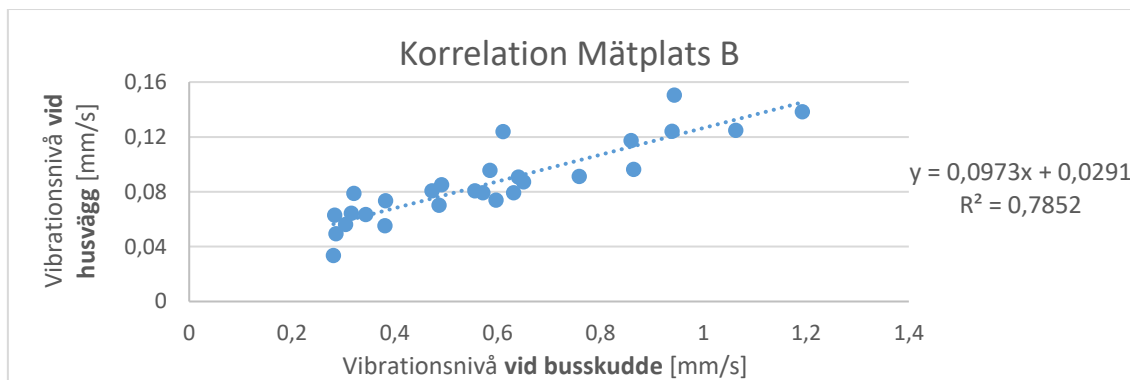
I figur 28 presenteras korrelationen mellan mätdata vid mätpunkt 2 (busskudde) och 3 (husvägg), vid mätplats A. Den linjära anpassningen har ett R^2 -värde $\sim 0,75$.



Figur 28. Korrelation mellan triggad vibrationsnivå vid mätpunkt 2 (busskudde) och mätpunkt 3 (husvägg) [mm/s], vid mätplats A. För den linjära anpassningen visas ekvation och tillhörande R^2 -värde till höger i figuren.

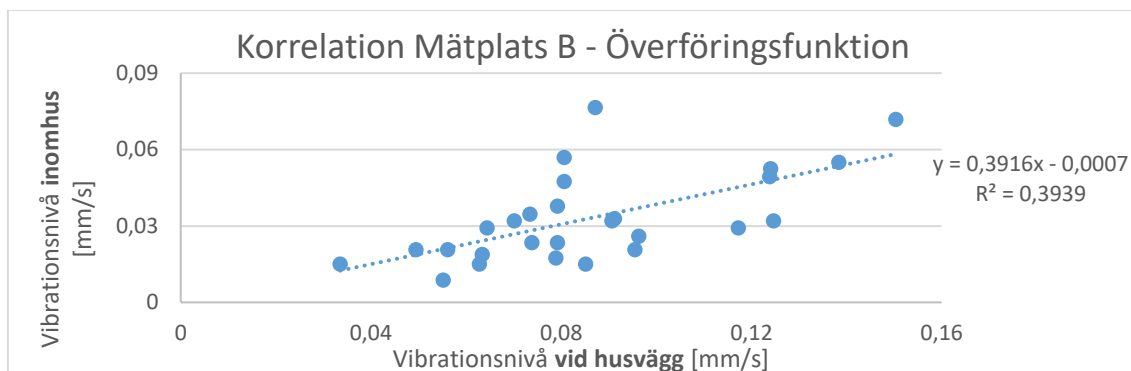
MÄTPLATS B

I figur 29 presenteras korrelationen mellan mätdata vid mätpunkt 2 (busskudde) och 3 (husvägg), vid mätplats D. Den linjära anpassningen har ett R^2 -värde $\sim 0,79$.



Figur 29. Korrelation mellan triggad vibrationsnivå vid mätpunkt 2 (busskudde) och mätpunkt 3 (husvägg) [mm/s], vid mätplats B. För den linjära anpassningen visas ekvation och tillhörande R^2 -värde till höger i figuren.

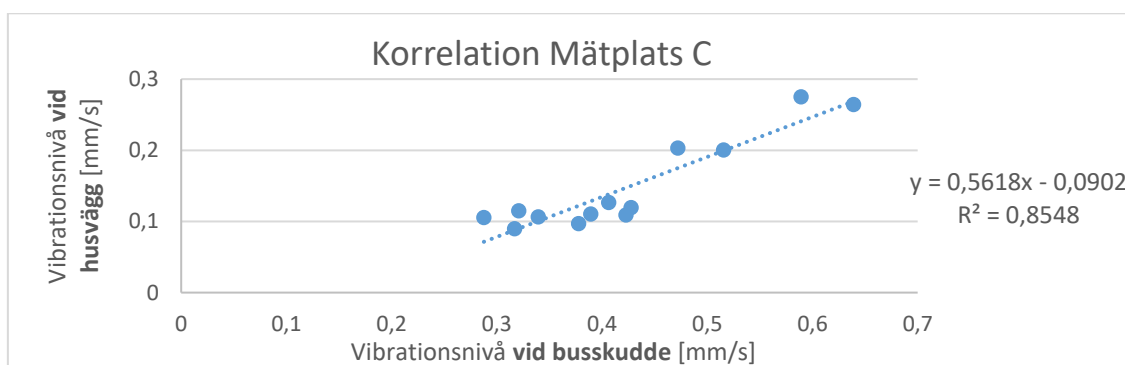
I figur 30 presenteras korrelationen mellan mätdata vid mätpunkt 3 (husvägg) och 4 (inomhus), vid mätplats B. Den linjära anpassningen har ett R^2 -värde $\sim 0,39$.



