

Kouvola – Kotka – Hamina -radan yleissuunnitelman jatkosuunnittelu

Tärinäselvitys

1618379.3
15.6.2022

TIIVISTELMÄ

Tässä selvityksessä on jatkettu Kouvola-Kotka-Hamina -radan yleissuunnitelman tärinäselvitystä tarkentamalla laskennallisia arvioita tärinän kohdealueilla sekä tarkastelemalla tärinän vaimennusmenetelmien vaikutusta kohdealueiden tärinätasoihin asuinrakennuksissa. Selvityksen liitteenä on yleissuunnitelmavaiheen tärinäselvityksen perusteella valittujen kohdealueiden 1–9 kohdekortit, joissa on esitetty tulokset eri vaimennusratkaisuilla.

Tärinää arvioitiin julkaisun *Suositus liikennetärinän mittaamisesta ja luokituksesta* mukaisella tärinäluokituksella. Suunnittelualueella sovellettava tärinän raja-arvo on tärinäluokka D.

Selvityksen tulokset on laskettu kunkin rataosan tavarajunien massajakaumasta määritetyllä 95. persentiilillä vastaavalla tavarajunalla, jolloin tulokset edustavat tärinän arvioinnissa käytettyä tilastollista tunnuslukua $v_{w,95}$. Selvityksessä rakennuksissa esiintyviä tärinätasoja on arvioitu rakennuksen perustuksen tärinätason perusteella. Mahdollista rakennusrungon resonanssin tärinää voimistavaa vaikutusta ei ole otettu huomioon. Selvityksen epävarmuuksia on arvioitu kappaleessa 5.2.

Kappaleessa 6 on esitetty kohdealueilla suoritettujen mittausten periaatteita. Mittaustulosten avulla tarkennettiin ja varmistettiin laskennallisessa arvioinnissa käytettyjä parametreja. Kohdealueiden laskentaparametrien mahdolliset muutokset on esitetty kohdekorteissa.

Selvityksen kappaleessa 7 on esitetty erilaisia tärinäntorjunnan toimenpiteitä sekä esitetty niille arvioituja vaimennusarvoja. Kohdealueilla vaimennusratkaisuna tarkasteltiin tavoitevaimennuksia 25 %, 50 % ja 75 %, joita vastaaviksi tärinäntorjunnan toimenpiteiksi valittiin pohjainpölkky, radan vieressä olevan maan vahvistaminen syvästabiloinnilla ja radan perustaminen maanvaraiselle teräsbetonilaatalle. Tärinäntorjunnan kustannuksia arvioitiin vaimennusratkaisuille arvioitujen yksikkökustannusten avulla.

Kappaleessa 8 on esitetty kohdealueiden tuloksia kootusti. Tarkemmin selvityksen tulokset on esitetty liitteissä 1–9 kohdealueiden kohdekorteissa. Kohdekorteissa on esitetty laskennan tulokset eri vaimennusratkaisuilla, kohdealueiden tärinäkartat eri vaimennusratkaisuilla sekä kohdealueen maaperäkartta.

Mahdollisessa jatkosuunnittelussa tarkasteltuja vaimennustoimenpiteitä suunnitella tarkemmin ja määrittää kohdealueilla kustannustehokkain kokonaisratkaisu eri toimenpiteitä yhdistelemällä. Väylävirasto päättää erikseen mahdollisesta jatkosuunnittelusta ja toimenpiteistä eivätkä ne kuulu käynnissä olevaan KoKoHa-hankkeeseen.

Espoossa 15.6.2022

A-INSINÖÖRIT SUUNNITTELU OY



Benjamin Oksanen, asiantuntija



Timo Huhtala, suunnittelujohtaja

Kouvola – Kotka – Hamina -radan yleissuunnitelman jatkosuunnittelu

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	5
1.1	Tilaaja	5
1.2	Tekijä5	
1.3	Kohde.....	5
1.4	Hankkeen kuvaus	5
1.5	Tärinäselvityksen tarkoitus.....	6
2	LÄHTÖTIEDOT	7
2.1	Maastomalli ja rakennukset	7
2.2	Maaperätiedot	7
2.3	Raideliikenne	7
3	TÄRINÄÄ KOSKEVAT OHJEARVOT	8
4	TÄRINÄNTORJUNNAN SUUNNITTELUPERUSTEET	8
5	LASKENTAMENETELMÄT	9
5.1	Tärinän laskentamalli	9
5.2	Epävarmuudet	9
6	KOHDEALUEILLA SUORITETUT MITTAUKSET	11
6.1	Siirtomobilitaettimittaus	11
6.2	Maaperän karakterisointimittaus	13
6.3	Liikennöivän kaluston tärinämittaukset	14
7	TÄRINÄNVAIMENNUS	14
7.1	Tärinäntorjunnan toimenpiteet	14
7.1.1	Radan perustaminen paalujen varaan tehdylle teräsbetonilaatalle	15
7.1.2	Radan perustaminen maanvaraiselle teräsbetonilaatalle	15
7.1.3	Teräsponttiseinä	15
7.1.4	Ankkuroitu teräsponttiseinä	15
7.1.5	Radan viereisen maan vahvistaminen syvästabiloinnilla	15
7.1.6	Ratapenkereen alapuolisten pehmeiden maakerrosten syvästabilointi	16
7.1.7	Ratapenkereen alapuolisten pehmeiden maakerrosten vahvistaminen suihkuinjektoimalla	16
7.1.8	Oja 16	
7.1.9	Massa radan vieressä	17
7.1.10	Ratapenkereen korkeuden kasvattaminen	17
7.1.11	Pohjainpölkky	17
7.1.12	Nopeusrajoitus	17
7.1.13	Kaluston kunnon kriteerit	17
7.2	Kohdealueilla tarkastellut tärinän vaimennusmenetelmät	19
7.3	Tärinäntorjunnan toimenpiteiden arvioidut kustannukset	20
7.3.1	Pohjainpölkky	20
7.3.2	Radan viereisen maan stabiloiminen syvästabiloinnilla	20
7.3.3	Radan perustaminen maanvaraiselle teräsbetonilaatalle	20
8	TULOKSET	21
8.1	Vaimennusratkaisujen vaikutukset tärinään	21
8.2	Vaimennusratkaisujen kustannukset	22
	LIITTEET 23	

1 JOHDANTO

1.1 Tilaaaja

Väylävirasto
Opastinsilta 12 A
00521 Helsinki

Miia Kari
miia.kari@vayla.fi

p. 029 534 3111

1.2 Tekijä

A-Insinöörit Suunnittelu Oy
Bertel Jungin aukio 9, 02600 Espoo
puh. 0207 911 888, fax. 0207 911 778

DI Benjamin Oksanen
benjamin.oksanen@ains.fi

p. 040 647 4358

DI Timo Huhtala
timo.huhtala@ains.fi

p. 040 643 3762

1.3 Kohde

Rakennuskohde: Kouvola-Kotka-Hamina – radan yleissuunnitelman jatkosuunnittelu

Tehtävä: Tärinäselvitys ja tärinäntorjunnan vaihtoehtojen tarkastelu

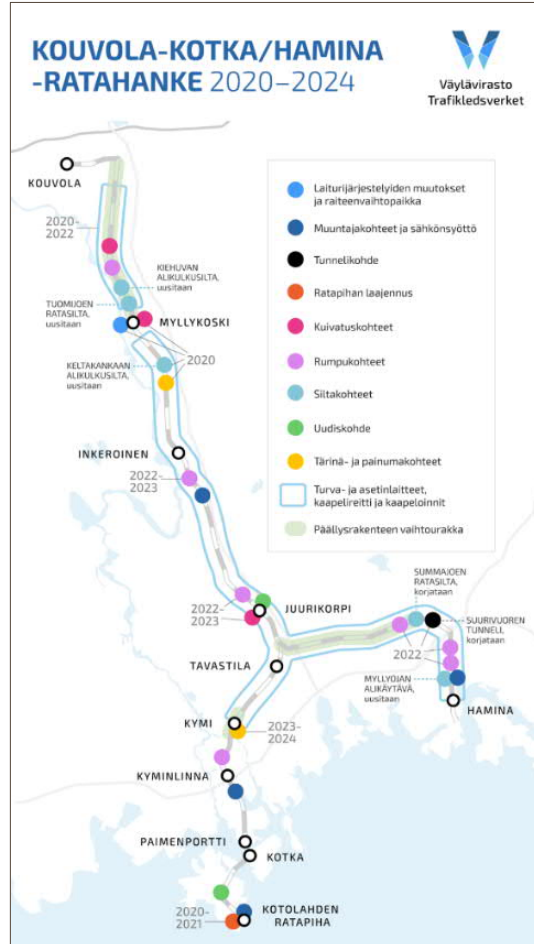
1.4 Hankkeen kuvaus

Kouvola-Kotka-Hamina -rataosuus on merkittävät TEN-T -verkon, Kouvolan ja Kotkan sekä Haminan satamien välinen tavaraliikenteen väylä. Kouvolan ja Juurikorven väli onkin Suomen vilkkain tavaraliikenteen osuus. Rataosilla liikkuu paljon muun muassa raskaita paperi- ja kartonkikuljetuksia. Kouvola-Kotka-välillä kulkee myös henkilöliikenteen junia.

Nykyisellään rata on Kouvolasta Juurikorpeen kaksiraiteinen, ja Juurikorvesta Kotkaan ja Haminaan haarautuvat osat ovat yksiraiteisia. Nykyinen rataosien suurin sallittu akselipaino on 22,5 tonnia.

