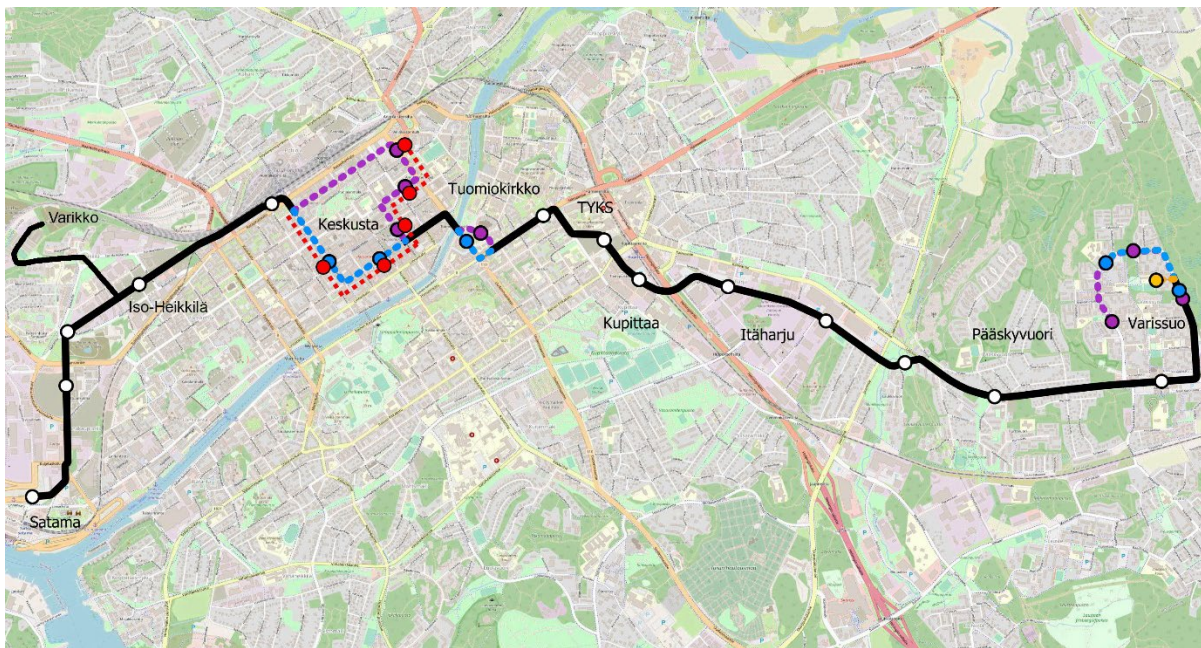


TURUN KAUPUNKI

LIITE 10.2 RAITIOTIELIIKENTEEEN TÄRINÄVAIKUTUSTEN ARVIOINTI

TURUN RAITIOTIEN YLEISSUUNNITELMA

24.5.2022



PROJEKTI 315670

Kuva: Suunnittelualue

Sisällysluettelo

1. Yleistä	3
2. Lähtötietoja.....	3
3. Kiskoliikenteen tärinät.....	4
4. Suunnitellun alueen kuvaus	5
5. Numeerinen analyysi	6
6. Arviointia	18
7. Yhteenveto ja johtopäätökset.....	19
Kirjallisuutta.....	20

1. Yleistä

Työssä laaditaan YS-vaiheen suunnitelma Turun Varissuon raitiotielinjalle. Hankkeen tavoitteena on lisätä liikenteen välityskykyä. Tämän tarkastelun tavoitteena on arvioida raitiotieliikenteen 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. Linjauksen pituus on Humalistonkadun kautta 11,0 km ja Matkakeskuksen kautta 11,5 km. Hankkeen kuluessa on tarkasteltavan linjauksen pituutta jatkettu noin 1,5 km pituudella Varissuon kohdalla.

Raitiotieliikenteen 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 konsultin käyttöön maaperätiedot linjauksen läheisyydestä.

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).

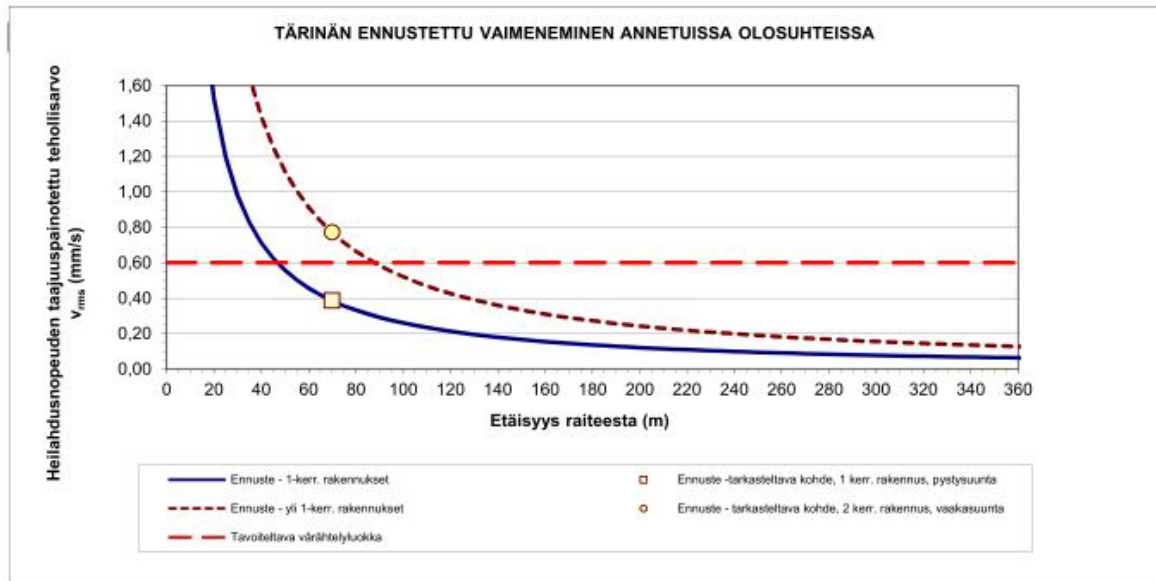
Värähtelyluokka	Kuvaus värähtelyolosuhteista	Heilahdusnopeuden huippuarvo v_{max} [mm/s]	Tunnusluku $v_{rms,95}$ [mm/s]
V	Kohonneen tärinäalttiuden alue <i>Rakenteiden vauriot mahdollisia</i>	$\geq 3,0$	$\geq 5,0$
H	Vähäisen tärinäalttiuden alue <i>Rakenteiden haitat mahdollisia</i>	$\leq 3,0$	$\leq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

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 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. Tärinärisäkiä 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 tärinän leviämisestä tärinälähteestä ympäristöön.

4. Suunnitellun alueen kuvaus

4.1 Yleistä

Linjaus (ks. aloitussivu) kulkee Turun satamasta Varissuolle. Tämän työn osuus alkaa Turun Sataman kohdalta. Tasaus (Kv) vaihtelee koko linjausta ajatellen tasolla + 2,3 ... + 49,7 ollen siten lännessä selkeästi alempana. Maanpinnan korkeus vaihtelee kohdittain tästä. Alueen ympäristössä on rakennuskantaa. Rakennuksia tai kaavoitettuja alueita on sijoitettu lähimmillään alle 10 m etäisyydelle radasta (lähin raide).

Nopeusrajoitus vaihtelee välillä 30 ... 60 km/h. Ajoratojen kunto on keskimäärin hyvä.

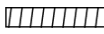

Raideliikenteen osalta yleensä uusille asuinrakennuksille hyväksyttävä värähtelyluokka täyttyy silttialueilla liikerakennuksissa yli 50 m etäisyydellä ja korkeampien rakennusten osalta 90 m etäisyydellä. Arvioidut värähtelyn tunnuslukujen etäisyydet ovat karkeasti 0.6 mm/s 35 m ja 0.3 mm/s 50 m. Merkittävin taajuusalue pehmeiköillä 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 tärinän kannalta ongelmallisinta savialueet. Pehmeikköjen osalta (savi, siltti, löyhä hiekka) tulee tehdä pohjavahvistuksia (stabilointi, paalutus, massanvaihto, paalulaatta), jolloin tärinäenergian siirtyminen lievenee.

