

Dato: 2023-03-24

Delstrekning1, Kaigaten – Sandbrogaten. Vurderinger av vibrasjoner fra Bybanen langs Bryggen

Sammendrag og oppsummering

I forbindelse med merknader til Bybanen byggetrinn 5 til Åsane sin reguleringsplan, er det pekt på behov for å redegjøre hvorvidt vibrasjoner fra Bybanen kan påvirke kulturlag og kulturminneverdier tilknyttet verdensarvstedet Bryggen.

Denne rapporten redegjør for fremtidige vibrasjon fra Bybane langs verdensarvstedet Bryggen. Vibrasjonsmålinger viser svært lave verdier for eksisterende bybane i Kaigaten. Verdiene for banen er lavere enn målingene av buss over Bryggen (0,1 mm/s mot 0,2-0,4 mm/s på Bryggen) og hele 30 ganger under konservativt anslått grenseverdi for bygningskader i NS 8141:2001 på 3 mm/s.

Vibrasjoner fra en vibrasjonsdempet baneoverbygning tilsvarende Kaigaten er under nivået som er forventet å kunne gi bygningskader eller gi opphav til irreversible endringer eller degradering i kulturlag over Bryggen. Målingene og vurderingene er i tråd med målinger og vurderinger fra tidligere arbeid.

03J	Justert etter kommentar	2023-03-24	KLIVE /OLNOT	KLIVE	OLNOT	IOV
02J	Klar til levering	2023-03-17	AMIKAY	KLIVE	OLNOT	IOV
01D	Notat til gjennomlesing	2023-03-10	AMIKAY	KLIVE	OLNOT	IOV
Versjon	Beskrivelse	Dato	Utarb. av	Fagkontroll	Tverf.kontr.	Godkj. av

Dette dokumentet er utarbeidet av rådgiver som del av det oppdraget som dokumentet omhandler. Opphavsretten tilhører rådgiver. Dokumentet må bare benyttes til det formål som oppdragsavtalen beskriver, og må ikke kopieres eller gjøres tilgjengelig på annen måte eller i større utstrekning enn formålet tilsier.

INNHold

1	Bakgrunn og premisser	3
1.1	Formål med rapporten	3
1.2	Bybanen byggetrinn 5 (BT5) reguleringsplan	3
1.3	Kulturminner og kulturlag	3
1.4	Merknad til reguleringsplanen	4
1.4.1	Merknad fra Vestland Fylkeskommune.....	4
1.4.2	Utdrag fra Riksantikvarens innspill til VLFK:	4
1.4.3	Utdrag av uttalelsene fra UNESCO Advisory Mission	5
1.5	Presiseringer av problemstillinger på grunnlag av merknader	6
1.6	Tidligere utført arbeid	6
2	Vibrasjonsmålinger.....	8
2.1	Innledning.....	8
2.2	Sammensetting av dataene fra buss over Bryggen	8
2.3	Sammenlikning mellom buss og Bybanen når begge går på plate.....	9
2.4	Oppsummering.....	10
3	Vibrasjon ved en fremtidig bybane langs Bryggen.....	11
3.1	Vibrasjonsdempende sporoverbygning.....	11
3.2	Numerisk simulering av vibrasjonsutbredelse	12
3.3	Vibrasjoner og grunnvannspåvirkning.....	15
3.4	Vibrasjon og påvirkning kulturlag.....	16
3.5	Vibrasjon og påvirkninger av bygninger	16
4	Konklusjon	17
5	Referanser	18

1 Bakgrunn og premisser

1.1 Formål med rapporten

I forbindelse med merknader til reguleringsplan for Bybanen byggetrinn 5 til Åsane, er det pekt på behov for å redegjøre hvorvidt vibrasjoner fra Bybanen kan påvirke kulturlag og kulturminneverdier tilknyttet verdensarvstedet Bryggen. Vestland fylkeskommune har i sin merknad satt krav til at risikoen for grunnvann, arkeologi og bygninger skal redegjøres og håndteres. Kravet er begrunnet i de faglige vurderingene og rådene fra KUVA, UNESCO Advisory Mission og Riksantikvaren, hvor særlig tre problemstillinger knyttet til vibrasjoner ønskes belyst.

- Kan vibrasjoner ødelegge kulturlagene
- Kan vibrasjoner forstyrre grunnvannets bevaring av kulturlagene
- Kan vibrasjoner skade verdensarvstedet Bryggen, som hviler på bolverkskar/trefundamenter i organiske lag

Hensikten med denne rapporten er å redegjøre for hvor store vibrasjoner som kan forventes fra Bybanen over Bryggen, og synliggjøre at disse ikke vil være til fare for verdensarvstedet Bryggen eller kulturlag.

1.2 Bybanen byggetrinn 5 (BT5) reguleringsplan

Plan- og bygningsetaten i Bergen Kommune la planforslag for Bybanen og hovedsykkelrute fra sentrum til Åsane, med forlenget Fløyfjelltunnel til Eidsvåg, ut på offentlig høring med høringsfrist 21. desember 2022. Planforslaget er delt inn i seks reguleringsplaner, der delstrekning 1 omfatter sentrum fra Kaigaten og frem til tunnelpåhugg i Sandbrogaten.

Merknader til planene er til behandling og revidert planforslag er planlagt lagt frem for 2.gangs politiske behandling i løpet av våren 2023.

1.3 Kulturminner og kulturlag

Bybanen gjennom sentrum vil gå på automatisk fredet bygrunn. Innenfor avgrensning av kulturminnet Middelalderbyen Bergen (id 89049) er det middelalderske kulturlag. Disse inngår i sammenheng med yngre kulturlag og store deler av kulturlagene er organiske. De inngår i et grunnvannsystem, hvor senkning av grunnvannet kan medføre forråtnelse av organiske lag. Dette kan gi tap av kulturlag, men også setninger for bygninger oppå disse kulturlagene. Dette er særlig viktig for verdensarvstedet Bryggen, som omfatter både de stående bygningene, og kulturlagene de hviler på.

Middelalderske kulturlag i Bergen er av svært heterogen karakter. Kulturlag kan bestå av mye organisk materiale fra svært fine (bløte) fraksjoner til fastere større objekter. Kulturlagenes organiske deler varierer med andre ord fra mudder til solide store trestokker, med organisk materiale som bein, skinn, treflis og annet i ulike størrelser. Dette er som regel blandet med ikke-organisk materiale som sand og stein i ulike størrelser. Kulturlagenes utbredelse er heller ikke ensartet, men kulturlagene er bevart i ulik grad, på ulik dybde, avhengig av hvordan senere inngrep i dem er gjort. Mange steder er de opprinnelige kulturlagene fjernet på grunn av fundamentering og tiltak som infrastruktur. Bybanetraseen vil bevege seg i ulik avstand til

ulike kulturlag langs traseen. Traseen er imidlertid valgt blant annet for å unngå nærhet til kulturlag, i den grad det er mulig i Bergen sentrum.

1.4 Merknad til reguleringsplanen

Bakgrunnen for at vibrasjon følges opp etter Vestland fylkeskommunes merknad er vist i det følgende:

1.4.1 Merknad fra Vestland Fylkeskommune.

VLFK har i sine merknader til forslag til reguleringsplan for BT5 fra 14. desember 2022 blant annet skrevet:

«Fylkesdirektøren ser KUVA-rapportane og rådgjevinga i UNESCO Advisory Mission Report i samanheng. Fylkesdirektøren er samd i dei faglege vurderingane i KUVA og legg til grunn råda frå UNESCO Advisory Mission og frå Riksantikvaren. Det er tre utfordringar som må arbeidast vidare med; 1) Det må arbeidast med å minimere store negative konsekvensar av visuell og funksjonell art, 2) risikobiletet for grunnvatn, arkeologi og bygningar må utgreiast og handterast, og 3) prosessen med konsekvensutgreiing for verdsarv er ikkje fullført.» (side 15)

VLFK nevner ikke konkrete vibrasjoner i sin merknad, men temaet faller inn under risikobildet for grunnvann, arkeologi og bygninger, med henvisning til KUVA, UNESCO Advisory Mission og Riksantikvaren

1.4.2 Utdrag fra Riksantikvarens innspill til VLFK:

«Under dette punktet skildrar rapporten ni tiltak. Dei to første punkta omhandlar vidare arkeologiske og geologiske undersøkingar på Bryggen, samt studiar knytt til vibrasjon og overføring av vibrasjonar i kulturlag. Den peikar vidare på at det må planleggjast for å minimere vibrasjonar så langt som mogleg, og at ein må unngå sporveksel på kaifronten. Det er òg særskilde bekymringar knytt til Finnegården med tanke på vibrasjonsoverføring og støy frå nærgåande kurve, og det blir foreslått å vurdere enkeltspor som kan gjere det mogleg å føre banesporet i ei større kurve.» (side 6)

«Vidare støtter vi tilrådingane i rapporten frå den rådgjevande synfaringa. Desse gjeld behov for ytterlegare vurderingar av grunnforhold på Bryggen sin kaifront og vidare studiar med tanke på vibrasjonar og overføring av vibrasjonar i kulturlag. I tillegg nøye overvaking og varslingsrutinar i ei eventuell anleggs- og driftsfase med tanke på negative strukturelle konsekvensar knytt til hydrologi og arkeologiske funn, samt miljøovervåkingsprogram eit år før, under og 10 år etter anleggsfase knytt til hydrologi og setningar. Rapporten tilrår vidare å utvide risikoanalysen med tanke på langtidseffektar av Bybaneutbygging.

Riksantikvaren ber Vestland fylkeskommune reise motsegn mot planforslaget på bakgrunn av risiko, usikkerheit og negative konsekvensar for det automatisk freda kulturminnet Mellomalderbyen Bergen.» (side 10)

Også Riksantikvaren viser til UNESCO Advisory Mission og støtter UNESCOs råd for blant annet vibrasjon.

1.4.3 Utdrag av uttalelsene fra UNESCO Advisory Mission

«The quayside, over which the Daylight Option is projected, daily carries a lot of vehicular traffic, which will be removed should the Bybanen be constructed. Yet the sensitivity of the cultural layers, which extend beyond the boundaries of the property, to vibrations is not known. Further studies on the impacts of vibrations on the cultural layers, the built fabric and the hydrology of the property and the Bryggen Quayside are required before the impact assessment can be completed and therefore before a final decision on the project can be taken». (side 2)

«ToR 1¹: Consider whether and how the ongoing plans for Bybanen will affect the OUV of the property and provide recommendations and guidance towards possible and necessary revisions/amendments/changes to the plans to safeguard OUV.

Before any final decision on the implementation of the Daylight Option along the Bryggen Quayside is taken, the following additional measures need to be implemented:

...

2. *Further studies on vibrations and vibration transference through the Bryggen cultural layers should be undertaken and if any significant negative impact can be expected, the project should be fundamentally reassessed;*
3. *As a precaution for any further development of the Bybanen Daylight Option, maximal technically viable vibration and reduction measures should be planned and, should the light-rail line be constructed, implemented for any light rail line along the Bryggen Quayside. No rail-switches should be positioned in the area in front of Bryggen or the length of the quayside;*
4. *Special attention is needed at the Finnegården curve of the Bybanen line to ensure that no vibrations of the turning light rail are transferred to the Finnegården building and to ensure that noise generated by the light rail wheels on the curved rail is reduced to a minimum (A single track line here would aid in avoiding noise development, as a curve with a larger radius would be possible)»* (side 2-3)

Fra ToR 1: 2-3, ser vi at anbefalinger fra UNESCO omfatter:

- Videre studier av vibrasjon og vibrasjonsoverføring for Bryggens kulturlag
- Vibrasjonsdempende tiltak
- Spesiell oppmerksomhet mot Finnegården.

I UNESCOs rapport omtales vibrasjoner videre under risiko fra side 33 til 35. En rekke spørsmål blir stilt knyttet til vibrasjon, de viktigste kan samles under punktene:

¹ Terms of Reference

- Kan vibrasjoner ødelegge kulturlagene
- Kan vibrasjoner forstyrre grunnvannets bevaring av kulturlagene
- Kan vibrasjoner skade verdensarvstedet Bryggen, som hviler på bolverksskar/trefundamenter i organiske lag

1.5 Presiseringer av problemstillinger på grunnlag av merknader

Denne rapporten har en todelt struktur for å belyse vibrasjon av Bybane langs verdensarvstedet Bryggen.

For å kunne si noe om hvilke konsekvenser vibrasjonene kan ha på kulturlagene og verdensarvstedet Bryggen er det etter høringsrunden til reguleringsplanene utført vibrasjonsmålinger på eksisterende byggetrinn i Kaigaten. Her er det målt vibrasjoner fra både bane og buss, med lignende grunnforhold som på Bryggen. Det er også tatt vibrasjonsmålinger av busstrafikken på Bryggen. Vibrasjonsmålingene er utført av Multiconsult og funnene er oppsummert i rapport (Multiconsult, 2023).

Kapittel 2 tar utgangspunkt i dagens situasjon over Bryggen. Basert på utførte målinger av vibrasjon fra buss langs Bryggen, og målinger av bybane og buss andre steder i byen, presenteres en sammenligning av vibrasjon fra buss og Bybane

Kapittel 3 tar for seg vibrasjoner fra fremtidig Bybane på Bryggen. I tråd med UNESCO Advisory Missions ToR 1:3 bør Bybanen fremfor Bryggen planlegges med vibrasjonsdempende tiltak. Kapitlet viser effekten av slike tiltak. Resultatene er sammenliknet med tidligere vibrasjonsmålinger og er brukt for å vurdere hvilket av de to tiltakene som har minste konsekvens for kulturminner i Bergen. Videre er det i kapitlet presentert resultater fra avanserte numeriske beregninger (som har blitt omtalt under begrepet FE-beregninger) for vurderinger av vibrasjon i grunnen.

Kapittel 4 oppsummerer og konkluderer.

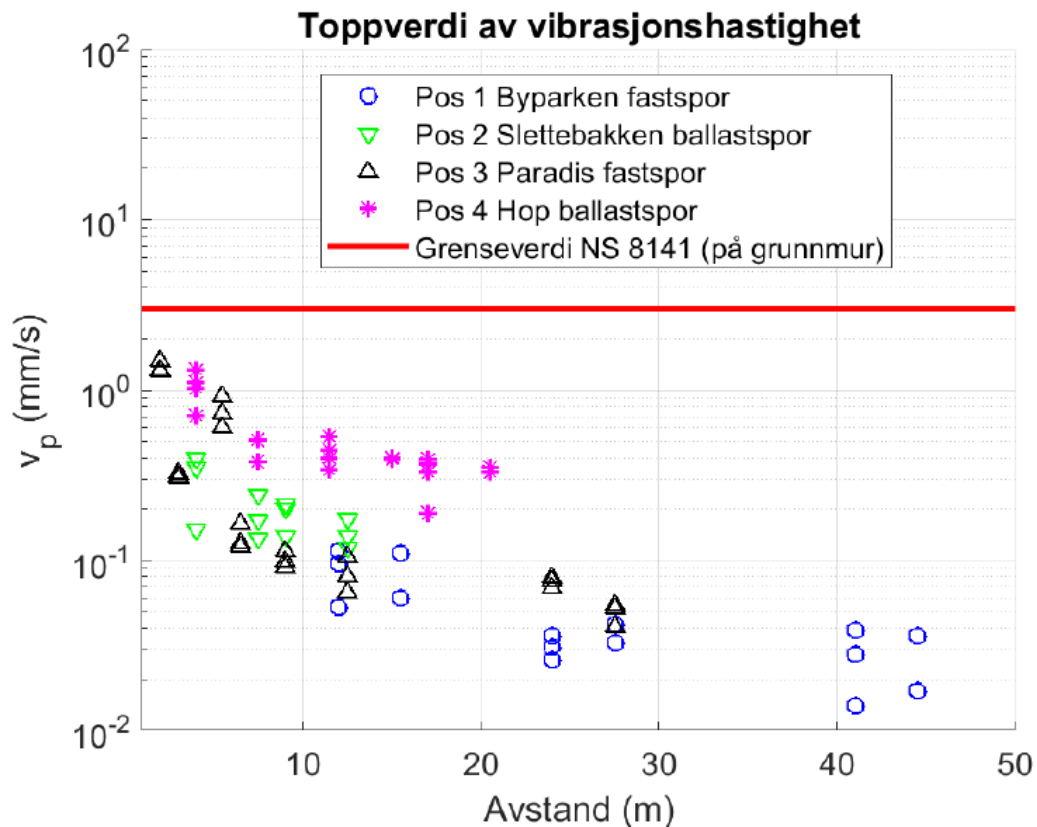
1.6 Tidligere utført arbeid

I forbindelse med oppstart av reguleringsplanarbeid for Bybanen i Bergen fra sentrum til Åsane utførte NGI en innledende vurdering av vibrasjoner til følsomme kulturlag ved Bryggen, Finnegården, Sandbrogaten og Øvregaten (NGI, 2021). I rapporten er tidligere utførte vibrasjonsmålinger for Bybanen byggetrinn 1 vurdert opp mot grenseverdier for å unngå bygningskade i NS8141 og grenser for nedbrytning av jorden i ISO/TS 14837-32. Rapporten konkluderer at:

«Vibrasjoner fra fremtidig Bybanetrase er lavere enn det som er forventet å kunne gi bygningskader», og «Vibrasjonsverdier fra fremtidig Bybanetrase er lavere enn det som er forventet å kunne gi opphav til irreversible endringer i jordens kornskjellett, setninger, økt komprimeringsgrad eller poretrykksoppbygning i kulturlag ved siden av banen».

Figur 1 viser målte vibrasjoner på bakken fra Bybanen og buss i flere steder som viser at vibrasjonene, selv på nærmeste avstand til buss og Bybane, er betraktelig lavere enn en konservativt anslått grenseverdi ifølge forrige utgave av NS 8141 for skader på bygninger (se Figur 1). NS8141 ble revidert i 2022 og har nå mindre strenge krav.

Målingene utført av Multiconsult (neste kapittel) viser samme nivåer av vibrasjoner og bekrefter samme konklusjon av ubetydelig effekt på bygninger. Det bør merkes at for bygninger fundamentert på mykt underlag er effekten lavere enn bygninger fundamentert til for eks. fjell.



Figur 1 Toppverdi av vibrasjonshastighet ved plassering av Bybane og buss. Rød linje viser konservativt anslått grenseverdi for vibrasjoner ifølge NS 8141 (Ref. NGI, 2021)

2 Vibrasjonsmålinger

2.1 Innledning

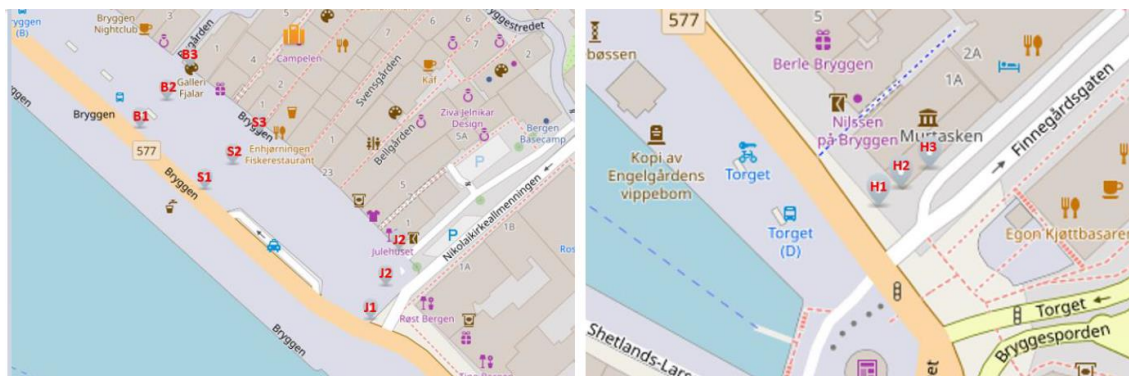
Vibrasjonsmålingene utført av Multiconsult er oppsummert i deres rapport (Multiconsult, 2023) og vedlagt denne rapporten. Under er det trukket ut noen sammenstillinger og vurderinger av resultatene.