Kouvola-Kotka/Hamina radan hankekokonaisuus kattaa Kouvola-Kotka/Hamina-välin peruskorjauksen (päälysrakenteet, sillat), akselipainon noston 22,5 tonnista 25 tonniin, turvalaitteiden uusimisen, Kotkan Kotolahden ratapihan raiteiston laajentamisen ja Hovinsaaren ratapihan muutostarpeet sekä Kouvola-Kotka-välin linjaosuuden välityskykyä parantavat toimenpiteet.

Akselipainon noston tarkoitus on parantaa kuljetusten kustannustehokkuutta sekä rataosien välityskykyä mahdollisesti lyhenevien junapituuksien myötä (vaunut voidaan lastata raskaammiksi ja vaunumäärät vähenevät). Kouvola-Kotka/Hamina ratahankkeen kartta on esitetty kuvassa 1. (Lähde: <https://vayla.fi/kouvola-kotka-hamina>.)



Kuva 1. Kouvola-Kotka/Hamina ratahankkeen kartta
(Lähde: <https://vayla.fi/kouvola-kotka-hamina/hankkeen-kartat>)

1.5 Tärinäselvityksen tarkoitus

Tämän tärinäselvityksen tarkoitus on tarkentaa Kouvola-Kotka-Hamina -radan yleissuunnitelman tärinäselvitystä [1] taulukossa 1 esitettyjen tärinän kohdealueiden (9 kpl) osalta. Kohdealueilla toteutettiin tärinä- ja maaperämittauksia, joiden perusteella yleissuunnitteluvaiheen laskennallisia arvioita tarkennettiin. Lisäksi tärinän kohdealueilla tarkasteltiin erilaisten tärinäntorjuntakeinojen vaikutusta asuinrakennusten tärinätasoihin sekä näiden ratkaisujen kustannuksia.

Taulukko 1. Tärinän kohdealueet

KOHDEALUE 1	Mielakka, Kouvola
KOHDEALUE 2	Myllykoski, Kouvola
KOHDEALUE 3	Juholanmäki, Kouvola
KOHDEALUE 4	Keltakangas, Kouvola
KOHDEALUE 5	Inkeroinen, Kouvola
KOHDEALUE 6	Ylänummi, Kouvola
KOHDEALUE 7	Salmenkylä, Hamina
KOHDEALUE 8	Hovila, Kotka
KOHDEALUE 9	Hovinsaari, Kotka

2 LÄHTÖTIEDOT

2.1 Maastomalli ja rakennukset

Selvitys perustuu Kouvola-Kotka-Hamina -ratahankkeen suunnitelma-aineistoon sekä Maanmittauslaitokselta saatuun avoimeen pohjakartta-aineistoon (<http://www.maanmittauslaitos.fi/avoimen-tietoaineiston-cc-40-lisenssi>).

Tärinäselvityksessä on käytetty seuraavia Maanmittauslaitoksen aineistoja:

- Maastotietokanta (rakennukset ja niiden käyttötarkoitukset, ratalinjaus ja vesistöt)
- Taustakartat

2.2 Maaperätiedot

Selvitys perustuu Geologian Tutkimuskeskuksen GTK:n avoimen lisenssin alaiseen *maaperä 1:20 000* -maaperäkartta -aineistoon. (GTK Avoin lisenssi Nimeä CC 4.0, sisältää GTK:n Maaperä 1:20 000 / 1:50 000 aineistoa, irrotettu 29.6.2021 Hakku-palvelu)

Maaperäkartan tietoja on täydennetty kairaustietojen sekä kohdealueilla suoritettujen mittauksen perusteella.

2.3 Raideliikenne

Junien nykyiset ja ennustetut (v.2050) liikennetiedot on toimittanut Sweco Infra & Rail Oy. Liikennetiedot on hyväksynyt Väylävirasto. Eri rataosille junien tyypit, lukumäärät, keskimääräiset pituudet sekä junien paino- ja nopeustiedot on esitetty erikseen päivä- ja yöajalle liitteessä 10. Tärinälaskennassa on käytetty junien nopeutena sarakkeen ”Nopeusrajoitus [km/h]” tietoja. Ennustetilanteessa liikennemäärät pääsääntöisesti hieman pienenevät nykytilanteesta.

Tavarajunien massojen toteutumat hankkeen alueella vuodelta 2021 on saatu Väylävirastolta (sähköposti, Mikael Takala, 11.4.2022 & 1.6.2022). Massatilastojen perusteella määritettiin laskennoissa käytetty massajakaumien 95. persenttiiliä vastaavat massat. Laskennassa käytetty massa on Kouvola-Juurikorpi-välillä 5300 t, Juurikorpi-Hamina-välillä 5500 t ja Juurikorpi-Kotka-välillä 5700 t. Kohdealueella K1 Mielakassa länteen kohti Kouvola haarautuvalla rai-deosuudella laskennassa käytetty massa on 860 t.

3 TÄRINÄÄ KOSKEVAT OHJEARVOT

VTT:n julkaisussa *Suositus liikennetärinän arvioimiseksi maankäytön suunnittelussa* [2] on esitetty suositukset tärinän raja-arvoiksi. Rakennusten tärinäluokittelun raja-arvot sekä kuvaukset häiritsevyydestä on esitetty taulukossa 2. Tunnusluku $v_{w,95}$ on määritelty tilastollisesti siten, että satunnaisesti ohi ajavan junan aiheuttama värähtely ei ylitä ylärajaa 95 % todennäköisyydellä.

Taulukko 2. VTT:n tärinäluokitus sekä kuvaus olosuhteista [2].

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 asuinolosuhteet. <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 häiritseväenä ja voi va- littaa häiriöstä.</i>	$\leq 0,30$
D	Olosuhteet, joihin pyritään vanhoilla asuinalueilla. <i>Keskimäärin 25 % asukkaista pitää tärinää häiritseväenä ja voi va- littaa häiriöstä.</i>	$\leq 0,60$
Luokka C edustaa vähimmäistasoa, johon tulee pyrkiä uusien rakennusten ja alueiden suunnitte- lussa. Yksittäiset olemassa olevien väylien varrella sijaitsevat uudisrakennukset tai väylän vähäiset muutokset arvioidaan kuitenkin luokan D mukaan [1]		

Selvitysalueen tavoitetasona on tärinäluokituksessa tärinäluokka D. Selvitysalueetta voidaan pi-
tää pääsääntöisesti vanhana asuinalueena, minkä lisäksi hankkeessa toteutettavat radan muu-
tokset ovat vähäisiä nykytilanteeseen verrattuna.

4 TÄRINÄNTORJUNNAN SUUNNITTELUPERUSTEET

Suunnittelupäätöksessä hankkeen tärinäntorjunnan lähtökohdaksi on kirjattu tavoite, jonka mu-
kaan asuin- ja lomarakennuksissa esiintyvät tärinätasot ei kasva nykytilanteesta [4]. Ensisijai-
nen tärinäntorjunnan toimenpide on suunnittelupäätöksen mukaan nopeusrajoitusten asetta-
minen.

Suunnittelupäätöksen [4] mukaan liikennöinti 250 kN akselipainolla sallittaneen vain uudem-
man tyyppisellä (Barber-teli tai vastaava) venäläisellä kalustolla, jonka aiheuttama tärinä on
vähäisempää kuin vanhemman venäläisen kaluston (Hopper-kalusto).

Tässä selvityksessä tutkittiin tärinäntorjunnan toimenpiteiden vaikutuksia kohdealueiden tä-
rinätasoihin. Tärinäntorjuntaratkaisuja tarkasteltiin laskentamallissa tavoitevaimennuksien 25
%, 50 % ja 75 % osalta. Tärinäntorjunnan kustannukset laskettiin kullekin tavoitevaimennuk-
selle määritetyn vaimennusratkaisun arvioitujen yksikköhintojen ja asennuslaajuuden avulla.
Vaimennusratkaisujen kustannukset asuinrakennusta kohden laskettiin D-luokan saavuttavien
asuinrakennusten osalta.

5 LASKENTAMENETELMÄT

5.1 Tärinän laskentamalli

Tärinätasoja maaperässä ja rakennuksissa on arvioitu julkaisussa *Suositus liikennetärinän arvioimiseksi maankäytön suunnittelussa* esitetyn laskentamallin [2] sekä eri kohteista keräämämme referenssipankin avulla. Laskentamalli arvioi pystysuuntaisen heilahdusnopeuden maksimin odotusarvon maaperässä kaavalla

$$v_{z,max} = v_{z,15} k_D k_S k_G k_R F \quad (1)$$

Laskentamallin muuttujat ovat

- pystysuora vertailuheilahdusnopeus 15 m etäisyydellä raiteen keskilinjasta $v_{z,15}$. Muuttujan arvo valittu referenssimittausten perusteella.
- etäisyyskerroin k_D . Värähtelyn vaimeneminen riippuu maalajin ominaisuuksista.
- nopeudesta riippuva kerroin k_S . Laskentamallissa yli 70 km/h nopeudet kasvattavat tärinätasoja.
- painosta riippuva kerroin k_G
- radan kunnosta riippuva kerroin k_R
- varmuuskerroin F

Rakennuksissa esiintyvä tärinä on arvioitu maaperän pystysuuntaisesta heilahdusnopeudesta. Pystysuuntaisen tärinän tehollisarvon suuruus on arvioitu huippuarvosta kertoimella $k_P = 0,5$. Maaperän värähtelyn on oletettu siirtyvän vaimentumattomana rakennuksen perustuksiin. Asuin- ja lomarakennusten osalta tulokset on esitetty rakennuksen perustuksiin arvioidun tärinätason mukaisesti tärinäluokittain.

