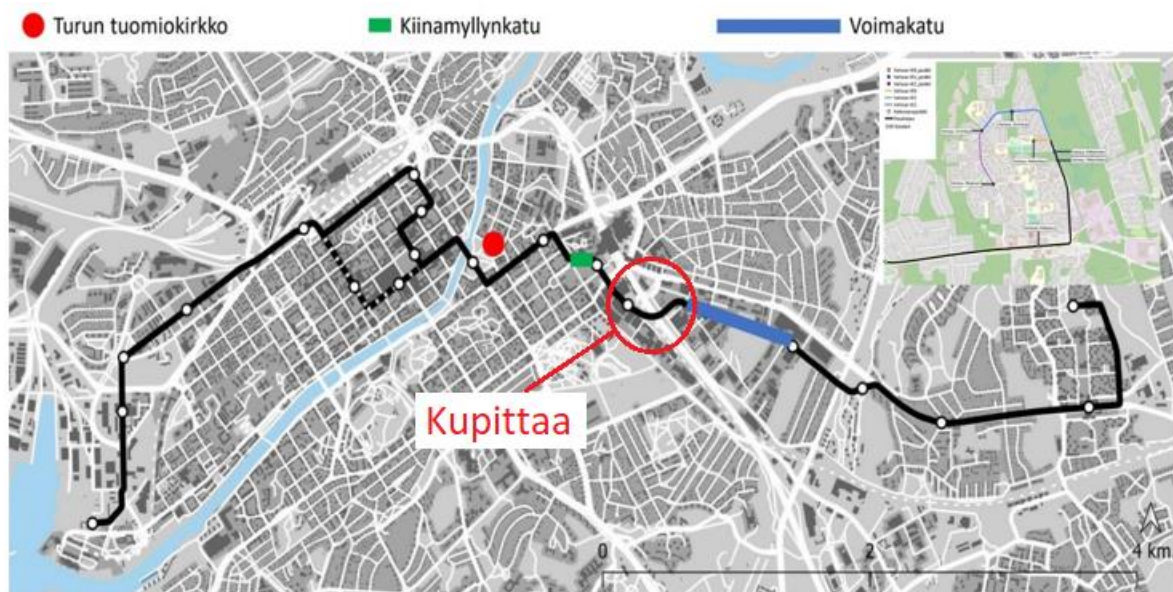


RAITIOTIELIIKENTEEN TÄRINÄVAIKUTUSTEN ARVIOINTI, TURKU KUPITTAAN KÄRKI

RS-VAIHE

15.4.2024



PROJEKTI 316281

Kuva: Suunnittelualue

SISÄLLYSLUETTELO

1	Yleistä	3
2	Lähtötietoja.....	3
3	Kiskoliikenteen tärinät.....	4
4	Suunnitellun alueen kuvaus	5
5	Numeerinen analyysi	6
6	Arviointia ja päätelmiä	9
	Kirjallisuutta	10

1. Yleistä

Työssä laaditaan RS-vaiheen suunnitelma Turun raitiotielinjalle Kupittaa kohdalle (plv 6700 ... 7400). Hankkeen tavoitteena on lisätä liikenteen välityskykyä. Tämän tarkastelun tavoitteena on arvioida junaliikenteen tärinävaikutuksia alueen rakennuskantaan. Hankkeen tilaajana on Turun kaupunki. Kaavaillun linjauksen lähiympäristön nykytila selvitetään rakennusten ja asukkaiden kannalta siten, että mahdolliset ongelmakohteet tärinän ja värähtelyn kannalta voidaan tunnistaa. Kohdalla raitiotie kulkee siltakannella.

Rautatieliikenteen tärinävaikutuksien arviointi perustuu tässä osaltaan muissa projekteissa tehtyjen vastaavien tärinämittausten tuloksiin. Arvioinnissa otetaan huomioon maaperän ominaisuudet ja raiteiden etäisyys rakennuksista. Arviointi perustuu tiedossa olevaan maaperäaineistoon. Tilaaja on luovuttanut selvityksen tekijän käyttöön maaperätiedot linjauksen läheisyydestä. Tärinän vaikutusarvioinnin tuottamiseksi kohteessa on tehty numeerista laskentaa.

