



Vöylävirasto  
Trafikledsverket

Opinnäytetyö  
2/2023

Vesa Vähäkuopus

## Liikennetärinää aiheuttavan voiman karakterisointi





Vesa Vähäkuopus

# **Liikennetäriinää aiheuttavan voiman karakterisointi**

Opinnäytetyö 2/2023

*Kannen kuva: Vesa Vähäkuopus*

Verkkójulkaisu pdf ([www.vayla.fi](http://www.vayla.fi))

ISSN 2490-1202

ISBN 978-952-405-043-2

Väylävirasto  
PL 33  
00521 HELSINKI  
puh. 0295 343 000

**Vesa Vähäkuopus: Liikennetärinä aiheuttavan voiman karakterisointi.** Väylävirasto Helsinki 2023. Opinnäytetyö 2/2023. 81 sivua ja 1 liite. ISSN 2490-1202, ISBN 978-952-405-043-2.

**Avainsanat:** rautatie, liikennetärinä, runkomelu, värähtely, voiman tiheys, force density

## Tiivistelmä

Tämän diplomityön aiheena oli erilaisten junatyypin maaperään värähtelyä aiheuttavien voimien suuruuksien arviointi. Tutkimus eteni selvittämällä värähtelyä aiheuttavan voiman syntymekanismit ja siihen liittyvät olennaisimmat osatekijät. Työn kokeellisessa osuudessa määritettiin erilaisten junatyypin ns. voiman tiheyksiä eli voimaa, millä juna vaikuttaa maahan per yksikköpituus aiheuttaen maaperän värähtelyä.

Värähtelyä aiheuttava voiman tiheys on junatyypille karakteristinen ominaisuus, mistä johtuen kertaalleen määritettyä arvoa voidaan hyödyntää uusilla suunnittelualueilla pelkästään määrittämällä kyseisen alueen maaperän värähtelyjohtavuus. Yhdistämällä alueen värähtelyjohtavuus aiemmin selvitettyyn junatyypin voiman tiheyteen, voidaan alueen värähtelyolosuhteita arvioida. Voiman tiheyksiä tarkastelemalla on lisäksi mahdollista selvittää, onko aiheutuva värähtelyvaste seurausta suuresta herätevoimasta tietyllä taajuusalueella vai maaperän hyvästä värähtelynsiirtokyvystä vastaavalla taajuusalueella.

Voiman tiheyttä on haastavaa mitata suoraan. Tämän takia tutkimusalueella määritettiin maaperän värähtelyjohtavuus keinoherätteillä, minkä jälkeen junien aiheuttamia värähtelyvasteita hyödyntämällä pystyttiin voiman tiheydet määrittämään junatyypikohtaisesti. Muodostetussa värähtelysystemissä vaikuttava voima on helposti selvitettävä, kun maaperän värähtelyjohtavuus ja junan aiheuttama värähtelyvaste tunnetaan.

Maaperän värähtelyjohtavuuden mittaukset ja voiman tiheyden määritykset suoritettiin Yhdysvaltojen Federal Transit Administrationin ohjeeseen perustuen. Ohjeessa kehoitetaan muodostamaan herätepisteistä epäkoherentti viivalähde, mikä pyrkii imitoimaan junan maaperään aiheuttamaa värähtelyä. Keinoherätelaite valmistettiin tutkimusta varten itse. Yhtenä tutkimuksen tavoitteena oli pyrkiä selvittämään jokseenkin tuntemattoman arviointimenetelmän käyttömahdollisuuksia Suomen ympäristössä.

Menetelmä todettiin lupaavaksi Suomen olosuhteisiin sovellettuna. Käsikäyttöisellä keinoherätteellä oli testialueella mahdollista muodostaa hyödynnettävää maaperän värähtelyjohtavuudesta kertovaa tietoa noin 50–70 metrin etäisyydelle keinoherätteestä. Tämän jälkeen värähtelyn taustakohina kasvaa kohtuuttoman suureksi.

Tämän tutkimuksen perusteella huomattiin IC- ja SM4-kaluston värähtelyä herättävän voiman olevan samaa suuruusluokkaa. SM4-kaluston osalta on havaittavissa yksikkömäärien vaikutus tuloksiin. Erityisesti muiden kuin yllä mainittujen junatyypin osalta tarvitaan lisätutkimuksia aiheeseen liittyen.

**Vesa Vähäkuopus: Karakterisering av kraft som orsakar trafikvibrationer.** Trafikledsverket. Helsingfors 2023. Lärdomsprov 2/2023. 81 sidor och 1 bilaga. ISSN 2490-1202, ISBN 978-952-405-043-2.

## Sammanfattning

Ämnet för detta diplomarbete var uppskattning av storleken på de krafter hos olika tågtyper som orsakar markvibrationer. Studien fortskred med klargörande av uppkomstmekanismerna till den kraft som orsakar vibrationen och de väsentligaste komponenterna som är förknippade med den. I den experimentella delen av arbetet bestämdes de olika tågtypernas s.k. kraftdensitet, dvs. den kraft med vilken tåget påverkar marken per enhetslängd och därigenom orsakar vibrationer i marken.

Densiteten hos den kraft som orsakar vibrationen är en karakteristisk egenskap hos tågtypen, och därför kan det en gång bestämda värdet utnyttjas inom nya konstruktionsområden helt enkelt genom att bestämma markens vibrationsledningsförmåga i det ifrågavarande området. Genom att kombinera området vibrationsledningsförmåga med den tidigare bestämda kraftdensiteten hos tågtypen kan vibrationsförhållandena i området uppskattas. Genom granskning av kraftens densiteter är det dessutom möjligt att klarlägga om det orsakade vibrationssvaret är resultatet av en hög excitationkraft inom ett givet frekvensområde eller en god vibrationsöverföringsförmåga hos marken inom motsvarande frekvensområde.

Direkt mätning av kraftens densitet utgör en utmaning. Av denna anledning bestämdes markens vibrationsledningsförmåga genom artificiella excitationer i undersökningsområdet, och därefter var det möjligt att utnyttja de av tågen orsakade vibrationssvaren för att bestämma kraftens densiteter specifikt för tågtypen. I ett skapat vibrationssystem är det lätt att klarlägga den verkande kraften eftersom markens vibrationsledningsförmåga och det av tåget orsakade vibrationssvaret är kända.

Mätningar av markens vibrationsledningsförmåga och bestämningar av kraftens täthet utfördes baserat på en instruktion från Federal Transit Administration i USA. I instruktionen uppmanas man att av excitationpunkterna skapa en osammanhängande linjekälla som tenderar att imitera den vibration i marken som orsakas av tåget. Anordningen för artificiella excitationer tillverkades för själva studien. Ett av målen med studien var att undersöka möjligheterna att använda en ganska okänd utvärderingsmetod i den finländska miljön.

Metoden konstaterades vara lovande när den tillämpades på finländska förhållanden. Med en manuell artificiell excitation var det möjligt att skapa användbar information om markens vibrationsledningsförmåga i testområdet på ett avstånd av cirka 50–70 meter från den artificiella excitationen. Därefter ökar vibrationens bakgrundsbrus till orimligt höga värden.

Baserat på denna studie noterades att den vibrationsframkallande kraften hos IC- och SM4-utrustningarna var av samma storleksklass. För SM4-utrustningens del kan det observeras en effekt av enhetsantalen på resultaten. I synnerhet för andra tågtyper än de ovannämnda behövs det ytterligare forskning med anknytning till ämnet.

**Vesa Vähäkuopus: Characterization of forces that induce traffic vibrations.** Finnish Transport Infrastructure Agency. Helsinki 2023. Thesis 2/2023. 81 pages and 1 appendix. ISSN 2490-1202, ISBN 978-952-405-043-2.

## Abstract

The subject of this master's thesis was to evaluate vibration inducing forces generated by different train types. The Research proceeded by elucidating the mechanisms of generation of the forces causing the vibration and the most important components related to it. In the experimental part of the research, the so-called force densities, i.e. the force with which a train affects the ground per unit length causing vibration in the soil.

The vibration force density is a characteristic feature of the train type, as a result of which the value once determined can be utilized in the new study areas only by determining the vibration transmissibility of the soil in the new design area. By examining the force densities, it is also possible to determine whether the resulting vibrational response is due to a high excitation force in a certain frequency range or due to a good vibration transmissibility of the soil in the corresponding frequency range.

Force densities are challenging to measure directly. For this reason, the vibration transmissibility of the soil in the study area was determined by artificial stimuli, after which the force densities could be determined for each train type by utilizing the vibration responses caused by the trains. The force stimuli acting in the formed vibration system is easily determined when the vibration transmissibility of the soil and the vibration response caused by the train are known.

Soil vibration transmissibility measurements and force density evaluations were performed based on the instructions of the US Federal Transit Administration. The guide calls for an incoherent line source to be formed from the excitation points, which tends to mimic the vibration caused by the train to the ground. The artificial excitation device was manufactured for the study by the researcher. One of the aims of the study was to try to find out the possibilities of using a somewhat unknown assessment method in the Finnish environment.

The method was found to be promising when applied to Finnish conditions. With a manual artificial excitation, it was possible to generate usable information on the vibration transmissibility of the soil in the test area at a distance of about 50–70 meters from the artificial excitation. After this, the background noise becomes unreasonably large.

Based on this study, it was found that the vibration-inducing forces of the IC and SM4 trains are of the same order of magnitude. For the SM4 train, the effect of unit amount on the results is noticeable. In particular, for train types other than those mentioned above, further research is needed on this topic.

## Esipuhe

Diplomityön tarkoituksena oli selvittää erilaisten junatyyppeiden maaperään värähtelyä aiheuttavien voimien suuruuksia ja perehtyä näiden sekä maaperän värähtelynjohtavuuden määrittämiseen.

Tämän diplomityön on tehnyt Vesa Vähäkuopus Tampereen yliopiston rakennetun ympäristön tiedekuntaan. Työn tilaajana toimi Väylävirasto ja se laadittiin Sitowise Oy:ssä syksyn 2021 ja kevään 2022 aikana.

Diplomityön ohjausryhmään ja tarkastajiin kuuluivat Tampereen yliopistosta Heikki Luomala ja Antti Pelho, Sitowise Oy:stä Pekka Taina ja Jarkko Punnonen sekä Väylävirastosta Mikael Takala.

Helsingissä helmikuussa 2023

Väylävirasto  
Väylänpito, Tekniikka- ja ympäristöosasto



# Sisältö

1	JOHDANTO.....	10
2	RATA JA RAUTATIEKALUSTO SUOMESSA .....	12
2.1	Rautatiet Suomessa.....	12
2.2	Rata.....	13
2.3	Suomessa liikennöivä kalusto .....	20
2.4	Telit ja pyöräkerrat.....	21
3	AALTOLIIKE JA VÄRÄHTELY MAAPERÄSSÄ .....	27
3.1	Värähtelyn ja aaltoliikkeen perusteet.....	27
3.2	Värähtelyaallon eteneminen maaperässä .....	28
3.3	Rautatieliikenne värähtelyn herättäjänä.....	33
4	VÄRÄHTELYN JA TÄRINÄN ARVIOINTI.....	38
4.1	Tärinän arviointimenetelmien jaottelu .....	38
4.2	Arviointimalli VTT:n mukaan.....	39
5	FTA TARKENNETTU ARVIOINTIMENETELMÄ.....	41
5.1	Menetelmän esittely .....	41
5.2	Taajuusvaste .....	46
5.3	Koherenssi.....	50
6	KOEJÄRJESTELYT.....	52
6.1	Tutkimusalueen kuvaus .....	52
6.2	Tutkimusalueen pohjasuhteet.....	54
6.3	Keinoheräte .....	55
6.4	Mittausten toteutus .....	57
6.5	Signaalinkäsittely ja värähtelyjohtavuuden määrittäminen .....	60
6.6	Junien vasteiden määrittäminen.....	64
7	MÄÄRITETYT VOIMAN TIHEYSTASOT .....	69
7.1	Tulokset.....	69
7.2	Epävarmuudet .....	71
7.3	Vertailut maailmalla tehtyihin mittauksiin.....	73
8	YHTEENVETO .....	75
8.1	Päätelmät.....	75
8.2	Jatkokehitystarpeet .....	76

## LIITTEET

Liite 1 Määritettyjä junien värähtelyä tuottavien voimien tiheyksiä

## Merkinnät ja lyhenteet

a	kiihtyvyys
A	värähtelyn tai runkomelun taso, ISO-14837
C	joustomatriisi
COH	koherenssi
$c_s$	leikkausaallon nopeus
D	siirtymä
dB	desibeli
f	taajuus
F	voima
$f_0$	ominaistaajuus
GTK	Geologian tutkimuskeskus
k	kontaktijäykkyys
P	siirtoreitti, ISO-14837
R	vastaanottopiste, ISO-14837
RMS	root mean square, tehollisarvo
S	heräte, ISO-14837
T	jaksonaika
u	värähtelyn kokonaistaso
$u_d$	värähtelyn dynaaminen osuus
$u_s$	värähtelyn kvasistaattinen osuus
v	nopeus
$V_p$	puristusaallon etenemisnopeus
$V_r$	Rayleigh-aallon etenemisnopeus
$V_s$	leikkausaallon etenemisnopeus
$V_{w,95}$	liikennetärinän tilastollinen arvo
FDL	voiman tiheystaso [dB]
FTA	Federal Transit Administration (Yhdysvaltojen liikennevirasto)
LSTM	line source transfer mobility (viivalähteen värähtelynjohtavuus)
$L_v$	värähtelyn suuruus
AAF	anti-aliasing filter
$F(\omega)$	värähtelysystemin syöte taajuudella $\omega$
$f\Delta$	taajuusresoluutio
frf	frequency response function (taajuusvastefunktio)
$f_s$	näytteenottotaajuus
$G_{ff}(\omega)$	kanavan f taajuuskohtainen autospektri
$G_{fx}(\omega)$	kanavien f ja x välinen taajuuskohtainen ristispektri
$G_{xx}(\omega)$	kanavan x taajuuskohtainen autospektri
$H(\omega)$	värähtelysystemin taajuusvastefunktio taajuudella $\omega$
N	näytemäärä
SNR	signal to noise ratio. Signaalin suhde meluun.
$X(\omega)$	värähtelysystemin vaste taajuudella $\omega$
$X_n$	taajuusspektrin amplitudi
*	kompleksikonjugaatti, notaatio

---

$\rho_{fx}$	normalisoitu korrelaatiokerroin signaalien f ja x välillä
$\sigma_{fx}$	kovarianssi signaalien f ja x välillä
$\Delta\phi$	syötteen ja vasteen välinen vaihe-ero
a	materiaalivaimennuksen vaikutusekspONENTTI
b	geometrisen vaimenemisen vaikutusekspONENTTI
g	maaperän värähtelyjohtavuus
u	poissonin vakio
$\mu$	leikkausmoduuli
$\rho$	tiheys
$\sigma$	keskihajonta
l	aallonpituus

# 1 Johdanto

Suomessa rautatieliikenteellä on merkittävä osuus elinkeinoelämässä erityisesti tavaroiden liikuttamisen välineenä. Tavaraliikenteen osuus rautateilla on Suomessa perinteisesti vankka johtuen pitkistä välimatkoista ja teollisuuden rakenteesta. Rautatiekuljetusten kokonaistonnimäärän sisältäen ns. transitoliikenteen, arvioidaan kasvavan vuoteen 2030 mennessä noin 40,3 miljoonaan tonniin. Myös henkilöliikenteen matkamäärät ovat kasvaneet viimeisen 20 vuoden aikana, mutta edelleen Suomessa vuonna 2017 ylivoimaisesti suosituin kulkumuoto pitkillä matkoilla oli edelleen henkilöauto. Tästä johtuen pienikin siirtymä tieliikenteestä raitteille nostaisi suuresti rautatieliikenteen volyymia. [1] [2]

Yllä olevan perusteella voidaan todeta, että rautatieliikenteen määrä ei osoita ainakaan vähenemisen merkkejä ennustettavan tulevaisuuden osalta. Tästä syystä rautatieliikenteeseen läheisesti liittyvät valitettavat värähtely- ja runkomeluongelmat sekä niiden arviointimenetelmien kehitystarpeet tarkkuuden ja käytettävyyden osalta ovat oikeutetusti osa myös tulevaisuuden rautatieinfran suunnittelun kehittämistä.

Rautatieliikenteestä aiheutuvan ja maaperässä liikkuvan värähtelyn arviointi ilman mittauksen mahdollisuutta on perustunut perinteisesti joko empiirisiin laskentakavoihin tai nykyään myös erilaisiin mallinnuksiin, joko analyyttisesti tai numeerisesti. Mallinnukseen perustuvien arviointimenetelmien tarkkuus ja soveltuvuus on suuresti riippuvainen käytettävien laskentaparametrien tarkkuudesta. Tarkasteltavan alueen olosuhteiden osalta tilanne on usein se, että alueen pääasiallinen maalaji ja mahdollisesti maakerroksen paksuus voidaan suurin piirtein pystyä arvioimaan, mutta juuri mitään muuta alueen maaperäolosuhteista tai maalajien dynaamiseen käyttäytymiseen vaikuttavista ominaisuuksista ei tiedetä. Tästä johtuen mallinnuksen tarkkuus voi jäädä huomattavan heikoksi, vaikka itse menetelmä mahdollistaisi tarkan arvion muodostamisen.

Tässä työssä tutkitaan Suomessa jokseenkin tuntemattoman menetelmän käyttöönoton mahdollisuuksia rautatieliikenteen aiheuttamien värähtely- ja runkomeluongelmien arvioinnissa. Jos rautatiekaluston pyörien ja radan kontaktipinnasta syntyvä voima pystytään määrittämään junatyypikohtaisesti, on mahdollista hyödyntää tätä tietoa alueella missä raideliikennettä ei vielä ole, mutta tulevan radan vaikutuksia ympäristöön pitää pystyä arvioimaan.

Tässä työssä tutkittavassa arviointimenetelmässä maaperän värähtelyjohtavuus määritetään keinoherätteillä. Hyödyntämällä maaperän värähtelyjohtavuudesta saatua tietoa sekä rautatiekaluston liikennöinnin aiheuttamaa mitattua värähtelyvastetta maaperässä on mahdollista selvittää junan värähtelyä aiheuttava voima. Tätä voimaa kuvataan tässä työssä termillä voiman tiheys, mikä kuvaa junasta rataan vaikuttavaa voimaa per yksikköpituus.

Työ käsittää kirjallisuustutkimuksen menetelmän taustalla oleviin teorioihin ja olemassa oleviin ohjeistuksiin sekä empiirisen osion missä erilaisten junakalustojen voiman tiheyksiä selvitetään kenttämittauksin. Lisäksi arvioidaan saatuja tuloksia ja niiden laatua, havainnoituja ilmiöitä sekä kartoitetaan mahdollisia jatkotutkimuskohteita ja uusia mahdollisia käyttötarkoituksia. Työn empiirinen osuus suoritetaan yksinkertaisella keinoherätteellä ja kiihtyvyyssantureilla sekä niihin liittyvällä tavanomaisella signaalinkäsittelylaitteistolla ja ohjelmistolla.

Mikäli menetelmä osoittautuu käyttökelpoiseksi myös Suomen olosuhteissa, mahdollistaa se uuden arviointimenetelmän käytettäväksi erityisesti tilanteisiin missä empiirisiin kaavoihin perustuvat menetelmät eivät sovellu käytettäväksi tai olosuhteet eivät ole tarpeeksi hyvin selvillä luotettavan mallinnuksen mahdollistamiseksi.

## 2 Rata- ja rautatiekalusto suomessa

Tässä luvussa esitellään Suomessa toimivaa rautatieliikennettä, rataan rakennustekniikkaa ja kalustoa niiltä osin kuin sen käsittely on tarpeellista ymmärryksen luomiseksi rautatieliikenteestä aiheutuviin värähtelyihin ja niihin liittyviin ilmiöihin. Radan rakenteen ja sen osarakenteiden materiaali- ja suunnitteluvaatimusten yhteyden ymmärtäminen rataosuuden sallittuun akselipainoon ja ajonopeuteen mahdollistaa ratarakenteen dynaamisen toiminnan ymmärtämisen. Niin ikään liikennöivän kaluston ominaisuuksien, erityisesti teli- ja jousitusten osalta, tunteminen helpottaa pyörän ja raiteen yhteisvaikutuksen ja sen suuruuden hahmottamisessa. Hieman tarkemmin käsitellään kiskon karheuden käsitettä, pyörien epätasaisuuksia ja niiden vaikutusta värähtelyn syntymekanismissa, esitystapaa sekä syntyvän voiman periaatteellista suuruutta.

### 2.1 Rautatiet Suomessa

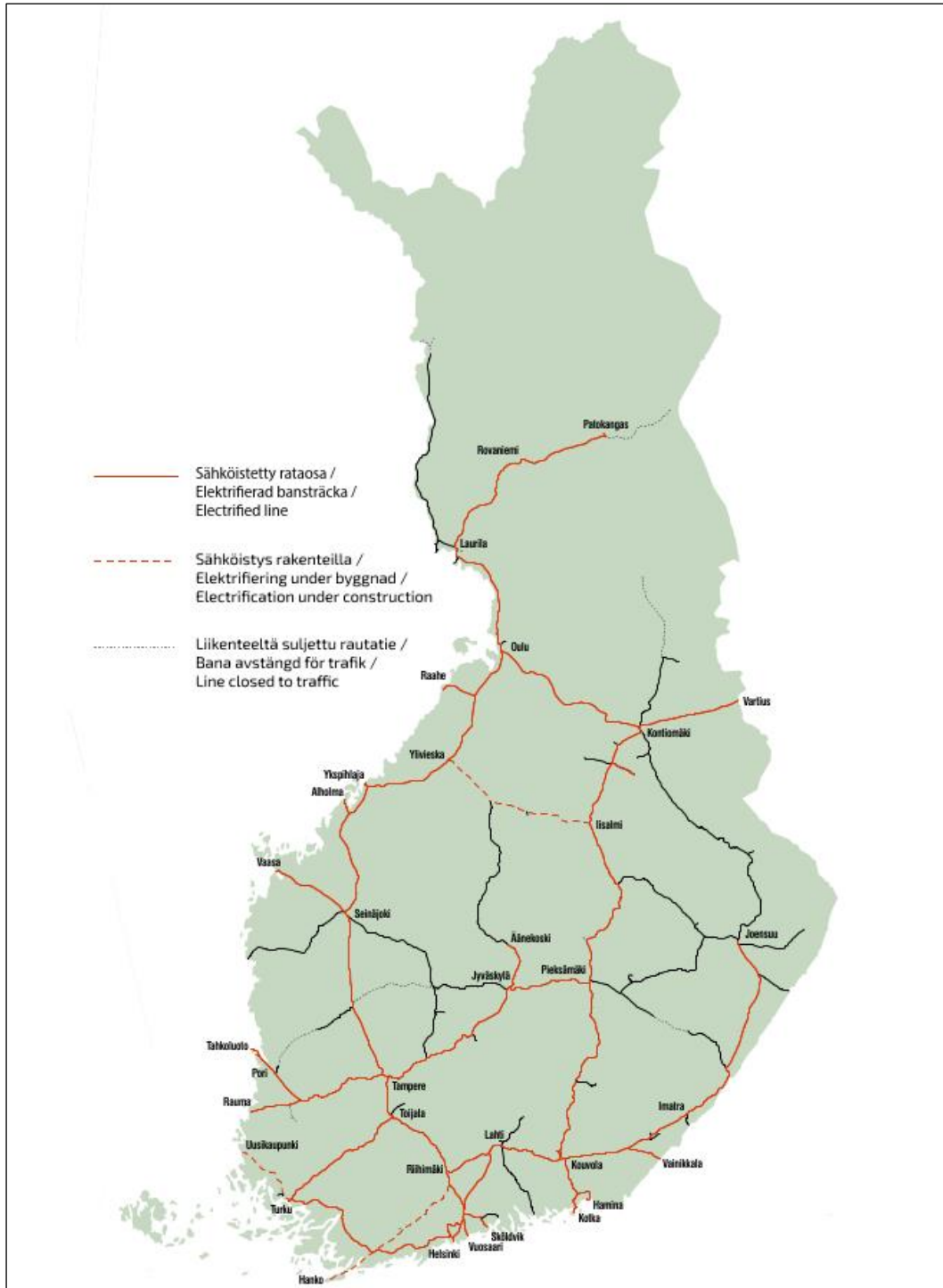
Suomen rautatieverkoston rakentaminen käynnistyi 1860-luvulla ensimmäisen yhteyden perustamisesta. Tämän jälkeen rakennetut raidekilometrit kasvoivat tasaisesti aina vuoteen 1940 saakka. Sodasta johtuneiden alueluovutusten mukana Suomi menetti myös noin 17 prosenttia siihen asti rakennetusta rautatieverkostostaan. Sotavuosien jälkeen rautatieverkoston rakentaminen jatkui, jokseenkin aiempaa hieman hiljaisemmalla tahdilla ja 1980-luvun alun jälkeen sen yhteenlaskettu pituus ei ole enää juurikaan muuttunut. [3]

Nykyään Suomen rataverkon vuosittaiseen kunnossapitoon käytetään lähes 200 miljoonaa euroa vuodessa ja tämän lisäksi uusia ratahankkeita kapasiteetin nostamiseksi tai laatutason parantamiseksi on käynnissä tai suunnittelun eri vaiheissa useita. Nykyisen rataverkon infranhaltijana toimii Väylävirasto, joka vastaan rataverkon ylläpitämisestä, kehittämisestä sekä hankkeiden toteutuksesta. Valtion rataverkkoon liittyy myös yksityisraiteita, esimerkiksi kuntien, kaupunkien, satamien ja teollisuuslaitosten raiteita. Yksityisraiteen haltijalla on samat vastuut ja velvollisuudet kuin rataverkon haltijallakin, mutta Väyläviraston ohjeet eivät ole niitä kohtaan velvoittavia. Liittymisestä valtion rataverkkoon tehdään sopimus, missä määritellään liityntäkohta, liikenteenohjauksen vastuut ja rataverkonhaltijoiden muu yhteistyö. [4] [5] [6]

Väyläviraston www-sivuilla Suomen liikennöidyn rautatieverkoston pituudeksi vuonna 2018 ilmoitettiin 5 926 kilometriä, josta 3 330 kilometriä on sähköistetty. Yksiraiteista osuutta on 5 234 kilometriä ja kaksi- tai useampiraiteista 692 kilometriä. Suomesta on raideyhteydet Tornion kautta Ruotsiin ja Vainikkalan, Imatrankosken sekä Vartiuksen kautta Venäjälle.

Suomessa rataverkon raideleveys on 1 524 mm, mikä poikkeaa suurimmassa osassa Eurooppaa käytössä olevasta 1 435 mm leveydestä. Sähköradan osuuksilla jännite on 25 000 volttia ja taajuus 50 Hz. Suurimmat sallitut akselipainot ovat vuonna 2022 225 kN ja osalla rataverkkoa 250 kN. Henkilöjunien suurin nopeusrajoitus on 220 kilometriä tunnissa ja tavarajunien 120 kilometriä tunnissa. [4]

Suomen rataverkko ja sen sähköistetyt osuudet on esitetty kuvassa 1.

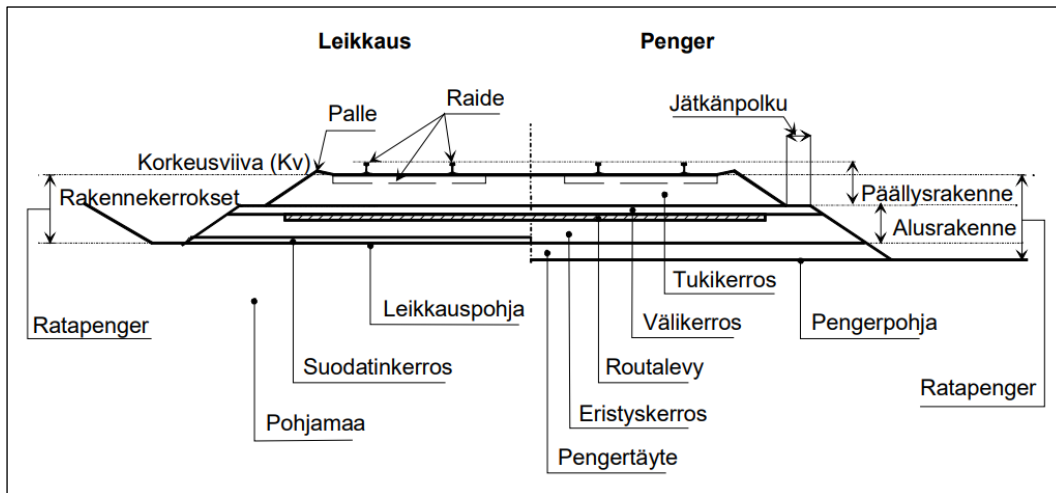


Kuva 1. Suomen rataverkon tilanne 2021 ja sen sähköistetyt osat [4].

## 2.2 Rata

Rata on kokonaisuus mikä voi sisältää monta raidetta ja käsittää myös niihin liittyvät ohjaus- sekä sähköjärjestelmät. Alapuolella selostetaan radan rakennetta niin kuin se on Väyläviraston tuottamissa radan rakennetta käsittelevässä ratateknisten ohjeiden (RATO) osissa 3 ja 11 esitetty.