Värähtely voi voimistua asuintiloissa rakennuksen rungon resonanssin vaikutuksesta. Resonanssin aiheuttama värähtelyn voimistuminen riippuu kuitenkin voimakkaasti rakennuksen perustamistavasta, runkoratkaisusta ja maaperän värähtelyn merkitsevistä taajuussisällöstä. Näin ollen resonanssin vaikutus on jätetty pois tarkastelusta tässä selvityksessä. Rungon resonanssi voi voimistaa tärinätasoja 1–10 kertaiseksi.

Laskentamallissa käytettävien parametrien arvoja kalibroitiin vertaamalla selvitysalueelta tehtyjen tärinämittausten tuloksia laskentamallilla vastaavilla olosuhteilla arvioituihin tärinätasoihin. Lisäksi hyödynnettiin muita A-Insinöörien mittaustietokannan mittaustuloksia referensseinä laskentamallin parametrien valinnassa.

Laskentamallin parametreja tarkennettiin kohdealueilla syksyllä 2021 tehtyjen mittausten perusteella. Mittauksista on kerrottu tarkemmin kappaleessa 6. Tehdyt muutokset on esitetty kohdealueittain kohdekorteissa.

5.2 Epävarmuudet

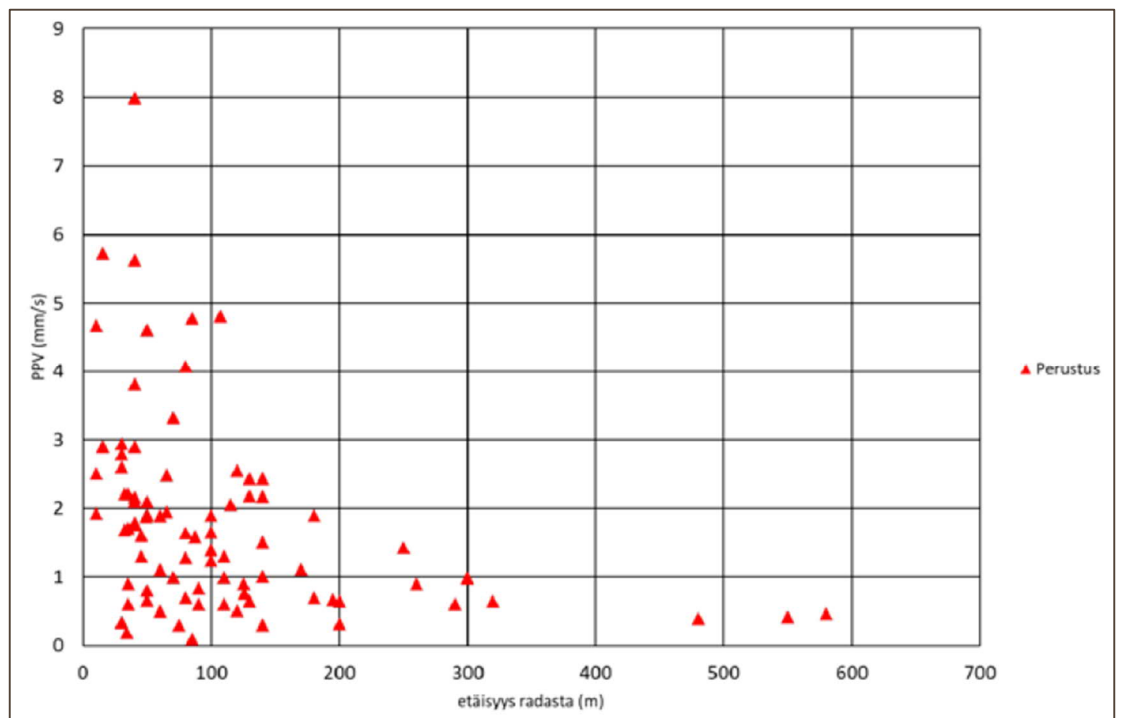
Tärinän laskennallisessa arvioinnissa maaperän ominaisuudet ja niiden vaihtelu radan ja tarkasteltavan kohteen välillä vaikuttavat suuresti tärinän esiintymiseen. Käytetty laskentamalli ei pysty ottamaan huomioon muutoksia maalajeissa radan ja tarkasteltavan kohteen välillä. Myöskään radan ja tarkasteltavan rakennuksen väliin jäävien muiden rakennusten tärinää vaimentavaa vaikutusta ei voida laskentamallilla luotettavasti arvioida.

Rakennusten perustamistapoja ei ole yksittäisten rakennusten osalta huomioitu laskennallisessa arviossa, minkä vuoksi esimerkiksi paaluille perustetun ja maanvaraisesti perustetun rakennuksen eroja ei ole voitu ottaa huomioon.

Asuin- ja lomarakennusten arvioidut värinätasot on laskettu rakennusten perustuksiin. Värinä asuintiloissa voi kuitenkin voimistua rungon resonanssin myötä. Voimistumisen suuruus riippuu rakennuksen rungon dynaamisista ominaisuuksista, maaperästä sekä värinän taajuussisällöstä. Näin ollen osassa asuinrakennuksia arvioidut värinätasot voivat olla aliarvioita, sillä rakennuksen rungon mahdollista resonanssia ei ole otettu huomioon.

Selvitysalueelta oli käytettävissä värinän osalta mittaustuloksia, joita hyödynnettiin laskentamallin kalibroimisessa. Erityisesti värinän vaimeneminen etäisyyden kasvaessa on kuitenkin suuresti riippuvainen maaperäolosuhteista, joten laskentamenetelmä on suuntaa antava ja soveltuu värinän kannalta haastavien alueiden selvittämiseen. Suuremmilla etäisyyksillä arvioinnin epävarmuus kasvaa.

Radanvarren asukkailta saadun palautteen ja tehtyjen värinämittausten perusteella suurin osa värinähaitoista ilmenee muutaman sadan metrin etäisyydellä radasta [5]. Kuvassa 2 on esitetty Väjälän vuosina 2016–2019 teettämiä värinämittauksia, joissa suurimmat etäisyydet rataa ovat olleet noin 600 m. Tällä etäisyydellä värinätasot ovat jääneet alhaisiksi.



Kuva 2. Perustuksista mitatun värinän voimakkuus ja rakennuksen etäisyys radasta. Kooste Väjälän vuosina 2016–2019 teettämiä mittauksista. [5]

Liikennöivän kaluston osalta värinään vaikuttavia asioita ovat erityisesti junan paino ja kaluston kunto. Lovipyörät ja muut kalustoviat voivat lisätä värinätasoja merkittävästi. Venäläisistä tavaravaunuista koostuvat tavarajunat aiheuttavat yleensä suomalaista kalustoa suurempia värinätasoja. Myös lovipyörät ovat venäläisessä kalustossa yleisempiä. Selvityksessä tavanomainen liikennöivän kaluston kunto ja sen vaikutus värinään otettiin huomioon laskentamallin kalibroinnissa mittaustuloksiin. Erityisen huonokuntoisen kaluston aiheuttamat värinätasot voivat

kuitenkin olla suurempia. Hankkeen suunnittelupäätöksen [4] mukaan 250 kN akselipainolla sallittaneen vain uudemman tyyppinen venäläinen kalusto, joiden aiheuttama värinä on pienempää ja lovipyöriä esiintyy vähemmän kuin vanhemmalla venäläisellä kalustolla. Näin ollen merkittävien painavimpien junien osalta kaluston kunto ei välttämättä ole erityisen huono.

6 KOHDEALUEILLA SUORITETUT MITTAUKSET

Kohdealueilla suoritettiin mittauksia keskimäärin kahdella mittauslinjalla kohdealuetta kohden. Mittauslinjojen sijainnit on esitetty liitteiden 1–9 kohdekorttien kartoissa. Mittauksissa mitattiin sekä maaperän dynaamisia ominaisuuksia että liikennöivän kaluston ohitusten aiheuttamia värinätasoja maaperässä. Kuvassa 3 on esitetty mittausjärjestelyjä mittauslinjalla K2L1.



Kuva 3. Mittausjärjestelyt mittauslinjalla K2L1. Junien aiheuttamaa värähtelyä sekä maaperän värähtelyominaisuuksia mitattiin rataa vasten kohtisuorilla linjoilla, enimmillään noin 40 m etäisyydellä radasta.

