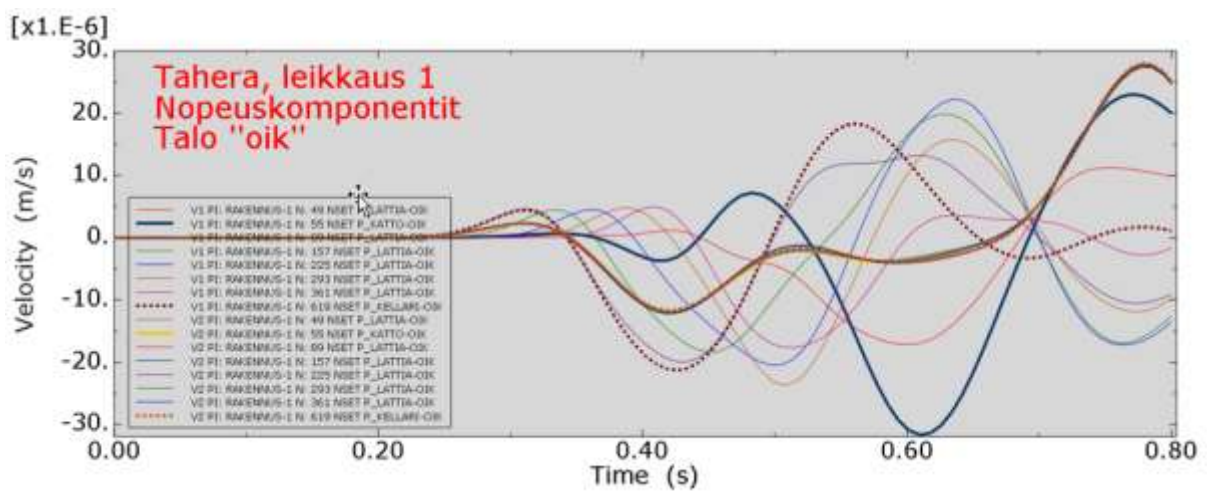


# TAHERA, TAMPEREEN HENKILÖRATAPI- HAN RATASUUNNITELMA

## TÄRINÄSELVITYS

7.5.2020



PROJEKTI 313383

---

## Sisällysluettelo

<b>1. Yleistä .....</b>	<b>3</b>
<b>2. Lähtötietoja.....</b>	<b>3</b>
<b>3. Kiskoliikenteen aiheuttama tärinä .....</b>	<b>5</b>
<b>4. Suunnitellun alueen kuvaus.....</b>	<b>6</b>
<b>5. Numeerinen analyysi .....</b>	<b>10</b>
5.1 Laskentamenettelyn kuvaus .....	10
5.2 Laskenta-asetukset ja laskennassa käytetyt oletukset .....	10
5.3 Laskennan tulokset.....	11
<b>6. Yhteenveto ja johtopäätökset .....</b>	<b>16</b>
<b>Kirjallisuutta.....</b>	<b>17</b>

## 1. Yleistä

Hyvänä käytäntönä tärinäselvityksissä on perusteltua ottaa huomioon seuraavaa: *Värähtelymittausten perusteella rakentamisen kannalta huomioitava tärinäalue ulottuu radan varressa noin 70 ... 100 metrin etäisyydelle lähimmästä raiteesta. Näillä alueilla jatko-suunnittelussa tulee varmistaa, ettei rakennusten runko- ja välipohjarakenteiden resonanssitaujuuksia mitoiteta maaperässä esiintyvien värähtelyhuippujen kohdalle /4/.*

Liikenneviraston ohjeen RATO3 (Liikennevirasto 2018: RATO 3. Radan rakenne – Liikenneviraston ohjeita 13/2018) mukaan ”*junaliikenteestä syntyvän tärinän voimakkuus alueilla, joita käytetään, taikka on suunniteltu käytettäväksi, asumiseen tai sitä vastaaviin tarkoituksiin, ei saa ylittää viitteessä /2/ esitettyjä tärinän tunnuslukuja. Tunnusluvut on annettu häiritsevyyden suhteen ja ihmisen herkkyyden suhteen painotettuina. Uusille radoille ja radoille, joilla liikennenopeutta tai akselipainoja nostetaan aikaisempaan verrattuna, sovelletaan tärinän tunnusluvun luokkaa C /2/. Vanhoilla radoilla sovelletaan luokkaa D. Vertailu tärinän tunnuslukujen suhteen tulee tehdä erikseen sekä vaaka- että pystysuunnissa. Tapauskohtaisesti voidaan arvioida haitan kohtuullisuuden ja tärinähaitan pienentämisen keinojen käytettävyyden perusteella sovellettavat tunnusluvut hanke- ja aluekohtaisesti.*” Edellä esitetyllä viittauksella tarkoitetaan VTT:n (2006) raporttia ja siinä esitettyjä suositusarvoja (taulukko 1).

Rautatieliikenteen tärinävaikutuksien arviointi perustuu tässä osaltaan muissa projekteissa tehtyjen vastaavien tärinämittausten tuloksiin. Arvioinnissa otetaan huomioon maaperän ominaisuudet ja raiteiden etäisyys rakennuksista. Arviointi perustuu olemassa olevaan maaperäaineistoon. Tilaaja on luovuttanut selvityksen tekijän käyttöön maaperätiedot linjauksen läheisyydestä valmiina kartta-aineistona sekä tarvittaessa perustamistapatiedot maastokatselmuksen havaintojen perusteella erikseen määritettyjen rakennusten osalta.

Työssä on arvioitu laskennallisesti junaliikenteen vaikutuksia Tampereen ratapihan lähiympäristön rakennuksiin. Laskennalliseen tärinätarkasteluun on valittu kolme poikkileikkauksia, joissa tärinän suuruutta on arvioitu 5 rakennukseen. Laskentaan valitut poikkileikkaukset ovat maaperäolosuhteitaan edustavia suunnittelualueen tärinävaikutusten arviointiin. Tärinätarkasteluun valittujen rakennusten etäisyydet ovat myös edustavia ja niiden perusteella voidaan päätellä rata-alueen lähialueen rakennuksiin kohdistuvan tärinän voimakkuutta.