Figur 30. Korrelation mellan uppmätt, triggad vibrationsnivå vid mätpunkt 3 (husvägg) och mätpunkt 4 (inomhus) [mm/s], vid mätplats B. För den linjära anpassningen visas ekvation och tillhörande R^2 -värde till höger i figuren.

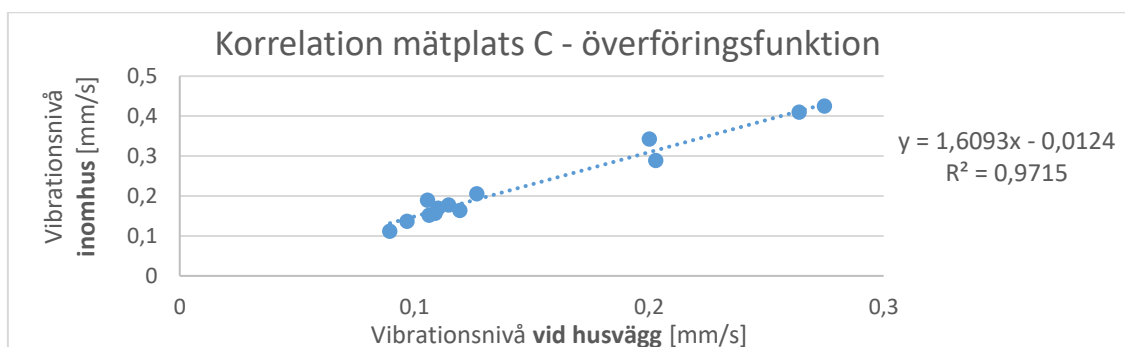
MÄTPLATS C

I figur 31 presenteras korrelationen mellan mätdata vid mätpunkt 2 (busskudde) och 3 (husvägg), vid mätplats C. Den linjära anpassningen har ett R^2 -värde $\sim 0,85$.



Figur 31. Korrelation mellan uppmätt, triggad vibrationsnivå vid mätpunkt 2 (busskudde) och mätpunkt 3 (husvägg) [mm/s], vid mätplats C. För den linjära anpassningen visas ekvation och tillhörande R^2 -värde till höger i figuren.

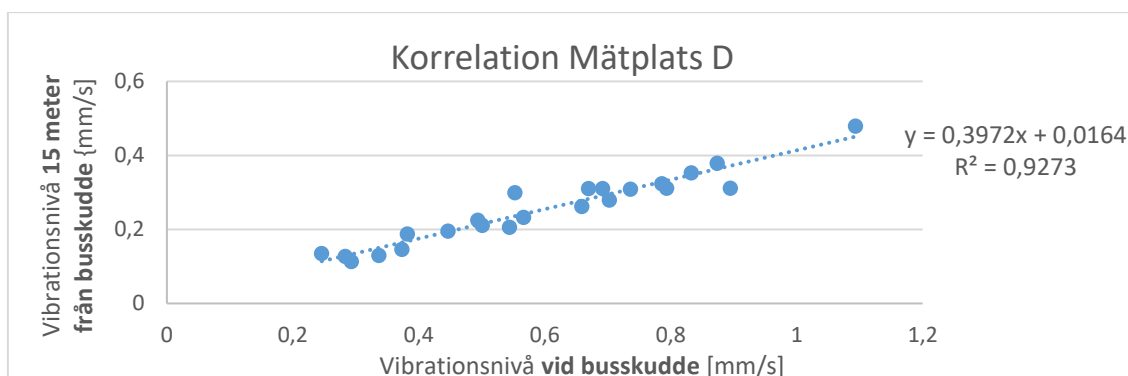
I figur 32 presenteras korrelationen mellan mätdata vid mätpunkt 3 (husvägg) och 4 (inomhus), vid mätplats C. Den linjära anpassningen har ett R^2 -värde $\sim 0,97$.



Figur 32. Korrelation mellan uppmätt, triggad vibrationsnivå vid mätpunkt 3 (husvägg) och mätpunkt 4 (inomhus) [mm/s], vid mätplats C. För den linjära anpassningen visas ekvation och tillhörande R^2 -värde till höger i figuren.

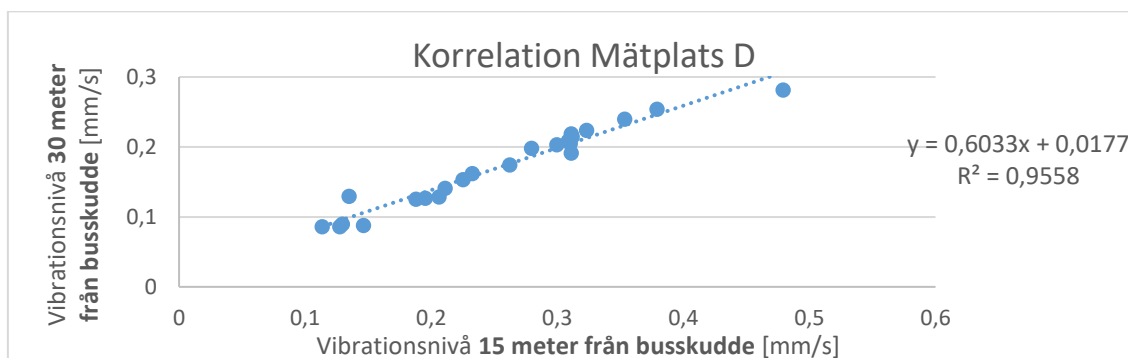
MÄTPLATS D

I figur 33 presenteras korrelationen mellan mätdata vid mätpunkt 2a (busskudde) och 2b (15 meter), vid mätplats D. Den linjära anpassningen har ett R^2 -värde $\sim 0,93$.