6.1 Siirtomobiliateettimittaus

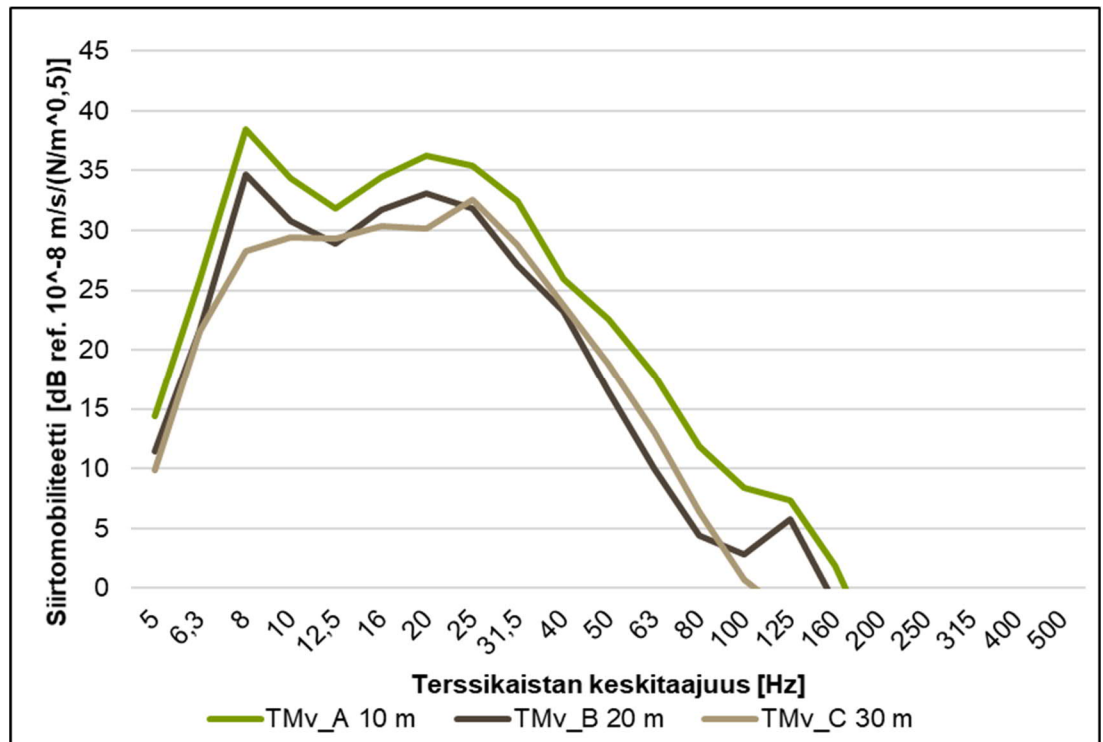
Kohdealueilla mitattiin keinoherätteen avulla maaperän siirtomobiliateetteja. Siirtomobiliateetti kuvaa maaperän värähtelyn etenemisominaisuuksia heräte- ja vastaanottopisteiden välillä [6]. Mittauksissa keinoherätteen iskuja kohdistettiin n. 5–10 m etäisyydelle lähimmästä kiskosta radan suuntaiselle linjalle. Keinoherätteen aiheuttamaa värähtelyä mitattiin 10, 20 ja 30 m etäisyyksillä herätelinjasta. Mittaustuloksista laskennallisesti määritetty viivalähteen siirtomobiliateetti kuvaa junan aiheuttaman värähtelyä maaperässä. Eri etäisyyksille määritetyn viivalähteen siirtomobiliateetin avulla voidaan määrittää värähtelyn vaimenemista taajuuskaistoittain

sekä maaperän ominaisuuksia eli taajuusalue, jolla värinän eteneminen maaperässä on otollisinta. Kuvassa 4 on esitetty kuva siirtomobiliiteettimittauksista mittauslinjalla K5L1.



Kuva 4. Siirtomobiliiteetti ja maaperän karakterisointimittauksissa värähtelyn keinoherätteenä käytettiin impulssilekaa.

Kuvassa 5 on esitetty esimerkkinä kohdealueelta 5 mitattu siirtomobiliiteetit etäisyyksiltä 10, 20 ja 30 m. Kuvasta nähdään 8 Hz taajuudella voimakkaasti heräävä maaperän resonanssi. Merkitsevän värinän taajuusalueen voidaan olettaa alkavan noin 6,3 Hz taajuudesta ylöspäin. Mitatut siirtomobiliiteetit kaikilta mittauslinjoilta on esitetty liitteessä 12.

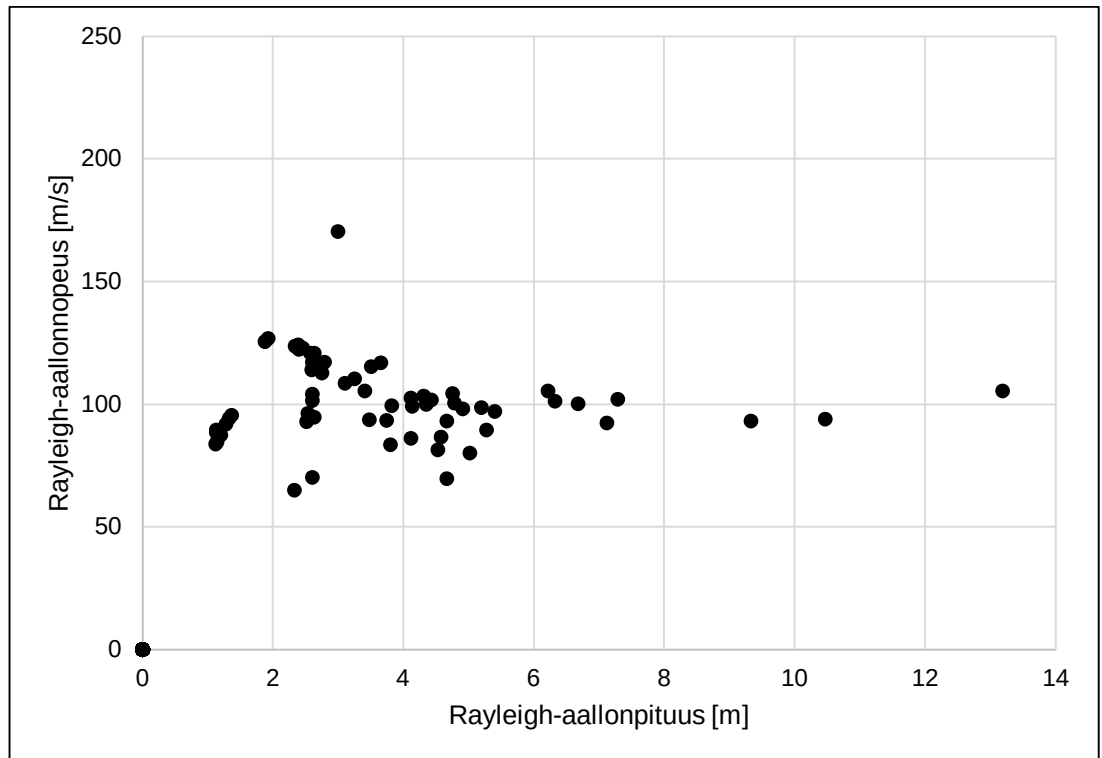


Kuva 5. Mitatut siirtomobiliiteetit etäisyyksiltä 10 m, 20 m ja 30 m mittaussinjalta K5L1 kohdealueella 5.

6.2 Maaperän karakterisointimittaus

Kohdealueiden maaperän ominaisuuksia pyrittiin tarkentamaan mittaamalla maaperän leikkausaallonnopeuksia SASW-menetelmällä (*spectral analysis of surface waves*, pinta-aaltojen spektrianalyysi) [7]. Menetelmässä keinoherätteen maaperään aiheuttaman värähtelyaallon etenemistä maaperässä tarkastellaan kahden mittauspisteen välillä. Signaalinkäsittelyn avulla mitatuista värähtelysignaaleista voidaan laskea pinta-aallon (Rayleigh-aalto) etenemisnopeus eri taajuuksilla. Pinta-aallon aallonpituuden perusteella voidaan arvioida aallon etenemisyvyys ja lasketusta aallon etenemisnopeudesta voidaan arvioida maalajin leikkausaallonnopeus kyseisellä syvyydellä. Maaperän leikkausaallonnopeuksia voidaan puolestaan hyödyntää maalajityyppien ja kerrosten määrittämisessä laskennallista selvitystä varten.

Kuvassa 6 on esitetty kohdealueen 5 mittaussinjalta K5L1 mitatut Rayleigh-aallon etenemisnopeudet aallonpituuden funktiona. Mittaustuloksesta voidaan arvioida, että ylimmän maalajin leikkausaallonnopeus on kohdealueella noin 110 m/s, sillä Rayleigh-aallon etenemisnopeus on yleensä noin 10 % pienempi kuin leikkausaallonnopeus. Lisäksi voidaan arvioida, että kyseinen maalajikerros ulottuu vähintään noin 7 m syvyydelle, sillä mitatun aallonnopeuden voidaan arvioida vastaavan syvyyttä, joka on noin puolet Rayleigh-aallonpituudesta. Maaperän karakterisointimittausten tulokset kaikilta mittaussinjoilta on esitetty liitteessä 13.



Kuva 6. Mitatut Rayleigh-aallonnopeudet mittauslinjalta K5L1.

6.3 Liikennöivän kaluston tärinämittaukset

Kohdealueilla suoritettiin muiden mittausten lomassa radalla liikennöivän kaluston tärinämittauksia. Tärinää mitattiin yleensä n. 20, 30 ja 40 m etäisyyksillä radasta. Laskentamallin parametreja kalibroitiin vertaamalla mitattujen tavarajunien ohitusten aiheuttamia tärinätasoja laskentamallilla vastaavalle junalle arvioituihin tärinätasoihin. Kaikilta kohdealueilta ei saatu mitattua junien ohitusten aiheuttamaa tärinää mittausten aikataulusta ja vähäisestä liikennöinnistä johtuen. Mitatut tavarajunat ja niiden aiheuttamat pystysuuntaiset tärinätasot maaperässä on esitetty liitteessä 11.

7 TÄRINÄNVAIMENNUS

Raideliikenteen tärinätasoihin rakennuksissa voidaan vaikuttaa liikennöintiin, kalustoon, rata-rakenteeseen, värähtelyn siirtotiehen tai vastaanottajaan tehtävillä muutoksilla. Tässä selvityksessä on keskitytty käsittelemään rataa tai radan välittömään läheisyyteen tehtäviin muutoksiin tai toimenpiteisiin, joilla voidaan saavuttaa tärinän vaimennusta.