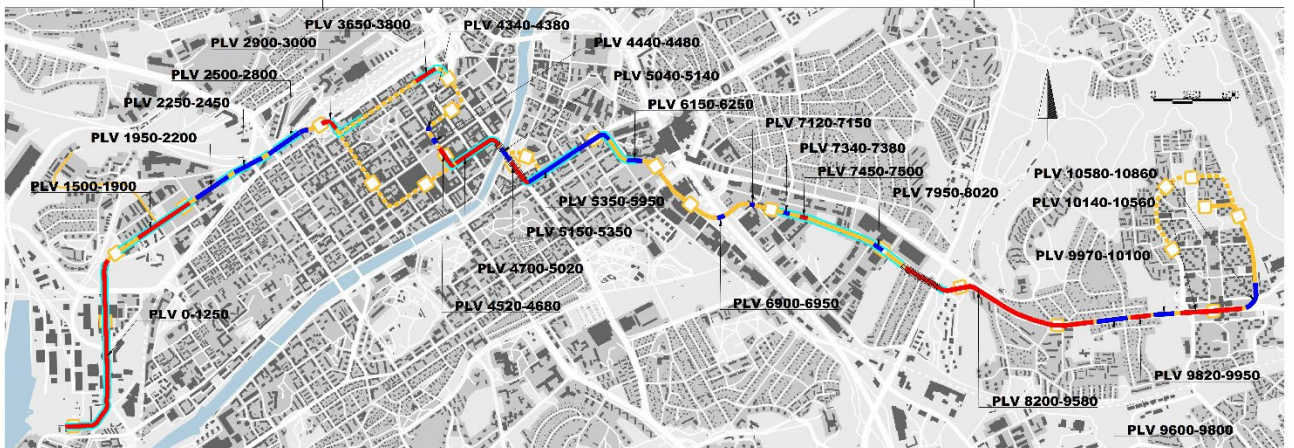
Tarkastelun tuloksena esitetään tärinän kannalta kriittisiksi arvioidut rataosuudet. Kriteereinä liitteiden esitykselle ovat ympäristön rakennuskanta, suunniteltu pohjanvahvistus, etäisyys rakennuksiin ja pohjasuhteiden laatu.

Kuvassa 2 on esitetty tärinän kannalta kriittisiksi arvioidut rataosuudet. Kohde on määritelty tärinän kannalta kriittiseksi, kun

- suunnitelmassa ei ole esitetty pohjanvahvistusta
- maaperässä on yli 5 m pehmeä kerros tai
- maaperässä on yli 3 m pehmeä kerros painokairauksen ollessa yli puolet painon puolella
- värähtelyn arvioidaan ylittävän 0,6 mm/s (tehollinen rms-arvo vw,95)
- etäisyys asuinrakennuksiin on alle 40 m

Alueiden otsikoinnissa on käytetty seuraavaa värikoodausta:

- **keltainen** linjaus, ei ongelma-aluetta
- **punainen** kriittinen alue
- **sininen** lievästi kriittinen, pohjanvahvistus paalulaatta, stabilointi, massanvaihto
- **vihreä** paalulaatta
-  siltamainen rakenne
-  stabilointi



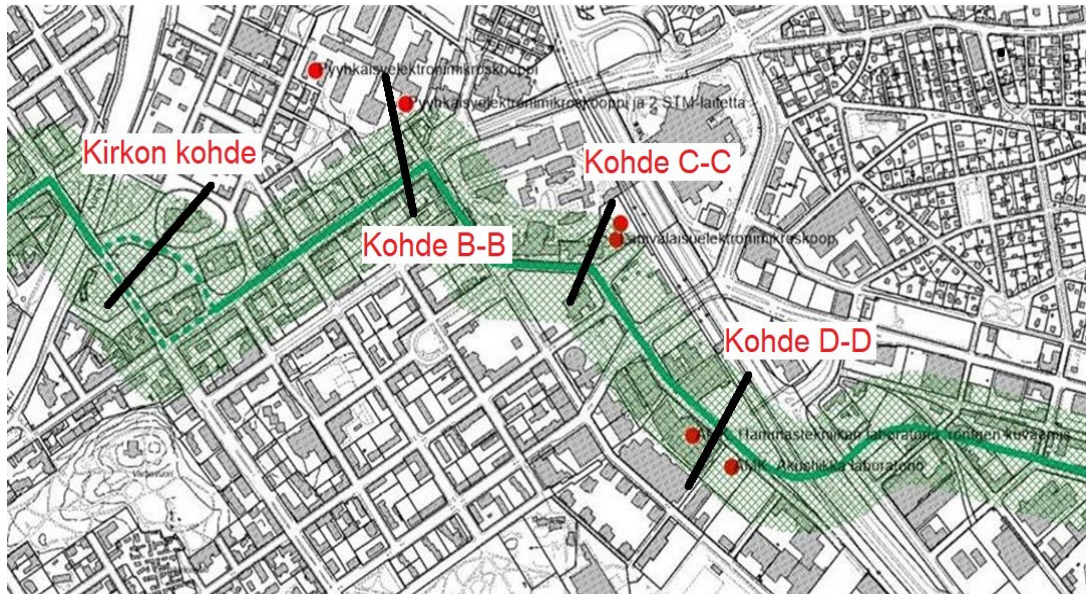
Kuva 2. Tarkastellun alueen (WSP) kriittiset kohteet, mukana paalulaatoitetut alueet.

Kuvissa 4a ... 7a on esitetty kohteet visuaalisesti. Tässä yhteydessä todetaan kuitenkin, että paalulaatoitus hoitaa pääosin herätelinjalla olevan pystykomponentin tärinän osalta. Näin ollen ei erillistä karttaa ongelmakohtista ole esitetty. Vaikka energia siirtyy paalujen välityksellä kovaan pohjaan ja sieltä takaisin heijastumalla, on pallogeometrisen vaime-nema kuitenkin selkeä.

