

Tärinä- ja runkomeluseelvitys

KAS-vaihe



**Tampereen
Ratikka**

PIRKKALA // LINNAINMAA

VERSIONHISTORIA

Versio	Päiväys	Muokkaaja	Muutoksen kuvaus
00	6.3.2024	J. Juuti	Selvitys julkaistu, sis. lohkot 3 ja 6

Sisällys

1	Hankkeen kuvaus	4
1.1	Kalusto, liikennöinti nopeudet ja radan päällysrakenne	4
1.2	Maaperä ja pohjanvahvistukset	6
1.3	Sillat, vaihteet ja muut radan epäjatkuvuuskohtat	7
2	Tärinä ja runkomelu	9
2.1	Yleistä	10
2.2	Tärinäanalyysin perusteet	12
2.2.1	Rakenteiden vaurioitumisalttiuteen vaikuttava tärinä	12
2.2.2	Asumismukavuuteen vaikuttava tärinä	14
2.3	Runkomeluanalyysin perusteet	16
3	Tulokset	18
3.1	Tärinä	18
3.1.1	Rakennusten vaurioitumisalttius	19
3.1.2	Asumismukavuus	20
3.1.3	Linnainmaa, lohko 3	21
3.1.4	Hatanpää, lohko 6	21
3.1.5	Härmälä, lohko 7	22
3.1.6	Pirkkala, lohko 8	22
3.2	Runkomelu	22
3.2.1	Linnainmaa, lohko 3	25
3.2.2	Hatanpää, lohko 6	29
3.2.3	Härmälä, lohko 7	30
3.2.4	Pirkkala, lohko 8	30
4	Yhteenveto ja jatkotoimenpiteet	30
5	Lähteet	31

1 HANKKEEN KUVAUS

Tämä tärinä- ja runkomeluserelvitys on osa Pirkkalan-Linnainmaan raitiotiehankkeen kehitysvaiheen suunnittelukokonaisuutta. Selvitys palvelee erityisesti kehitysvaiheen katusuunnittelua.

Hankkeen rataosuudet jaetaan lohkoihin siten, että lohko 3 käsittää Linnainmaan osuuden (Kaupin kampus, pl. 4588 – Linnainmaa, pl. 8888), lohko 6 Hatanpään osuuden (Sorin aukio, pl. 627 – Hatanpää C, pl. 2947), lohko 7 Härmälän osuuden (Rantaperkiö, pl. 2947 – Partola, pl. 6327) ja lohko 8 Pirkkalan osuuden (Pakkala, pl. 6327 – Suuppa, pl. 9898). Raitioteiden linjaukset esitetään likimääräisesti seuraavassa kuvassa (Kuva 1).



Kuva 1 Raitiotien linjaus välillä TAYS – Linnainmaa ja Sorin aukio - Pirkkala (Pirkkala-Linnainmaa raitiotien hankesuunnitelma).

Linnainmaan haaran linjaus (yht. 4,3 km) on likimain seuraava: linja alkaa nykyiseltä Kaupin kampuksen pysäkiltä ja jatkuu Lääkärintien ja Tenniskadun kautta uudelle väyläosuudelle (vireillä olevat asemakaavat 8618 ja 8931) kohti Alasjärveä. Alasjärven lounaiskulmalla väylä ylittää Teiskontien uutta siltaa myöten ja jatkuu Teiskontietä myötäillen Heikkilänkadulle, josta se jatkuu Mäentakusenkadun kautta Linnainmaan päätepysäkille. Linnainmaan haara kulkee kokonaisuudessaan Tampereen kuntarajojen sisäpuolella.

Pirkkalan haaran linjaus (kokonaispituus yht. 9,3 km) on vastaavasti likimain seuraava: linja alkaa Tampereelta nykyisen Sorin aukion pysäkiltä ja jatkuu Hatanpään valtäväylää ja Nuolialantietä pitkin Pirkkalan kunnan rajalle (yht. 4,7 km). Pirkkalan kunnan puolella linja jatkuu Kenkätietä ja Kaartotietä myötäillen Naistenmatkantielle ja sitä pitkin Pirkkalan Suupan päätepysäkille (yht. 4,6 km).

1.1 Kalusto, liikennöintinopeudet ja radan päällysrakenne

Tampereella ja Pirkkalassa liikennöitävien raitiovaunujen malli on Arctic X34; kyseinen malli on kolmiosainen ja 37,3 metriä pitkä (Tampereen ratikka, 2024). Raitiovaunun bruttopainon arvioidaan olevan maksimissaan noin 80 tonnia maksimiakselipainon

mukaan (8-akselia, max. 10 tonnia / akseli). Vaunun taarapaino (omapaino) on 56,8 tonnia. Vaunun akseliväli on 1800 millimetriä.

Vaunujen nopeusrajoitukset eri rataosuuksilla vaihtelevat välillä 25 – 70 km/h. Nopeusrajoitukset esitetään kootusti seuraavissa taulukoissa (Taulukko 1-1 ja Taulukko 1-2).

Taulukko 1-1. Nopeusrajoitukset, Linnainmaan haara

Nopeusrajoitus [km/h]	Alkupaalu	Loppupaalu
40	4588	4830
50	4830	5280
40	5280	5600
30	5600	5760
40	5760	6900
70	6900	7880
40	7880	loppuun

Taulukko 1-2. Nopeusrajoitukset, Pirkkalan haara

Nopeusrajoitus [km/h]	Alkupaalu	Loppupaalu
40	627	2940
25	2940	3040
40	3040	5780
30	5780	6260
50	6360	loppuun

Alla olevassa kuvassa esitetään hankesuunnitelmavaiheen arvio rataosuuksien keskinopeuksista (Kuva 2).



Kuva 2 Vaunujen keskinopeudet rataosuuksittain (Pirkkala-Linnainmaa raitiotien hankesuunnitelma).

Radan päällysrakenne on osuiksittain joko avo- tai kiintoraidetta. Rataosuuksien päällysrakennetyypit listataan seuraavassa taulukossa (Taulukko 1-3).

Taulukko 1-3 Kiinto- ja avoraideosuudet

Linnainmaan haara			
Kiintoraide	Avoraide	Alkupaalu	Loppupaalu
x		4588	4730
	x	4730	5760
x		5760	6860
	x	6860	7880
x		7880	loppuun
Pirkkalan haara			
Kiintoraide	Avoraide	Alkupaalu	Loppupaalu
x		626	3090
	x	3090	3860
x		3860	6710
	x	6710	9330
x		9330	loppuun

Kaikilla uusilla rataosuuksilla kiskon alle asennetaan elastiset kiskonaluslevyt.

1.2 Maaperä ja pohjanvahvistukset

Rataosuuksien ja niiden lähialueiden maaperätiedot perustuvat pohjatutkimuksiin sekä maaperäkarttoihin (GTK, 2024). Tämän selvityksen tekohetkellä maaliskuussa 2024 uusien raitiotielinjojen pohjanvahvistusmenetelmät ja sijainnit perustuvat hankesuunnitelmiin.

Linnainmaan haaran alkupuoliskolla noin paalulle 5900 asti kallio pääosin on 3 – 6 metrin syvyydellä maanpinnasta ja pintamaakerrokset vaihtelevat siltistä tiiviiseen hiekkaiseen soramoreeniin. Paaluvälillä 5900 – 6300 on paksuhko pehmeikkö, jossa kallio on pääosin yli 10 metrin syvyydellä ja välillä 6300 – 6950 maaperä vaihtelee siltistä ja savesta hiekkamoreeniin kallionpinnan ollessa 3 – 10 metrin syvyydellä maanpinnasta. Teiskontien eteläpuolella paaluvälillä 7350 – 7850 kallio on lähellä maanpintaa (< 3 m) ja maakerrokset ovat täyttöjä tai moreenia. Paaluvälillä 7850 – 8200 kallionpinta on yleensä yli viiden metrin syvyydellä ja maakerrokset vaihtelevat siltistä soraiseen hiekkään ja moreeniin. Pappilan risteyssillan jälkeen paalulta 8350 eteenpäin radan päätepaalulle asti kallionpinta on pääosin yli kolmen metrin syvyydessä, joskin radan loppuosan läheisyydessä kallio on lähellä maanpintaa. Maakerrokset radan loppuosalla vaihtelevat täytöistä saveen, silttiin ja moreeniin.

Linnainmaan haaralla radan pohjanvahvistusmenetelmiin kuuluvat massanvaihdot, betoniarinat ja paalulaatat. Suunnitellut vahvistustoimenpiteet esitetään alla olevassa taulukossa (Taulukko 1-4) paaluväleittäin.

Taulukko 1-4 Pohjanvahvistukset, Linnainmaan haara

Massanvaihto	Betoniarina	Paalulaatta	Alkupaalu	Loppupaalu	Pituus [m]
x			4808	4988	180
x			5148	5208	60
x			5328	5478	150
x			5638	5778	140
x			5868	5918	50
	x		5968	6028	60
		x	6028	6318	290
x			6318	6408	90
x			6498	6548	50
x			6708	6778	70
x			6848	6918	70
		x	6918	6948	30
	x		7868	7988	120
x			8738	8808	70

Pirkkalan haaran Hatanpään osuudella paaluvälillä 627 – 2940 kallio on pääsääntöisesti syvällä (> 10 m maanpinnasta) ja maakerrokset koostuvat täytöistä, savi- ja silttikerrostumista sekä moreenista.

Pirkkalan haaralla radan pohjanvahvistusmenetelmiin kuuluvat betoniarinat ja paalulaatat. Suunnitellut vahvistustoimenpiteet esitetään alla olevassa taulukossa (Taulukko 1-5) paaluväleittäin.

Taulukko 1-5 Pohjanvahvistukset, Pirkkalan haara

Betoniarina	Paalulaatta	Alkupaalu	Loppupaalu	Pituus [m]
	x	977	1002	25
	x	1027	1217	190
x		1217	1607	390
	x	1597	2607	1010
	x	2622	2677	55
x		2677	2827	150
x		3207	3377	170
	x	5107	5337	230
	x	5350	5437	87
x		5437	5797	360
	x	5797	6137	340
x		6577	6847	270
x		7987	8527	540
x		8957	9147	190

1.3 Sillat, vaihteet ja muut radan epäjatkuuskohdat

Rataosuuksilla sijaitsevat sillat ja vaihteet ovat eräänlaisia radan epäjatkuuskohtia ja siten niiden läheisyydessä on mahdollista esiintyä tavanomaista voimakkaampaa tärinää.

Esimerkiksi runkomelun laskennallisessa arvioinnissa vaihteet on huomioitava korjaustekijällä $\Delta L_v = +10$ dB (Talja & Saarinen 2009). Tässä selvityksessä myös siltojen pääty- ja maatuet ja siltarummut huomioidaan vastaavalla korjaustekijällä.

Linnainmaan haaralla on kaksi siltaa: Rahjukosken silta (S51, pv. 6950 – 7350) ja Pappilan risteyssilta II (S52, pv. 8200 – 8350). Lisäksi paaluvälillä 5900 - 5910 sijaitseva siltarumpu voidaan myös tulkita radan epäjatkuvuuskohdaksi. Pirkkalan haaralla on vastaavasti yhteensä yhdeksän siltaa, jotka luetellaan seuraavassa taulukossa (Taulukko 1-6). Sillan alku- ja loppupaaluksi katsotaan tässä selvityksessä siirtymälaattojen tukilinjat sillan pääty- tai maatuella.

Taulukko 1-6 Sillat, Pirkkalan haara

	Alkupaalu	Loppupaalu	Pituus [m]
S101, Viinikanlahden silta	1000	1032	32
S102, Vihilahden silta	2604	2624	20
S103, Härmälänojan silta	5334	5347	13
S104, Kenkätien alikulkukäytävä II	5537	5543	6
S105, Simonpolun alikulkukäytävä	6902	6908	6
S106, Nuolialan alikulkukäytävä	7422	7428	6
S107 ja 108, Teräksen AKK ja raittisilta	9279	9302	23
S109, Suupan alikulkukäytävä	9829	9835	6

Rataosuuksille suunnitellut vaihteet esitetään kootusti seuraavissa taulukoissa (Taulukko 1-7 ja Taulukko 1-8).

