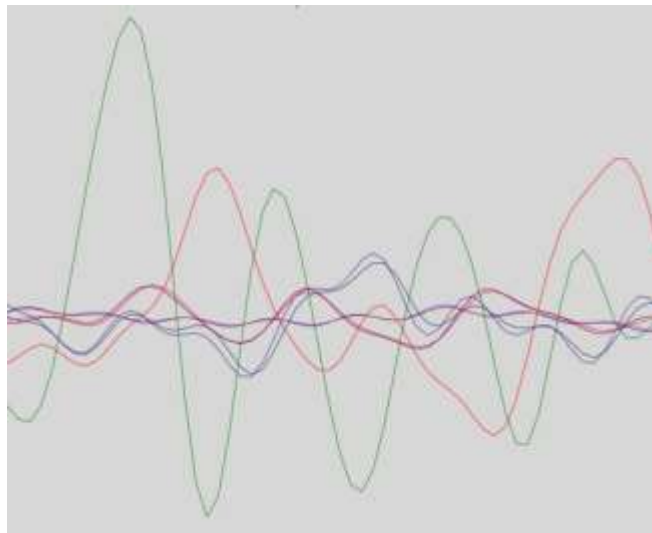


VAASAN KAUPUNKI

MUSEOKATU 11, VAASA TÄRINÄSELVITYS

20.4.2020



312188/21

Sisällysluettelo

1. Johdanto.....	3
2. Lähtötietoja.....	3
3. Kiskoliikenteen tärinät.....	4
4. Suunnittelualan kuvaus.....	5
5. Numeerinen analyysi	6
5.1. Laskentamenettelyn kuvaus	6
5.2. Laskenta-asetukset ja laskennassa käytetyt oletukset	6
5.3. Laskennan tulokset.....	7
6. Johtopäätökset	10
7. Kirjallisuutta	10

1. Johdanto

Työssä on arvioitu raideliikenteen värinävaikutuksia Vaasassa Vaskiluodon radan varteen sijoittuvan Museokatu 11 hankkeen alueella. Toimeksianto oli alun perin tarkoitus toteuttaa värinämittauksiin perustuvana selvityksenä. Junaliikenne kyseisellä rataosuudella on nykyisessä tilanteessa vähäistä ja satunnaista, minkä vuoksi selvitys perustuu laskennalliseen arviointiin.

Hyvänä käytäntönä kaavaslostuksissa on perusteltua ottaa huomioon seuraavaa: *Värähtelymittausten perusteella rakentamisen kannalta huomioitava värinäalue ulottuu radan varressa noin 70 ... 100 metrin etäisyydelle lähimmästä raiteesta. Näillä alueilla jatkosuunnittelussa tulee varmistaa, ettei rakennusten runko- ja välipohjarakenteiden resonanssitajuuksia mitoiteta maaperässä esiintyvien värähtelyhuippujen kohdalle /4/.* Tässä selvityksessä tarkastellaan rataosuuden junaliikenteen värinävaikutuksia.

Rautatieliikenteen värinävaikutusten arviointi perustuu tässä selvityksessä osaltaan muissa projekteissa tehtyjen värinämittauksien tuloksiin sekä Museokatu 11 kohteeseen laadittuun värähtelytasojen laskennalliseen analyysiin. Värähtelyn laskennallisessa arvioinnissa otetaan huomioon junaliikenteen aiheuttaman värähtelyn lähtötaso (heräte), raiteiden etäisyys rakennuksista sekä maaperän ominaisuudet värähtelyn etenemisreitillä.

Mauri Koskinen on tehnyt laskennalliset tarkastelut värinän etenemisestä sekä laatinut tämän raportin. Ilkka Niskanen on tarkistanut raportin.

2. Lähtötietoja

Liikenneperäisen värinän ohjearvot perustuvat mitatun värinän heilahdusnopeuden v taa-juuspainotetun tehollisarvon perusteella tilastollisesti määritettyyn tunnuslukuun $v_{w,95}$ [mm/s]. Suositus asuinrakennusten ja niitä vastaavien asuintilojen värähtelyluokituksista /1/ on esitetty taulukossa 1. Luokitus perustuu ihmisen kokeman värinän häiritsevyyteen. Kun kyseessä on muu kuin asumistarkoitus, tavoiteraja voi olla kaksinkertainen.

Taulukko 1. Suositus asuinrakennusten ja vastaavien asuintilojen värähtelyluokituksista /1/.