2.2 Sammensetting av dataene fra buss over Bryggen

Figur 2 oppsummerer typiske verdier av målte vibrasjoner fra buss langs Bryggen. Plassering av målepunktene er indikert på Figur 3. For hvert målepunkt er det gitt to verdier: RMS1 og Peak. RMS som gir en gjennomsnittsverdi over et tidsintervall (her 1 sek.) er et begrep som ofte brukes i forskjellige standarder i forbindelse med komfort. Peak er toppverdi av målte vibrasjoner og er en parameter som ofte brukes i forbindelse med skader. Peak verdier pleier å være flere ganger større enn tilsvarende RMS verdier (se Figur 2). Ifølge NS 8141:2001 er grenseverdi for bygningskader konservativt anslått til å være 3 mm/s (se Figur 1), som er ti ganger større enn typiske verdier målt i Bryggen (i område 0,2-0,4 mm/s).

Målested	Vei		Midt		Vegg	
	RMS1	Peak	RMS1	Peak	RMS1	Peak
Hanseatisk museum	Ca. 0,1	Ca. 0,4	Ca. 0,05	Ca. 0,2	Ca. 0,1	Ca. 0,4
Julehuset	0,05 – 0,1	0,2-0,4	0,05 – 0,1	0,2-0,4	0,05 – 0,1	0,2-0,4
Sjøboden	0,08 – 0,15	0,5-0,8	0,05 – 0,1	Ca. 0,2	Ca. 0,05	Ca. 0,15
Bugaarden	0,04 – 0,05	Ca. 0,2	0,02 – 0,03	0,1-0,15	0,02 – 0,03	0,1-0,15

Figur 2 Typiske verdier for buss over Bryggen, verdier i mm/s (figur: Multiconsult)



Figur 3 Plassering av målepunkt Bryggen. Symbolene H, J, S og B refererer til henholdsvis Hanseatisk museum, Julehuset, Sjøboden og Bugaarden (figur: Multiconsult).

2.3 Sammenlikning mellom buss og Bybanen når begge går på plate

Figur 4 oppsummerer typiske verdier av målte vibrasjoner i Kaigaten hvor det går både Bybane og buss. Det er målt vibrasjoner på to steder i Kaigaten. Ved sporsløyfene direkte øst for Christies gate og ved Fana sparebank øst for Peter Motzfeldts gate. Ved sparebanken er det målt på begge sider av traseen, men ved sporsløyfene er det kun målt på sørsiden av traseen som følge av buttsporet som ligger på nordsiden.

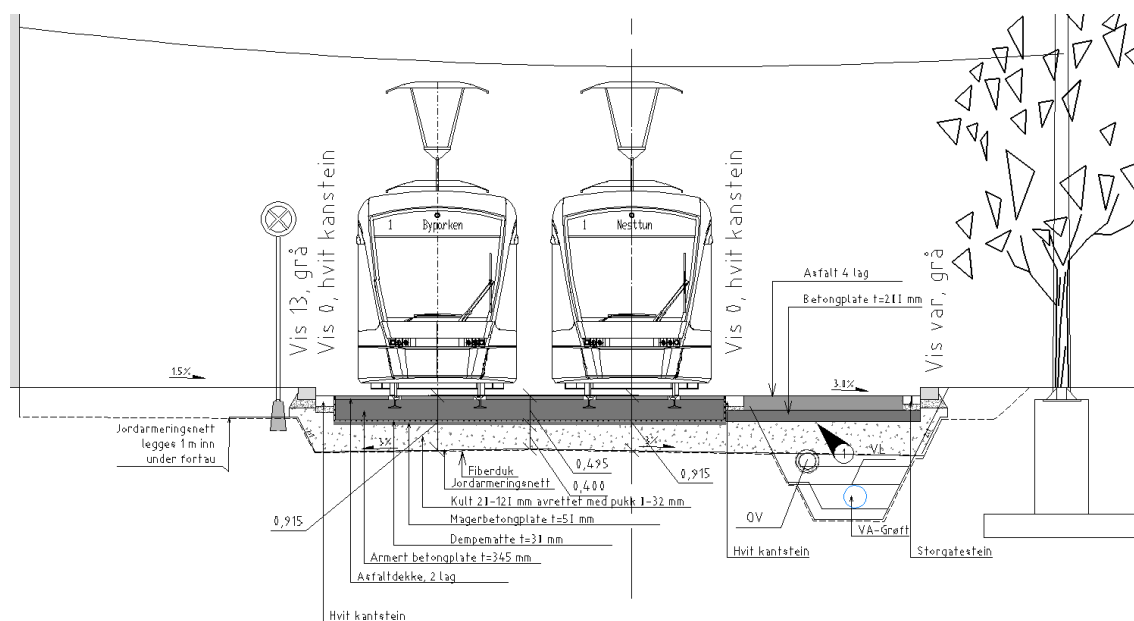
Bybanen er anlagt på betongfundament med 30 mm bølgeformet dempematte på strekningen. Det er platefundament også under kjørebane på sørsiden parallelt med sporet. Se Figur 6 for typisk normalprofil i Kaigaten.

Målepunkt (avstand)	Sted Type	Uten sporveksler nordside		Uten sporveksler sørside	
		RMS1	Peak	RMS1	Peak
Kantstein (Ca. 3,5 m)	Buss	<0,02	<0,1	Ca. 0,05	Ca. 0,2
	Bane	0,1-0,2	1-1,5	0,05-0,15	Ca. 1
Fortau (Ca. 7 m)	Buss	<0,02	<0,1	<0,02	<0,1
	Bane	<0,02	<0,1	0,04-0,08	0,5
Park (Ca. 15 m)	Buss	-	-	-	-
	Bane	-	-	-	-

Figur 4 Typiske verdier i Kaigaten med buss og Bybane i samme trase, verdier i mm/s (K4 er omtalt som fortau i kolonnen for «uten sporveksler sørside» i tabellen, men målepunktet er egentlig i den parallelle kjørebane på sørsiden av banetraseen)



Figur 5 Plassering av målepunkt Kaigaten



Figur 6 Som-bygget normalprofil Kaigaten (Norconsult)

Vibrasjonsmålingene viser svært lave verdier for både buss og bane målt utenfor traseen. Ved fortau på nordsiden av traseen er verdiene under målingene av buss over Bryggen (0,1 mm/s mot 0,2-0,4 mm/s på Bryggen) og hele 30 ganger under kravet i NS 8141:2001.

Ved målepunkt på kantstein og i den parallell kjørebane på sørsiden viser målingene 5-10 ganger så høy verdi for bane som målingene på fortauet på nordsiden. Den store forskjellen er vurdert til å skyldes at kantstein og platefundament under parallell kjørebane på sørsiden er anlagt mot banefundamentet og opptrer som del av banefundamentet, til tross for at det skal være dempematte mellom platen og plate for kjørefelt. En forklaring kan være at den bølgeformede dempematten over tid er tettet med finstoff, som kan være et problem med denne typen dempematte. I dag brukes ofte andre typer dempematter som ikke har dette problemet. Selv de høye verdiene på kantstein, og i den parallell kjørebane på sørsiden (0,5 mm/s) er under det konservativt anslått kravet på 3 mm/s i NS 8141:2001.

Målingene tatt i Kaigaten er i underkant av 40 m fra sporveksel ved Peter Motzfeldts gate, og målingene viser som beskrevet over verdier som er godt under grenseverdier i NS8141:2001. Planlagt sporveksel i Slottsgaten er i overkant av 90 m unna verdensarvstedet Bryggen. Avstanden er så stor at det ikke forventes noe fare for at vibrasjoner fra planlagte veksler i Slottsgaten vil negativt påvirke verdensarvstedet Bryggen.

2.4 Oppsummering

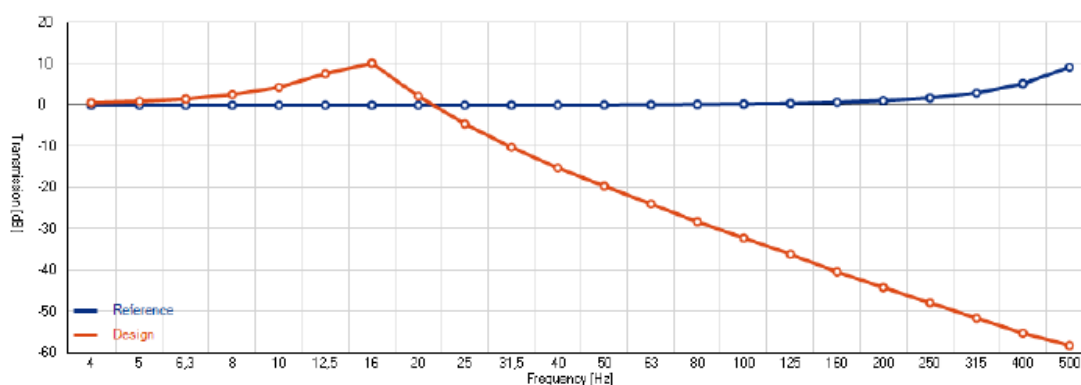
Vibrasjonsmålingene viser svært lave verdier for bane målt utenfor selve betongplaten. Verdiene for banen er under målingene av buss over Bryggen (0,1 mm/s mot 0,2-0,4 mm/s på Bryggen) og hele 30 ganger under konservativt anslått grenseverdi for bygningskader i NS 8141:2001 på 3 mm/s. Målingene er på nivå med tidligere målinger, jamfør NGI (2021).

Målingene viser videre at tiltaket som er gjort i Kaigaten med dempematte rundt banefundament fungerer som ønskelig og gir en reduksjon i størrelsesorden med faktor 10 på vibrasjoner utenfor platen i forhold til målinger på platen.

3 Vibrasjon ved en fremtidig bybane langs Bryggen

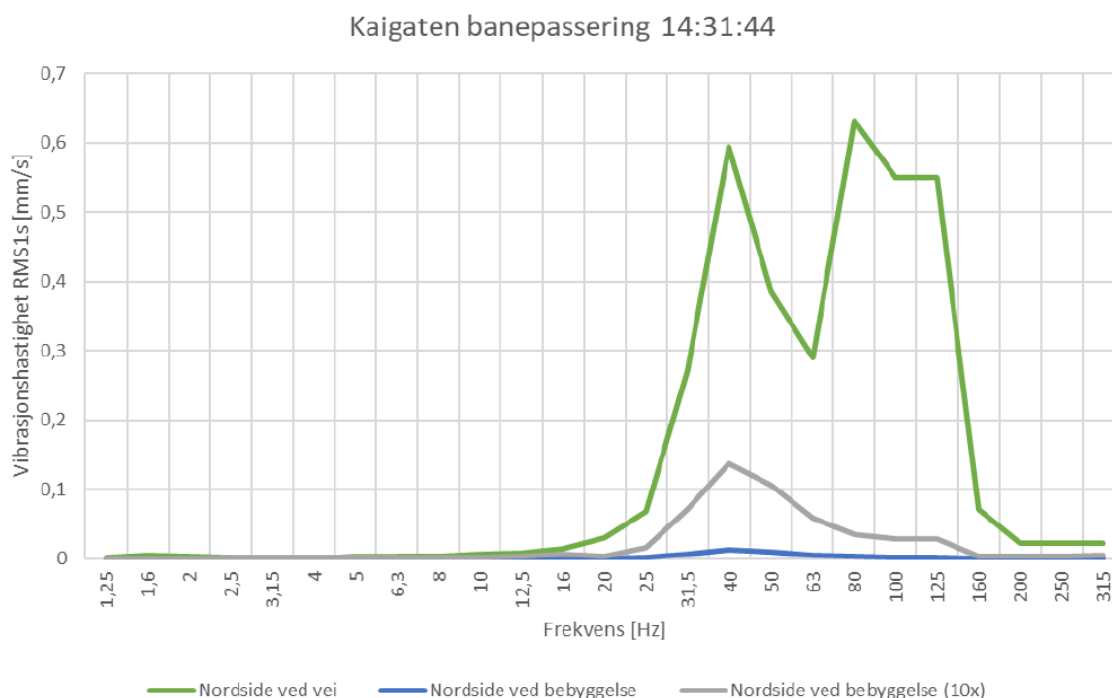
3.1 Vibrasjonsdempende sporoverbygning

Det finnes flere etablerte og utprøvde baneløsninger som kan betydelig redusere vibrasjoner fra skinnegående sporvogn. En av de mest kjente metodene er å legge vibrasjonsdempende matter rundt banefundamentet (på engelsk floating slab track), slik som er gjort i Kaigaten. Mattens tykkelse og stivhet kan justeres for å få størst effekt for frekvensområder av interesse. Prinsippet kan illustreres ved hjelp av en Transfer Funksjon-kurve, som angir reduksjon/økning av forskjellige frekvenser i en vibrasjons tidsserie. For eksempel, TF i Figur 7 øker vibrasjoner ifm. frekvenser mellom 10-20 Hz med en faktor på ca. 10 og reduserer vibrasjoner ifm. frekvenser rundt 40 Hz med faktor på ca. 30. Reduksjon av høyere frekvenser er enda kraftigere. For eksempel, frekvenser 60 Hz reduseres med faktor på 1000.



Figur 7 Eksempel på Transfer Funksjon for en bane med myke vibrasjonsdempende matter – dempmatter – rundt banefundamentet

For å evaluere effekten av denne dempeløsningen, har vi utført en frekvensanalyse av to vibrasjonstidsserier i to lokasjoner fra en typisk banepassering i Kaigaten og har beregnet deres frekvensspekter i 1/3 oktavbånd. Vibrasjonene i begge lokasjoner er karakterisert med frekvenser over 20 Hz og med dominerende frekvenser i området 40-160 Hz (se Figur 8).



Figur 8 Eksempel på Transfer Funksjon for en bane med dempematter

Frekvensspekter (i 1/3 oktavbånd) av vibrasjoner fra samme trikk med bane *med dempematter* beregnes ved å multiplisere frekvensspekteret i Figur 8 med TF vist i Figur 7. Denne operasjonen praktisk sett eliminerer alle vibrasjoner med frekvenser over 60 Hz (andre topp i grønn kurve i Figur 8) og reduserer frekvenser rundt 40 Hz (førte topp i grønn kurve i Figur 8) med faktor på 30. Derfor, kan vibrasjonene fra bybanen reduseres til under nivå av vibrasjoner fra busser presentert i kap. **Error! Reference source not found.** Dette forklarer hvorfor man har fått målt lavere vibrasjoner fra Bybane enn busser siden det ligger dempematte i Kaigaten i dag.

Vibrasjonene fra bybane kan ytterligere reduseres ved å bruke vibrasjonsisolerende skinneinnfesting, dempematte under skinnene eller kontinuerlig opplagring av skinne i vibrasjonsdempende material. En slik konfigurasjon kan sammen med dempematte rundt banefundament designes for å få en best mulig reduksjon av vibrasjoner avhengig av diverse parameter for Bybanen.

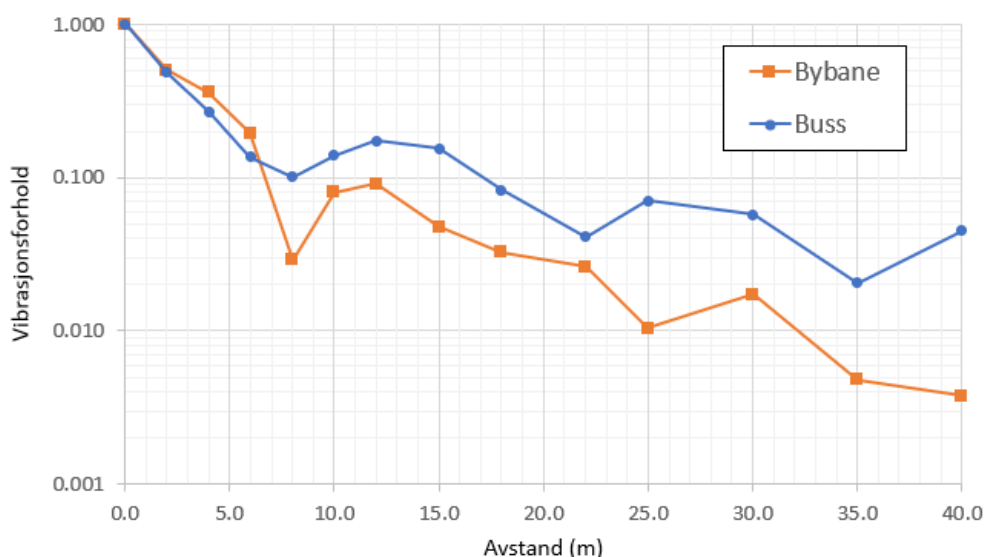
3.2 Numerisk simulering av vibrasjonsutbredelse

Det er brukt et avansert numerisk verktøy, *LaySac* (Park & Kaynia, 2018), for å estimere vibrasjoner fra bybane. Verktøyet er også brukt for å estimere spenninger og tøyninger i kulturlaget som funksjon av avstand. Den sistnevnte informasjonen brukes for å vurdere mulighet for at vibrasjoner kan ha degraderende effekt på kulturlag. *LaySac* løser analytisk differensielle likninger av bølgeforplantning i en lagdelt jord og har derfor mer nøyaktighet enn konvensjonelle FE (Finite Element) verktøy som har kjente svakheter for laster med høye frekvenser i 3D modelleringer.

Inngangsdata for *LaySac* simuleringer er mekaniske egenskaper av jord (for eks. masse tetthet, elastisitet, alternativt skjærbølghestighet, V_s , og Poissons tall). Ut fra geotekniske grunnundersøkelser ved Bryggen, er det laget V_s -profil for en gjennomsnittlig lagtykkelse på 15 m. Både dybde til fjell og topplag over kulturlag vil variere gjennom sentrum. For beregningens del er det antatt 2,5 m normalt stivt topplag (silt/sand/leire) over kulturlag med en ganske lav stivhet. Stivheten antatt for kulturlag er på nivå med torv og er en konservativ antagelse.

Figur 9 oppsummerer resultatene fra simuleringene som viser reduksjon av vibrasjoner med avstand for Bybane og buss. Hovedforskjellen på disse simuleringene er at det er brukt en dominant frekvens på 15 Hz for Buss og 40 Hz for Bybane. Dette ut fra frekvensanalyse av målinger fra Bybane og buss trafikk (forrige kap.). Disse frekvensene stemmer også overens med målingene utført av NGI (2021).

Reduksjon av vibrasjon i denne figuren er ganske konsistent med tidligere målinger (sammenlikne med målingene i Figur 1). Dette bekrefter modellen. Merk at vibrasjoner fra Bybanen reduserer kraftigere enn vibrasjoner fra Buss som er en positiv observasjon med tanke på effekt på kulturobjekter ut fra et helhetssynspunkt. Trendene i disse resultater gjelder i alle 3 retninger.