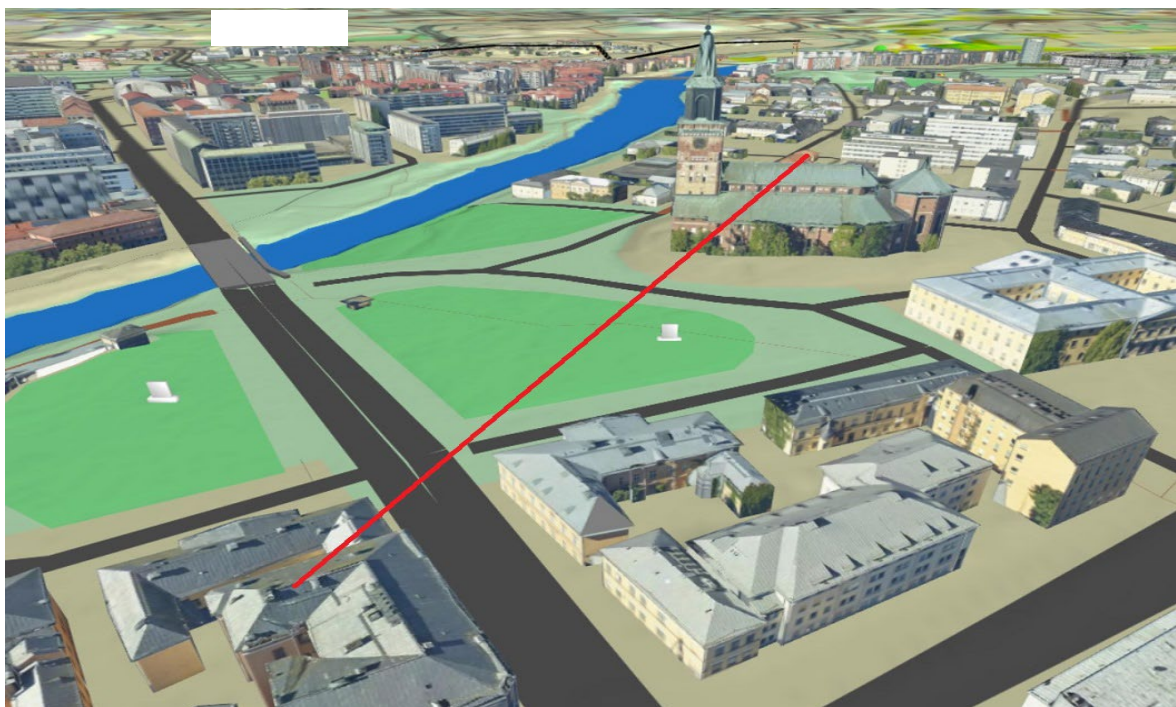
5. Numeerinen analyysi

Kohteet

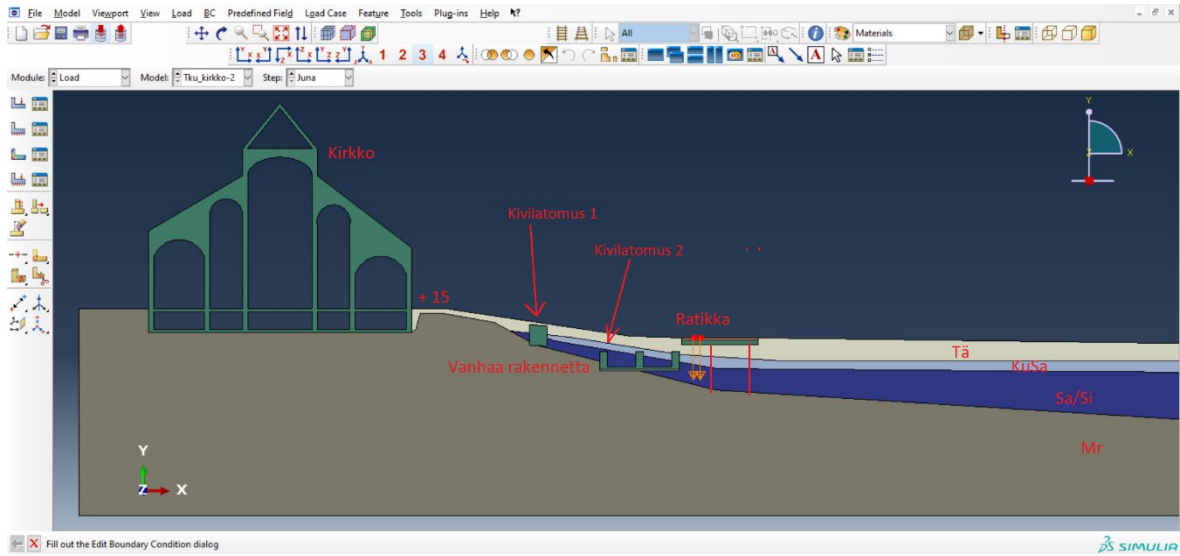
Tärinälaskentaan on valittu neljä poikkileikkausta. Ne sijaitsevat alueella kuvan 3 mukaisesti. Poikkileikkausten kohdalla alueen maakerrokset ovat kohteittain kuvien 4...7 mukaiset. Kirkon alueelta on muodostettu kaksi eri poikkileikkausta, joissa siltamainen rakenne ja kelluva laattarakenne ovat vuorotellen Uudenmaankadulla ja kirkon linjauksella.



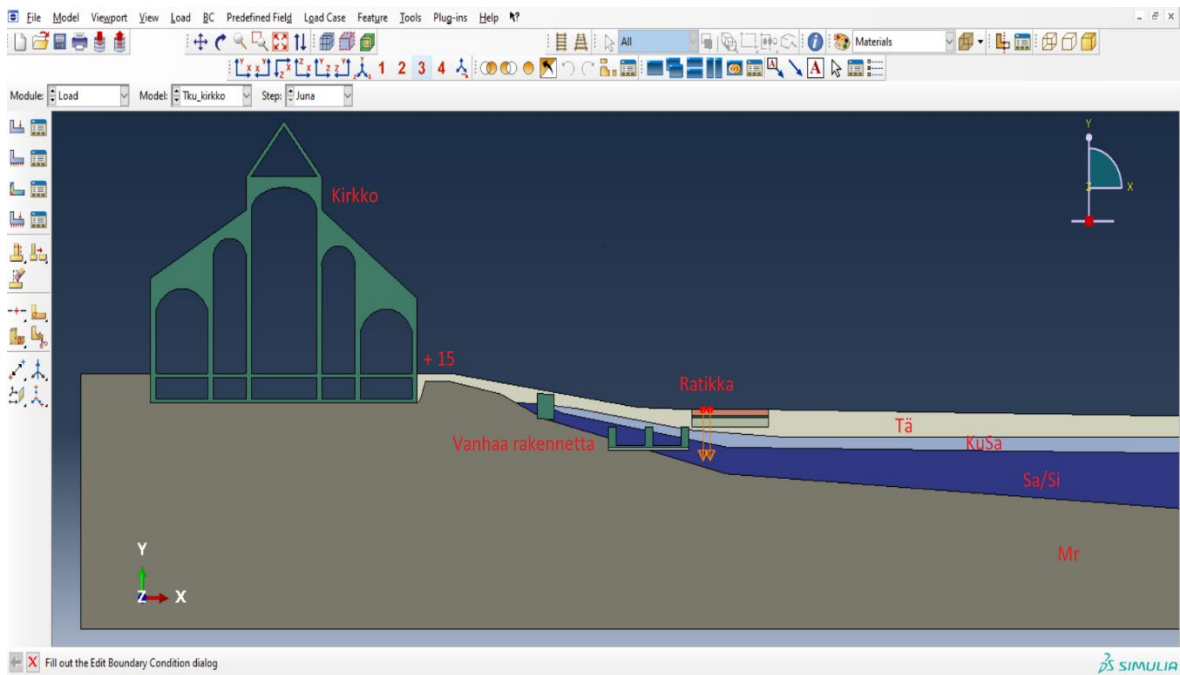
Kuva 3. Tärinälaskennan leikkausten sijainnit.



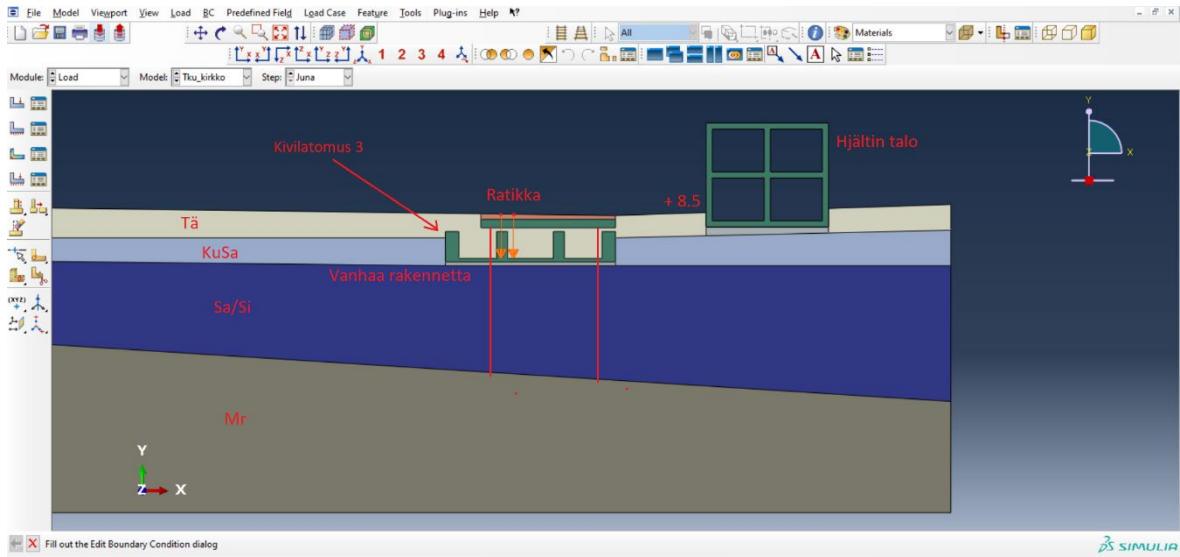
Kuva 4 a. Kohde "kirkon alue".