2. Lähtötietoja

Liikenneperäisen tärinän ohjearvot perustuvat mitatun tärinän heilahdusnopeuden v taajuuspainotetun tehollisarvon perusteella tilastollisesti määritettyyn tunnuslukuun $v_{w,95}$ [mm/s]. Suositus asuinrakennusten ja niitä vastaavien asuintilojen värähtelyluokituksista (VTT Tiedotteita 2278, 2004) on esitetty taulukossa 1. Luokitus perustuu ihmisen kokeman tärinän häiritsevyyteen. Kun kyseessä on muu kuin asumistarkoitus, tavoiteraja voi olla kaksinkertainen.

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

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

Rakenteiden perustusten vaurioalttiutta kuvataan taulukon 2 luokituksella. Esitettyjä raja-arvoja pienempien värähtelytasojen ei katsota aiheuttavan rakennuksen käyttöarvoa pienentäviä vaurioita.

Taulukko 2. Rakennusten perustusten vaurioalttiuden rajaamisessa käytettävät kriteerit (VTT 2001).

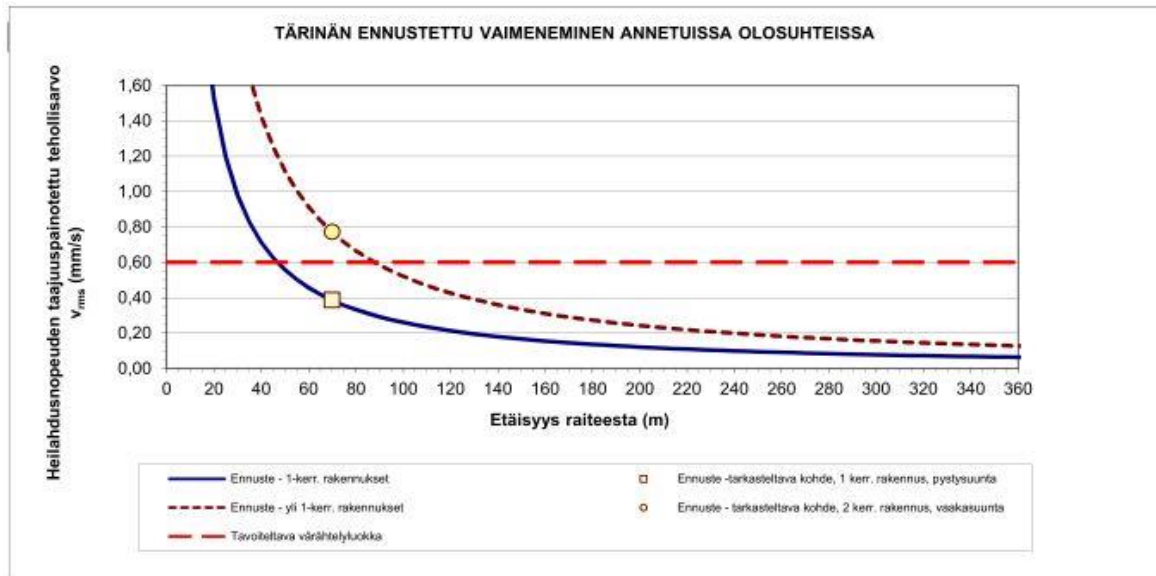
Värähtely-luokka	Kuvaus värähtelyolosuhteista	Heilahdus-nopeuden huippuarvo V_{max} [mm/s]	Tunnusluku $V_{rms,95}$ [mm/s]
V	Kohonneen värähtelyalttiuden alue <i>Rakenteiden vauriot mahdollisia</i>	$\geq 3,0$	$\geq 5,0$
H	Vähäisen värähtelyalttiuden alue <i>Rakenteiden haitat mahdollisia</i>	$\leq 3,0$	$\leq 5,0$
E	Rakenteiden vaurioriski epätodennäköinen	$\leq 1,0$	$\leq 1,6$

Tärinän tuottamaa haittaa asumismukavuudelle arvioidaan tässä tapauksessa värähtelyluokan D ($v_{w,95} \leq 0,60$ mm/s) mukaan.