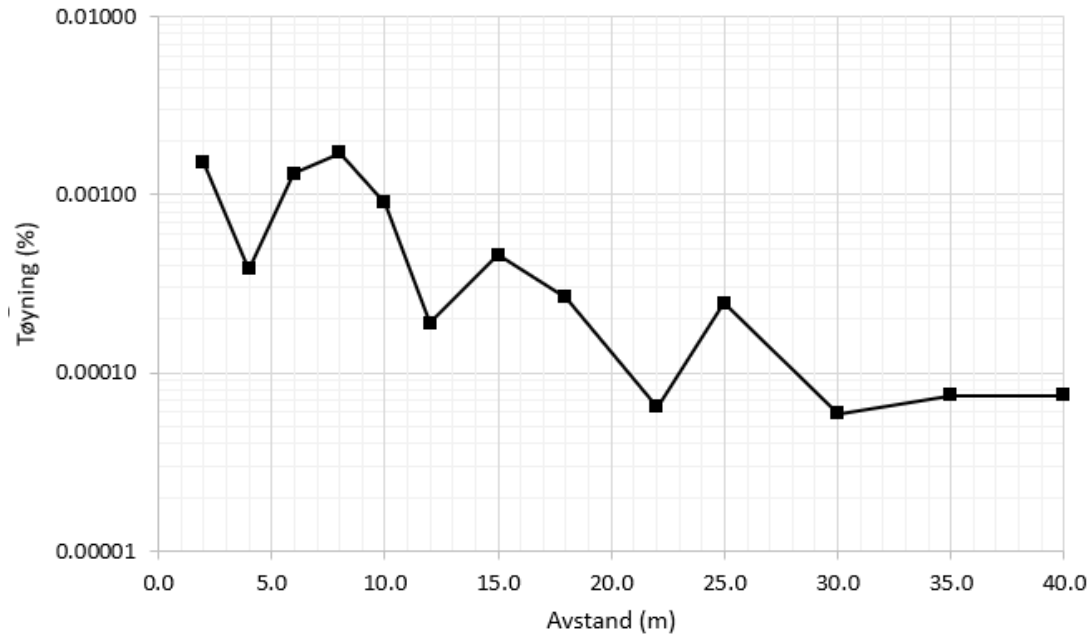
Figur 9 Reduksjon av vibrasjon fra Bybane og busstrafikk i normalisert form

Denne modellen er også brukt for å estimere skjærspenninger og skjærtøyninger i kulturlag som funksjon av avstand. Både skjærspenning og skjærtøyning er brukt i geoteknikk for å vurdere effekt av vibrasjoner på jordmaterialer, og i prinsippet kan anvendes på kulturlaget som er en blanding av jord og andre faste materialer.

Figur 10 viser variasjon av beregnet skjærtøyninger, γ , i kulturlaget som funksjon av avstand. Størst verdi på avstander opptil 10 m er rundt $\gamma = 0,001\%$ som er mye lavere enn terskelen for elastisk respons av de fleste jordmaterialer (typisk 0,01%). I praksis betyr det ingen plastiske tøyninger i materiale og derfor ingen degradering over tid. Med andre ord, forventes det ikke at Bybane over Bryggen gir negative effekter på kulturlaget og kulturminner.

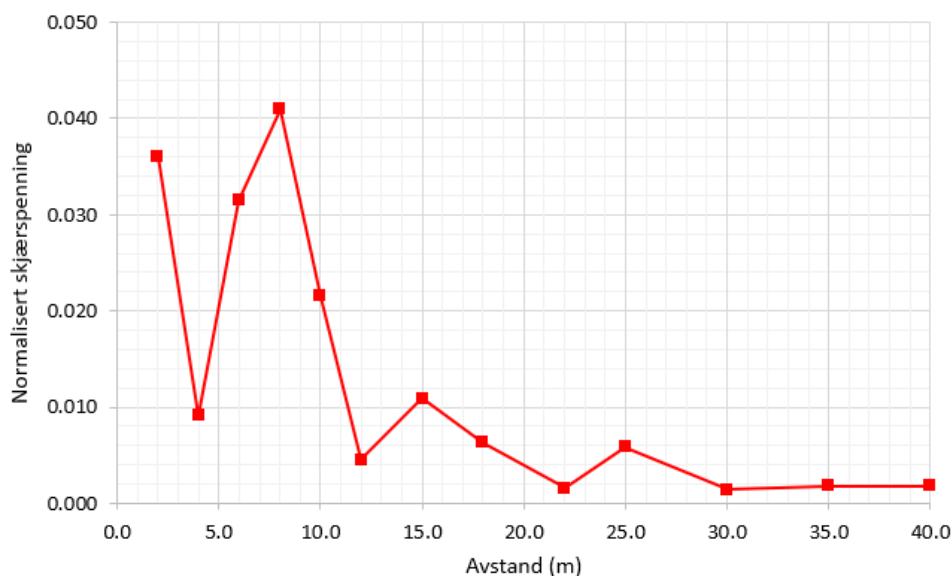
Som en kontroll av den detaljerte beregningen over, er det brukt en enkel formel som gir et estimat på skjærtøyning som funksjon av vibrasjonshastighet, v (målt med toppverdi 0,2-0,3

mm/s), og V_s (50-60 m/s) ifølge $\gamma = v/V_s = 0,0003/60 = 0,000005 \sim 0,0005\%$. Denne er halvparten av beregnede verdien over (0,001%), og er betraktet som en kvalitetskontroll av beregningene.



Figur 10 Skjærtøyning (i %) i kulturlaget som funksjon av avstand

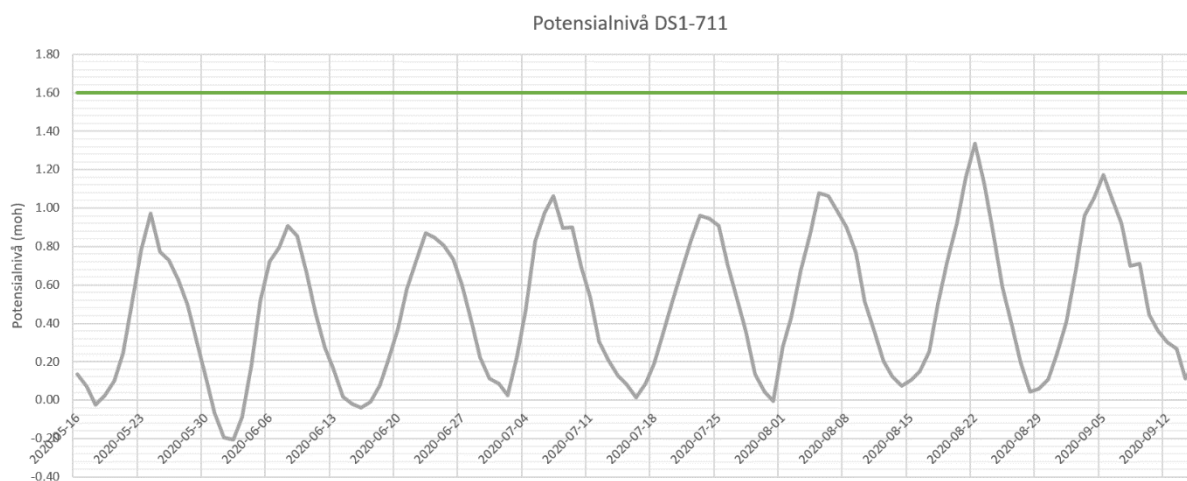
En annen måte å presentere disse resultatene på er vha. den konvensjonelle skjærspenning normalisert med effektiv vertikal spenning i hvert punkt. Figur 11 viser variasjon av normalisert skjærspenning som funksjon av avstand. Største verdier er rundt 0,04 som igjen er betraktet som veldig lav, og lav sannsynlighet for å ha noen negative effekter på selv de svakeste jordarter slik som løs sand/silt eller torv. Derfor, er det svært usannsynlig at vibrasjoner og tilhørende spenninger/tøyninger medfører noen risiko for skader. Størst fare for degradering av jord under sykliske laster er generering av overtrykk i porevannet. I en homogen og veldig løslagret jordart av type silt og sand er grensen for normalisert skjærspenning, før det skjer noen nedgradering, på rundt 0,1. I leire er det enda høyere, ca. 0,20. I materialer som er sammensatt av flere elementer/arter (for eks. blanding av leire, silt, sand, treverk, etc.) er fare for poreovertrykk enda lavere enn i homogene materialer. Med andre ord vil den ikke-homogene tekturen av kulturlaget betraktes som en positiv egenskap når det gjelder degradering av kulturlag som følge av vibrasjoner.



Figur 11 Normalisert skjærspenning i kulturlaget som funksjon av avstand

3.3 Vibrasjoner og grunnvannspåvirkning

Det vurderes som usannsynlig med påvirkning på grunnvannsforhold som følge av vibrasjoner fra fremtidig Bybane over Bryggen. Det går i dag busser på Bryggen og målinger av poretrykk viser ingen tegn på slik påvirkning. Se Figur 12 for målt poretrykk fra Bryggen, hvor det er tydelig at det er flo og fjære som er styrende for grunnvannsnivået på Bryggen. Erfaringer fra sprengninger i jord/berg med svært høye vibrasjoner viser ingen effekt på grunnvannforhold heller. I ekstreme tilfeller med veldig porøse jordarter kan det observeres små oscillasjoner i poretrykk, men ekstremt lavt i forhold til grunnvannsnivå og har derfor ingen effekter på grunnvann.



Figur 12: Poretrykkmåling i punkt DS1-711

3.4 Vibrasjon og påvirkning kulturlag

I tidligere arbeid (NGI, 2021) er det sagt at «Vibrasjonsverdier fra fremtidig Bybanetrase er lavere enn det som er forventet å kunne gi opphav til irreversible endringer i jordens kornskjellett, setninger, økt komprimeringsgrad eller poretrykkoppbygning i kulturlag ved siden av banen». De nye målingene støtter denne vurderingen (Kap 3.2) ut fra at vibrasjoner fra eksisterende Bybanen generelt er på samme nivå eller lavere enn fra eksisterende busstrafikk over Bryggen. Som diskutert i rapporten, er det i tillegg forventet enda lavere vibrasjoner ved bruk av vibrasjonsdempende tiltak både under betongplaten og rundt skinner.

Det er ikke utført fysiske tester for materialer på kulturlag i Bergen. Slike tester i laboratorium av arkeologisk materiale er mulig, men er vurdert å være lite tjenlige her. Kulturlagene i Bergen er ganske heterogene, både i komposisjon og utbredelse. Det vil derfor ikke kunne trekkes generelle slutninger ut fra slike undersøkelser utført på noen prøver. I stedet er konservativt antatte egenskaper på materialer brukt som inngangsverdier i vibrasjonsberegningene.

I NGIs tidligere vurdering er de påpekt at spunt kan reflektere vibrasjoner og øke dem med en faktor på opptil 2. Dette er fremdeles langt under grenseverdier. Spunt kan også designes på en måte som reduserer denne faktoren.

3.5 Vibrasjon og påvirkninger av bygninger

Vibrasjon fra Bybanen er betraktelig lavere (med faktor på mer enn 10) enn grenseverdier i NS8141:2001 for skader på vanlige bygninger. Marginen er så stor at det ikke forventes noe fare for skade på bygninger på Bryggen. Det har vært spesielt fokus på Finnegården som er nærmest Bybanen, men målinger og beregning viser at selv helt opptil Bybanen er vibrasjonene svært lave og betydelig under grenseverdiene i NS8141:2001. Det vurderes ikke som nødvendig å gjøre egne tiltak på Finnegården, eller andre bygninger langs Bryggen, for å unngå skader.

4 Konklusjon

Vibrasjonsmålinger viser at eksisterende Bybane i Kaigaten genererer mindre vibrasjoner enn bussene gjør over Bryggen i dag. Etablering av Bybanen langs Bryggen vil med andre ord ikke gi mer vibrasjoner til omkringliggende lag og bygninger enn dagens situasjon.

Vibrasjoner fra fremtidig Bybanetrase vurderes å være godt under nivået som vil kunne gi bygningsskader eller gi opphav til endringer i kulturlag over Bryggen. Analyse av skjærtøyning ved hjelp av avansert numeriske modeller, og bekreftet med forenklete beregningsmetoder, viser størst verdi på under $\gamma = 0,001\%$ som er mye lavere enn terskelen for elastisk respons i de fleste jordmaterialer (typisk 0,01%), dvs. at praktisk sett blir det ingen plastiske tøyninger i materiale og derfor ingen degradering av kulturlagene over tid.

Vibrasjon fra Bybanen er betraktelig lavere (med faktor på mer enn 10) enn grenseverdier i NS8141:2001 for skader på vanlige bygninger. Marginen er så stor at det ikke forventes noe fare for skade på bygninger på Bryggen. Det vurderes ikke som nødvendig å gjøre egne tiltak på de vernede bygninger for å unngå skader.

Vibrasjonene på planlagt Bybane over Bryggen kan reduseres videre ved å gjøre ytterligere vibrasjonsdempende tiltak på sporoverbygningen, slik at vibrasjonene vil bli signifikant mindre enn dagens busstrafikk over Bryggen. Dette kan være mykere vibrasjonsdempende matter under banefundamentet og vibrasjonsisolerende skinneinnfesting eller kontinuerlig opplagring av skinne i vibrasjonsdempende material.

5 Referanser

Multiconsult. (2023). *Vibrasjonsmålinger Bryggen*. Bergen.

NGI. (2021). *Vurdering av vibrasjoner fra bybanetrase til kulturlag ved Bryggen, Finnegaarden og Sandbrogaten*. Oslo.

Park, J., & Kaynia, A. M. (2018). Stiffness matrices for fluid and anisotropic soil layers with applications in soil dynamics. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, ss. 169-182.

RAPPORT

Vibrasjonsmålinger Bryggen

OPPDRAKSGIVER

Norconsult AS

EMNE

VIBRASJONSMÅLINGER

DATO / REVISJON: 22. mars 2023 / 03

DOKUMENTKODE: 10249529-01-RIA-RAP-001



Multiconsult

Dette dokumentet har blitt utarbeidet av Multiconsult på vegne av Multiconsult Norge AS eller selskapets klient. Klientens rettigheter til dokumentet er gitt for den aktuelle oppdragsavtalen eller ved anmodning. Tredjeparter har ingen rettigheter til bruk av dokumentet (eller deler av det) uten skriftlig forhåndsgodkjenning fra Multiconsult. Enhver bruk av dokumentet (eller deler av det) til andre formål, på andre måter eller av andre personer eller enheter enn de som er godkjent skriftlig av Multiconsult, er forbudt, og Multiconsult påtar seg intet ansvar for slikt bruk. Deler av dokumentet kan være beskyttet av immaterielle rettigheter og/eller eiendomsrettigheter. Kopiering, distribusjon, endring, behandling eller annen bruk av dokumentet er ikke tillatt uten skriftlig forhåndssamtykke fra Multiconsult eller annen innehaver av slike rettigheter.

RAPPORT

OPPDRAG	Vibrasjonsmålinger Bryggen	DOKUMENTKODE	10249529-01-RIA-RAP-001
EMNE	Vibrasjonsmålinger	TILGJENGELIGHET	Åpen
OPPDRAGSGIVER	Norconsult AS	OPPDRAGSLEDER	Merethe Bryn
KONTAKTPERSON	Daniel Frantzen, Ivar Øvretvedt	UTARBEIDET AV	Kjetil Sundfjord
KOORDINATER	Sone: Øst: Nord:	ANSVARLIG ENHET	10233015 Måleteknikk og Bygningsbesiktigelse
GNR./BNR./SNR.	/ / / Bergen		

SAMMENDRAG

Multiconsult har gjennomført vibrasjonsmålinger på Bryggen, på Florida og i Kaigaten i forbindelse med vurderinger av vibrasjoner fra Bybanen på Bryggen. Denne rapporten oppsummerer de målte vibrasjonsnivåene.

REV.	DATO	BESKRIVELSE	UTARBEIDET AV	KONTROLLERT AV	GODKJENT AV
03	22.03.2023	Retting figur	Kjetil Sundfjord	Ingrid Holst	Merethe Bryn
02	16.03.2023	Tatt ut kapittel 4.2 (målinger med sporveksler) i påvente av flere målinger	Kjetil Sundfjord	Ingrid Holst	Merethe Bryn
01	15.02.2023	Utvidet med målinger utført 13.02.2023 og 14.02.2023	Kjetil Sundfjord	Ingrid Holst	Merethe Bryn
00	13.02.2023	Første utgave	Kjetil Sundfjord	Ingrid Holst	Merethe Bryn

INNHOLDSFORTEGNELSE

1	Innledning	5
2	Metode.....	5
3	Målepunkter.....	5
3.1	Kaigaten	6
3.2	Florida	7
3.3	Hanseatisk museum.....	8
3.4	Bryggen	9
4	Resultater	10
4.1	Kaigaten uten sporveksler	10
4.1.1	Nordsiden	10
4.1.2	Sørsiden	13
4.2	Florida	16
4.3	Hanseatisk museum	18
4.4	Julehuset	21
4.5	Sjøboden	24
4.6	Bugaarden	28
5	Oppsummering	30

1 Innledning

Multiconsult Norge AS er engasjert av Norconsult AS for å utføre vibrasjonsmålinger i forbindelse med vurdering av vibrasjoner fra Bybanen over Bryggen. Det er utført målinger på Bryggen, i Kaigaten, og på Florida.

2 Metode

Målingene ble utført med Sigicom Datalogger og Infra V12 treaksiell geofon. Målingene er utført i henhold til NS 8176 [1] og det er registrert høyeste vibrasjonshastighet RMS1s i intervaller på 5 s.

Ved vibrasjoner som overskrider et gitt triggernivå registrerer loggerne også transienter. Fra disse kan det hentes ut tidsforløp for vibrasjonshendelsene, og det kan gjøres frekvensanalyser.

3 Målepunkter

Det er utført målinger på 4 steder på Bryggen, med 3 målepunkter i ulik avstand fra veien på hvert målested. Målingene ble utført den 30.01.2023 i tidsrommet 07:30 - 09:00.

I tillegg er det utført målinger i Kaigaten og på Florida som referansested der det passerer både buss og bane. Målinger i Kaigaten langs strekning uten sporveksler ble utført 24.01.2023 i tidsrommet 14:30 – 15:30. Målinger på Florida ble utført i 24.01.2023 i tidsrommet 11:55 – 13:00 og 13.01.2023 i tidsrommet 12:55 – 14:00

Under målingene er det utført manuell registrering av tidspunkter for passeringer av busser og andre tunge kjøretøy, samt Bybane i Kaigaten og på Florida.

Plassering og beskrivelse av målepunkter på de ulike stedene er gitt i de følgende delkapitlene.

3.1 Kaigaten

Plassering og beskrivelse av målepunkter i Kaigaten er vist i Tabell 1 og Figur 1.

Tabell 1: Målepunkter i Kaigaten

Målepunkt	Beskrivelse	Avstand
K1	Kaigaten uten sporveksler nordside, på kantstein	Ca. 3,5 m fra senterlinje
K2	Kaigaten uten sporveksler nordside, ved bebyggelse	Ca. 7 m fra senterlinje
K3	Kaigaten uten sporveksler sørside, i kjørefelt	Ca. 3,5 m fra senterlinje
K4	Kaigaten uten sporveksler sørside	Ca. 7 m fra senterlinje



Figur 1: Plassering av målepunkter i Kaigaten

3.2 Florida

Plassering og beskrivelse av målepunkter på Florida er vist i Tabell 2 og Figur 2. Målinger i punkt F1 og målinger i punkt F2 og F3 ble ikke utført i samme tidsrom og er derfor ikke sammenlignet direkte.