Taulukko 1-7. Vaihteiden sijainnit, Linnainmaan haara

Numero	Alkupaalu	Loppupaalu	Pituus [m]
1	6498	6526	28
2	7982	8010	28
3 ja 4	8431	8460	29
5 (ja 6)	8720	8780	60

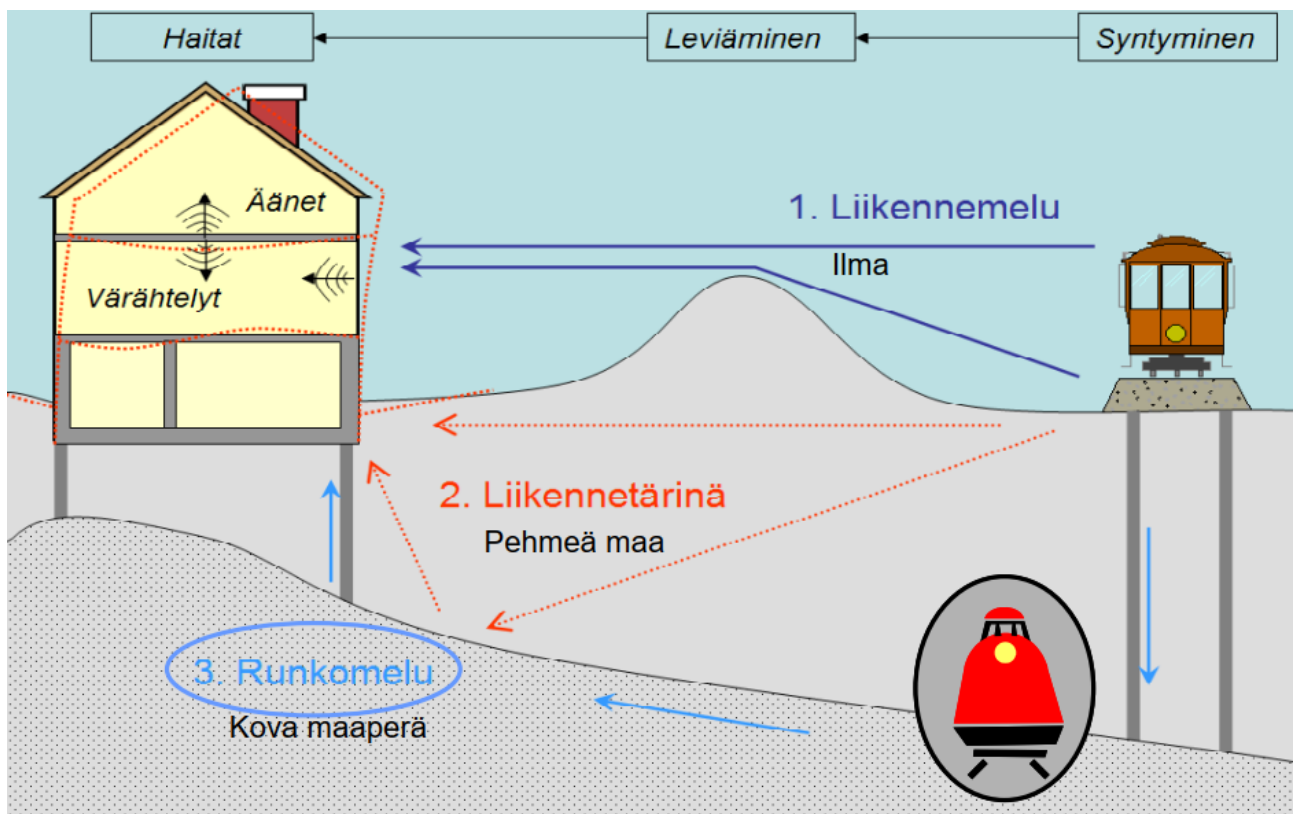
Taulukko 1-8. Vaihteiden sijainnit, Pirkkalan haara

Numero	Alkupaalu	Loppupaalu	Pituus [m]
1	2285	2314	29
2	3035	3063	28
3	5543	5573	30
4	5596	5625	29
5	5818	5847	29
6 ja 7	6023	6063	40
8	7761	7789	28
9 ja 10	9607	9636	29
11	9807	9848	41

2 TÄRINÄ JA RUNKOMELU

Tärinän ja runkomelun arvioinnin tausta-aineistona ovat muun muassa seuraavat VTT:n julkaisut: Suositus liikennetärinän mittaamisesta ja luokituksesta (2004), Suositus liikennetärinän arvioimiseksi maankäytön suunnittelussa (2006), Rakennukseen siirtyvän liikennetärinän arviointi (2008), Maaliikenteen aiheuttaman runkomelun arviointi (2009), Ohjeita liikennetärinän arviointiin (2011) ja Liikennetärinä – Alueiden tärinäkartoitus ja rakenteiden vaurioitumisalttius (2014).

Raitiotieliikenne synnyttää vaunun, väylän ja maaperän vuorovaikutuksen myötä maahan aaltoliikettä eli värähtelyä, jota kutsutaan liikennetärinäksi. Värähtelyn aiheuttavaa tekijää kutsutaan yleisesti herätteeksi. Herätteen aikaansaama tärinä leviää maassa ympäristöön ja voi edelleen siirtyä lähialueiden rakennuksiin aiheuttaen muun muassa rakennusrungon ja välipohjien värähtelyä. Kyseinen värähtely voidaan aistia tuntoaistilla. Runkomelulla tai runkoäänellä tarkoitetaan maaperän kautta rakennukseen siirtyvää värähtelyä, joka muuttuu ihmisen aistimaksi ääneksi. Tärinän ja runkomelun synty- ja leviämismekanismien periaatteet esitetään seuraavassa kuvassa (Kuva 3).



Kuva 3. Tärinän ja runkomelun syntyminen, leviäminen ja vaikutukset ympäristöön (Tajja & Saarinen 2009).

Liikennetärinä voi pahimmillaan johtaa rakennevaurioihin lähialueen rakennuksissa, mutta tämä ei ole todennäköistä raitiovaunun tapauksessa. Sekä tärinä että runkomelua voivat lisäksi häiritä asumismukavuutta, keskittymistä ja nukkumista. Yleensä tärinä aiheuttaa eniten haittaa alueilla, joilla on pehmeitä maakerroksia. Suurin runkomeluriski taas on yleensä alueilla, joilla on kovia maakerroksia tai kallio lähellä maanpintaa.

2.1 Yleistä

Tärinän voimakkuuteen ja etenemiseen maassa vaikuttavat muun muassa:

- liikennöitävän kaluston tyyppi, kunto, paino ja nopeus
- väylän rakenne, kunto ja perustamistapa
- maaperän ominaisuudet ja kerroksellisuus
- väylän epäjatkuvuuskohdat, kuten vaihteet, sillat ja alikulut

Edellä mainitut tekijät vaikuttavat myös tärinän taajuussisältöön. Mikäli maapohjan ominaistaajuus ja herätteen taajuus ovat samaa suuruusluokkaa, syntyy resonanssi-ilmiö ja tärinän amplitudit kasvavat. Kun etäisyys tärinälähteseen kasvaa, tärinän voimakkuus pienenee muun muassa säteilyvaimennuksen johdosta. Karkeasti arvioiden rataliikenteen aiheuttama värähtelyn amplitudi puolittuu, kun etäisyys radasta kasvaa

- karkearakeisilla mailla noin 1,5-kertaiseksi
- sitkeillä savimailla noin 3-kertaiseksi ja
- pehmeillä savimailla noin 6-kertaisiksi

Liikennetärinän vaikutusalue ulottuu pisimmälle hienorakeisissa hyvin pehmeissä tai pehmeissä maapohjissa (savi, siltti, turve ja lieju), joiden suljettu leikkauslujuus on alle 25 kN/m². Kovissa maaperissä vaikutusalue on rajatumpi. Pienin liikennetärinän vaikutusalue on kovissa karkearakenteisissa maapohjissa (sora, hiekka) ja moreenimaalajeissa (silttimoreeni, hiekkamoreeni, soramoreeni) sekä kalliossa.

Raideliikenne aiheuttaa tärinää tyypillisesti kolmella eri taajuusalueella. Kulkuneuvon akselit aiheuttavat liikkuvaa ”staattista painumaa” radalle, mikä synnyttää maahan aaltoliikettä. Aaltoliikkeiden taajuus on vaunun akseleiden ohitustaajuus eli Tampereen raitiovaunun tapauksessa noin 4-10 Hz. Kyseisellä taajuusalueella tärinä voi vahvistua hienorakeisissa maapohjissa ja aiheuttaa vaakasuuntaista resonanssivärähtelyä 1-2 kerroksisen pientalon runkorakenteissa. Paksuilla pehmeiköillä matalataajuinen tärinä voi levitä huomattavan kauas radasta. Vaunukaluston, ratapölkkyjen ja radan epäjatkuvuuskohtien vuorovaikutuksesta muodostuvat herätteet aiheuttavat taajuudeltaan noin 10-50 Hz tärinää. Tällä taajuusalueella tärinä voi vahvistua kiinteissä irtorakeisissa kitkamaapohjissa ja aiheuttaa erityisesti rakennusten välipohjien pystysuuntaista värähtelyä. Vaunun pyörien ja kiskojen kontaktista taas syntyy taajuudeltaan 30-150 Hz tärinää, joka siirtyy helpoimmin tiiviissä maassa ja kalliossa ja kuullaan yleensä runkoääninä rakennuksissa.

Liikennetärinä siirtyy maaperän kautta lähialueilla sijaitsevien rakennusten maakontaktissa olevien rakenneosien (mm. perustukset ja maanpainesinät) kautta runkorakenteisiin ja edelleen välipohjiin. Yleensä rakenteisiin siirtyvän värähtelyn taajuussisältö ja amplitudit poikkeavat maapohjan vastaavista, mutta resonanssitilanteessa näin ei välttämättä ole. Liikennetärinä ei tyypillisesti aiheuta rakenteellisia vaurioita tavanomaisessa kunnossa olevissa rakennuksissa tai rakenteissa. Sen sijaan se voi olla haitallista herkille laitteille tai toiminnoille. Tärinän välittymiseen maapohjasta rakennukseen vaikuttavat maapohjassa etenevän tärinän suuruus ja taajuus, maapohjan ominaisuudet perustamisalueella ja rakennuksen perustamistapa, kellarillisuus ja massa sekä rakennusosien dynaamiset ominaisuudet (mm. materiaaliominaisuudet,

jäykkyydet ja jännemitat). Lisäksi rakennuksen yksityiskohtien ja rakenneosien liitosten ominaisuuksilla on vaikutus tärinän ilmentymiseen. Rakenteiden tärinänsietoon ja vaurioitumisriskiin vaikuttavat merkittävästi rakenteiden kuormitushistoria ja kunto.

Merkittävin yksittäinen tekijä tärinän siirtymisessä rakenteisiin on herätetaajuuden sekä maapohjan ja rakenteiden ominaistuuksien suhde (RIL 253-2010). Kun tärinälähteen taajuus ja maapohjan ja rakennuksen ominaistuuksien suhde ovat samaa suuruusluokkaa, on tärinällä parhaat edellytykset siirtyä maaperän kautta rakennukseen. Tällöin myös rakennuksen ja rakenneosien resonanssivärähtely on mahdollinen (resonanssista lisää kohdassa 2.2.2). Rakennukseen siirtyvä tärinä tulee aina olettaa vähintään samansuuruiseksi kuin maapohjassa, vaikka siirtyessään rakennukseen tärinä voikin jossain tapauksissa vaimentua (Talja & Törnqvist 2014).

Pehmeillä maaperillä tehokkain rakenteellinen ratkaisu tärinän vaimentamiseksi on perustaa väylä paalulaatalle, joka pienentää tehokkaasti väylän pystyvärähtelyä (Talja et al. 2008). On oletettavaa, että paalulaatta pienentää myös vaakavärähtelyä, vaikka julkaistua tutkimustietoa aiheesta ei ole tiedossa. Raitioteillä maaperään siirtyvää värähtelyä voidaan vaimentaa myös kiskojen tai radan päällysrakenteen alle sijoitettavilla joustavilla vaimennusosilla tai vaimennusmatoilla. On tarpeen huomioida, että kiskon alle asennettavat joustavat elementit toimivat parhaiten vain yli 30 - 40 Hz:n taajuusalueella ja ratapölkkyjen tai radan alle asennettavat vaimennusmatot vain yli 20 - 30 Hz:n taajuusalueella. Kelluvalla laatalla tai kelluvalla sepelitäytteisellä kaukalolla vaimentava vaikutus voi alkaa jo 10 Hz:n paikkeilta. Taajuusalueiden perusteella edellä mainitut vaimennusratkaisut toimivat parhaiten kovilla maaperillä ja siksi niitä käytetään yleensä ennemminkin runkomelun torjuntaan. Pehmeillä savimailla ne eivät kuitenkaan välttämättä toimi vaimentavasti, vaan voivat jopa kasvattaa tärinää. Tärinää voidaan pyrkiä vaimentamaan myös väylän ja rakennuksen väliin rakennetuin vaimennusseinin ja ääritapauksessa rajoittamalla liikennevälineen ajonopeutta tai liikennöintiä erityisesti yöaikaan.

Todettakoon, että liikennetärinään ja sen leviämiseen vaikuttavia tekijöitä ja epävarmuuksia on niin paljon, että värähtelyn suuruutta rakennuksessa on hyvin vaikeaa arvioida tarkasti käsinlaskentakaavoilla (arviointitaso 2) (Talja et al. 2008). Tarkempaa laskenta-analyysiä varten olisi tarpeen käyttää esimerkiksi FEM-pohjaista ohjelmistoa, jossa maaperän ominaisuudet voitaisiin paremmin huomioida. Luotettavin arvio saataisiin tärinämittauksin perustuen arviointitasoon 3.

Runkomelulla tarkoitetaan VTT Tiedotteen 2468 (Talja & Saarinen 2009) mukaan maaperän kautta rakennukseen siirtyvää värähtelyä, joka muuttuu rakenteissa ääneksi. Runkomelu syntyy kiskon ja raitiovaunun pyörien kosketuksen aiheuttamasta värähtelystä – vastaavasti kuin liikennetärinä – ja välittyy väylän alusrakenteiden ja maaperän kautta läheisten rakennusten perustuksiin. Perustuksesta värähtely etenee rakennuksen runkorakenteita pitkin huonetilojen seinä-, välipohja-, ja yläpohjarakenteisiin. Rakenneosien värähtely synnyttää huonetilan pinnoissa äänen säteilyä, joka etenee ilmassa paineaaltona ja on aistittavissa äänenä. Runkomeluun liittyvä värähtely on voimakkuudeltaan niin pientä, ettei se aiheita minkäänlaista vaaraa rakenteille.

Runkoäänestä aiheutuvan häiriön suhteellisen harvinaisuuden takia tutkimusta sen vaikutuksesta ihmiseen on melko vähän. Runkomelun häiritsevyys riippuu äänitasosta, häiriön toiston määrästä ja ajankohdasta, melun taajuussisällöstä sekä tilan taustamelutasosta (Talja & Saarinen 2009). Runkomeluhaitta on yleensä suurin tilanteissa, joissa sekä väylän että rakennuksen perustukset ulottuvat suoraan peruskallioon tai kovaan kitkamaahan. Pehmeissä maapohjissa kuten savissa ja silteissä runkomelu vaimenee nopeasti sen verrattain korkean taajuuden (16 – 250 Hz) vuoksi.

Runkomelun taajuusalue (16 – 250 Hz) on korkea verrattuna haitalliseksi koettuun matalataajuiseen liikennetärinä, jonka tyypillinen taajuusalue on noin 3 – 50 Hz. Runkomelun kannalta merkittävimmät värähtelyn taajuudet ovat tavallisesti alle 100 Hz, koska rakenneosien ominaistaajudet sijaitsevat yleensä kyseisellä taajuusalueella ja rakenteet ovat siten alttiimpia värähtelylle. Häiritseviä runkoäänitasoja voi esiintyä myös yli 250 Hz taajuuksilla, mikäli rakennus on kiinteässä yhteydessä kallioon, maakerrokset perustusten alla ovat ohuita tai jos rakennus sijaitsee hyvin lähellä väylää.