Raide puolestaan koostuu kahdesta kiskosta, ratapölkkyistä, kiskojen kiinnitys- ja jatkososista sekä vaihteista ynnä muista raiteen erikoisrakenteista. Raide muodostaa yhdessä tukikerroksen kanssa radan päällysrakenteen. Tukikerroksen tarkoituksena on pitää raide oikeassa asemassa ja jakaa kuormat alusrakenteelle. Tukikerroksen materiaalina käytetään raidesepeliä tai raidesoraa. Päällysrakennetarkaisua, jossa tukikerros on korvattu betonirakenteella, kutsutaan kiintoraiteeksi. Kiintoraiteen suurimmiksi eduiksi mainitaan yleensä pidempi käyttöikä ja pienempi kunnossapidon tarve. Vastaavasti investointikustannukset ovat suuremmat. Kuvassa 2 on esitetty radan rakenne pengertämättömällä ja pengerrytyllä osuudella.



Kuva 2. Radan rakenne [7].

Alusrakenteen ylin kerros on välikerros, jonka tehtävänä on muodostaa tukikerrokselle tasainen ja kantava alusta sekä estää tukikerroksen sekoittuminen alapuolisiin rakenteisiin. Välikerroksen alapuolella on eristyskerros, jonka tehtävänä on estää tai vähentää sen alla olevien maakerrosten routimista, sekä siirtää ylempää tulevat kuormat pohjamaalle, jolla tarkoitetaan käsittelemätöntä luonnontilassa olevaa perusmaata. Tarvittaessa eristyskerroksen ja pohjamaan välissä voi olla lisäksi ohut suodatinkerros estämässä pohjamaan ja eristyskerroksen sekoittumista ja/tai routalevy parantamassa pohjamaan routimisen estoa. [7]

Yleensä radan rakenteesta muodostuu ympäristöstä helposti erottuvaa pengermäinen rakenne. Sen takia usein puhutaankin ratapenkereestä, joka koostuu yllä mainituista rakennekerroksista ja mahdollisesta pengertäytteestä sijoitettuna pengerpohjan ja eristyskerroksen väliin. Nopeus- ja akselipaino sekä liikenteen käyttötarkoitus määräävät radan alusrakenneluokituksen, minkä perusteella radan alusrakenne suunnitellaan. [7]

Ratateknisten ohjeiden mukaiset alusrakenneluokat ovat esitettyinä taulukossa 1.



Taulukko 1. Radan alusrakenneluokat [7].

Alusrakenneluokka	Henkilöliikenteen suurin sallittu nopeus, [km/h]	Tavaraliikenteen suurin sallittu nopeus 225 kN akselipainolla, [km/h]	Tavaraliikenteen suurin sallittu nopeus 250 kN akselipainolla, [km/h]
0	≤ 50	≤ 40	≤ 40
1	≤ 120	≤ 100	≤ 60
2	≤ 200	≤ 100	≤ 80
3	≤ 250	≤ 120	≤ 100
4	> 250	> 100	> 100

Radan tai raiteen päällysrakenneluokka puolestaan määrittää käytettävät kiskot ja ratapölkkyt. Päällysrakenneluokituksessa yhdistetään kaluston nopeudesta aiheutuvan dynaamisen pyöräkuorman ja akselipainon vaatimukset, joiden perusteella päällysrakenne mitoitetaan ja suunnitellaan. Ratatekniset ohjeet osa 11 on uudistunut vuonna 2021 ja sen mukaan päällysrakenneluokka ei suoraan määrää raiteelle suurinta sallittua nopeutta, vaan nopeuden tilalla on suurin sallittu dynaaminen pyöräkuorma  $Q_{max,sall}$ . Ratateknisten ohjeiden mukaiset päällysrakenneluokat on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Radan päällysrakenneluokat [8].

Päällysrakenneluokka	Kiskoprofiili	Ratapölkkytyyppi	Tukikerros	Sallittu dynaaminen pyöräkuorma
A	K30, K33	puu	raidesora tai vastaava	100
B1	K43, K60, 54E1, 60E1	puu	raidesora tai vastaava	140
B2	K43, K60	puu, betoni	raidesepeli	150
C1	54E1	puu, betoni 1987 ja myöhemmin valmistunut	raidesepeli	200
C2	54E1	puu, betoni 1987 ja myöhemmin valmistunut	raidesepeli	200
D	60E1	betoni	raidesepeli	*

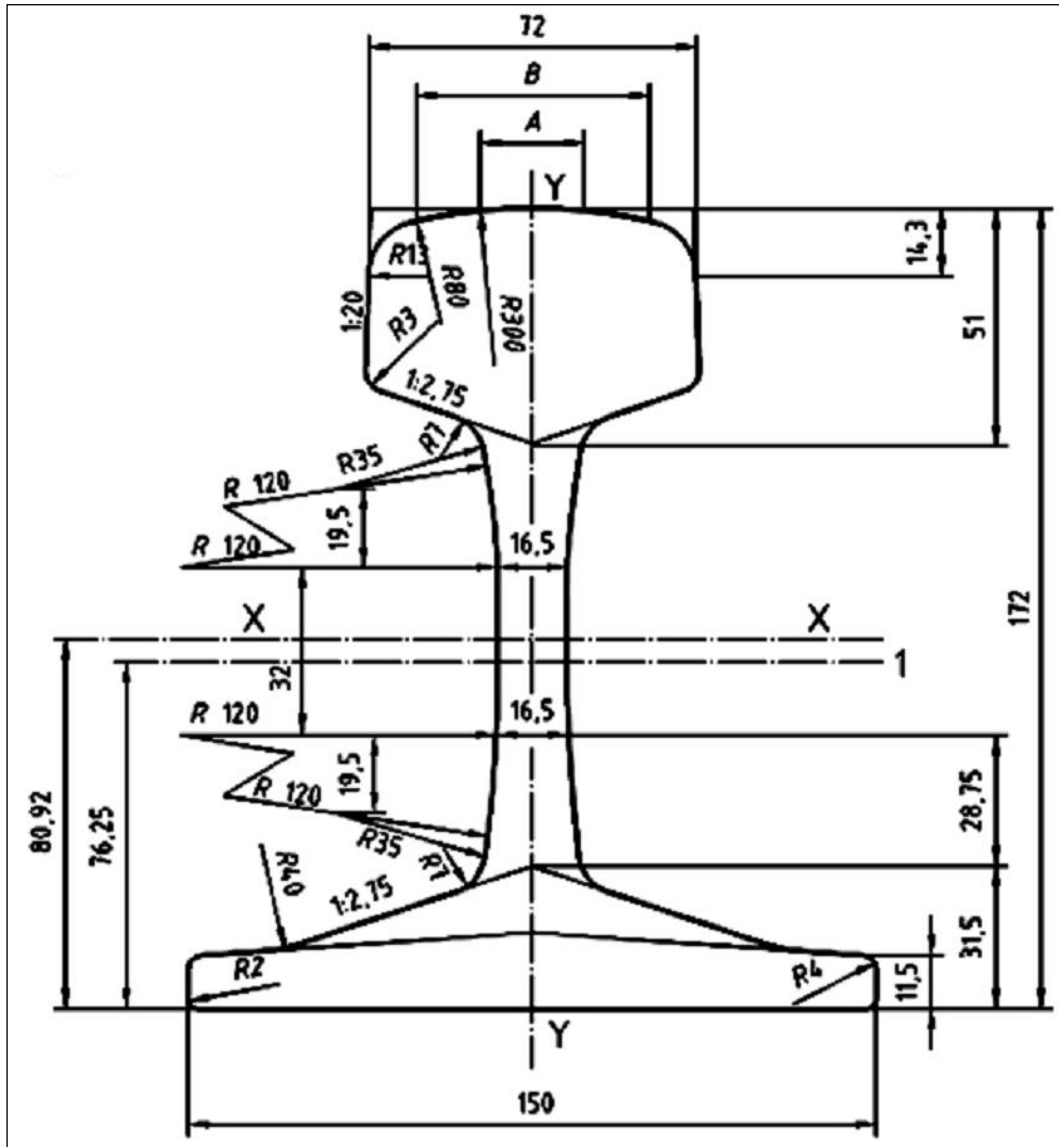
\*päällysrakenneluokan D osalle on esitetty yhteys  $Q_{max,sall}$  ja sallitun nopeuden  $V_{adm}$  välille seuraavasti

$160 \text{ km/h} < V_{adm} \leq 200 \text{ km/h}$ :	$Q_{max,sall} \leq 190 \text{ kN}$
$200 \text{ km/h} < V_{adm} \leq 250 \text{ km/h}$ :	$Q_{max,sall} \leq 180 \text{ kN}$
$250 \text{ km/h} < V_{adm} \leq 300 \text{ km/h}$ :	$Q_{max,sall} \leq 170 \text{ kN}$
$V_{adm} > 300 \text{ km/h}$ :	$Q_{max,sall} \leq 160 \text{ kN}$

Maaperään siirtyvän värähtelyn kannalta radassa on mielenkiintoisinta kiskot, kiskonkiinnikkeet ja ratapölkkyt. Seuraavaksi esitellään niitä ja niiden vaikutusta syntyvään värähtelyyn sekä sen ominaisuuksiin hieman yksityiskohtaisemmin.

## Ratakiskot, pyörät ja niiden pintojen epätasaisuudet

Ratakiskot toimivat kaluston kulkupintana, tukipalkkina ja liikkuvan kaluston ohjauselementtinä. Kiskon tehtävänä on kantaa siihen suuntautuva kuormitus ja siirtää se ratapölkkyille. Nykyään Suomen rataverkolle hankitaan pelkästään 54E1 tai 60E1 kiskoja, joista jälkimmäisen profiilin kaavakuva ja päämitat on esitetty kuvassa 3. [7]



Kuva 3. 60E1 kiskoprofiilin kaavakuva (EN-13674-1:2003).

Kiskotyypin 60E1 tunnuksessa ensimmäinen numero esittää profiilin massaa (kg) per juoksumetri (m), kirjain E kertoo kyseessä olevan EN-standardin mukainen kiskoprofiili ja numero 1 kyseessä olevan profiilityypin ensimmäinen versio.

Kiskon pinnan epätasaisuus tai karheus on yksi ratarakenteesta maaperään suuntautuvan värähtelyn syntymekanismien osatekijöistä. Värähtelyn herätevoima syntyy kontaktipinnan epätasaisuudesta, joka pyrkii liikuttamaan pyörää ja kiskoja suhteessa toisiinsa. Epätasaisuuden toinen aiheuttaja on kiskon pinnan epätasaisuus tai karheus ja vastaavasti kontaktipinnan toisella puolella pyörän epätasaisuus.

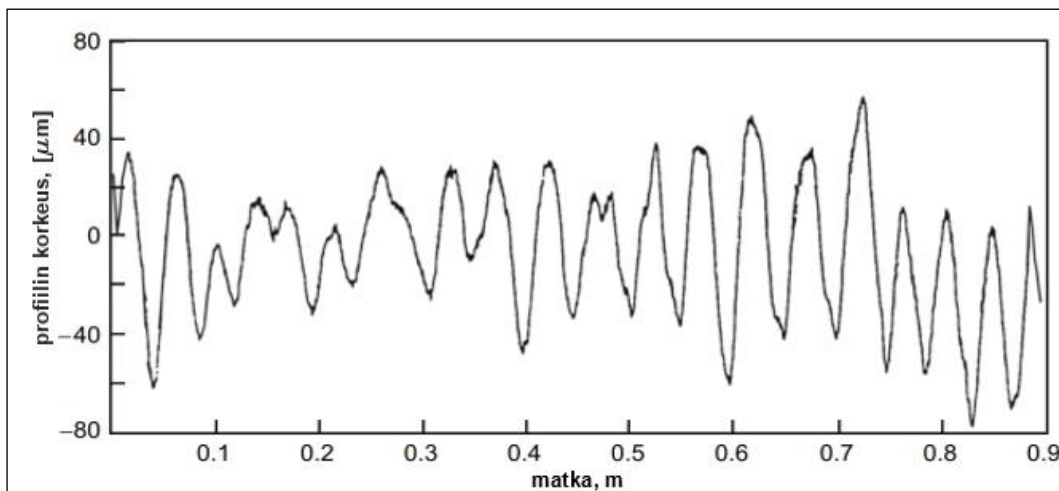
Epätasaisuuden vaikutus syntyyvään värähtelyyn ja sen suuruuteen on helposti ymmärrettävissä. Pyörän liikkussa kiskoja pitkin nopeudella  $v$  (m/s) toistuva epätasaisuus tietyllä välimatkalla eli aallonpituudella  $\lambda$  aiheuttaa värähtelyä taajuudella  $f$  kaavan

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad (1)$$

mukaisesti. Juna, jonka pyörien epätasaisuus oletetaan olemattomaksi, etenevässä nopeudella  $\sim 44$  m/s ( $\sim 160$  km/h) kiskoilla, joiden karheus dominoi aallonpituudella  $\sim 0,05$  m aiheuttaa värähtelyä pyöriin ja kiskon kautta ratarakenteeseen taajuudella  $\sim 890$  Hz. On huomattavissa, että kiskon karheuden vaikutus syntyyvään maaperän värähtelyyn tapahtuu usein taajuusalueella, mikä ei ole liikennetärinän tai runkomelun kannalta oleellista.

Karheuden aallonpituuden noustessa tai etenemisen nopeuden ollessa pienempi värähtely siirtyy myös pienemmille taajuusalueille. Jos nopeudeksi asetetaan  $\sim 22$  m/s ( $\sim 80$  km/h) kiskon karheudella  $\lambda \sim 0,3$  m, aiheuttaa kontaktista syntyvä vuorovaikutus värähtelyä kiinnostavalla  $\sim 70$  Hz taajuustasolla. Tyypilliset karheuden aallonpituudet sijoittuvat Thompsonin mukaan välillä  $0,005$  m –  $0,5$  m ja karheuden amplitudin suuruus on luokassa muutamia kymmeniä mikrometrejä ( $10$ – $6$  m). [8]

Kuvassa 4 on esitetty kuluneen kiskon profiili noin metrin matkalta.



Kuva 4. Kiskon karheusprofiili [9].

Kuvasta huomataan, että kahden epätasaisuuden huippukohdan välimatka on noin  $0,05$  m ja huipusta huippuun amplitudi keskimäärin vähintään noin  $50$ – $70$  mikrometriä. Koska näin pientä pinnan karheutta ei voi silmillä havaita, on värähtelyn syntymekanismin suuruusluokan ja sen merkityksen hahmottaminen ilman laskennallista arviointia haastavaa.

Kiskoprofiilin epätasaisuudesta aiheutuvan siirtymän huipusta huippuun (tai peak-to-peak) amplitudin  $D_{p-p}$  ja tehollisen siirtymän  $D_{rms}$  välillä on voimassa kaavan 2 mukainen tunnettu yhteys.

$$D_{rms} = \frac{D_{p-p}}{2\sqrt{2}} \quad (2)$$

Tämän lisäksi esimerkiksi Hakulisen ja Vuennon mukaan siirtymän  $D_{rms}$  yhteys kiihtyvyyteen  $a_{rms}$  noudattaa kaavaa

$$a_{rms} = D_{rms} * (2\pi * f)^2, \quad (3)$$

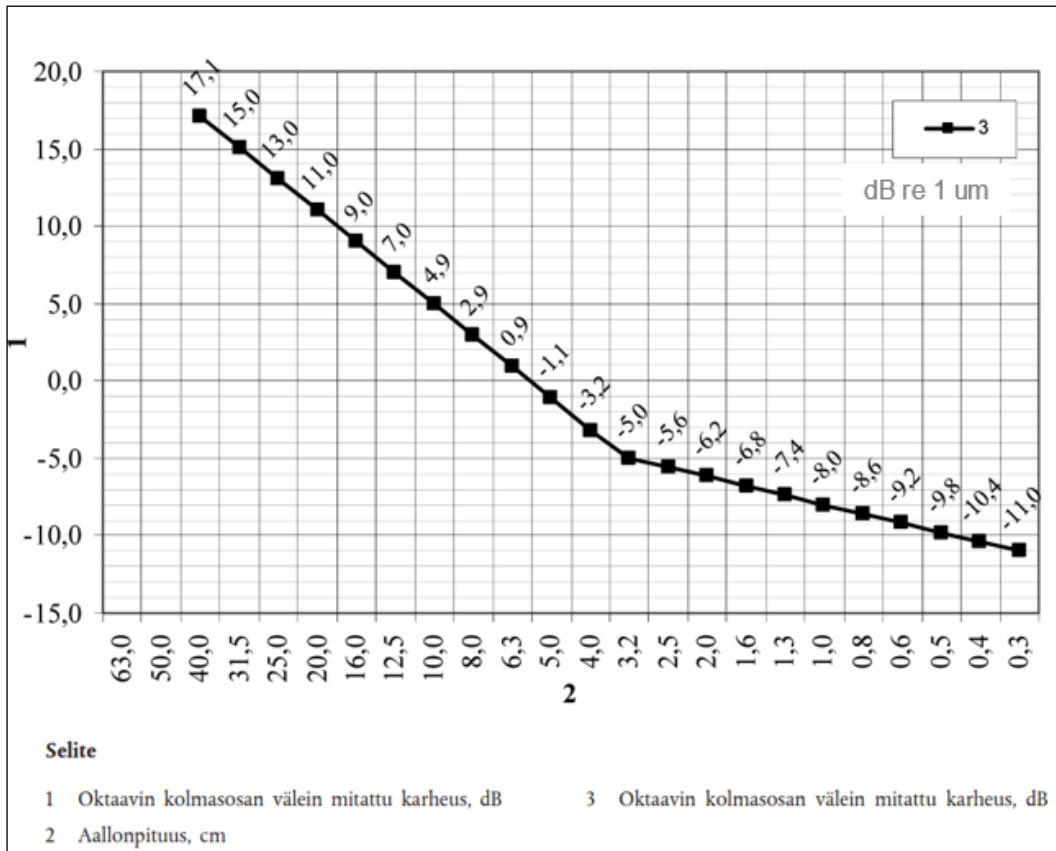
kun oletetaan kyseessä olevan idealisoitu harmoninen värähtely [10]. Tarkastelu suorittamalla huomataan, että nopeudella  $\sim 44$  m/s ( $\sim 160$  km/h) etenevä pyörän ja kiskon 50 mikrometrin jatkuvasta aallonpituudella 0,05 m toistuvasta epätasaisuudesta aiheutuva kiihtyvyyden tehollisarvo  $a_{rms}$  on noin 550 m/s<sup>2</sup>. Värähtelyn herätevoima  $F$  syntyy tunnetusta Newtonin 2. lain mukaisesta yhteydestä

$$F = ma, \quad (4)$$

missä  $a$  on yllä oleva laskettu tehollinen kiihtyvyys ja  $m$  junakaluston jousittamaton massa, minkä käsitteeseen palataan luvussa 2.4. Loposen ja muiden mukaan junakaluston jousittamaton massa voi helposti ylittää 500 kg per pyörä. Tästä johtuen ensi ajatuksella pieneltä näyttävä epätasaisuus kiskojen ja pyörän kontaktipinnassa aiheuttaa huomattavan suuret voimat suuntautuneena radan ja pyörien suuntaan. Sama ilmiö on voimassa myös pyörien monikulmaisuuuden tai lovien aiheuttaman värähtelyn osalta. [11]

Yllä oleva esitys on yksinkertaistus todellisesta pyörän ja kiskon rajapinnassa tapahtuvasta ilmiöstä. Thompsonin mukaan [9] edellä mainitussa kontaktipinnassa vaikuttaa myös ainakin kuormitusta tasaava Hertzin kontaktijousi. Lisäksi yksinkertaistus ei ota huomioon kontaktipinnan kummallakin puolella olevien muiden systeemin massojen, jousien ja jäykkyyksien osuutta. Yksinkertaistuksenkin jälkeen on huomattavissa miksi VTT:n liikennetärinää [12] ja runkomelua [13] sekä niiden laskennallista arviointia käsittelevissä julkaisuissa kiskojen sekä pyörien kulumiselle ja epätasaisuudelle on asetettu huomattavat sanktiot. Kiskon karheuden vaikutus huomioidaan myös Yhdysvaltojen Federal Transit Administrationin värähtelyä käsittelevässä ohjeistuksessa. [14]

Koska kiskon karheuden aiheuttaman värähtelyn taajuus on etenevän pyörän nopeudesta riippuvainen, esitetään karheus yleensä yllä hyödynnetyllä tavalla aallonpituuden  $\lambda$  funktiona tai sen käänteisarvona eli aaltolukuna. Kuvassa 5 on esitetty Euroopan unionin jäsenvaltioiden käyttämä oleva kiskon karheuden ylärajakäyrä. Käyrää voidaan hyödyntää herätevoimia arvioitaessa, mikäli parempaa tietoa tarkasteltavan alueen rautatien kiskojen kunnosta ei ole.



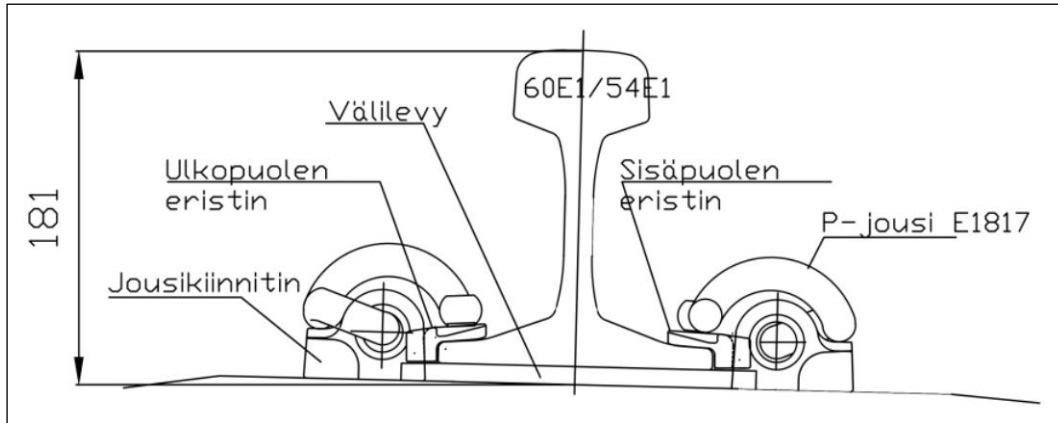
Kuva 5. Kiskon karheuden ylärajakäyrä. [15]

Käyrä esittää ylärajan karheudelle, kun rautatiekaluston aiheuttamaa melua halutaan mitata hallituissa ja valvotuissa olosuhteissa. Käyrä on osa Euroopan unionin TSI (Technical Specifications for Interoperability) hankkeen ohjeistusta, joka takaa vertailukelpoiset tulokset eri maissa suoritetuille mittauksille. [15]

## Kiskonkiinnitys

Kiskonkiinnityksen tärkeimpänä tehtävänä on pitää kisko kiinni ratapölkkyssä. Aluslevy antaa kiskolle oikean kallistuksen ja jakaa kiskosta ratapölkkyyn kohdistuvan voiman tarpeeksi suurelle pinta-alalle. Kiskon ja ratapölkyn väliin tulevan välilevyn materiaalin jäykkyys vaikuttaa teliin ja rataan syntyvän värähtelyn ominaisuuksiin. Pehmeämpi aluslevy tarkoittaa kiskojen parempaa eristystä olevista ratapölkkyistä, mutta värähtely pääsee etenemään kiskoa pitkin vapaammin. Jäykempi välilevy vähentää kiskon värähtelyä, mutta ratapölkyn värähtely kasvaa jäykemmän liitoksen ansiosta. Aluslevyt ovat yksi radan dynaamisen mallin osista ja ne mallinnetaan jousena sekä vaimentimena kiskon ja pölkyn välissä. [8]

Kuvassa 6 on esitetty tyypillinen betoniratapölkkyillä käytettävä ns. P-jousikiinnitys.



Kuva 6. Kiskon ja pölkyn P-jousikiinnitys [8].

Kuvassa nähdään P-jousikiinnityksen rakenne, missä jousikiinnitin on valettuna betoniseen ratapölkkyyn. Asennuksessa P-jousi väännetään kiinni kiinnittimeen ja kiskon jalkaan. Jousen ja ratakiskon välissä on eristimet sekä kiskon ja ratapölkyn välissä välilevy.

### Ratapölkkyt

Ratapölkyn tehtävänä on siirtää kiskonkiinnikkeen kautta kiskolta tuleva kuormitus alapuolella olevalle tukikerrokselle pitäen samalla raideleveys ja kiskon kallistus suunniteltuna. Rataverkolla käytetään pääasiassa betoni- tai puuratapölkkyjä pölkkyjaon ollessa jatkuvakiskoisella pää tai sivuraiteella noin 600 millimetriä. Ratapölkky voi olla myös muovista tai komposiittimateriaaleista valmistettu. Tällöin puhutaan ns. synteettisistä ratapölkkyistä. Muovi- tai komposiittipölkkyjä voidaan käyttää rataverkon haltijan luvalla.

Ratapölkyn pohjassa voi olla kiinnitettyä joustava levy eli ns. pohjain. Pohjaimien käyttötarkoituksiksi on mainittu ratateknisissä ohjeissa muun muassa:

- raiteen geometrian pysyvyyden parantaminen
- radan jäykkyyserojen tasoittaminen siirtymäalueilla
- kiskojen pinnan korrugaation eli aaltoilun vähentäminen tai tärinän vähentäminen [8].

Pohjaimien tai synteettisten ratapölkkyjen käytöstä Suomessa on toistaiseksi vain vähän kokemuksia. Parhaillaan on meneillään tutkimus Porin testiradalla, jossa selvitetään synteettisten ratapölkkyjen ja pohjaimien vaikutusta raideliikenteestä aiheutuviin värähtelytasoihin. Pohjaimella varustettu betoninen ratapölkky pienensi liikennetärinän tasoa 20–50 %. Suurin vaikutus todettiin pystysuuntaisen värähtelyn pienentymisessä. Komposiittipölkky pienensi myös liikennetärinää, mutta voimisti runkomelun taajuusalueen värähtelyä. Syyksi epäiltiin resonanssia liittyen pölkyn alimpaan ominaistajuuteen. Vuoden 2021 akustiikkapäivien esitelmässä tuloksia kuvailtiin lupaaviksi. [16]

## 2.3 Suomessa liikennöivä kalusto

Suomessa rautateillä liikkuva henkilö- ja tavaraliikenne liikkuu samoilla raiteilla. Liikennöivä kalusto jaetaan yleensä henkilö- ja tavaraliikenteeseen. Ylivoimaisesti suurin osuus rekisteröidystä kalustosta on veturivetoisia tavaravaunuja, joiden ikä

ja kunto vaihtelee. Henkilöliikenne koostuu veturivetoisista henkilöliikennevaunuista sekä moottorijunista, joissa ei ole omaa veturia, vaan voimantuottokoneisto on sulautettu suoraan vaunuun. Lisäksi raiteilla liikkuu ratatyökoneita ja muuta kalustoa. [4] [17]

Taulukossa 3 on esitetty Suomeen rekisteröity rautatiekalusto vuoden 2021 lopussa.