Tabell 2: Målepunkter på Florida

Målepunkt	Beskrivelse	Avstand
F1	Florida, mellom vei og bane	Ca. 4 m fra midt mellom banespor
F2	Florida, i sykkelfelt	Ca. 3 m fra senter av kjørefelt
F3	Florida, på fortau	Ca. 1 m fra senter av kjørefelt



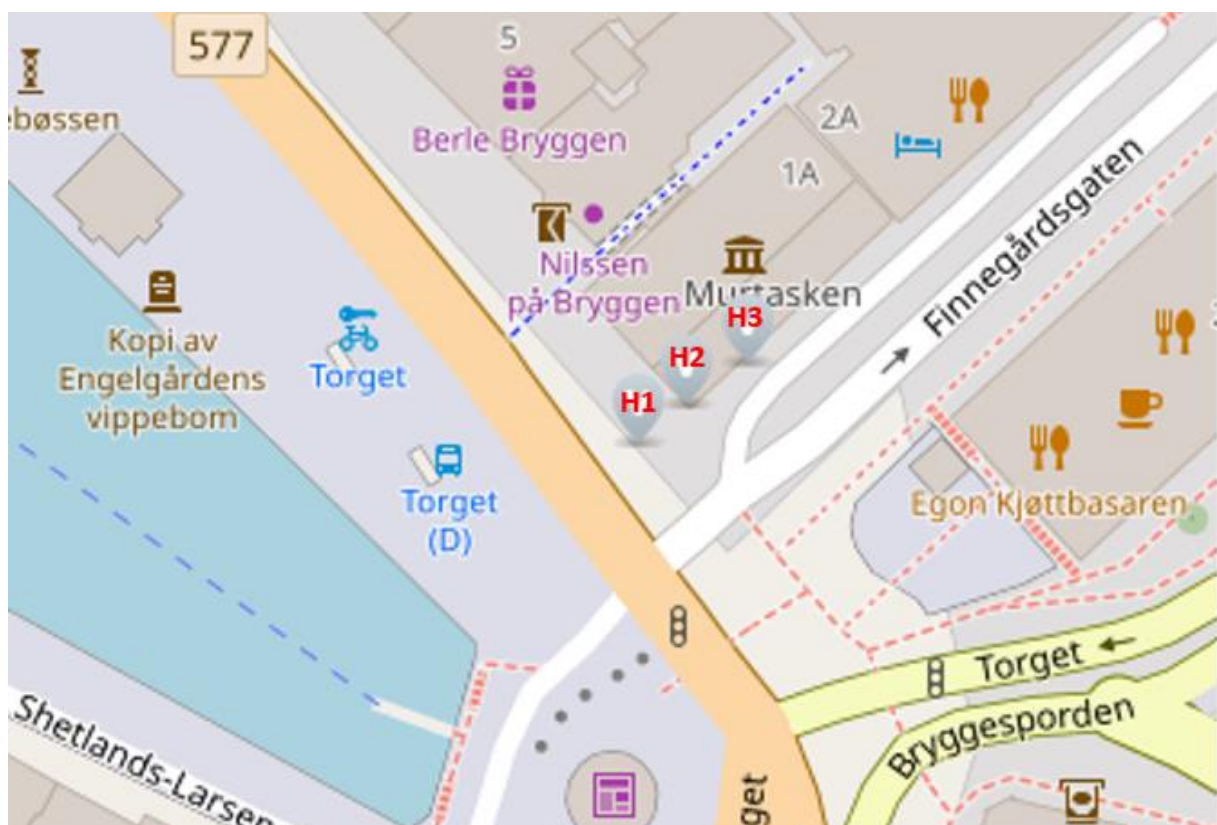
Figur 2: Plassering av målepunkter på Florida

3.3 Hanseatisk museum

Plassering og beskrivelse av målepunkter ved Hanseatisk museum er vist i Tabell 3 og Figur 3.

Tabell 3: Målepunkter ved Hanseatisk museum

Målepunkt	Beskrivelse	Avstand
H1	Hanseatisk museum vei	Ca. 4 m fra senterlinje
H2	Hanseatisk museum midt, ved hushjørne	Ca. 10 m fra senterlinje
H3	Hanseatisk museum vegg, 5 m inn fra hushjørne	Ca. 15 m fra senterlinje



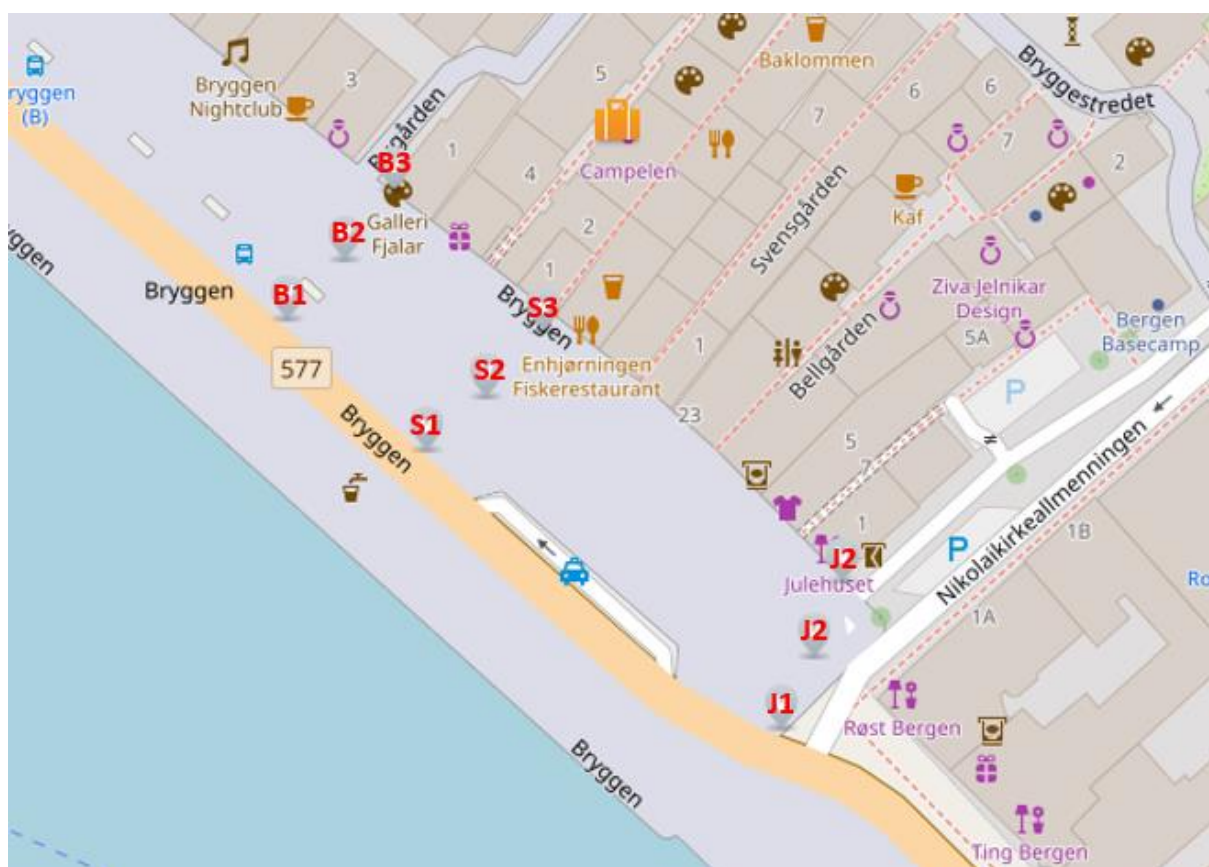
Figur 3: Plassering av målepunkter ved Hanseatisk museum

3.4 Bryggen

Plassering og beskrivelse av målepunkter på Bryggen er vist i Tabell 4 og Figur 4.

Tabell 4: Målepunkter på Bryggen

Målepunkt	Beskrivelse	Avstand
J1	Julehuset vei	Ca. 9 m fra senterlinje
J2	Julehuset midt	Ca. 19 m fra senterlinje
J3	Julehuset vegg	Ca. 26 m fra senterlinje
S1	Sjøboden vei	Ca. 6 m fra senterlinje
S2	Sjøboden midt	Ca. 21 m fra senterlinje
S3	Sjøboden vegg	Ca. 29 m fra senterlinje
B1	Bugaarden vei	Ca. 8 m fra senterlinje
B2	Bugaarden midt	Ca. 18 m fra senterlinje
B3	Bugaarden vegg	Ca. 26 m fra senterlinje



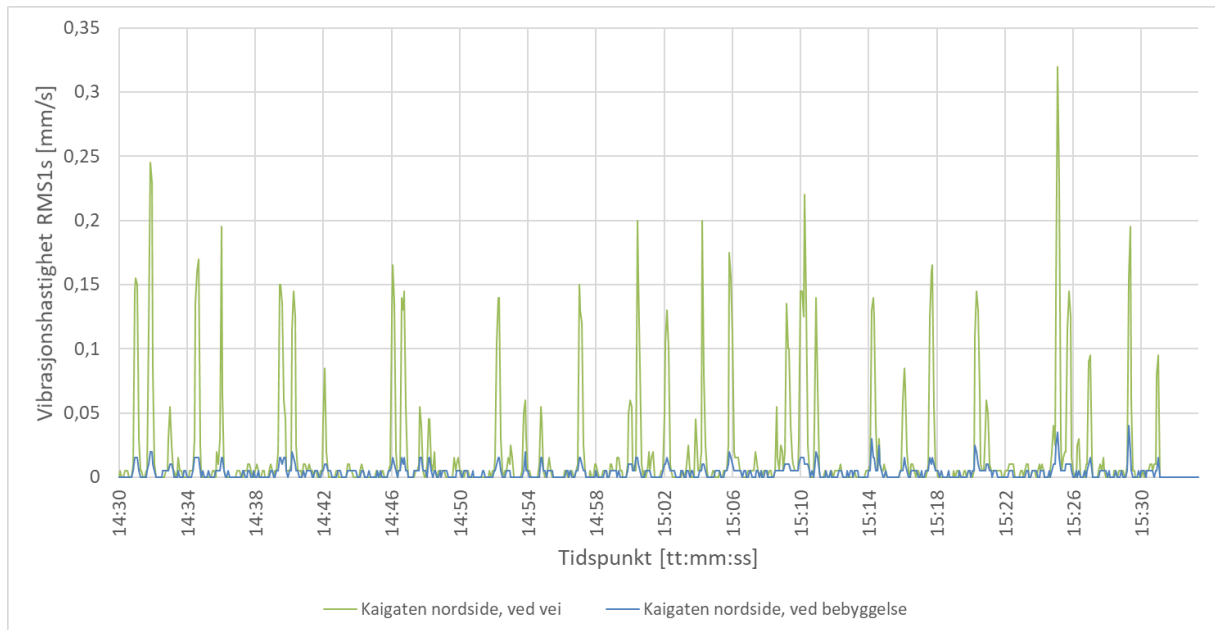
Figur 4: Plasseringer av målepunkter på Bryggen

4 Resultater

4.1 Kaigaten uten sporveksler

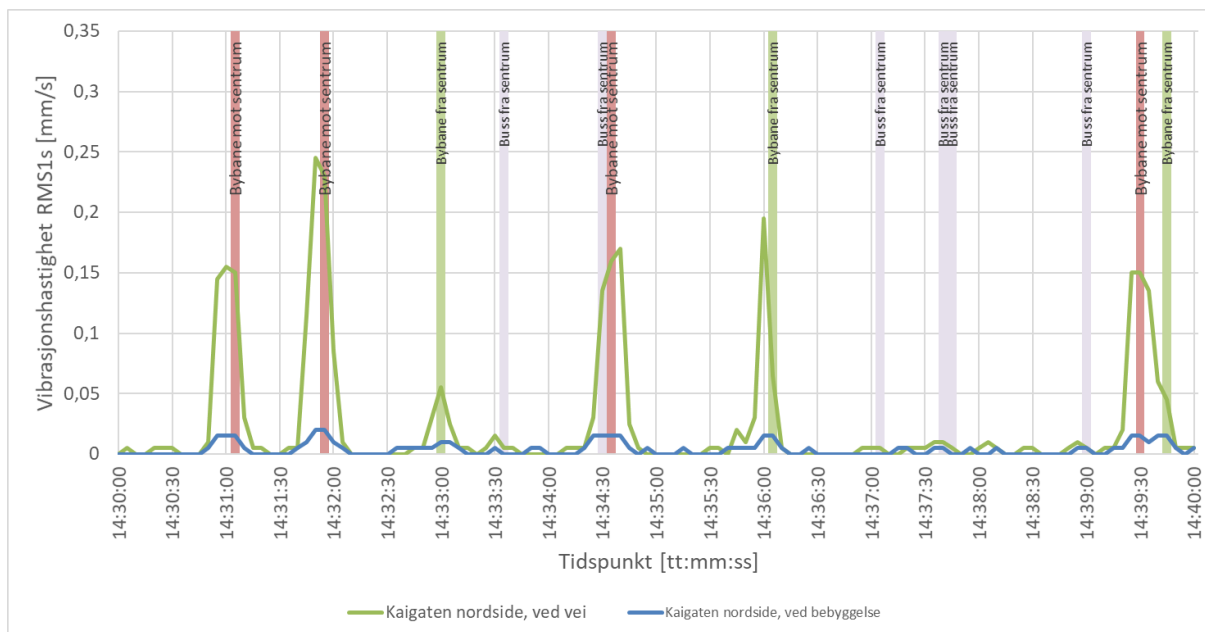
4.1.1 Nordsiden

Figur 5 viser målt vibrasjonshastighet RMS1s i vertikal retning for hele måleperioden i de to målepunktene på nordsiden av Kaigaten. Figuren viser vibrasjonsnivåer som i hovedsak er i størrelse 0,1 – 0,2 mm/s, med enkelte høyere verdier, i målepunktet nær vei/bane. I målepunktet nær bebyggelsen er vibrasjonsnivåene betydelig lavere 0,02 – 0,03 mm/s.



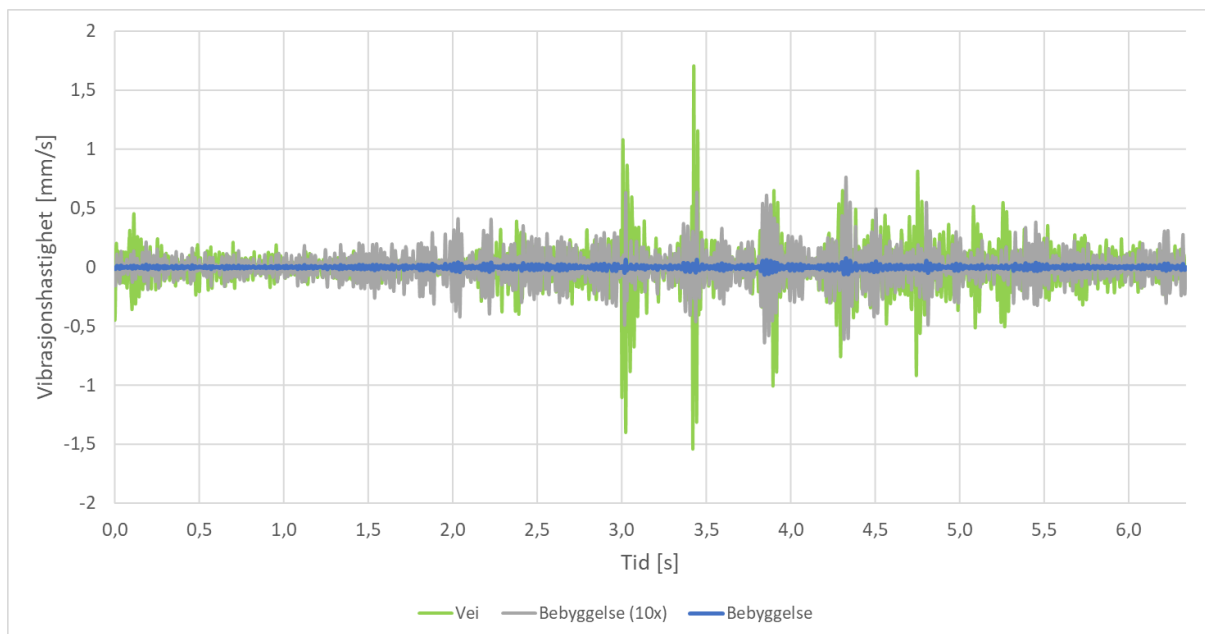
Figur 5: Målt vibrasjonshastighet RMS1 i vertikal retning i målepunkter på nordsiden av Kaigaten, hele måleperioden.

Figur 6 viser tilsvarende målinger som Figur 5, men avgrenset til tidsrommet 14:30 – 14:40. Figuren viser at alle de høyeste vibrasjonsnivåene samsvarer med passeringer av bane. Dette gjelder alle vibrasjonsnivåer av betydning i hele måleperioden. Passeringer av buss i bussfeltet, som ligger på vestsiden av gaten, gir lave vibrasjonsnivåer på østsiden av gaten. Som det fremgår av figuren er vibrasjonene fra banepasseringer betydelig lavere i målepunktet ved bebyggelsen, selv om målepunktet kun ligger i ca. 3,5 meter større avstand fra sporet. Dette skyldes sannsynligvis at målepunktet nærmest gaten er plassert oppå platefundamentet som skinnene ligger på.



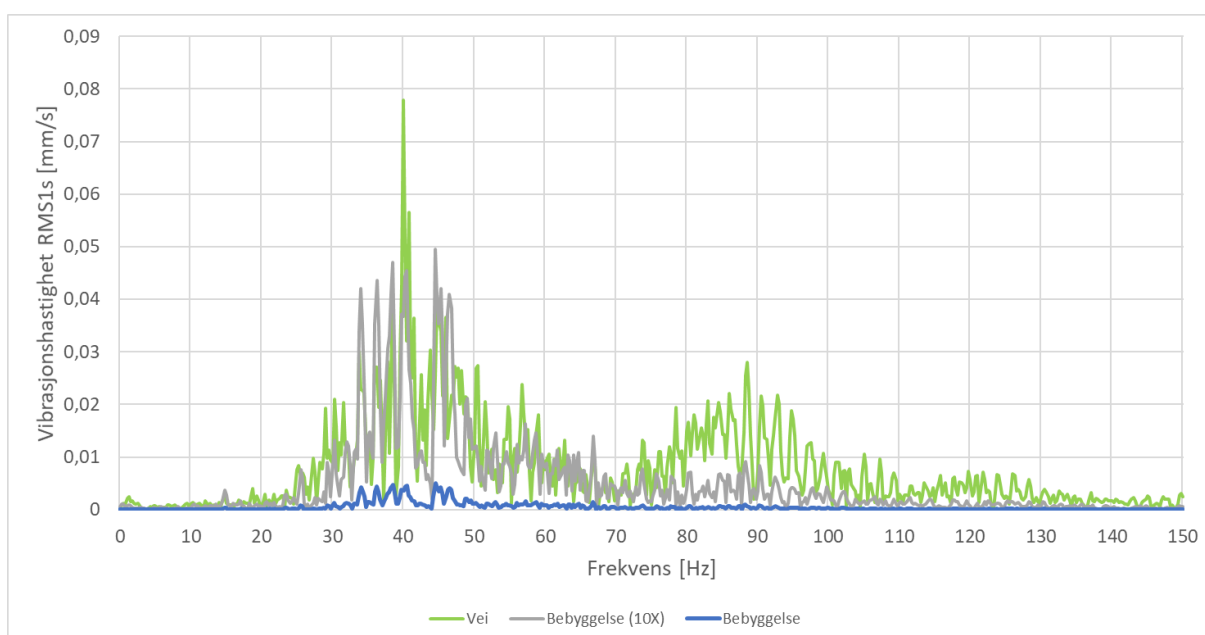
Figur 6: Målt vibrasjonshastighet RMS1 i vertikal retning i målepunkter på nordsiden av Kaigaten, i tidsrommet 14:30 – 14:40.