Runkomelun vaimentamiseen on raitioteillä useita keinoja, kuten joustavien kiskonaluslevyjen käyttäminen, eristelevyjen tai vaimennusmattojen sijoittaminen ratapölkkyjen tai radan päällysrakenteen alle sekä radan perustaminen kelluvalle laattarakenteelle (Talja & Saarinen 2009). Kustannustehokkaimpia ratkaisuja ovat joustavat kiskonaluslevyt sekä radan perustaminen eristelevyjen tai vaimennusmattojen päälle.

2.2 Tärinäanalyysin perusteet

Tärinä- ja runkomeluselvityksessä tarkastellaan raitiotieliikenteen aiheuttaman tärinän vaikutusta radan lähialueiden rakenteisiin ja asumismukavuuteen. Selvitys tehdään perustuen arviontitasoon 2 eli laskenta-analyysin (Törnqvist & Talja 2006). Tärinärisä arvioitaessa käytetään asteikkoa: *ei erityistä riskiä, vähäinen, kohtalainen, suuri ja erittäin suuri*.

2.2.1 Rakenteiden vaurioitumisalttiuteen vaikuttava tärinä

Rakenteiden vaurioitumisalttiutta arvioitaessa tunnuslukuna käytetään maaperän värähtelyn huippuarvoa v_G tai v_{max} (mm/s). Tässä raportissa vaurioitumisalttiuteen vaikuttavaa tärinää arvioidaan VTT:n Tutkimusraportissa VTT-R-04703-14 esitettyllä laskentamenetelmällä (Talja & Törnqvist 2014). Menetelmä pohjautuu useissa kohteissa ja erilaisilla maapohjilla suoritettuihin tärinämittauksiin sekä empiirisiin havaintoihin ja sillä voidaan arvioida rataliikenteen aiheuttamaa tärinän suuruutta eri etäisyyksillä väylästä. Laskentamenetelmässä maaperän värähtely oletetaan samaksi pysty- ja vaakasuunnassa. Laskentakaava on tehty junaliikenteelle (tavara- ja henkilöjuna), mutta raitiovaunu rinnastetaan tässä selvityksessä henkilöjunaan niiden samankaltaisuuden vuoksi. Maanpinnan värähtelyn huippuarvo etäisyyden funktiona lasketaan kaavalla:

$$v_G = v_0 \cdot \left(\frac{D_0}{D}\right)^B \cdot \left(\frac{S}{S_0}\right)^A \cdot \frac{G}{G_0} \cdot k_R \cdot F,$$

jossa

- v_0 on värähtelyn perusarvo maassa vertailuetäisyydellä D_0 raiteen keskilinjasta ja jonka arvo saadaan tutkimusraportin VTT-R-04703-14 taulukosta 2
- D_0 on vertailuetäisyys 15 m
- D on tarkasteluetäisyys raiteen keskilinjasta
- B on etäisyysseksponentti, jonka arvo saadaan tutkimusraportin VTT-R-04703-14 taulukosta 2. Etäisyysseksponentti kuvaa sitä, kuinka nopeasti tärinä vaimenee etäisyyden suhteen; mitä suurempi eksponentti on, sitä nopeammin tärinä vaimenee.
- S on tarkasteltava nopeus, jonka perusarvo S_0 on 70 km/h
- A on nopeuseksponentti, jonka arvo on 0,9 - 1,1 (keskimäärin 1,0). VTT:n Working Paper 50 liitteen C (Törnqvist & Talja 2006) mukaan matalilla nopeuksilla heilahdusnopeuden on havaittu olevan useimmiten nopeudesta riippumaton. Nopeuskerrointa S/S_0 käytetään vain nopeuksilla $S \geq 70$ km/h. Alemmilla nopeuksilla nopeuskerrointa ei suositella käytettäväksi, jolloin asetetaan $(S/S_0)^A=1$. Tässä selvityksessä nopeuskerroin ja -eksponentti ovat aina yksi.
- G on tarkasteltavan raitiovaunun kokonaispaino (80 tonnia), vertailupaino G_0 on kaavassa 2000 tonnia
- k_R on radan kunnosta riippuva kerroin, joka on keskimäärin 1,0. Myös tässä selvityksessä $k_R = 1$.
- F on varmuuskerroin, jonka arvo on 2. Jos perusyhtälö on kalibroitu kohteessa tehdyillä tärinämittauksilla, $F = 1$. Koska kalibrointia ei suoriteta tämän selvityksen puitteissa käytetään arvoa $F = 2$.

Värähtelyn huippuarvoa laskettaessa on erittäin suuri vaikutus sillä, valitaanko värähtelyn perusarvon v_0 parametrit ja etäisyysseksponentin B arvot taulukon ylä- vai alarajoilta. On tärkeää huomioida, että värähtelytason arviointi perustuu homogeeniseen pohjamaahan eli tärinän alkulähteellä pohjamaa oletetaan samaksi kuin tarkasteltavilla etäisyyksillä; laskennassa ei siis huomioida pohjamaan muutoksia tarkastelualueella. Tämä puute johtaa siihen, että tärinän määrittäminen on yksilöllistä jokaisessa rakennuksessa ja laskennallinen arviointi sisältää epävarmuuksia.

Mahdollinen resonanssi huomioidaan suurennuskertoimella k_B , jolla kerrotaan edellä mainittua värähtelyn huippuarvoa, eli $v_B = k_B * v_G$ (Talja & Törnqvist 2014). Suurennuskerroinmenetelmällä saadaan karkea arvio resonanssin vaikutuksesta, kun värähtelyn taajuussisältöä eli signaalia ei tunneta. Tässä selvityksessä suurennuskerroin k_B käytetään pehmeällä maaperällä arvoa 3,0 ja kovalla maaperällä arvoa 1,5.

Laskennallisesti määritettyjä maanpinnan värähtelyn huippuarvoja verrataan seuraavan taulukon (Taulukko 2-1) mukaisiin värähtelyrajoihin (Talja & Törnqvist 2014). Rajaus perustuu maalajiin ja maaperän värähtelyn huippuarvoon v_{max} (mm/s).

Taulukko 2-1 Tärinäalueiden rajauksessa käytettävät raja-arvot maaperän värähtelylle (v_{max} mm/s) (Talja & Törnqvist 2014)

Maalaji	Pehmeä savi, leikkauslujuus < 25 kN/m ²	Sitkeä savi, siltti, löyhä hiekkä	Tiivis hiekkä, sora, moreeni, rikkonainen tai löyhä kallio	Kiinteä kallio
Värähtelyssä hallitseva taajuus	< 10 Hz	10-20 Hz	20-50 Hz	> 50 Hz
V-alue	3	4,2	6	7,2
H-alue	1-3	1,4-4,2	2-6	2,4-7,2
E-alue	< 1	< 1,4	< 2	< 2,4

Kartoitettava alue jaetaan normaalikuntoisten rakennusten tärinänsiedon perusteella seuraaviin alueisiin:

V-alue: Rataa lähimpänä oleva alue, jossa maaperän tärinä on niin voimakasta, että se voi aiheuttaa rakennuksille ja rakenteille vahinkoriskin.

H-alue: Tavanomaisiin ja hyväkuntoisiin rakennuksiin ei yleensä aiheudu käyttökelpoisuutta haittaavia vaurioita, jos resonanssille herkkien rakenteiden suunnittelussa on otettu huomioon liikennetärinä. Alueella tärinä on kuitenkin usein selvästi havaittavaa ja häiritsee yleensä asumismukavuutta. Rakennuskanta ja käytetyt rakennusmateriaalit tulee ottaa huomioon vaurioitumisriskin arvioinnissa.

E-alue: Normaalikuntoisille rakenteille ei aiheudu tärinästä rakenteiden vaurioitumista, mutta tärinä voi häiritä asumismukavuutta. Tärinän vaikutus asumismukavuuteen on tarkistettava erikseen VTT Tiedotteen 2569 mukaan.

Tavallisesti asumismukavuuden haitta-alue on huomattavasti laajempi kuin mahdollisia vaurioita aiheuttavan tärinän alue, koska asumismukavuudelle asetetut tärinän ohjearvot ovat selvästi pienemmät kuin rakenteiden vaurioitumiselle asetetut ohjearvot. Muilla kuin pehmeillä maapohjilla vaurioita aiheuttavan tärinän todennäköisyys on vähäinen muualla kuin aivan lähteen välittömässä läheisyydessä (Talja & Törnqvist 2014).

2.2.2 Asumismukavuuteen vaikuttava tärinä

Arvioitaessa asumismukavuuteen vaikuttavaa tärinähaittaa käytetään tarkoitukseen värähtelyn tunnuslukua $v_{w,95}$ (mm/s). Tässä selvityksessä asumismukavuuteen vaikuttavat tärinälaskelmat suoritetaan VTT:n Working Paper 50:n liitteen C (Törnqvist & Talja 2006) sekä VTT:n tiedotteen 2425 (Talja et al. 2008) ja tutkimusraportin VTT-R-04703-14 (Talja & Törnqvist 2014) mukaisesti. Laskenta perustuu kohdassa 2.2.1 esitettyyn värähtelyn huippuarvon v_G (v_{max}) kaavaan.

Värähtelyn tunnusluku $v_{w,95}$ on painotetun värähtelyn tehollisarvon v_w tilastollinen maksimi ja sen arvo perustuu yhden viikon ajalta 15 merkitsevimmästä ajoneuvosta mitattuihin värähtelysignaaleihin (Talja et al. 2008). Kustakin signaalista määritetään suurin painotettu värähtelyn tehollisarvo ja tunnusluku lasketaan näiden 15 tehollisarvon keskiarvona lisättynä 1,8-kertaisella hajonnalla. Tunnuslukua voidaan mittausten sijaan arvioida myös teoreettisesti. Koska tässä selvityksessä tarkastellaan vain laskennallisia värähtelyn maksimiarvoja, voidaan värähtelyn tunnusluku laskea värähtelyn

huippuarvon kautta likimääräiskaavalla $v_{w,95} = 0,4 \dots 0,6 * v_{max}$. Tässä selvityksessä kerroin valitaan 0,6:ksi.

Tärinän ilmentyminen rakenteessa on aina yksilöllistä, mikä aiheuttaa laskentaan epätarkkuutta. Resonanssin merkitys on yleensä suurin pehmeillä maapohjilla, koska maaperässä etenevän tärinän taajuuskaista on verrattain kapea ja osuu todennäköisemmin rungon tai lattian ominaistaajuusalueelle. Rakennuksen ja rakenneosien resonanssialttiisuus riippuu rakennuksen tyypistä, materiaaleista ja käytetyistä rakenneratkaisuista. Tärinälle alttiimpia ovat yleensä pehmeikölle rakennetut 1-2 kerroksiset pientalot, joiden ominaistaajuus voi osua pehmeikön ominaistaajuudelle. Tällöin suurennuskertoimena voidaan käyttää $k_B = 3,0$. Kovassa maaperässä hallitsevat korkeammat taajuudet (> 10 Hz) ja värähtely on laajakaistaista, jolloin vaakavärähtely ei yleensä voimistu rakennuksen rungossa ja myös lattioissa värähtelyn voimistuminen voidaan olettaa vähäiseksi ($k_B = 1,5$) (Talja & Törnqvist 2014). Koska maaperä harvoin on täysin homogeeninen, on resonanssi ilmiönä mahdollinen vielä melko kaukanakin väylästä, mikäli olosuhteet ovat otolliset.

Resonanssissa vahvistuu se värähtelyn taajuuskomponentti, joka sattuu rakennuksen tai rakenneosan ominaistaajuuden alueelle. Resonanssin ilmeneminen on satunnaista, mutta sen merkitys voi olla hyvin suuri. Kuitenkin vain erittäin harvoin resonanssin vaikutus rakennuksissa on suurempi kuin mitä tämän selvityksen puitteissa käytetyin suurennuskertoimin oletetaan.

Suositus rakennusten värähtelyluokista esitetään VTT:n Tiedotteessa 2278 "Suositus liikennetärinän mittaamisesta ja luokituksesta" (Talja 2004). Luokitus itsessään pohjautuu Norjan standardiin (NS 8176E 1999), mutta se on sopusoinnussa VTT:n mittausten ja muissa maissa käytettävien suositusten kanssa. Kohteet voidaan jakaa neljään värähtelyluokkaan värähtelyn tunnusluvun $v_{w,95}$ mukaan (ks.

Taulukko 2-2), joihin laskennallisia tai mitattuja arvoja verrataan. Luokituskriteerin on toteuduttava pystyvärähtelyn osalta rakennuksen kaikissa lattiarakenteissa ja vaakavärähtelyn osalta rakennuksen jokaisessa kerroksessa (Törnqvist & Talja 2006). Suositellut raja-arvot eivät ota kantaa tärinähäiriön toistuvuuteen tai häiriön kellonaikaan.

Taulukko 2-2 Suositus rakennusten värähtelyluokituksesta (Talja 2004)

Värähtely-luokka	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 voivat valittaa häiriöistä</i>	$\leq 0,30$

D	Olosuhteet, joihin pyritään vanhoilla asuinalueilla <i>Keskimäärin 25 % asukkaista pitää tärinää häiritseväenä ja voivat valittaa häiriöistä</i>	$\leq 0,60$
---	--	-------------

Uusien alueiden ja väylien suunnittelussa suositellaan tavoitetasoksi vähintään tasoa C (Talja et al. 2008). Yllä olevassa taulukossa (Taulukko 2-2) esitetyt värähtelyluokat koskevat vain normaaleja asuinrakennuksia, mutta hoito- ja sosiaalihuollon laitokset voidaan rinnastaa asuinrakennuksiin, ellei niitä ole suunniteltu häiriöttömiksi. Taulukkoa ei sovelleta rakennuksille, joissa ihmiset ovat pääasiassa liikkeessä tai muut kuin liikenteestä aiheutuvat häiriöt voivat olla merkittävämpiä (toimistot, kauppa- ja liiketilat, teollisuusrakennukset); kyseisille rakennuksille voidaan soveltaa tarvittaessa muita suosituksia.