*Taulukko 3. Suomen rautatiekalusto 31.12.2023 [17].*

Vaunu, tavaraliikenne	Vaunu, henkilöliikenne	Veturit	Moottorijunat	Ratatyökoneet	Höyryveturit	Mittavaunut	<b>Yhteensä</b>
9151	680	652	222	69	16	1	<b>10791</b>

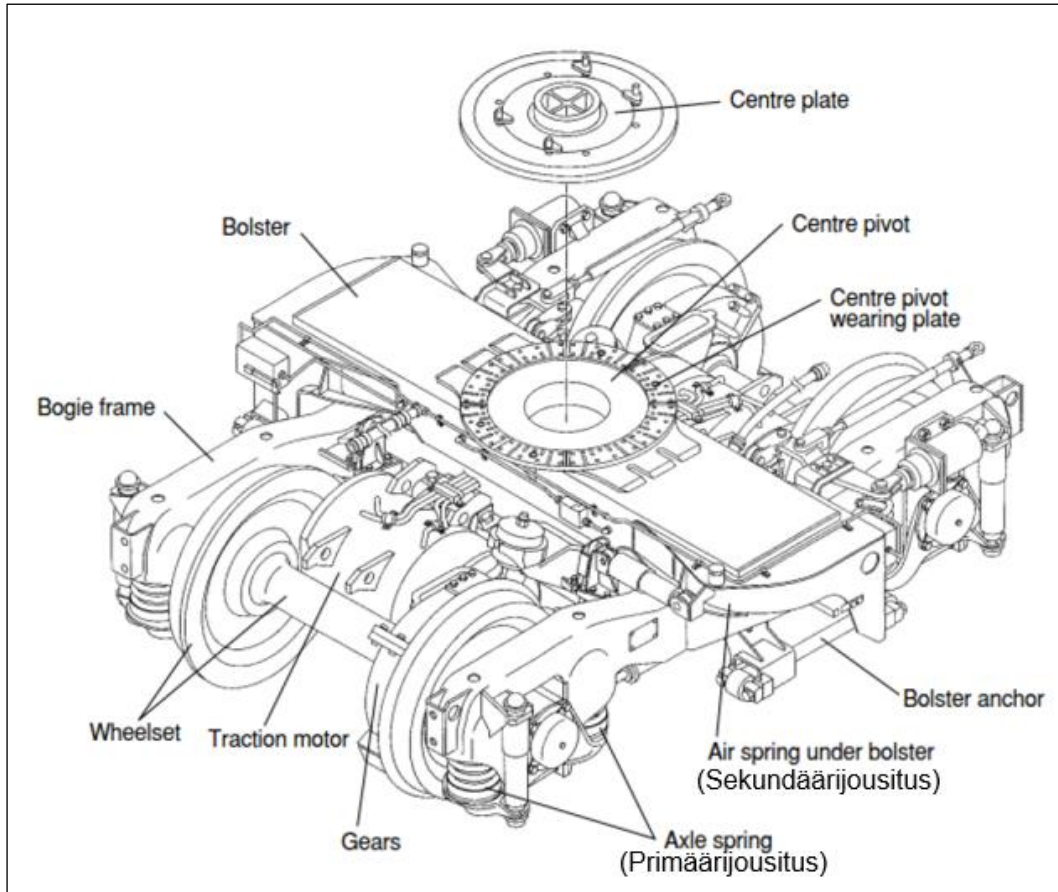
## 2.4 Telit ja pyöräkerrat

Liikennetärinän ja maaperän värähtelyn kannalta rautatiekalustossa on kiinnostavinta kiskoihin suoraan ja epäsuoraan liittyvät osat. Junan massa kohdistuu pyörien kautta kiskoihin ns. akselikuormina, joista muodostuu nauhamainen tärinälähde kummallekin vierekkäiselle kiskolle. Yleisin sallittu akselikuorma rataosuuksilla on nykyhetkellä 22,5 tonnia. Pyörien kautta dynaamiset voimat välittyvät liikennöivän kaluston suuntaan jousituksen kautta teliin ja vastaavasti kiskon, kiskonkiinnikkeiden ja pölkkyjen kautta syvemmälle ratarakenteeseen. Vaunun ja radan välillä on teli, jonka tärkein tehtävä on stabiloida vaunun ajoa radalla, vähentää radan epätasaisuuksista aiheutuvaa värähtelyä vaunussa parantaen matkustusmukavuutta ja samalle vähentäen kiskojen epätasaisuuksien pahenemista. Teli voidaan ajatella pyörien ja vaunun välillä vakauttajana toimien siinä roolissa molempiin suuntiin. [18] [19]

Telit voidaan jakaa eri tyypeihin esimerkiksi akseleiden määrän tai muiden telin osien mukaisesti. Okamoton mukaan akselimäärän lisäksi yleisiä jakoja ovat jako sen mukaan onko kyseessä niveellinen tai niveletön teli (articulated bogie tai non-articulated bogie), jousituksen mukaan tai sen mukaan onko telissä keskipalkkia (bolster), jonka keskiosassa olevan telikeskiön kautta teli liittyy vaunun varsinaiseen runkoon. [18]

Suomessa tyypillisesti junakalustossa on keskipalkki, mutta 1980-luvulla kehitetyt keskipalkittomia telejä on myös runsaasti liikennöinnissä eri puolilla maailmaa. Keskipalkittomassa telissä vaunun runko on jousien kautta suorassa yhteydessä teliin ja pystyakselin suhteen tapahtuva rotaatio tai kiertoliike estetään erilaisilla suunnatuilla vaimentimilla. Keskipalkillisessa telissä vaunun rungon ja telin välissä on telikeskiön kautta vaunun runkoon liittyvä keskipalkki, joka on yhdistettynä telirunkoon. Jousitus voi olla joko vaunun rungon ja keskipalkin välissä tai keskipalkin ja telin välissä. [18]

Kuvassa 7 on esitetty tyypillinen henkilöliikenteessä esiintyvä telirakenne ja siihen liittyvät oleelliset osat.



Kuva 7. Tyypillinen keskipalkillinen teli. Muokaten [18].

Kuvasta voidaan huomata telikeskiön (centre pivot) mahdollistama telin liittyminen vaunun runkoon keskiölevyn (centre plate) kautta. Keskipalkin (bolster) ja telirungon (bogie frame) välissä oleva ns. sekundäärijousitus on näkymättömissä keskipalkin alla. Pyöräkerta (wheelset) ja siihen liittyvä ajomoottori (traction motor) sekä vaihteisto (gears) ovat jousitettu primäärijousituksella irti varsinaisesta telirungosta.

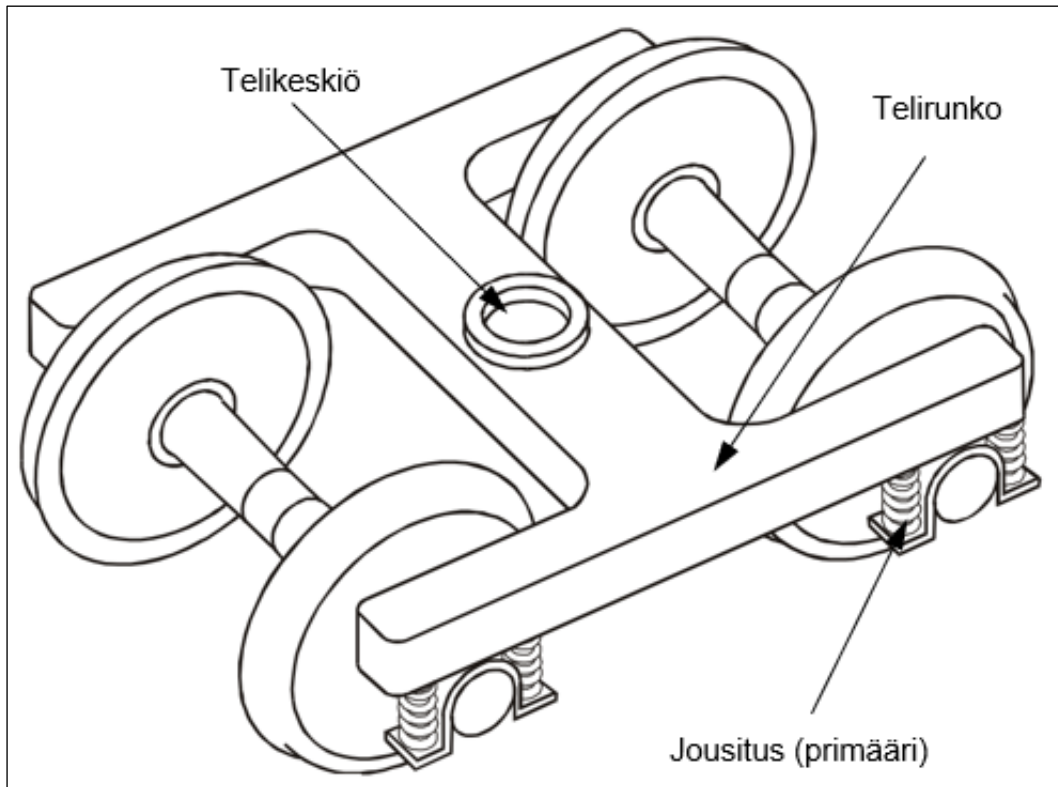
Kalustoon ja teleihin liittyvän keskustelun yhteydessä nousee usein esiin käsite jousittamaton massa (unsprung mass). Tämä on Escudierin ja Atkinsin mukaan määritelty ajoneuvon niiden osien massaksi, jota mikään jousitus ei kannattele ja massa on siis jousittamattomassa yhteydessä tukipintaan eli tässä tapauksessa kiskoon. Kuvassa 7 esitellyssä tapauksessa telin jousittamattomaan massaan kuuluu ainakin pyörien, akselien ja primäärijousituksen massa. Mikäli teliin on sijoitettu ajomoottori tai moottoreita ja niihin liittyvää vaihteistoa (kuten kuvassa 7) sekä jarruja riippuu niiden vaikutus siitä, miten ne on kiinnitetty teliin. Usein ainakin osa niiden massoista on jousittamatonta. [18] [20]

Luvussa 2.2 viitattiin kiskoon kohdistuvan kuormituksen suuruuteen sekä sen yhteydestä kiskon karheuteen ja jousittamattomaan massaan. Koska jousittamattoman massan määrä on telityypin ominaisuus ja koska värinäongelmat yhdistetään usein nimenomaan tavaraliikenteeseen, esitellään tässä yhteydessä lyhyesti myös tyypilliset tavaravaunujen telit ja niiden ominaisuudet. Korkeamäen mukaan Suomessa vuonna 2011 yleisin liikenteeseen rekisteröity tavaravaunu oli neliakselinen (kaksitelinen) Sp-raakapuuvaunu. Nykyään samaa tuoteperhettä edustava Sps-



raakapuuvaunu on hieman useammin rekisteröity, mutta kummankin vaunun ominaisuudet ovat likipitään samat perustuen Traficomien avoimen datan rekisteröintitietoihin.

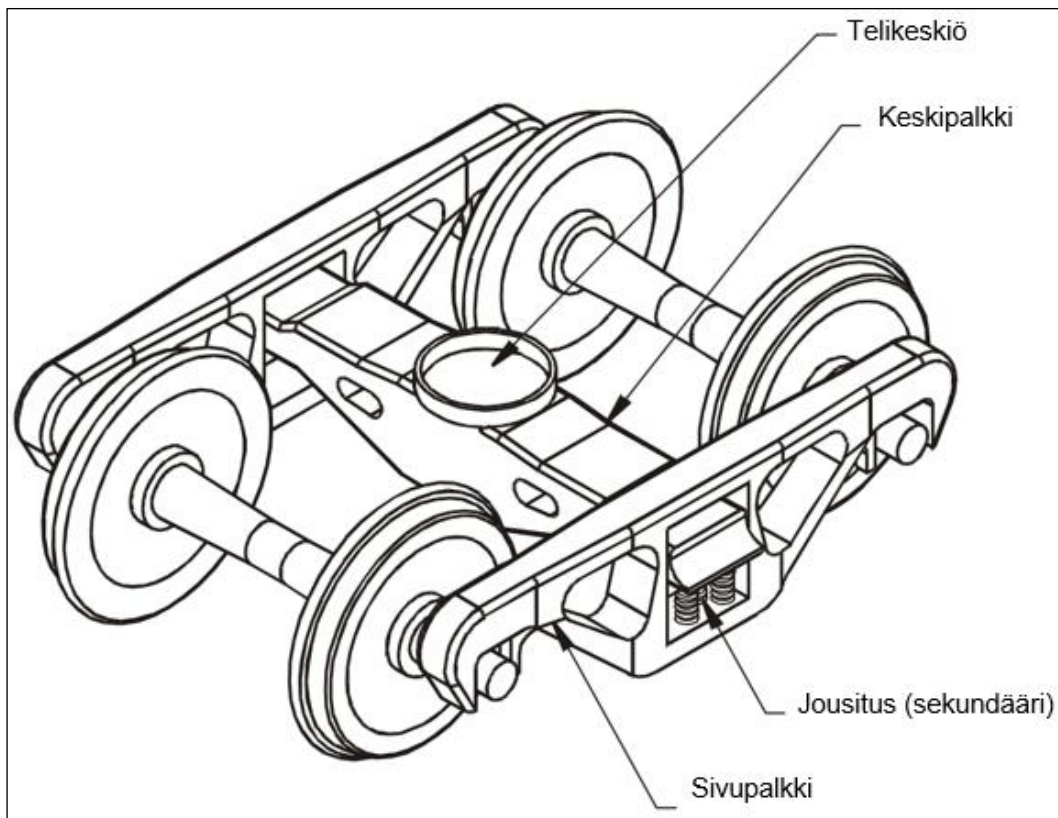
Käytettävät telimallit ovat K14, K16 ja K17, joista K14 on käytössä ainakin Sp-raakapuuvaunuissa. Rakenteen muodon takia telejä kutsutaan H-runkoisiksi teleiksi. Tyypillisen Suomessa käytössä oleva H-runkoisen telin rakenne on esitetty kuvassa 8. [17] [19]



Kuva 8. H-runkoinen teli. Muokaten [19].

H-runkoisen telin primäärijousitus sijaitsee heti pyöräkerran ja telirungon välissä. Tästä syystä telin jousittamaton massa koostuu pelkästään pyöristä, akseleista ja jousituksesta ja on tämän takia huomattavan pieni. Teli liittyy vaunun runkoon telikeskiön kautta suoraan ilman sekundääristä jousitusta.

Venäläinen kalusto, jota liikkuu Suomessa nykyään runsaasti, koostuu pääasiassa venäläisten standardien mukaan rakennetuista vaunuista. Yleisin telityyppi näissä tavaravaunuissa on 18–100, joka on kolmiosainen teli. Kolmiosainen teli muodostuu nimensä mukaisesti kahdesta sivupalkista ja keskipalkista. Pyöräkerran liittymistä sivupalkkiin ei ole jousitettu, eli primäärijousitus puuttuu. Telin jousitus on sen sijaan sijoitettu sivupalkin ja keskipalkin väliin ja siitä voidaan käyttää termiä sekundäärijousitus. Tästä johtuen telin jousittamaton massa koostuu pyöristä, akseleista, sivupalkeista ja jousituksesta eli sen jousittamaton massa on sivupalkkien verran suurempi kuin H-runkoisissa teleissa. Kolmiosaisen telin periaatteellinen rakenne on esitetty kuvassa 9. [11]



Kuva 9. Kolmiosainen teli. Muokaten [19].

Loponen ja muut ovat arvioineet yleisesti kotimaisissa tavaravaunuissa käytössä olevan H-runkoisen telin jousittamattomaksi massaksi 2 500 kg, mikä koostuu kahdesta pyöräkerrasta eli akselin ja pyörien kokonaisuuksista sisältäen jousituksen. Kolmiosaisen telin pyöräkertojen ja jousituksen massa on sama 2 500 kg, mutta tämän lisäksi vaikuttaa jousittamaton sivupalkkien massa  $2 \times 500$  kg. Tästä syystä kolmiosaisen telin jousittamaton massa nousee tasolle 3 500 kg. [11]

Pelkkä telityypin vaikutus jousittamattomaan massaan voi olla siis luokkaa  $\sim 40\%$ . Tätä voidaan pitää huomattavana eroavaisuutena.

Vetureiden osalta ilmiö toimii vastaavasti. Siemens Mobilityn valmistama Sr3 (Vectron) sähköveturi on VR Groupin uusiin kaksitelisiin (2 akselia per teli) veturi nopeaan matkustajaliikenteeseen, sekä raskaaseen tavaraliikenteeseen suunnattu veturi. Veturin massaksi ilmoitetaan varusteista riippuen 80–90 tonnia, joka antaa akselimassaksi vastaavasti 20 000 – 22 500 kilogrammaa. [21]

Telityyppinä veturissa on 18 tonnia painava SF4, mitä on tutkittu Federal Railroad Administrationin (myöhemmin FRA) johdosta vuonna 2013 rataa kohdistuvan voiman arviointiin liittyvässä tutkimuksessa. Laskennoissa käytettyä jousittamatonta massaa ei suoraan ilmoiteta, mutta sen oletetaan olevan välillä 2 500 – 3 800 kg per pyöräkerta. Jousittamattoman massan ilmoitetaan sisältävän: 2 pyörää, 1 akseli, 2 laakerointijärjestelmää ja niiden koteloinnit sekä 4 primäärijousta (puolet jousien massasta). Loput jousittamattomasta massasta määräytyy ajomoottorien, vaihteistojen ja muun mahdollisen voimansiirron sekä jarrujen sijoittelusta. Mitä enemmän yllä olevista voidaan sijoittaa suoraan telirunkoon kiinni, sitä pienempi

on jousittamaton massa. FRA mukaan SF4 telityypissä ainakin moottori on kiinnitetty telirunkoon. [22]

Yllä olevan perusteella nykyaikaisenkin veturin massa ja jousittamaton massa näyttäisi olevan huomattava ja voi olla liikennöivän yksikön huomattavin yksittäinen värähtelyn herätelähde. Kuvassa 10 on esitetty Sr3 veturi ja siinä käytössä oleva SF4 telityyppi.



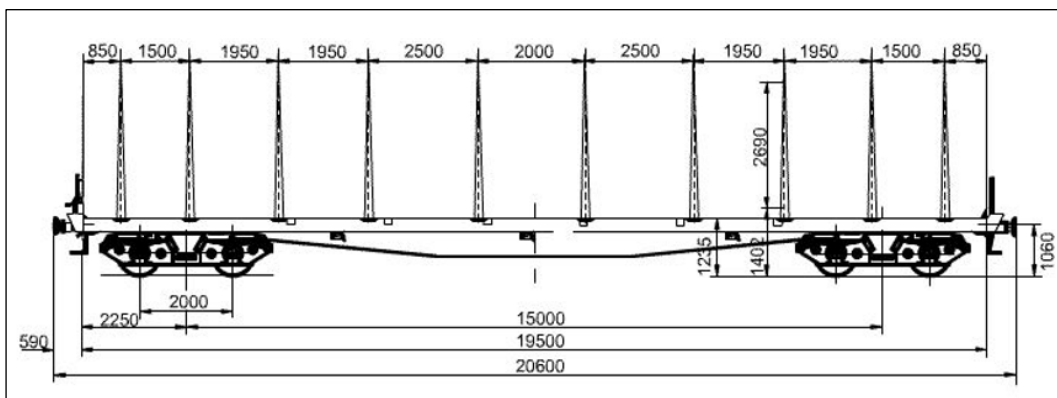
Kuva 10. Sr3 (Vectron) veturi ja SF4 teli. Yhdistettynä lähteistä [21] [22].

Telin osalta primääri- ja sekundäärijousitukset ovat kuvassa selvästi huomattavissa. Ajomoottorit ja vaihteisto ovat piilossa telirungon sisällä.

Muilta osin kaluston osalta värähtelyn kannalta olennaista on vaunujen ja veturien akselien ja telien etäisyydet sekä rataan vaikuttava akselimassa. Yksittäinen akseli ja sen pyörät aiheuttavat liikkueessaan rataa ja sitä kautta maaperään pienen siirtymän, joka huomataan tarkastelupisteessä pyörien ohittaessa sen. Koska samantyyppisistä vaunuista koottu juna koostuu useista teleistä ja akseleista, joiden välimatka on vakio, on tämä ns. ohitustaajuus yksinkertaisesti etenemisen nopeus (m/s) jaettuna telien välimatkalla (m) toisistaan. [24]

Korkeamäen mukaan henkilöliikenteen akselipaino on tavallisesti 120–190 kN ja tavaraliikenteen 200–250 kN välillä. Raskaissa malmikuljetuksissa maailmalla akselipaino voi olla jopa 400 kN. [19]

Kuvassa 11 on esitetty Suomessa yleisen Sps-raakapuuvaunun oleelliset mitat. Vr-Transpointin mukaan kyseisen vaunun akselipaino voi suurimmillaan olla noin 200 kN.



Kuva 11. Sps-raakapuuvaunun oleelliset mitat [25].

Suomessa akselipainoa rajoittaa rataosuuksille säädetyt enimmäisarvot luvun 2.1 mukaisesti. Julkisestikin käytyn keskustelun perusteella paineita sallitun akselipainon nostamiseksi tietyille rataosuuksille on olemassa. Tämän tapahtuessa liikennöivän kaluston väliset akselipainoerot tulevat oletettavasti kasvamaan ja tarkastelu eri kalustojen välillä muuttuu mielenkiintoisemmaksi.

### 3 Aaltoliike ja värähtely maaperässä

Tässä luvussa esitellään aaltoliikkeen sekä värähtelyn peruskäsitteet ja ilmiöt. Tämän jälkeen ne yhdistetään junien aiheuttamaan värähtelyyn ja erilaisiin aaltotyyppeihin maaperässä. Värähtelyn syntymekanismi ja sen matemaattinen malli esitellään tarkemmin, koska työn empiirinen osuus käsittelee maaperän värähtelyntuottavuuden sekä junien värähtelyvasteiden määrittämistä mittauksin. Asian matemaattisen mallinnuksen tunteminen lisää ilmiöiden ymmärrettävyyttä.

#### 3.1 Värähtelyn ja aaltoliikkeen perusteet

Värähtelyaalto on liikettä ja energian siirtoa väliaineessa, niin että partikkeleiden sijainti väliaineessa on sama ennen ja jälkeen häiriön ohitusta. Tämän mahdollistamiseksi väliaineen partikkeleiden täytyy olla vuorovaikutuksessa toistensa kanssa ja nopeus, jolla häiriö tai häiriöt etenevät väliaineessa riippuu suuresti tämän vuorovaikutuksen voimakkuudesta. Väliaineessa etenevä häiriö voi siis olla joko yksittäinen tai niitä voi olla useita. Usein väliaineessa etenevän häiriön demonstroimiseen käytetään tiukan köyden tai jousen pään nopeaa poikkeuttamisesta tasapainoasemasta, joka aiheuttaa köydessä etenevän häiriön tai aallon. [26]

Kun vuorovaikutettu kappale tai partikkeli häiriön etenemisen reitille joutumisen takia liikkuu tasapainoasemansa ympärillä, sen sanotaan värähtelevän. Värähtely voi olla suuria epäsäännöllisyyksiä sisältävää tai se voi olla tasaista liikettä. Jos kappaleen liike toistuu säännöllisesti, on värähtely jaksomaista ja jaksonajan käänteisluku on värähtelijän taajuus. [27]

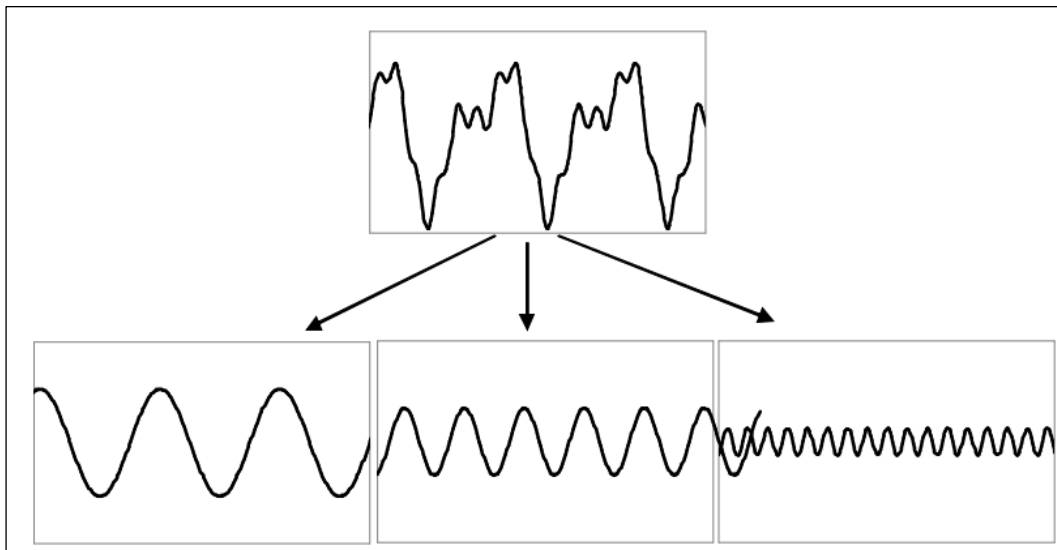
$$f = \frac{1}{T} \quad (5)$$

Yksinkertaisimmillaan säännöllinen liike on harmonista ja sitä kuvataan siniaaltona. Asia voidaan havainnollistaa kuvittelemalla tilanne, jossa jouseen ripustettu massa poikkeutetaan tasapainoasemasta ja päästetään vapaasti liikkumaan eli värähtelemään. Massan sijainti  $x$  tasapainoasemaan nähden voidaan ilmoittaa funktiona ajan suhteen kaavan

$$x(t) = \frac{A \sin 2\pi t}{T} \quad (6)$$

mukaisesti, jossa  $A$  on värähtelyn amplitudi, eli tässä tapauksessa alkuperäinen poikkeutus tasapainoasemasta ja  $T$  jaksonaika. [27]

Luonnossa aaltoliike yleensä koostuu eri taajuuksista. Tällöin aaltoliikkeestä tai värähtelyaallostaa voidaan erottaa eri taajuuskomponentit vaikuttamassa vakioamplitudilla. Näiden yhteisvaikutuksesta muodostuu tarkasteltava värähtely [12] [27]. Kuvassa 12 on esitetty kolmesta eri värähtelykomponentista koostuva värähtelyliike tarkastelupisteessä.



Kuva 12. Värähtelyn vakioamplitudiset taajuuskomponentit [12].

Kun maaperään syntyvä värähtely on rautatien vaikutuksesta aiheutuvaa, ei värähtely ole enää vapaata vaan pakotettua eli, siihen vaikuttaa radan ja junan vuorovaikutuksesta aiheutuva dynaaminen voima. Mikäli tämä voima vaikuttaa samalla taajuudella kuin maakerroksen ominaistaajuus sijaitsee, voi värähtely kasvaa huomattavan suureksi. Maakerroksen ominaistaajuutta  $f_0$  voidaan ainakin pehmeillä maalajeilla yksinkertaistaen arvioida kaavalla

$$f_0 = \frac{c_s}{4H} \quad (7)$$

missä  $c_s$  on leikkausaallon nopeus ja  $H$  maakerroksen paksuus. [12]

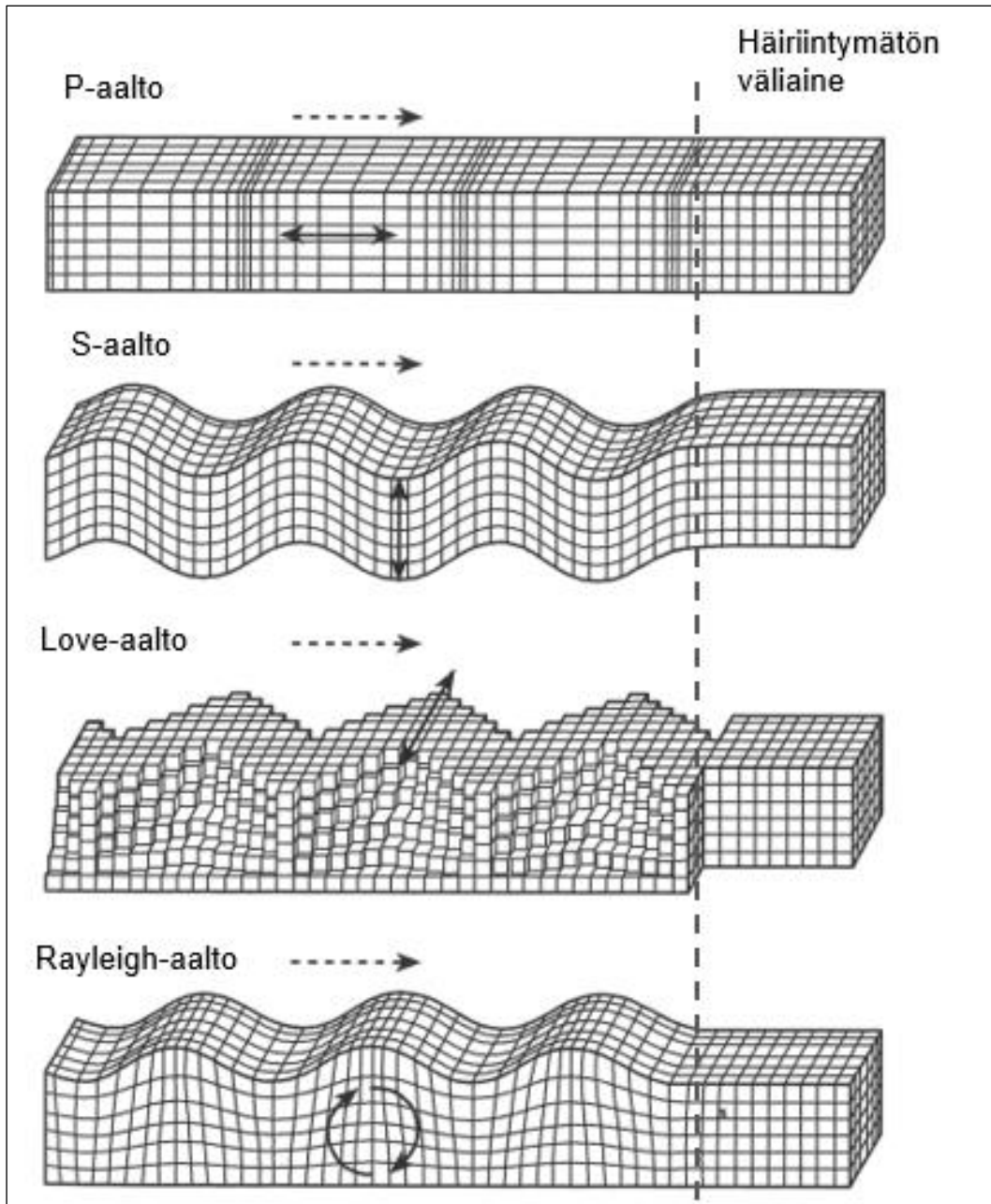
### 3.2 Värähtelyaallon eteneminen maaperässä

Värähtely leviää maassa erilaisina mainittuina häiriöinä tai aaltomuotoina eli ns. seismisinä aaltoina ja siirtyy rakennuksiin. Ihminen aistii näiden aaltojen yhteysvaikutuksesta syntyvän rakenteiden värähtelyn tunto, näkö ja kuuloaisteilla.