Laskennallisessa arvioinnissa tärinän lähtötasona on käytetty empiirisen mittaustietoon perustuvaa kuorman amplitudia, jossa on otettu huomioon akselipaino ja lovipyöräefektin hallitseva osuus. Tässä mielessä tärinän lähtötasojen voidaan katsoa edustavan tärinän kannalta ns. pahinta mahdollista tilannetta.

Tärinätarkastelun on laatinut Mauri Koskinen ja sen on tarkistanut Ilkka Niskanen.

## 2. Lähtötietoja

Liikenneperäisen tärinän ohjeavot perustuvat mitatun tärinän heilahdusnopeuden v taa-juuspainotetun tehollisarvon perusteella tilastollisesti määritettyyn tunnuslukuun  $v_{w,95}$  [mm/s]. Arvioinnissa käytettävä tärinän tunnusluku,  $v_{w,95}$ , perustuu yksittäisten liikenneta-  
pantumien suurimpiin värähtelyyn tehollisarvoihin ja näiden perusteella laskettuun keskiar-

voon sekä hajontaan siten, että  $v_{rms}'95$  on viidentoista suurimman yksittäisen tapahtuman keskiarvo lisättynä 1.8 kertaa viidentoista suurimman yksittäisen tapahtuman hajonta.

Suositus asuinrakennusten ja niitä vastaavien asuintilojen värähtelyluokituksesta (VTT Tiedotteita 2278, 2004) on esitetty taulukossa 1. Luokitus perustuu ihmisen kokeman tärinän häiritsevyyteen. Kun kyseessä on muu kuin asumistarkoitus, tavoiteraja voi olla kaksinkertainen.

Ratasuunnitelman mukaisesti ratapihan itäreunaan rakennetaan uusi raide. Suunnitellut muutokset eivät ole niin merkittäviä, että tärinän tasoja tulkittaisiin suhteessa uusille radoille käytettävään luokkaan C. Ratasuunnitelman mukaiselle toteutukselle arvioituja tärinäarvoja verrataan vanhoille radoille sovellettavaan luokkaan D.

Taulukko 1. Suositus asuinrakennusten ja vastaavien asuintilojen värähtelyluokituksesta (VTT 2006).

Värähtelyluokka	Kuvaus värähtelyolosuhteista	$v_{w,95}$ [mm/s]
A	Hyvät asuinolosuhteet. <i>Ihmiset eivät yleensä havaitse värähtelyitä.</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 värähtelyitä häiritsevinä ja voi valittaa häiriöistä</i>	$\leq 0,30$
D	Olosuhteet, joihin pyritään vanhoilla asuinalueilla. <i>Keskimäärin 25 % asukkaista pitää värähtelyitä häiritsevinä ja voi valittaa häiriöistä</i>	$\leq 0,60$

Rakenteiden perustusten vaurioalttiutta kuvataan taulukon 2 luokituksella. Esitettyjä raja-arvoja pienempien värähtelytasojen ei katsota aiheuttavan rakennuksen käyttöarvoa pienentäviä vaurioita. On mahdollista, että louhintaa esiintyy rajatuissa kohdissa rakentamistoimenpiteitä.

Tärinä voi vaurioittaa myös rakennuksia. Tätä riskiä arvioidaan tärinän heilahdusnopeuden huippuarvojen perusteella (taulukko 2).

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	$\leq 1,0$	$\leq 1,6$

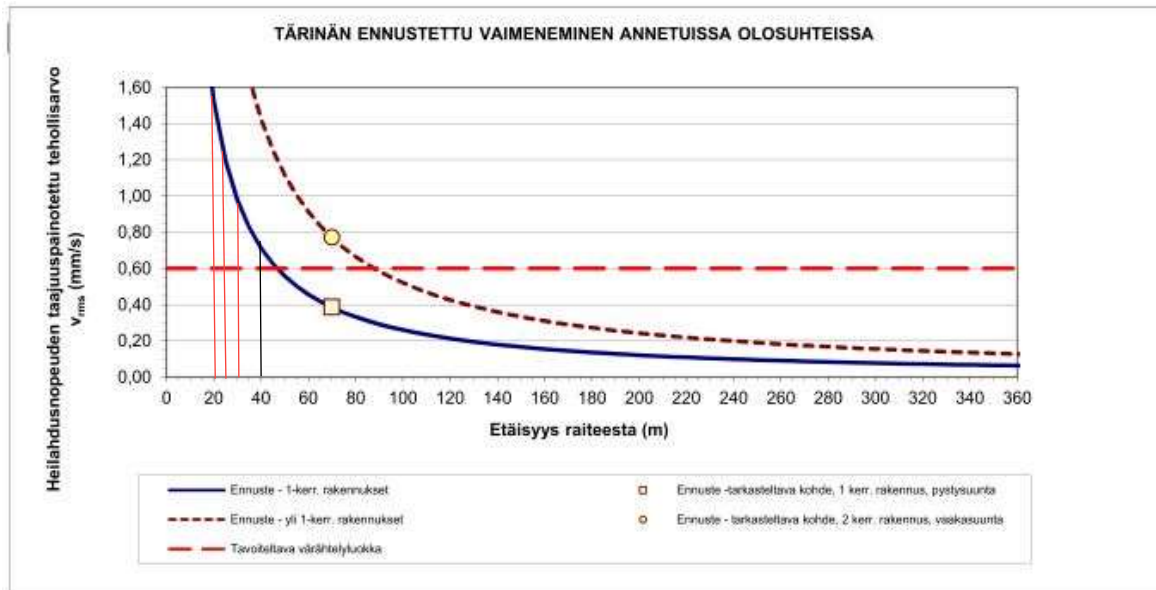
### 3. Kiskoliikenteen aiheuttama tärinä

Tärinähaitat on otettava huomioon yhdyskuntasuunnittelussa. Liikennetärinä voi olla asuinrakennusten lisäksi häiritsevää esimerkiksi julkisissa tiloissa, joissa on tärinäherkkiä laitteistoja. Valitusten lisääntyminen voi olla seurausta esimerkiksi liikenteellisistä muutoksista ja radan rakenteissa tapahtuneista muutoksista sekä myös ilmastollisista sääolosuhteista, kuten roudasta ja pohjaveden pinnan muutoksista.