2.3 Runkomeluanalyysin perusteet

Suomessa ei ole annettu ohje- tai raja-arvoja maa- ja tunneliliikenteen aiheuttamalle runkomelulle, mutta VTT:n tiedotteessa 2468 (Talja & Saarinen 2009) esitetään suositukset erilaisten rakennusten runkomelutasoille. Suositukset on kootusti seuraavassa taulukossa (Taulukko 2-3). Taulukon raja-arvot täyttävät valtioneuvoston, sosiaali- ja terveysministeriön ja Suomen rakennusmääräyskokoelmassa annetut suurimmat sallitut äänitasot asunnoissa. VTT:n tiedote ei ota kantaa runkomelun raja-arvojen kohdalla häiriön toistuvuuteen tai kellonaikaan. Suositus runkomelutason raja-arvosta avoradan varrella sijaitsevalle asuinrakennuksille on yleensä $L_{prm} \leq 35$ dB, mutta mikäli kaavamääräyksessä on annettu ohje julkisivun ilmastäneristävyydestä, suositus runkomelutason raja-arvosta on 30 dB (Talja & Saarinen 2009). Tässä selvityksessä valmisteilla olevilla asemakaava-alueilla uusille asuinrakennuksille sovelletaan suositusarvoa $L_{prm} = 30$ dB; oletuksena on, että asemakaavoissa tullaan antamaan määräyksiä rakennusten ilmanäneristävyydelle. Olemassa oleville asuinrakennuksille sovelletaan suositusarvoa $L_{prm} = 35$ dB. Liikerakennuksille sovelletaan vastaavasti raja-arvoja $L_{prm} = 45$ dB.

Taulukko 2-3 Suositus runkomelutason raja-arvoista Suomessa (Talja & Saarinen 2009)

Rakennustyyppi	Runkomelutaso L_{prm} [dB]
Radio-, tv- ja äänitysstudiot, konserttitalit	25-30
Asuinhuoneistot	30/35*
Hoito- ja sosiaalihuollon laitokset, majoitustilat	30/35*
Kokoontumis- ja opetustilat	35
Toimistot, kaupat, näyttelytilat, museot	40/45*

* Avoradat. Mikäli kaavamääräyksessä on annettu ohje julkisivun ilmastäneristävyydestä, on suositeltavaa käyttää runkomelutason tiukempaa raja-arvoa

Selvitys tehdään laskennallisesti arviontason 2 mukaan VTT:n tiedotteessa 2468 esitettävän värähtelyn siirtotiehen perustuvan arvion avulla (Talja & Saarinen 2009). Menetelmä perustuu arvioituun värähtelyn nopeustasoon, eikä se edellytä tarkkaa tietoa

värähtelyn taajuusspektristä eikä sen muuttumisesta siirtymäreitillä. Arvio on suuntaantava laskentaan liittyvistä lukuisista epävarmuustekijöistä johtuen.

Runkomelun arvioinnin lähtökohtana on peruskäyrältä saatu maaperän värähtelyn nopeustaso L_v (Talja & Saarinen 2009). Maaperän värähtelyn nopeustasoa korjataan muun muassa värähtelyn aiheuttajasta, siirtotiestä ja rakennuksesta riippuvilla nopeustason korjaustekijöillä ΔL_v ja lopputuloksena saadaan runkomelua kuvaava sisätilan äänitaso L_{pA} . Peruskäyrä noudattaa lauseketta:

$$L_v [dB] = A - B \cdot \log_{10}(d/d_0) - C \cdot (d/d_0),$$

jossa

- A on vakio, jonka arvo on 103 dB
- B on vakio, jonka arvo on 14 dB
- C on vakio, jonka arvo on 0,8 dB
- d_0 on vakio, jonka arvo on 10 m
- ja d on tarkasteltavan kohteen etäisyys väylän reunasta.

Runkomelua kuvaava sisätilan äänitaso L_{pA} lasketaan kaavalla:

$$L_{pA} [dB] = L_v + \sum \Delta L_{v,i},$$

jossa L_v on edellä esitetty peruskäyrä, johon lisätään korjaustekijöiden ΔL_v summa. Tässä selvityksessä käytetään seuraavia korjaustekijöitä (vrt. Talja & Saarinen 2009, taulukot 6 – 11):

- liikennetyyppi
 - raitiovaunu: 0 dB
- ajonopeuden vaikutus
 - korjaus lasketaan vaunun nopeusrajoitusten mukaisesti kaavalla:
 $\Delta L = 20 \cdot \log_{10}(v_s/v_{s,0})$, jossa $v_{s,0} = 100$ km/h
- ajoneuvon ominaisuuksista riippuvat tekijät
 - normaali jousitus: 0 dB
- väylän kunto
 - hyväkuntoinen rata: 0 dB
 - jyrkkien kaarteiden (kaarresäde < 50 m), vaihteiden ja siltojen päätytukien kohdalla radan epäjatkuvuuskohdasta johtuva korjaustekijä: +10 dB
- radan eristämistapa
 - ei eristystä: 0 dB
- väylän sijainti
 - avorata: 0 dB
- rakennuksen tyyppi ja tarkasteltava asuin kerros

- mikäli perustuksen ja arvioidun kallion välissä on maa-ainesta vähintään 3 m, käytetään korjaustekijää:
 - pientalot (kerroksia 1 tai 2): -5 dB
 - kerrostalot (kerroksia ≥ 3): -10 dB
- mikäli perustuksen ja kallion välillä oletetaan olevan maa-ainesta vähemmän kuin 3 m, korjaustekijä: 0 dB
- tarkasteltava asuinkerros: -2 dB (tässä selvityksessä aina ensimmäinen kerros)
- rakenneosien resonanssi: +6 dB
- muunto äänenpainetasoksi: -28 dB
- muunto A-painotetuksi äänenpainetasoksi
 - matala taajuusalue
 - pehmeät savi-, siltti- ja hiekkamaat, kun maakerroksen paksuus väylän ja rakennuksen alla on yli 3 m: -50 dB
 - keskitaajuusalue
 - kovat savi-, siltti- ja moreenimaat, kun maakerroksen paksuus väylän ja rakennuksen alla on yli 3 m: -35 dB
 - sovelletaan lisäksi alueilla, joilla pohjanvahvistuksia (myös paalulaatat)
 - korkea taajuusalue
 - kallio ja iskostuneet moreenimaat, kun maakerroksen paksuus väylän ja rakennuksen alla on alle 3 m: -20 dB
- varmuusmarginaali: + 6 dB.

Väylän alaiselle paalulaatalle ei runkomelun laskentamenetelmässä ole määritetty korjaustekijää ΔL_v , vaikka paalulaatta voi tietyissä tapauksissa kasvattaa runkomelua. Paalut voivat toimia siirtymäreittinä, jota pitkin tärinä leviää pohjamaahan ja kallioon, josta edelleen lähialueen rakennusten paaluihin ja perustuksiin. Ilmiö on VTT:n tiedotteen 2468 mukaan huonosti tunnettu (Talja & Saarinen 2009).

Kumipyöräliikenteeseen verrattuna raitiotien korjaustekijöiden summa on lähtökohtaisesti 6 dB pienempi ja näin laskennallisen arvion mukaan runkomelun määrä lisääntyy suunnittelualueella uuden raitiotien myötä.

3 TULOKSET

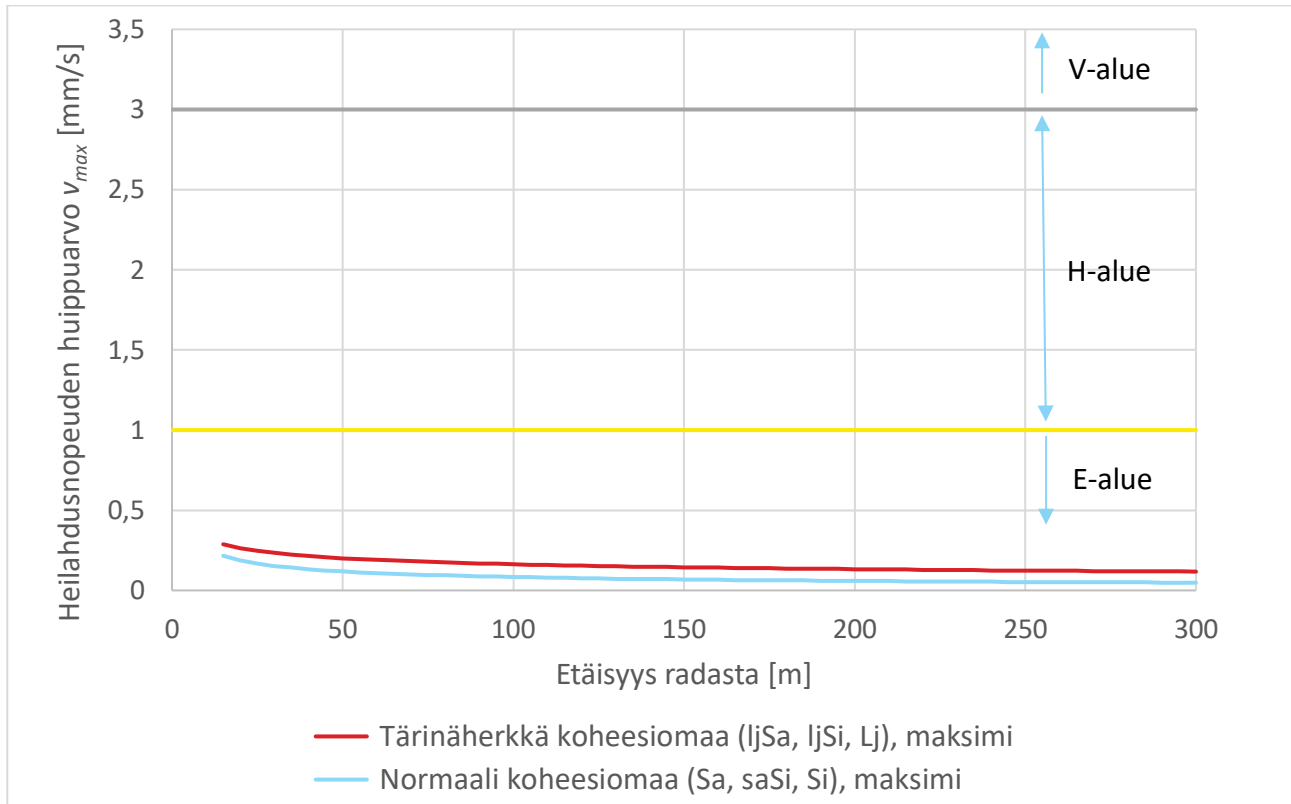
Seuraavissa aliluvuissa esitellään laskenta-analyysien tulokset uusilla Linnainmaan ja Pirkkalan raitiotieosuuksilla tärinän ja runkomelun osalta.

3.1 Tärinä

Tärinää tarkastellaan laskennallisesti rakennusten vaurioitumisalttiuden ja asumismukavuuden näkökulmista.

3.1.1 Rakennusten vaurioitumisalttius

Rakennusten ja rakenneosien vaurioitumisalttiuden tärinäanalyysiin laskentaparametrit valitaan siten, että tärinän amplitudit saadaan laskettua ylärajan mukaan. Laskenta suoritetaan kahdelle tärinän vahvistumisen ja etenemisen kannalta edullisimmalle maaperätyypille eli eloperäiselle koheesiomaalle (liejuinen savi, liejuinen siltti tai lieju) ja tavanomaiselle koheesiomaalle (savi tai siltti). Alla olevassa kuvassa (Kuva 4) esitetään heilahdusnopeuden huippuarvot v_{max} molemmille maaperätyypeille etäisyyden funktiona.



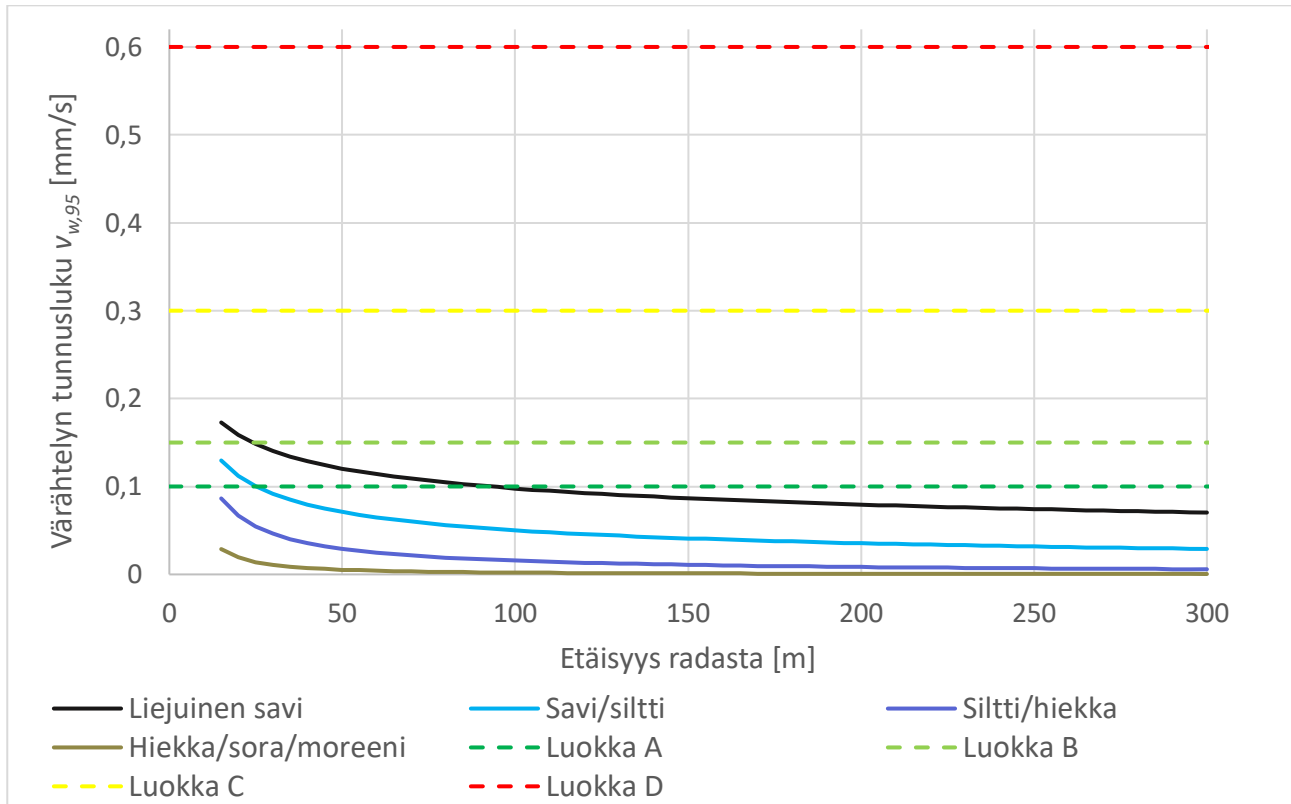
Kuva 4 Laskennalliset heilahdusnopeuden huippuarvot v_{max} etäisyyden funktiona maaperän koostuessa tärinäherkästä koheesiomaasta tai normaalista koheesiomaasta mahdollinen resonanssi huomioiden.