Figur 33. Korrelation mellan uppmätt, triggad vibrationsnivå vid mätpunkt 2a (busskudde) och mätpunkt 2b (15 meter) [mm/s], vid mätplats D. För den linjära anpassningen visas ekvation och tillhörande R^2 -värde till höger i figuren.

I figur 34 presenteras korrelationen mellan mätdata vid mätpunkt 2b (15 meter) och 2c (30 meter), mätplats D. Den linjära anpassningen har ett R^2 -värde $\sim 0,96$.



Figur 34. Korrelation mellan uppmätt, triggad vibrationsnivå vid mätpunkt 2b (15 meter) och mätpunkt 2c (30 meter) [mm/s], vid mätplats D. För den linjära anpassningen visas ekvation och tillhörande R^2 -värde till höger i figuren.

F. BERÄKNING AV DIFFERENSER

Ekvation 20–22, vid mätplats A–C, samt ekvation 23 och 24, vid Mätplats D, användes för att beräkna differensen (D) i vibrationsnivån mellan två mätpunkter. Beräkningen baserades på medelvärden i V-, L- och T-led (M_{V_medel} , M_{L_medel} och M_{T_medel}) samt medel för summa (M_{summa_medel}), presenterade i appendix D. Index 1–4 respektive 2a–2c representerar mätpunkt 1–4 respektive mätpunkt 2a–2c.

$$D_{summa_12_i} = M_{summa_medel1_i} - M_{summa_medel2_i} \quad (20)$$

$$D_{summa_32_i} = M_{summa_medel3_i} - M_{summa_medel2_i} \quad (21)$$

$$D_{summa_42_i} = M_{summa_medel4_i} - M_{summa_medel3_i} \quad (22)$$

Ovanstående ekvation 20–22 användes på samma sätt som för D_{summa_i} att beräkna D_{V_i} , D_{L_i} , och D_{T_i} , för mätplats A–C (i), med hjälp av $M_{V_medel_i}$, $M_{L_medel_i}$ och $M_{T_medel_i}$ vid respektive mätpunkt.

$$D_{\text{summa_abD}} = M_{\text{summa_medel2b}} - M_{\text{summa_medel2a}} \quad (23)$$

$$D_{\text{summa_bcD}} = M_{\text{summa_medel2c}} - M_{\text{summa_medel2b}} \quad (24)$$

Ovanstående ekvation 23 och 24 användes på samma sätt som för D_{summaD} att beräkna D_{VD} , D_{LD} , och D_{TD} , för mätplats D, med hjälp av M_{V_medel} , M_{L_medel} och M_{T_medel} vid respektive mätpunkt.

G. BERÄKNING AV KVOTER

Ekvation 25–27, vid mätplats A–C, samt ekvation 28 och 29, vid mätplats D, användes för att beräkna kvoten (F) mellan vibrationsnivån i två mätpunkter. Beräkningen baserades på medelvärden i V-, L- och T-led (M_{V_medel} , M_{L_medel} och M_{T_medel}) samt medel för summa ($M_{\text{summa_medel}}$), presenterade i appendix D. Index 1–4 respektive 2a–2c representerar mätpunkt 1–4 respektive mätpunkt 2a–2c.

$$F_{\text{summa_12i}} = \frac{M_{\text{summa_medel2i}}}{M_{\text{summa_medel1i}}} \quad (25)$$

$$F_{\text{summa_32i}} = \frac{M_{\text{summa_medel2i}}}{M_{\text{summa_medel3i}}} \quad (26)$$

$$F_{\text{summa_42i}} = \frac{M_{\text{summa_medel3i}}}{M_{\text{summa_medel4i}}} \quad (27)$$

Ovanstående ekvation 25–27 användes på samma sätt som för F_{summa_i} att beräkna F_{Vi} , F_{Li} , och F_{Ti} , för mätplats A–C (i), med hjälp av $M_{V_medel_i}$, $M_{L_medel_i}$ och $M_{T_medel_i}$ vid respektive mätpunkt.

$$F_{\text{summa_abD}} = \frac{M_{\text{summa_medel2a}}}{M_{\text{summa_medel2b}}} \quad (28)$$

$$F_{\text{summa_bcD}} = \frac{M_{\text{summa_medel2b}}}{M_{\text{summa_medel2c}}} \quad (29)$$

Ovanstående Ekvation 28 och 29 användes på samma sätt som för F_{summaD} att beräkna F_{VD} , F_{LD} , och F_{TD} , för mätplats D, med hjälp av M_{V_medel} , M_{L_medel} och M_{T_medel} vid respektive mätpunkt.