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.

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). Voidaan havaita, että epäedullisimmat tilanteet muodostuvat korkealla rakennuksella vaakasuuntaisiin värähtelyihin. Useimmissa rakennesysteemeissä riittää 10 alimman ominaistajuuden määrittäminen. Tavoitteena on, että radan liikenne ei muodosta riittävän pitkää ja energialtaan korkeata herätettä näiden ominaismuotojen heräämiseksi ja tämä saattaa vaatia suojaustoimenpiteitä.

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/ esittää tällaisten ennustekäyrien arviointiperiaatetta.



Kuva 1. Esimerkki tärinän leviämisestä tärinälähteestä ympäristöön.

## 4. Suunnittelun alueen kuvaus

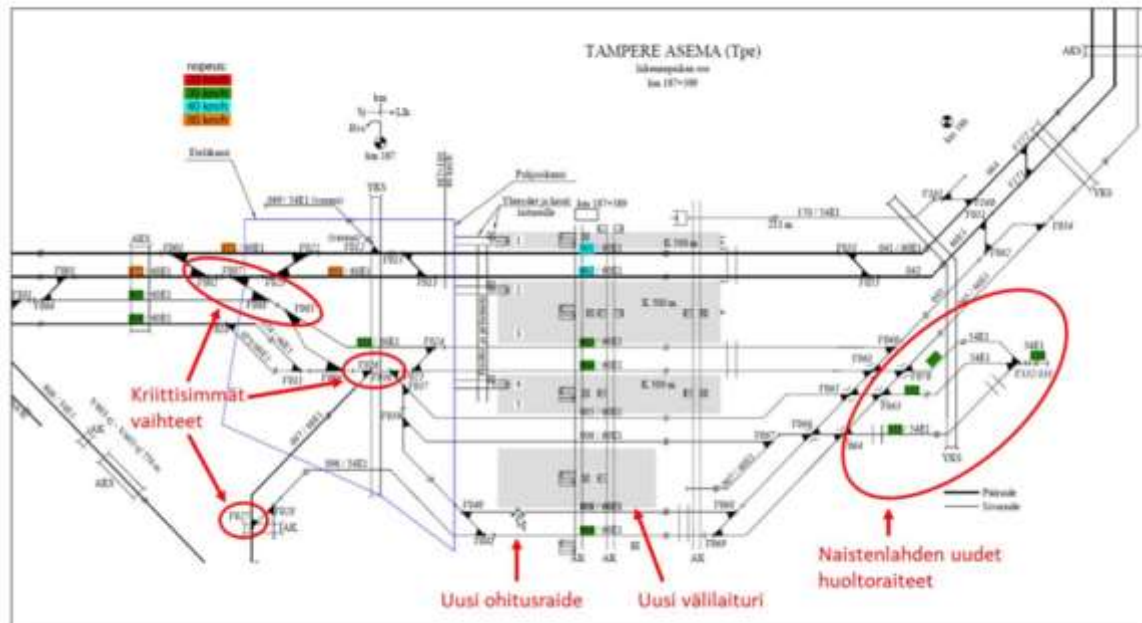
Alue sijaitsee Tampereen ratapihan alueella (kuvat 2...5). Maanpinta vaihtelee keskimäärin tasolla +96. Alueen ympäristössä on runsaasti rakennuskantaa. Itäinen ja keskinen alue rajoittuu pohjois- ja eteläpuolelta keski-ikäiseen ja uudehkoon toimitilatyypiseen rakennuskantaan. Läntinen alue puolestaan rajoittuu varsinkin pohjoispuolelta pääosin ikääntyvään asuinrakennustyyppiseen rakennuskantaan. Suunnittelualue alkaa kohdasta km 186+572 ja päättyy kohtaan km 188+120.

Alueella on laajasti vanhoja rakennekerroksia. Kalliota ei juurikaan esiinny paljastuneena. Alueen pinnassa olevan täytekerroksen alla on pääosin kitkamaata usean metrin paksuudelta. Kairaukset ovat päättyneet kiviin tai tiiviiseen maakerrokseen. Kallion pintaa ei ole varmennettu. YS-vaiheen pohjatutkimukset ilmenevät suunnitelmakartasta GEO-16968-1.

Alueen toimenpiteet tärinöiden suhteen on esitetty laskentaleikkauksessa, kuva 2. Näiden olosuhteet on esitetty oheisessa selosteessa vain kyseisten tärkeimpien kohteiden osalta. Tulevissa toimenpiteissä suoritetaan esim. louhintaa tai normaalista maanvaraisesta perustamisesta poikkeavaa toimintaa.

Ennustetilanteessa uusia rakennuksia tulee sijoittumaan hyvin lähellä raiteita ja lähimmillään rakennukset sijoittuvat alle 10 metrin etäisyydelle lähimmästä raiteesta.

Suurin muutos on uuden ohitusraiteen rakentaminen ratapihan itäreunaan, sillä tulisi liikennöimään Jyväskylä – Pori liikenne (tavaraliikennettä).



Kuva 2. Tampereen ratapihan raidekaavio.

Ympäröivän alueen katuosuuksilla on vilkasta kaksisuuntaista auto-, bussi-, kuorma-auto-liikennettä. Nopeusrajoitus on 40 km/h. Ajouratojen kunto on hyvä. Rakennuksia on sijoitettu lähimmillään pohjoisessa noin 25 m etäisyydelle pääradasta.