3. Kiskoliikenteen tärinät

Liikennetärinä voi olla häiritsevää asuinrakennuksissa sekä esimerkiksi julkisissa tiloissa, joissa on värähtelyherkkiä laitteistoja. Valitusten lisääntyminen voi olla seurausta esimerkiksi liikenteellisistä muutoksista ja radan rakenteissa tapahtuneista muutoksista sekä myös ilmastollisista sääolosuhteista, kuten roudasta ja pohjaveden pinnan muutoksista. Tärinäris-kiä pidetään yleensä suurehkona, mikäli maaperä koostuu pehmeistä maalajeista tai löyhistä kerroksista, kun pohjavesi on länä. Kuitenkin paikallisesti kaltevat tiiviit karkearakeiset kerrokset ja erityisesti kallio saattaa nostaa heijastusten kautta tärinän vastetta.

Tärinän leviäminen ympäristössä herätelähteestä on mahdollista arvioida alustavasti esimerkiksi oheisen kuvan 1 mukaisella mallilla. VTT:n ohje ”Suositus liikennetärinän arvioimiseksi maankäytön suunnittelussa” /1/ esittää tällaisten ennustekäyrien arviointiperiaatetta.



Kuva 1. Esimerkki värinän leviämisestä värinälähteestä ympäristöön.

4. Suunnitellun alueen kuvaus

4.1 Yleistä

Linjaukset (ks. aloitussivu) kulkee Turun Kupittaa kohdalla. Maanpinnan korkeus vaihtelee keskimäärin tasolla + 21.5 ja kannen korkeus tasolla + 25. Maanpinnan korkeus vaihtelee kohdittain tästä. Alueelle on tulossa merkittävää rakennuskantaa. Rakennuksia on sijoitettu lähimmillään lähes kiinni tai pienelle etäisyydelle radasta mitaten lähimmästä raiteesta.

Alueen (linjauksen) läheisillä katuosuuksilla on kaksisuuntaista tieliikennettä. Nopeusrajoitus vaihtelee välillä 40 ... 60 km/h. Ajoin kunnossa on keskimäärin hyvä.

Raideliikenteen osalta yleensä uusille asuinrakennuksille hyväksyttävä värähtelyluokka täyttyy siltialueilla liikerakennuksissa yli 50 m etäisyydellä ja korkeampien rakennusten osalta 90 m etäisyydellä. Arvioidut värähtelyn tunnuslukujen etäisyydet ovat karkeasti 0.6 mm/s 35 m ja 0.3 mm/s 50 m. Merkittävin taajuusalue pehmeillä on /4/ noin 5 ... 15 Hz, mutta voi nousta huomattavasti korkeammaksi (< 50 Hz). Todennäköisesti pystyvärähtely on keskimäärin määräävä. Jos savikerroksen paksuus ei ole suuri, tulee merkittäväksi tekijäksi kohdittain perustamistapa, rummut jne. Savikerroksen paksuuntuessa sen kerrosominaisuudet merkitykseltään kasvavat. Selvitysalueen pohjamaan suhteen on värinän kannalta ongelmallisinta savialueet. Pehmeikköjen osalta (savi, siltti, löyhä hiekka) tulee tehdä pohjavahvistuksia (stabilointi, paalutus, massanvaihto, paalulaatta), jolloin värinäenergian siirtyminen lievenee.