Värähtelyluokka	Kuvaus värähtelyolosuhteista	$v_{w,95}$ [mm/s]
A	Hyvät asuinolosuhteet. <i>Ihmiset eivät yleensä havaitse värähtelyä.</i>	$\leq 0,10$
B	Suhteellisen hyvät olosuhteet. <i>Ihmiset voivat havaita värähtelyä, mutta ne eivät ole häiritseviä.</i>	$\leq 0,15$
C	Suositus uusien rakennusten ja väylien suunnittelussa. <i>Keskimäärin 15 % asukkaista pitää värähtelyä häiritsevinä ja voi valittaa häiriöistä</i>	$\leq 0,30$
D	Olosuhteet, joihin pyritään vanhoilla asuinalueilla. <i>Keskimäärin 25 % asukkaista pitää värähtelyä häiritsevinä ja voi valittaa häiriöistä</i>	$\leq 0,60$

Tunnusluku, $v_{w,95}$ [mm/s], lasketaan siten, että viidentoista suurimman yksittäisen tapahtuman värähtelynopeuden tehollisarvon keskiarvoon lisätään 1.8 kertaa viidentoista suurimman yksittäisen tapahtuman hajonta.

Tärinän mahdollisesti aiheuttamien rakenteellisten vaurioiden arviointiin sovelletaan eri vertailuarvoja kuin asumisviihtyisyyden kohdistuvien haittojen arviointiin. Rakennusten perustusten vaurioalttiutta kuvataan taulukon 2 mukaisella luokituksella. Esitetyt raja-arvoja pienempien värähtelytasojen ei katsota aiheuttavan rakennuksen käyttöarvoa pienentäviä vaurioita.

Taulukko 2. Rakennusten perustusten vaurioalttiuden rajaamisessa käytettävät kriteerit /3/.

Värähtelyluokka	Kuvaus värähtelyolosuhteista	Heilahdusnopeuden huippuarvo v_{max} [mm/s]	Tunnusluku $v_{rms,95}$ [mm/s]
V	Kohonneen tärinäalttiuden alue <i>Rakenteiden vauriot mahdollisia</i>	$\geq 3,0$	$\geq 5,0$
H	Vähäisen tärinäalttiuden alue <i>Rakenteiden haitat mahdollisia</i>	$\leq 3,0$	$\leq 5,0$
E	Rakenteiden vaurioriski epätodennäköinen	$\leq 1,0$	$\leq 1,6$

3. Kiskoliikenteen tärinät

Tärinästä mahdollisesti aiheutuvat haitat on otettava huomioon yhdyskuntasuunnittelussa. Liikenteen aiheuttama tärinä voi olla asuinrakennusten lisäksi häiritsevää esimerkiksi julkisissa tiloissa, joissa on tärinäherkkiä laitteistoja.

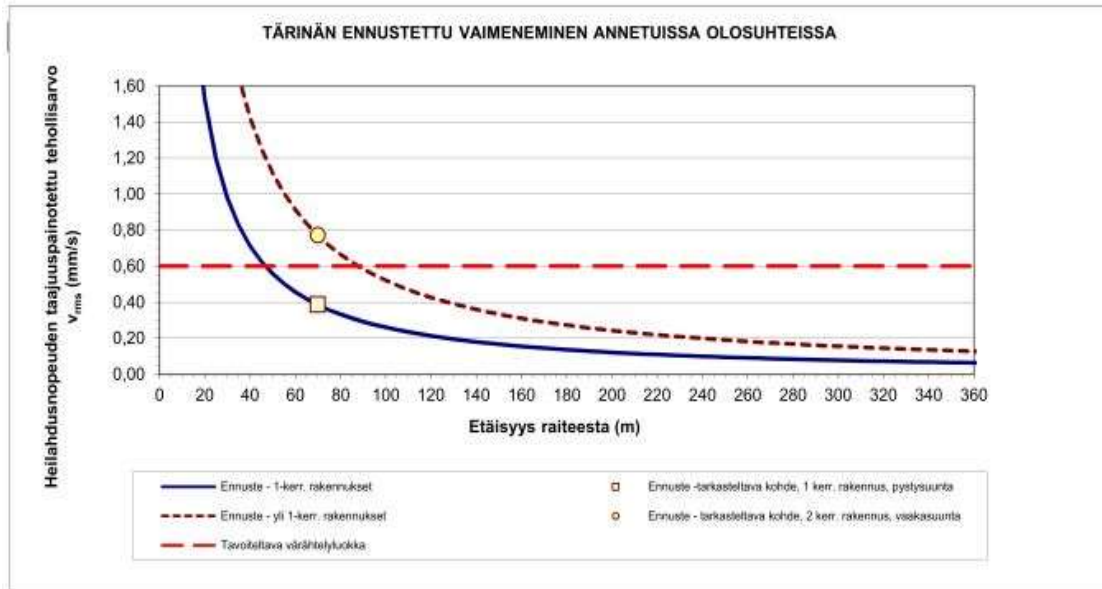
Tärinäriskiä pidetään yleensä suurehkona, mikäli maaperä koostuu pehmeistä maalajeista tai löyhistä kerroksista, kun pohjavesi on läsnä. Kuitenkin paikallisesti kaltevat tiiviit karkearakeiset kerrokset ja erityisesti kallio saattaa nostaa heijastusten kautta tärinän vastetta.