Tässä raportissa on käsitelty 3 eri kohdetta, jotka on arvioitu edustaviksi kyseisen ratapiha-alueen rakentamista koskevia toimenpiteitä ajatellen. Nämä on esitetty kuvissa 2 ... 5.



Kuva 3. Tampereen ratapihan läntinen alue, laskentaleikkaus 1.



Kuva 4. Tampereen ratapihan keskinen alue, laskentaleikkaus 4.





Kuva 5a. Tampereen ratapihan itäinen alue, laskentaleikkaus 6.



Kuva 5b. Laskentaleikkauksen 6 linjaus.

## 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. 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 lähtötaasoja, jolloin niiden vaikutus voi olla 5...10 kertainen normaalin kaluston aiheuttamaan härtteeseen verrattuna.

Pohjasuhteet arviointiin on valittu saatavissa olleiden maaperätietojen perusteella. 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 (junan nopeus 80 km/h, akselipaino 20 tonnia) mukainen kuorma-amplitudi. Laskennoissa käytetty kuorman amplitudi saatiin empiirisen mittaustiedon perusteella, jossa on otettu huomioon akselipaino ja lovipyöräefektin hallitseva osuus. Koko laskennan ajaksi valittiin 0.4 s.

Analyysissä on parametreina käytetty muodonmuutosmoduulia  $E$ , suppeumalukua  $\nu$  sekä materiaalihiheyttä  $\rho$ . Lisäksi on sovellettu kerrosten vaimennuskertoimia  $\alpha$  ja  $\beta$ , jotka on arvioitu perustuen 5 % kokonaisvaimennusoletukseen sekä massan ja jäykkyyden keskinäiseen jakaumaan 1/3 ja 2/3, vastaavasti.

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

Laskennan mallipoikkileikkaukset on kuvattu elementtimenetelmällä käyttäen 2D-solid – tyyppisiä lineaarisia tasomuodonmuutostilaelementtejä, joiden DOF –luku on 2 kpl solmua kohden (translaatiovapausasteet).

### 5.2 Laskenta-asetukset ja laskennassa käytetyt oletukset

Mallinnettujen talojen runkojäykkyys on yksinkertaistettu mallikuvien mukaisiksi. Värähtelyn etenemisen laskennassa on käytetty lisäksi seuraavia oletuksia:

- Rakenteiden on oletettu olevan betonia

- Jäykistys oletetaan tapahtuvan hissikuilun ja runkojäykistämisen kautta
- Rakennukset on perustettu kovan pohjan varaan paaluilla

Laskentamallien tukipaaluperustus on toteutettu muodostamalla elementaariset sidosyhtälöt rakennuksen alapinnan (vastaavien kohtien) ja alimman maakerroksen (kova pohja) virtuaalituen välille.

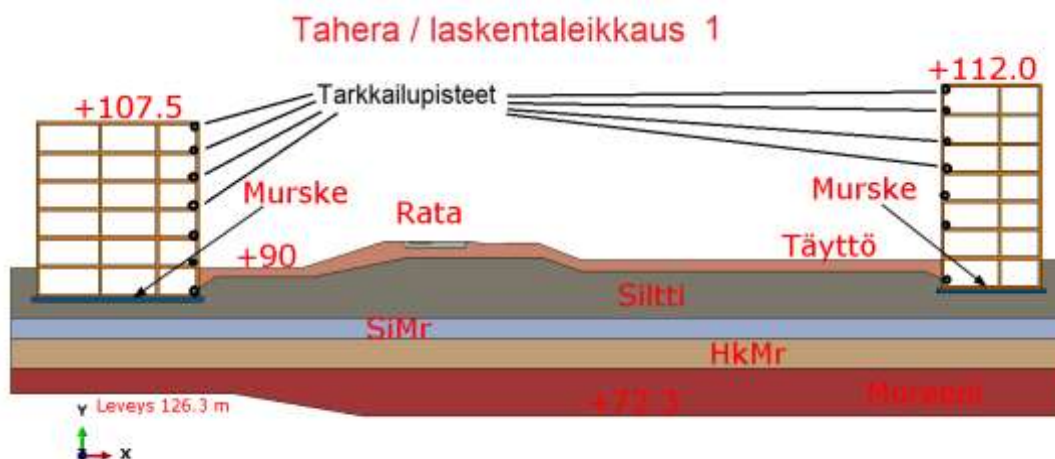
Yleensä laskennan taustalla on tarve ottaa tarkennetusti huomioon rakennuskanta analyysin yhteydessä, koska tärinän vaste muodostuu erilaiseksi mitattaessa sitä luonnontilaisessa maaperän kohdassa ilman kohteeseen tulevaa rakennusta. Lisäksi vastetta dominoi usein ns. lovipyöräheräte, jonka vaikutus on normikaluston tuottamaan herätteeseen 5...10 kertainen.

Tarkastelun pohjana olleet laskennat olivat luonteeltaan dynaamisia ”pakkovärähtelyanalyysijä”. Tärinän vasteita on näissä havainnointu maanpinnan tasolla useissa pisteissä ja rakennusten eri kerroksissa. Laskennoissa käytetyt kuorman amplitudit on saatu empiirisen mittaustiedon perusteella, jossa on otettu huomioon akselipaino ja lovipyöräefektiin hallitseva osuus. Komponentit ovat yleensä pienehköjä johtuen pääosin perustamistavasta. Rakennuskorkeuden kasvaessa vaakasuuntaiset värähtelyt ovat hallitsevia.