Figur 7 viser tidsforløp for vibrasjoner fra den andre Bybanepasseringen som fremgår av Figur 6, like før kl. 14:32. Vibrasjonshastighet i målepunkt ved vei er vist med grønt, og hastighet i målepunkt ved bebyggelse i blått. For å bedre vise sammenhengen mellom vibrasjonene i de to målepunktene er det også vist vibrasjonshastighet i målepunkt ved bebyggelse multiplisert med en faktor på 10, vist med grå linje i figuren.



Figur 7: Tidsforløp for vibrasjoner fra banepassering kl. 14:31:44

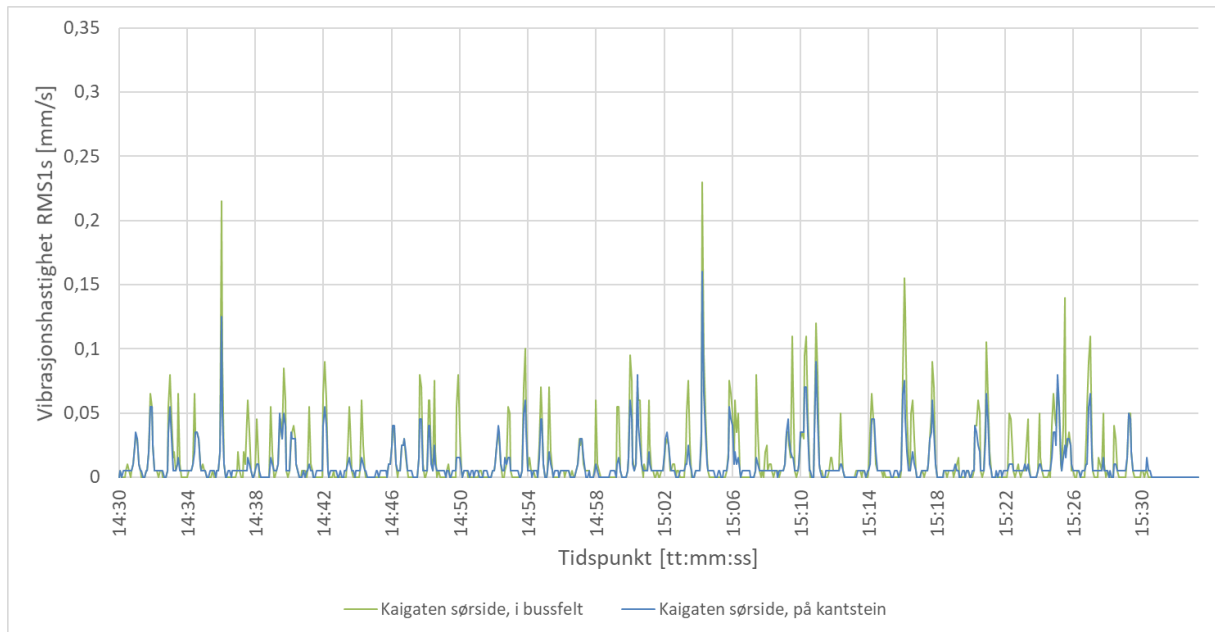
Figur 8 viser en frekvensanalyse av vibrasjonene fra den samme banepasseringen. Også her er det vist resultat fra målepunkt ved bebyggelse multiplisert med en faktor på 10 med grå linje. Både i målepunkt ved vei og målepunkt ved bebyggelse er frekvensområdet for vibrasjonene i hovedsak mellom 30 – 50 Hz. Vibrasjonene i målepunkt ved bebyggelse er betydelig mindre enn i målepunktet ved vei i hele frekvensområdet. Spesielt er den tydelige vibrasjonen ved nøyaktig 40 Hz i målepunktet ved vei redusert betydelig.



Figur 8: Frekvensanalyse av vibrasjoner fra banepassering kl. 14:31:44.

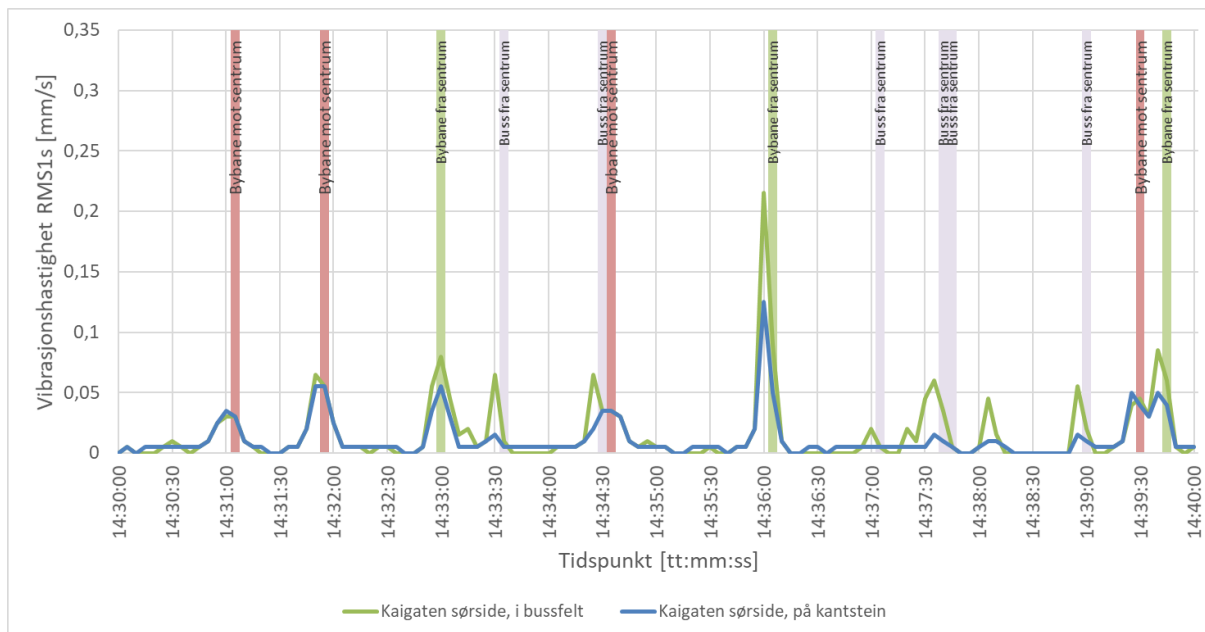
4.1.2 Sørsiden

Figur 9 viser målt vibrasjonshastighet RMS1s i vertikal retning for hele måleperioden i de to målepunktene på sørsiden av Kaigaten. Figuren viser vibrasjonsnivåer som i hovedsak er i størrelse 0,05 – 0,15 mm/s, med enkelte høyere verdier, i målepunktet nærmest veien. I målepunktet på gangstien er vibrasjonsnivåene noe lavere, omkring 0,05 mm/s.



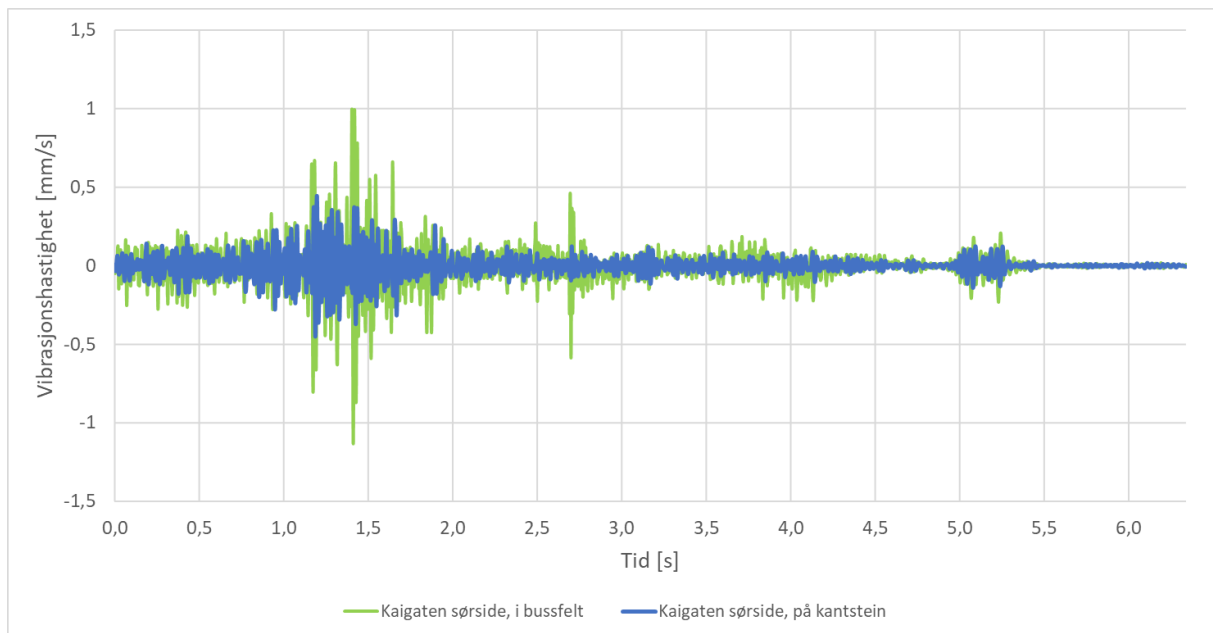
Figur 9: Målt vibrasjonshastighet RMS1 i vertikal retning i målepunkter på sørsiden av Kaigaten, hele måleperioden.

Figur 10 viser tilsvarende målinger som Figur 9, men avgrenset til tidsrommet 14:30 – 14:40. Figuren viser at vibrasjonsnivåene samsvarer med passeringer av både bane og buss. Alle de høyeste nivåene som fremgår av Figur 9, i størrelse opp mot 0,1 mm/s og høyere, skyldes passeringer av bane. Passeringer av buss gir nivåer i størrelse 0,05 mm/s.



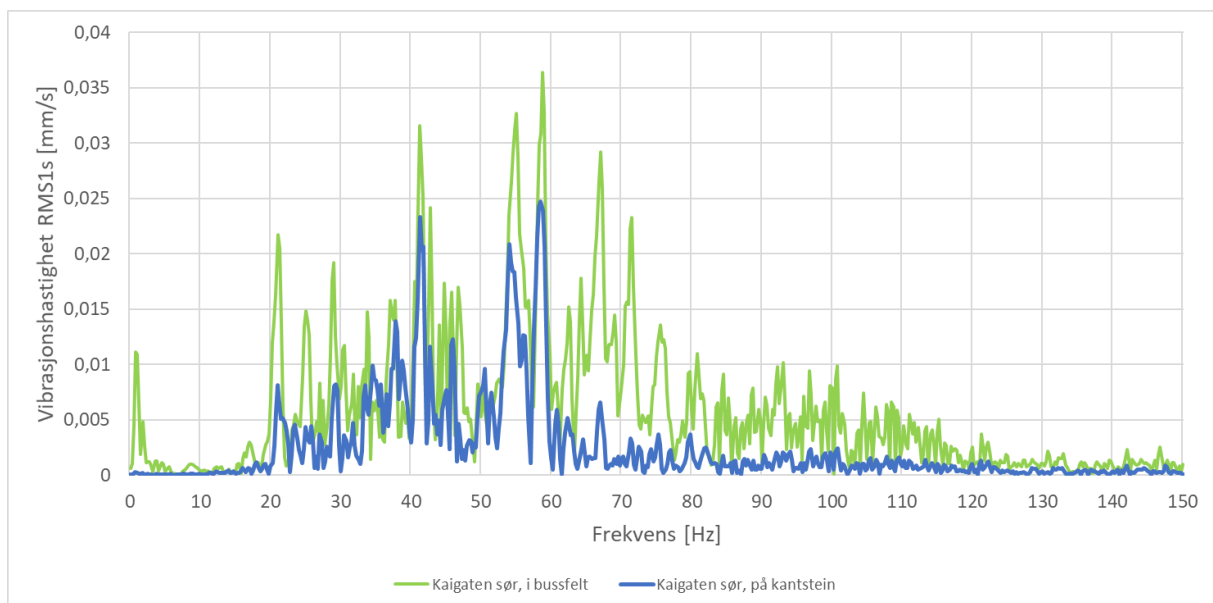
Figur 10: Målt vibrasjonshastighet RMS1 i vertikal retning i målepunkter på sørsiden av Kaigaten, i tidsrommet 14:30 – 14:40.

Figur 11 viser tidsforløp for vibrasjoner i vertikal retning fra banepasseringen med de høyeste vibrasjonsnivåene som fremgår av Figur 10, like før kl. 14:36. Fra tidsforløpet fremgår også det høyeste vibrasjonsnivået (peak) som er høyere enn RMS1s.



Figur 11: Tidsforløp for vibrasjoner fra banepassering kl. 14:35:55.

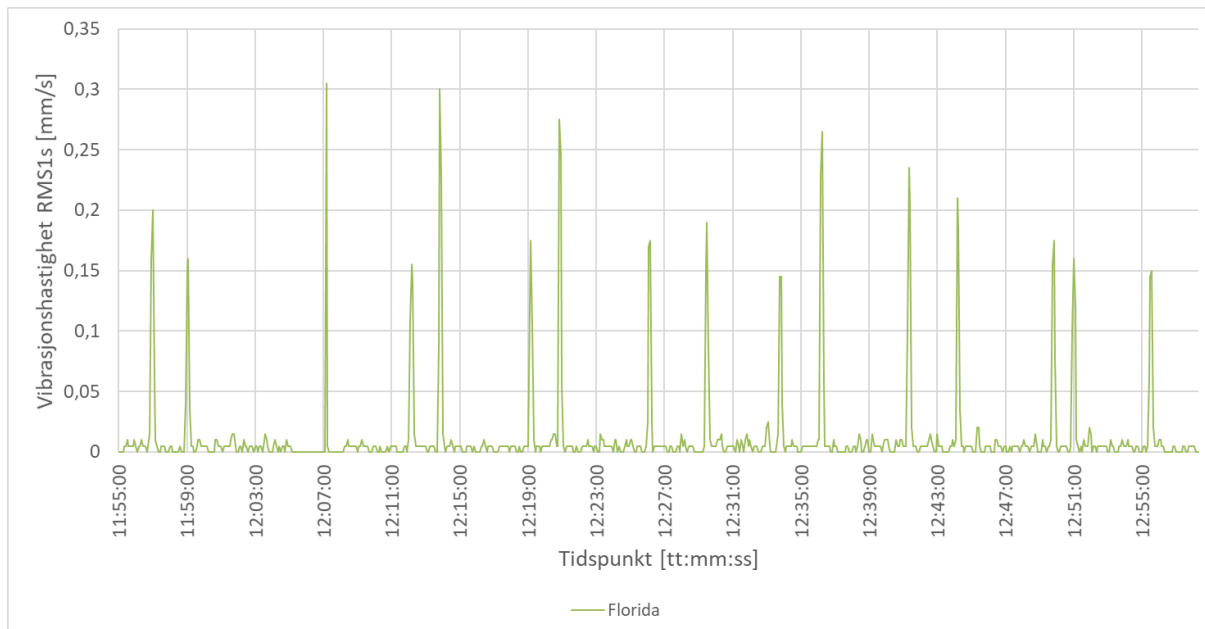
Figur 12 viser frekvensanalyse av vibrasjonene fra den samme passeringen.



Figur 12: Frekvensanalyse av vibrasjoner fra banepassering kl. 14:35:55.

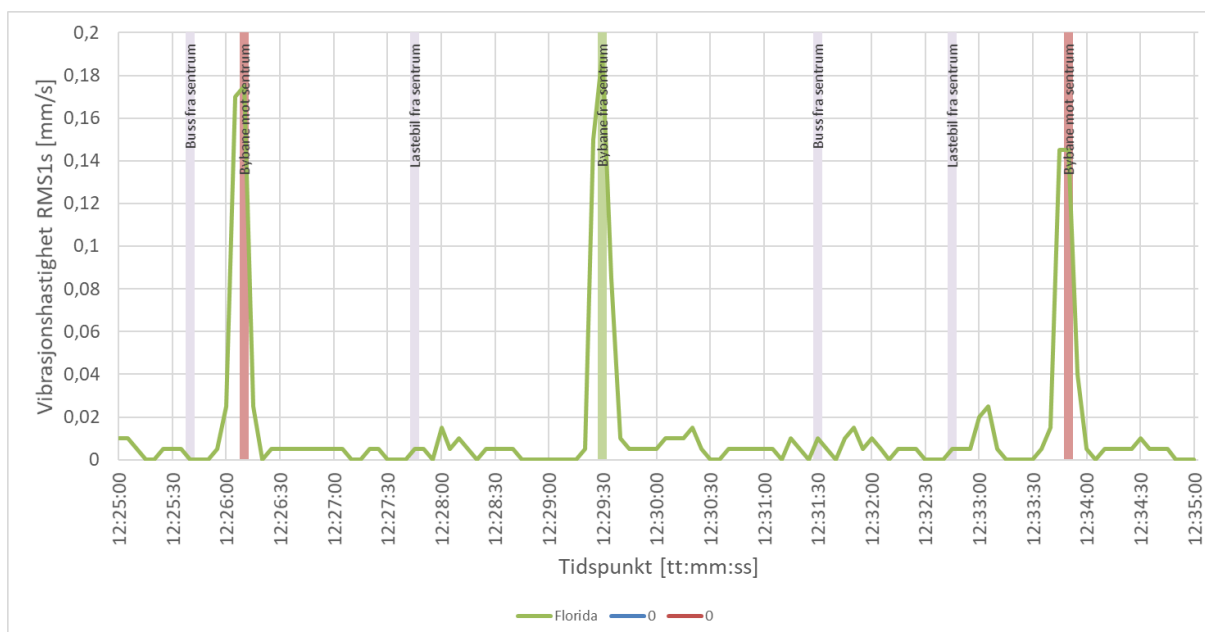
4.2 Florida

Figur 13 viser målt vibrasjonshastighet RMS1s i vertikal retning for hele måleperioden i målepunkt mellom vei og bane på Florida. Målingene viser vibrasjonsnivåer på i størrelse 0,1 – 0,3 mm/s. Alle disse nivåene skyldes passeringer av bane.