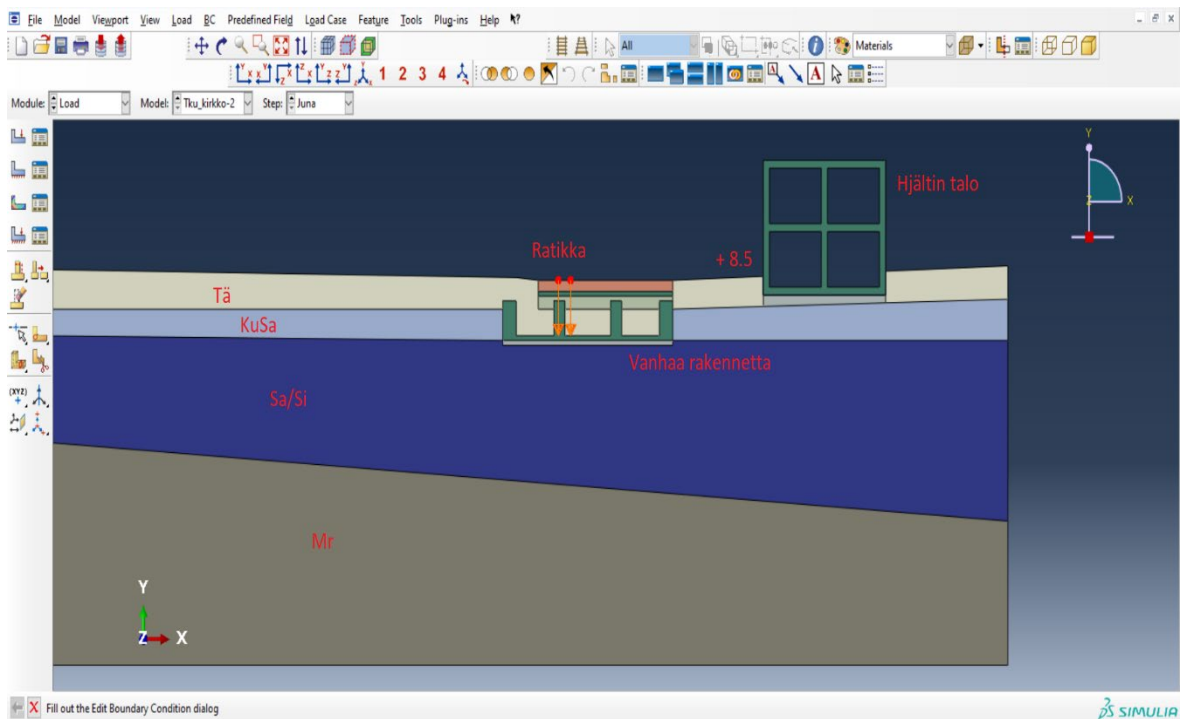
Kuva 4 b. Laskentapöykkileikkaus "kirkon alue", siltamainen rakenne, kirkko.



Kuva 4 c. Laskentapöykkileikkaus "kirkon alue", kelluva rakenne, kirkko.



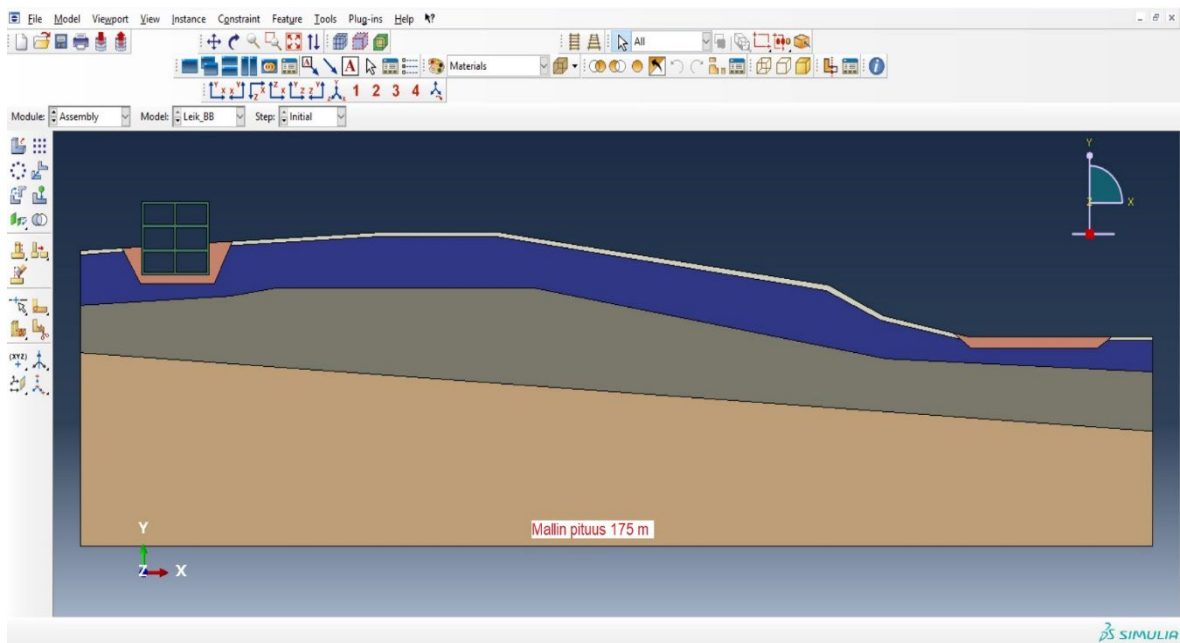
Kuva 4 d. Laskentapoikkileikkaus "kirkon alue", siltamainen rakenne, Hjältin talo.



Kuva 4 e. Laskentapoikkileikkaus "kirkon alue", kelluva rakenne, Hjältin talo.



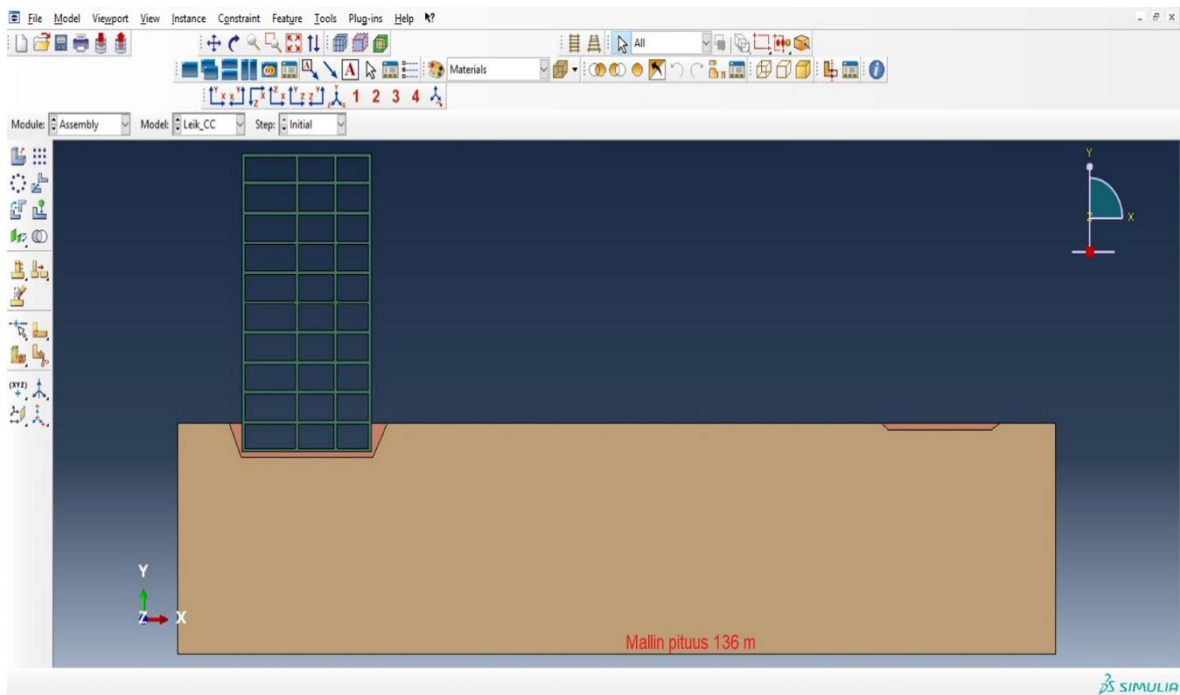
Kuva 5 a. Kohde B-B.



Kuva 5 b. Laskentapoikkileikkaus "B-B" mallinnuksessa.