H. ITERATIV ANPASSNING

Differensen Δd , mellan den beräknade vibrationsnivån M_{e3_i} respektive M_{e2bD} samt M_{e2cD} och den faktiskt uppmätta vibrationsnivån M_{summa3_i} respektive M_{summa2bD} samt M_{summa2cD} , minimerades genom anpassning av n och α (ekvation 30–32).

$$\text{A-C} \quad \Delta d = M_{e3_i} - M_{\text{summa3}_i} \quad (30)$$

$$\text{D.2b} \quad \Delta d = M_{e2bD} - M_{\text{summa2bD}} \quad (31)$$

$$\text{D.2c} \quad \Delta d = M_{e2cD} - M_{\text{summa2cD}} \quad (32)$$

I. LAMB'S EKVATION

I ekvation 33–37 presenteras fullständiga ekvationer med anpassade konstanter n och koefficienter α i Lamb's ekvation. Konstanten (n) har störst värde vid mätplats C, vilken även har längst avstånd från busskudden till mätpunkt 2. Koefficienten (α) är cirka en faktor 10 mindre för mätplats C, än för mätplats A och B. Konstanten (n) och koefficienten (α) skiljer sig nog åt mellan fallen D.2b respektive D.2c.

$$\mathbf{A:} \quad M_{e3A} = M_{\text{summa}2A} * \left(\frac{0,1}{25}\right)^{0,15} * e^{(0,039(25-0,1))} \quad (33)$$

$$\mathbf{B:} \quad M_{e3B} = M_{\text{summa}2B} * \left(\frac{1}{15}\right)^{0,45} * e^{(-0,05(15-1))} \quad (34)$$

$$\mathbf{C:} \quad M_{e3C} = M_{\text{summa}2C} * \left(\frac{5}{25}\right)^{0,6} * e^{(-0,0044(25-5))} \quad (35)$$

$$\mathbf{D.2b:} \quad M_{e2bD} = M_{\text{summa}2aD} * \left(\frac{0,1}{15}\right)^{0,15} * e^{(-0,007(15-0,1))} \quad (36)$$

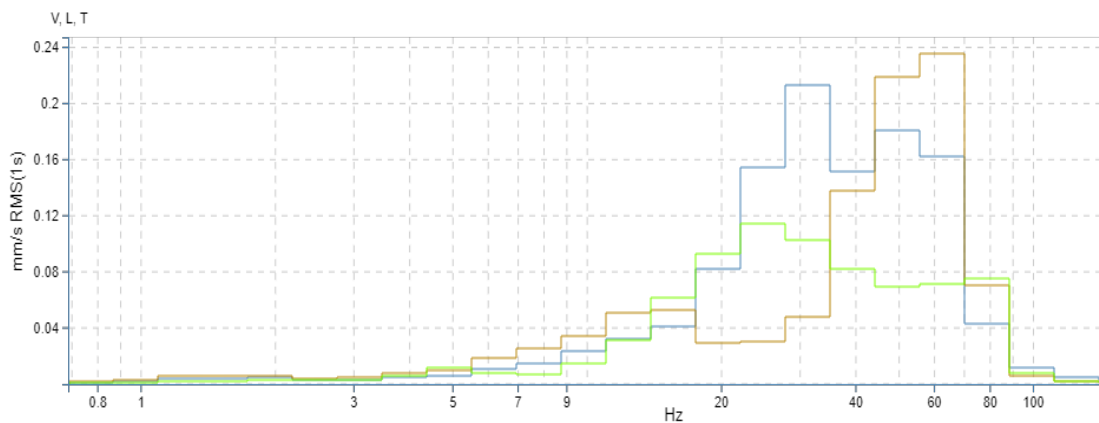
$$\mathbf{D.2c:} \quad M_{e2cD} = M_{\text{summa}2aD} * \left(\frac{0,1}{30}\right)^{0,2} * e^{(-0,0037(30-0,1))} \quad (37)$$

J. FREKVENSSPEKTRUM

I följande avsnitt presenteras de frekvensspektrum som användes för frekvensspektrumanalys.

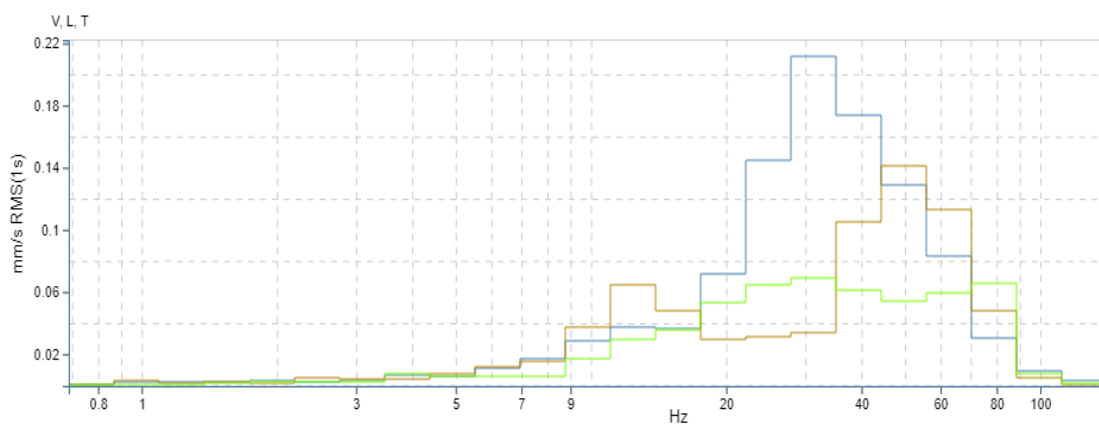
MÄTPLATS A

I figur 35 presenteras ett frekvensspektrum för mätpunkt 2 (busskudde) vid mätplats A.