Kuvaajasta havaitaan, ettei raitiovaunuliikenteen aiheuttama laskennallinen tärinä yllä lähellekään E-alueen ylärajaa 1,0 mm/s, vaan heilahdusnopeuden huippuarvot jäävät 15 metrin päässä radasta tärinäherkässä koheesiomaassa 0,29 mm/s:n paikkeille, vaikka laskentaparametreissa huomioidaan mahdollinen resonanssi. Tavanomaisessa koheesiomaassa vastaava lukema on 0,22 mm/s. Karkearakeisemmissa maaperissä tärinän huippuarvot ovat vielä pienemmät ja toisaalta E-alueen ylärajakin suurempi (ks. Taulukko 2-1).

Tulosten perusteella todetaan, *ettei raitiovaunuliikenteestä aiheudu erityistä riskiä rakennusten tai rakenneosien vaurioitumiselle* Linnainmaan ja Pirkkalan haaroilla. Maltilliset värähtelyn maksimiarvot selittyvät pääasiassa sillä, että raitiovaunu on raideliikennöintiin verrattain kevyt väline ja liikennöinti nopeudet alhaisia. Entisestään vaurioitumisalttiutta pienentää se, että pehmeikköalueilla rata suunnitellaan perustettavan paalulaatalle, joka vaimentaa tehokkaasti etenkin pystysuuntaista värähtelyä. Myös muut pohjanvahvistusmenetelmät ovat yleisesti sinällään tärinäriskiä pienentäviä, koska ne ovat käytössä muiden kuin pehmeiden savikkojen yhteydessä (Talja et al. 2008).

3.1.2 Asumismukavuus

Myös asumismukavuuden osalta laskennassa haetaan ylärajaa tärinän suuruudelle ja laskentaparametrit valitaan sen mukaan. Laskenta suoritetaan neljälle erilaiselle jäykkyydeltään ja rakeisuudeltaan toisistaan poikkeavalle maalajille: liejuiselle savelle, savi- ja silttimaalle, siltti- ja hiekkamaalle sekä moreenille. Alla esitetään värähtelyn tunnusluvut $v_{w,95}$ kullekin maalajille etäisyyden funktiona (Kuva 5).



Kuva 5 Laskennalliset värähtelyn tunnusluvut $v_{w,95}$ etäisyyden funktiona eri maaperissä mahdollinen resonanssi huomoiden.

Kuvaajasta havaitaan, että laskennallisesti raitiovaunuliikenne ei tuota millään maapohjatyypillä värähtelyluokan C raja-arvoa 0,3 mm/s ylittävää värähtelyä edes raidelinjan läheisyydessä, vaikka laskentaparametreissa huomioidaan mahdollinen resonanssi. Suurimmillaan tärinä on eloperäisillä savimailla, jolloin 15 metrin päässä radasta $v_{w,95} = 0,17$ mm/s, mikä ylittää niukasti värähtelyluokan B raja-arvon 0,15 mm/s. Savi- ja silttimailla vastaavalla etäisyydellä radasta $v_{w,95} = 0,13$ mm/s, mikä alittaa luokan B raja-arvon. Karkearakaisemmillä maapohjilla alittuu myös luokan A raja-arvo 0,1 mm/s. Mikäli resonanssi jätetään huomiotta, laskennalliset värähtelyn tunnusluvut alittavat luokan A raja-arvot kaikilla maapohjatyypeillä (liejuinen savi $v_{w,95} = 0,06$ mm/s ja savi- ja silttima 0,04 mm/s). Maltilliset värähtelyn tunnuslukujen arvot selittyvät pääasiassa raitiovaunun keveydellä ja alhaisilla liikennöintinopeuksilla.

Analyysin perusteella raitiovaunun aiheuttama tärinä ei rajoita suunnittelualueen maankäyttöä, koska pääosa rakennuksista sijaitsee vähintään 15 metrin etäisyydellä radasta ja pehmeikköalueilla radan alusrakennetta vahvistetaan paalulaatoin. Paalulaatat pienentävät etenkin pystyvärähtelyä tehokkaasti ja oletettavasti jonkin verran

myös vaakavärähtelyä (Talja et al. 2008). Pelkästään laskennallisesta näkökulmasta tarkasteltuna valtaosa uusien rataosuuksien varrella sijaitsevista rakennuksista kuuluisi luokkaan A ja loputkin vähintään luokkaan B ilman, että paalulaattojen vaimentavaa vaikutusta edes huomioidaan.

Kuten kohdassa 2.1 todetaan, laskentaan liittyy epävarmuutta. Etenkin alle 50 metrin päässä radasta sijaitsevien rakennusten välipohjien resonanssivärähtelyä ei voida kokonaan poissulkea. Pehmeikköalueilla rata perustetaan pääasiassa paalulaatalle, mutta maan värähtelyn vaakakomponentit voivat paikallisesti aiheuttaa lähialueen rakennuksissa ja välipohjissa havaittavaa tärinää. Lisäksi vaihteet ja muut radan epäjatkuvuuskohdat, vinot kalliopinnat ja suuret lohkat voivat aikaansaada heijasteita ja värähtelyn paikallista voimistumista, mikä voidaan havaita lähialueella rakennusten tai rakennosien tärinänä. Kyseiset riskit katsotaan tässä selvityksessä asumismukavuuden kannalta pääosin *vähäisiksi* johtuen tärinää vaimentavista radan pohjanvahvistustoimenpiteistä ja Tampereen raitiotien aiemmista vaiheista kertyneestä kokemusperäisestä tiedosta. Lisäksi runkomeluvaimennetuilla rataosuuksilla eristysratkaisu vaimentaa tyypillisesti myös tärinää.

3.1.3 Linnainmaa, lohko 3

Linnainmaan haaralla suurin osa radan varrella olevista rakennuksista on kerrostaloja, jotka eivät ole yhtä herkkiä resonanssille kuin 1-2 kerroksiset pientalot. Rataosuudella on yksi selkeämpi pehmeikköalue paaluvälillä 6000 – 6300, jolla savi- ja silttikerrokset ovat paikoin yli 10 metriä paksuja. Rata suunnitellaan kyseisellä paaluvälillä perustettavan paalulaatalle, joten tärinäriskin katsotaan olevan *vähäinen*.

Muutoin Linnainmaan lohkolla radan läheisyydessä olevat hienorakeiset savi- ja silttikerrokset ovat verrattain ohuita ja moreenikerrokset ja kallio ovat lähempänä maanpintaa. Näillä alueilla pohjamaan ominaisuuksista johtuvaa *erityistä tärinäriskiä ei katsota olevan*. Rataosuuden selkeät epäjatkuvuuskohdat ovat siltarumpu paaluvälillä 5900 – 5910, Rahjukosken ja Pappilan siltojen päätytuet sekä vaihteet 1 – 6, jotka voivat kasvattaa tärinäriskiä paikallisesti.

3.1.4 Hatinpää, lohko 6

Hatinpään rataosuuden alkupäässä paalulle 800 asti hiekka- ja moreenikerrokset ovat pääosin noin 2 – 4 metrin etäisyydellä maanpinnasta ja radan läheisyydessä olevat rakennukset ovat liike- ja toimistorakennuksia; näin ollen tärinäriskin katsotaan kyseisellä pätkällä olevan *vähäinen*. Paaluvälillä 800 – 1000 on asuin- ja liikerakennuksia lähimmillään noin 12 metrin päässä raitiotielinjasta. Alueella on täyttökerrosten alla noin 8 - 10 metriä paksu silttinen maakerros, jonka alla tiiviimpiä hiekka- ja moreenikerroksia. Alueella rata suunnitellaan perustettavan maanvaraisesti lukuunottamatta Viinikanlahden sillan edustaa paaluvälillä 977 – 1002, jossa rata olisi paalulaatalla. Radan maanvaraisella osuudella lähirakennusten tärinäriskin katsotaan olevan *kohtalainen*, koska pohjamaan ominaistajuus ja raitiovaunun akseleiden ohitustajuus voivat olla lähellä toisiaan. Myös sillan päädyn aiheuttama epäjatkuvuuskohta voi kasvattaa tärinäriskiä.

Paaluvälillä 1800 – 1900 on asuinkerrostalo ja hotelli lähimmillään noin 14 metrin etäisyydellä radasta ja alueella on yli 10 metriä paksu savi- ja silttikerrostuma. Toisaalta rata on alueella suunniteltu perustettavan paalulaatalle ja tärinärisiä katsotaan siten *vähäiseksi*. Paaluvälillä 1900 – 2700 sijaitsevat asuinkerrostalot ovat pääasiassa yli 35 metrin etäisyydellä radasta. Alueella on paikoin yli 10 metriä paksuja savi- ja silttimaakerroksia ja rata on suunniteltu perustettavan pääosin paalulaatalle. Tästä johtuen tärinärisiä kyseisellä paaluvälillä katsotaan *vähäiseksi*. Paaluvälillä 2700 – 2920 sijaitsee asuinkerrostaloja lähimmillään noin 14 metrin päässä radasta, mutta alueella on pääosin moreenikerrostumia *eikä erityistä tärinärisiä näin ole*.

Muutoin suurin osa Hatanpään lohkon radan varrella olevista rakennuksista on verrattain kaukana radasta sijaitsevia liike- ja toimistorakennuksia, joiden tärinäkriteerit eivät ole yhtä tiukat kuin asuinrakennuksissa; kyseisten rakennusten osalta *erityistä tärinärisiä ei katsota olevan*. Viinikanlahden sillan lisäksi rataosuuden muita selkeitä epäjatkuvuuskohtia ovat Vihilahden silta sekä vaihde 1, jotka voivat kasvattaa tärinärisiä paikallisesti, vaikka rata suunnitellaan kyseisillä kohdilla perustettavan paalulaatalle.

3.1.5 Härmälä, lohko 7

Selvityksen alilukua täydennetään myöhemmin.

3.1.6 Pirkkala, lohko 8

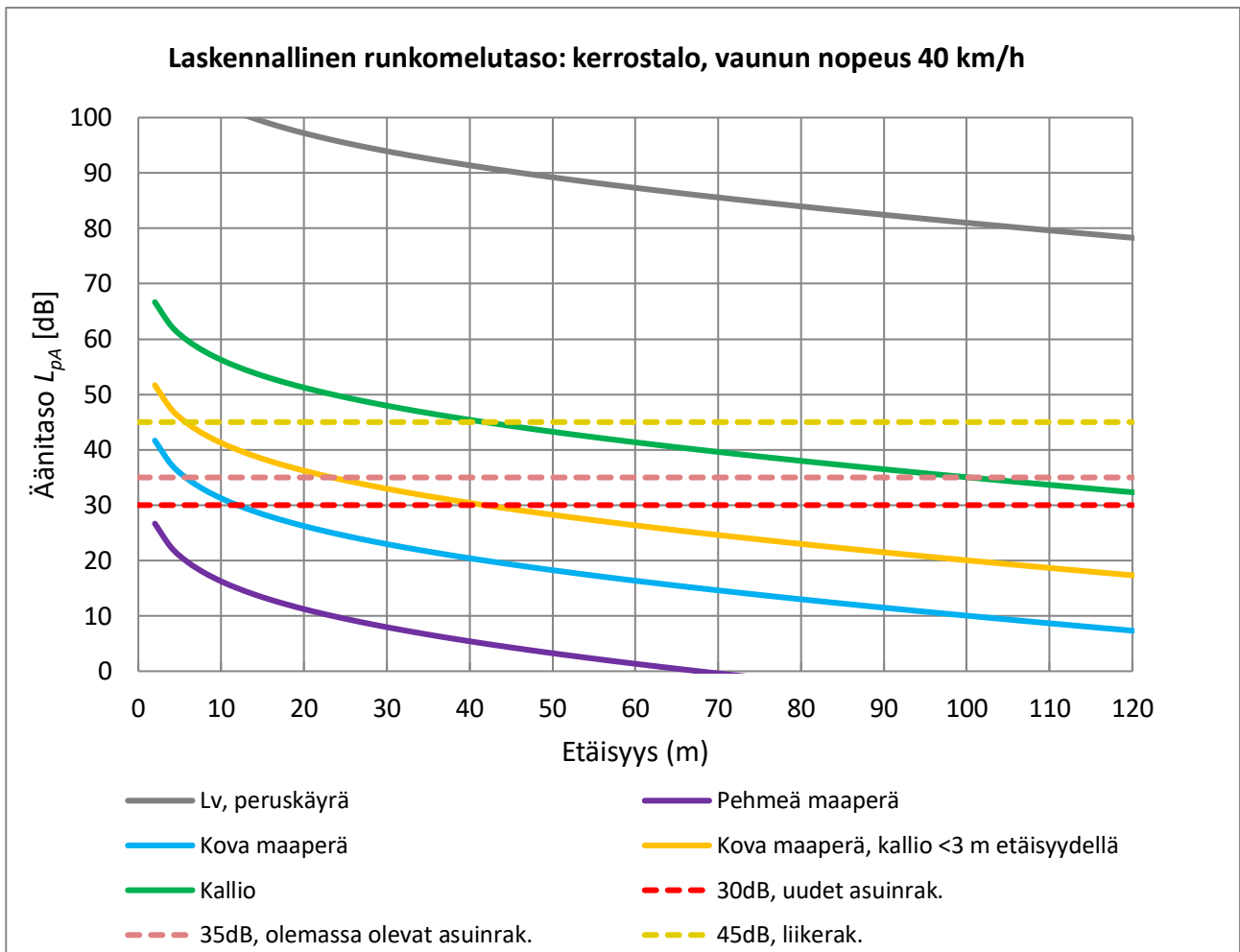
Selvityksen alilukua täydennetään myöhemmin.