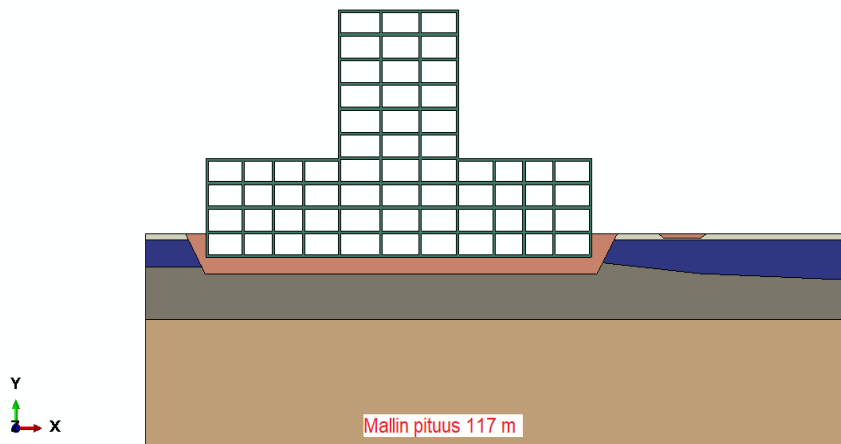
Kuva 6 a. Kohde C-C.



Kuva 6 b. Laskentapoiikkileikkaus "C-C" mallinnuksessa.



Kuva 7 a. Kohde D-D.



Kuva 7 b. Laskentapöikileikkaus "D-D" mallinnuksessa.

Laskennan periaatteet

Suunnittelualueeseen kohdistuvaa tärinää on tarkasteltu FEM-laskennan tulosten perusteella. Laskennallisessa tarkastelussa tärinän herätteen (lähtötaso) värähtelytaso on arvioitu raiteilla liikennöivän raitiotien 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 tärinän lähtötasoja, jolloin niiden vaikutus voi olla 5...10-kertainen normaalin kaluston aiheuttamaan herätteen verrattuna.

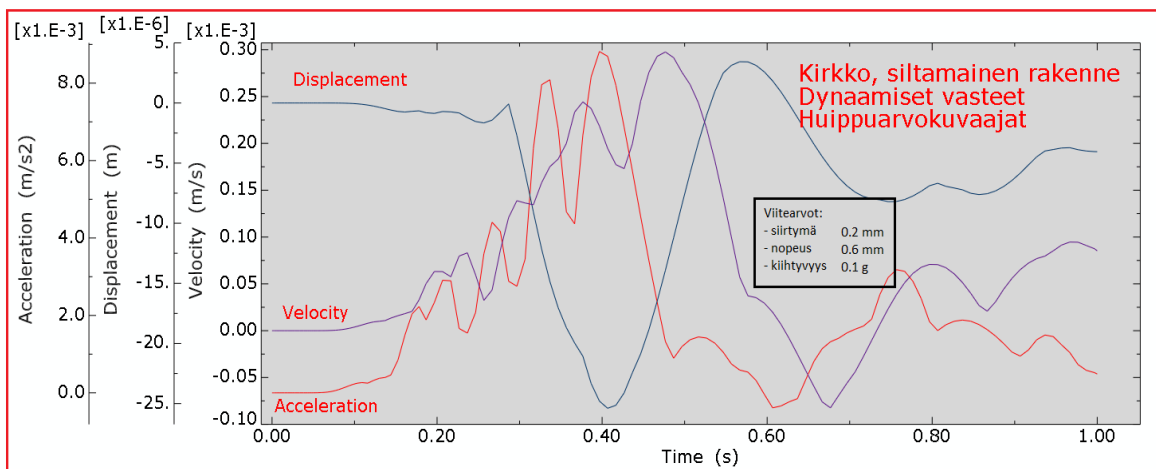
Pohjasuhteiden arvioinnissa on käytetty alueen maaperätietojen perusteella muodostettua geoteknistä poikkileikkausta.

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

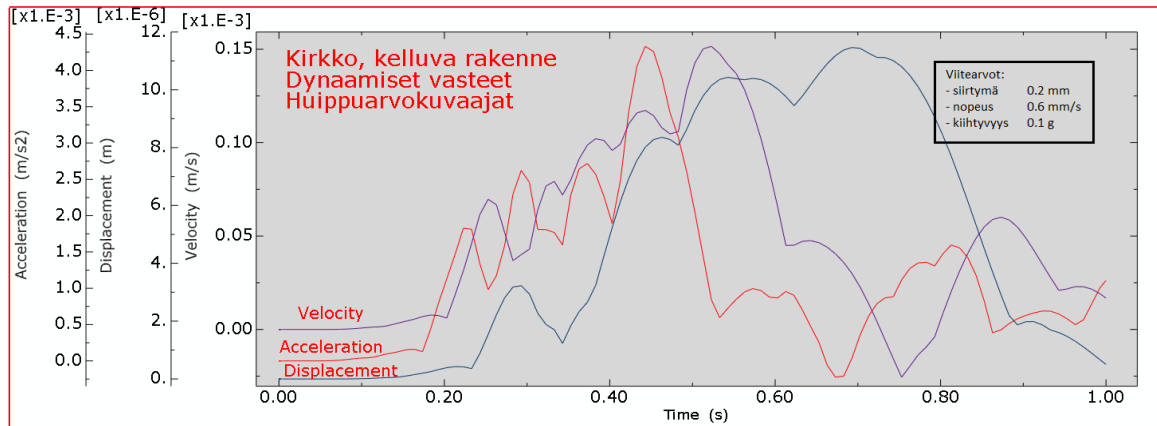
Dynaamisessa analyysissä raitiotien kiskoja kuvaaviin solmuihin kytkettiin arvioidun tärinäimpulssin mukainen kuorma-amplitudi. Laskennassa käytetyn kuorman amplitudi on saatu empiirisen mittaustiedon perusteella, jossa on otettu huomioon akselipaino ja lovipyyöräefekti. Laskennan aikajaksoksi valittiin 1 s, koska vasteen suppeneminen on tällöin jo havaittavissa. Maksiminopeutena käytettiin 40 km/h ja akselipainona 13 tonnia.

Laskennan mallipoikkileikkaus (yksinkertaistettu runkojäykkyys) on kuvattu elementtimenetelmällä käyttäen 2D-solid –tyyppisiä lineaarisia tasomuodonmuutostilaelementtejä, joiden DOF –luku on 2 kpl solmua kohden (translaatiovapausasteet). Mallien koot vaihtelivat välillä DOF = 24500...36400. Mallien reunat ja pohja olivat reunaehdoiltaan energiaa absorboivat. Rakennusten jäykistyksen oletetaan tapahtuvan hissikulun ja/tai osittaisen runkojäykistämisen kautta. Mallien mahdolliset tukipaalu- ja perustukset pehmeiköstä johtuen on toteutettu muodostamalla elementaariset sidosyhtälöt rakennuksen alapinnan (vastaavien kohtien) ja alimman maakerroksen välille.