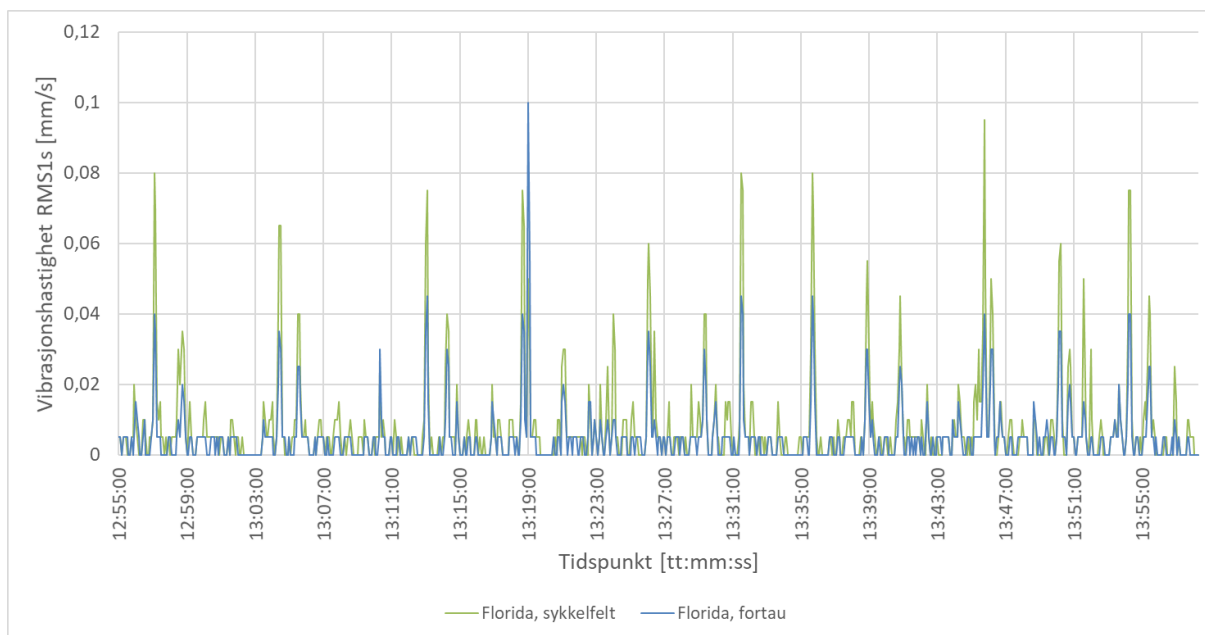
Figur 13: Målt vibrasjonshastighet RMS1s i vertikal retning i målepunkt mellom vei og bane på Florida, hele måleperioden.

Figur 14 viser tilsvarende målinger som Figur 13, men avgrenset til tidsrommet 12:25 – 12:35. Figuren viser at vibrasjonsnivåene samsvarer med passering av bane, og at det er svært lave nivåer fra passering av buss.



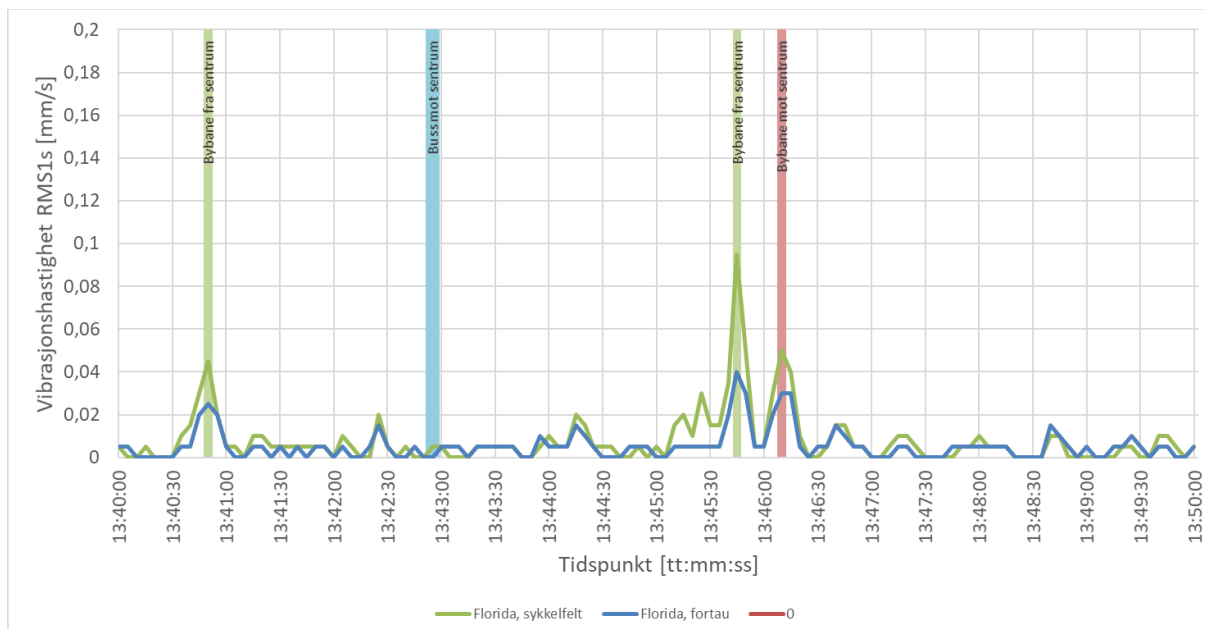
Figur 14: Målt vibrasjonshastighet RMS1s i vertikal retning i målepunkt mellom vei og bane på Florida, i tidsrommet 12:25 – 12:35.

Figur 15 viser målt vibrasjonshastighet RMS1 i vertikal retning for hele måleperioden i målepunktene i sykkelfelt og på fortau på Florida. Målingene viser vibrasjonsnivåer på i størrelse 0,1 – 0,1 mm/s. Også i disse punktene skyldes nivåene passering av bane.



Figur 15: Målt vibrasjonshastighet RMS1 i vertikal retning i målepunkt i sykkelfelt og på fortau på Florida, hele måleperioden.

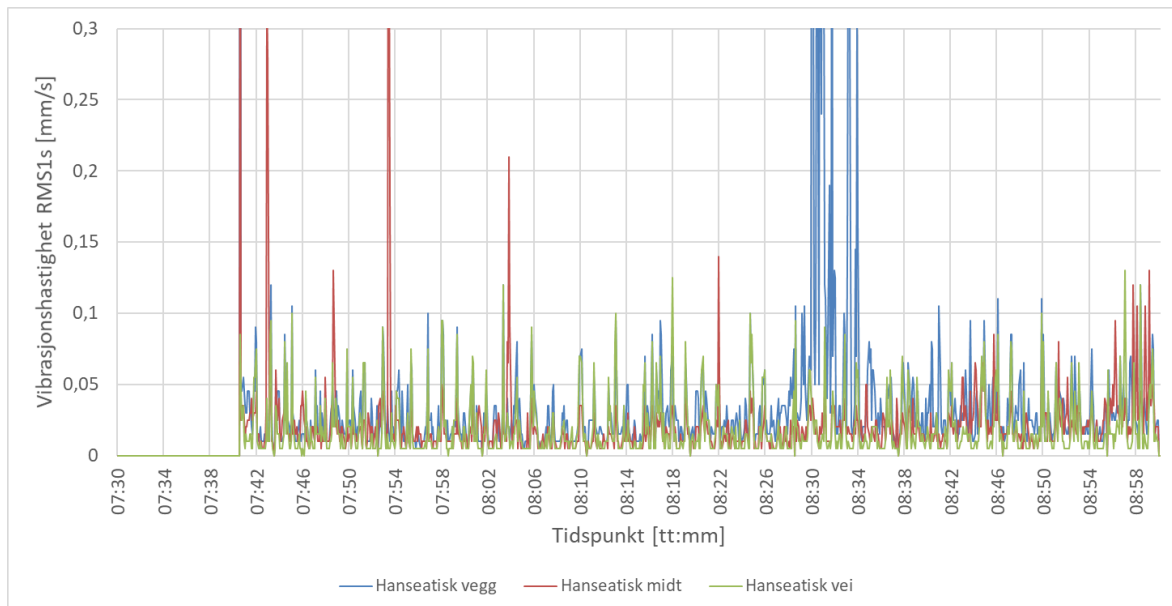
Figur 16 viser tilsvarende målinger som Figur 15, men avgrenset til tidsrommet 13:40 – 13:50. Figuren viser at de høyeste vibrasjonsnivåene samsvarer med passering av bane, mens passering av buss gir svært lave nivåer.



Figur 16: Målt vibrasjonshastighet RMS1 i vertikal retning i målepunkt i sykkelfelt og på fortau på Florida, i tidsrommet 13:40 – 13:50.

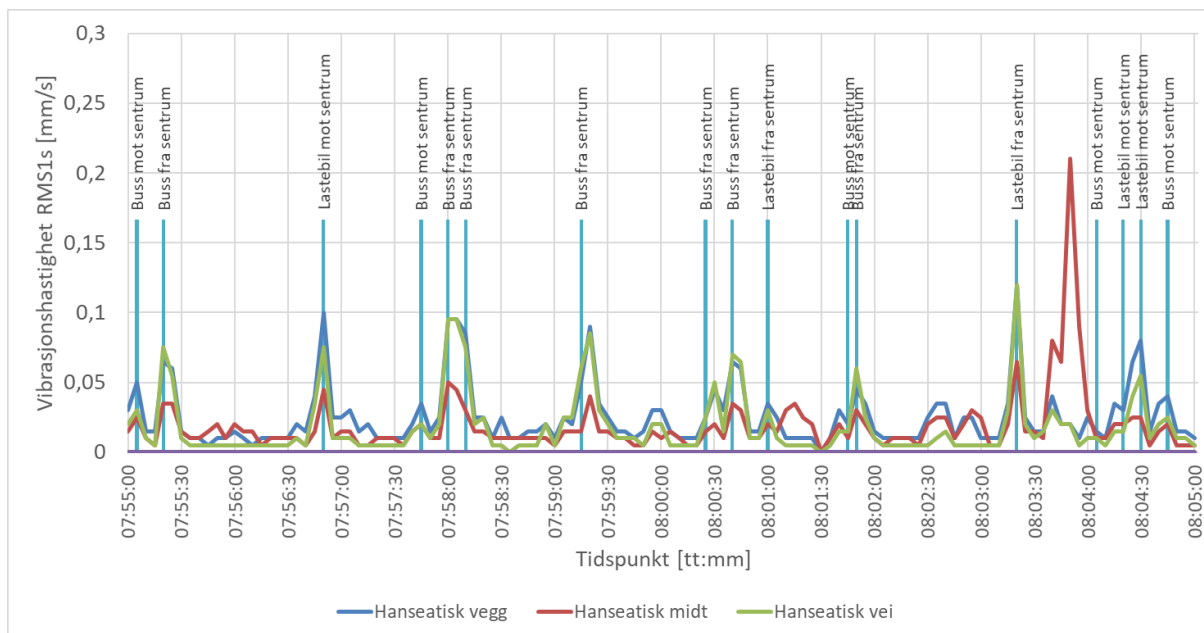
4.3 Hanseatisk museum

Figur 17 viser målt vibrasjonshastighet RMS1s i vertikal retning for hele måleperioden i de tre målepunktene ved Hanseatisk museum. Figuren viser vibrasjonsnivåer som i hovedsak er inntil ca. 0,1 mm/s. I målepunktene *midt* (rød linje) og *vegg* (blå linje) er det tidvis registrert høyere vibrasjonshastigheter, som for eksempel i tidsrommet 08:30 og 08:35 i målepunkt *vegg*. Tidspunkt for disse vibrasjonene samsvarer i liten grad med passeringer av tunge kjøretøy på veien, og målt hastighet er langt større i målepunktene *midt*/*vegg* enn i målepunktet *like* ved veien. Det er derfor svært usannsynlig at disse målingene skyldes veitrafikk. En mer sannsynlig årsak er aktivitet tett på målepunktene.



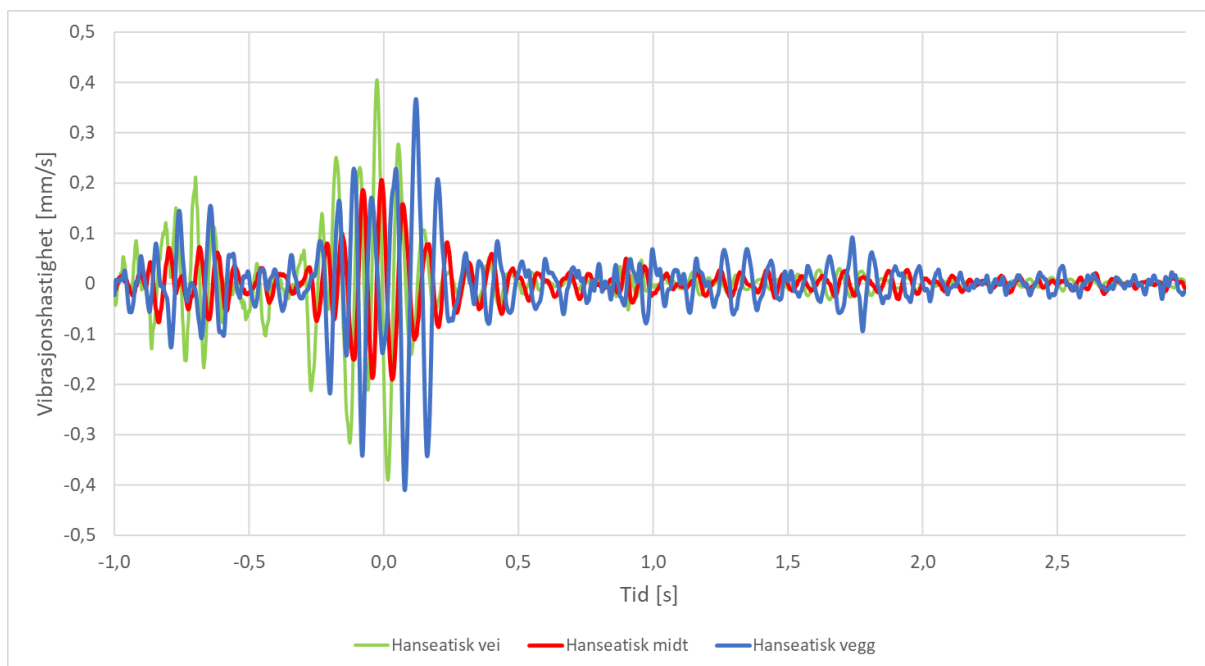
Figur 17: Målt vibrasjonshastighet RMS1 i vertikal retning i målepunkter ved Hanseatisk museum, hele måleperioden.

Figur 18 viser tilsvarende målinger som Figur 17, men avgrenset til tidsrommet 07:55 – 08:05. I denne figuren er også passeringer av tunge kjøretøy markert. Figuren viser at målte vibrasjonsnivåer på inntil ca. 0,1 mm/s i stor grad samsvarer med registrerte passeringer. Det understrekes at passeringstidspunktene er registrert manuelt, og at tidspunktet for noen passeringer kan avvike noe fra de registrerte vibrasjonshendelsene. Figuren viser også at den målte vibrasjonshastigheten på 0,2 mm/s i målepunkt *midt* ca. kl. 08:03:50 ikke samsvarer med passering av kjøretøy eller med vibrasjonsnivå i noen av de to andre målepunktene. Dette er et eksempel på vibrasjonsnivå som er vurdert å skyldes annen aktivitet nær det aktuelle målepunktet.



Figur 18: Målt vibrasjonshastighet RMS1 i vertikal retning i målepunkter ved Hanseatisk museum, i tidsrommet 07:55 – 08:05.

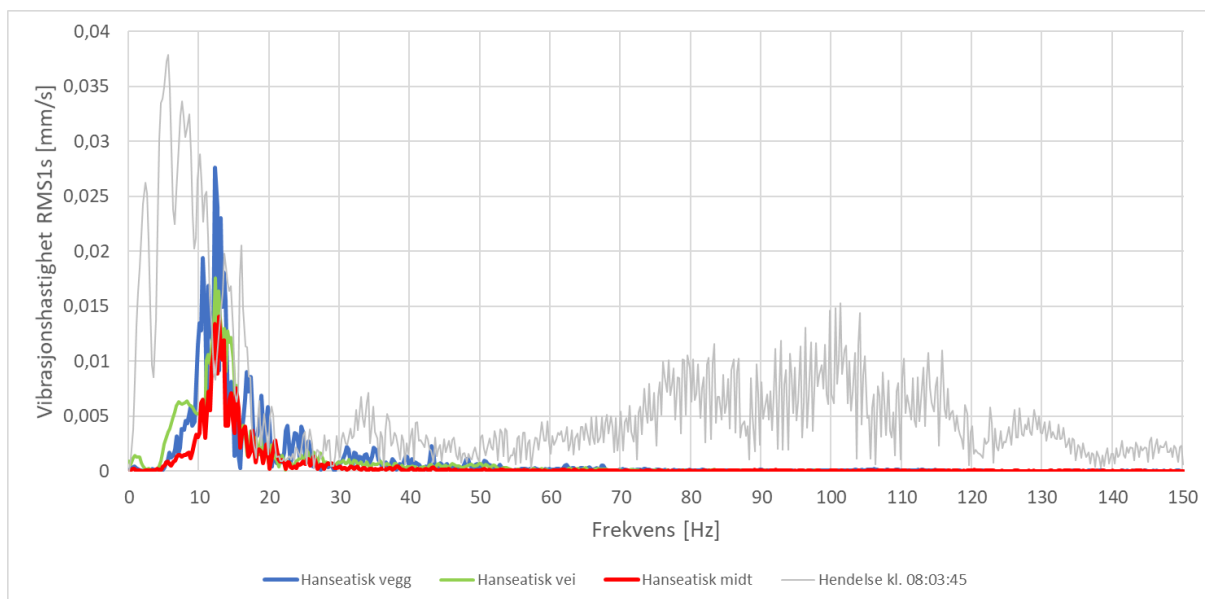
Figur 19 viser tidsforløp for vibrasjoner i vertikal retning fra passering av lastebil kl. 08:03:15, som er passeringen med høyest vibrasjonsnivå i Figur 18. Fra tidsforløpet fremgår også det høyeste vibrasjonsnivået (peak) som er høyere enn RMS1s.



Figur 19: Tidsforløp for vibrasjoner fra passering av lastebil ved Hanseatisk museum kl. 08:03:15

Figur 20 viser frekvensanalyse av vibrasjoner i vertikal retning fra den samme passeringen. Figuren viser at vibrasjonene i hovedsak er i frekvensområdet 10 – 15 Hz. Vibrasjonene er altså mer lavfrekvente enn vibrasjonene i Kaigaten.

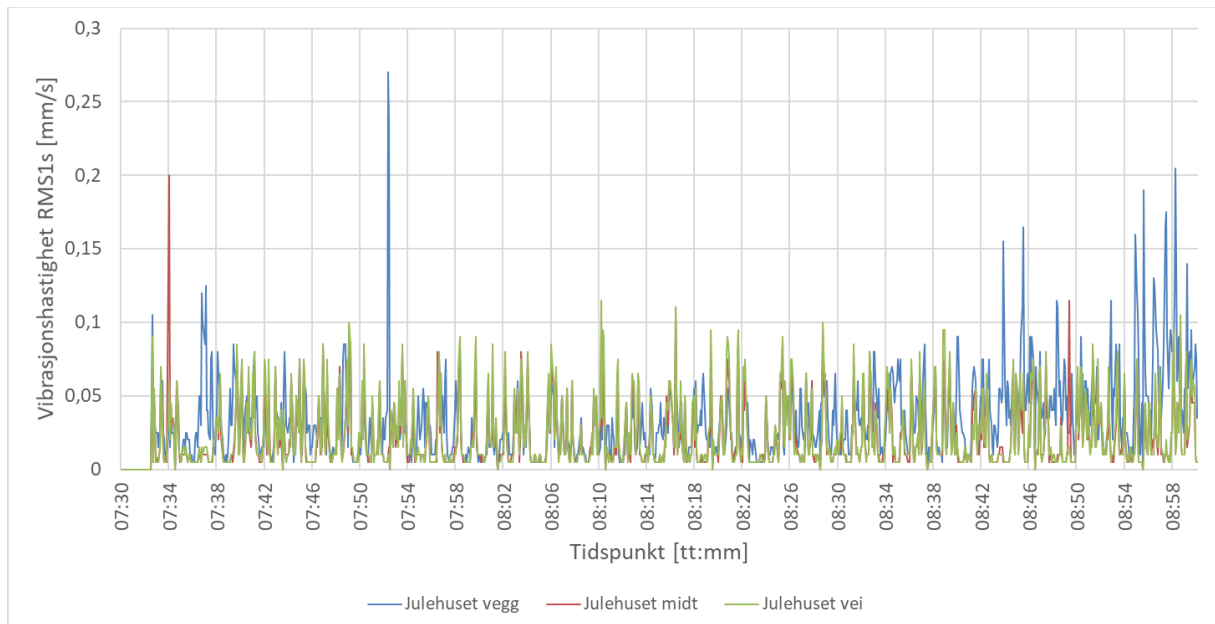
I figuren er det også til sammenligning inkludert frekvensanalyse av vibrasjonshendelsen i målepunkt *midt* like før kl. 08:04. Som figuren viser har vibrasjonene fra denne hendelsen et markant forskjellig frekvensspekter, noe som tyder på en annen kilde.