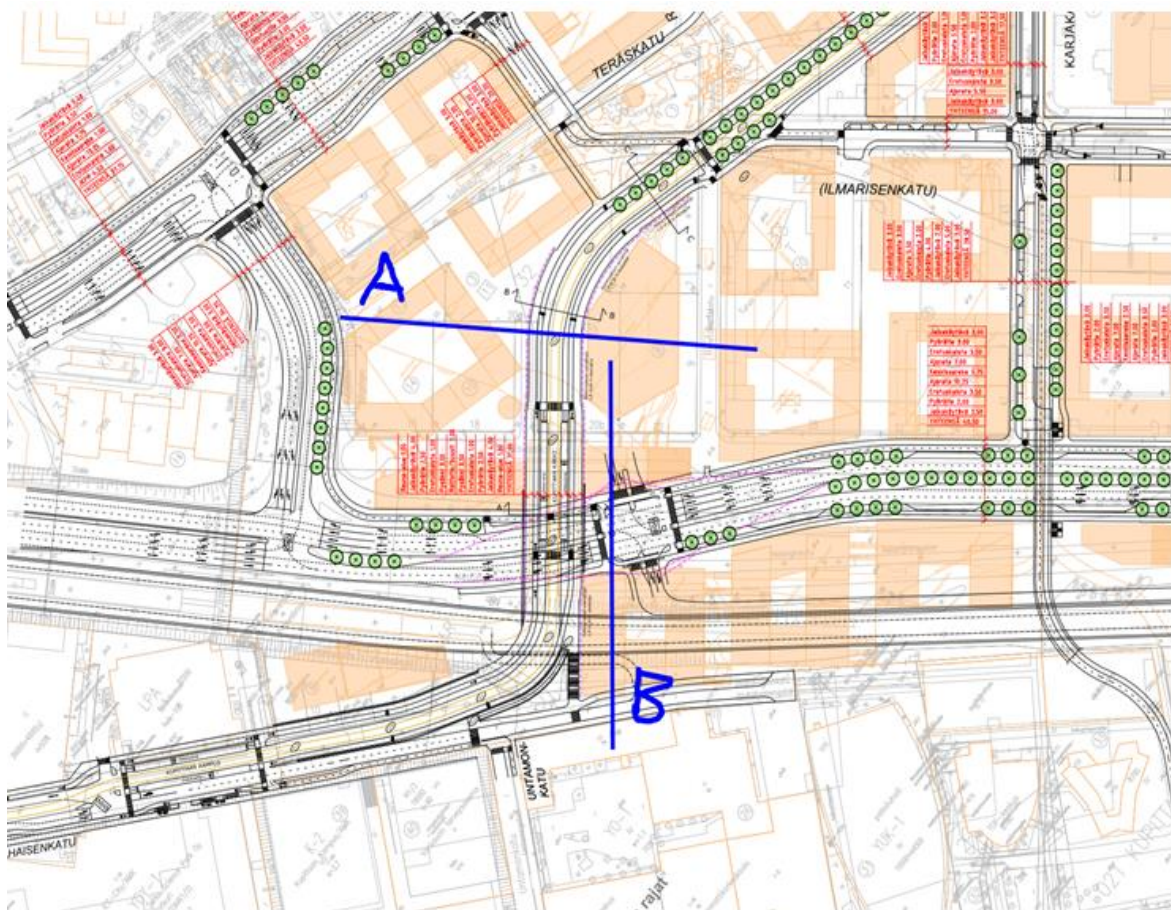
Tarkastelun tuloksena esitetään värinän kannalta kriittisiksi arvioidut rataosuudet. Kriteereinä liitteiden esitykselle ovat ympäristön rakennuskanta, suunniteltu pohjavahvistus, etäisyys rakennuksiin ja pohjasuhteiden laatu.

Kuvassa 2 on esitetty tarkastelualue. Tässä yhteydessä todetaan kuitenkin, että kannen paalutus hoitaa pääosin pystykomponentin tärinän osalta. Vaikka energia siirtyy paalujen välityksellä kovaan pohjaan ja sieltä takaisin heijastumalla, on pallogeometrinen vaime-nema kuitenkin selkeä.