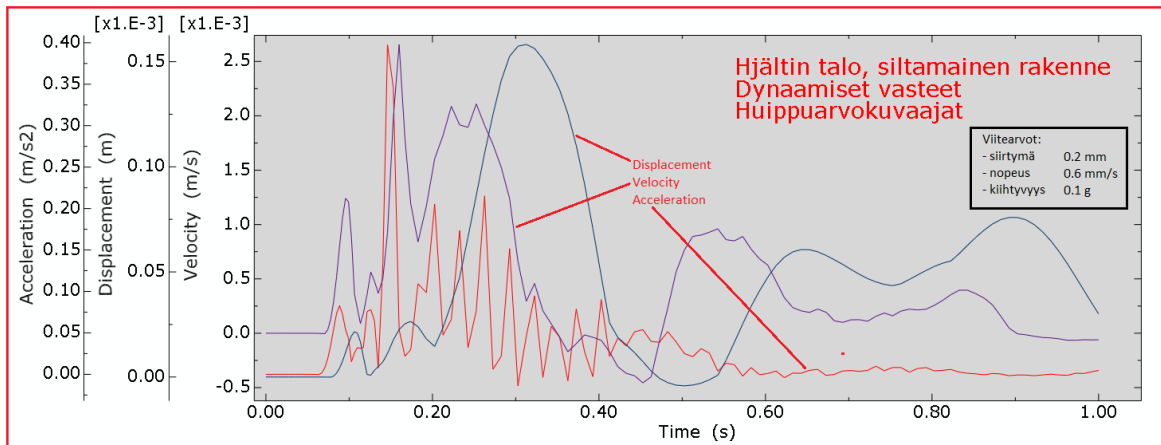
Tulokset



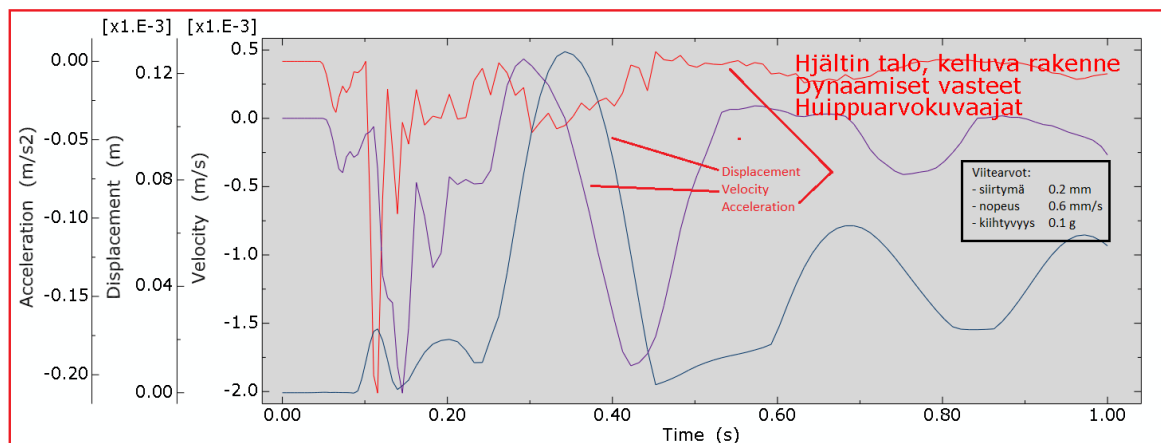
Kuva 8 a. Dynaaminen vaste, kirkon kohde, kirkon puoli, siltamainen rakenne, vastekäyrästä huippuarvokuvaajat.



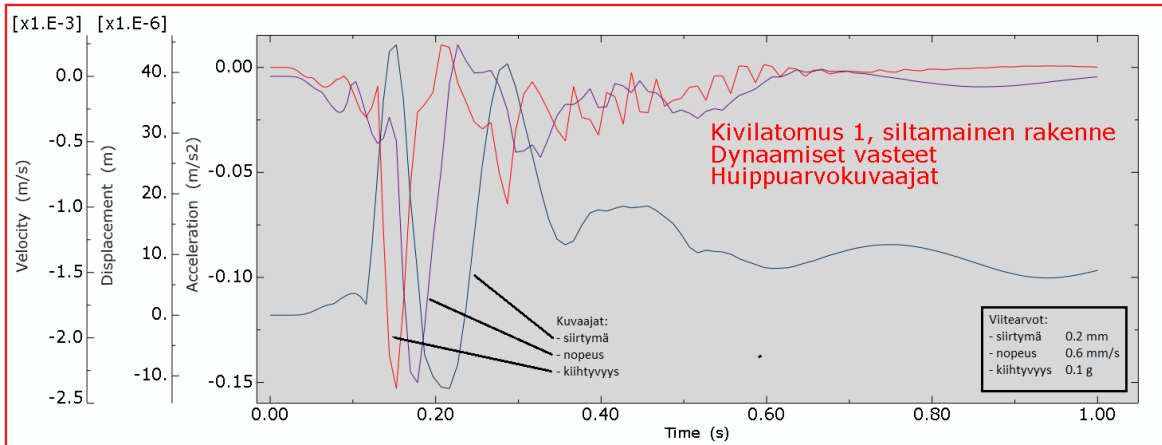
Kuva 8 b. Dynaaminen vaste, kirkon kohde, kirkon puoli, kelluva rakenne, vastekäyrästä huippuarvokuvaajat.



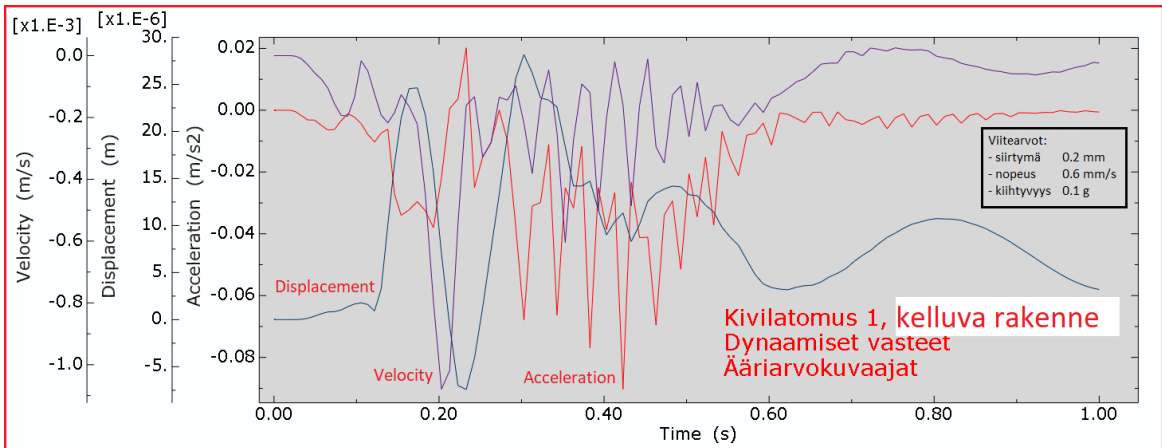
Kuva 8 c. Dynaaminen vaste, kirkon kohde, Hjältin talo, siltamainen rakenne, vastekäyrästä huippuarvokuvaajat.



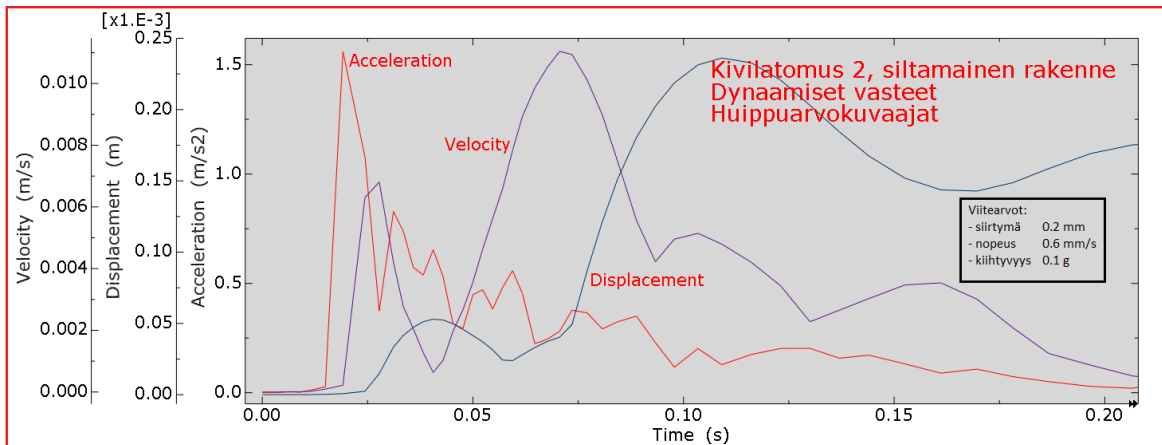
Kuva 8 d. Dynaaminen vaste, kirkon kohde, Hjältin talo, kelluva rakenne, vastekäyrästä huippuarvokuvaajat.