### 5.3 Laskennan tulokset

#### Leikkaus 1

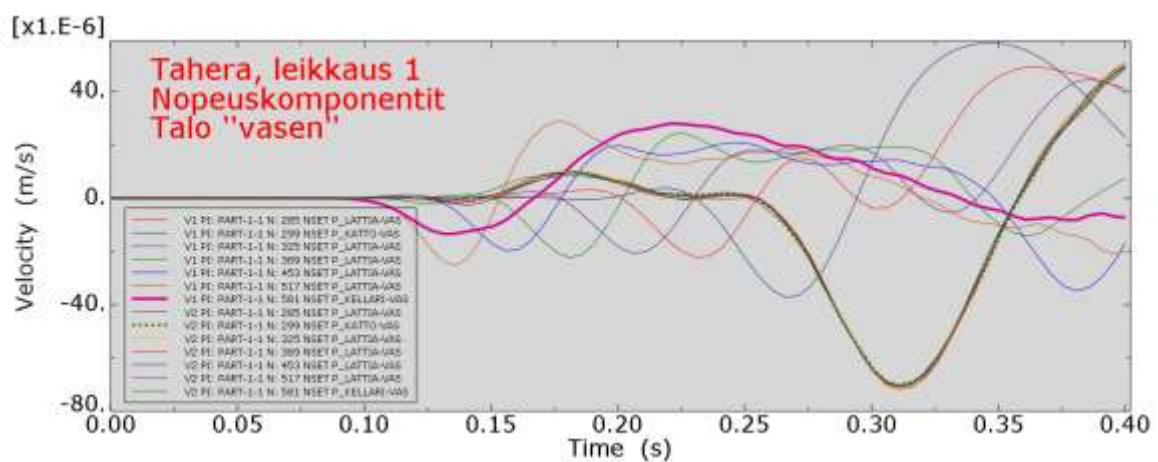
Mallin koko oli  $DOF = 91462$ . Mallin reunat ovat reunaehdoiltaan energiaa absorboivat. Laskentamallin kokonaisleveys on 126.3 m ja korkeus 39.7 m. Rakennusten leveydet ovat 19.5 m ja 12 m.



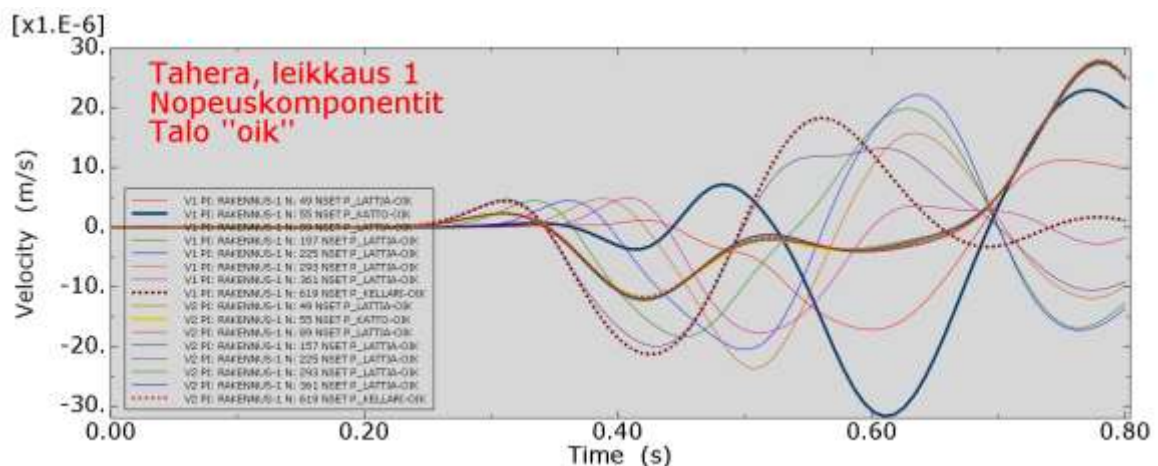
Kuva 6. Laskentamalli (2D) rakennusten ja maan yhteistoimintaan, leikkaus 1.

Kuvassa 7 ja 8 on esitetty laskennallisesti arvioitujen rakennukseen kohdistuvien värähtelyn nopeuskomponenttien (V1 vaakakomponentti, V2 pystykomponentti) kehittyminen tarkkailupisteissä laskentajaksolla 0.4 s. Nopeuskomponentit pystysuunnassa ovat pienehköjä johtuen pääosin kovaan pohjaan suunnitellusta perustamistavasta.

Laskennallisesti arvioidut korkeimmat värähtelytasot olivat talon ”vas” osalta alle 0.06 mm/s (kuva 7) ja talon ”oik” osalta alle 0.03 mm/s (kuva 8). Tarkastelussa on otettava huomioon, että laskennan tulokset on esitetty FEM-analyysin huippuarvoina, jotka ovat tyypillisesti 50...60% tehollisarvojen viitearvoja ( $v_{w,95}$ ) suurempia. Tällä perusteella voidaan todeta, että laskennallisesti arvioidut värähtelynopeudet alittavat selvästi värähtelyluokan D mukaisen suositusarvon, 0.6 mm/s.



Kuva 7. Rakennuksen (”vasen”) pysty- ja vaakasuuntaiset nopeuskomponentit laskentajaksolla (0.4 s).



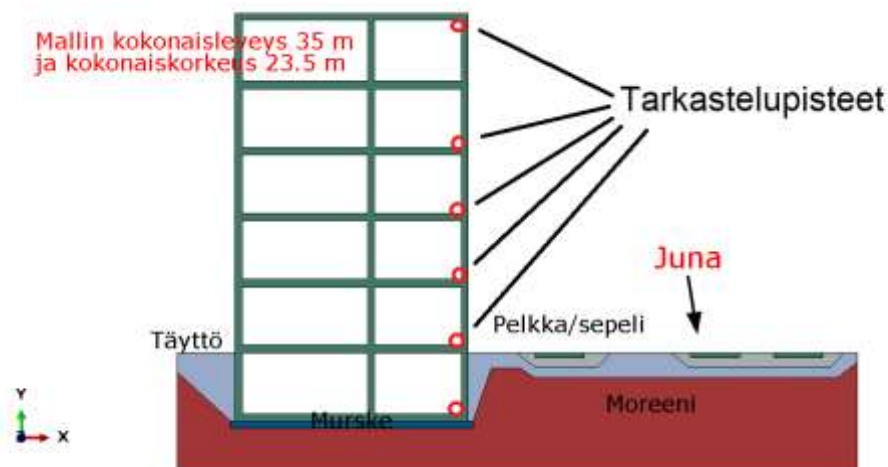
Kuva 8. Rakennuksen (”oikea”) pysty- ja vaakasuuntaiset nopeuskomponentit laskentajaksolla (0.8 s).