Tärinästä aiheutuvien valitusten lisääntyminen voi olla seurausta esimerkiksi liikenteellisistä muutoksista ja radan rakenteissa tapahtuneista muutoksista sekä myös ilmastollisista sääolosuhteista, kuten roudasta ja pohjaveden pinnan muutoksista.

Tärinän heilahdusnopeudet saattavat voimistua resonanssi-ilmiö vaikutuksesta. Rakennusten ja rakenteiden ominaistajuudet on syytä selvittää, jotta voidaan arvioida riskiä resonanssin esiintymiseen. Resonanssitilanteessa systeemi menettää rakenteellisen toimintakykynsä. Useimmiten kuitenkin junaliikenteen tuottama resonanssitilanne vaatii pitkähkön raskaan kaluston muodostaman syklistarjan (10...15 toistuvaa harmonista herätettä). Värähtelyn ominaistajuudet ja –muodot määritetään dynaamisilla analyyseillä mahdollisen rakenteellisen systeemin resonanssitilanteen selvittämiseksi.

Tärinän leviäminen ympäristössä herätelähteestä on mahdollista arvioida alustavasti esimerkiksi oheisen kuvan 1 mukaisella mallilla. Kuva 1 edustaa tällaista esimerkkitapausta.

VTT:n ohje ”Suositus liikennetärinän arvioimiseksi maankäytön suunnittelussa” /1, 2, 4/ esittää tällaisten ennustekäyrien arviointiperiaatetta.

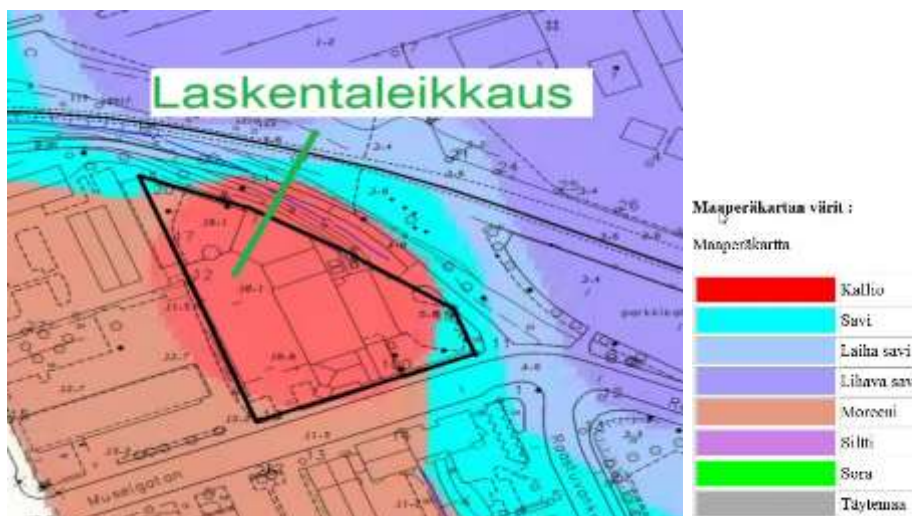


Kuva 1. Esimerkki tärinän leviämisestä tärinälähteestä ympäristöön.

4. Suunnittelualueen kuvaus

Alue sijaitsee Vaasassa Museokadun alueella (kuva 2). Junaradan raiteiden kiskojen yläpinta on rakennusten kohdalla noin tasolla + 5.6 m merenpinnan tasosta.