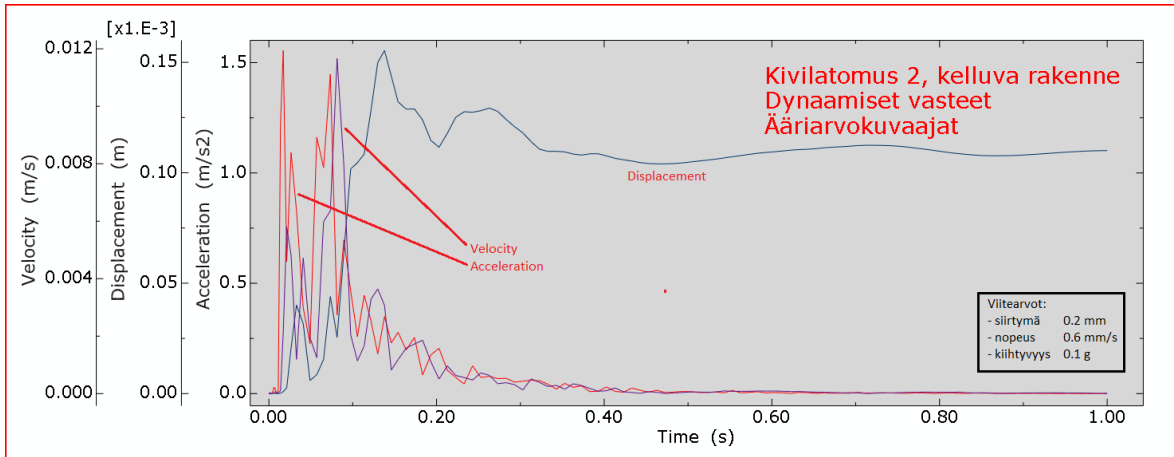
Kuva 8 e. Dynaaminen vaste, kirkon kohde, kivilatomus 1 (arkeologinen kohde), siltamainen rakenne, vastekäyrästä huippuarvokuvaajat.



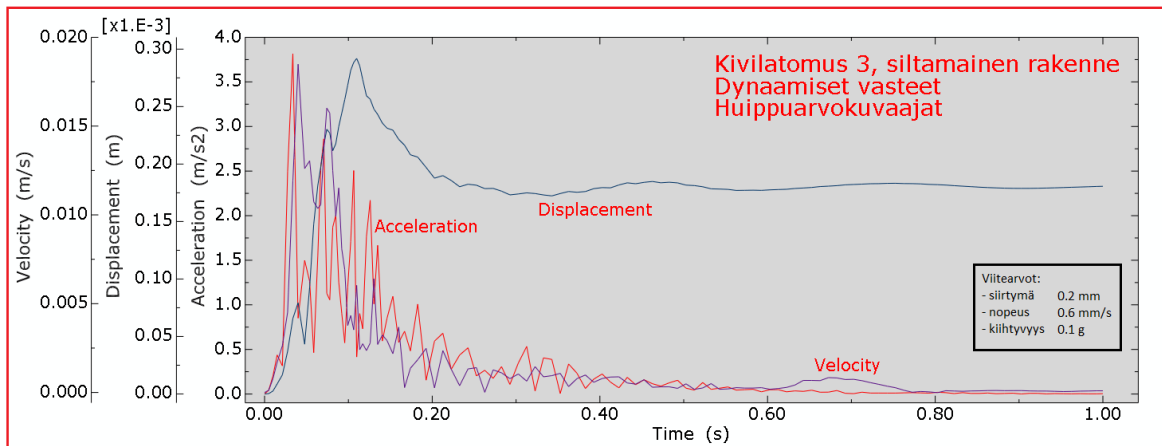
Kuva 8 f. Dynaaminen vaste, kirkon kohde, kivilatomus 1 (arkeologinen kohde), kelluva rakenne, vastekäyrästä huippuarvokuvaajat.



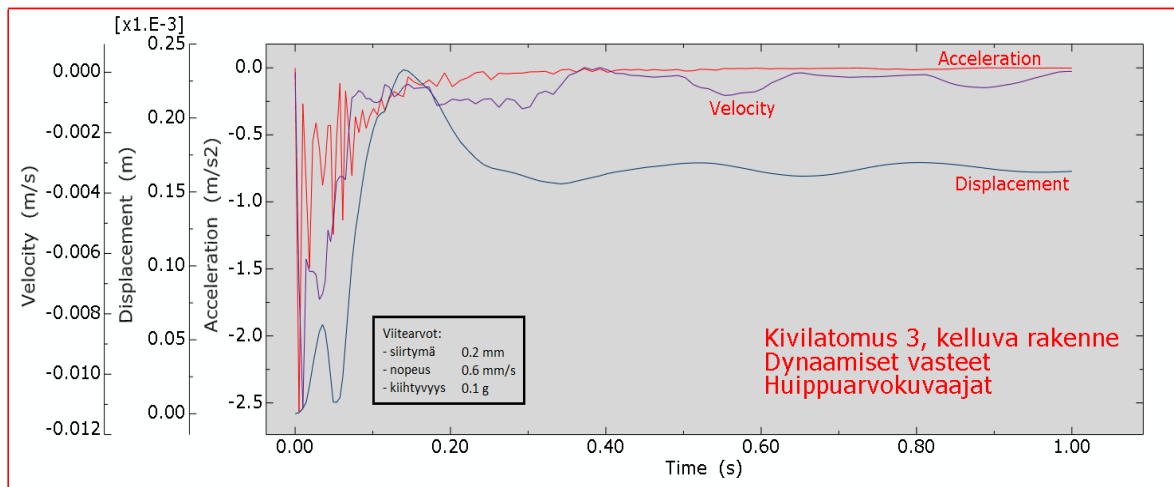
Kuva 8 g. Dynaaminen vaste, kirkon kohde, kivilatomus 2 (arkeologinen kohde), paalutettu rakenne, vastekäyrästä huippuarvokuvaajat.



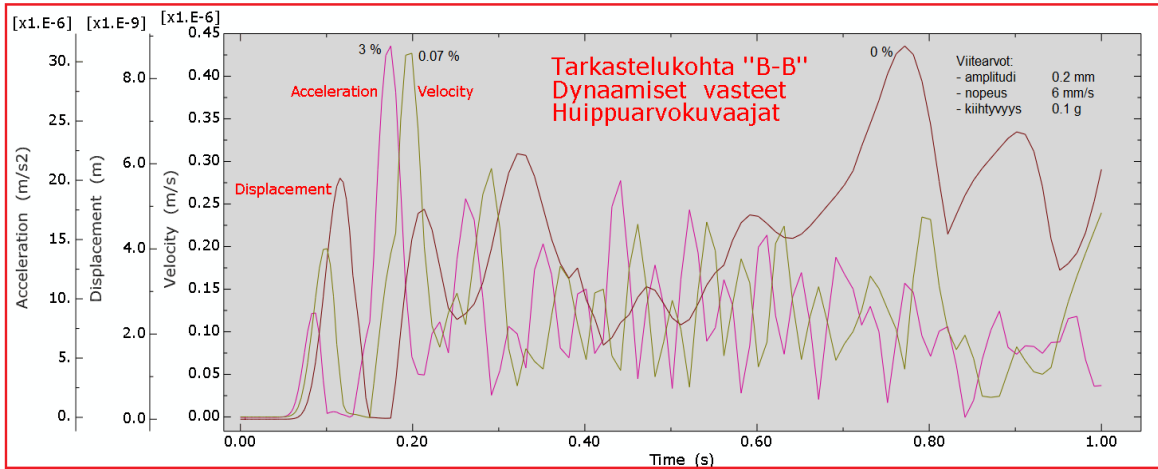
Kuva 8 h. Dynaaminen vaste, kirkon kohde, kivilatomus 2 (arkeologinen kohde), kelluva rakenne, vastekäyrästäön huippuarvokuvaajat.