Erilaisista aaltomuodoista voidaan erotella P-aalto (primary-, pressure-, tai pitkittäisaalto), S-aalto (secondary-, shear-, tai leikkausaalto) sekä Rayleigh ja Love-aallot. P-aalto kuvaa maassa etenevää häiriötä, missä maapartikkelit ovat välillä kokoon puristuneina ja välillä laajemmin levinneinä. S-aalloissa maapartikkelit liikkuvat leikkausmuodonmuutosten takia ilman, että joutuvat kokoon puristuneeseen tilaan.

Rayleigh- ja Love-aallot syntyvät muiden aaltotyyppien kohdatessa maanpinnan, jolloin liike jatkuu vedenpinnan aaltoilua muistuttavana ellipsisenä liikkeenä tai Love-aallon kyseessä aallon etenemissuuntaan nähden poikittaisena liikkeenä. Siirtymisreitit perusteella niitä kutsutaan pinta-aalloiksi. [12]

Kuvassa 13 on esitetty eri aaltomuotojen etenemistä maaperässä. Katkoviivalla piirretty viiva kuvastaa aaltoliikkeen etenemissuuntaa ja väliaineeseen piirretty nuoli partikkeleiden liikettä.



Kuva 13. Aaltotyyppien eteneminen maaperässä. Muokaten [28].

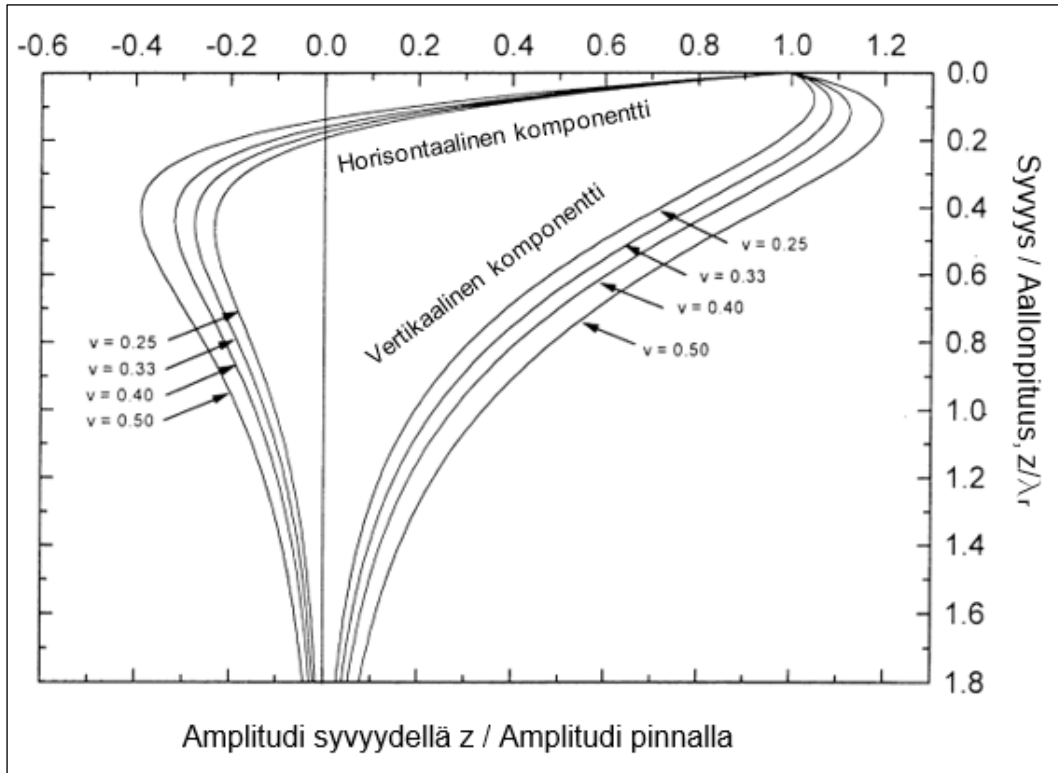
Pinta-aaltoja pidetään liikennetärinän kannalta usein oleellisempina tärinän aiheuttajina, koska niiden energia leviää edetessä pienemmälle pinta-alalle kuin syvemmällä maaperässä etenevien aaltojen. Smoltzykin mukaan 2/3 perusrakenteen dynaamiseen kuormitukseen johtavasta energiasta siirtyy Rayleigh-aallon mukana tarkastelupisteeseen.

Pinta-aaltojen osalta on huomioitavaa, että niiden siirtymäamplitudi pienenee huomattavasti etäisyyden kasvaessa maanpintaan. Näiden aaltomuotojen tehokas tunkeutumissyvyys vastaa suurin piirtein aaltoliikkeen aallonpituutta  $\lambda$ , joka saadaan kaavasta

$$\lambda = \frac{v}{f}, \quad (8)$$

jossa  $v$  on aaltoliikkeen etenemisnopeus maaperässä ja  $f$  värähtelyn taajuus. [28]

Kuvassa 14 on esitetty R-aallon siirtymäamplitudeja eri syvyyksillä neljällä eri poissonin vakion  $\nu$  arvolla. Kuvaa tulkittaessa voidaan huomata amplitudien suuruuksien perusteella kiinnostavimman alueen sijoittuvan maan pintaosiin.



Kuva 14. Aaltotyyppien eteneminen maaperässä. Muokaten [29].

Kuvasta huomataan, että pinnasta aallonpituuden verran maan sisään siirryttäessä R-aallon amplitudit ovat kummankin suuntakomponentin osalta tippuneet alle puoleen pinnan arvoihin verrattuna. Suurempi poissonin vakio indikoi suurempaa siirtymäamplitudia jokaisella syvyydellä.

Kun värähtelylähteenä on esimerkiksi metroliikenne tai yleisesti rautatieliikenne tunnelissa, eli viivamainen värähtelylähde on maan sisässä ja väliaineen kautta yhteydessä tarkastelupisteisiin, on P- ja S-aaltojen osuus värähtelyssä suurin. Gutowskin ja Dymin mukaan pinta-aaltoja voi tällöinkin muodostua P- ja S-aaltojen kohdatessa maan pinnan, mutta niiden suurus on jokseenkin pieni, ellei viivalähde ole lähellä pintaa. [30]

Seismisten aaltojen etenemisnopeus väliaineessa riippuu niiden etenemisreitistä. P- ja S-aallot etenevät äärettömässä elastisessa, homogeenisessa ja isotrooppisessa väliaineessa, jolloin niiden vastaavat nopeudet  $v_p$  ja  $v_s$  voidaan arvioida seuraavilla yhtälöillä.

$$v_p = \left( \frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

$$v_s = \left( \frac{\mu}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$



Yhtälöissä  $\mu$  on maaperän leikkausmoduuli (tai Lamén toinen parametri),  $\rho$  maaperän tiheys ja  $\lambda$  Lamén ensimmäinen parametri, joka saadaan hyödyntäen maaperän poissonin vakiota  $\nu$  seuraavasti.

$$\lambda = \frac{2\mu\nu}{1 - 2\nu} \quad (11)$$

Rayleigh-aallon, joka on siis pinta-aalloista merkittävin, nopeus saadaan puolestaan hyödyntämällä leikkausaallon etenemisnopeudesta seuraavasti.

$$v_r = \frac{0.862 + 1.14\nu}{1 + \nu} c_s \quad (12)$$

Rautatieliikenteen aiheuttamaa värähtelyä tutkittaessa maaperä usein ajatellaan ja mallinnetaan olettaen lineaarielastinen konstitutiivinen käyttäytyminen. Thompsonin ja muiden mukaan näin voidaan toimia, sillä junan ohittaessa tarkastelupisteen ovat maaperän partikkeleiden siirtymät suhteellisen pieniä lukuun ottamatta aluetta välittömässä radan läheisyydessä. [24]

Värähtelyn herätteestä syntyneen aaltoliikkeen voimakkuus vaimenee sen edessä maaperässä. Tämä vaimeneminen voidaan jakaa geometriseen- ja materiaalivaimennukseen. Geometrisellä vaimennuksella tarkoitetaan värähtelyaallon energian leviämistä avaruuteen, jolloin sen intensiteetti pienenee liikuttaessa kauemmas herätepisteestä.

Geometrinen vaimeneminen on siis riippumaton väliaineen ominaisuuksista toisin kuin materiaalivaimennus. Koska Rayleigh-aalto on yleensä tärinää aiheuttavan värähtelyn suurin levittäjä, käsittää analyyttinen menettely yleensä vain sen vaimenemisen tarkastelun. Kokonaisvaimennus voidaan esittää yhtälöllä

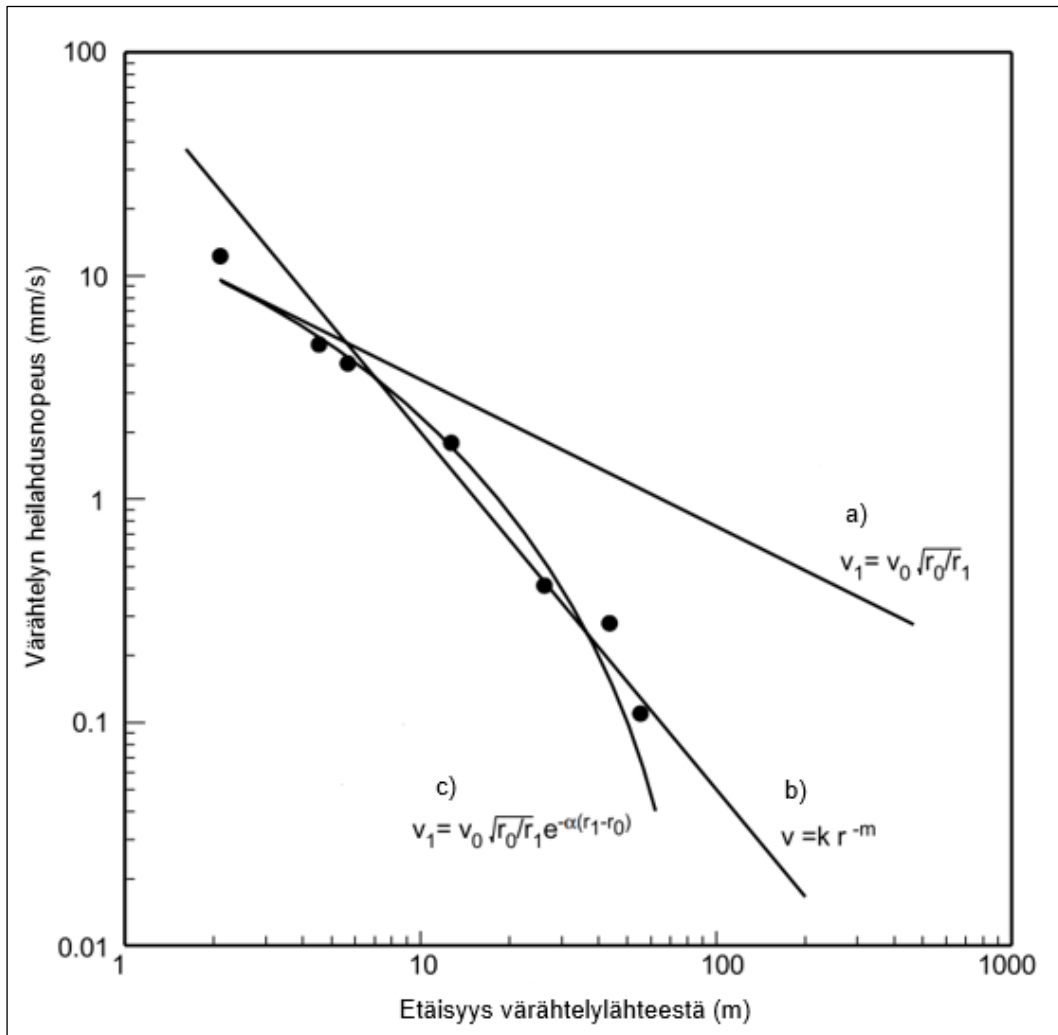
$$\frac{A_2}{A_1} = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^\beta \cdot e^{\alpha(r_1-r_2)}, \quad (13)$$

jossa  $A_1$  on värähtelyamplitudin suuruus etäisyydellä  $r_1$  värähtelylähteestä, ja  $A_2$  värähtelyamplitudin suuruus etäisyydellä  $r_2$  värähtelylähteestä. Eksponentti  $\beta$  kuvaa geometrisen vaimenemisen suuruutta ja vastaavasti eksponentti  $\alpha$  sisäistä eli materiaalivaimennusta. Rayleigh-aallon, kimmoisassa puoliavaruudessa pätevä, geometristä vaimennusta kuvaava tekijä  $\beta$  on aina 0,5. Eksponentti  $\alpha$  eli sisäistä vaimennusta kuvaava absorptiokerroin on puolestaan tarkasteltavan väliaineen ominaisuuksista riippuvainen ja kuvaa värähtelyamplitudin muutosta sen edetessä yhden metrin matkan väliaineessa. Vaimennuksen suuruuksia ja maan dynaamisten ominaisuuksien määrittäjiä on esitetty lisäksi standardissa ISO-14837-32 *Measurement of dynamic properties of the ground*. [31] [32]

Hiller ja Crabb ovat referoineet tutkimuksia maarakennustöistä aiheutuvan värähtelyn vaimenemista maaperässä kattavasti artikkelissaan vuodelta 2001. Paperissa todetaan pelkän geometrisen värähtelyn huomioimisen johtavan yleensä liian pienen vaimenemiseen verrattuna mittaustuloksiin. Toisaalta aiemmin esitetyn yhtälön 13 käyttö on haastavaa, sillä sisäisen materiaalivaimennuksen suuruus vaihtelee maaperän paikallisten olosuhteiden mukaan ja on lisäksi taajuusriippuvainen. [32]

Tutkimuksen mukaan ja yllä olevaan perustuen maaperässä vaimenemista arvioitaessa käytössä on usein yksinkertaistettu ns. pseudovaimenemisen malli missä

arvioitu värähtelyn taso tarkastelupisteessä saadaan sovittamalla käyrä vertailukohteissa eri etäisyydellä mitattuihin värähtelytuloksiin. Kuvassa 15 on esitetty Hillerin ja Crabbin läpikäymät kolme vaimenemisen mallia. [32]



Kuva 15. Värähtelyn vaimeneminen maaperässä etäisyyden funktiona [32].

Kuvasta on huomattavissa pelkän geometrisen vaimenemisen a) vaimennusta aliarvioiva vaikutus verrattuna teoreettiseen malliin c), missä geometrisen ja materiaalivaimennus on huomioitu. Käytännön syistä usein käytössä on yhteisvaikutusta kuvaava yksinkertaistettu pseudovaimenemisen malli b). Malli johtaa hieman konservatiiviseen arvioon vaimenemisesta, mutta on tarpeeksi lähellä todellisuutta. Pseudovaimenemisen kaavassa  $k$  ja  $m$  ovat mittaustulosten regressioanalyysistä saadut käyränsovitustermit.

Geometrisen vaimenemisen tapaista amplitudin pienentymistä tapahtuu myös aaltorintaman läpäistessä jäykkyyseroja omaavien maakerrosten rajapintoja. Rajapinnoissa tapahtuu samalla myös heijastumisia, joten paikallisesti värähtely voi myös vahvistua ja erilaiset aaltotyypit sekoittua tai muuttua toiseksi. [33]

Törnqvistin ja Taljan mukaan analyyttisten arviointimenetelmien heikkoutena on näiden monimutkaisten vuoro- ja yhteisvaikutusten huomioiminen, koska mallit ovat väkisin yksinkertaistettuja. Toisaalta samassa yhteydessä myös todetaan pe-

riaatteessa tarkempien numeeristen menetelmien käytön vaativan tarkkaa maaperän olosuhteiden tuntemista ja mallintamista, joka ei usein ole mahdollista tai käytännöllistä. Näin myös numeerisen mallintamisen tarkkuus voi jäädä analyttisten arviointimenetelmien tasolle. [33]

### 3.3 Rautatieliikenne värähtelyn herättäjänä

Lähes kaikki maalla kulkevat kuljetusjärjestelmät voivat aiheuttaa liikkuaan maassa kulkevaa värähtelyä. Näistä kuljetusjärjestelmistä rautatiekaluston teräspyörien ja teräksisten kiskojen yhteisvaikutuksesta syntyvä värähtely on ylivoimaisesti suurin liikennetärinän aiheuttaja. Rakennuksissa asuvat ihmiset häiriintyvät liikennetärinästä ja tärinälle herkkien laitteiden toiminta voi vaarantua. Äärimmäisissä tapauksissa myös rakennukset tai rakenteet voivat vaurioitua liikennetärinän vaikutuksesta. [34]

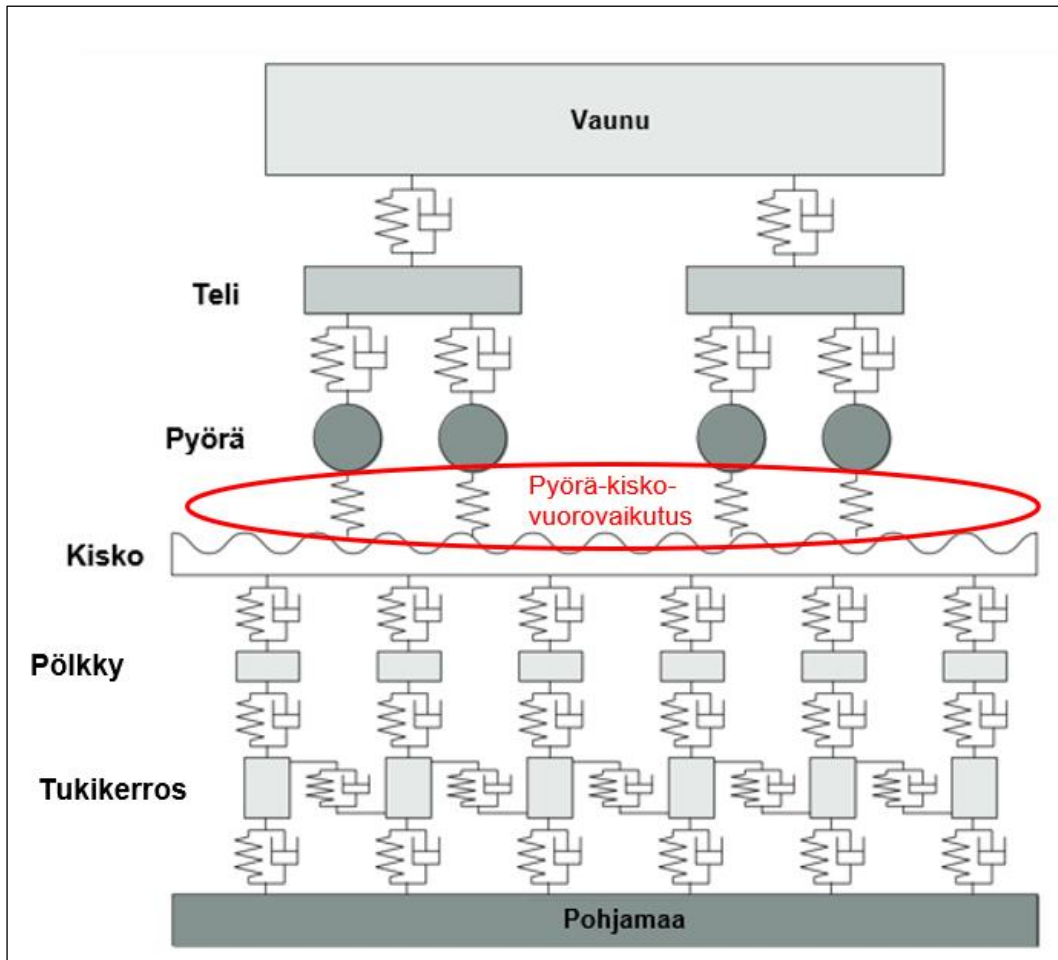
Värähtelyn vaikutukset ympäristössä havaitaan ihmisten toimesta joko mainittuna liikennetärinä tai runkomeluna. Kokemus on värähtelyn taajuusalueesta riippuvainen, jolloin varsinainen liikennetärinä on kyseessä, kun värähtelyn taajuusalue on välillä 1–80 Hz. Runkomelua koetaan kun 16–250 Hz taajuusalueella tapahtuva värähtely siirtyy rakennukseen sen perustuksen kautta ja värähtelyliikkeeseen joutuvat rakenteet säteilevät ihmisen kuultavissa olevaa melua. [34]

Liikennetärinää aiheuttava värähtely johtuu rautatiekaluston pyörän ja radan yhteisvaikutuksesta. Herätteenä toimiva voima syntyy, kun liikkuva rautatiekalusto kuormittaa kiskoja pyörän kautta. Nämä vaikuttavat kuormat voidaan jakaa kahteen eri kategoriaan. Kvasistaattiseen kuormitukseen, jossa aiheuttajana on liikkuvan kaluston kiskon kautta ratarakenteeseen vaikuttavat akselipainot sekä dynaamisiin kuormituksiin, jotka aiheutuvat pyörien tai kiskojen epätasaisuuksista, kiskojen epäjatkuvuuskohdista, vaihteista sekä ratapölkkyjen parametrisestä jaksotaisesta vaikutuksesta. [24] [35]

Dynaamisen kuormituksen taustalla on siis joko radan tai pyörän tai kummankin epätasaisuus. Pyörän liikkuaan epätasaisista kiskoista pitkin syntyy pyörään ja kiskoon dynaamista kuormitusta pyörän ja kiskon vuorovaikutuksesta. Tämä kuormitus tai voima aiheuttaa kohtaamispuolella kummallakin puolella värähtelyä, jonka suuruus riippuu osajärjestelmien ominaisuuksista. Toisin sanoen, kun dynaaminen voima vaikuttaa lähellä osajärjestelmien ominaisuuksia, aiheutuu suurin värähtelyvaste. [35]

Osajärjestelmillä tarkoitetaan massojen, jousien ja vaimentimien kokonaisuutta. Liikennöintivälineen puolen järjestelmien muodostavat vaunun tai veturin massa, edellä mainittujen ja telin väliset jousitukset sekä vaimennukset. Radan puolella järjestelmien muodostavat kiskot, ratapölkkyt, tukikerros sekä pohjamaa tämän kokonaisuuden alla. Muodostuva kokonaisuus on kompleksinen ja värähtelee monilla resonanssitaajuuksilla. Koska järjestelmien elementtien ominaisuudet voivat olla vaikeasti määritettävissä ja maaperän ominaisuudet vaihtelevat paikallisesti, on maaperään välittyvä värähtely usein hyvin vaikea ennustaa tai mallintaa. [35]

Kuvassa 16 on esitetty rautatien värähtelylähteen dynaaminen malli.



Kuva 16. Vaunu-rata värähtelysteemin dynaaminen malli. Muokaten [35].

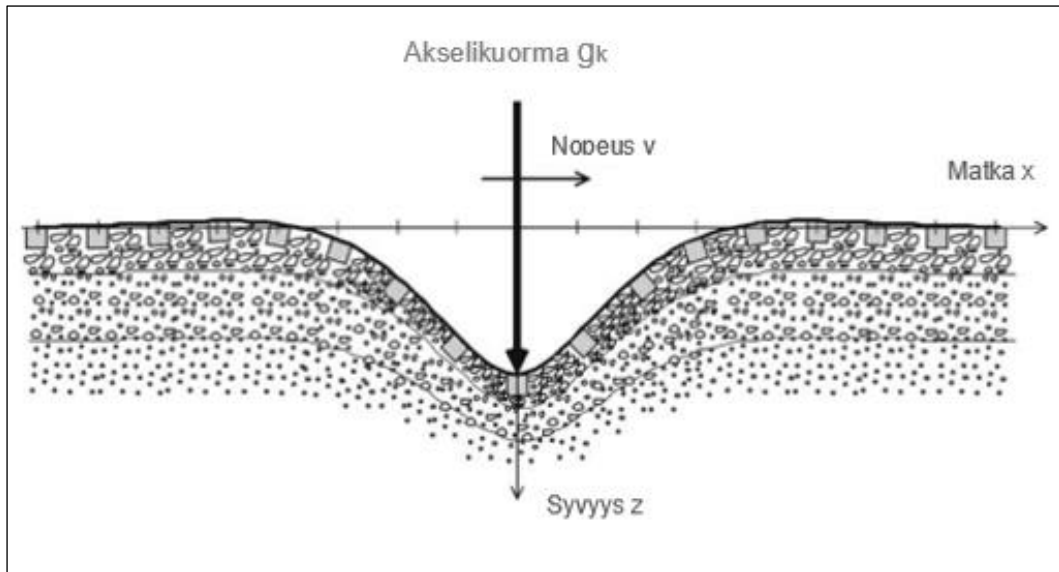
Kuvassa on esitetty värähtelysteemin olennaisimmat jouset ja vaimennukset. Malli voi olla erilainen riippuen mallinnukselle esitetystä vaatimuksista ja käytetystä palkkiteoriasta kuvaamaan kiskoja ja pölkkyjä. Pyörän ja kiskon vuorovaikutus niiden rajapinnassa mallinnetaan ns. kontaktijousena (Hertzian contact spring), mikä huomioi paikalliset kontaktialueen muodonmuutokset. Thompsonin mukaan kuormituksen ja muodonmuutoksen suhde ei ole lineaarinen ja ilmiö on kokonaisuutena huomattavan monimutkainen. [8]

Rataan kohdistuvat kuormitukset voidaan jakaa todetusti kvasistaattiseen ja dynaamiseen kuormitukseen. Näistä syntyvä värähtely  $u(t)$  voidaan vastaavasti jakaa kvasistaattiseen ja dynaamiseen osuuteen yhtälön 14 tavalla, missä  $u_s(t)$  on kvasistaattinen kuorman aiheuttaman värähtelyn osuus ja  $u_d(t)$  vastaavasti dynaamisen kuormituksen osuus kokonaisvärähtelystä. [36]

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{u}_s(t) + \mathbf{u}_d(t) \quad (14)$$

Kvasistaattinen osuus värähtelystä on liikkuvan kuorman aiheuttamaa. Tällöin junan massasta aiheutuva kuorma liikkuu rataa pitkin junan nopeudella ja siirtyy akselien kautta rataan. Ilmiö havaitaan matalan taajuuden värähtelynä, jonka täsmällinen taajuus riippuu akselien ja telien tarkastelupisteen ohitusnopeudesta. [36]

Kuvassa 17 on esitetty liikkuvan kuorman aiheuttama ns. "painumasuppilo" liioiteltuna etenemässä pitkin rataa.



Kuva 17. Kvasistaattisen kuormituksen aiheuttama painumasuppilo. Muokaten [37].

Kuormitukset aiheuttavat ratarakenteeseen siirtymiä, joista kvasistaattisen kuormituksen aiheuttama tarkastelupisteen värähtely  $u_s$  ajanhetkellä  $t$  on junan jokaisen akselin kuormituksen osuus superpositioperiaatteen mukaisesti. Kaavassa

$$\mathbf{u}_s(t) = \sum_{k=1}^{n_a} w_k \mathbf{u}_{s0} \left( t - \frac{y_{k0}}{v} \right) \quad (15)$$

$n_a$  on junan akselien lukumäärä,  $w_k$  akselin  $k$  kantama kuorma,  $v$  junan etenemisnopeus,  $\mathbf{u}_{s0}$  maaperän värähtelyvaste liikkuvaan yksikkökuormaan (unit magnitude) ja  $y_{k0}$  akselin sijainti radalla ajanhetkellä  $t = 0$ . Kvasistaattisesta kuormituksesta syntyvän värähtelyn osuudella on merkitystä vain erittäin matalien taajuuksien alueella sekä lähellä rataa. Sen takia se voidaan usein jättää huomioimatta mallinnuksissa ja arvioinneissa. [36] [38]

Dynaaminen kuormitus ja siitä aiheutuva värähtely puolestaan syntyy radan ja pyörän epätasaisuuksista. Kun oletetaan täydellinen kontakti pyörän ja kiskon välillä on voimassa yhteys

$$\mathbf{u}_a(f) = \mathbf{u}_t(f) + \mathbf{u}_{w/r}(f), \quad (16)$$

missä vektorit  $\mathbf{u}_a(f)$  ja  $\mathbf{u}_t(f)$  keräävät akselien ja radan siirtymät liikkuvissa kontaktipisteissä. Vektori  $\mathbf{u}_{w/r}(f)$  sisältää pyörän ja radan epätasaisuudet, jotka vaikuttavat akselin asemaan. Yksinkertaistettuna akselin siirtymä on siis radan siirtymä + pyörän ja radan pinnan (kiskon) epätasaisuus. Siirtymät  $\mathbf{u}_a(f)$  ja  $\mathbf{u}_t(f)$  voidaan esittää myös junan dynaamisena kuormina joustomatriisien avulla yhtälön

$$[\mathbf{C}^t(f) + \mathbf{C}^v(f)] \mathbf{g}_d(f) = -\mathbf{u}_{w/r}(f) \quad (17)$$

mukaisesti, missä  $C^t$  ja  $C^p$  ovat järjestyksessä radan ja ajoneuvon joustomatriisit perustuen luotuun mekaaniseen malliin kuvan 15 mukaisesti. Vektori  $u_{w/r}$  sisältää edelleen samat pyörän ja kiskon epätasaisuudet, jotka on saatu joko mittaamalla tai käyttämällä satunnaista karheusmatriisia. Dynaaminen kuorma  $g_d(f)$  saadaan ratkaisemalla yllä oleva yhtälö 17 sen suhteen. Ratkaisumalli ei huomioi suuria muodonmuutoksia tai pyörä-kisko yhteyden hetkittäistä menetystä.