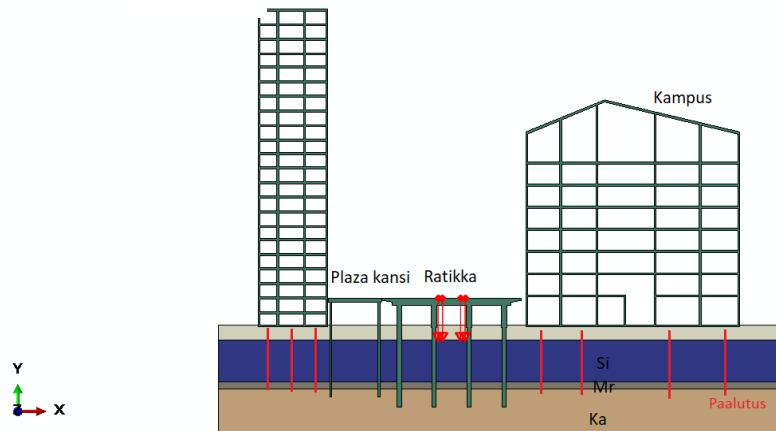
5. Numeerinen analyysi

Kohteet

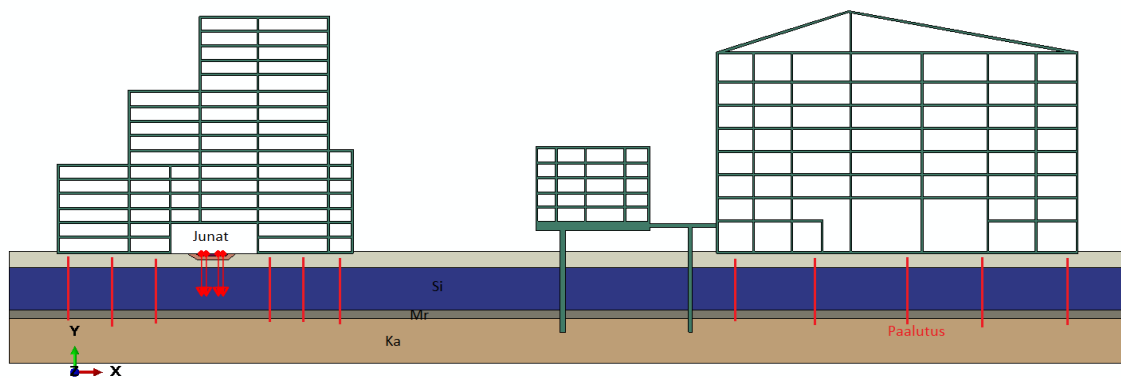
Tärinälaskentaan on valittu kaksi poikkileikkausta. Ne sijaitsevat alueella kuvan 2 mukaisesti. Poikkileikkausten kohdalla alueen maakerrokset ovat kohteittain kuvien 3 ja 4 mukaiset. Rakennukset on perustettu paaluille.



Kuva 2. Tärinälaskennan leikkausten sijainnit (leikkaukset A ja B).



Kuva 3. Laskentapoikkileikkaus A.



Kuva 4. Laskentapoikkileikkaus B.

Laskennan periaatteet

Suunnittelualueeseen kohdistuvaa värinää on tarkasteltu FEM-laskennan tulosten perusteella. Laskennallisessa tarkastelussa värinän herätteen (lähtötaso) värähtelytaso on arvioitu raiteilla liikennöivän junavaunun akselipainon ja nopeuden perusteella.

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

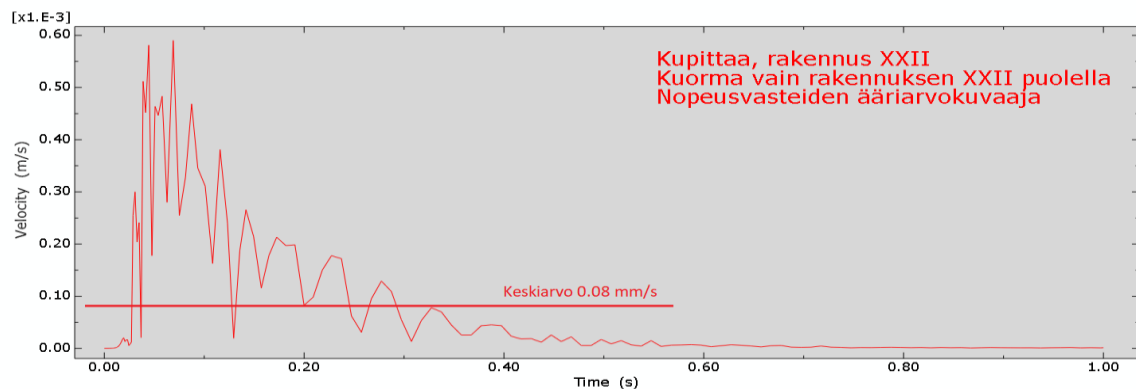
Pohjasuhteiden arvioinnissa on käytetty alueen maaperätietojen perusteella muodostettua geoteknistä poikkileikkausta.

Tarkastelun laskennat olivat luonteeltaan dynaamisia "pakkovärähtelyanalyysijä". Mallissa materiaalikäyttäytyminen on lineaarista ilman myötöehtoa. Laskentaelementin koko valittu siten, että jokaisen elementin dimensiot vastaavat suurinta muodostuvaa värinän aallonpituutta. Värinän vasteita on havainnointu rakennuksen eri kerroksissa.