Värähtelyn pystykomponenttien kuvaajista havaitaan, että ne pienenevät luonnollisesti etäisyyden kasvaessa kuormituspisteestä. Rakennuksen kohdalla pystykomponentit, joista so-

velletaan ns. tehollisarvoa (noin 50...60 % tässä lasketuista enimmäisarvoista), ovat riittävästi pieniä luokituksen saamiseksi luokkaan C. Nopeudet ovat suurimmillaan kuormituspis-  
 teessä, jossa pystykomponentit ovat luonnollisesti hallitsevia. Pääosin inertia vaikutuksista  
 johtuen havaitaan myös maamassan aaltoilua. Kauempana herätekohtasta havaitaan  
 yleensä vaakasuuntaisten komponenttien suhteellisen osuuden selkeää kasvua.

#### Leikkaus 4

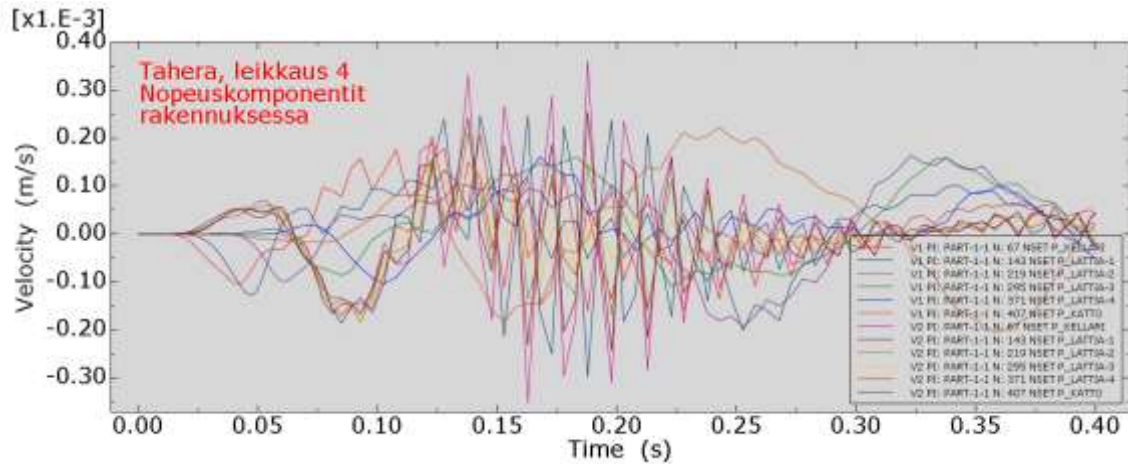
Mallin (kuva 9) koko oli  $DOF = 77800$ . Mallin reunat ovat reunaehdoiltaan energiaa absor-  
 boivat. Laskentamallin kokonaisleveys on 35 m ja korkeus 23.5 m. Rakennuksen leveys on  
 12 m.



Kuva 9. Laskentamalli (2D) rakennusten ja maan yhteistoimintaan, leikkaus 4.

Kuvassa 10 on esitetty laskennallisesti arvioitujen rakennukseen kohdistuvien värähtelyn  
 nopeuskomponenttien (V1 vaakakomponentti, V2 pystykomponentti) kehittyminen tarkkai-  
 lupisteissa laskentajaksolla 0.4 s. Nopeuskomponentit pystysuunnassa ovat pienehköjä  
 johtuen pääosin kovaan pohjaan suunnitellusta perustamistavasta.

Laskennallisesti arvioidut korkeimmat värähtelytasot olivat alle 0.4 mm/s (kuva 10). Tarkas-  
 telussa on otettava huomioon, että laskennan tulokset on esitetty FEM-analyysin huippuar-  
 voina, jotka ovat tyypillisesti 50...60% tehollisarvojen viitearvoja ( $v_{w,95}$ ) suurempia. Tällä pe-  
 rusteella on todennäköistä, että asumisterveydelle asetetut tärinän suositusarvot eivät ylitä  
 kohteessa. Tulee myös huomioida, että yksittäinen värähtelyhuippu, joka ei toistu, ei ole  
 relevantti rakenteen kannalta.

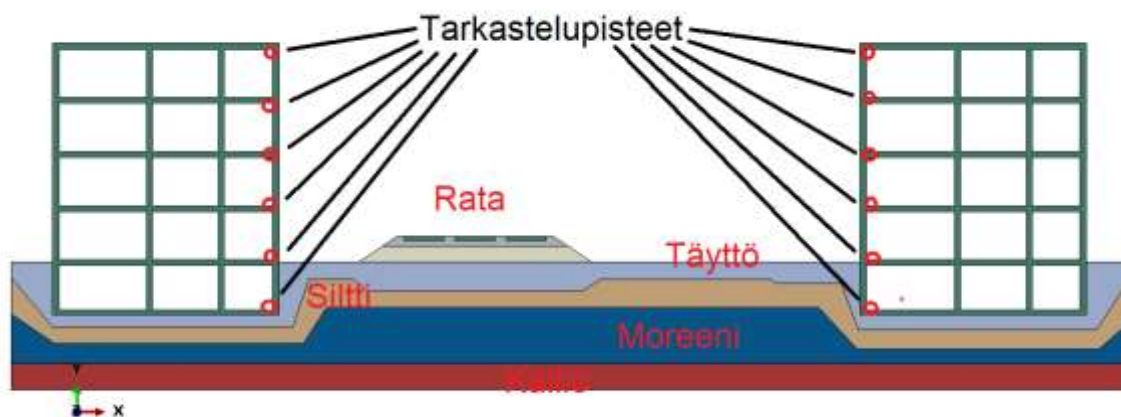


Kuva 10. Rakennuksen pysty- ja vaakasuuntaiset nopeuskomponentit laskentajaksolla (0.4 s).