3.2 Runkomelu

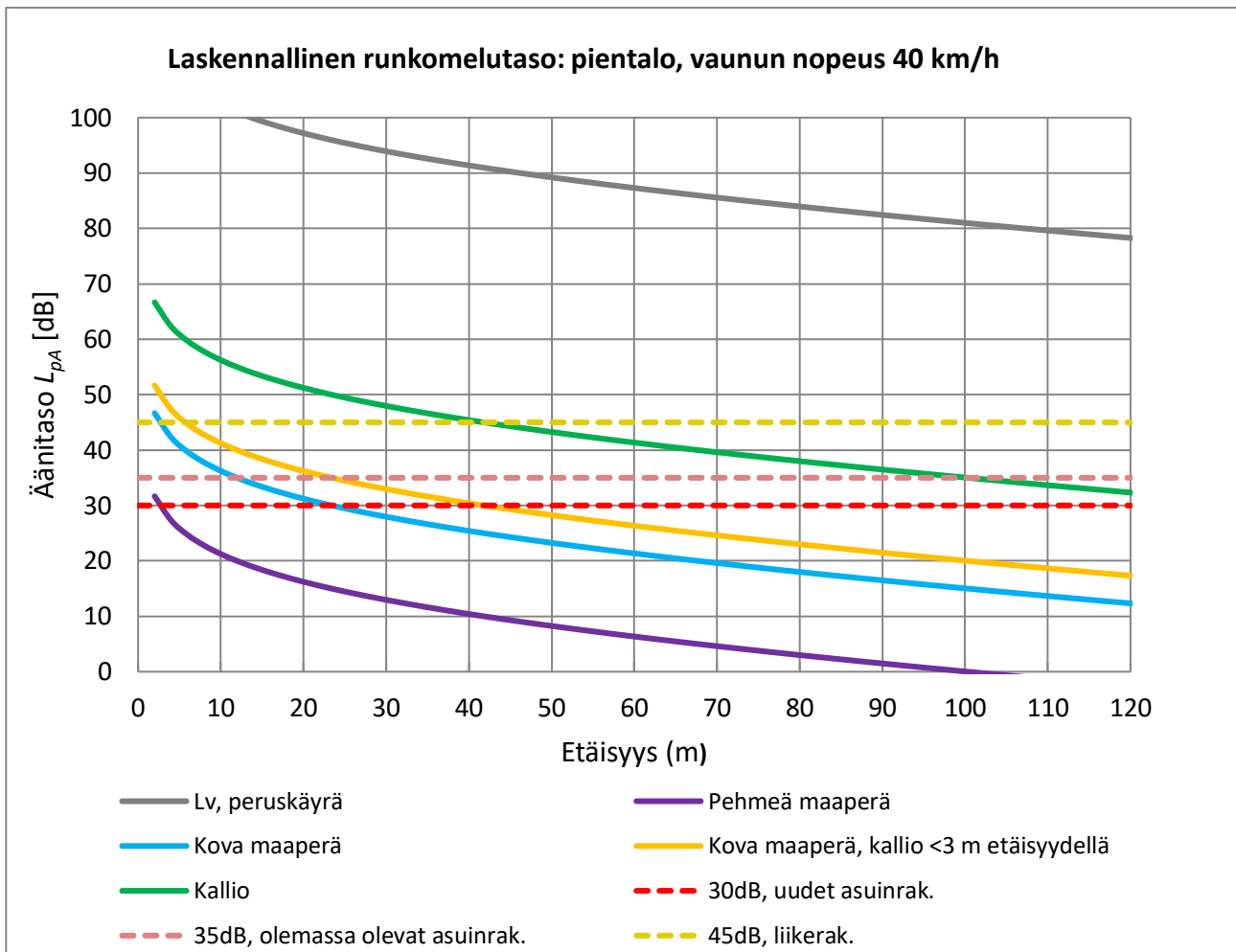
Runkomelun laskennassa pyritään arvioimaan suunnittelualueen rakennusten runkomelutasot ylärajan mukaan. Analyysi suoritetaan siten, että runkomelua vaimentamia eristysrakenteita ei huomioida. Analyysissä tarkastellaan neljää eri tapausta radan ja rakennuksen perustamistavan sekä maaperätyypin mukaan:

- rata ja rakennus pehmeällä maaperällä,
- rata ja rakennus kovalla maaperällä,
- rata kovalla maaperällä ja rakennuksen perustuksen ja kallion välissä maata enintään kolme metriä ja
- rata ja rakennus kalliolla (kallion etäisyys maanpinnasta alle kolme metriä).

Alla olevissa kuvissa (Kuva 6 ja Kuva 7) esitetään runkomelutasojen L_{pA} laskennalliset arvot etäisyyden funktiona kerros- ja pientalolle, kun raitiovaunun nopeus on 40 km/h. Lisäksi kuvissa esitetään maaperän värähtelyn perustaso L_v . Tarkastelussa on kunkin rakennustyypin ensimmäinen kerros.



Kuva 6 Runkomelutason laskennallinen arvio etäisyyden funktiona raitiotiestä eri maaperillä (vaunun nopeus 40 km/h, kerrostalo)



Kuva 7 Runkomelutason laskennallinen arvio etäisyyden funktiona raitiotiestä eri maaperillä (vaunun nopeus 40 km/h, pientalo)

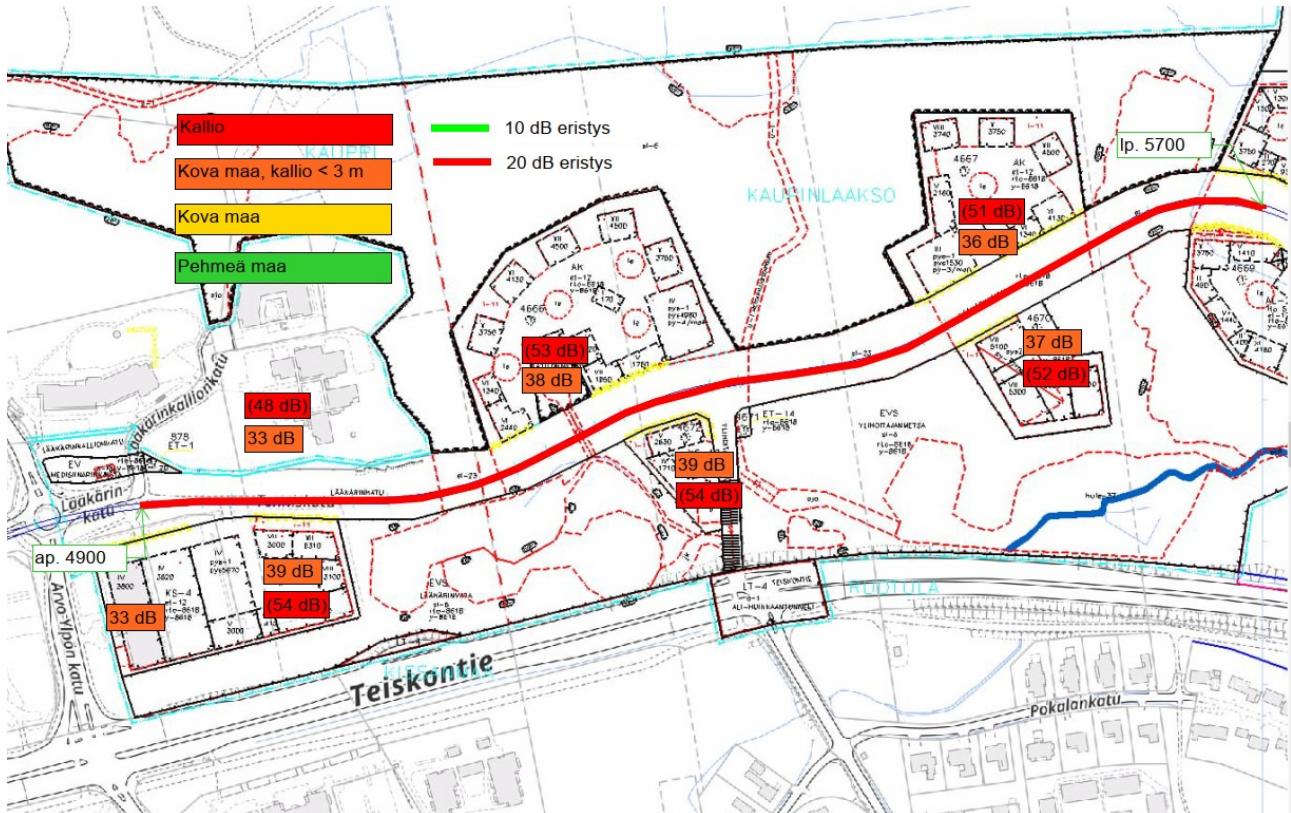
Laskentatulokset ovat linjassa kohdan 2.1 kanssa; runkomelu leviää häiritsevästi kaikkein laajimmalle kallioiden alueilla. Samoin kallion läheisyys vaikuttaa runkomelutasoon kasvattavasti paksumpaan maakerrokseen verrattuna. Analyysinmenetelmässä rakennustyyppillä ei ole laskennallista vaikutusta runkomelutasoon ensimmäisen kerroksen tasolla, kun perustuksen ja kallion välissä on maata alle kolme metriä tai jos perustus sijaitsee kalliolla; äänenpainetaso korjaustekijät ovat tällöin molemmille rakennustyypeille samat.

Raitiovaunun nopeudesta riippuen kalliolla 30 dB vyöhyke on 110 – 180 metrin, 35 dB vyöhyke 76 – 141 metrin ja 45 dB vyöhyke 26 – 69 metrin etäisyydellä radasta. Vastaavasti, kun rata on kovalla maalla ja kallionpinta on alle kolmen metrin syvyydellä rakennusten perustamistasosta 30 dB vyöhyke on 27 – 69 metrin, 35 dB vyöhyke 14 – 42 metrin ja 45 dB vyöhyke etäisimmilläänkin enää vain 12 metrin etäisyydellä radasta. Kun rata on kovalla maalla ja kallio on yli kolmen metrin syvyydellä rakennusten perustamistasosta rakennustyyppistä ja ajonopeudesta riippuen 30 dB vyöhyke on 7 – 43 metrin ja 35 dB vyöhyke 3 – 24 metrin etäisyydellä radasta. Pehmeällä maaperällä runkomelu leviää häiritsevästi kaikkein kapeimmalle alueelle; tavanomaisella rataosuudella 30 dB vyöhyke on laskennallisesti vain noin kuuden metrin levyinen.

Kaikki edellä esitellyt vaihteluvälit ovat voimassa tavanomaisille rataosuuksille eikä niissä siten ole huomioitu radan epäjatkuvuuskohtia; ne huomioidaan paikallisesti kutakin ratalohkoa tarkasteltaessa. Raitiotielinjauksille suunnitellut pohjavahvistukset huomioidaan laskelmissa siten, että rata tulkitaan vahvistettavilla osuuksilla perustetun kovalle maaperälle (keskitaajuusalue). Seuraavissa aliluvuissa tarkastellaan tarkemmin kutakin uutta ratalohkoa ja niiden runkomeluriskejä. Vaimennettaviksi esitetyillä rataosuuksilla eristysratkaisuksi ehdotetaan kuvissa ilmaistun vaimennustason (10 tai 20 dB) mukaista routalevyä tai vaimennusmattoa elastisten kiskonaluslevyjen (5 dB) lisäksi. Kokonaisvaimennus on näillä keinoin siis 15 tai 25 dB.

3.2.1 Linnainmaa, lohko 3

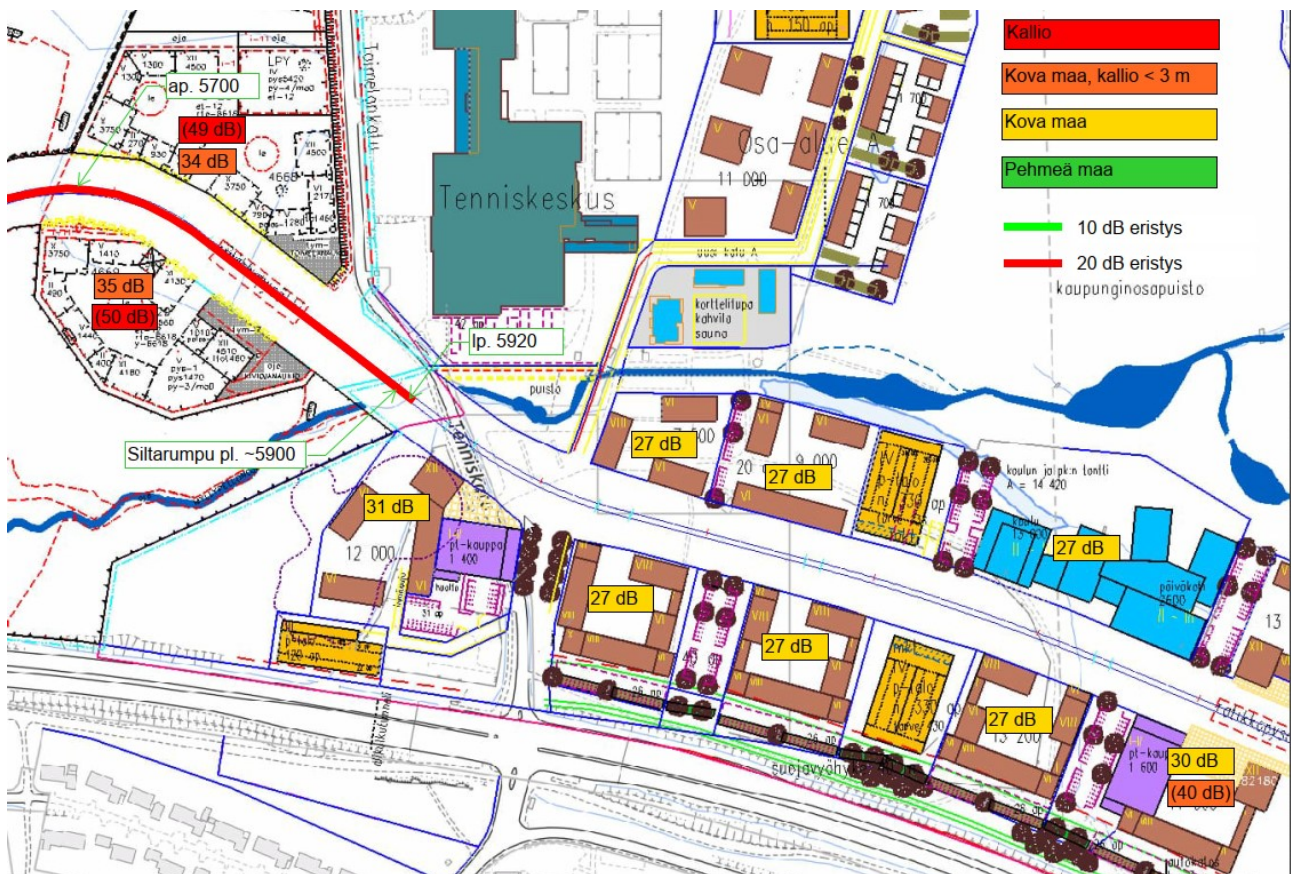
Linnainmaan haaran alkupäässä paaluvälillä 4588 – 4900 runkomelu ei ylitä laskennallisesti rakennuskohtaisia suositusarvoja. Paaluvälillä 4900 – 5700 rata kulkee valmisteilla olevalla asemakaava-alueella 8618. Vaunun maksiminopeus rataosuudella vaihtelee välillä 40 – 50 km/h. Alueella kallionpinta on monin paikoin lähellä maanpintaa ja toisaalta moreenikerrostumat tiiviitä. Näin ollen alueella on kohonnut runkomeluriski, mikäli ratarakennetta ei vaimenneta. Runkomeluanalysissä tehdään herkkyystarkastelua siten, että osuudella rata oletetaan joko maan- tai kallionvaraiseksi ja lähialueen rakennusten perustukset kallionvaraisiksi. Kallionvaraisuudella tarkoitetaan tässä sitä, että rakenteen ja kallion välissä on maata alle kolme metriä. Seuraavassa kuvassa (Kuva 8) esitetään alueen laskennalliset runkomelutasot. Vaimennustarve perustuu oletukselle, että niin rata kuin lähirakennusten perustukset ovat välillä 4900 – 5700 kallionvaraisia.