Dynaamisen kuorman selvittämisen jälkeen on mahdollista laskea vapaan kentän siirtymävaste dynaamiseen kuormitukseen yhtälöllä

$$u(x't) = \sum_{k=1}^{n_a} \int_{-\infty}^t H_{ts}(x_k(\tau), x', t - \tau') g_d(\tau) d\tau, \quad (18)$$

missä  $H_{ts}(x, x', t)$  on siirtofunktio, joka kuvaa radan pisteessä  $x$  kuorman  $g_d(\tau')$  vaikutuksesta syntyvän siirtymän pisteessä  $x'$ . Yksinkertaistuksen vuoksi värähtelyvasteen syntyminenataan ja maaperään käsitellään useimmiten yhden pyörän ja kiskon vuorovaikutuksesta syntyvänä ilmiönä. Koska systeemi oletetaan lineaarisiksi ja jokainen värähtelylähde itsenäiseksi, voidaan kokonaisvaste ajatella syntyväksi kun tietty määrä pistemäisistä herätteistä syntyneitä vasteita yhdistetään epäkoherentteina. Thompsonin mukaan näin voidaan olettaa olevan ainakin lyhyillä aallonpituuksilla. Pitemmällä aallonpituuksilla, jotka sopivat ratapölkkyjen ylityksistä syntyviin värähtelyihin, kiskon liitoksiin jne. värähtelylähteiden voidaan olettaa olevan korreloivia keskenään. [8] [36] [38]

Heckl ja muut tutkivat rautatiekaluston ohituksesta syntyneitä värähtelyspektrejä ja huomasivat, että tyypillisesti vastepään värähtelyspektristä voidaan erottaa lähietäisyydeltä vaikuttavista dynaamisista voimista ainakin akseleiden ratapölkkyjen ylittämistä syntyvä vaikutus sekä mahdolliset suuremmat epäjatkuvuuskohdat. Pyörien liikkeestä syntyvä kvasistaattinen vaikutus on haastavampaa huomata värähtelyspektreistä. [39]

Taulukossa 4 on esitetty UIC:n raportin mukaisesti värähtelyn syntymekanismit jaoteltuna ajoneuvon nopeuden ja syntyvän värähtelyn taajuuden mukaan.

*Taulukko 4. Värähtelyn olennaisimmat syntymekanismit [35].*

Ajoneuvon nopeus	40 km/h	80 km/h	160 km/h
Liikkuva kuorma (akseliväli n. 1,8 m)	3 Hz	5 Hz	11 Hz
Radan epätasaisuus	1–100 Hz	2–200 Hz	4–400 Hz
Kiskon epätasaisuus	n. 500 Hz	n. 1000 Hz	n. 2000 Hz
Pyörän epätasaisuus	≤ 4 Hz	≤ 8 Hz	≤ 15 Hz
Pyörän monikulmaisuus (polygonisaatio). 0,1 m aallonpituus.	n. 100 Hz	n. 200 Hz	n. 400 Hz
Pölkkyvälin vaikutus, 0,6 m.	16 Hz ker-rannaiset	32 Hz ker-rannaiset	64 Hz ker-rannaiset.

UIC:n esityksessä kiskon epätasaisuudesta aiheutuva värähtely käsitellään ilmeisesti vain tietyn karheuden aallonpituudella. Taulukossa esitettyjen kiskojen epätasaisuudesta aiheutuvat värähtelyn taajuudet ovat yhdenmukaisia 0,02 m aallon-

pituuksella dominoivan kiskon karheuden mukaisesti. Toisaalta esimerkiksi Thompson esittää kirjassaan karheuden aallonpituuksiksi laajemmin 0,005 m..0,5 m, mutta ei tarkemmin erittele niiden yleisyyksiä [9].

Kiskon karheuksien profiileista ja ylipäätään kiskojen kunnosta näyttäisi olevan Suomessa vielä hyvin vähän tietoa saatavilla julkisista lähteistä.

## 4 Värähtelyn ja värähtelyn arviointi

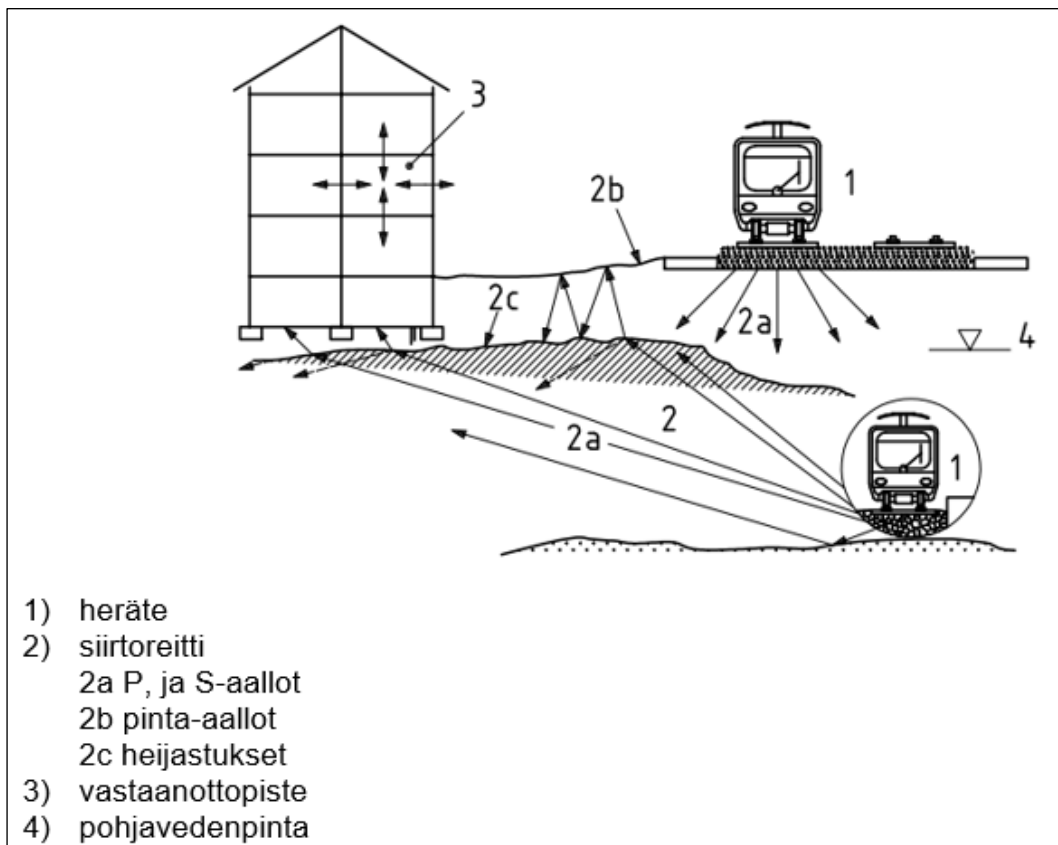
Tässä luvussa esitellään rautatieliikenteestä aiheutuvan värähtelyn ja värähtelyn arvioinnissa käytettävien menetelmien perusteet ISO-14837 mukaisesti. Yleisesti ottaen lähes kaikki arviointimenetelmät perustuvat jollakin tapaa edellä mainittuun standardiin.

### 4.1 Värähtelyn arviointimenetelmien jaottelu

Standardin ISO-14837 mukaan rautatieliikenteen värähtelyjä arvioitaessa ja arviointimalleja kehitettäessä kehoitetaan värähtelysystemi jakamaan komponentteihin seuraavasti: heräte, siirtoreitti ja vastaanotin. Systemi voidaan siirtää kaavan muotoon seuraavasti:

$$A(f) = S(f) \cdot P(f) \cdot R(f), \quad (19)$$

missä A on värähtelyn tai runkomelun taso tai suuruus tarkastelupisteessä, S on heräte, P siirtoreitti ja R vastaanottopiste. Kaikki komponentit esitetään taajuuden funktiona. Kuvassa 18 on esitetty kaavan 19 komponenttien esiintyminen värähtelysystemissä.



Kuva 18. Värähtelysystemi ISO 14837 mukaisesti [34].

Herätteenä kuvan systemissä toimii avoradan tai tunneliradan liikennöintivälineen ja radan interaktio, jonka jälkeen syntyneet värähtelyaallot (2a, 2b) etenevät maa-



perässä luvussa 3.2 käsiteltyinä eri aaltomuotoina. Värähtely arvioidaan vastaanottopisteessä (3) rakennuksen sisällä. Jokaisen komponentin vaikutus esitetään taajuuden funktiona ja ne voidaan jakaa parametreihin riippuen tarkastelutason tarkkuudesta ja perustuen muihin käytössä oleviin ohjeisiin koskien värähtelyarviointia. ISO-14837 mukaan värähtelyarviointiin käytettävät mallit voidaan jakaa useisiin eri tarkkuustasoihin riippuen hankkeen vaiheesta. Tarkastelutaso tarkentuu hankkeen edetessä ja saavuttaa huippunsa rakentamissuunnitelmavaiheessa. [34]

Seuraavassa alaluvussa esiteltävä VTT:n tunnetuksi tuoma arviointimenetelmä on ns. empiirinen eli mitattavaan tietoon ja sen hyödyntämiseen perustuva malli. ISO-14837 mukaisesti on olemassa myös parametrisia malleja, mitkä voidaan jakaa algebrallisiin sekä numeerisiin ratkaisuihin perustuviin. Näistä ensimmäinen soveltuu lähinnä yksinkertaisten arviointien suorittamiseen.

Numeeriset mallit pystyvät suoriutumaan monimutkaisimmasta arviointitehtävistä, jos systeemin ominaisuudet tunnetaan tarpeeksi tarkasti. Nykyään tärinätutkimuksissa yleistyneet elementtimenetelmät ovat yksi numeerisista malleista. Elementtimenetelmässä tutkimusalue esitetään elementtiverkkona (mesh), jonka jälkeen malli muodostaa systeemistä lineaarisen yhtälöryhmän ja iteroimalla ratkaisee jokaisen elementin solmukohtan (node) siirtymän. [34]

Numeeristen menetelmien ongelmana voitaneen pitää lähtötiedoilta vaadittavaa tarkkuutta. Lisäksi ISO-14837 mukaan on olemassa ns. hybridimalleja, joissa yhdistellään numeerisia ja empiirisiä malleja. Esimerkiksi maaperän värähtelyn johtavuus voi perustua empiiriseen malliin (mittaukseen), kun herätevoiman suuruus on numeerisesti muodostettu.

## 4.2 Arviointimalli VTT:n mukaan

Suomessa rautatieliikenteen värähtelyä arvioidaan usein Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:n tai sen edeltäjien laatimien ohjeistusten mukaan. Julkaisussa *Liikennetärinä: Alueiden tärinäkartoitus ja rakenteiden vaurioitumisalttius* on ISO-14837 mukaisesti arviointi jaettu useaan eri tarkkuustasoon.

Tarkastelutaso 1: Alustava juna- ja maaperätietoihin perustuva rajausta. Kartoitus tehdään puoliempiirisillä laskentakaavoilla

Tarkastelutaso 2: Tarkennettu tärinämittauksiin perustuva rajausta. Kartoitus perustuu tunnetusta junaliikenteestä mitattuun maaperän värähtelyyn

Tarkastelutaso 3: Rakennuksessa esiintyvään värähtelyyn arviointi. Tarkat vaikutukset alueella olevaan tai suunniteltavaan rakennuskantaan.

Suunnittelun alkuvaiheessa arviointimallien tarkkuudeksi riittää arvio siitä tuleeko liikennöintivälineistä aiheutuvaa värähtelyä ja tärinää huomioida ollenkaan. Arviointiin käytettävien parametrien määrän tulee olla mahdollisimman vähäinen ja käsittää vain niitä tietoja, joita suunnittelun tässä vaiheessa on saatavilla. Esimerkiksi liikennöintivälineiden yleiset tiedot, radan ja havainnointipisteiden väliset etäisyydet, maaperän yksinkertaistetut ominaisuudet jne. [12]

Edellä mainittu ensimmäinen tarkastelutaso on luonnollisesti ainoa käytettävissä oleva, kun varsinaista herätelähdettä ei vielä ole olemassa, sillä rata tai raitiotie on

vasta suunnitteluvaiheessa. Alun perin Madshusin ja muiden kehittämä laskentamalli on esitelty Törnqvistin ja muiden mukaan VTT:n ohjeistuksissa ja esitetään Suomen olosuhteisiin muokattuna alla olevassa muodossa. [40]

Laskentamallissa on esitetty tiettyjen junatyyppien maaperään tuottama värähtelyarvo (mm/s) perustuen aikaisempaan mittaustietoon. Kaavassa

$$v_G = v_0 \cdot \left(\frac{D_0}{D}\right)^B \cdot \left(\frac{S}{S_0}\right)^A \cdot \frac{G}{G_0} \cdot k_r \cdot F \quad (20)$$

$v_G$  on tarkastelupisteen värähtelytaso etäisyydellä  $D$  radasta ja  $v_0$  junatyyppin aiheuttama aikaisemmista mittauksista määritetty värähtelyn arvo 15 m etäisyydellä radasta. Termin  $v_0$  yhteydessä käytetään myös nimitystä värähtelyn perusarvo.

Termi  $\left(\frac{D_0}{D}\right)^B$  kuvaa värähtelyn vaimenemista maaperässä perustuen kokemusperäiseen tietoon.  $D_0$  on aiemmin mainittujen vertailumittausten 15 m etäisyys radasta ja  $D$  tarkasteltavan pisteen etäisyys radasta. Eksponentti  $B$  kuvaa vaimentumisen suuruutta. Loput kaavan 20 termit ja niiden muuttujat ovat erilaisia korjaus- ja varmuuskertoimia seuraavasti:

$S$  = junan nopeus, perusarvo  $S_0 = 70$  km/h. Nopeuseksponentti  $A$  on 0,9–1,1.

$G$  = junan kokonaispaino, perusarvo  $G_0 = 2\,000$  tonnia.

$k_R$  = radan kunnosta riippuva kerroin, keskimäärin 1,0.

$F$  = varmuuskerroin [12].

Yksinkertaistettuna voidaan laskentamenetelmän käyttävän värähtelyn perusarvoa  $v_0$  herätteenä, ensimmäinen termi kuvaa siirtoreittiä sekä värähtelyn vaimenemista siinä ja loput yhtälön muuttujat ovat erilaisia korjauskertoimia. Suurin eroavaisuus ISO-14837 mukaiseen jakoon on yksilukuarvon käyttäminen taajuuskohtaisten arvojen sijaan.

## 5 Fta tarkennettu arviointimenetelmä

Tässä luvussa esitellään värähtelyn siirtomobilitiitin määritykseen perustuva värähtelyarviointimenetelmä ja käydään läpi sen käyttöön liittyvä ohjeistus niin kuin se on esitetty Federal Transit Administrationin ohjeessa. Tämän työn empiirinen osuus suoritettiin perustuen tähän ohjeeseen, mutta hyödyntäen muista lähteistä saatua tietoa signaalien käsittelystä liittyen rakenteiden ja rakennelmien värähtelyjohtavuuden mittauksiin ja moodianalyysihin. FTA:n esittämä tarkennettu arviointimenetelmä on empiirinen malli.

### 5.1 Menetelmän esittely

Tutkimusalueen tärinänjohtavuuden karakterisointiin perustuva värähtelyn arviointimenetelmä ja sen tunnetuksi tekeminen on suurimmalta osin Saurenmanin ja Nelsonin 1980-luvulla tehdyn tutkimuksen ansiosta. Edellä mainittuihin viitataan isossa osassa menetelmällä tehdyistä tutkimuspapereissa ja kenttämittausten raporttiosioissa. Menetelmä esitellään laajasti esimerkiksi Federal Transit Administrationin (myöh. FTA) ohjeessa *Transit Noise and Vibration Impact Assessment Manual* jossa siihen viitataan "Detailed Vibration Analysis" nimellä. Julkaistu ohje on päivittynyt vuosien mittaan ja uusin versio tällä hetkellä on saatavilla vuodelta 2018. [14] [41]

Tässä tarkennetussa värähtelyanalyysissä käytetään 1/3 oktaavikaistoittain esitettyä voiman tiheyttä (force density) tai tiheystasoa (force density level) esittämään värähtelyn lähteen eli herätevoiman ominaisuuksia. Tiheys tässä yhteydessä kuvaa junakaluston tuottamaa voimaa per yksikkömetri. Tiheystaso kuvaa voiman esittämistä logaritmisesti vertailuarvoon suhteutettuna ja yksikkönä on desibeli.

Värähtelyn arvioinnin kannalta tärkeimmät ominaisuudet ovat voiman tiheyden suuruus ja tieto mille taajuusalueille se jakautuu ja kuinka laaja- tai kapeakaistaisesti. Tämä vaikuttava herätevoima syntyy luvun 3.3 mukaisesti kaluston ja radan yhteisvaikutuksesta kiskon ja pyörän kontaktipinnassa ja aiheuttaa kiskon sekä pyörän värähtelyn. Kiskon värähtely etenee radan rakenteiden kautta maaperään ja siirtyy sitä kautta tarkastelupisteeseen.

Tarkastelupisteessä tämän värähtelyn ja aistitun tärinän suuruus ja taajuussisältö riippuvat maaperän värähtelyjohtavuudesta ja herätevoiman suuruudesta. Liikennetärinää arvioitaessa maaperän värähtelyjohtavuus kannattaa esittää partikkelin heilahdusnopeutena per käytetty voima, sillä myös erilaiset ohjearvot yleisesti annetaan nopeustasossa. Kun värähtelyjohtavuus ilmoitetaan nopeustasossa, puhutaan mobiliteetista. Voiman tiheystaso, maaperän mobiliteetti sekä tarkastelupisteessä todettu värähtelyn suuruus esitetään yleensä 1/3 oktaavikaistoittain.

Periaatteeltaan kyseessä on maaperän taajuusvastefunktion määrittäminen, missä systeemin tulona toimii pyörien ja kiskojen yhteisvaikutuksesta syntynyt voiman tiheys, taajuusvastefunktiona on maaperän värähtelyjohtavuus ja vasteena on maaperän värähtelyn taso tarkastelupisteessä. Taajuusvastefunktioihin ja niiden määrittämiseen palataan tarkemmin myöhemmin.

Koska menetelmän teorian mukaan voiman tiheys on kaluston ja radan ominainen eli karakteristinen ominaisuus, voidaan samaa voiman tiheyttä hyödyntää myös

alueilla missä sen määrittäminen ei ole syystä tai toisesta mahdollista. Eli esimerkiksi alue, missä ratalinjaa ei vielä ole olemassa, mutta maaperän värähtelynjohtavuuden määrittäminen on mahdollista. Toimimalla näin voidaan pyrkiä ennustamaan tulevan radan aiheuttamia maaperän värähtelyitä tarkemmin tälle tulevan ratalinjan alueelle kuin pelkillä perinteisillä empiirisillä laskentakaavoilla.

Tietyn tyyppisen kaluston rataan kohdistuvan voiman tiheys ei ole suure, joka voidaan helposti mitata suoraan. Yleensä se täytyy johtaa määritetystä maaperän värähtelynjohtavuudesta ja maaperästä mitatuista värähtelyvasteista, jotka tutkittava kalusto on aiheuttanut. Tilanne on kuvattu ISO-14837 standardin mukaisesti kaavassa 19. Kaavasta huomataan, että kun kaksi termiä tunnetaan, voidaan kolmas selvittää triviaalisti, kun vastaanottopisteen ominaisuudet  $R(f)$  jätetään huomioimatta. Lisäksi on olemassa malleja, missä joko maaperän värähtelynjohtavuus tai voiman tiheys mallinnetaan numeerisesti. Tällöin puhutaan ns. hybridimalleista. [14] [38]

Mikäli voiman tiheyttä päädytään arvioimaan jossain muualla, tarkoituksena hyödyntää sitä tarkastelualueella, olisi olosuhteiden hyvä olla suunnilleen samanlaiset. Erityisesti radan rakenne, pengeri ja junan nopeus. Tarvittaessa poikkeavia parametrejä voidaan sovittaa vastaaviksi soveltamalla erilaisia korjauskertoimia tai kaavoja. Esimerkiksi nopeus on voiman tiheyteen vaikuttava ominaisuus, joka vaatii korjauskertoimen, mikäli uuden rata-alueen nopeudet poikkeavat alueesta missä voiman tiheys alun perin määritettiin.

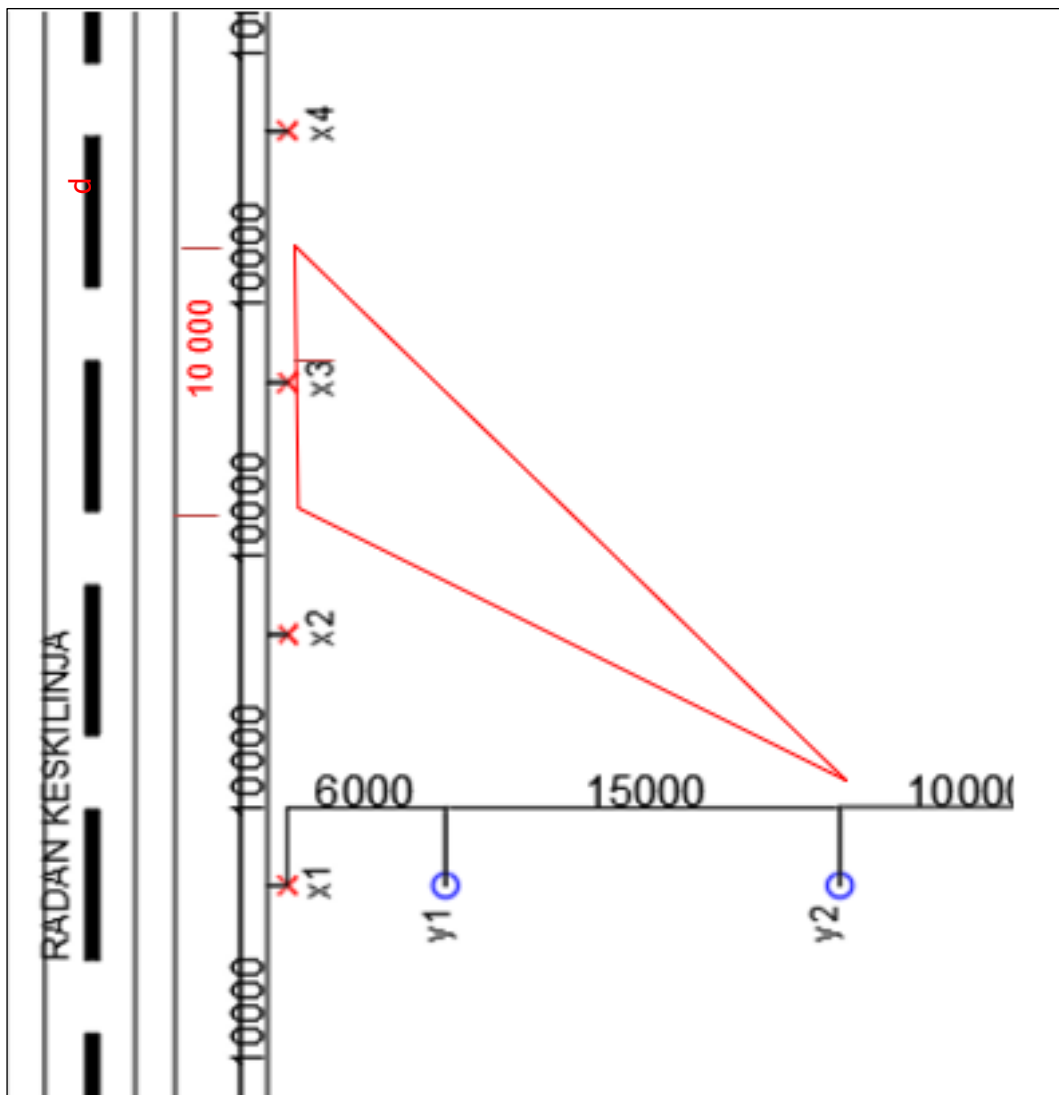
FTA mukaan paras arviointitarkkuus saavutetaan muodostamalla ensin keinotekoisista pistelähteistä viivalähdemäiseen herätteeseen perustuva maaperän värähtelynjohtavuuden taajuusvastefunktio. Kun maaperän värähtelynjohtavuuden viivalähdemäinen taajuusvastefunktio on selvitetty, voidaan sitä hyödyntää voiman tiheyden määrittäksessä kaavan

$$v^2 = F^2 \gamma^2 \quad (21)$$

mukaisesti, missä  $v^2$  on tarkastelupisteen värähtelyn tehollisarvo neliönä,  $F^2$  voiman tiheys neliönä ja  $\gamma^2$  maaperän värähtelynjohtavuus neliönä viivamaisella lähteellä herätettynä. Värähtelynjohtavuus  $\gamma$  saadaan kaavasta

$$\gamma = \sqrt{\sum_i (\gamma_{ij}^2) d_i}, \quad (22)$$

missä  $\gamma_{ij}$  on pisteestä  $i$  tarkastelupisteeseen  $j$  mitattu, pistemäisellä lähteellä todettu värähtelynjohtavuus ja  $d$  on herätepisteiden välinen etäisyys. Kuvassa 19 on esitetty periaatekuva mittausjärjestelystä, kun  $i$  on x3 ja  $j$  y2.



Kuva 19. Värähtelynjohtavuus välillä  $x_3$  ja  $y_2$ .

Yksinkertaistettuna värähtelynjohtavuus tai mobiliteetti  $\gamma_{ij}$  on voimassa välimatkan  $d$  määrittelemällä alueella. Tämän jälkeen nämä pistemäisesti todetut värähtelynjohtavuudet lisätään kaavan 22 mukaisesti epäkoherentteina pistelähteinä yhteen, muodostaen viivamaisen lähteen herättämän värähtelynjohtavuuden. Yläpuolella kerrotut yhteydet ovat voimassa ainakin Villotin ja muiden mukaan. [42]

Koska menetelmän laskutoimitukset suoritetaan logaritmisesti desibeleinä, tehdään tässä vielä pikainen yksikkötarkastelu selvyuden varmistamiseksi ja yllä olevan havainnollistamiseksi.

$$\left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = \frac{N^2}{\text{m}} \cdot \left[\frac{\text{m}\sqrt{\text{m}}}{\text{sN}}\right]^2 \quad (23)$$

Yläpuolella kaavassa 23 on esitetty yksiköittäin kaavan 21 sisältö. Yhtäsuuruusmerkin vasen puoli on värähtelynjohtavuuden tarkastelupisteessä todettu värähtelyn tehollisarvo neliötynä. Yhtäsuuruusmerkin oikealla puolella ensimmäisessä termissä voima on neliöity, koska yhtälö ajatellaan tehotasolla toimivaksi. Voiman määrä ilmoitetaan metriä kohden.

Viimeinen termi saadaan yhtälöstä 22 ja on siis epäkoherenteista pistemäisistä värähtelynohtavuuksista koostettu viivamaisen lähteen herättämä värähtelynohtavuus neliöitynä. Esitystapana on tuotettu värähtelynopeus (m/s) herätevoimaa (N) kohti per viivalähteen pituus ( $\sqrt{m}$ ).

Koska kuitenkin lopullisena haluttuna tarkastelutasona on joko tarkastelupisteen värähtelynopeus tai tässä tutkimuksessa vaikuttava voima, käytetään jokaisesta termistä mieluummin sen neliöjuurta ja tehotasolta poistutaan.

Toimenpiteen jälkeen kaava yksinkertaistuu alla olevaan muotoon ja termien välinen yhteys on helppo hahmottaa.

$$\frac{m}{s} = \frac{N}{\sqrt{m}} \cdot \frac{m\sqrt{m}}{sN} \quad (24)$$

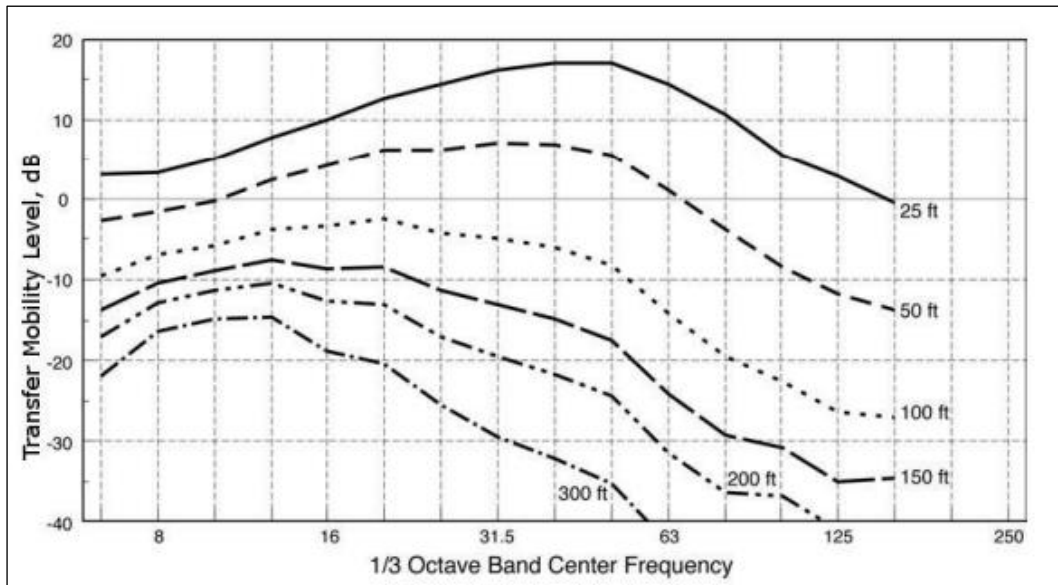
Yllä olevan perusteella on selvää, että muodostetun viivalähteen pituuden pitäisi täsmätä tarkasteltavan junan pituuden kanssa. Koska näin ei useinkaan ole, käytetään osassa tutkimuksia metrin sijaan esimerkiksi yksikköä l, mikä kuvaa värähtelylähteen yksikköpituutta. Tämä vaihtelee junatyypin välillä.