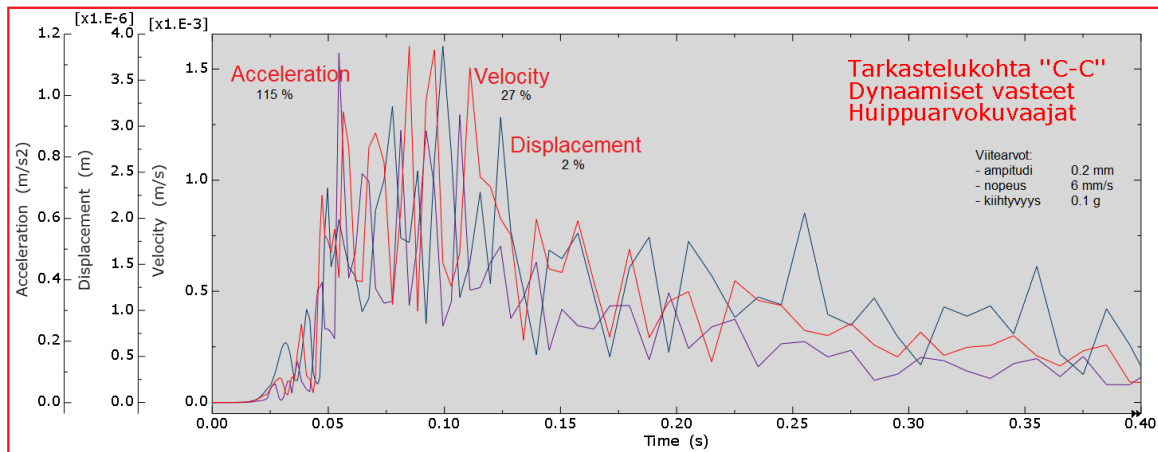
Kuva 8 i. Dynaaminen vaste, Hjältin talo, kivilatomus 3 (arkeologinen kohde), paalutettu rakenne, vastekäyrästäön huippuarvokuvaajat.



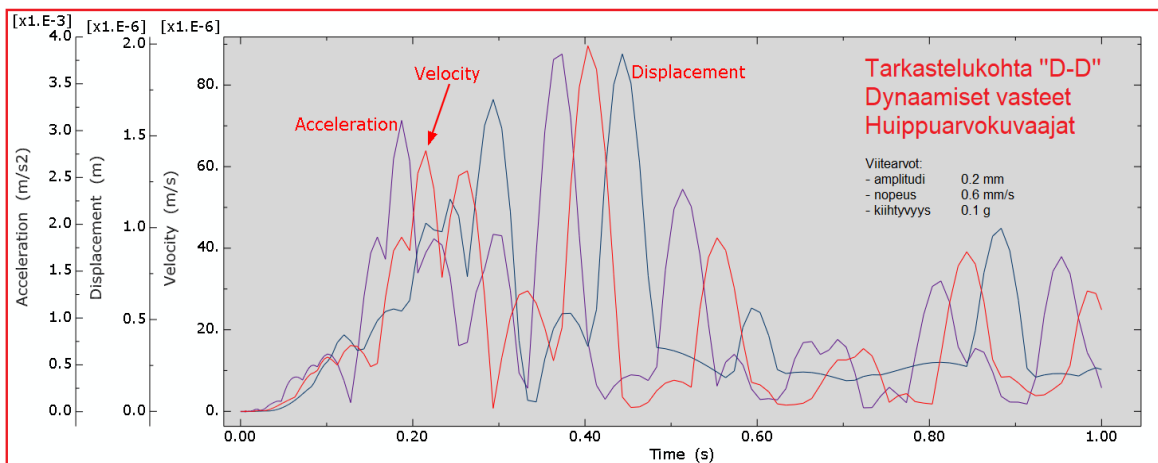
Kuva 8 j. Dynaaminen vaste, Hjältin talo, kivilatomus 3 (arkeologinen kohde), kelluva rakenne, vastekäyrästäön huippuarvokuvaajat.



Kuva 9. Dynaaminen vaste, kohde B-B, vastekäyrästäön huippuarvokuvaajat.



Kuva 10. Dynaaminen vaste, kohde C-C, vastekäyrästäön huippuarvokuvaajat.



Kuva 11. Dynaaminen vaste, kohde D-D, vastekäyrästäön huippuarvokuvaajat.

6. Arviointia

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 on noin 50 % värähtelyn maksimiarvosta. Tulostekuvissa on esitetty ns. huippuarvokuvaaja, joka edustaa yksittäisten havaintopisteiden ääriarvoa (min/max).
- massoitellun etäisyys tärinää mitoittavaan raiteeseen (kiskoon), rakennuksen leveys ja korkeus ilmenevät kuvista 4...7. Maksiminopeutena on käytetty 40 km/h ja akselipainona 13 tonnia.
- laskennallisen tarkastelun perusteella värähtelyn maksimitasot (% viitearvosta) laskentapisteissä ilmenevät taulukoista 3. Esitettynä on myös vaurioitumisherkkyuden suhteen painotettu keskiarvo. Tarkastelujakson (1 s) aikana on nähtävissä värähtelyn vaimentuminen. Suositeltuun ohjearvoon (0,6 mm/s) verrannollinen tulos (vw,95) alittuu kohteissa pääosin.

Taulukko 3 a. Laskennallisten vasteiden kooste, kirkon ja Hjältin kohdat.

	kirkko	kirkko	Hjält	Hjält
	siltamainen	kelluva	siltamainen	kelluva
%				
a	0,8	5	40	20
u	0	6	75	60
v	25	13	208	42
ka	9	8	107	41

Taulukko 3 b. Laskennallisten vasteiden kooste, leikkausten B, C ja D kohdat.

	kohde		
	B	C	D
%			
a	3	115	0,4
u	0	2	1
v	0,07	27	7,5
ka	1	48	3

Taulukko 3 c. Laskennallisten vasteiden kooste, kivilatomoiset (arkeologinen kohde) (vrt. kuvat 4b ja 4d).

	kivilatomoiset		kivilatomoiset		kivilatomoiset	
	1		2		3	
	siltamainen	kelluva	siltamainen	kelluva	siltamainen	kelluva
%						
a	15	8	150	150	375	250
u	20	15	125	75	150	125
v	206	83	0,9	1	2	1
ka	80	35	92	75	176	125

7. Yhteenveto ja johtopäätökset

Tässä tarkastelussa on arvioitu ihmisen tärinänä tunteman värähtelyn tasoa ja vaimentumista radan läheisyydessä sekä rakenteiden vaurioitumisherkkyttä. Tässä yhteydessä on tutkittu pysty- ja vaakasuuntaista värähtelyä. Arvioituja värähtelytasoja on verrattu tärinälle annettuihin suositusarvoihin. Mittauksia ei kohteessa ole tehty. Keskisiä johtopäätöksiä ovat:

- Keskimäärin paalutetun laattarakenteen vasteet ovat suurempia kuin kelluvan.
- Kirkon linjauksen vasteet (taulukko 3 a) ovat pienempiä kuin Hjältin talon. Syynä tähän ovat etäisyys ja massa.
- Linjaus tulee ongelmallisten kohtien osalta olemaan pääosin pohjavahvistettua ja vasteet ongelmakohdissa ovat pääosin hallinnassa tätä kautta. Tarvittaessa lisätoimenpiteitä tärinän torjumiseksi ovat pohjaimet ja vaimenninmatot. Myös ponttiseinät, stabilointi, massanvaihto ja kumirouheseinät tulevat kysymykseen. Vaimennusten tavoitteena on saada tärinätasot suositusten mukaiselle tasolle (alle 0,6 mm/s).
- Tuomiokirkon poikkileikkauksessa radan tuottamat värähtelyvasteet osittain ylittävät asetetut suositukset Hjältin talon (Uudenmaankadun linjaus) kohdalla. Vaurioitumisalttiudelle asetetun viitearvon ei kuitenkaan arvioida ylittyvän arkeologisia kohteita lukuun ottamatta. Vaurioiden voidaan kuitenkin olettaa olevan pieniä säilytettävillä arkeologisille kohteille. Jatkosuunnittelussa on kiinnitettävä erityistä huomiota sekä työn aikaisiin ratkaisuihin että lopullisiin ratkaisuihin, joilla varmistetaan säilytettävien arkeologisten kohteiden säilyminen ehjinä.
- Kohteiden B, C ja D dynaamisissa laskennoissa huomioitiin rakennusten herkäät laitteistot ja dynaamiset vasteet olivat hyvin pieniä ja siten viitearvojen rajoissa.
- Tarkastelussa ei ole otettu huomioon rakennuksiin mahdollisesti sijoitettavia uusia teknisiä laitteita ja niiden suojaamista tärinältä.

- Epävarmuutena tulee mainita pohjatutkimusten karkeus, jolloin esimerkiksi vinot kalliopinnat sekä suuret lohkarat saattavat aiheuttaa heijasteita ja värähtelyn interferoitumista

Helsinki 24.5.2022

WSP Finland Oy

Mauri Koskinen

Mauri Koskinen

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.