7.1 Tärinäntorjunnan toimenpiteet

Tässä kappaleessa on esitetty erilaisia tärinäntorjunnan toimenpiteitä ja niiden vaimennuksen arvioitua tehokkuutta. Tärinäntorjunnan toimenpiteille on esitetty arvioidut tärinän vaimennusominaisuudet, jos tietoja on ollut saatavilla kirjallisuuslähteistä tai A-Insinöörien sisäisestä mitaustietokannasta. Raideliikenteen tärinään vaikuttaa hyvin paljon kaluston, ratarakenteen sekä maaperän ominaisuudet, joten vaimennusratkaisujen ei voida olettaa toimivan eri kohteissa tai olosuhteissa samalla tavalla. Tutkimustietoa ja toteutettuja vaimennusratkaisuja on

olemassa suhteellisen vähän, joten esitetyt vaimennusarvot eri ratkaisuille ovat suuntaa antavia arvioita.

7.1.1 Radan perustaminen paalujen varaan tehdylle teräsbetonilaatalle

Paalujen varaan tehdylle teräsbetoniselle laatalla eli paalulaatalle perustettu rata vähentää tärinää joidenkin lähteiden mukaan jopa 90 % [8]. Paalulaatta estää tärinän syntymistä suoraan sen lähteessä, kun paalulaatan lisäämä ratarakenteen jäykkyys heikentää tärinäilmiötä eikä värähtely pääse kytkeymään maaperän pehmeisiin maakerroksiin yhtä tehokkaasti.

7.1.2 Radan perustaminen maanvaraiselle teräsbetonilaatalle

Radan perustamisen maanvaraiselle teräsbetonilaatalle on esitetty vähentävän tärinää 60–80 % [8] tai 70 % [9]. Teräsbetonilaatta muodostaa jäykän tärinää vähentävän kerroksen ratarakenteeseen.

7.1.3 Teräsponttiseinä

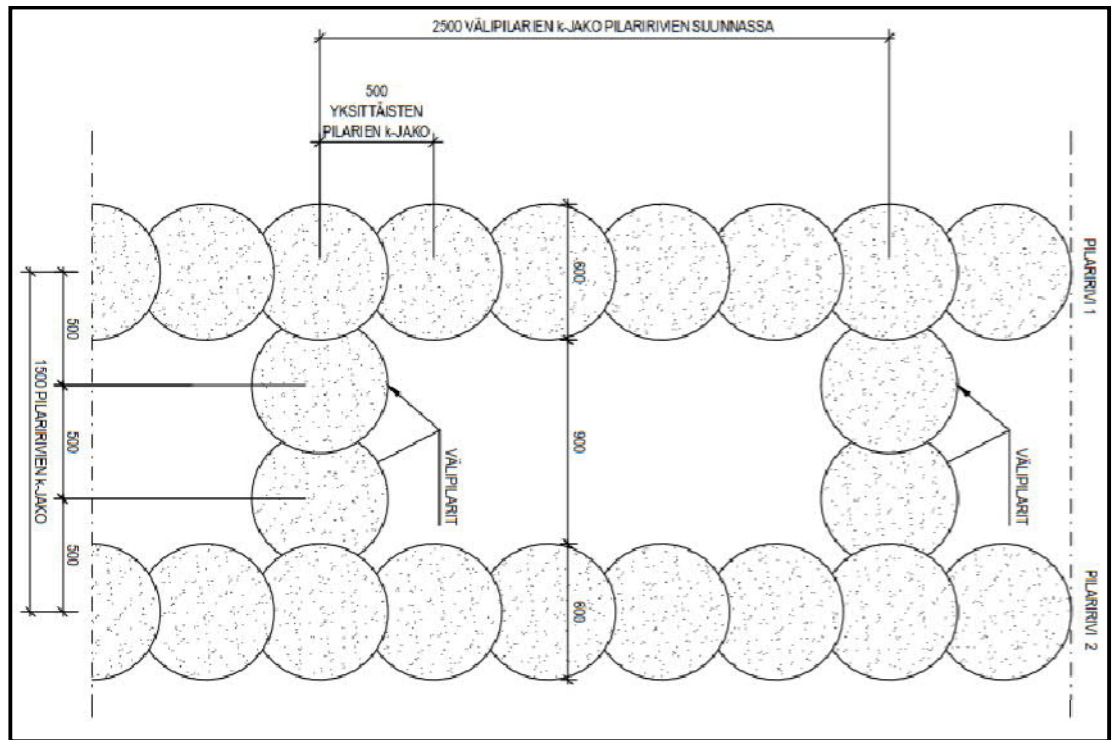
Teräsponttiseinä asennetaan pystyasentoon maanpinnan tasosta pohjamaan pehmeiden maakerrosten läpi. Teräsponttiseinä tukeutuu alapäästään tiiviisiin maakerroksiin. Teräsponttiseinä vaimentaa tärinän siirtymistä pehmeiden maakerrosten kautta. Teräsponttiseinä voidaan sijoittaa radan tai suojattavan kohteen lähelle. Teräsponttiseinälle esitetyt vaimennusarvot vaihtelevat 20–50 % välillä [10, 11].

7.1.4 Ankkuroitu teräsponttiseinä

Ankkuroitu teräsponttiseinä on rakenteeltaan vastaava kuin vapaasti seisova teräsponttiseinä, mutta seinä on jäykistetty yläpäästään vaakasuuntaisilla ankkureilla. Ankkuroitu teräsponttiseinä voi vaimentaa erityisesti vaakasuuntaista värähtelyä vapaasti seisovaa enemmän [12].

7.1.5 Radan viereisen maan vahvistaminen syvästabiloinnilla

Radan viereisen maan vahvistaminen syvästabiloinnilla eli ns. tärinäseinä vaimentaa tärinän etenemistä pehmeissä maakerroksissa. Syvästabiloinnilla toteutetaan seinämäisiä rakenteita, jossa pehmeitä maakerroksia vahvistetaan stabiloimalla niitä pyöreillä pilareilla, jotka leikkaavat toisiaan. Syvästabiloinnista koostuva stabilointirakenne voidaan toteuttaa lähelle rataa tai lähelle suojattavaa kohdetta. Stabilointirakenne vaimentaa tärinää noin 40–80 % [13] kuvan 7 mukaisella kahdesta pilaririvistä ja välipilareista koostuvalla toteutuksella.



Kuva 7. Stabilointirakenteena toteutetun tärinäseinän periaatepiirros, kuvan lähde [13].

7.1.6 Ratapenkereen alapuolisten pehmeiden maakerrosten syvästabilointi

Ratapenkereen alapuolisia pehmeitä maakerroksia syvästabiloimalla voidaan vähentää tärinäilmiön voimakkuutta. Syvästabiloidun pohjamaan päälle perustettu rata vähentää tärinää noin 50 % [8].

7.1.7 Ratapenkereen alapuolisten pehmeiden maakerrosten vahvistaminen suihkuinjektioimalla

Radan stabiloinnin suihkuinjektointipilareilla on esitetty vähentävä tärinää noin 30 % alle 10 Hz taajuuksilla [9]. Radan stabiloinnin periaate tärinän vaimennuksessa on sama kuin syvästabiloinnissa, mutta erilaisista materiaaleista johtuen saavutettava vaimennus voi olla erilainen. Suihkuinjektoinnin etuna on, että injektointi voidaan toteuttaa olemassa olevan ratarakenteen läpi. Suihkuinjektointi vaatii kuitenkin useiden viikkojen kovettumisajan, joten yksiraiteisilla osuuksilla menetelmä ei tarvittavan liikennekatkon vuoksi ole usein käyttökelpoinen.

7.1.8 Oja

Maaperän pehmeän maakerroksen katkaiseva oja voi vaimentaa tärinää tehokkaasti. Oja voi olla avoin, tuettu tai täytetty esimerkiksi EPS-muovilla. Tärinän vaimennusarvo riippuu voimakkaasti maaperäolosuhteista ja pehmeän maakerroksen paksuudesta. Raportoidut vaimennusarvot välillä 30–90 % [9, 14]. Tärinän kannalta merkitsevä, alle 20 Hz taajuuksilla vaimennus on yleensä heikkoa tai vaadittava ojan syvyys on teknisesti haastavaa toteuttaa. Näin ollen tämä vaihtoehto on harvoin käyttökelpoinen.

7.1.9 Massa radan vieressä

Radan viereen lisätty massa toimii yhdessä pohjamaan kanssa resonaattorina, joka vaimentaa värähtelyä resonanssitaajuutta suuremmilla taajuuksilla. Massan, joka on 1 m leveä ja pituus-massaltaan 3400 kg/m vaimennus voi olla yli 40 Hz taajuuksilla noin 50 % [15]. Tärinän kannalta merkitsevä, savimailla alle 15 Hz taajuuksilla vaimennusta on vaikea saavuttaa. Massa voidaan toteuttaa esimerkiksi betonisena rakenteena tai kivimurskeella.

7.1.10 Ratapenkereen korkeuden kasvattaminen

Ratapenkereen korkeuden kasvattamisen on esitetty vähentävän tärinätasoa noin 30 % [8]. Toimenpidettä voi olla haastava toteuttaa jo olemassa oleviin ratoihin, sillä ratapenkereen korkeuden kasvattaminen vaikuttaa merkittävästi radan geometriaan. Radan geometrian muutokset vaikuttavat merkittävästi muihin radan rakenteisiin kuten esimerkiksi sähkörataan, laitureihin, siltoihin ja vaativat myös merkittäviä toimenpiteitä radan stabiliteetin parantamiseen.