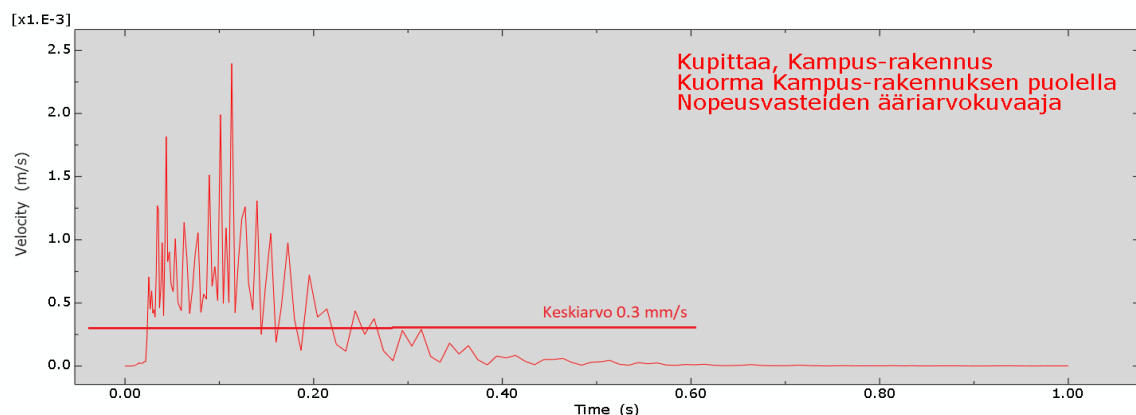
Dynaamisessa analyysissä raitiotien kiskoja kuvaaviin solmuihin kytkettiin arvioidun värinäimpulssin mukainen kuorma-amplitudi. Laskennassa käytetyn kuorman amplitudi on saatu empiirisen mittaustiedon perusteella, jossa on otettu huomioon akselipaino ja lovipyyräreäfekti. Laskennan aikajaksoksi valittiin 1 s, koska vasteen suppeneminen on tällöin jo havaittavissa. Nopeutena käytettiin ratikan osalta 40 km/h ja akselipainona 10 tonnia sekä junan osalta 50 km/h ja 17 tonnia.

Laskennan mallipoikkileikkaus (yksinkertaistettu runkojäykkyys) on kuvattu elementtimenettelmällä käyttäen 2D-solid –tyyppisiä lineaarisia tasomuodonmuutostilaelementtejä, joiden DOF –luku on 2 kpl solmua kohden (translaati vapausasteet). Mallien koot vaihtelivat välillä DOF = 24500...36400. Mallien reunat ja pohja olivat reunaehdoiltaan energiaa absorboivat. Rakennusten jäykistyksen oletetaan tapahtuvan hissikuilun ja osittaisen runkojäykistämisen kautta. Mallien mahdolliset tukipaaluperustukset pehmeikön takia on toteutettu muodostamalla elementtaariset sidosityhtälöt rakennuksen alapinnan (vastaavien kohtien) ja kalliopinnan välille.

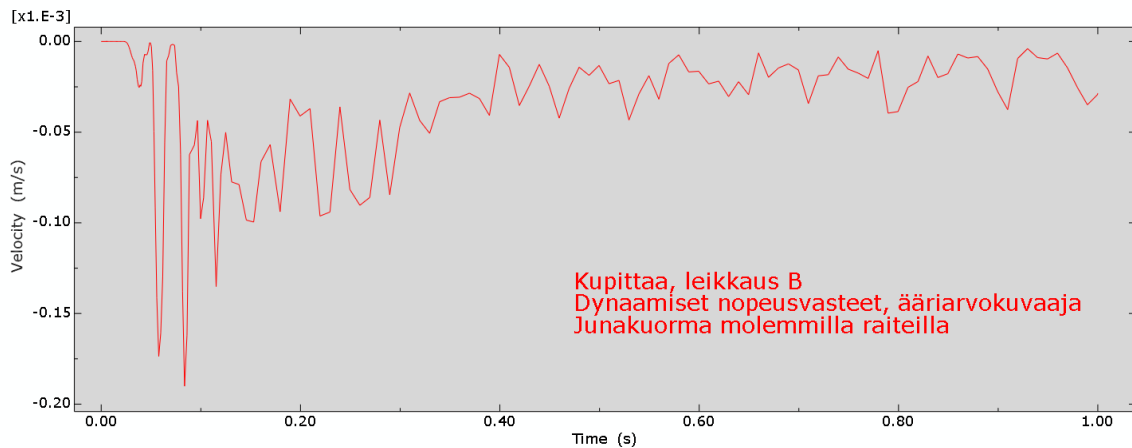
Tulokset



Kuva 5. Dynaaminen nopeusvaste, leikkaus A, rakennus XXII, vastekäyrästä huippuarvokuvaajat. Tehollisarvo on $0.5 \times 0.6 \text{ mm/s} = 0.3 \text{ mm/s}$. Sallittu arvo alittuu.