Värähtelyn pystykomponenttien kuvaajista havaitaan, että ne pienenevät luonnollisesti etäisyyden kasvaessa kuormituspisteestä. Rakennuksen kohdalla pystykomponentit, joista sovelletaan ns. tehollisarvoa (noin 50...60 % tässä lasketuista enimmäisarvoista), ovat riittävän pieniä luokituksen saamiseksi luokkaan C. Nopeudet ovat suurimmillaan kuormituspaikassa, jossa pystykomponentit ovat luonnollisesti hallitsevia. Pääosin inertia vaikutuksista johtuen havaitaan myös maamassan aaltoilua. Kauempana herätekohtasta havaitaan yleensä vaakasuuntaisten komponenttien suhteellisen osuuden selkeää kasvua.

### Leikkaus 6

Mallin (kuva 11) koko oli  $DOF = 98700$ . Mallin reunat ovat reunaehdoiltaan energiaa absorboivat. Laskentamallin kokonaisleveys on 70 m ja korkeus 21.7 m. Rakennuksen leveys on 14 m (kumpikin rakennus).

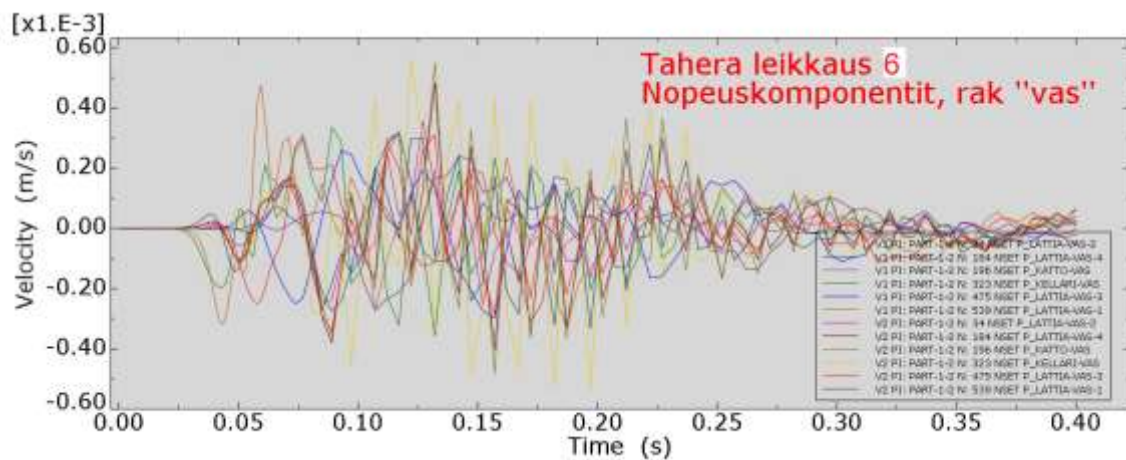


Kuva 11. Laskentamalli (2D) rakennusten ja maan yhteistoimintaan, leikkaus 6.

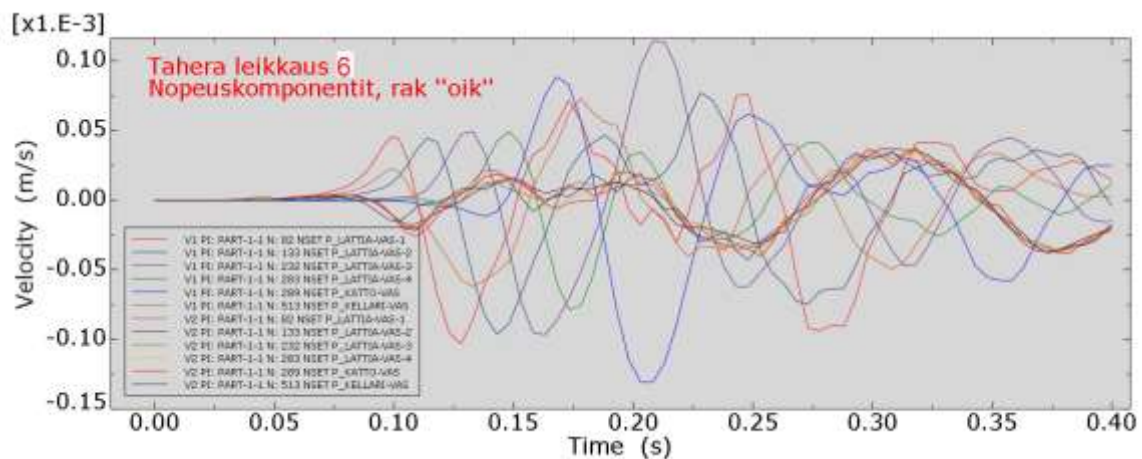
Kuvissa 12 ja 13 on esitetty laskennallisesti arvioitujen rakennukseen kohdistuvien värähtelyn nopeuskomponenttien (V1 vaakakomponentti, V2 pystykomponentti) kehittyminen

tarkkailupisteissä laskentajaksolla 0.4 s. Nopeuskomponentit pystysuunnassa ovat pienehköjä johtuen pääosin kovaan pohjaan suunnitellusta perustamistavasta.