Figur 35. Frekvensspektrum, tersband med oktavytp RMS 1s, för trigging vid mätplats A, mätpunkt 2 (busskudde), för tidpunkt 11.34.01. X-axel visar frekvens [Hz] och y-axel visar uppmätt vibrationsnivå [mm/s], där V-led presenteras i blått, L-led presenteras i rött och T-led presenteras i grönt.

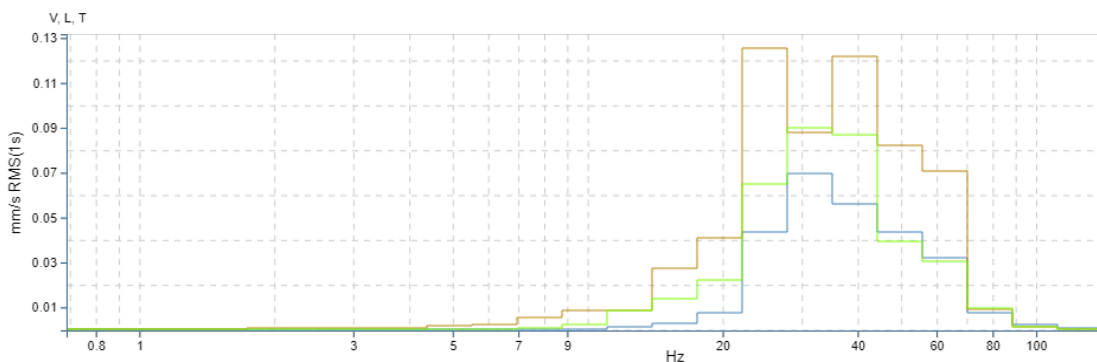
I figur 36 presenteras ett frekvensspektrum för mätpunkt 2 (busskudde) vid mätplats A.



Figur 36. Frekvensspektrum, tersband med oktavytp RMS 1s, för trigging vid mätplats A, mätpunkt 2 (busskudde), för tidpunkt 11.42.23. X-axel visar frekvens [Hz] och y-axel visar uppmätt vibrationsnivå [mm/s], där V-led presenteras i blått, L-led presenteras i rött och T-led presenteras i grönt.

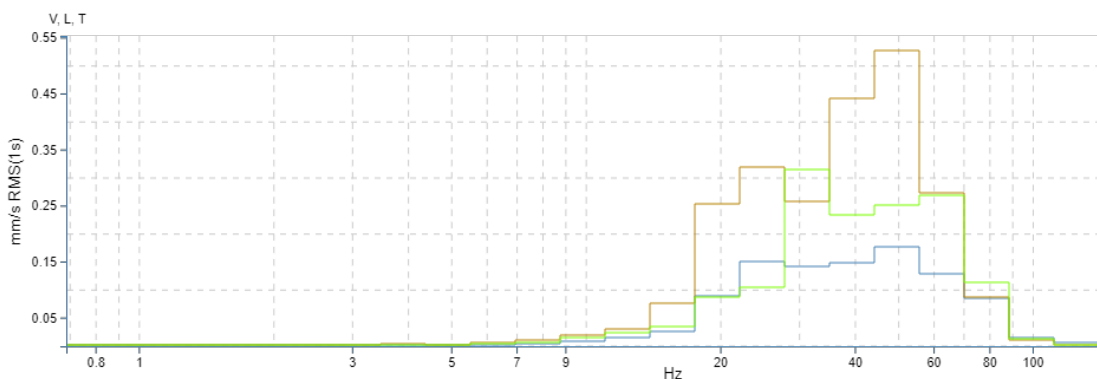
MÄTPLATS B

I figur 37 presenteras ett frekvensspektrum för mätpunkt 2 (busskudde) vid mätplats B.



Figur 37. Frekvensspektrum, tersband med oktavytyp RMS 1s, för trigging vid mätplats B, mätpunkt 2 (busskudde), för tidpunkt 11.37.41. X-axel visar frekvens [Hz] och y-axel visar uppmätt vibrationsnivå [mm/s], där V-led presenteras i blått, L-led presenteras i rött och T-led presenteras i grönt.

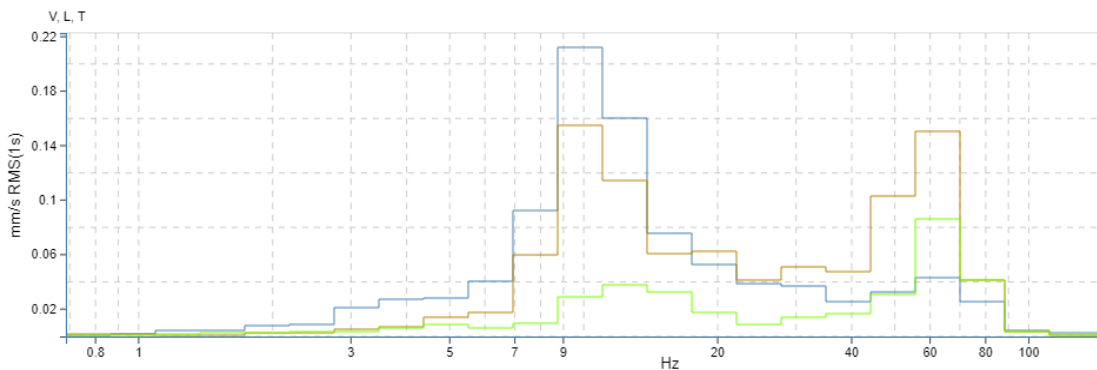
I figur 38 presenteras ett frekvensspektrum för mätpunkt 2 (busskudde) vid mätplats B.