Kuva 6. Dynaaminen nopeusvaste, leikkaus A, Kampus, vastekäyrästä huippuarvokuvaajat. Tehollisarvo on $0.5 \times 2.5 \text{ mm/s} = 1.25 \text{ mm/s}$. Sallittu arvo ylittyy, joskin kriteeri voidaan hyväksyä impulssin nopean vaimenemisen takia.



Kuva 7. Dynaaminen vaste, leikkaus B, vastekäyrästön huippuarvokuvaajat. Tehollisarvo on $0.5 \times 0.19 \text{ mm/s} = 0.095 \text{ mm/s}$. Sallittu arvo alittuu.

6. Arviointia ja päätelmiä

Laskennallisen tarkastelun tuloksena on esitetty rakennukseen kohdistuvien värähtelyn vaaka- ja pystysuuntaisten vastekomponenttien kehittyminen tarkkailupisteissä, joita on kunkin kerroksen tasalla edustavissa pisteissä. Näiden perusteella voidaan todeta seuraavaa:

Värähtelylaskennan tuloksia tarkasteltaessa on huomioitava seuraavat seikat:

- Lasketut tulokset edustavat vasteiden maksimiarvoja. Ohjearvoon verrannollinen värähtelyarvon vertailuarvo ($v_{w,95}$) on noin 50 % värähtelyn maksimiarvosta.
- Tulostekuvissa (kuvat 5...7) on esitetty ns. huippuarvokuvaaja, joka edustaa yksittäisten havaintopisteiden ääriarvoa (max). Leikkauksessa A (kuvat 5 ja 6) on esitetty myös keskiarvo, jolloin on arvioitavissa värähtelyn alittavan suositellun ohjearvon, johon on perusteena impulssin nopea vaimeneminen. Vaurioitumisalttiudelle asetettu viitearvo (taulukko 2) ei arvioida ylittyvän.
- Rakennusten etäisyys tärinää mitoittavaan raiteeseen on pienehkö. Leikkauksessa A on Kampusrakennus kiinni siltakannessa.
- Nopeutena on käytetty ratikan osalta 40 km/h ja akselipainona 10 tonnia sekä junan osalta 50 km/h ja 17 tonnia.
- Tarkastelujakson (1 s) aikana on nähtävissä värähtelyn vaimentuminen.
- Jännemitoiltaan pitkät ja joustavat lattiarakenteet voivat pitkien junien vaikutuksesta resonoidessaan aiheuttaa merkittävää tärinäefektiä rakennuksissa. Epävarmuutena tulee myös mainita pohjatutkimusten karheus, jolloin esimerkiksi vinot kalliopinnat sekä suuret lohkat saattavat aiheuttaa heijasteita ja värähtelyn interferoitumista.
- Pystysuuntainen värähtely voidaan yleensä vaimentaa radan perustusratkaisujen avulla ja vaakasuuntainen värähtely rakenteellisten ratkaisujen avulla. Yleisesti on

tunnettua, että vaakasuuntainen värähtely on kauempana radasta suurempaa, kuin pystysuuntainen.

- Tarkastelussa ei ole otettu huomioon rakennuksiin mahdollisesti sijoitettavia teknisiä laitteita ja niiden suojaamista tärinältä.
- Lisätoimenpiteitä tärinän torjumiseksi ovat pohjaimet ja vaimenninmatot. Myös pont-tiseinät, stabilointi, massanvaihto ja kumirouheseinät tulevat kysymykseen. Näillä toimilla voidaan lisätä varmuutta rakenteiden kestävyYTEEN.

Helsinki 15.4.2024
WSP Finland Oy

Mauri Koskinen

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 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.