Asemakaavakohteessa maanpinnassa on kalliota paljastuneena ja sen taso on paikoin suhteellisen korkealla junarataan nähden. Pohjatutkimuskairaukset radan puolisella alueella ovat päättyneet kiviin, kallioon tai tiiviiseen maakerrokseen. Kallioinen alue madaltuu koilliseseen mentäessä jyrkästi. Tarkasteltava rakennus (ks. raportin kansikuva) sijaitsee lähimmillään noin 26 m etäisyydelle lähimmän raiteen (läntinen) keskilinjasta.



Kuva 2. Laskennallisen tarkastelun leikkauksen sijoittuminen ja maaperän ominaisuudet. Nykyisessä tilanteessa (huhtikuu 2020) suunnittelualueen koillispuolella sijaitsevalla rataosuudella liikennöinti ei ole säännöllistä. Rataosuudella liikennöi tavarajunia tarpeen mukaan, esimerkiksi huhtikuussa 2020 rataoperaattoreiden tiedossa ei ollut yhtään tulevaa liikennöintitapahtumaa.

5. Numeerinen analyysi

5.1. Laskentamenettelyn kuvaus

Suunnittelualueeseen kohdistuvaa tärinää on tarkasteltu FEM-laskennan tulosten perusteella. Laskennallisessa tarkastelussa tärinän herätteen (lähtötaso) värähtelytaso on arvioitu raiteilla liikennöivän junaliikenteen akselipainon ja junan nopeuden perusteella.

Laskennallisen tärinätarkastelun etuna voidaan pitää sitä, että tarkastelussa arvioidaan luonnontilaisessa maaperässä esiintyvää tärinää ilman olemassa olevien rakennusten vaikutusta. Lisäksi laskennallisessa tarkastelussa voidaan ottaa huomioon ns. lovipyöräheräte, jonka vaikutus on normikaluston tuottamaan herätteeseen 5...10 kertainen.

Värähtelyn etenemisen laskennassa on otettu huomioon alueen maaperäolosuhteet, rakennusten perustamistapa, mallinnetun rakennuksen ominaisuudet ja tarkasteltavan pisteen korkeusasema (kerros) suunnitellussa rakennuksessa. Lisäksi tuloksia laskennassa on huomioitu junakaluston ns. lovipyöräheräte, joka aiheuttaa normaalia voimakkaampia tärinän lähtötasoja, jolloin niiden vaikutus voi olla 5...10 kertainen normaalin kaluston aiheuttamaan herätteeseen verrattuna.

Pohjasuhteiden arvioinnissa on käytetty alueen maaperäkartan tietoja. Tarkastelussa on käsitelty kohdittain paikalliset pohjasuhteet ja empiirisen, kirjallisen sekä laskennallisen tiedon pohjalta arvioitu vastaavassa kohdassa esiintyvä värähtelyn eteneminen.

Tarkastelun laskennat olivat luonteeltaan dynaamisia ”pakkovärähtelyanalyysijä”. Mallissa, jonka materiaalikäyttäytyminen on lineaarista, on elementin koko valittu siten, että jokaisen elementin dimensiot vastaavat suurinta muodostuvaa tärinän aallonpituutta. Tärinän vasteita on havainnoitu maanpinnan tasolla yhdessä pisteessä ja rakennuksen eri kerroksissa.

Dynaamisessa analyysissä kytkettiin rakenteen kiskoja kuvaaviin solmuihin arvioidun tärinäimpulssin mukainen kuorma-amplitudi. Laskennoissa käytetty kuorman kaksoisharmoinen amplitudi on saatu empiirisen mittaustiedon perusteella, jossa on otettu huomioon akselipaino ja lovipyöräefektin hallitseva osuus. Laskennan aikajaksoksi valittiin 0.5 s. Junan nopeutena käytettiin 30 km/h ja akselipainona 20 tonnia.