Laskennallisesti arvioidut korkeimmat värähtelytasot olivat talon ”vas” osalta alle 0.5 mm/s (kuva 12) ja talon ”oik” osalta alle 0.1 mm/s (kuva 13). Tarkastelussa on otettava huomioon, että laskennan tulokset on esitetty FEM-analyysin huippuarvoina, jotka ovat tyypillisesti 50...60% tehollisarvojen viitearvoja ( $v_{w,95}$ ) suurempia. Tällä perusteella voidaan todeta, että laskennallisesti arvioidut värähtelynopeudet alittavat värähtelyluokan D mukaisen suositusarvon, 0.6 mm/s. Tulee myös huomioida, että yksittäinen värähtelyhuippu, joka ei toistu, ei ole relevantti rakenteen kannalta.



Kuva 12. Vasemman puoleisen rakennuksen pysty- ja vaakasuuntaiset nopeuskomponentit laskentajaksolla (0.4 s).



Kuva 13. Oikean puoleisen rakennuksen pysty- ja vaakasuuntaiset nopeudet laskentajaksolla (0.4 s).

Värähtelyn pystykomponenttien kuvaajista havaitaan, että ne pienenevät luonnollisesti etäisyyden kasvaessa kuormituspisteestä. Rakennuksen kohdalla pystykomponentit, joista sovelletaan ns. tehollisarvoa (noin 50...60 % tässä lasketuista enimmäisarvoista), ovat riittä-

vän pieniä luokituksen saamiseksi luokkaan C. Nopeudet ovat suurimmillaan kuormituspi-teessä, jossa pystykomponentit ovat luonnollisesti hallitsevia. Pääosin inertia vaikutuksista johtuen havaitaan myös maamassan aaltoilua. Kauempana herätekohdasta havaitaan yleensä vaakasuuntaisten komponenttien suhteellisen osuuden selkeää kasvua.

## 6. Yhteenveto ja johtopäätökset

- Tarkastelussa on arvioitu tehtävämäärittelyn mukaisesti ihmisen tärinänä tunteman värähtelyn tasoa ja vaimentumista ratapihan läheisyydessä. Tässä yhteydessä on tutkittu pysty- ja vaakasuuntaista värähtelyä. Laskennallisesti arvioitua tärinän voimakkuutta on verrattu tärinälle asetettuihin suositusarvoihin.
- Tärinä tarkasteluun valittujen rakennusten etäisyydet ovat edustavia ja niiden perusteella voidaan päätellä rata-alueen lähialueen rakennuksiin kohdistuvan tärinän voimakkuutta.
- Laskennallisessa arvioinnissa tärinän lähtötasona on käytetty empiirisen mittaus-tietoon perustuvaa kuorman amplitudia, jossa on otettu huomioon junan akseli-paino ja lovipyöräefektin hallitseva osuus. Tässä mielessä tärinän lähtötasojen voi-daan katsoa edustavan tärinän kannalta ns. pahinta mahdollista tilannetta.
- Laskentakohteisiin arvioidut tärinän huipputasot vaihtelivat välillä 0.03 - 0.5 mm/s riippuen tarkasteltavan rakennuksen etäisyydestä rataa, radan ja kohteen väli-sestä maaperästä sekä siitä mihin kerrokseen laskentapiste sijoittui tarkastelta-vassa rakennuksessa
- Tarkastelun tuloksista voidaan todeta, että kaikki arvioidut tärinä vasteet alittivat vanhalla radalla käytettävän viitearvon 0.6 mm/s. Laskennallisia tuloksia tarkastel-taessa on otettava huomioon, että tulokset ovat ns. huippuarvoja, jotka ovat tyypil-lisesti 50...60% tehollisarvojen mukaisesti määritettyjä viitearvoja (vw,95) suurem-pia.
- Ympäristöön leviävän tärinän kannalta merkittävin muutos on ratapihan itäpuolelle rakennettava uusi raide, joka sijoittuu noin 4.5 m nykyisen raiteen nro 8 itäpuolelle. Tällä perusteella tärinän arvioidaan lisääntyvän ratapihan itäpuolella sijaitsevien rakennusten kohdalla.
- Uuden raiteen liikennöinnin aiheuttaman tärinän vaikutusalueelle sijoittuvat raken-nukset ovat lähimmillään 20 ... 30 metrin etäisyydellä raiteesta. Näillä etäisyyksillä tärinälähteen siirtyminen noin 5 m lähemmäs saattaa aiheuttaa 0.2 – 0.3 mm/s suuremman värähtelyn nopeuden lähtötilanteeseen verrattuna.
- Laskennallisten tulosten perusteella uusille asuinrakennuksille annettu värähtelyn ohjearvo 0.3 mm/s saattaa ylittyä, mikäli asuinrakennus sijoittuu 10 - 20 metrin etäisyydelle raiteesta. Värähtelyluokan D mukaista ohjearvoa, 0.6 mm/s, ei ylitetty tarkastelussa mukana olleissa kohteissa, jotka sijaittivat noin 10 metrin etäisyy-dellä lähimmästä raiteesta.
- Raiderakenteet tulevat olemaan kitkamaan varaan perustettuja ja tämä lieventää ympäristöön leviävää energiaa. Esitetyt arviot tärinän mahdollisesta tasosta on tärkeä tunnistaa, jos rakennuksissa on herkkiä laitteistoja. Tarvittaessa laitteistot tulee varustaa tärinän vaimentimilla.



- 
- Tärinän vaikutuksia arvioitaessa mallinnuksen avulla on perusteltua ylikorostaa epävarmuustekijöitä. Jännemitoiltaan pitkät ja joustavat lattiarakenteet voivat pitkien junnien vaikutuksesta resonoidessaan aiheuttaa merkittävää tärinäefektiä rakennuksessa. Korkeiden rakennusten osalta tärinän vaikutuksia tulee tarkastella erikseen FEM-mallinnusta käyttäen.

Helsingissä 7.5.2020  
WSP Finland Oy

Mauri Koskinen, Tkt  
Pohjarakennus

## 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 2004, 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.