7.1.11 Pohjainpölkky

Pohjainpölkky on betoninen ratapölkky, jonka alapinnassa on ohut kerros joustavaa materiaalia. Pohjainpölkkyjen on havaittu vaimentavan suurempien taajuuksien lisäksi myös tärinän kannalta merkitsevää alle 20 Hz taajuusalueella. Pohjainpölkyn tärinän vaimennusominaisuuksia tutkittiin vuonna 2020 Pori-Mäntyluoto -radan testiosuuksilla tehdyissä mittauksissa [16]. Vuoden 2021 joulukuussa toteutetuissa jatkomittauksissa tutkittiin erilaisia pohjainmateriaaleja sekä mitattiin vuoden käytössä ollut aiempi testirataosuus. Tulosten perusteella keskipehmeällä pohjaimella (Pandrol USP-R-07e) saadaan noin 15-40 % vaimennus tärinän kannalta merkitsevä, alle 20 Hz taajuuksilla pystysuuntaisessa taajuuskomponentissa. Testiolosuhteet eivät edustaneet kaikkein pehmeintä tai tärinäalttiinta maaperää, minkä vuoksi erityisen pehmeillä savialueilla pohjaimien tärinänvaimennuksesta ei ole varmuutta.

7.1.12 Nopeusrajoitus

Tavarajunan synnyttämän tärinän suuruus on riippuvainen junan nopeudesta ja usein tärinäongelmien toimenpiteenä käytetty ratkaisu on asettaa nopeusrajoituksia. Kalustosta ja maaperästä riippuen merkittävin tärinätasojen pienentyminen voi esiintyä eri nopeustasoilla. Kohdekohtainen rajanopeus, jolla tärinätasot pienenevät merkittävästi (noin 20–50 %) voi olla esimerkiksi 40 tai 50 km/h [17]. Nopeusrajoituksia määritettäessä voi olla suositeltavaa määritellä mittauksin kohteen rajanopeus, jolla tärinään saadaan merkittävä pienentyminen.

Nopeusrajoituksen aiheuttamien kustannusten arviointi on haastavaa, sillä tavarajunille asetettujen nopeusrajoitukset vaikuttavat rataosuuden kapasiteettiin, josta syntyvien kerrannaisvaikutusten kustannukset voivat olla merkittäviä. Lisäksi nopeusrajoitukset voivat vaikuttaa myös laajemmin liikennöinnin suunnitteluun eri rataosilla.

7.1.13 Kaluston kunnan kriteerit

Erityisesti venäläisessä tavaravaunukalustossa yleiset lovipyörät voivat lisätä tärinätasoa merkittävästi verrattuna kalustoon, jossa lovipyöriä tai muita pyörävikoja ei ole. Kaluston kunnan

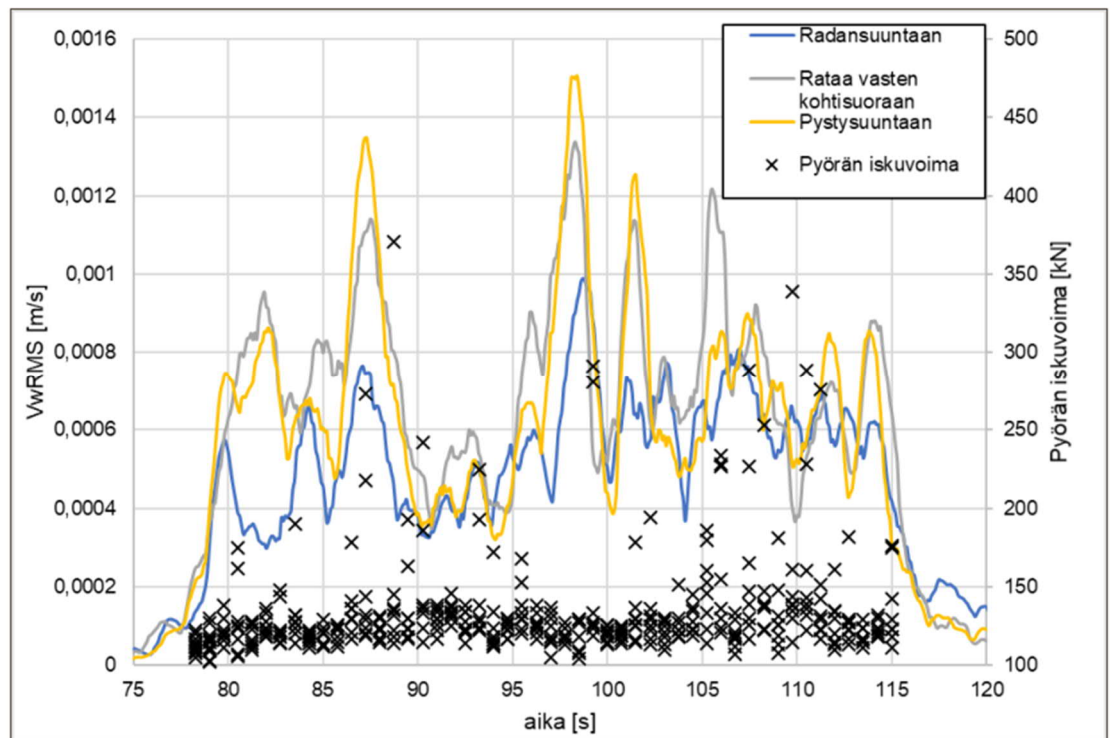
parantaminen voi olla kustannustehokkain ratkaisu vähentää raideliikenteestä aiheutuvan värähtelyn haittoja [18].

Rataverkolla liikennöivästä kalustosta mitataan pyörien iskuvoimia automaattisilla pyörävoimailmaisimilla. Junaliikenteen ja vaihtotyön turvallisuussäännöt -ohjeessa [19] on esitetty pyörien iskuvoimien raja-arvoja ja toimenpiteitä taulukon 3 mukaisesti.

Taulukko 3. Junaliikenteen ja vaihtotyön turvallisuussäännöt -ohjeessa esitetyt pyörien iskuvoimien raja-arvot ja toimenpiteet.

Ilmoituksen tyyppi	Taso	Raja-arvo	Toimenpiteet
Dynaaminen voima Q_{imp}	Q_5	> 450 kN	Poistettava junasta, suurin sallittu nopeus 50 km/h poistamiseen asti
	Q_4	> 400 kN	Suurin sallittu nopeus 50 km/h heti ilmoituksen jälkeen. Pyöräkerta korjataan ennen seuraavaa kuormausta
	Q_3	> 350 kN	Ei nopeusrajoitusta, korjataan ennen seuraavaa kuormausta. Jos sama yksikkö aiheuttaa seuraavan kuormauksen jälkeen vähintään Q_3 -hälytyksen, noudatetaan Q_4 :n edellyttämiä toimenpiteitä
	Q_2	> 250 kN	Korjataan viimeistään seuraavalla kunnossapitopaikalla
	Q_1	> 200 kN	Kunnossapitäjä voi ajoittaa korjauksen

Kuvassa 8 on esitetty Pori-Mäntyluoto-testiradalla mitatut hiilijunan tärinätasot sekä pyörävoimailmaisimella mitatut pyörien iskuvoimat. Tärinätasot on mitattu 14 m etäisyydellä radasta. Kauempana radasta lovipyörien vaikutus voi olla pienempi herätteen taajuussisällöstä ja maaperän vaimennusominaisuuksista johtuen. Kuvassa suurimmat pyörän iskuvoimat johtuvat lovipyöristä ja ovat suurimmillaan noin 370 kN, kun pyörien iskuvoiman keskiarvo on 132 kN. Erityisesti useamman lovipyörän kohdalla junan aiheuttamat tärinätasot ovat noin kaksinkertaiset keskimääräiseen tasoon verrattuna.



Kuva 8. Pori-Mäntyluoto-testiradalla mitatut hiilijunan tärinätasot sekä pyörävoimailmaisella mitatut pyörien iskuvoimat.

Käytössä olevat raja-arvot ovat tavanomaiseen, kunnossa olevan pyörän iskuvoimaan verrattuna suuret. Nykyiset raja-arvot ovat tärinän lisääntymisen kannalta suuria, mutta tiukemmilla raja-arvoilla ja toimenpiteillä lovipyöristä johtuvaa tärinää voitaisiin vähentää. Kuvassa 5 esitetyn tapauksen kohdalla voidaan arvioida tärinätasojen karkeasti ainakin puolittuvan, jos lovipyörät rajattaisiin pois. Tällöin iskuvoiman raja-arvona tulisi käyttää noin 200–250 kN. Liikennöivän kaluston pyörien kunnan parantamisella saatava hyöty ei rajoitu ainoastaan tietyille rataosuuksille, vaan siitä hyötyisi koko rataverkko, jolla kyseinen kalusto liikennöi.

7.2 Kohdealueilla tarkastellut tärinän vaimennusmenetelmät

Kohdealueille valittiin tarkasteltaviksi vaimennusmenetelmät, joiden arvioidut tavoitevaimennukset vastaavat 25, 50 ja 75 %. Tavoitevaimennuksella 25 % vaimennusratkaisu on pohjainpölkky, tyypiltään Pandrol USP-R-07e. Tavoitevaimennuksella 50 % vaimennusratkaisu on radan viereisen maan vahvistaminen syvästabiloinnilla. Tavoitevaimennuksella 75 % vaimennusratkaisu on radan perustaminen maanvaraiselle teräsbetonilaatalle.