Figur 38. Frekvensspektrum, tersband med oktavytyp RMS 1s, för trigging vid mätplats B, mätpunkt 2 (busskudde), för tidpunkt 11.44.26. X-axel visar frekvens [Hz] och y-axel visar uppmätt vibrationsnivå [mm/s], där V-led presenteras i blått, L-led presenteras i rött och T-led presenteras i grönt.

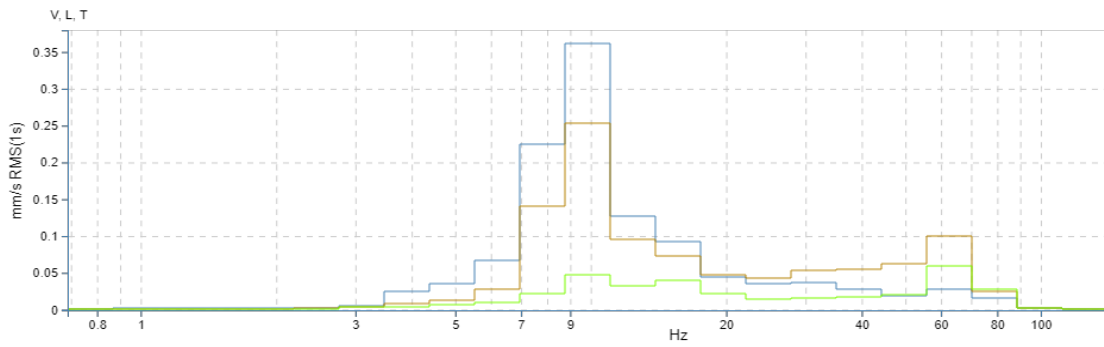
MÄTPLATS C

I figur 39 presenteras ett frekvensspektrum för mätpunkt 2 (busskudde) vid mätplats C.



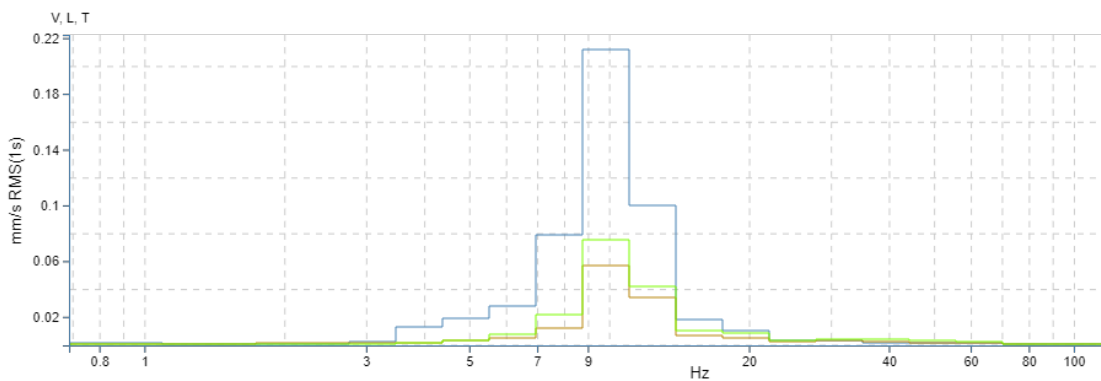
Figur 39. Frekvensspektrum, tersband med oktavytyp RMS 1s, för trigging vid mätplats C, mätpunkt 2 (busskudde), för tidpunkt 14.03.08. X-axel visar frekvens [Hz] och y-axel visar uppmätt vibrationsnivå [mm/s], där V-led presenteras i blått, L-led presenteras i rött och T-led presenteras i grönt.

I figur 40 presenteras ett frekvensspektrum för mätpunkt 2 (busskudde) vid mätplats C.



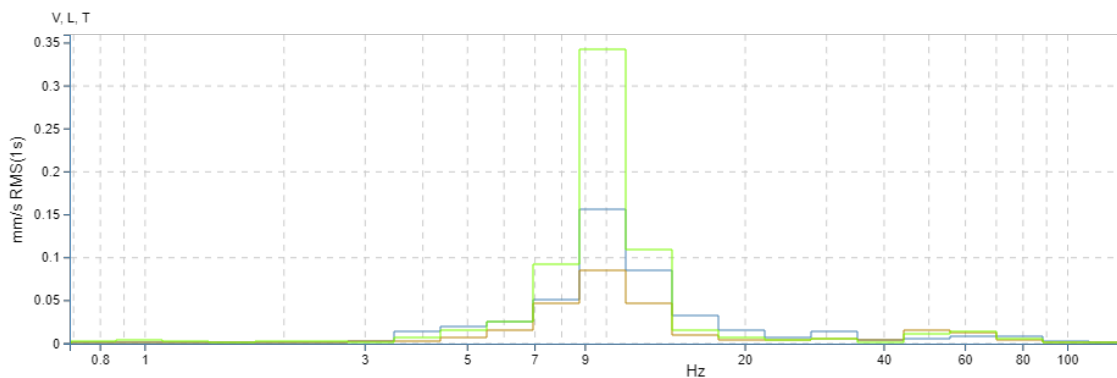
Figur 40. Frekvensspektrum, tersband med oktavtyp RMS 1s, för trigging vid mätplats C, mätpunkt 2 (busskudde), för tidpunkt 13.55.50. X-axel visar frekvens [Hz] och y-axel visar uppmätt vibrationsnivå [mm/s], där V-led presenteras i blått, L-led presenteras i rött och T-led presenteras i grönt.