Figur 20: Frekvensanalyse av vibrasjoner fra passering av lastebil ved Hanseatisk museum kl. 08:03:15

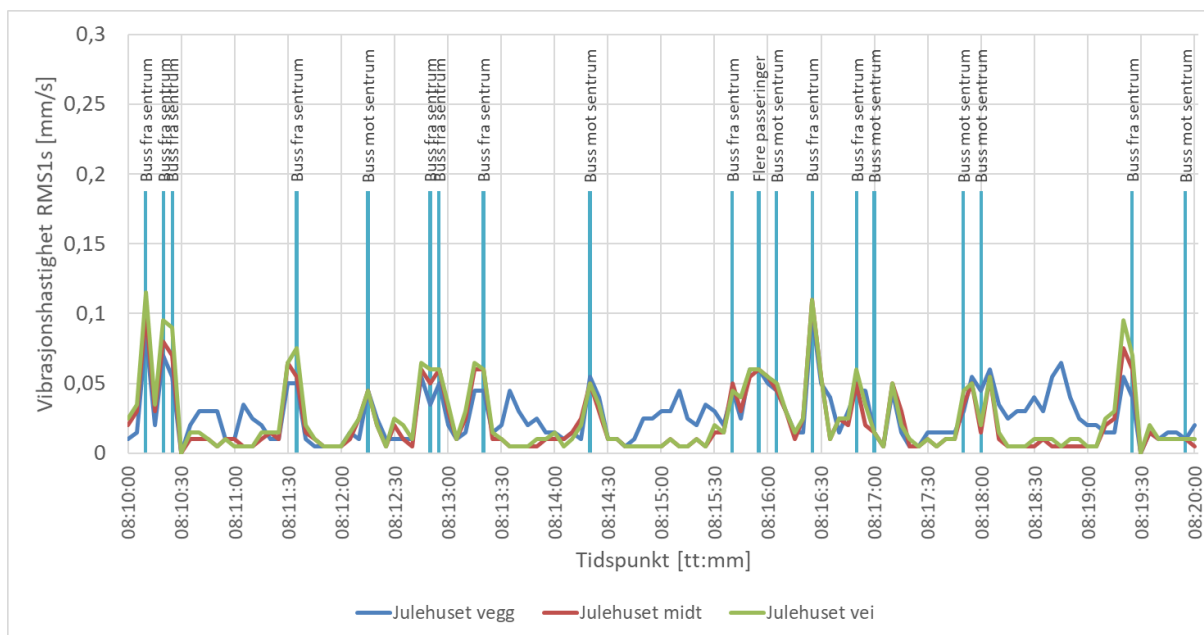
4.4 Julehuset

Figur 21 viser målt vibrasjonshastighet RMS1s i vertikal retning for hele måleperioden i de tre målepunktene ved Julehuset. Figuren viser vibrasjonsnivåer som i hovedsak er inntil ca. 0,1 mm/s. Tilsvarende som i målepunktene ved Hanseatisk museum er det i målepunktene *vegg* og *midt* registrert noen vibrasjonsnivåer som er vurdert å ikke skyldes veitrafikk. Dette gjelder spesielt i målepunkt *vegg* i slutten av måleperioden.



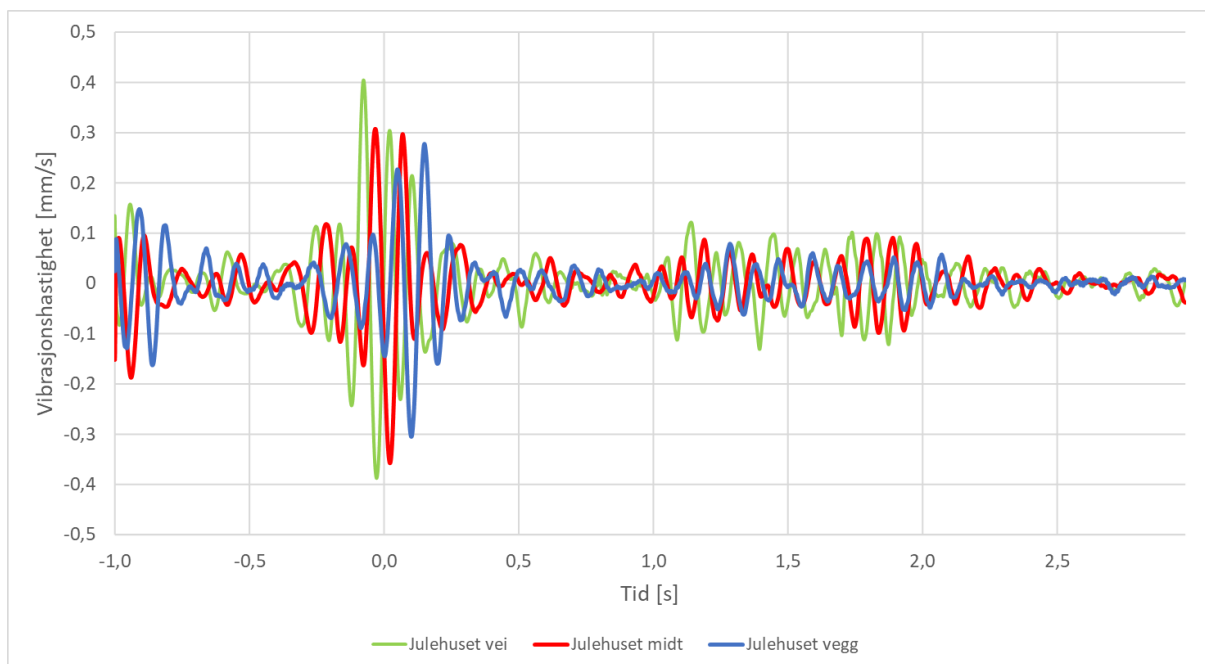
Figur 21: Målt vibrasjonshastighet RMS1 i vertikal retning i målepunkter ved Julehuset, hele måleperioden.

Figur 22 viser tilsvarende målinger som Figur 21, men avgrenset til tidsrommet 08:10 – 08:20. Passeringer av tunge kjøretøy er også markert i figuren. Figuren viser at målte vibrasjonsnivåer på inntil ca. 0,1 mm/s i stor grad samsvarer med registrerte passeringer.



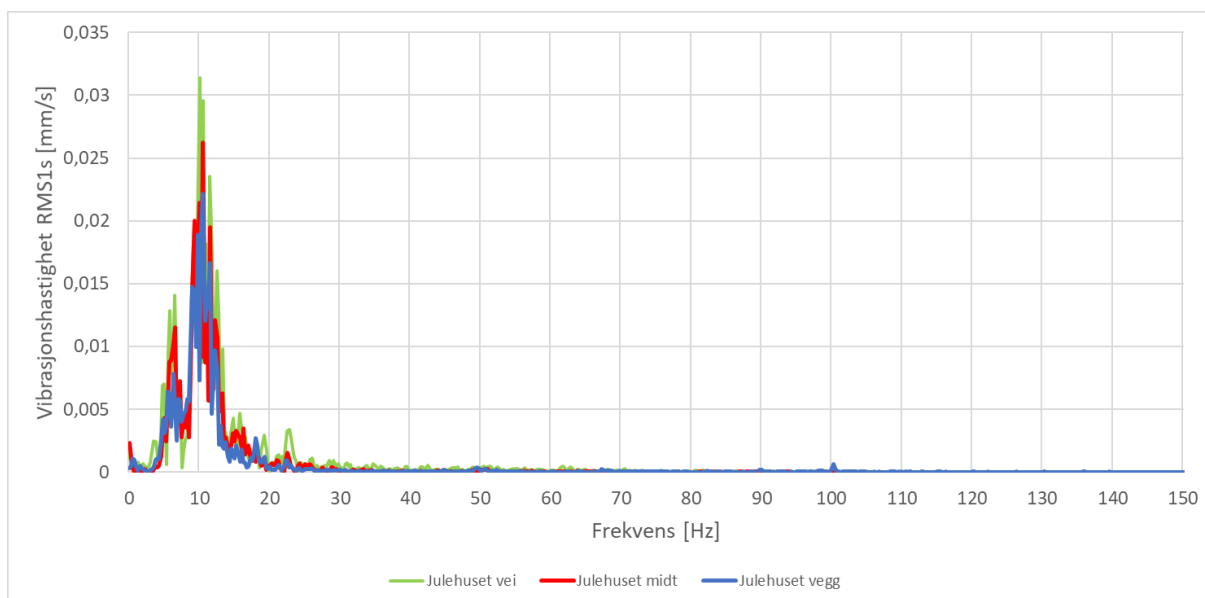
Figur 22: Målt vibrasjonshastighet RMS1 i vertikal retning i målepunkter ved Julehuset, i tidsrommet 08:10 – 08:20

Figur 23 viser tidsforløp for vibrasjoner i vertikal retning fra den første busspasseringen vist i Figur 22, kl. 08:03:05. Fra tidsforløpet fremgår også det høyeste vibrasjonsnivået (peak) som er høyere enn RMS1s.



Figur 23: Tidsforløp for vibrasjoner i vertikal retning for passering av buss ved Julehuset kl. 08:10:05

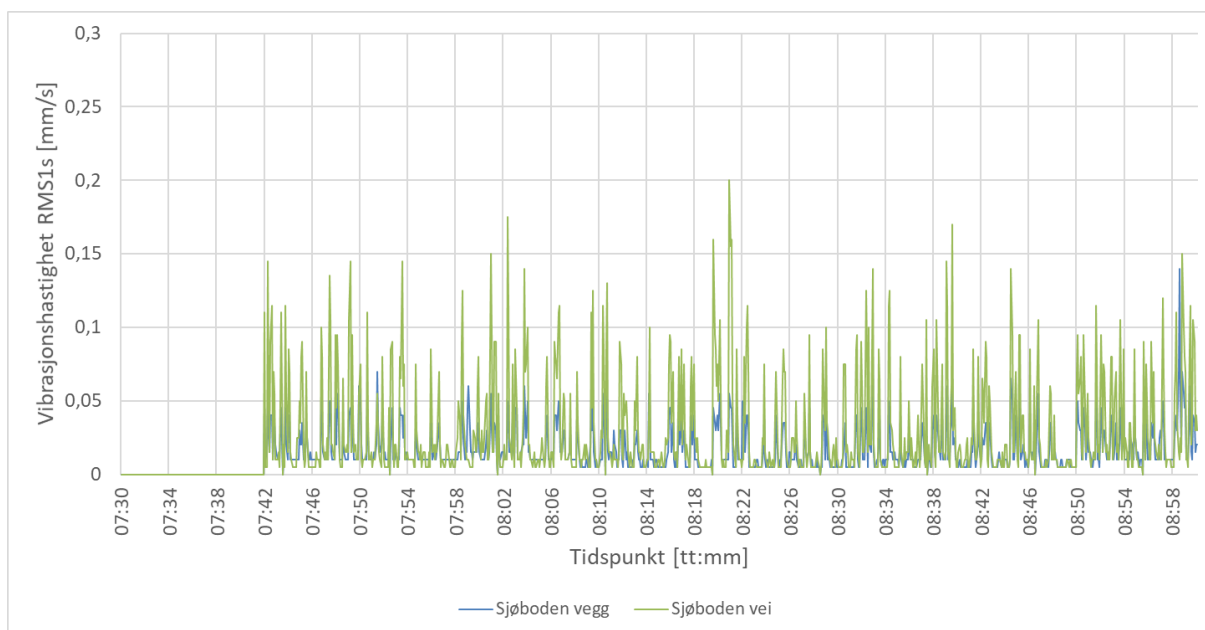
Figur 24 viser frekvensanalyse av vibrasjoner i vertikal retning fra den samme passeringen. Frekvensområdet er omtrent det samme som ved Hanseatisk museum, 10 – 15 Hz.



Figur 24: Frekvensanalyse av vertikale vibrasjoner fra passering av buss ved Julehuset kl. 08:10:05

4.5 Sjøboden

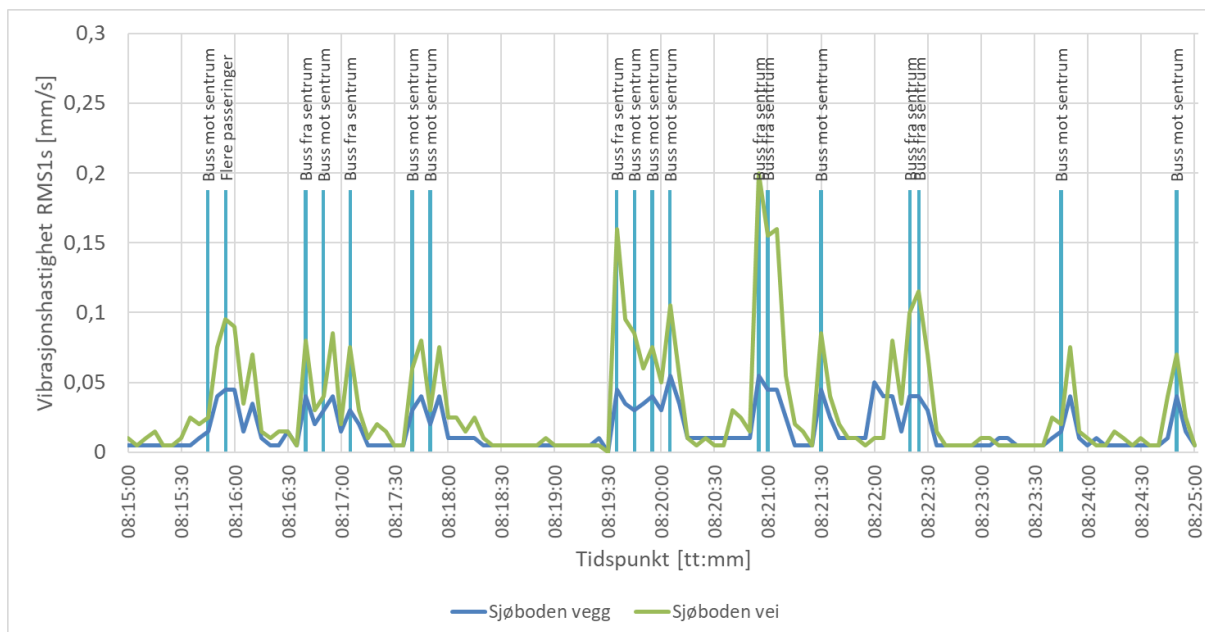
Figur 25 viser målt vibrasjonshastighet RMS1s i vertikal retning for hele måleperioden i målepunktene ved Sjøboden. På grunn av tekniske utfordringer med måler i målepunkt *midt* er det ikke vist data for dette målepunktet. Figuren viser vibrasjonsnivåer som for det mest er inntil ca. 0,1 mm/s, men også noen høyere nivåer i størrelse 0,1 – 0,2 mm/s. Disse høyere nivåene samsvarer med passeringer av tunge kjøretøy. Det er altså registrert høyere vibrasjonsnivåer i målepunkt nær vegen ved Sjøboden enn i tilsvarende målepunkt ved Hanseatisk museum, Julehuset eller Bugaarden.



Figur 25: Målt vibrasjonshastighet RMS1 i vertikal retning i målepunkter ved Sjøboden, hele måleperioden.

Figur 26 viser tilsvarende målinger som Figur 25, men avgrenset til tidsrommet 08:15 – 08:25. Passeringer av tunge kjøretøy er også markert i figuren. Figuren viser at målte vibrasjonsnivåer på inntil ca. 0,1-0,2 mm/s i målepunkt ved veien i stor grad samsvarer med registrerte passeringer. Nivåene i målepunkt ved vegg er tydelig lavere, med verdier på ca. 0,05 mm/s.

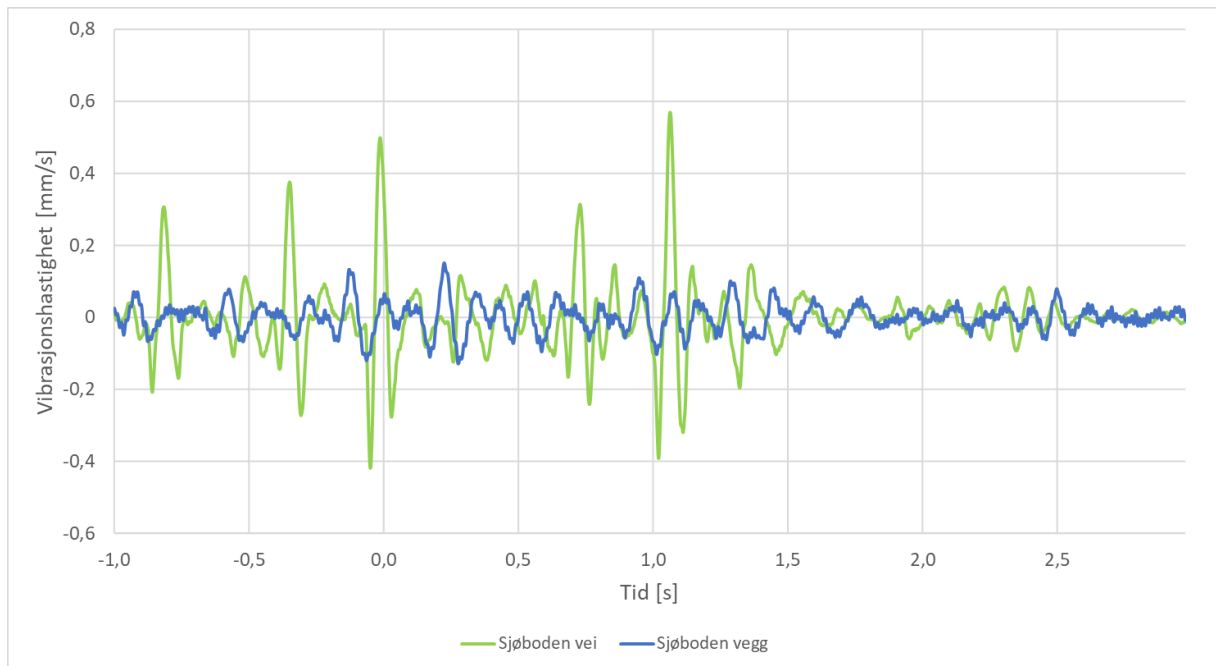
Det er altså registrert høyere vibrasjonsnivåer i målepunkt nær vegen ved Sjøboden enn i tilsvarende målepunkt ved Hanseatisk museum, Julehuset eller Bugaarden. En mulig årsak til dette er at det fartshump i nærheten av målepunktet. Målepunktet ved vegg ved Sjøboden viser imidlertid ikke høyere nivåer enn tilsvarende målepunkter på de andre målestedene.