Tästä eteenpäin tarkastelu ja tulokset esitetään logaritmisesti laskutoimenpiteiden ja luettavuuden helpottamiseksi, kuten FTA ohjeistuksessa on esitetty. Menetelmä perustuu alapuolella esitettävän kaavan 25 mukaiseen yhteyteen, joka on perusteltu auki kaavan 21 yhteydessä.

$$L_v = FDL + LSTM \quad (25)$$

Kaavassa  $L_v$  on tietyn kaluston aiheuttama tehollisarvoinen värähtelytaso maaperässä,  $FDL$  on junan karakteristinen voiman tiheystaso ja  $LSTM$  kuvaa viivamaisella lähteellä todettua maaperän värähtelynohtavuuden tasoa. Kaikki suureet esitetään logaritmisesti sekä 1/3 oktaavikaistoittain. Voiman tiheystason määrittäminen vaatii menetelmän mukaan maaperän värähtelynohtavuuden tutkimista. Seuraavaksi esitellään vaiheittain ja pääpiirteittäin FTA esittämä menetelmä sen suorittamiseksi. Ohjeistus on vapaamuotoisesti käännetty FTA:n julkaisusta *Transit Noise and Vibration Impact Assessment Manual, 2018*. [14]

**Määritä** maaperän mobiliteetti pistemäisen herätteen ja tarkastelupisteen välillä. Määrittämisessä maaperää tai rataa kuormitetaan impulssimaisesti voimalla, mikä voidaan mitata. Vasteena syntynyt maaperästä mitattava värähtely mitataan useilla eri etäisyyksillä. Tyypillisesti kuormitus tehdään tiputtamalla voima-anturille huomattavan massan omaava esine tai impulssivasaralla, jossa on integroituna vastaava anturi. Tarkoituksena on luoda värähtelypulssi, joka etenee samaa reittiä kuin arvioitavan liikennöintivälineen aiheuttama värähtely. Saatuna suureena on signaalinkäsittelyn jälkeen mobiliteetti ( $\frac{m}{sN}$ ), mikä kuvaa syntyvän värähtelytason suhteen herätteenä toimineeseen voimaan. Mobiliteetti esitetään 1/3 oktaavikaistoittain. Kuvassa 20 on esitetty pistemäisellä lähteellä määritetty mobiliteetti useille etäisyyksille.



Kuva 20. Esimerkki pistelähteen värähtelyjohtavuudesta maaperässä [14].

Kuvasta voidaan vahvistaa intuitiivinen tulkinta, missä värähtely välittyy parhaiten lähimpään tarkastelupisteeseen (25 ft) ja pidemmillä matkoilla mobiliteetti on heikompa.

Arvioi viivalähteen mobiliteetti maaperässä eri etäisyyksille. Pistelähteet yhdistetään epäkoherentteina, jolloin saadaan viivalähdemäisen herätteen avulla todettu mobiliteetti. Tätä kutsutaan viivalähteen mobiliteetiksi eli line source transfer mobilityksi (LSTM).

Riippuen tarkasteltavan liikennöintivälineen pituudesta, tarvitaan erikseen arvioidava määrä keinotekoisia pistelähteitä radan suuntaisesti joko radalle tai radan välittömään läheisyyteen. Yhdistäminen on esitetty kaavassa

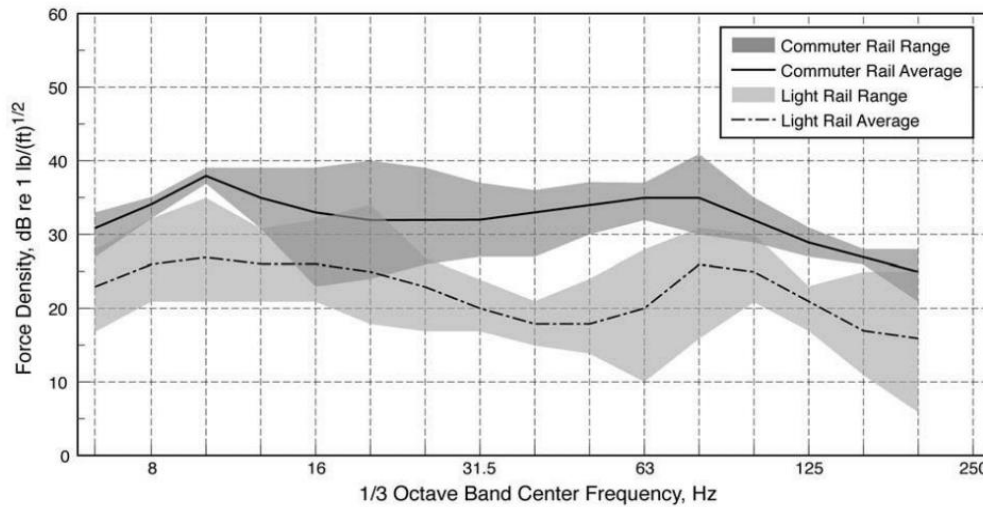
$$LSTM_{y_1} = 10 \log_{10} \left[ d \sum_{i=1}^n 10^{\frac{\gamma_{xi}}{10}} \right], \quad (26)$$

missä  $LSTM_{y_1}$  on viivalähteen mobiliteetti tarkastelupisteessä  $y_1$ ,  $\gamma_{xi}$  on herätteen  $xi$  ja tarkastelupiste  $y_1$  välinen mobiliteetti,  $n$  on herätteen määrä ja  $d$  herätteen välimatka toisistaan. Kaava 26 on yhdenmukainen aikaisemmin esitetyn kaavan 22 kanssa, missä asia on esitetty absoluuttiavaruudessa.

**Määritä** voiman tiheystaso kaavan

$$FDL = L_v - LSTM \quad (27)$$

mukaisesti ja esitä saadut tulokset 1/3 oktaavikaistoittain. Kuvassa 21 on esitetty FTA ohjeesta löytyviä tyypillisiä voiman tiheyden tasoja nopeudella 40 mailia tunnissa.



Kuva 21. FTA esittämät voiman tiheyden tasot [14].

Kuvassa on esitetty voiman tiheyden tasoja lähijunille (commuter) ja raitiotiekalustolle (light rail) nopeudella 40 mph (~60 km/h). Kuvasta voidaan päätellä ainakin se, että voiman tiheyksien välillä on suurta hajontaa. Vastaavia tietoja ei julkisesti ole juurikaan saatavilla eurooppalaisille tutummissa yksiköissä.

Kun voiman tiheys tietylle kalustolle on määritetty yllä olevan ohjeistuksen mukaisesti, voidaan sitä hyödyntää halutulla tarkastelualueella arvioitaessa suunnitteilla olevan radan värähtelyvaikutusta ympäristöön.

## 5.2 Taajuusvaste

Tästä eteenpäin tässä tekstissä käytetään värähtelynjohtavuuden paikalla usein myös termiä taajuusvastefunktio tai englanniksi frequency response function eli frf. Termillä kuvataan kappaleen tai rakenteen dynaamista käyttäytymistä, kun siihen vaikutetaan tietyllä voimalla. Yksinkertaistettuna kappaleen pisteeseen  $x$  syötetty voima tuottaa värähtelyliikkeen eli vasteen pisteessä  $y$ . Kun kappaleeseen tuodaan voima vain yhteen pisteeseen ja vaste mitataan vastaavasti yhdessä pisteessä, on kyseessä ns. SISO-systeemi (single input – single output). Edellä mainittu voidaan esittää yhteyden

$$\text{vaste} = \text{frf} \cdot \text{syöte} \quad (28)$$

mukaisesti, mistä voidaan päätellä kolmannen termin oltaessa pääteltävissä, jos kaksi muuta termiä pysytään selvittämään. ISO-7626-5 puolestaan määrittelee taajuusvastefunktion vapaasti suomennettuna seuraavasti: "Fourier muunnoksesta saatu taajuusriippuvainen suhdeluku liikevasteen ja yksikkövoiman välillä lineaarisessa systeemissä". [43] [44]

Raideliikenteestä johtuvia värähtelyitä tai värähtelyitä tarkasteltaessa mitattavana suurena on yleensä junien aiheuttama vaste. Aiemmin esitetyn kaavan 19 mukaan ei kuitenkaan voida suoraan sanoa, aiheutuuko suuri vaste suuresta syötevoimasta vai maaperän dynaamisista ominaisuuksista eli värähtelynjohtavuudesta vastaavalla taajuusalueella. Ominaisuudet ovat kuitenkin selvitettävissä, jos systeemiin vaikuttava voima tiedetään ja sen aiheuttama vaste voidaan mitata.



Alla oleva taajuusvastefunktioiden teoria on referoitu ja esitetty perustuen Ewingsin ja McConnellin & Varoton kirjoittamiin käsikirjoihin [43][45].

Värähtelysysteemin ominaisuuksia tutkittaessa yleinen menetelmä on käyttää sähködynaamista ravistinta tai impulssivasaraa herätelähteenä. Taajuusvastefunktioiden määrittämisessä käytettävät signaalien analyysityökalut perustuvat puolestaan diskreetistä Fourier-muunnoksessa saatuun kaksipuoleiseen taajuusspektriin, jonka amplitudit  $X_n$  saadaan kaavasta

$$X_n = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k e^{-\frac{2\pi ink}{N}}, n = 1..N, \quad (29)$$

jossa  $N$  on näytepisteiden määrä. [43]

Periaatteessa kappaleen tai maaperän taajuusvastefunktio on kaavan 19 muoto esitettynä seuraavasti:

$$H(\omega) = \frac{X(\omega)}{F(\omega)}, \quad (30)$$

jossa  $H$  on systeemin taajuusvastefunktio,  $X$  vaste ja  $F$  systeemiin syötetty voima. Kaikki termit esitetään taajuuden funktiona. Taajuusvastefunktiosta voidaan puhua myös suoraan nimellä, joka perustuu tarkasteltavaan suureeseen suhteessa voimaan. Koska rautateistä aiheutuvaa värähtelyä ja tärinää tarkastellaan usein nopeustasossa, on hyödyllistä käyttää taajuusvastefunktiona mobiliteettia. [43] [45]

Yllä olevan perusteella on nopeasti huomattavissa yhteys luvussa 4.1 esitettyyn värähtelysysteemiin ja tapaan millä se kehoitetaan jakamaan eri komponentteihin. Taulukossa 5 on esitetty yleisimmät käytössä olevat taajuusvastefunktioiden nimitykset. Englanninkielinen termi on ISO-7626 mukainen ja suomennettu nimitys vapaasti käännetty.

*Taulukko 5. Taajuusvastefunktioiden yleisimmät nimitykset ISO-7626 mukaisesti.*

Vaste	Määritelmä	Nimi
siirtymä (displacement)	$\frac{u(\omega)}{F(\omega)} = H(\omega)$	jousto (receptance)
nopeus (velocity)	$\frac{v(\omega)}{F(\omega)} = Y(\omega)$	liikkuvuus eli mobiliteetti (mobility)
kiihtyvyyys (acceleration)	$\frac{a(\omega)}{F(\omega)} = A(\omega)$	kiihtymiskyky (accelerance)

Signaaliin kuulumattomat komponentit eli melu on yleinen ongelma myös taajuusvastefunktioita määritettäessä. Melua voi olla joko syötteen voimakkuuden tallenteessa tai vastaavasti vasteen nauhoituksessa. Melun vaikutusta arvioidaan pienentämällä suoran voiman ja vasteen suhteen sijasta ns.  $H$ -estimaattoreita.  $H_1(\omega)$  estimaattori sopii käytettäväksi, kun herätetään signaalin oletetaan olevan häiriövapaata ja melua on pelkästään vastesignaalissa.

$$H_1(\omega) = \frac{G_{fx}(\omega)}{G_{ff}(\omega)} \quad (31)$$

$H_2(\omega)$  estimaattori puolestaan sopii paremmin käytettäväksi, kun melua oletetaan olevan herätesignaalisissa.

$$H_2(\omega) = \frac{G_{xx}(\omega)}{G_{xf}(\omega)} \quad (32)$$

Koska maaperän taajuusvastefunktioita määritettäessä melun arvioidaan yleensä olevan pääasiallisesti vastepään signaalisissa, esitetään tässä  $H_1(\omega)$  estimaattorin määrittäminen tarkemmin. Kaavassa 31  $G_{fx}(\omega)$  ja  $G_{ff}(\omega)$  ovat herätteen ja vasteen välinen ristispektri ja herätteen autospektri vastaavassa järjestyksessä. Autospektri  $G_{ff}(\omega)$  saadaan kaavasta

$$G_{ff}(\omega) = \hat{f} *_{f(\omega)} \cdot \hat{f}_f(\omega) , \quad (33)$$

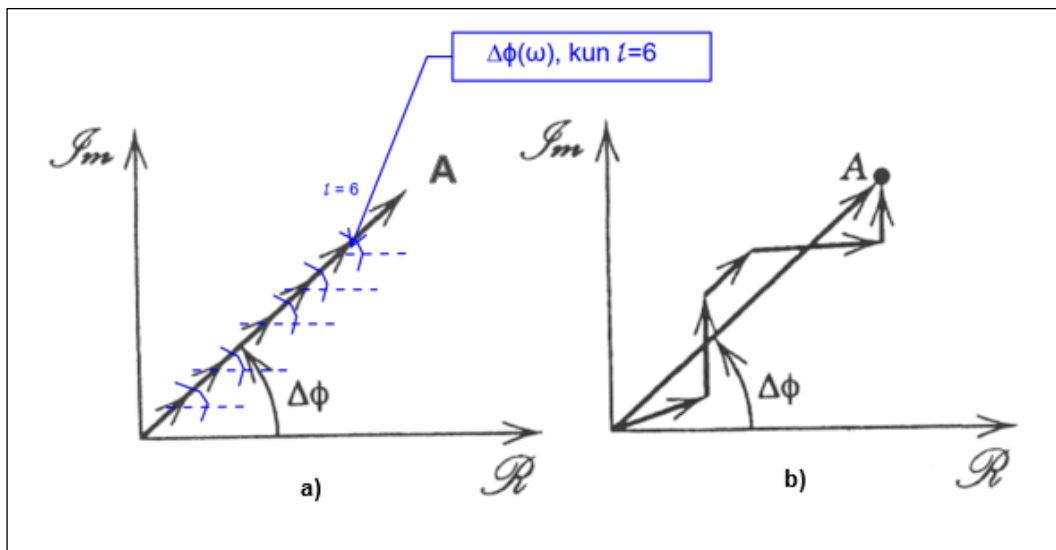
jossa  $\hat{f} *_{f(\omega)}$  on taajuusspektrin komponentin  $\hat{f}_f(\omega)$  kompleksikonjugaatti. Kertolaskussa imaginääriosaa katoaa, eli autospektrillä ei ole vaihetietoa. Ristispektri  $G_{fx}(\omega)$  kanavien  $f$  (voima) ja  $x$  (vaste) välille saadaan kaavan

$$G_{fx}(\omega) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N f^t(\omega) \cdot x^{t*}(\omega) \quad (34)$$

mukaisesti, jossa  $f^t(\omega)$  on herätesignaalin amplitudi tapahtumalle  $t$  ja  $x^{t*}(\omega)$  vastesignaalin amplitudin kompleksikonjugaatti samalle tapahtumalle.  $N$  on tapahtumien kokonaismäärä ja operaatio suoritetaan taajuuskoreittain. Yhtälön 34 tuloksena saadaan jokaiselle tapahtuman  $t$  näyteparille kompleksiluku eli ristispekt-rivektori. Näytepari siis tarkoittaa samasta tapahtumasta nauhoitettua heräte- ja vastesignaalia, joista voidaan muodostaa ristispektri. Ristispektri kuvaa yleisellä tasolla kahden signaalien jaettua tehoa tai voimaa.

Näytepareista saadut ristispektrit ovat kompleksisia eli ne voidaan piirtää kompleksitasolle. Ristispektrin vaihe kuvaa signaalien  $f$  ja  $x$  välistä vaihe-eroa tapahtumassa  $t$ . Normi eli vektorin pituus kuvaa signaalien  $f$  ja  $x$  tuloa samassa tapahtumassa. Koska kaavan 34 mukaan tuotettu ristispektri  $G_{fx}(\omega)$  koostuu useamman erillisen tapahtuman keskiarvosta, puhutaan samassa yhteydessä usein myös spektrin ns. estimaatista.

Kuvassa 22 on avattu ristispektrin visuaalinen yhteys matemaattiseen esitykseen.



Kuva 22. Ristispektri. Muokattuna [45].

Kuvassa on esitetty kaksi eri ristispektriä eri signaalien välillä. Ristispektrissä **a)** signaaleista  $f$  ja  $x$  on olemassa 6 näyteparia eli  $N$  on vastaavasti 6. Jokainen näytepari omaa saman vaihe-eron  $\Delta\phi(\omega)$  signaalien  $f$  ja  $x$  välillä mistä johtuen jokaisen ristispektrivektorin suunta on sama ja kaavan 34 summaoperaattorin vaikutus huomioidaan summaamalla ne myös kompleksitasolla eli piirtämällä peräkkäin.

Hahmottamisen helpottamiseksi jokaisen vektorin normi on kuvassa asetettu samanmittaiseksi. Kun origosta pisteeseen  $A$  muodostuneen kokonaisvektorin pituus vielä jaetaan näytemäärällä  $N$  ja lasketaan kulma  $\Delta\phi$  reaaliakselista edellä mainittuun vektoriin, on signaalien  $f$  ja  $x$  välinen ristispektri eli muodostettu keskiarvona (estimaatti) jokaisesta näyteparista.

Kohdan **a)** tilanne kuvastaa signaalien  $f$  ja  $x$  keskinäistä samanmukaisuutta tavalla, joka ei sisällä mitään epävarmuutta. Ristispektrissä **b)** vektorien suunta ja pituus vaihtelevat, mutta epävarmuus on silti kohtalaisen pientä.

Yllä olevan perusteella on helppo hahmottaa kolmas tilanne, missä signaalien  $f$  ja  $x$  välinen vaihe-ero vaihtelisi suuresti. Tällöin yksittäiset ristispektrivektorit pyörisivät origon ympärillä ja muodostunut kokonaisvektori olisi huomattavan lyhyt näytemäärällä  $N$  jakamisen jälkeen. Eli korrelaatio signaalien välillä olisi huomattavan pientä. Toisin sanoen jaettu voima tai teho olisi myös pientä ja sen myötä myös muodostettava mobiliteetti.

Kun kaavan 31 mukaisesti ristispektrin estimaatti vielä normalisoidaan herätevoiman suhteen, on taajuusvastefunktion  $H_l$  estimaattori muodostettu. Yllä oleva operaatio suoritetaan jokaisella taajuuskorin alueella minkä jälkeen taajuusvastefunktiota käsitellään esimerkiksi 1/3 oktaavikaistoihin keskiarvoistettuna.

## 5.3 Koherenssi

Ristispektrin keskiarvoon perustuva määritelmä antaa samalla signaalien keskinäiseen samankaltaisuuteen eli korrelaatioon tarkastelutyökalun. Kun saadun ristispektrin estimaatin neliö vielä normalisoidaan signaalien  $f$  ja  $x$  tehospektrien  $S_{ff(\omega)}$  ja  $S_{xx(\omega)}$  tulolla kaavan

$$COH^2 = \frac{[S_{fx(\omega)}]^2}{S_{ff(\omega)}S_{xx(\omega)}} \quad (35)$$

mukaisesti, saadaan selville signaaliparin koherenssi  $COH$ , mikä on tärkeä työkalu taajuusvastefunktioiden laadunvalvonnassa. Koherenssilla ei ole yksikköä ja sen arvo vaihtelee välillä 0 ja 1. Mikäli systeemi on täysin lineaarinen ja systeemiin ei pääse melua, on koherenssi 1 silloin kun signaalien  $f$  ja  $x$  näytteiden vaihe-ero pysyy jatkuvasti samana. Vastaavasti jos koherenssi on 0 ei signaalien välillä ole minkäänlaista yhteyttä. Koska ristispektrit ja tehospektrit perustuvat signaalien keskiarvoon, ei koherenssia voida määrittää, ellei vertailtavia näytepareja ole vähintään kahta.

Taajuusvasteita määritettäessä signaalien välinen koherenssi ei todellisuudessa käytännössä ole koskaan yksikön (1) suuruinen. Syiksi McConnell ja Varota esittävät seuraavia:

**Materiaalin epälineaarisuus.** Epälineaarisuus vaikuttaa koherenssiin kahdella tavalla. Ensimmäiseksi herätteen ja voiman signaalien välien vaihe-ero on riippuvainen vasteen amplitudin suuruudesta eli vaihe-ero vaihtelee dataikkunan vaihtuessa. Toisekseen epälineaarisia rakenteita (tai maaperää) herätettäessä rakenteen resonanssitaajuuden syttymisen lisäksi värähtely voimistuu myös resonanssitaajuuden yläpuolisilla kerrannaisilla, jotka eivät vastaa herätteen signaalispektriä.

**Ongelmat signaalinkäsittelyssä ja ikkunoinnissa.** Oletetaan että herätetty värähtely ei vaimene nollaan määritetyn ikkunan aikana. Tällöin osa signaalin tehosta "vuotaa" viereisille taajuuksille ja koherenssi tippuu.

**Aikaviiveet signaalien välillä.** Testattavasta rakenteesta riippumaton lineaarinen vaiheviive (phase lag) heikentää signaalien välistä koherenssia sekä vääristää taajuusvastefunktiota. Ongelma voi aiheutua esimerkiksi mittauskalustosta.

**Melu mukana mittauksessa.** Koherenssin arvo on riippuvainen signaalien sisältämässä melusta. Esimerkiksi herätteen signaali-kohinasuhteen  $SNR(\omega)$  yhteys koherenssiin  $COH$  saadaan kaavasta

$$iSNR(\omega) = \frac{COH^2(\omega)}{1 - \gamma^2(\omega)}, \quad (36)$$

kun käytössä on  $H_I$  estimaattori. Kaavasta 36 on nähtävissä hyvän koherenssin olevan mahdollista vain, kun syötteen signaali-kohinasuhde on suuri. [43] [45]

Koherenssissa on vahva yhteys todennäköisyysmatematiikassa käytettävään kaavaan

$$\rho_{fx} = \frac{\sigma_{fx}}{\sigma_f \sigma_x}, \quad (37)$$

mistä saatu normalisoitu korrelaatiokerroin  $\rho_{fx}$  kuvaa kuinka hyvin  $f$ :n arvot ovat sidoksissa  $x$ :n arvoihin. Kertoimen arvot ovat välillä  $-1, +1$ . Kaavassa  $\sigma_f$  sekä  $\sigma_x$  ovat signaalien  $f$  ja  $x$  keskihajonnat.  $\sigma_{fx}$  on signaalien välinen kovarianssi. [43] [45]

## 6 Koejärjestelyt

Tässä luvussa kuvataan, miten Hausjärven Monnissa toteutetut maaperän värähtelyjohtavuuden tutkimukset suoritettiin ja todetaan tutkimusalueen olennaisimmat mittaustuloksiin vaikuttavat tekijät. Esitellään käytetty kalusto ja kerrotaan mittaussuunnitelman olennaisimmat asiat. Lisäksi käsitellään lyhyesti junien värähtelyvasteiden mittaaminen.

### 6.1 Tutkimusalueen kuvaus

Tutkimukseen liittyvät mittaukset suoritettiin Helsinki–Tampere-pääradan varrella Monnin kylässä Hausjärvellä. Julidata.fi-palvelun mukaan sijainti on noin 64 ratakilometriä Helsingistä Tampereen suuntaan. Paikka valittiin etukäteen oletetun hyvän tärinänjohtavuuden ja rataosuuden monipuolisen ja runsaan liikenteen vuoksi. Väyläviraston yhteysvälikortin mukaan alkuvuonna 2020 Kerava–Riihimäki-välillä kulki noin 180 henkilö- ja tavarajunaa vuorokaudessa. Välillä liikkuu myös Kouvolan suunnalta tulevaa venäläistä rautatiekalustoa, mikä Hyvinkään kohdalta jatkaa Hangon suuntaan. [46]

Alueella ei mittaushetkellä todettu aistinvaraisesti muita jatkuvia värähtelylähteitä. Monninlinjan raskas ajoneuvoliikenne oli huomattavissa kiihtyvyyssantureiden tuottamissa aikasignaaleissa, mutta varsinaiset tutkimukseen liittyvät mittaukset suoritettiin ajanhetkillä, jolloin raskasta liikennettä ei ollut. Lisäksi mittaushetkellä otettiin näytteitä maaperän taustavärähtelystä, jotka on esitetty värähtelyjunien vasteiden kanssa taulukossa 7. Tutkimusalueen likimääräinen sijainti (tummennettuna) on esitetty kuvassa 23.



Kuva 23. Tutkimusalueen sijainti (<https://gtkdata.gtk.fi/maankamara/> / 2021).

Tutkimusalueen kohdalla sähköistetty kaksoisraide kulkee noin 2,5 metriä korkean ja 15 metriä leveän penkereen päällä, jonka rakennetta ei tarkemmin tutkittu. Liikenneviraston vanhan suunnitelmaselostuksen mukaan mittauspaikan kohdalla radan alusrakenneluokka on 3 ja päällysrakenneluokka D. Mitoittavana akselipainona on 250 kN [47].

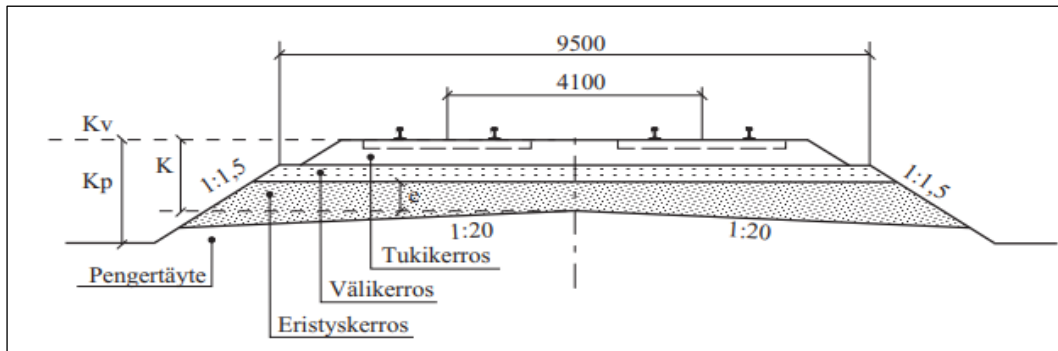
Penkereellä voidaan olettaa olevan värähtelyn leviämiseen liittyviä ominaisuuksia. Esimerkiksi Talja ja muut toteavat penkereen vaikutuksen olevan suurin lähellä rataa ja etäämmällä radasta maapohjan ominaisuuksien olevan merkittävämpiä. [12]

Kuvassa 24 on esitetty yleiskuva ratapenkereestä mittauspaikalla.



*Kuva 24. Ratapenger mittauspaikalla. Katsomissuunta etelään.*

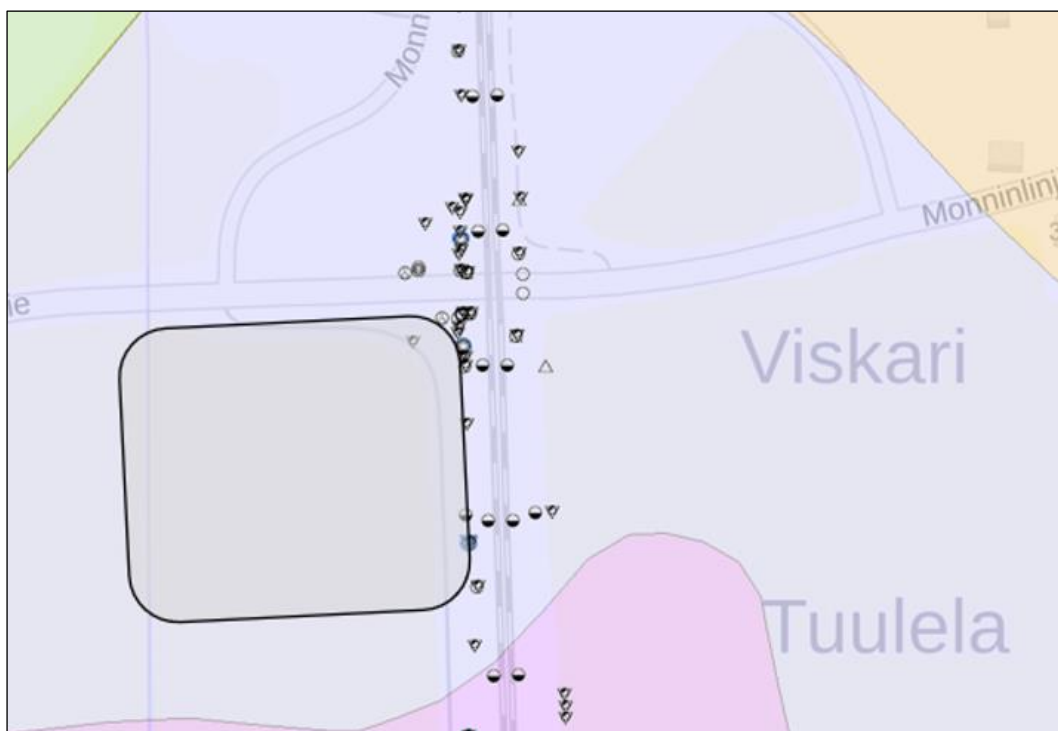
Ratapenkereen ulkolaidan etäisyys radan keskipisteestä mittausalueella on noin 9 metriä ja sama geometria jatkuu kumpaankin suuntaan. Penger mittausalueen kohdalla oli jokseenkin kasvillisuuden peitossa, mutta ohuen pintakerroksen poistamisen jälkeen ratapenger vaikutti olevan murskeesta tehty. Ratojen rakenteita on käsitelty tarkemmin luvussa 2.2 ja ratojen normaalipoikkileikkauksia on esitetty Väyläviraston rautateitä käsittelevissä ratateknisissä ohjeissa. Kuvassa 25 on esitetty tutkimusalueella oletettavasti toteutettu ratapenkereen poikkileikkaus.