I figur 41 presenteras ett frekvensspektrum för mätpunkt 3 (husvägg) vid mätplats C.



Figur 41. Frekvensspektrum, tersband med oktavtyp RMS 1s, för trigging vid mätplats C, mätpunkt 3 (husvägg), för tidpunkt 13.55.50. X-axel visar frekvens [Hz] och y-axel visar uppmätt vibrationsnivå [mm/s], där V-led presenteras i blått, L-led presenteras i rött och T-led presenteras i grönt.

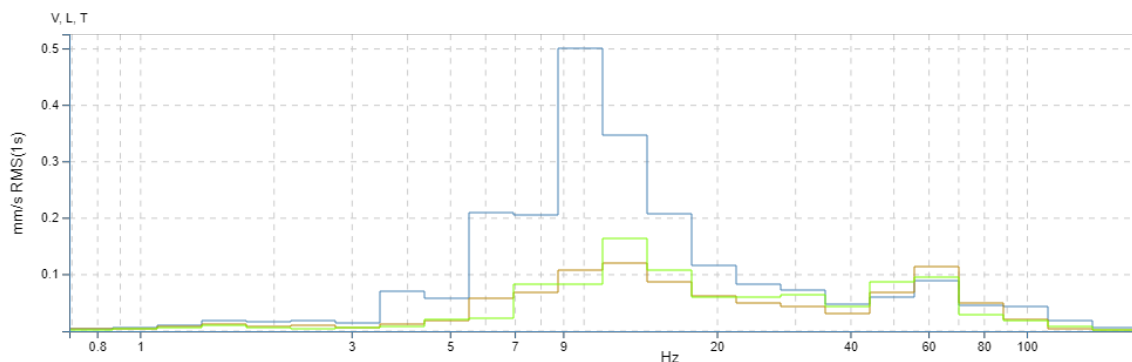
I figur 42 presenteras ett frekvensspektrum för mätpunkt 4 (inomhus) vid mätplats C.



Figur 42. Frekvensspektrum, tersband med oktavtyp RMS 1s, för trigging vid mätplats C, mätpunkt 4 (inomhus), för tidpunkt 13.55.50. X-axel visar frekvens [Hz] och y-axel visar uppmätt vibrationsnivå [mm/s], där V-led presenteras i blått, L-led presenteras i rött och T-led presenteras i grönt.

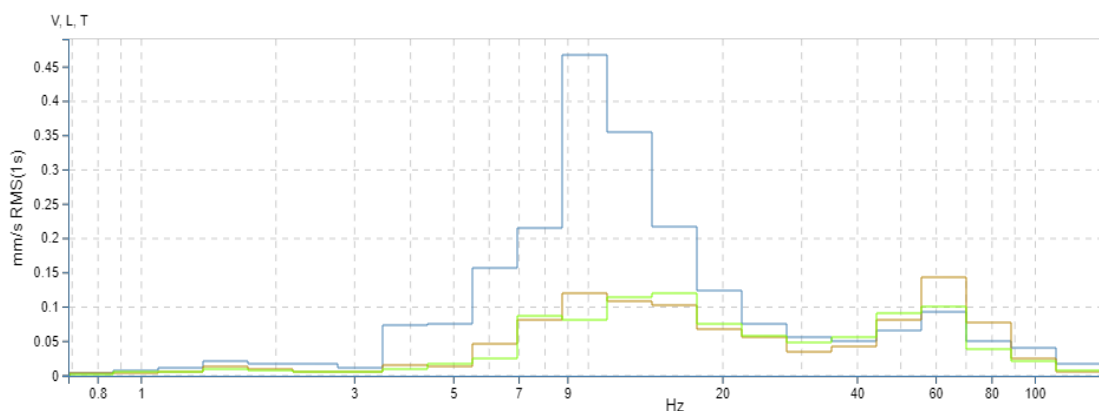
MÄTPLATS D

I figur 43 presenteras ett frekvensspektrum för mätpunkt 2a (busskudde) vid mätplats D.



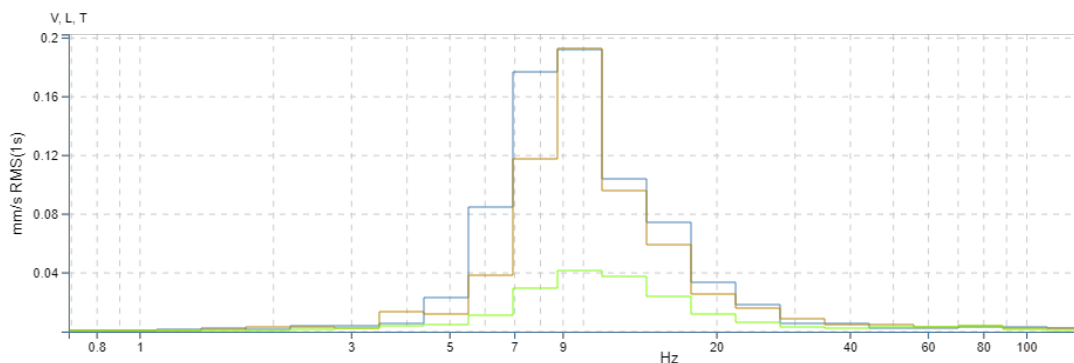
Figur 43. Frekvensspektrum, tersband med oktavtyp RMS 1s, för trigging vid mätplats D, mätpunkt 2a (busskudde), för tidpunkt 17.47.45. X-axel visar frekvens [Hz] och y-axel visar uppmätt vibrationsnivå [mm/s], där V-led presenteras i blått, L-led presenteras i rött och T-led presenteras i grönt.