Kuva 8 Laskennalliset runkomelutasot ilman runkomelueristystä ja esitetty runkomeluvaimennus kiskonaluslevyjen lisäksi paaluvälillä 4900 – 5700. Sulkeissa olevat arvot mahdollisia, mikäli rataosuus

tulkitaan kallionvaraiseksi. Tausta-aineistona Tampereen virastokartta sekä valmisteluvaiheen asemakaava 8618.

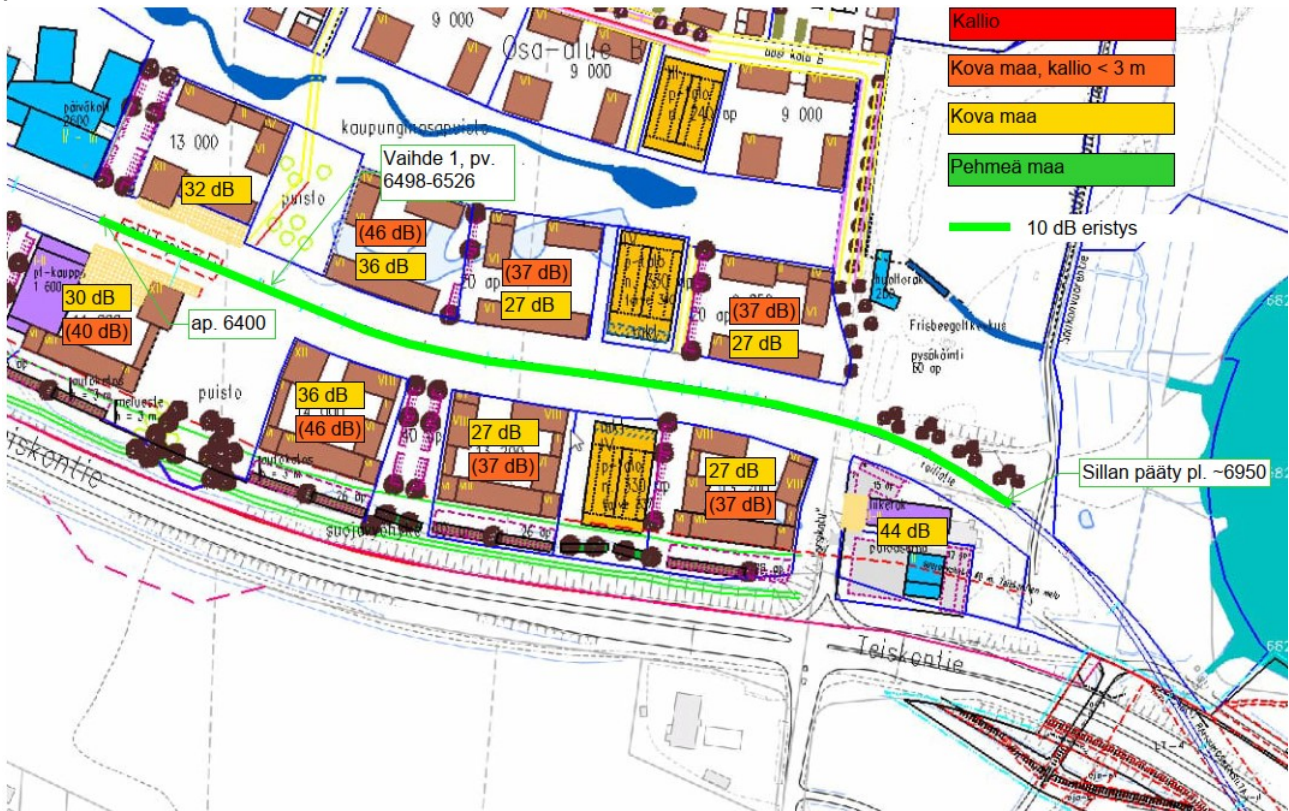
Paaluvälillä 5700 – 6400 rata kulkee valmisteilla olevilla asemakaava-alueilla 8618 ja 8931. Vaunun maksiminopeus rataosuudella on pääosin 40 km/h. Asemakaava-alueiden rajalle asti (pl. n. 5900) kallionpinta on suurilta osin alle viiden metrin syvyydessä ja paikoin ylempänä, joten rata ja lähialueen rakennukset oletetaan kallionvaraisiksi (alle kolme metriä maata perustuksen ja kallion välissä). Lisäksi paalun 5900 paikkeilla on siltarumpu, joka tulkitaan radan epäjatkuvuuskohtaksi. Paaluvälille 5900 – 6400 sijoittuu paksuhko pehmeikko ja rataa on pehmeikön kohdalla suunniteltu vahvistettavan paalulaatalla, joten runkomeluriskiä ei laskennallisesti alueella ole. Seuraavassa kuvassa (Kuva 9) esitetään paaluvälin 5700 - 6400 laskennalliset runkomelutasot sekä tarvittava ratanosuuden vaimennus.



Kuva 9 Laskennalliset runkomelutasot ilman runkomelueristystä ja esitetty runkomeluvaimennus kiskonaluslevyjen lisäksi paaluvälillä 5700 – 6400. Sulkeissa olevat arvot mahdollisia, mikäli rata ja/tai rakennus on kallionvarainen. Tausta-aineistona Tampereen virastokartta sekä valmisteluvaiheen asemakaavat 8618 ja 8931.

Paaluvälillä 6400 – 7000 rata kulkee valmisteilla olevalla asemakaava-alueella 8931. Vaunun maksiminopeus rataosuudella on pääosin 40 km/h. Radan pohjaa suunnitellaan osuudella vahvistettavan suurelta osin massanvaihoilla. Alueella kallionpinnan syvyys on tarkasti tiedossa vain osuuden loppupuolella (pl. 6800 eteenpäin), missä kallio on noin kahdeksan metrin syvyydellä. Muulla osuudella kallio on kairaus- ja maatulkaustietojen perusteella pääosin yli viiden metrin syvyydellä. Koska tarkkaa tietoa kallionpinnan sijainnista ei ole, tehdään runkomeluanalyyseissä herkkyytarkastelua siten, että lähialueen rakennusten perustukset oletetaan maanvaraisten ohella kallionvaraisiksi

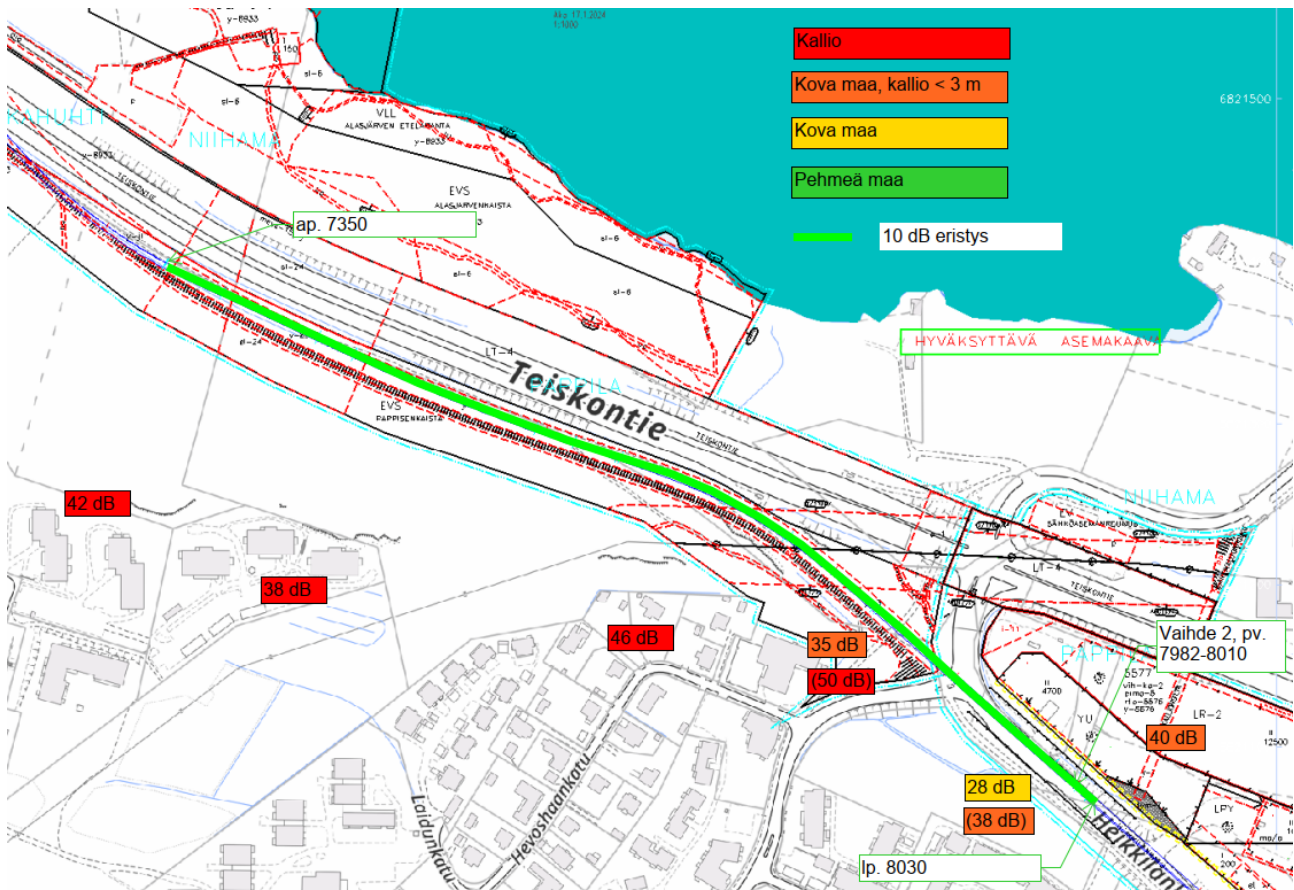
(alle kolme metriä maata perustuksen ja kallion välissä). Osuudella sijaitsee yksi vaihde ja Rahjukosken sillan (S51) pohjoinen päätytuki, jotka tulkitaan radan epäjatkuvuuskohdiksi. Osuuden laskennalliset runkomelutasot ja tarvittava vaimennus esitetään alla olevassa kuvassa (Kuva 10). Esitetty vaimennustaso perustuu oletukselle, että rakennusten perustukset ovat osuudella kallionvaraisia.



Kuva 10 Laskennalliset runkomelutasot ilman runkomelueristystä ja esitetty runkomeluvaimennus kiskonaluslevyjen lisäksi paaluvälillä 6400 – 7000. Sulkeissa olevat arvot mahdollisia, mikäli rakennus on kallionvarainen. Tausta-aineistona Tampereen virastokartta sekä valmisteluvaiheen asemakaava 8931.

Mikäli hankkeen myöhemmissä vaiheissa lähialueen rakennusten perustustamisolosuhteet tarkentuvat, voidaan rataosuuden vaimennusta mahdollisesti jonkin verran optimoida.