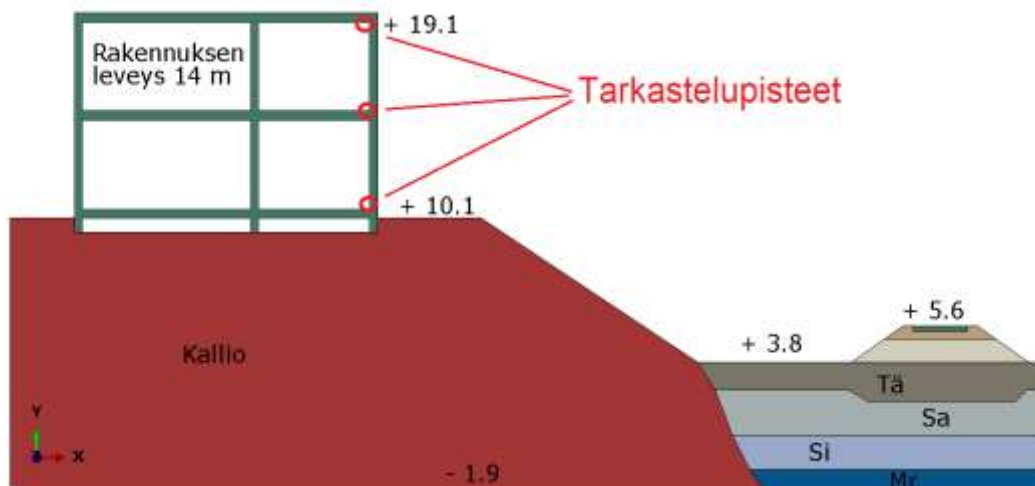
5.2. Laskenta-asetukset ja laskennassa käytetyt oletukset

Laskennan mallipoikkileikkaus (kuva 3) – laskentakohta ilmenee raportin kansikuvasta - on kuvattu elementtimenetelmällä käyttäen 2D-solid –tyyppisiä lineaarisia tasomuodonmuostilaelementtejä, joiden DOF –luku on 2 kpl solmua kohden (translaatiovapausasteet). Mallin koko oli DOF = 35700. Mallin reunat ja pohja ovat reunaehdoiltaan energiaa absorboivat. Laskentamallin kokonaisleveys on 48 m ja korkeus 21 m. Rakennuksen leveys on 14 m.

Mallinnetun talon runkojäykkyys on yksinkertaistettu kuvan 3 mukaiseksi.

Värähtelyn etenemisen laskennassa on käytetty lisäksi seuraavia oletuksia:

- Rakenteiden on oletettu olevan betonia.
- Jäykistys oletetaan tapahtuvan hissikuilun ja osittaisen runkojäykistämisen kautta.
- Rakennus perustetaan kallion varaisesti.



Kuva 3. Laskentamallin (2D) rakennus, tarkastelupisteiden sijainnit ja maaperän ominaisuudet.

Analyysissä on parametreina käytetty muodonmuutosmoduulia E , suppeumalukua ν sekä materiaalihiheyttä ρ . Lisäksi on sovellettu kerrosten vaimennuskertoimia α ja β , jotka on arvioitu perustuen 5 % kokonaisvaimennusoletukseen sekä massan ja jäykkyuden keskinäiseen jakaumaan 1/3 ja 2/3, vastaavasti.

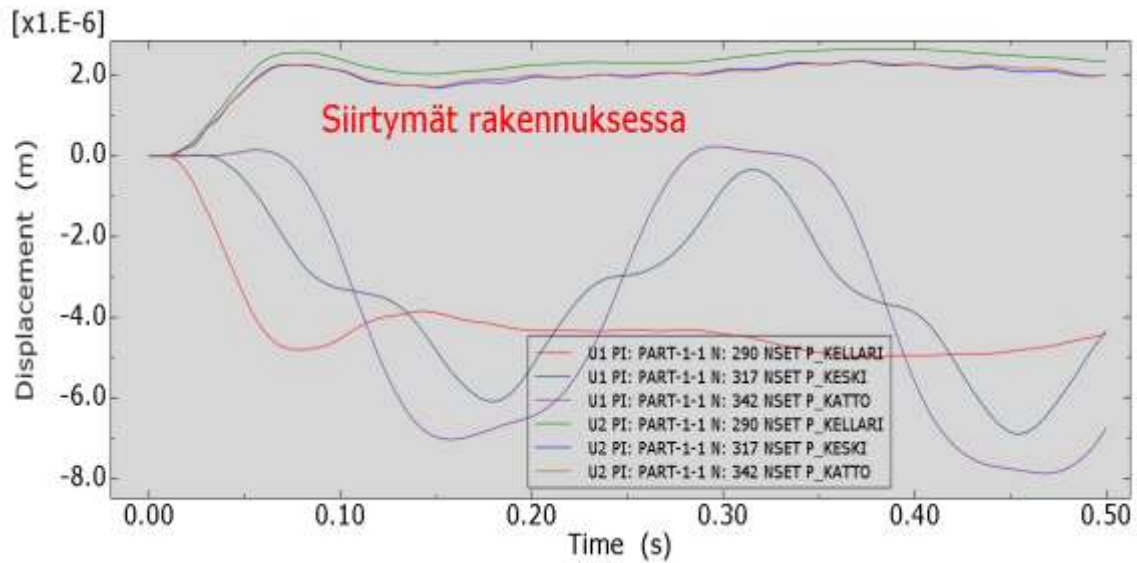
Lujuusparametreja (myötöehto) ei ole määritetty dynaamisessa analyysissä pienten muodonmuutostasojen vuoksi. Laskentaohjelman käyttämät aallonnopeudet tulevat määrittäviksi ohjelmassa elastisten moduulien ja massatiheyksien perusteella (esim. $v_p = (E / \rho)^{1/2}$).