Kohdealueiden tärinätorjunnatoimenpiteiden valinta on tehty huomioiden niiden toteutettavuus muun muassa rataliikenteen osalta. Kohdealueilla tietyiltä osin liikennekatkoja vaativa tavoitevaimennusta 75 % vastaava ratkaisu radan perustaminen maanvaraiselle teräsbetonilaatalle ei ole mahdollista, jolloin kyseistä toimenpidettä on tarkasteltu rajatulla alueella, jossa toimenpide on toteutuskelpoinen. Yksiraitaisilla osuuksilla kyseinen toimenpide ei ole toteutettavissa.

7.3 Tärinäntorjunnan toimenpiteiden arvioidut kustannukset

Kohdealueilla tarkasteltujen tärinäntorjunnan toimenpiteiden ja eri kohdealueiden vertailemiseksi toimenpiteille muodostettiin arvioidut yksikkökustannukset. Kaikki yksikkökustannukset ovat karkeita arvioita nykyisessä kustannustasossa. Todellisiin kustannuksiin vaikuttavat erityisesti muun muassa pehmeikköjen syvyydet sekä käytettävissä olevat rataliikenteen katkot. Yksikkökustannuksissa ei ole otettu huomioon myöskään maanhankinnallisia kustannuksia. Arvioitujen yksikkökustannusten perusteella on kohdekorteissa arvioitu eri toimenpiteiden kokonaiskustannuksia tarkastelluilla alueilla.

7.3.1 Pohjainpölkky

Tavoitevaimennusta 25 % vastaava tärinäntorjunnan toimenpide on pohjainpölkky. Pohjaimeksi on tarkastelussa valittu Pandrol USP-R-07e, josta on saatu parhaat tulokset tähän mennessä tehdyissä pohjaintesteissä.

Pandrol USP-R-07e -pohjaimen hinta on n. 30 €/kpl, jolloin 600 mm pölkkyvälillä kustannus on 50 €/jm. Yksikkökustannus koskee ainoastaan pohjaimien materiaalikustannusta, jolloin yksikkökustannus pätee siinä tilanteessa, kun päällysrakenne uusitaan ja betonipölkkyjen sijaan asennetaan betonipölkkyt pohjaimilla.

Jos päällysrakenteen uusinta tehdään ainoastaan pohjainpölkkyjen asentamisen vuoksi, on toimenpiteestä syntyvät kustannukset merkittävästi suuremmat. Hankkeessa ei tulla vaihtamaan pohjainpölkkyä pelkästään tärinäntorjunnan toimenpiteenä vaan pohjainpölkkyt voidaan asentaa vain, kun päällysrakenne muutoinkin uusittaisiin. Näin ollen tässä selvityksessä ei ole tarkasteltu pohjainpölkyn kustannuksia, joihin sisältyisi ratarakenteen uusimisesta aiheutuvat kustannukset.

7.3.2 Radan viereisen maan stabiloiminen syvästabiloinnilla

Tavoitevaimennusta 50 % vastaava toimenpide on radan viereisen maan vahvistaminen syvästabiloinnilla eli syvästabilointipilareista koostuva seinä radan vieressä. Periaatekuva stabilointirakenteesta on esitetty raportin kuvassa 7.

Syvästabiloinnin yksikkökustannus juoksumetriä kohden on laskettu syvästabiloinnin ja muista arvioiduista rakenteen toteuttamisesta aiheutuvista kustannuksista. Kustannuksia saattaa tulla muun muassa rata- ja jännitekatkoista, työn vaihteittain suorittamisesta ja pilareiden kovettumisen odottamisesta, maankaivuusta sekä kivien ja täyterosten poistoista, rakenteiden tukemisesta sekä työmaateistä. Edellä kuvattujen kustannuksen kanssa arvioitu kokonaiskustannus maan vahvistamiselle syvästabilointipilareista koostuvan rakenteena on 1000 €/jm.

7.3.3 Radan perustaminen maanvaraiselle teräsbetonilaatalle

Tavoitevaimennusta 75 % vastaava toimenpide on radan perustaminen maanvaraiselle teräsbetonilaatalle.

Maanvaraisen teräsbetonilaatan kustannukset on laskettu olettaen, että betonilaatta tehdään elementeistä. Laatan paksuus on 400 mm, laatan leveys 6 m ja asennussyvyys ratarakenteessa n. 1,2 m. Asennettaessa laattaa välikerros ja tukikerros uusitaan ja vanha ratapenger

ajetaan kokonaan pois. Toimenpiteessä sähkörataa ei pureta, kiskoja ja ratapöllejä ei uusita eikä ratojen väliin tarvita tukiseinää.

Toimenpiteen aikana radan liikenne ohjataan kulkemaan viereistä raidetta niiltä osin, kuin se on mahdollista. Yksiraiteisilla osuuksilla tämän vaimennusratkaisun toteuttaminen ei ole mahdollista. Edellä kuvatuilla oletuksilla arvioitu yksikkökustannusta vaimennusratkaisulle on n. 1800 €/jm.

8 TULOKSET

Tärinätasot on laskettu kunkin rataosan massajakauman 95. persentiiliä vastaavan tavarajunan mukaan. Tärinätasot on esitetty rakennuksen perustuksissa ilman rakennuksen rungon resonanssin mahdollisesti aiheuttamaa voimistumista.

Vaimennusratkaisujen vaikutuksia tärinään on arvioitu laskennallisesti tavoitevaimennusten 25 %, 50 % ja 75 % avulla. Todellisuudessa vaimennusratkaisulla saavutettavat vaimennukset voivat poiketa laskennallisesti arvioituista merkittävästi esimerkiksi maaperän ominaisuuksien vuoksi tai eri tarkasteluetaisyksillä radasta.

Tarkemmin selvityksen tulokset on esitetty liitteissä 1–9 kunkin kohdealueiden kohdekorteissa. Kohdekorteissa on esitetty laskennan tulokset eri vaimennusratkaisulla, kohdealueiden tärinäkartat eri vaimennusratkaisulla sekä kohdealueen maaperäkarta.

8.1 Vaimennusratkaisujen vaikutukset tärinään

Taulukossa 4 on esitetty D-luokan ylittävien asuinrakennusten määrä eri kohdealueilla. Asuinrakennusten määrä on esitetty tilanteessa, jossa ei ole tärinätorjuntatoimenpiteitä sekä tavoitevaimennuksilla 25 %, 50 % ja 75 % laskettuna. Tärinänvaimennustoimenpiteiden osalta on tarkasteltu myös niiden toteutettavuutta. Tavoitevaimennusta 75 % vastaavaa toimenpidettä ei ole kaikilla kohdealueilla tarkasteltu vastaavalla laajuudella kuin muita tavoitevaimennuksia. Esimerkiksi kohdealueella 2 tavoitevaimennusta 75 % ei pystytä toteuttamaan kuin osalle alueesta, minkä vuoksi kyseisellä vaimennusratkaisulla vaimennuksesta hyötyvien rakennusten määrä jää pienemmäksi esimerkiksi tavoitevaimennukseen 25 % verrattuna. Kohdealueilla 8 ja 9 tehtyjen mittausten perusteella tarkennetun arvion perusteella riski tärinän ohjearvojen ylittymisestä on vähäinen, joten näillä alueilla tärinätorjuntaratkaisujen tutkiminen ei ollut tarpeen.

Taulukko 4. D-luokan ylittävien rakennusten lukumäärä eri tilanteissa. Esimerkiksi kohdealueella 2 ilman tärinätorjuntaa riski D-luokan ylittymisestä koskee 92 kpl kohdealueen asuinrakennuksista ja 25 % vaimennuksella 52 kpl, joten vaimennusratkaisun myötä 40 kpl kohdealueen asuinrakennuksista saavuttaa D-luokan.

KOHDEALUE	Ei tärinätorjuntaa	25 % vaimennus	50 % vaimennus	75 % vaimennus
KOHDEALUE 1	6 kpl	1 kpl	0 kpl	0 kpl
KOHDEALUE 2	92 kpl	52 kpl	27 kpl	66 kpl
KOHDEALUE 3	10 kpl	2 kpl	1 kpl	5 kpl
KOHDEALUE 4	23 kpl	13 kpl	8 kpl	3 kpl
KOHDEALUE 5	20 kpl	13 kpl	12 kpl	7 kpl
KOHDEALUE 6	49 kpl	38 kpl	25 kpl	-

KOHDEALUE 7	4 kpl	2 kpl	1 kpl	-
KOHDEALUE 8	0 kpl	-	-	-
KOHDEALUE 9	0 kpl	-	-	-

8.2 Vaimennusratkaisujen kustannukset

Taulukossa 5 on esitetty kohdealueilla tarkasteltujen tärinän vaimennusratkaisujen kokonaiskustannukset kohdealueittain. Taulukossa 6 on esitetty vaimennusratkaisujen kustannukset tärinäluokan D saavuttavaa asuinrakennusta kohden.

Taulukko 5. Tärinäntorjunnan vaimennusratkaisujen kokonaiskustannukset.