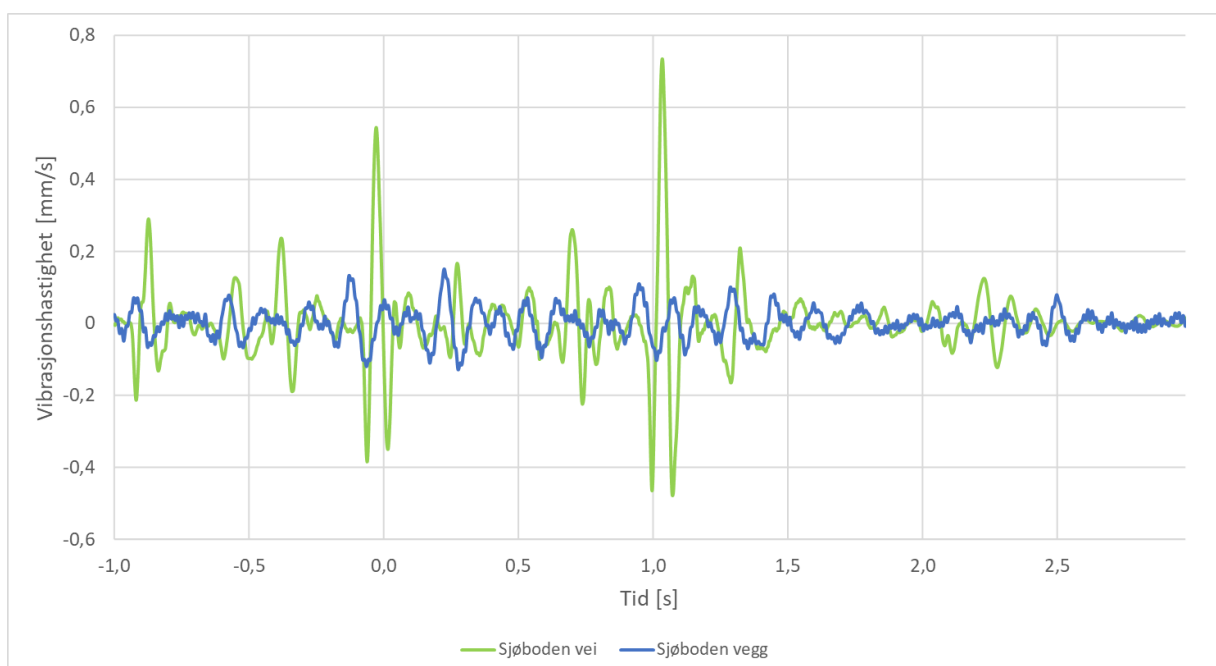
Figur 26: Målt vibrasjonshastighet RMS1 i vertikal retning i målepunkter ved Sjøboden, i tidsperioden 08:15 - 08:25

Figur 27 viser tidsforløp for vibrasjoner i vertikal retning fra busspassering kl. 08:19:31. Fra tidsforløpet fremgår også det høyeste vibrasjonsnivået (peak) som er høyere enn RMS1s.

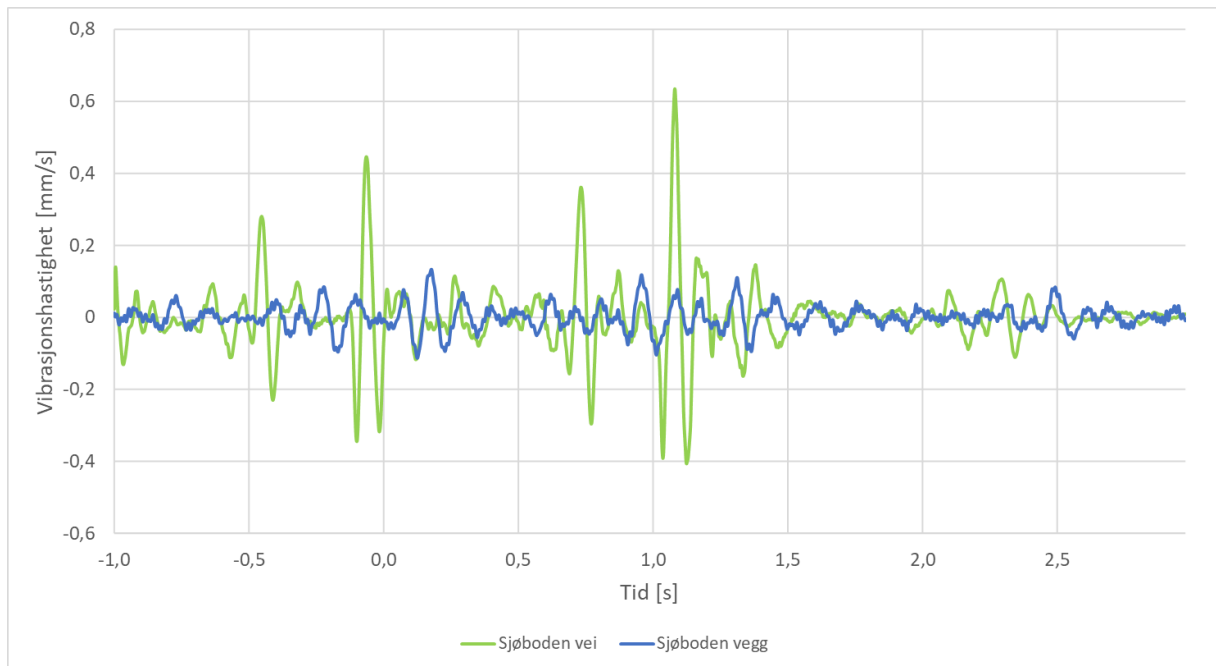
I tidsforløpet vises at de høyeste vibrasjonsnivåene i målepunktet ved veien inntreffer etter ca. 0 s og ca. 1 s. Dette kan indikere at fartshumpen ved Sjøboden er årsak til noe høyere vibrasjonsnivåer dette målepunktet, som nevnt i forrige avsnitt. Med akselavstand på ca. 6 m vil en hastighet på ca. 20 km/t gi et tidsintervall på ca. 1 s mellom passering av første og andre hjulsett. Det er funnet tilsvarende tidsforløp for flere av hendelsene med høyest vibrasjonsnivå i målepunktet ved veien. To eksempler er vist i Figur 28 og Figur 29, for passeringer henholdsvis 07:42:02 og 07:49:10. Tydelige topper i vibrasjonsnivå vises ikke i målepunktet ved vegg. Dette kan tyde på at vibrasjoner som oppstår ved passering av fartsdump ikke forplantes i stor grad fra veien og inn til veggen.



Figur 27: Tidsforløp for vibrasjoner i vertikal retning for passering av buss ved Sjøboden kl. 08:19:31.

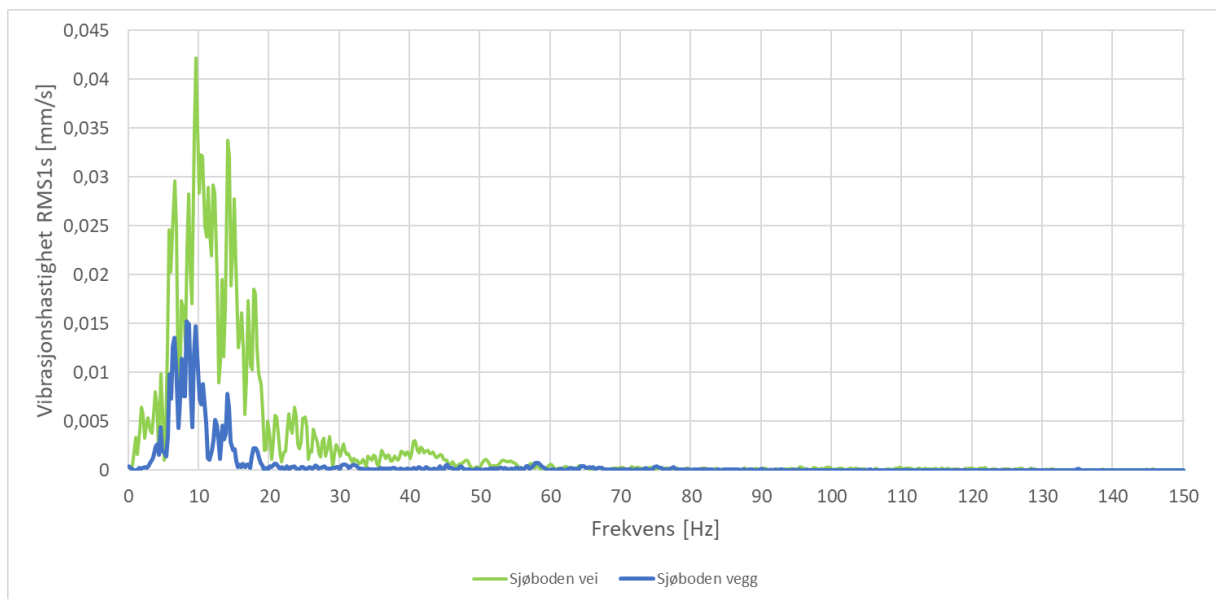


Figur 28: Tidsforløp for vibrasjoner i vertikal retning for passering av buss ved Sjøboden kl. 07:42:02



Figur 29: Tidsforløp for vibrasjoner i vertikal retning for passering av buss ved Sjøboden kl. 07:49:10

Figur 30 viser frekvensanalyse for vibrasjoner i vertikal retning for passeringen kl. 08:19:31.

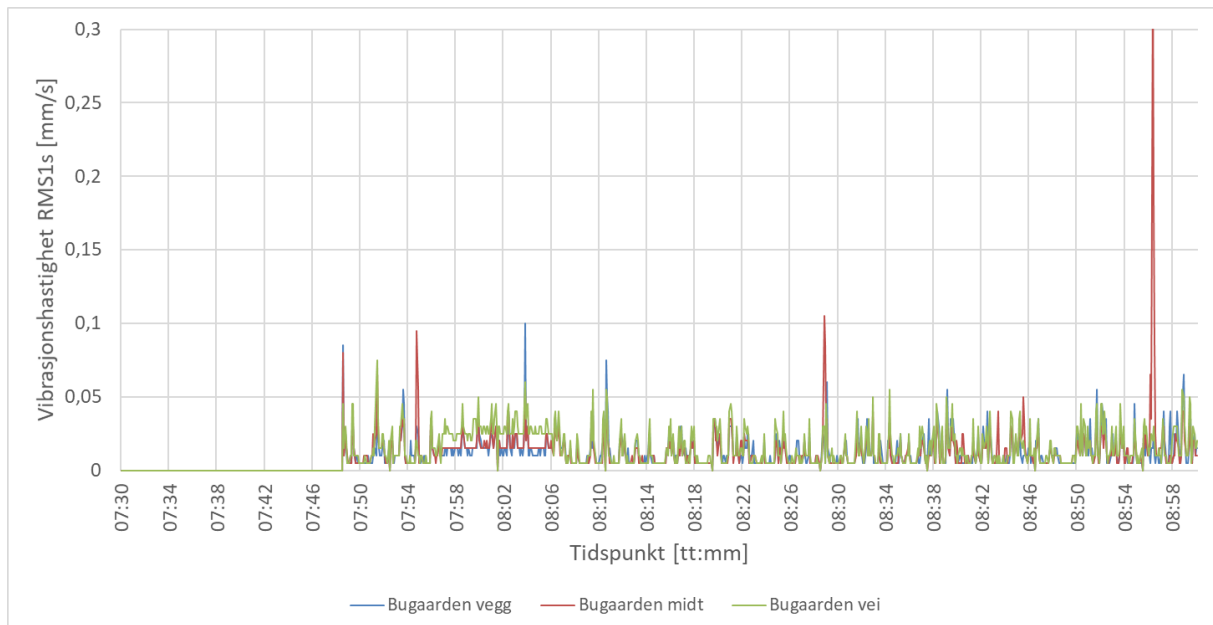


Figur 30: Frekvensanalyse for vibrasjoner i vertikal retning for passering av buss ved Sjøboden kl. 08:19:31.

4.6 Bugaarden

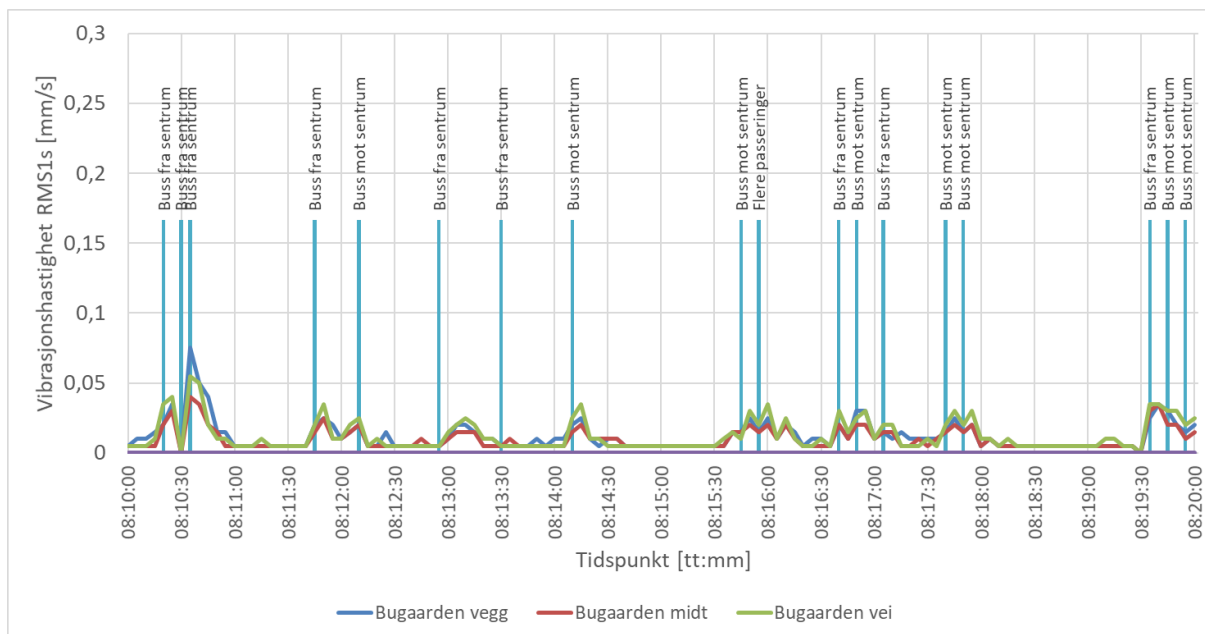
Figur 31 viser målt vibrasjonshastighet RMS1s i vertikal retning for hele måleperioden i de tre målepunktene ved Bugaarden. Figuren viser at vibrasjonsnivåer som i hovedsak er inntil 0,05 mm/s. Også i målepunktene ved Bugaarden er det registrert enkelte høyere vibrasjonsnivåer i målepunktene ved vegg og midt som er vurdert å ikke skyldes veitrafikk.

I tidsrommet 07:57 til 08:08 er det en tydelig langvarig hendelse med vibrasjonsnivåer i samme størrelsesorden som passeringer av tunge kjøretøy på vei. Disse vibrasjonsnivåene skyldes tråleren Hordagut, som la fra kai i dette tidsrommet.



Figur 31: Målt vibrasjonshastighet RMS1 i vertikal retning i målepunkter ved Bugaarden, hele måleperioden

Figur 32 viser tilsvarende målinger som Figur 31 men avgrenset til tidsrommet 08:10 – 08:20. I denne figuren er passeringer av tunge kjøretøy markert. Det er ikke registrert egne passeringstidspunkter ved Bugaarden, slik at det er passeringstidspunktene ved Sjøboden som er markert. Dette gir noe større avvik mellom tidspunkt for passeringer og registrerte vibrasjonshendelser. Det er likevel tydelig samsvar mellom passeringstidspunktene og vibrasjonsnivåer på inntil ca. 0,05 mm/s.



Figur 32: Målt vibrasjonshastighet RMS1 i vertikal retning i målepunkter ved Bugaarden, i tidsrommet 08:10 – 08:20

I målingene ved Bugaarden er det på grunn av lave vibrasjonsnivåer ikke registrert transienter som samsvarer med passeringer av busser eller andre tunge kjøretøy. Det antas at maksimalt vibrasjonsnivå er ca. 4 ganger større enn RMS1s, tilsvarende som de andre målepunktene på Bryggen. Det er også sannsynlig at frekvensspekter for vibrasjonene er tilsvarende som de andre målepunktene på Bryggen.

En mulig årsak til lavere vibrasjonsnivåer er at det ikke er kumlokk eller lignende ujevnheter i veibanen i nærheten av målestedet. I tillegg er det bussholdeplass like ved målestedet, noe som kan gi lav hastighet for mange busser.

5 Oppsummering

Tabell 5 oppsummerer vibrasjonsnivåer som, basert på de utførte vibrasjonsmålingene, er typiske for passeringer av buss langs Bryggen. Tabell 6 oppsummerer vibrasjonsnivåer som er typiske for passeringer av buss og bane i Kaigaten. Tabell 7 oppsummerer vibrasjonsnivåer som er typiske for passeringer av buss og bane på Florida. Enkeltpasseringer kan gi noe høyere nivåer enn de nivåene som er oppgitt som typiske.

Tabell 5: Typiske vibrasjonsnivåer på Bryggen, alle tall i mm/s.

Målested	Vei		Midt		Vegg	
	RMS1	Peak	RMS1	Peak	RMS1	Peak
Hanseatisk museum	Ca. 0,1	Ca. 0,4	Ca. 0,05	Ca. 0,2	Ca. 0,1	Ca. 0,4
Julehuset	0,05 – 0,1	0,2-0,4	0,05 – 0,1	0,2-0,4	0,05 – 0,1	0,2-0,4
Sjøboden	0,08 – 0,15	0,5-0,8	0,05 – 0,1	Ca. 0,2	Ca. 0,05	Ca. 0,15
Bugaarden	0,04 – 0,05	Ca. 0,2	0,02 – 0,03	0,1-0,15	0,02 – 0,03	0,1-0,15

Tabell 6: Typiske vibrasjonsnivåer i Kaigaten, alle tall i mm/s.

Målepunkt (avstand)	Sted	Uten sporveksler nordside		Uten sporveksler sørside	
		RMS1	Peak	RMS1	Peak
Kantstein (Ca. 3,5 m)	Buss	<0,02	<0,1	Ca. 0,05	Ca. 0,2
	Bane	0,1-0,2	1-1,5	0,05-0,15	Ca. 1
Fortau (Ca. 7 m)	Buss	<0,02	<0,1	<0,02	<0,1
	Bane	<0,02	<0,1	0,04-0,08	0,5
Park (Ca. 15 m)	Buss	-	-	-	-
	Bane	-	-	-	-

Tabell 7: Typiske vibrasjonsnivåer på Florida, alle tall i mm/s.

Målepunkt	Sted	Florida	
		RMS1	Peak
Mellom vei og bane	Buss	<0,02	<0,1
	Bane	0,1-0,3	Ca. 1
I sykkelfelt	Buss	<0,02	<0,1
	Bane	0,04-0,08	Ca. 0,2
På fortau	Buss	<0,02	<0,1
	Bane	0,02-0,04	Ca. 0,1