Kuva 25. Ratapenkereen normaalipoikkileikkaus [7].

## 6.2 Tutkimusalueen pohjasuhteet

Alueen pohjasuhteet ovat kohtalaisen hyvin tiedossa. Geologian tutkimuskeskuksen (GTK) ylläpitämän pohjatutkimusrekisterin mukaan tutkimusalueen pinta- ja pohjamaalajina on hiesu. Väyläviraston tilauksesta alueella on myös suoritettu pohjatutkimuksia syksyllä 2020. Syksyn 2020 pohjatutkimukset on suoritettu radan suuntaisesti, eikä uudempia tietoja ollut saatavilla värähtelyn vastaanottoalueella liikuttaessa radalta lännen suuntaan. Kuvassa 26 on esitetty tutkimusalueen julkisesti saatavilla olevat maaperän tutkimustulokset sekä hiesualueen laajuus. Tutkimusalue korostettu.



Kuva 26. Tutkimusalueen pohjasuhteet ([gtkdata.gtk.fi/pohjatutkimukset](http://gtkdata.gtk.fi/pohjatutkimukset)).

Kuvasta huomataan, että mittausalue sijoittuu kokonaisuudessaan hiesupatjalle. Tarkalleen mittauspaikan kohdalla ei ole suoritettu pohjatutkimuksia, joilla kallion pinta voidaan tarkasti todeta, mutta Monninlinjan alikulun kohdalla (70 metriä mittauskohdasta pohjoiseen) suoritettut porakonekairaukset ovat tavanneet kallion noin 20 metrin syvyydessä.



Lisäksi maanäytteitä on otettu eri syvyyksiltä tutkimusalueen kohdalta ja niiden perusteella maaperä on hiesua, kuten maaperäkartassa osoitetaan. Kuvassa 26 esitettyjen koko alueen kairausten syvyydet ennen kallion tapaamista ovat olleet luokkaa 15–20 metriä, joten mittauspaikan pehmeän kerroksen osuudeksi ratalinjan läheisyydessä ja viereisellä pellolla voidaan olettaa noin 20 metriä. Ratapenkereen ja viereisen pellon, jossa valtaosa mittauspisteistä sijaitsi, välissä kulkee nykyisin vähällä käytöllä oleva noin 5 metriä leveä tie (Radanvarsitie) matalan penkereen päällä. Kokonaisuuteen kuuluu myös matala oja tien ja pellon välissä. Tien rakenteita ei tämän työn yhteydessä tutkittu sen tarkemmin. Oletettavasti niillä on vähäinen vaikutus maan pinnalla etenevien värähtelyaaltojen käyttäytymiseen.

## 6.3 Keinoheräte

Erilaiset vasarat ja niiden tuottamat iskut ovat yleisiä rakenteiden ja koneen osien värähtelynjohtavuuden tutkimuksiin liittyviä herätteitä. Herätteen luomiseen tarvitaan periaatteessa vain massaltaan määritetty kappale, jolla tutkittava kappale herätetään värähtelemään. Yleensä käytössä on impulssivasara tai vastaava mittauslaite. Vasaran lyöntipäähän on integroitu laite, mikä kykenee määrittämään törmäyshetkellä siihen vaikuttavan voiman. Tämä törmäysvoima vaikuttaa mekaniikan kolmannen lain mukaan sekä vasaran ja rakenteen suuntaan. Voiman suuruuden määrittää törmäävän kappaleen nopeus ja massa. Käyttäjä kontrolloi törmäävän kappaleen nopeutta ja sitä kautta herättävän voiman suuruutta. [43]

Vastaavasti maaperän värähtelynjohtavuuden määrittämiseen tarvitaan keinoheräte. Tässä tutkimuksessa keinoheräte valmistettiin kiinnittämällä kiihtyvyyssanturi painavan vasaran eli lekan lyöntipäähän kiinni. Maaperään vaikuttava voima  $F$  on yksinkertaisesti Newtonin 2. lain mukaan

$$F = ma, \quad (38)$$

missä  $a$  on lyöntihetken osumakohdan hidastuvuus ja massa ( $m$ ) lekan massa vaakatasossa pidettäessä. Kuvassa 27 on esitetty Monnissa käytetty keinoheräte.



*Kuva 27. Käytetty keinoheräte.*

Kyseessä on yksinkertainen systeemi, missä lekaan on kiinnitetty kiihtyvyyssanturi. Maaperään uppoamisen takia iskut täytyy kohdistaa aluslevyyn, joka jakaa kuorman suuremmalle pinta-alalle. Tässä kehitysversiossa aluslevynä toimi 400 mm x 400 mm kokoinen ja 25 mm paksuinen filmivaneri. Kuvassa näkyy myös aluslevyn alla käytetty ohut solumuovikappale, jonka tarkoituksena oli pidentää kontaktiaikaa ja testata vaikutusta herätettäviin taajuualueisiin.

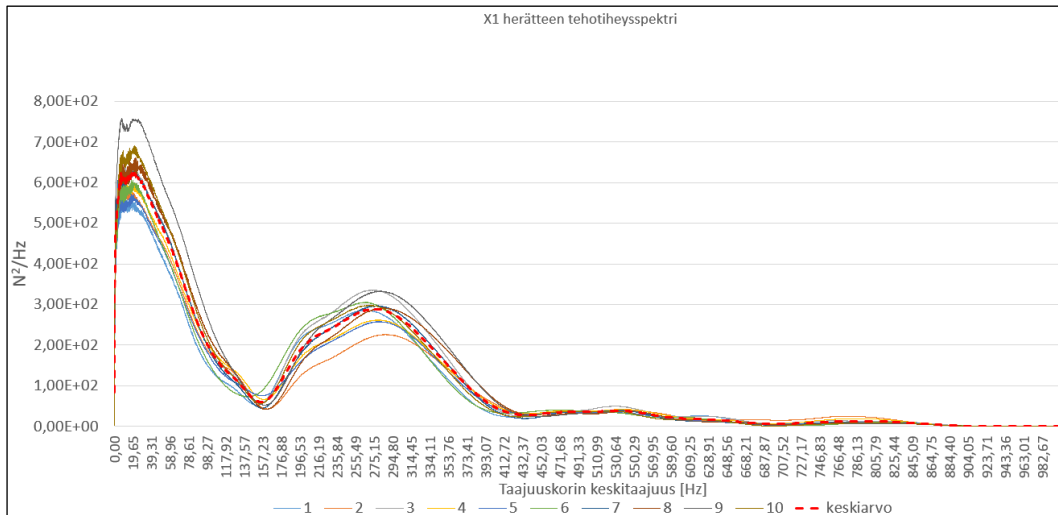
Monnin mittauksissa todettiin, että lekan ja aluslevyn kontaktiaika on erittäin lyhyt vaimennuksenkin jälkeen, mistä syystä vastaavasti hidastuvuuden huippuarvo on korkea. Mittauksien aikana todettu hidastuvuus oli välillä 500–700 g mikä tarkoittaa vastaavasti ~27 000 – 37 000 Newtonin voiman huippuarvoa erittäin lyhyellä ajanhetkellä. Keinoherätteen massaksi mitattiin 5,45 kilogrammaa.

Kun vasaran pää kohtaa testirakenteen tai aluslevyn, on niihin tuotettu voima aikatasossa tarkasteltuna puolikkaan siniaallon muotoinen ja vain muutaman millisekunnin mittainen jakso. Taajuustasossa voima on lähes tasainen tiettyyn pisteeseen asti, minkä jälkeen se nopeasti pienenee. Impulssimaisen iskun herättämä taajuusalue on riippuvainen lekan ja aluslevyn jäykkyyksistä sekä lekan massasta. Systeemin ominaistaajuus  $f_0$  saadaan yhtälöstä

$$f_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (39)$$

missä  $k$  on pintojen yhdistetty jäykkyys ja  $m$  lekan pään massa. Ominaistaajuuden yläpuolella voiman siirtäminen aluslevyyn ja sitä kautta maaperään on haastavaa. Jäykkyyksiä muuttamalla tämän taajuuden sijaintiin voidaan vaikuttaa ja usein sopivan yhdistelmän löytäminen vaatii useita yrityksiä erilaisilla yhdistelmillä. [43] [44]

Kuvassa 28 on esitetty herätepisteessä X1 luotujen 10 impulssin jokainen tehotehosspektri ja niiden energettinen keskiarvo.



Kuva 28. Herätepisteessä X1 tehotehosspektri.

Tehotehosspektri kuvaa signaalin värähtelyn tehon jakautumista eri taajuuskoreihin. Kuvaajasta huomataan, että keinoheräte tuottaa maaperään suurimman voiman 0–50 Hz taajuusalueella. Tämän jälkeen systeemiin tuotettava voima pienenee jyrkästi ja noin 150 Hz taajuudella ilmenevä kuoppa on oletettavasti systeemin resonanssitaajuus kaavan 39 mukaisesti. Tällöin leka ja aluslevy värähtelevät resonanssissa ja lekan voimantuotto maaperään on pientä.

## 6.4 Mittausten toteutus

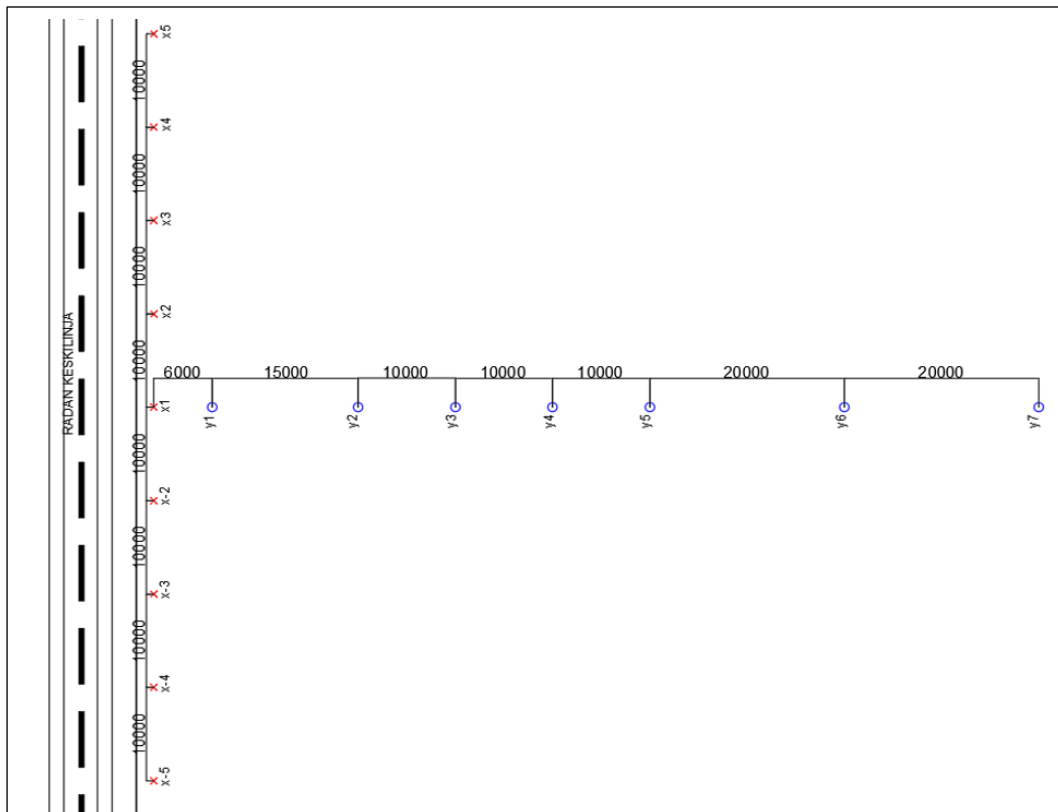
Teknisten ongelmien takia mittaukset piti jakaa kahdelle päivälle. Ensimmäisenä mittauspäivänä 17.11.2021 mitattiin yhden herätepisteeseen ja vastaanottopisteiden välinen maaperän värähtelynjohtavuus sekä junien aiheuttamat värähtelyt. Tällöin mittausalueen pellon osuus oli huomattavan märkä. Vettä alkoi kerääntyä välittömästi kiihtyvyyssantureiden asennusta varten kaivettujen kuoppien pohjalle, mutta sillä ei ollut suoraa vaikutusta mittalaitteiden toimintaan tai nähtävää vaikutusta mittauksiin.

Jälkimmäisenä mittauspäivänä 30.11.2021 maaperän värähtelynjohtavuus määritettiin keinoherätteen avulla kahdeksasta eri pisteestä vastaanottopisteisiin. Tänä päivänä alueella oli noin kymmenen astetta pakkasta ja maan pinta oli 5–10 sentin syvyyteen asti roudassa. Kiihtyvyyssanturit asennetaan hyvän kiinnityksen takaamiseksi pieniin monttuihin, joten asennustyön yhteydessä routaantunut kerros poistettiin.

Herätepisteiden ja vastaanottopisteiden sijainnit esitetään kahden eri akselin suhteen. Pohjois-etelä suunnassa kulkeva rautatie on akseli, jonka mukaan herätepisteet X1 → X5 ja X-2 → X-5 sijoitettiin ratapenkereen juurelle muodostaen ns. herätelinjan. Mittauslinja puolestaan on kohtisuorassa rataa ja herätelinjaa kohti. Mittauspisteet Y1–Y7 erkaantuvat mittalinjaa pitkin radasta ja herätelinjasta. Lyhyin välimatka on siis herätepisteen X1 ja mittauspisteen Y1 välillä. X1 voidaan ajatella mittausjärjestelmän origoksi.

Herätepisteet sijaitsivat radan penkereen juurella, radan RSU-alueen ulkopuolella, noin yhdeksän metriä kaksoisraiteen keskilinjasta ulospäin lännen suuntaan. Pisteen etäisyys toisistaan oli noin 10 metriä ja niitä oli yhteensä 9 kappaletta. Jokaisessa pisteessä tuotettiin vähintään 10 impulssimaista herätettä edellä kuvatulla laitteistolla. Maaperään keinoherätteellä aiheutettu värähtely mitattiin kohtisuorassa linjassa rataa vasten. Etäisyydet radan keskustasta olivat 15, 30, 40, 50, 60, 80 ja 100 metriä. Herätepisteillä maaperän värähtelynjohtavuuden määrittäminen on esitelty luvussa 5.

Kuvassa 29 on esitetty mittausjärjestelyt alueella.



Kuva 29. Heräte- ja mittauspisteiden sijainti alueella.

Vastaanottopiste Y3 ei ollut käytössä junien värähtelyjen tallentamisen aikana 17.11.2021. Muutoin mittausjärjestelyt olivat samanlaiset kumpanakin mittauspäivänä.

Taulukossa 6 on ilmoitettu kuvan 29 sisältö numeerisesti. Herätepisteiden osalta positiivinen etäisyys tarkoittaa liikkumista kohti etelää mittalinjasta ja negatiivinen vastaavasti pohjoisen suuntaan.



Taulukko 6. Mittauspisteet.

Herätepiste	Etäisyys mittalinjasta [m]	
x1	0	
x2	10	
x3	20	
x4	30	
x5	40	
x-1	-10	
x-2	-20	
x-3	-30	
x-4	-40	
Vastaanottopiste	Etäisyys radasta [m]	Etäisyys herätepisteestä x1 [m]
y1	15	6
y2	30	21
y3	40	31
y4	50	41
y5	60	51
y6	80	71
y7	100	91

Kumpanakin mittauspäivänä ja kummassakin mittausosuudessa maaperän värähelyt mitattiin kiihtyvyyssantureille, jotka kiinnitettiin noin 40 cm mittaisilla maapikeillä tai maaruuveilla maaperään. Maan pintakerros poistettiin ennen kiihtyvyyssantureiden asentamista. Kuvassa 30 on esitetty kolmiaksisiaalisen kiihtyvyyssanturin asennus maaperään 15 metrin etäisyydellä kaksoisraiteen keskilinjasta.



Kuva 30. Kiihtyvyyssanturi kiinnitettynä maaperään maaruuvilla.

Tässä tutkimuksessa käytetyt kiihtyvyyssanturit olivat Integrated Electronics Piezoelectric eli IEPE-tyyppisiä malleja. IEPE-tyyppisten kiihtyvyyssantureiden etuina ovat muun muassa pienet häiriöt, suuri kiihtyvyyden mittauskkyky, hyvä tarkkuus ja pieni koko. [48]

Keinoherätteessä käytettiin PCB353B14 kiihtyvyyssanturia ja maaperän mittauspisteissä MFF KS823B (3-aks.) ja MFF KS48 (1-aks.) kiihtyvyyssantureita. Kiihtyvyyssantureita ohjattiin ja niiden tuottama signaali tallennettiin IMC Cronos Flex-400 testausjärjestelmällä, jota hallinnoi IMC Studio ohjelmisto. Näytteiden pituudeksi asetettiin oletukseksi 8192 millisekuntia ja näytteenottotaajuudeksi 2000 Hz.

Varsinainen mittaus eteni seuraavasti. Tutkimuksen tekijä herätti maan värähtelemään herätepisteissä X1...X5 ja X-2...X-5. Tutkimuksen toinen ohjaaja valvoi mitauksia ja nauhoitettavan signaalin laatua reaaliajassa. Näin pystyttiin erottamaan pois mahdolliset herätteen aiheuttamat tuplaosumat tai muut häiriöt. Mittaus keskeytettiin junien tai muiden häiriöiden ajaksi. Kun maan värähtelynjohtavuus oli määritetty, vaihdettiin laitteiston mittaasetukset ja ohi ajavien junien aiheuttamat värähtelyvasteet tallennettiin.

Kiihtyvyyssantureita käytettäessä tallennettava suure on tuleva jännite, minkä mitauslaitteisto muuntaa kiihtyvyydeksi.

## 6.5 Signaalinkäsittely ja värähtelynjohtavuuden määrittäminen

Käsiteltävä data on 16 384 näytteeseen näytteistetty signaali, mikä näytteenottotaajuudella 2 000 Hz vastaa 8 192 millisekunnin mittaista signaalia kaavan

$$t = \frac{N}{f_s} \quad (40)$$

mukaisesti. Kaavassa  $N$  on signaalin näytteiden määrä,  $f_s$  näytteenottotaajuus ja  $t$  signaalin pituus sekunteina. IMC Famos (myöhemmin Famos) ohjelmisto käyttää nopeaa Fourier muunnosta (FFT) signaalia käsitellessään, minkä vaatimuksena signaalin näytteiden määrän täytyy olla luku 2 korotettuna johonkin potenssiin. Tässä tapauksessa  $2^{14}$ . Käytettävä taajuusresoluutio  $\Delta f$  saadaan vastaavasti kaavan

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} \quad (41)$$

mukaisesti. Taajuusresoluutio kuvaa FFT:stä saatavien taajuusspektrien taajuuskorien leveyttä. Tässä tutkimuksessa näytteenottotaajuus ja signaalin pituus valittiin tarkoituksella varovaisen suuriksi. Nyquistin teoreeman mukaan näytteenottotaajuuden tulee olla vähintään kaksinkertainen signaalin suurimpiin tarkasteltaviin taajuuskomponentteihin verrattuna. Vaatimus täytettiin reilusti. IMC Studio (myöhemmin Studio) käyttää automaattisesti AAF-suodatinta vaimentaakseen Nyquistin rajataajuuden yläpuolella olevat taajuuskomponentit.

Varsinainen signaalinkäsittely eteni tästä yhdistämällä jokainen näyte tai segmentti samaksi signaaliksi, joka käsiteltiin ikkunoittain ikkunan pituuden ollessa yhdenmukainen yhdistettyjen segmenttien kanssa.

Famoksessa on mahdollista valita käytettäväksi erilaisia ikkunointeja (windowing) ja niiden limityksiä. Erilaisia vaihtoehtoja limityksen suhteen kokeiltiin, mutta niiden vaikutus huomattiin lopulta pieneksi. Lopullinen data päädyttiin käsittelemään pelkällä suorakulmion (rectangle) muotoisella ikkunoinnilla, jota myös McConnell ja Varoto suosittelivat käytettäväksi. Värähtelytutkimuksissa usein käytettävä Hanning-ikkunointi ei edellä mainittujen mukaan pääsääntöisesti sovellu käytettäväksi impulssimaisia signaaleja tarkisteltaessa. [45]

Taajuusvastefunktioiden määrittäminen on signaalinkäsittelyohjelmistojen perustyökaluja. Famoksessa taajuusvastefunktiot muodostetaan määrittämällä käytettävät signaalit ja ikkunointi. Tämän jälkeen laskenta etenee taajuuskoreittain automaattisesti. Taajuusvastefunktioita käsittelevän luvun 5.2 mukaan valittiin estimaattoriksi  $H_1$  ja tuotettava suure on käytännöllisyyden mukaisesti mobiliteetti. Yksikkönä on  $\frac{\text{ms}}{N}$  eli värähtelyn hiukkasnopeuden tehollisarvon suuruus per maaperään syötetty 1 Newtonin voima herätepisteestä. Kiihtyvyyssantureiden tieto on nimensä mukaisesti kiihtyvyyttä, joten signaalit oli integroitava kertaalleen nopeustasoon pääsemiseksi. Herätepään signaalin muodostaminen on käsitelty luvussa 6.3 ja sen toteutus on yksinkertainen kertolasku Famoksessa suoritettuna taajuuskoreittain.

Taajuuskoreittain esitetty mobiliteetin suuruus vaihtelee suuresti. Tämän ja käytännöllisyyden takia taajuusvasteen suuruus keskiarvoistettiin energeettisesti 1/3 oktaavikaistoihin eli terssikaistoihin. Keskiarvot laskettiin alaspäin 250 Hz terssikaistasta kaavan

$$f_{kesk_{n-1}} = \frac{f_{kesk_n}}{2^{\frac{1}{3}}} \quad (42)$$

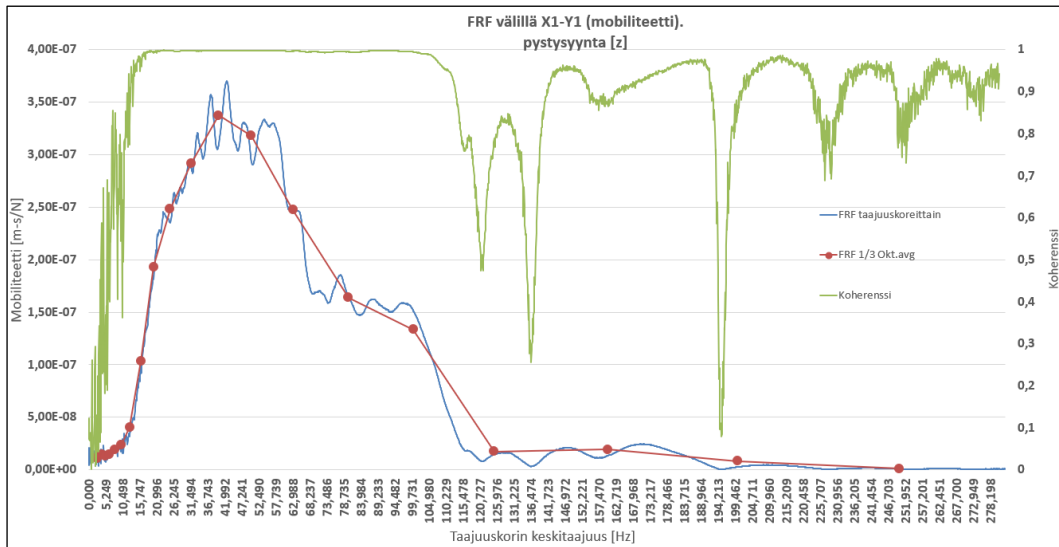
mukaan, missä  $f_{kesk_n}$  on 250 Hz keskiarvoisen omaava terssikaista. Terssikaistojen keski- ja rajataajuuksien määrittäminen on esitetty esimerkiksi standardeissa ISO 266-1997 *Acoustics – Preferred frequencies* ja IEC-61260-2014 *Electroacoustics – Octave band and fractional octave band filters*. [49] [50]

Taajuusvastefunktion energeettinen keskiarvo  $FRF_l$  terssikaistalle  $l$  saadaan terssikaistojen rajojen määrittämisen jälkeen kaavalla

$$FRF_l = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N frf_i^2} \quad , \quad (43)$$

missä  $frf_i$  on taajuuskorin  $i$  taajuusvastefunktio ja  $N$  terssivälille sopivien taajuuskorien lukumäärä. Työssä taajuusresoluutio muodostui kaavan 41 mukaan tasolle 0,12 Hz. Käytetty resoluutio on tarpeettoman tarkka ottaen huomioon menetelmän muut luonnolliset epävarmuudet. Kuvassa 31 on esitetty taajuusvastefunktio (FRF) ja koherenssi välillä X1–Y1.

Keinoherätteellä aiheutetut värähtelyvasteet taajuuspainotettiin ISO 2631-2 mukaisesti. Vastaavaa taajuuspainotusta käytettiin myös junien värähtelyvasteita tutkittaessa.



Kuva 31. FRF ja Koherenssi välillä X1–Y1.

Kuvasta huomataan, kuinka sinisellä käyrällä esitetty taajuuskoreittain laskettu taajuusvastefunktio vaihtelee huomattavasti eri taajuuksilla, mutta tasoittuu terssikaistoihin keskiarvoistamisen jälkeen. Punaisella viivalla ja ympyröillä on esitetty terssien keskitäajuudet välillä 1–250 Hz. Signaalien välinen ennustettavuus eli koherenssi on pääsääntöisesti lähellä arvoa yksi (1), sillä heräte- ja vastapisteen etäisyys on vain 6 metriä.

Mobiliteetti on määritelmän mukaan huomattavan pieni arvo ja suuruusluokan vaihtelu voi olla suurta siirryttäessä kauemmaksi herätepisteestä. Tästä syystä on käytännöllistä esittää taajuusvastefunktio logaritmisesti desibeleinä. Referenssiarvoksi  $FRF_{ref}$  valittiin  $\frac{m/s}{N}$ , mikä helpottaa vertailun tekemistä Verbrakenin ja muiden Belgiassa suorittamiin tutkimuksiin. Taajuusvastefunktion  $frf_l$  desibeliarvo  $FRF_l [dB]$  terssikaistalle  $l$  saadaan tämän jälkeen kaavasta

$$FRF_l [dB] = 20 \log_{10} \frac{frf_l}{FRF_{ref}}. \quad (44)$$

Myös kuvassa 31 taajuuskoreittain esitetty koherenssi keskiarvoistettiin terssiin aritmeettisesti kaavan

$$COH_l = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N coh_i \quad (45)$$

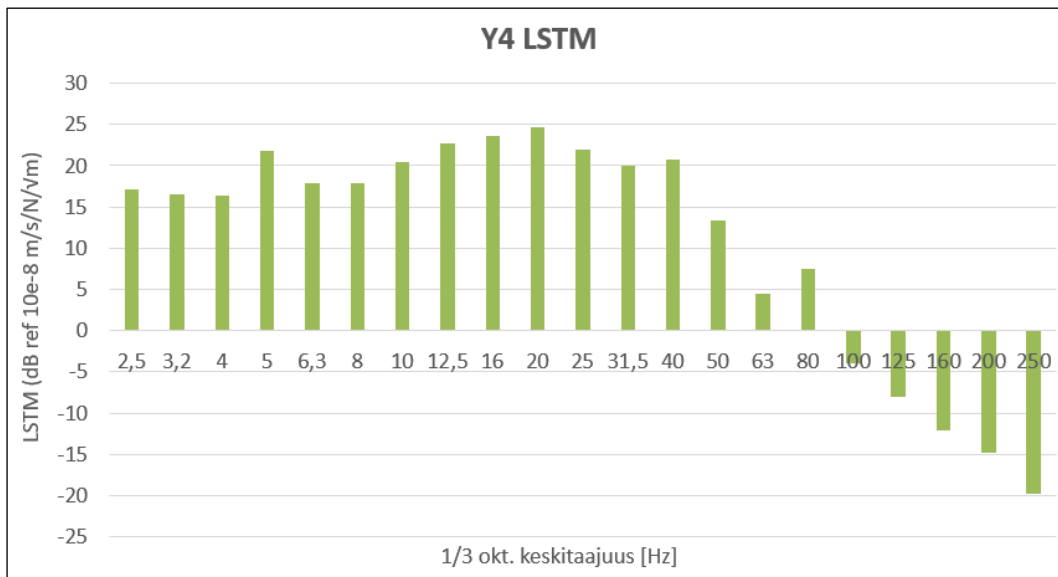
mukaan, missä  $coh_i$  on taajuuskorille  $i$  laskettu koherenssin arvo ja  $COH_l$  terssikaistan  $l$  keskiarvoistettu koherenssi.  $N$  on käsiteltävään terssikaistaan sisältyvien taajuuskorien lukumäärä.