KOHDEALUE	Pohjainpölkky ¹	Radan viereisen maan vahvistaminen syvästabiloinnilla	Radan perustaminen maanvaraiselle teräsbetonilaatalle
KOHDEALUE 1	29 000 €	700 000 €	1 026 000 €
KOHDEALUE 2	163 000 €	2 800 000 €	3 168 000 €
KOHDEALUE 3	82 000 €	920 000 €	1 134 000 €
KOHDEALUE 4	98 000 €	1 550 000 €	3 510 000 €
KOHDEALUE 5	28 000 €	280 000 €	1 008 000 €
KOHDEALUE 6	150 000 €	2 250 000 €	-
KOHDEALUE 7	13 000 €	250 000 €	-
KOHDEALUE 8	-	-	-
KOHDEALUE 9	-	-	-
KOHDEALUEET 1-9 YHTEENSÄ	563 000 €	8 750 000 €	9 846 000 €

¹Kustannus päällysrakenteen uusimisen yhteydessä

Taulukko 6. Tärinäntorjunnan vaimennusratkaisujen kustannukset tärinäluokan D saavuttavaa asuinrakennusta kohden. Esimerkiksi kohdealueella 2 taulukon 4 mukaan 25 % vaimennuksella eli pohjainpölkkyllä D-luokan saavuttaa 40 asuinrakennusta ja taulukon 5 mukaan kohdealueen kokonaiskustannukset tärinäntorjunnalle pohjainpölkkyä käyttäen ovat 163 000 €, joten kustannus D-luokan saavuttavaa asuinrakennusta kohden on 163 000 € / 40 kpl ≈ 4 000 €/kpl.

KOHDEALUE	Pohjainpölkky ¹	Radan viereisen maan vahvistaminen syvästabiloinnilla	Radan perustaminen maanvaraiselle teräsbetonilaatalle
KOHDEALUE 1	6 000 €	117 000 €	171 000 €
KOHDEALUE 2	4 000 €	43 000 €	122 000 €
KOHDEALUE 3	10 000 €	102 000 €	227 000 €
KOHDEALUE 4	10 000 €	103 000 €	176 000 €
KOHDEALUE 5	4 000 €	35 000 €	78 000 €
KOHDEALUE 6	14 000 €	94 000 €	-
KOHDEALUE 7	7 000 €	83 000 €	-
KOHDEALUE 8	-	-	-
KOHDEALUE 9	-	-	-
KESKIMÄÄRIN	7 900 €	82 000 €	155 000 €

¹Kustannus päällysrakenteen uusimisen yhteydessä

Keskimääräistä pienemät kustannukset tärinäluokan D saavuttavaa asuinrakennusta kohden tavoitevaimennusta 25 % vastaavalla pohjainpölkyn toteutettavalla tärinäntorjunnalla on kohdealueilla 1, 2, ja 5. Kyseisillä alueilla asuinrakennukset, joissa on riski tärinäluokan D ylittymisestä, sijoittuvat verrattain tiiviisti radan varrelle. Kohdealueilla 3, 4 ja 6 asuinrakennukset, joissa on riski tärinäluokan D ylittymisestä, ovat sijoittuneet hajanaisesti radan varrelle, minkä vuoksi vaimennusta vaativa osa radasta on suurempi yksittäistä rakennusta kohden.

Tavoitevaimennusta 50 % vastaava syvästabiloinnilla toteutettu tärinäntorjunta on kustannuksiltaan keskimääräistä pienempi kohdealueilla 2 ja 5, kuten myös tavoitevaimennusta 75 % vastaava maanvarainen teräsbetonilaatta.

Kustannustehokkaimpia vaimennusratkaisut tärinäluokan D saavuttavaa asuinrakennusta kohden ovat kohdealueilla 2 ja 5. Suurimmat kustannukset asuinrakennusta kohden ovat kohdealueilla, joissa asuinrakennukset ovat sijoittuneet hajanaisesti radan varrelle, jolloin vaadittava vaimennusratkaisun määrä ja kustannus on suhteessa mahdollisiin vaimennuksesta hyötyviin rakennuksiin. Tällaisia kohdealueita ovat kohdealueet 3, 4 ja 6.

Tässä selvityksessä eri vaimennustoimenpiteiden vaikutusta tärinään tarkasteltiin erillisinä tapauksina, mutta käytännössä voi olla kustannustehokkainta yhdistää eri vaimennusratkaisuja kohdealueilla. Tarkemmassa jatkosuunnittelussa voidaan määrittää parhaiten eri alueille soveltuvat toimenpiteet muun muassa tarkempien geoteknisten tutkimusten perusteella.

Väylävirasto päättää erikseen mahdollisesta jatkosuunnittelusta ja toimenpiteistä. Jatkosuunnittelu tai toimenpiteet eivät kuulu käynnissä olevaan KoKoHa-hankkeeseen.

LIITTEET

1. Kohdealue 1 Mielakka, Kouvola (6 s.)
2. Kohdealue 2 Myllykoski, Kouvola (6 s.)
3. Kohdealue 3 Juholanmäki, Kouvola (6 s.)
4. Kohdealue 4 Keltakangas, Kouvola (6 s.)
5. Kohdealue 5 Inkeroinen, Kouvola (6 s.)
6. Kohdealue 6 Ylänummi, Kotka (6 s.)
7. Kohdealue 7 Salmenkylä, Hamina (6 s.)
8. Kohdealue 8 Hovila, Kotka (3 s.)
9. Kohdealue 9 Hovinsaari, Kotka (3 s.)
10. Junaliikennetiedot (3 s.)
11. Mitatut tavarajunien ohitukset (1 s.)
12. Siirtomobilitaattimittaukset (8 s.)
13. Maaperän karakterisointimittaukset (8 s.)

LÄHTEET

1. Kouvola-Kotka-Hamina -radan yleissuunnitelma. Tärinäselvitys. Projektinumero: 1618379.3. A-Insinöörit Suunnittelu Oy. 11.6.2021
2. Talja, A. 2004. Suositus liikennetärinän mittaamisesta ja luokituksesta. Espoo, VTT Tiedotteita 2278.

3. Talja, A., Vepsä, A., Kurkela, J. ja Halonen, M. 2008. Rakennukseen siirtyvän liikennetärinän arviointi. Espoo, VTT tiedotteita 2425.
4. Kouvola-Kotka Mussalo ja Juurikorpi – Hamina rataosien akselipainon nosto 250 kN, 16.5.2019, VÄYLÄ/2654/04.01.01/2019
5. Takala, M. 2020. Radanvarrella tärisee. Rautatietekniikka, 2-2020. Raideliikenteen Teknisten ja Toimihenkilöiden Liitto RTTL ry.
6. Quagliata, A., Ahearn, M., Boeker, E., Roof, C., Meister, L., Singleton, H., 2018. Transit Noise and Vibration Impact Assessment Manual (No. 0123). Federal Transit Administration.
7. Nazarian, S., Desai, M.R., 1993. Automated Surface Wave Method: Field Testing. Journal of Geotechnical Engineering 119(7).
8. Hakulinen, M. 1999. Rautatietärinän mittauskäytäntö pohjoismaissa. Ratahallintokeskuksen julkaisuja 5/1999. Ratahallintokeskus, Kiinteistöyksikkö.
9. Kaewunruen, S., Qin, Z., 2020. Sustainability of Vibration Mitigation Methods Using Meta-Materials/Structures along Railway Corridors Exposed to Adverse Weather Conditions. Sustainability 12, 10236.
10. Talja, A. 2015. Pilaristabilointi- ja ponttiseinät: Tärinäestekokeilujen alustavat tulokset ja jatkotutkimustarpeet. Asiakasraportti VTT-CR-00691-15. VTT.
11. Dijckmans, A., Ekblad, A., Smekal, A., Degrande, G., Lombaert, G., 2016. Efficacy of a sheet pile wall as a wave barrier for railway induced ground vibration. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 84, 55–69.
12. Liisanantti, P., 2021. Ponttiseinän toiminnan mallintaminen ratatärinän vaimentamiseksi. Diplomityö. Oulun yliopisto, rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkinto-ohjelma. 80 s.
13. Huhtala, T., Ruohonen, M. & Kylläinen, M. 2017. Stabilointirakenteen teknistaloudellinen toimivuus liikennetärinän torjunnassa – Loppuraportti. A-Insinöörit Suunnittelu Oy.
14. Jiang, J., Toward, M.G.R., Dijckmans, A., Thompson, D.J., Degrande, G., Lombaert, G., Ryue, J., 2015. Reducing Railway Induced Ground-Borne Vibration by Using Trenches and Buried Soft Barriers, in: Nielsen et al. (Eds.), Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 555–562.
15. Dijckmans, A., Coulier, P., Jiang, J., Toward, M.G.R., Thompson, D.J., Degrande, G., Lombaert, G., 2015. Mitigation of railway induced ground vibration by heavy masses next to the track. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 75, 158–170.
16. Huhtala, T., Oksanen, B., Kylliäinen, M. 2021. Pori-Mäntyluoto-koerataosuuden tärinä- ja runkomelumittaukset. Akustiikkapäivät 2021. Turku, 24.-25.11., Akustinen Seura ry, s. 20-25.
17. Luomala, H. 2020. Radan vaakasuuntaiset voimat, Mittaukset Porin koeajojen yhteydessä. Raportti. Tampereen yliopisto.
18. Mueller, R., 2011. Measurements of rolling stock influence on railway vibrations and an overview of rolling stock mitigation measures, EURO DYN 2011. Leuven, p. 7.
19. Junaliikenteen ja vaihtotyön turvallisuussäännöt (Jt). Väyläviraston ohjeita 3/2021. Väylävirasto.