5.3. Laskennan tulokset

Kuvasta 4 on esitetty laskennallisesti arvioitujen rakennukseen kohdistuvien värähtelyn nopeuskomponenttien (V1 vaakakomponentti, V2 pystykomponentti) kehittyminen tarkkailupisteissä laskentajaksolla 0.5 s.

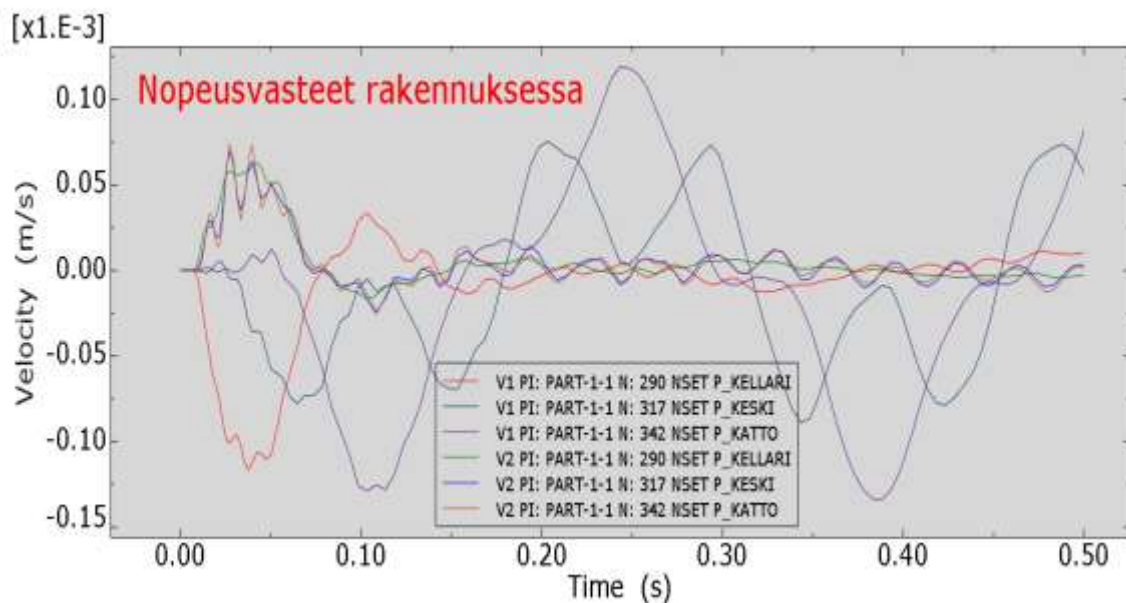
Radasta aiheutuvan junaherätteen tuottamat siirtymien komponentit tietyissä tarkkailupisteissä (kuva 3) on esitetty kuvassa 4. Kuvasta 5 puolestaan ilmenee nopeusvasteet ja kuvasta 6 kiihtyvyydvasteet. Tarkkailupisteissä vasteet ovat alle VTT:n ohjeiden viitearvojen.

Laskennallisesti arvioidut pysty- ja vaakasuuntaisten siirtymäkomponenttien arvot vaihtelivat välillä 0.002 – 0.008 mm ja ne alittivat selvästi vertailuarvon 0.2 mm (kuva 4).