I figur 44 presenteras ett frekvensspektrum för mätpunkt 2a (busskudde) vid mätplats D.



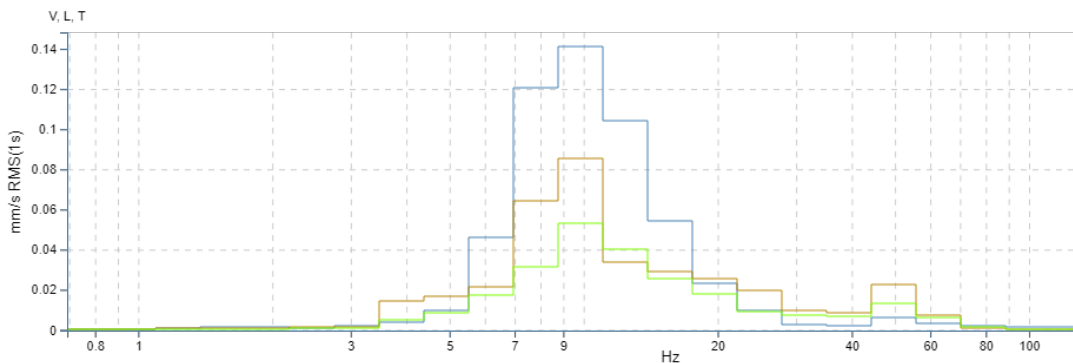
Figur 44. Frekvensspektrum, tersband med oktavtyp RMS 1s, för trigging vid mätplats D, mätpunkt 2a (busskudde), för tidpunkt 18.15.15. X-axel visar frekvens [Hz] och y-axel visar uppmätt vibrationsnivå [mm/s], där V-led presenteras i blått, L-led presenteras i rött och T-led presenteras i grönt.

I figur 45 presenteras ett frekvensspektrum för mätpunkt 2b (15 meter) vid mätplats D.



Figur 45. Frekvensspektrum, tersband med oktavtyp RMS 1s, för trigging vid mätplats D, mätpunkt 2b (15 meter), för tidpunkt 18.15.15. X-axel visar frekvens [Hz] och y-axel visar uppmätt vibrationsnivå [mm/s], där V-led presenteras i blått, L-led presenteras i rött och T-led presenteras i grönt.

I figur 46 presenteras ett frekvensspektrum för mätpunkt 2c (30 meter) vid mätplats D.



Figur 46. Frekvensspektrum, tersband med oktavtyp RMS 1s, för trigging vid mätplats D, mätpunkt 2c (30 meter), för tidpunkt 18.15.15. X-axel visar frekvens [Hz] och y-axel visar uppmätt vibrationsnivå [mm/s], där V-led presenteras i blått, L-led presenteras i rött och T-led presenteras i grönt.

K. BERÄKNING SKYDDSVIBRATIONSNIVÅ

Ekvation 38 presenterar beräkningen av skyddsvibrationsnivån vid mätplats C.

$$\begin{aligned}
 M_{F2C} &= \frac{\left(\frac{0,28 + 0,0124}{1,6093}\right)}{\left(\frac{5}{25}\right)^{0,6} * e^{(-0,0045(25-5))}} \approx \frac{\left(\frac{0,28}{1,6093}\right)}{\left(\frac{5}{25}\right)^{0,6} * e^{(-0,0045(25-5))}} = \\
 &= \frac{0,17}{\left(\frac{5}{25}\right)^{0,6} * e^{(-0,0044(25-5))}} = 0,5 \text{ [mm/s]}
 \end{aligned} \tag{38}$$

L. BERÄKNING SKYDDSAVSTÅND

Ekvation 39 presenterar beräkningen av skyddsavståndet vid mätplats C. Det är en förenklad version av ekvation 4, Lamb's ekvation för vibrationsavtagande, där termen för materialdämpning antas liten i förhållande till termen för geometrisk dämpning. Att detta antagande är rimligt kan bekräftas av appendix M.

$$R_{G3C} = \frac{5}{\left(\frac{0,17}{1}\right)^{1/0,6}} = 96 \text{ [m]} \tag{39}$$

M. MATERIALDÄMPNING

Ekvation 40 visar att det, för att avsevärt underlätta beräkningar, är rimligt att försumma termen för materialdämpning då $0,92 \approx 1$.

$$\begin{aligned}
 M_{F2C} &= \text{geometrisk dämpning} * \text{materialdämpning} = \\
 &= \left(\frac{5}{25}\right)^{0,6} * e^{(-0,0044(25-5))} \approx 0,096 * 0,92
 \end{aligned} \tag{40}$$