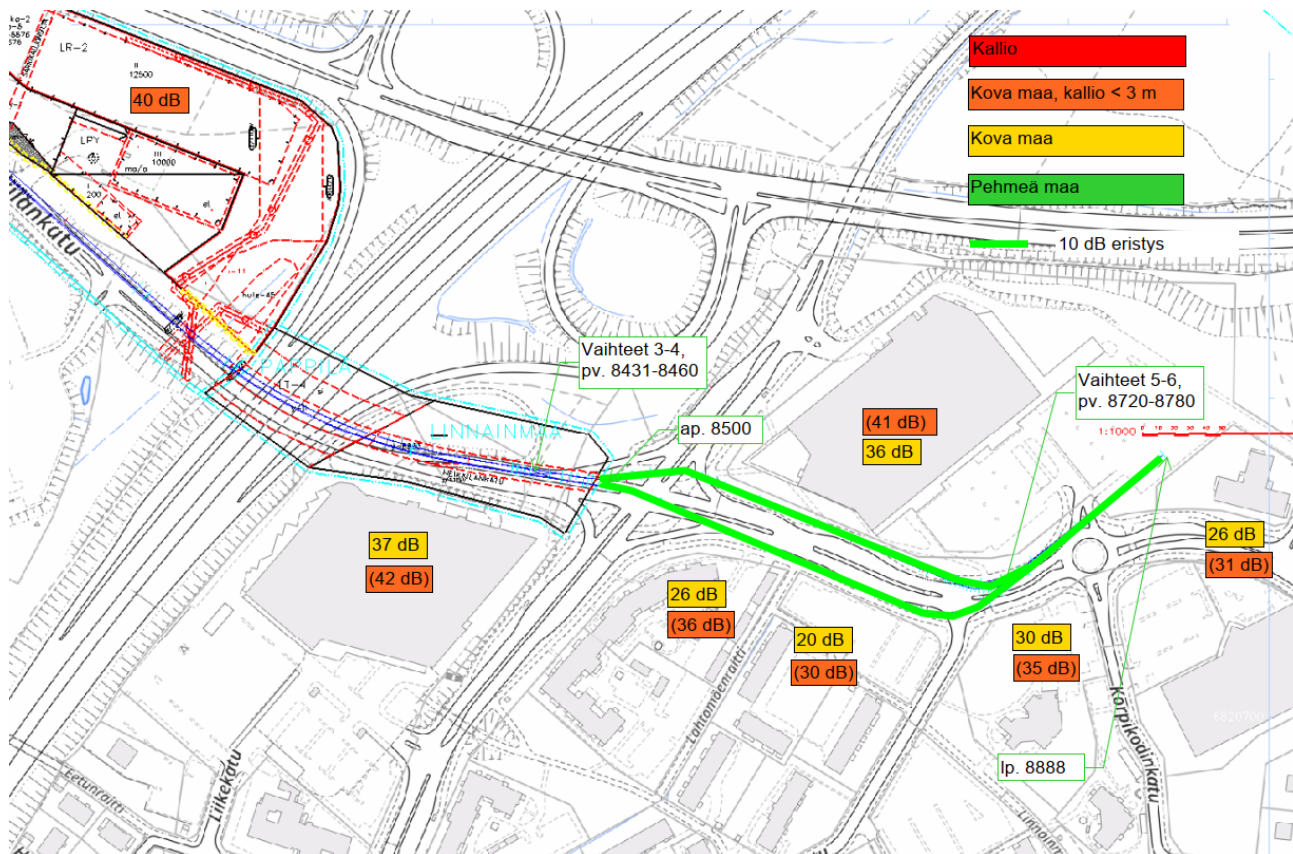
Rahjukosken sillan jälkeen rata kulkee valmisteilla olevilla asemakaava-alueilla 8933 ja 8876 (paaluväli 7350 – 8000). Noin paalulle 7850 asti rata sijaitsee Pappisenkallion laitamalla, jossa kallio on lähellä maanpintaa; täten niin rata kuin kaikki osuuden varteen sijoittuvat rakennukset oletetaan laskelmissa kallionvaraisesti perustetuiksi. Paalulta 7850 eteenpäin maakerrokset paksunevat jopa kahdeksaan metriin asti ja koostuvat pääosin täytöistä, siltistä ja moreenista. Lähialueen rakennukset tuleva varikko mukaan lukien oletetaan laskelmissa kuitenkin kallionvaraisiksi. Vaunun maksiminopeus paalulle 7880 asti on 70 km/h ja siitä eteenpäin 40 km/h. Kokonaisuudessaan osuudella on yksi vaihde ja Rahjukosken sillan (S51) eteläinen päätytuki, jotka tulkitaan radan epäjatkuvuuskohdiksi. Osuuden laskennalliset runkomelutasot ja tarvittava vaimennus esitetään alla olevassa kuvassa (Kuva 11).



Kuva 11 Laskennalliset runkomelutasot ilman runkomelueristystä ja esitetty runkomeluvaimennus kiskonaluslevyjen lisäksi paaluvälillä 7350 – 8000. Sulkeissa olevat arvot mahdollisia, mikäli rata ja/tai rakennus on kallionvarainen. Tausta-aineistona Tampereen virastokartta sekä valmisteluvaiheen asemakaavat 8933 ja 8876.

Mikäli hankkeen myöhemmissä vaiheissa lähialueen rakennusten perustustamisolosuhteet tarkentuvat, voidaan rataosuuden vaimennusta mahdollisesti jonkin verran optimoida.

Paalulta 8000 eteenpäin radan loppuosa sijoittuu pääosin valmisteilla olevan asemakaavan 8933 sekä Linnainmaan ajantasa-asemakaavan 7844 alueelle. Vaunun maksiminopeus rataosuudella on 40 km/h. Kallionpinta on alueella pääosin yli viiden metrin syvyydellä, mutta radan loppuosalla läheiset rakennukset oletetaan laskelmissa myös kallionvaraisiksi. Maakerrokset koostuvat alueella pääosin täytöistä, siltistä ja moreenista. Osuudella on kaksi vaihdeparia ja Pappilan risteyssilta, jotka tulkitaan radan epäjatkuvuuskohdiksi. Osuuden laskennalliset runkomelutasot ja tarvittava vaimennus esitetään alla olevassa kuvassa (Kuva 12). Esitetty vaimennustaso perustuu oletukselle, että rakennusten perustukset ovat osuudella kallionvaraisia.



Kuva 12 Laskennalliset runkomelutasot ilman runkomelueristystä ja esitetty runkomeluvaimennus kiskonaluslevyjen lisäksi paaluvälillä 8000 – 8888. Sulkeissa olevat arvot mahdollisia, mikäli rakennus on kallionvarainen. Tausta-aineistona Tampereen virastokartta sekä valmisteluvaiheen asemakaava 8933.

Laskelmien perusteella erillistä runkomelueristystä ei rataosuudella välttämättä tarvita; rakennuskohtaiset raja-arvot alittuvat kaikkialla mikäli rakennukset ovat maanvaraisia. Myöskään kallionvaraiset perustukset eivät tuota merkittäviä ylityksiä suositusarvoihin. Voi kuitenkin olla perusteltua käyttää radan loppuosuudella erillistä runkomeluvaimennusta alueen toiminnot (mm. Lahdensivun hoivakoti, Linnainmaan seurakuntatalo ja asuinkerrostalot) ja vilkkaus (liikerakennukset) huomioon ottaen. Tässä selvityksessä esitetään 10 dB vaimennusta paaluvälille 8500 – 8888.

3.2.2 Hatinpää, lohko 6

Hatinpään lohkolla ei yleisesti ottaen ole merkittävää runkomeluriskiä alueen maakerroksista johtuen. Maakerrokset ovat pääosin paksuja ja hienorakeisia, jolloin häiritsevää runkomelua esiintyy vain kapealla sektorilla radan ympärillä. Lisäksi lohkolla olemassa oleva rakennuskanta sijaitsee yleensä melko kaukana radasta. Rataosuudella vaunun maksiminopeus on 40 km/h.

Paaluvälillä 1800 – 1900 on asuinkerrostalo ja hotelli lähimmillään noin 14 metrin etäisyydellä radasta, mutta alueella olevan pehmeikön vuoksi laskennalliset runkomelutasot ovat alhaisia. Paaluvälillä 2700 – 2920 sijaitsee asuinkerrostaloja lähimmillään noin 14 metrin päässä radasta, mutta kovassa maaperässä laskennallinen runkomelutaso jää noin 26 dB:iin.

Paikallisesti runkomelu voi ylittää suositusarvon 35 dB Viinikanlahden sillan pohjoispuolella sijaitsevan asuinkerrostalon sillan puoleisessa päädyssä, kun silta tulkitaan

radan epäjatkuvuuskohdaksi. Riskiä pienentää kuitenkin se, että sillan eteläpuolella on raitiotiepysäkki, joten vaunujen ajonopeus riskialueella on todellisuudessa pienempi kuin 40 km/h. Myös elastisten kiskonaluslevyjen käyttö alentaa runkomelutasoa. Riskiä on edelleen mahdollista pienentää ottamalla runkomeluriski huomioon etenkin paalulaatan ja sillan päädyn liitoksen suunnittelussa sekä asentamalla radan päällysrakenteen alle erillinen runkomeluvaimennuskaista.

3.2.3 Härmälä, lohko 7

Selvityksen alilukua täydennetään myöhemmin.

3.2.4 Pirkkala, lohko 8

Selvityksen alilukua täydennetään myöhemmin.

4 YHTEENVETO JA JATKOTOIMENPITEET

Linnainmaan lohkolla *ei selvityksen perusteella katsota olevan erityistä tärinäriskiä* poislukien pehmeikköalue paaluvälillä 6000 – 6300 ja radan epäjatkuvuuskohdat, joilla tärinäriskin arvioidaan olevan *vähäinen*. Hatanpään lohkolla tärinäriski katsotaan pääosin *vähäiseksi* lukuunottamatta Viinikanladen sillan pohjoispäätä paalun 1000 paikkeilla, jonka ympäristössä riski arvioidaan *kohtalaiseksi*.

Selvityksen perusteella Linnainmaan haaran todetaan olevan suurelta osin runkomelun riskialuetta. Hatanpään lohkolla ei arvioida olevan erityisiä runkomelun riskialueita Viinikanlahden sillan pohjoispuolella sijaitsevaa asuinkerrostaloa lukuunottamatta. Linnainmaan lohkon runkomeluvaimennusta edellyttävät osuudet esitetään seuraavassa taulukossa paaluväleittäin.

Taulukko 4-1 Esitetyt runkomeluvaimennukset, Linnainmaan haara (lohko 3)

Alkupaalu	Loppupaalu	Etäisyys [m]	Vaimennus [dB]
4588	4900	312	0
4900	5920	1020	20*
5920	6400	480	0
6400	6950	550	10*
6950	7350	400	0
7350	8030	680	10*
8030	8500	470	0
8500	8888	388	10*
Yhteensä	10 dB	1618	
	20 dB	1020	

* Vaimennus elastisen kiskonaluslevyn lisäksi

Vaimennettavia osuuksia voi olla mahdollista optimoida hankkeen myöhemmissä vaiheissa etenkin paaluväleillä 4900 – 5920 ja 6400 – 6850, mikäli kallion

sijainti radan ja tulevien rakennusten kohdilla on silloin tarkasti tiedossa. Myös radan loppuosuudella vaimennuksessa voi olla optimointivaraa, kun raitiovaunun ajonopeus ja maa- ja kallioperätiedot alueelta tarkentuvat.

Sekä tärinä- että runkomelulaskelmiin liittyy epävarmuutta moninaisista syistä. Häiritsevää tärinää tai runkomelua voi esiintyä paikallisesti myös alueilla, joilla riskiä ei tässä selvityksessä arvioida olevan johtuen esimerkiksi poikkeamista maa- tai kallioperässä. Etenkin vaihteiden ja muiden radan epäjatkuvuuskohtien, joihin ajetaan raideosuuden maksiminopeutta, suunnitteluun on kiinnitettävä erityishuomiota sekä tärinän että runkomelun osalta. Runkomelun tapauksessa väylän perustaminen paalulaatalle voi tietyissä tapauksissa kasvattaa laskennallisia äänitasoja L_{pA} , mikäli tärinän todetaan siirtyvän paaluista kallioon ja edelleen lähialueen rakennusten perustuksiin ja paaluihin.

Rakennusten välipohjien resonanssi on mahdollinen lopulta hyvin monenlaisissa rakennuksissa ja maaperissä etenkin alle 50 metrin etäisyydellä väylästä. Tärinän osalta raitiotien suunnitteluperusteisiin sekä valmisteilla oleviin asemakaavoihin on syytä lisätä ohjeistus raitioliikenteen aiheuttaman tärinän huomioimiseksi. Erityisesti uusien rakennusten välipohjien suunnittelussa tulisi huomioida raitiovaunun aiheuttaman värähtelyn taajuusalue, pohjamaan ominaistuuudet ja radan epäjatkuvuuskohdat.

Tässä selvityksessä arvioidaan raitiotien aiheuttaman tärinän ja runkomelun vaikutusta pelkästään ihmisten kokemana häiriönä muun muassa asumismukavuuden kannalta. Suunnittelualueella voi kuitenkin olla toimintoja (esim. tärinäherkät laitteet), joille tärinän ja runkomelun raja-arvot ovat asumismukavuuden vastaavia alhaisemmat; tämä tulee tarpeen mukaan ottaa huomioon seuraavissa suunnitteluvaiheissa tapauskohtaisesti.

Tärinä- ja runkomeluselvitystä on tarpeen päivittää lähtötietojen päivittyessä ja tarkentuessa. Tärinää ja runkomelua on hankkeessa syytä arvioida uudelleen viimeistään ennen radan vaimennusratkaisujen suunnittelua. Vaimennusratkaisuja suunniteltaessa tulee selvittää tarkemmin paalulaatan mahdollinen vaikutus runkomeluun.

5 LÄHTEET

Geologian tutkimuskeskus (2024). Maankamara-karttapalvelu. Saatavissa: <https://gtkdata.gtk.fi/maankamara/>

NS 8176 (1999). Vibrasjoner og støt. Måling i bygninger av vibrasjoner fra landbasert samferdsel og veiledning for bedømmelse av virkning på mennesker. Oslo: Norges Standardiseringsförbund (NSF), 27 s.

Pirkkala-Linnainmaa raitiotien hankesuunnitelma 28.2.2023

RIL (2010). RIL 253-2010 Rakentamisen aiheuttamat tärinät. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

Talja, A. (2004). Suositus liikennetärinän mittaamisesta ja luokituksesta, VTT Tiedotteita 2278, 50 s.

Talja, A. (2011). Ohjeita liikennetärinän arviointiin, VTT Tiedotteita 2569, 35 s.

Talja, A. & Saarinen, A. (2009). Maaliikenteen aiheuttaman runkomelun arviointi, esiselvitys, VTT Tiedotteita 2468, 56 s.

Talja, A., Vepsä, A., Kurkela, J. & Halonen, M. (2008). Rakennukseen siirtyvän liikennetärinän arviointi, VTT Tiedotteita 2425, 95 s.

Talja, A. & Törnqvist, J. (2014). Liikennetärinä: Alueiden tärinäkartoitus ja rakenteiden vaurioitumisalttius, VTT Tutkimusraportti VTT-R-04703-14, 58 s.

Tampereen ratikka (2024). Vaunujen tekniset tiedot. Saatavissa:
<https://www.tampereenratikka.fi/vaunujen-tekniset-tiedot/>

Törnqvist, J. & Talja, A. (2006). Suositus liikennetärinän arvioimiseksi maankäytön suunnittelussa, VTT Working Paper 50, 46 s.