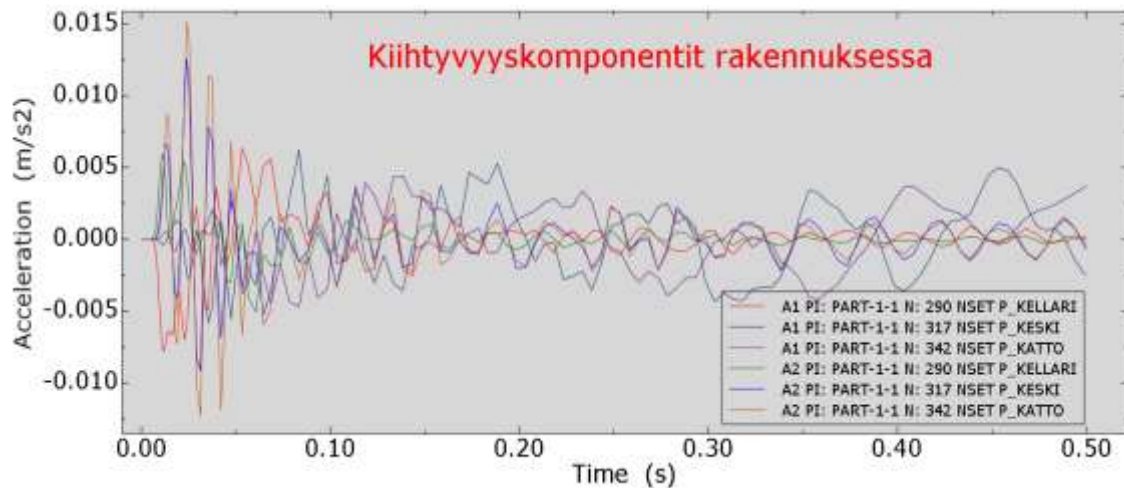
Kuva 4. Rakennuksen pysty- ja vaakasuuntaiset siirtymäkomponentit tarkkailupisteissä las-
kentajaksolla (0.5 s). Viitearvona (suurin sallittava) voidaan pitää enimmillään arvoa $y = 0.2$
mm. Vasteiden laskennalliset ääriarvot (noin 0.008 mm) ovat noin 4 % viitearvoista.

Laskennallisesti arvioidut nopeuskomponenttien huippuarvot vaihtelivat tarkastelupisteissä
välillä 0 – 0.13 mm/s ja alittivat selvästi tärinälle asetetun ohjearvon 0.3 mm/s.



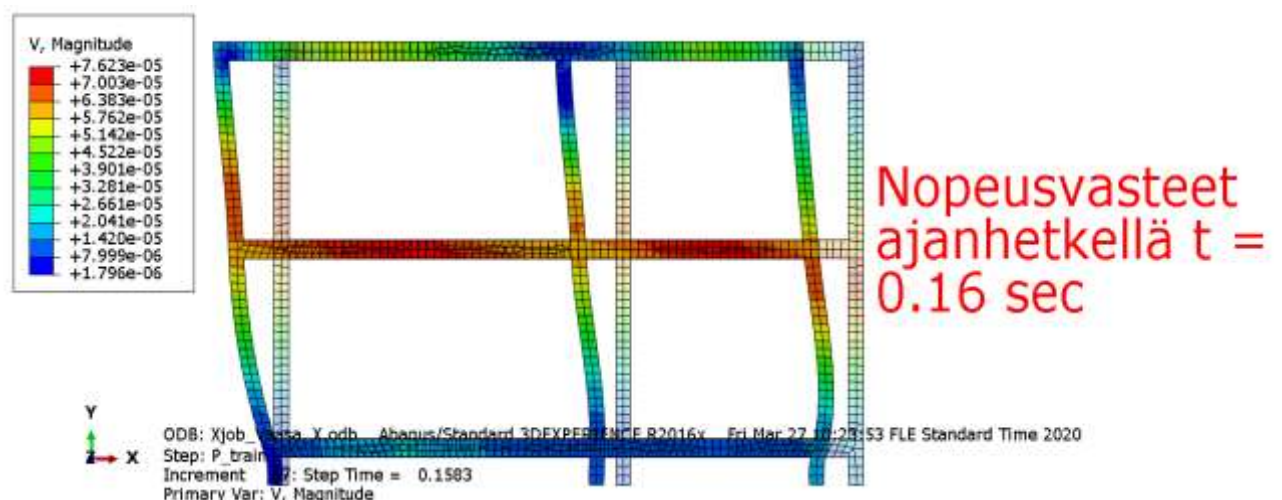
Kuva 5. Rakennuksen pysty- ja vaakasuuntaiset nopeuskomponentit tarkkailupisteissä las-
kentajaksolla (0.5 s). Viitearvona (suurin sallittava) voidaan pitää enimmillään arvoa $v = 0.3$
mm/s. Vasteiden laskennalliset ääriarvot (noin 0.12 mm/s) ovat noin 40 % viitearvoista.

Laskennallisesti arvioitu kiikhtyvvyyskomponenttien arvot tarkastelupisteissä vaihtelivat välillä 0 – 0.015 m/s² ja alittivat selvästi kiikhtyvvydelle asetetun vertailuarvon, 2.5 m/s²



Kuva 6. Rakennuksen pysty- ja vaakasuuntaiset kiikhtyvvyyskomponentit tarkkailupisteissä laskentajaksolla (0.5 s). Viitearvona (suurin sallittava) voidaan pitää enimmillään arvoa $a = 0.25 \text{ g} (= 2.5 \text{ m/s}^2)$. Vasteiden laskennalliset ääriarvot (noin 0.015 m/s²) ovat noin 0.6 % viitearvoista.

Kuva 7 esittää impulssin etenemää mallin eräällä värähtelymuodolla ajanhetkellä $t = 0.16 \text{ s}$. Voidaan havaita, että rakennuksen vertailupisteiden kiikhtyvvyksien (kuvan taulukko) raja-arvot eivät ylitä VTT:n suositusten /1/ mukaan, vrt. kappale 2.



Kuva 7. Esimerkki impulssin (resultoiva nopeus) etenemästä tietyllä ajanhetkellä $t = 0.16 \text{ s}$.

Tarkastelupisteen sijainnin suhteen voidaan nopeuksien pystykomponenttien kuvaajista havaita, että ne pienenevät luonnollisesti etäisyyden kasvaessa kuormitus pisteestä. Nopeudet

ovat suurimmillaan kuormituspisteessä, jossa pystykomponentit ovat luonnollisesti hallitsevia. Pääosin inertiavaikutuksista johtuen havaitaan myös maamassan aaltoilua. Kauempana herätekohdasta havaitaan yleensä vaakasuuntaisten komponenttien suhteellisen osuuden selkeää kasvua. Rakennuskorkeuden kasvaessa vaakasuuntaiset värähtelyt ovat hallitsevia, mutta tässä tapauksessa eivät vielä ylitä asetettuja viitearvoja.

6. Johtopäätökset

- Tarkastelussa on arvioitu laskennallisesti raideliikenteen aiheuttaman värähtelyn etenemistä, vaimentumista ja ihmisen tärinänä tuntemaan värähtelyn tasoa. Laskettuja värähtelytasoja on verrattu tärinälle annettuihin suositusarvoihin. Viitearvot perustuvat lähteisiin /1...4/.
- Laskennallisesti arvioidut pysty- ja vaakasuuntaisten siirtymäkomponenttien arvot vaihtelivat välillä 0.002 – 0.008 mm ja ne alittivat selvästi vertailuarvon 0.2 mm.
- Laskennallisesti arvioidut värähtelyn nopeuskomponenttien huippuarvot vaihtelivat tarkastelupisteissä välillä 0 – 0.13 mm/s ja alittivat selvästi tärinälle asetetun ohjearvon 0.3 mm/s.
- Laskennallisesti arvioitu kiihtyvyys-komponenttien arvot tarkastelupisteissä vaihtelivat välillä 0 – 0.015 m/s² ja alittivat selvästi kiihtyvyydelle asetetun vertailuarvon 2.5 m/s².
- Laaditun selvityksen perusteella tärinän tasot alittavat selvästi asumisviihtyisyydelle asetetut ohjearvotasot sekä rakennusten vaurioitumiselle esitetyt raja-arvot. Selvityksen perusteella kohteeseen ei ole tarpeellista antaa tärinää koskevia käävamääräyksiä.

Mauri Koskinen

Mauri Koskinen, Tkt
WSP Finland Oy

7. Kirjallisuutta

1. VTT 2006, Suositus liikennetärinän arvioimiseksi maankäytön suunnittelussa. Espoo. 46 s. Liitteitä 33 s. (VTT Working papers 50). ISBN 951 – 38 – 660 – 5. ISSN 1459 – 7683.
2. VTT 2005, Suositus liikennetärinän mittaamisesta ja luokituksesta. Espoo. 50 s. Liitteitä 15 s. (VTT tiedotteita 2278). ISBN 951 – 38 – 6523 – 1. ISSN 1235 – 0605.
3. VTT 2001, Rautatieliikenteen tärinän vaikutus rakenteisiin – vaurioalttiuden kartoittaminen ja mittaaminen. Luonnos 47 s.
4. VTT 2011, Ohjeita liikennetärinän arviointiin. Espoo 35 s. Liitteitä 9 s. (VTT tiedotteita 2569). ISBN 978 – 951 – 38 – 7685 – 2. ISSN 1455 – 0865.