Kuvasta 31 huomataan, että koherenssin perusteella mittausdata on lähialueella luotettavaa taajuusalueella 10–100 Hz. Koherenssin äkilliset romahtamiset kertovat oletettavasti antiresonanssialueista, suuresta melusta mittaussignaaleissa tai muusta havaitsemattomasta häiriöstä mittaustapahtumassa.



Kun jokaisesta herätepisteestä oli mitattu värähtelynjohtavuus (*FRF*) jokaiseen raataan kohtisuorassa olevaan varsinaiseen mittauspisteeseen, eteni tutkimus muodostamalle viivalähteen värähtelynjohtavuus (*LSTM*) kappaleessa 5 esitetyllä tavalla perustuen FTA ohjeistukseen. Maaperän värähtelynjohtavuus laskettiin jokaiselle etäisyydelle herätelinjasta.

Kuvassa 32 on esitetty pistelähteistä muodostettu maaperän värähtelynjohtavuus FTA ohjeistuksen ja kaavan 26 mukaisesti laskettuna.

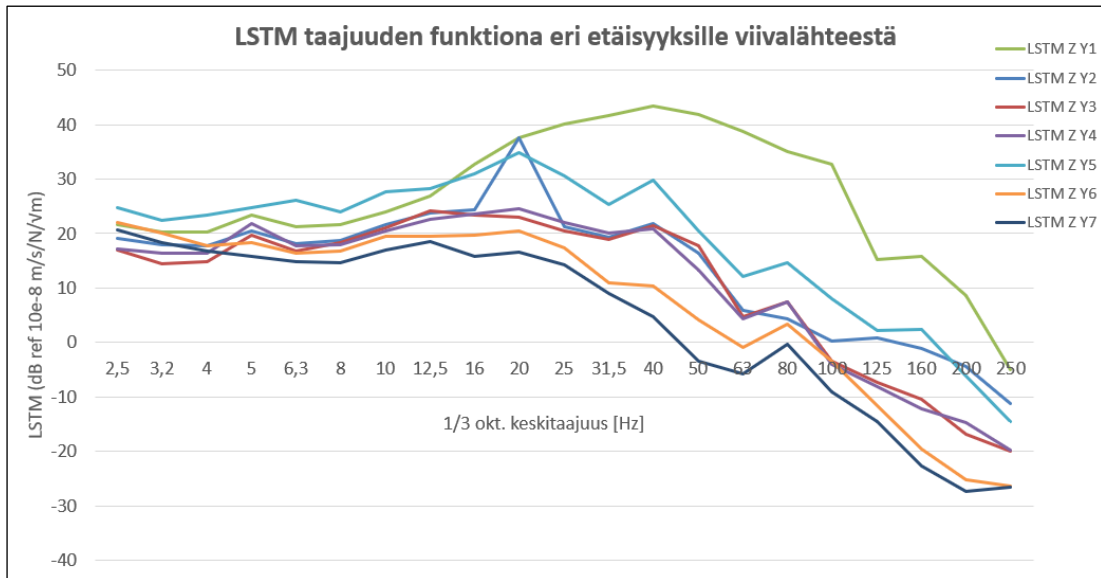


Kuva 32. Värähtelynjohtavuus pisteessä Y4, 50 metriä radasta.

Värähtelynjohtavuuden perusteella maaperä johtaa värähtelyä laajalla taajuusalueella tasaisesti välillä 4–40 Hz. Tämän jälkeen värähtelynjohtavuus romahtaa nopeasti. LSTM kuvaa viivamaisen herätelähteen eli junan aiheuttaman värähtelyn siirtymistä maaperässä.

Kuvassa 32 koherenssia ei esitetä, mutta sen esittäminen olisi haastavaa linjamaisen lähteen yhteydessä. Tarkastelupistettä lähimmät herätepisteet dominoivat viivalähteen ominaisuuksia muodostettaessa, joten koherenssi pitäisi painottaa ottamaan ne enemmän huomioon. Maaperän ominaistajuuden tarkasteluun soveltuu paremmin yhden herätepisteen ja tarkastelupisteen välillä suoritettu mobiliteetin määrittäminen. Tällöin myös koherenssi on tarkasteltavissa.

Kuvassa 33 on esitetty maaperän viivamaisella lähteellä muodostettu maaperän värähtelynjohtavuuden arvo eri etäisyyksille radasta.



Kuva 33. Maaperän värähtelynohtavuus pisteissä Y1–Y7, 15–100 metriä radasta.

Intuitiivisesti värähtelynohtavuuden pitäisi olla aina sitä parempi mitä lähempänä vastaanottopiste sijaitsee herätelinjasta. Ajatus pitää pääsääntöisesti paikkansa, mutta yllä olevasta kuvasta 33 on huomattavissa kaksi epämääräisyyttä. Pisteessä Y2 mitattu värähtelynohtavuus on huomattavan korkea 20 Hz terssikaistan kohdalla. Eri herätepisteistä mitatut värähtelynohtavuuden arvot olivat kauttaaltaan kohollaan 20 Hz kohdalla mikä voi viitata resonanssimaiseen ilmiöön tällä taajuudella. Piste Y2 ei ollut käytössä junien vasteita tarkastellessa, joten asiaa ei tutkittu tarkemmin.

Enemmän huomiota herättää pisteessä Y5 mitattu liian suurelta tuntuva värähtelynohtavuus. Arvo on alle 20 Hz tersseillä jopa suurempi kuin lähimmän pisteen Y1 mitattu vastaava arvo. Yli 20 Hz tersseillä värähtelynohtavuus on selvästi suurempaa kuin lähempänä olevilla tarkastelupisteillä lukuun ottamatta pistettä Y1. Ilmiölle ei löydetty vakuuttavaa selitystä.

Lähialueen ulkopuolella jokaisessa tarkastelupisteessä oli huomattavissa taajuusalueita, missä värähtely oli suurempaa kuin viereisillä terssikaistoilla. Kohoumat 40 Hz ja 80 Hz kohdilla voivat mahdollisesta viitata esimerkiksi maan ominaistaajuuden kerrannaisiin.

Yllä olevaa tarkastellessa täytyy huomata, että tuloksissa on mukana ISO 2631-2 mukainen taajuuspainotus. Mikäli tuloksia halutaan hyödyntää liikennetärinän viitekehysten ulkopuolella, täytyy taajuuspainotus purkaa, jotta maaperän luontainen värähtelynohtavuus saadaan tutkittavaksi.

## 6.6 Junien vasteiden määrittäminen

Junien värähtelyvasteet maaperästä määritettiin samoilla mittauspisteillä kuin maan värähtelynohtavuus. Mittaus käynnistettiin manuaalisesti junan lähestyessä mittauspaikkaa minkä lisäksi mittausjärjestelmä tallentaa aikaisignaaliin automaattisesti viimeiset viisi sekuntia värähtelytietoa ennen nauhoituksen aloittamista. Nauhoitettujen junien ohitusten datankäsittely eteni siten, että ensin ohitusten aikaisignaaleista erotettiin koneellisesti kohta, missä värähtelyn 1s tehollisarvo oli

suurin. Laskentaohjelmisto etsii tehollisarvon maksimikohdan liu'uttamalla laskentaikkunaa aikaisignaalin läpi 100 millisekunnin intervallilla.

Tämän jälkeen tältä sekunnin ikkunalta laadittiin ISO 2631-2 mukaisesti taajuuspainotettu taajuusspektri. Menetelmä on vastaava VTT:n liikennetärinää käsittelevien ohjeistusten kanssa, missä tilastollinen arvo  $v_{w,95}$  perustuu ohituksen liukuvaan RMS 1s arvoon. ISO 2631-2 taajuuspainottaa värähtelyn vastaamaan ihmisen kokemusta koetun värähtelyn epämukavuudesta ja ärsyttävyydestä. [51]

Yhteensä mittauspäivänä 19.11.2021 mitattiin 11 junan ohitusta, minkä jälkeen niiden ominaisuudet määritettiin edellä mainitun mukaisesti. Kaikki mittausdatan käsittely suoritettiin Famos ohjelmistolla.

Alapuolen taulukossa 7 on esitetty ohitukset ja niiden ominaisuudet sekä tilastollinen arvo  $v_{w,95}$  perustuen VTT:n ohjeistukseen pois lukien ohitusten määrä, joka jäi 11 junaan. Yllättäen etäisyydellä 15 metriä radasta suurimman värähtelyvasteen aiheuttivat henkilöjunat ja mittauksen ainoa tavarajuna (3645) tuottaa suurimman värähtelyvasteen vasta etäisyydellä 40 metriä ja kauempana. Mainittakoon, että tavarajunan akselimassa ei todennäköisesti edustanut mittauspaikan tyypillistä tavarajunaliikennettä.

Kokonaisuutena alueen tärinätilanne on kuitenkin maltillinen. Tilastollinen arvo  $v_{w,95}$  etäisyydellä 40 metriä on alle 0,15 mm/s, mitä voidaan pitää yllättävän pienenä. Tutkimusalue valittiin osittain mahdollistamaan kohtalaisten suurten värähtelyvasteiden tallentaminen. Tämä tavoite ei toteutunut. Taulukossa punaisella korostettu solu kuvaa mittauspisteen suurinta värähtelytapahtumaa.

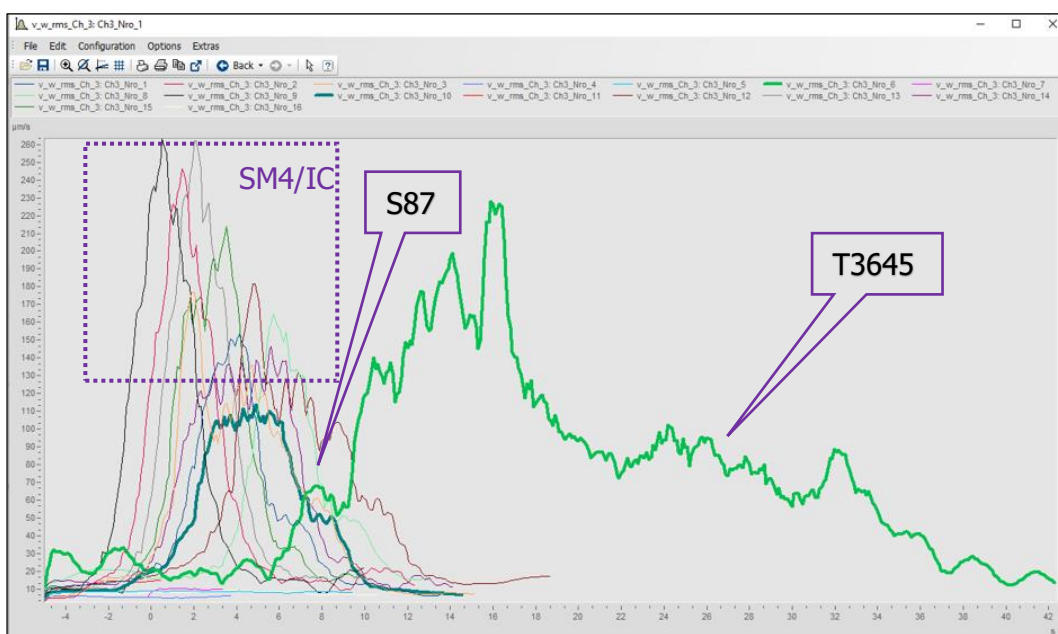
*Taulukko 7. Junien aiheuttamat värähtelyn tehollisarvot (mm/s) eri etäisyyksillä radasta.*

kello	juna	tapahtuma	15 m	15 m	15 m	40 m	50 m	60 m	80 m	100 m
			y1x	y1y	y1z	y3	y4	y5	y6	y7
13:59	SM4	1	0,13	0,13	0,15	0,06	0,05	0,06	0,04	0,03
14:01	SM4	2	0,21	0,19	0,25	0,10	0,07	0,08	0,05	0,03
14:05	IC37	3	0,14	0,13	0,18	0,09	0,08	0,07	0,08	0,05
	tausta	4	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	tausta	5	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14:15	T 3645	6	0,14	0,17	0,23	0,13	0,11	0,12	0,09	0,05
	tausta	7	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
14:20	SM4	8	0,13	0,13	0,17	0,07	0,05	0,07	0,04	0,03
14:30	SM4	9	0,22	0,19	0,26	0,11	0,08	0,08	0,05	0,03
14:40	S87	10	0,11	0,13	0,11	0,06	0,05	0,08	0,04	0,03
	tausta	11	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
15:00	IC27	12	0,16	0,15	0,18	0,10	0,08	0,07	0,08	0,05
15:05	SM4	13	0,23	0,18	0,26	0,10	0,08	0,08	0,05	0,03
15:07	IC38	14	0,16	0,21	0,15	0,11	0,07	0,06	0,06	0,03
15:17	IC178	15	0,25	0,21	0,21	0,12	0,08	0,08	0,05	0,03
15:20	tausta	16	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Keskiarvo</b>			0,17	0,16	0,20	0,10	0,07	0,08	0,06	0,04
<b>K.Hajonta</b>			0,05	0,03	0,05	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01
<b><math>v_{w,95}</math></b>			0,26	0,22	0,29	0,13	0,11	0,11	0,09	0,05

Mielenkiintoisena tietona voitaneen pitää etäisyydellä 15 metriä mitattujen tulosten eri suuntakomponenttien samankaltaisuutta. Mittaus vahvistanee ajatusta, missä pystysuoran suuntakomponentin värähtelyarvo ei ole välttämättä suurin. Suunta x kuvasi radansuuntaista, y rataa kohtisuoraan ja z pystysuuntaa.

Kokonaisuutena lähietäisyydellä junatyypillä ei näyttäisi muutenkaan olevan suurta merkitystä. Pienimmän värähtelyvasteen aiheuttaa Pendolino (vihreällä) ja suurimman hieman yllättäen SM4 lähijuna, eikä esimerkiksi huomattavasti suuremman kokonaismassan omaava Intercity-junatyyppi.

Kuvassa 34 on esitetty 15 metrin etäisyydellä junien ohitukset tehollisarvoisena värähtelynä näytettynä samassa kuvassa. Pystyakselilla värähtelyn tehollisarvo (um/s) ja vaaka-akselilla aika (s).



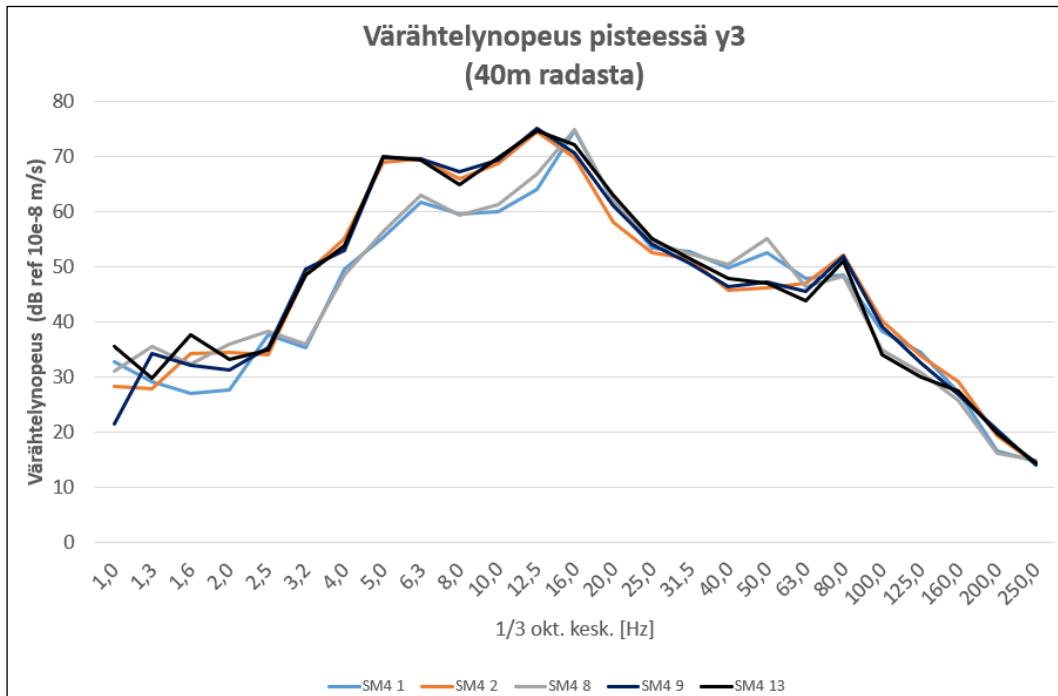
Kuva 34. Ohitusten taajuuspainotettu tehollisarvoinen värähtely 15 m etäisyydellä radasta.

T3645 ja S87 erottuvat joukosta. Tavaraajunan tuottama suurempi energiamäärä on nähtävissä kuvaajasta, mutta SM4 ja IC junatyyppit omaavat suuremman 1 s tehollisarvon. VTT ohjeistus ei ota kantaa värähtelyn kestoon (mahdollisesti suurempi energia), vaan tunnusluku laaditaan pelkästään 1s tehollisarvon perusteella.

Aistinvaraisesti huomioituna T3645 oli joko tyhjä tai huomattavan kevyesti lastattu. Kokonaismassan vaikutus värähtelyyn on suurin matalilla taajuuksalueilla ja voidaan olettaa, että ainakaan niiltä osin ohitus ei edustanut tyypillistä tavarajunaliikennettä. Korkeimmilla taajuustasoilla värähtelyn herätteenä toimii jousittamaton massa, ja kaluston kuormauksen asteella ei ole siihen merkitystä. Yllä oleva on käsitelty kattavammin luvussa 2.4.

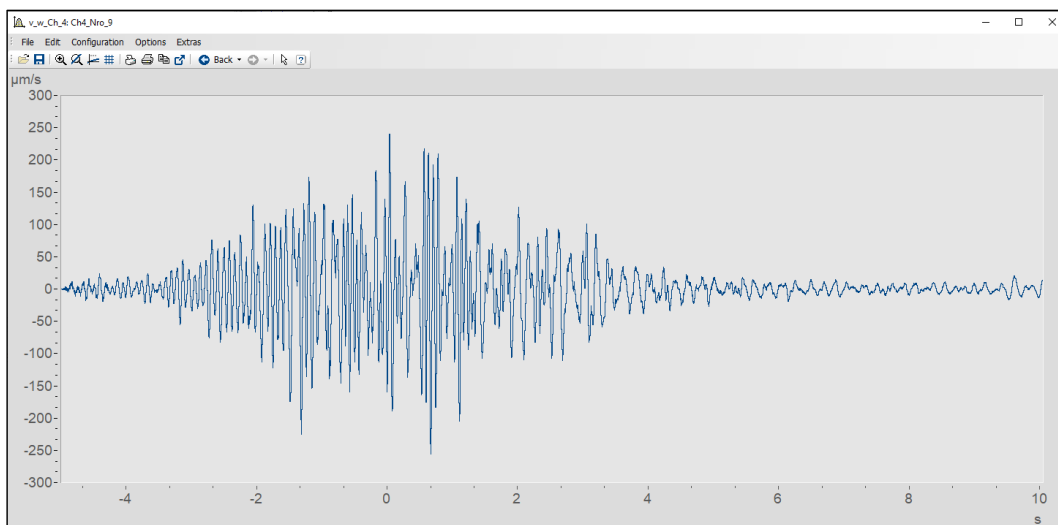
Henkilöliikenteen junien ohitukset tapahtuivat nopeudella 140–160 km/h ja tavarajuna puolestaan ohitti tutkimusalueen nopeudella 80 km/h. Koska mittauslinja laukaistiin manuaalisesti junien ollessa suunnilleen yhtä kaukana mittauslinjasta kestää tavarajunalla kauemmin saapua mittauslinjan kohdalle ja tämän takia suurimmat värähtelytasot tapahtuvat myöhemmin aikatasolla tarkasteltuna. Vastavasti myös ohituksen kesto on huomattavan pitkä henkilöjuniin verrattuna.

Mielenkiintoiseksi seikaksi paljastui myös SM4 kaluston yksikkömäärien erottuminen mittaustuloksista. Kuvassa 35 on esitetty SM4 lähijunien ohitusten värähtelyspektrit 40 metrin etäisyydellä radasta.



Kuva 35. SM4 ohitusten värähtelyspektrit etäisyydellä 40 metriä radasta.

Yksittäiset SM4 yksiköt ("sarjat" 1 ja 8) antavat huomattavasti kahden yksikön kokoonpanoa ("sarjat" 2,9 ja 13) pienemmän värähtelyvasteen. Ero on huomattavin terssikaistojen 2,5 Hz – 16 Hz välillä ja suurimmillaan jopa 10 desibeliä. Kuvassa 36 on esitetty kahden yksikön SM4 junan ("sarja" 9) ohituksen aikaisignaali 40 metrin etäisyydellä radasta.

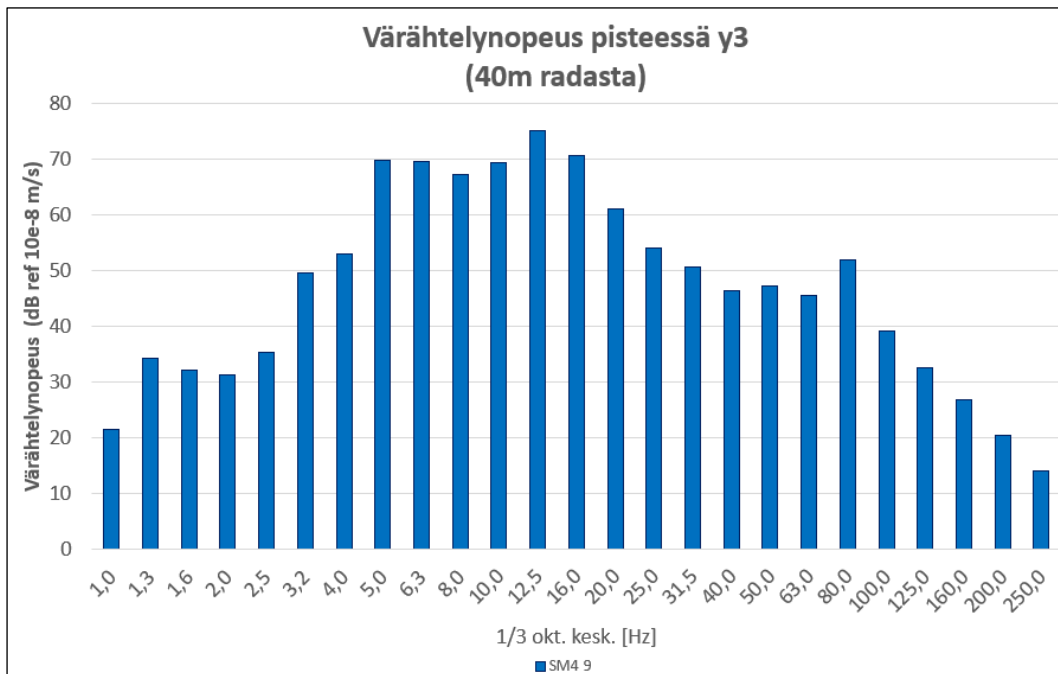


Kuva 36. SM4 ohituksen aikaisignaali 40 metrin etäisyydellä radasta.

Signaalin mukaan ohitus on hyvin nopea muutaman sekunnin häiriö, minkä aikana värähtely on suhteellisen tasaista. Kuvassa tarkastelevana suurena on heilahdusnopeuden huippuarvo. Suuria eroja henkilöjunien välillä ei ollut aikaisignaalien

muodoissa. Intercityn ohitus on hieman pidemmän aikavälin häiriö verrattuna SM4 juniin.

Kuvassa 37 on esitetty saman ohituksen suurimman liukuvan 1 s mittaisen RMS tehollisarvon ISO 2631-2 mukaisesti taajuuspainotettu spektri.



Kuva 37. SM4 ohituksen terssispektri 40 metrin etäisyydellä radasta.

Värähtely on taajuuspainotuksenkin jälkeen kohtalaisen laajakaistaista koko spektrin alueella. 80 Hz terssikaistan kohdalla oleva piikki sopii pölkkyjen ylityksistä syntyvästä parametrisestä herätteestä aiheutuvaksi. Tämä noin 5–10 dB äkillinen kohoama verrattuna ympäröiviin spektreihin oli huomattavissa jokaisella junatyypillä nopeuden suhteen tarkasteltuna.

Yhteenvetona voidaan todeta junien värähtelyvasteiden määrittämisen olevan nykyaikaisella mittauskalustolla yksinkertainen toimenpide. Samaa junatyyppiin kuuluvien ohitusten taajuusspektrit ovat erittäin lähellä toisiaan 2,5 Hz terssikaistan yläpuolella. Ylärajaksi spektrille asetettiin 250 Hz, joka on riittävä asumismukavuuden kannalta (tärinä ja runkomelu) tehdyissä tarkasteluissa.

Alle 2,5 Hz terssikaistan taajuuksilla terssispektreissä näyttää olevan eroa samantyyppisten junien kesken. Syyksi epäiltiin ainakin kiihtyvyyssantureiden pienillä taajuuksilla ilmenevää sisäistä taustakohinaa. Mittausalueen maaperässä ilmenevä taustakohina eri etäisyyksillä radasta mitattuna oli -15...20 dB riippuen taajuusalueesta. Rauhallisempaa mittausaluetta on haastavaa löytää, joten 20 dB taustakohina liepee pakko hyväksyä menetelmää käytettäessä.

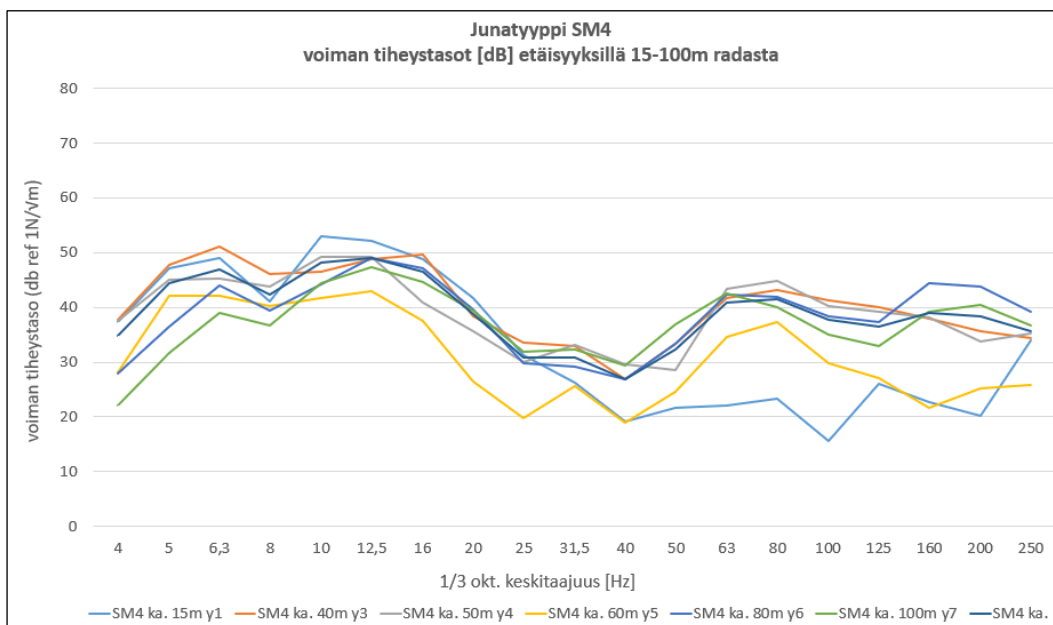
## 7 Määritetyt voiman tiheystasot

Tässä luvussa käydään läpi määritetyt junien voiman tiheystasojen tulokset ja niiden tulkinnat. Tulokset esitetään 1/3 oktaavikaistoilla välillä 4 Hz – 250 Hz. Tämän jälkeen tuloksia verrataan muualla mitattuihin julkisesti saatavilla oleviin samojen junatyypin voiman tiheyden arvoihin.

### 7.1 Tulokset

Voiman tiheystasot tarkastellaan junatyypeittäin eri mittauspisteissä. Junatyypin keskiarvo on energettinen keskiarvo laskettuna kaikista junatyypin ohituksista. Maaperän värinänjohtavuus perustuu jo määritelmän mukaisesti keskiarvoon kaikista keinoherätteistä. Itse voiman tiheystason (*FDL*) muodostaminen on triviaali miinuslasku logaritmisessa avaruudessa maaperän värähtelynjohtavuuden (*LSTM*) ja junien vasteiden (*Lv*) määrittämisen jälkeen.

Mikäli maaperän sekä radan ja penkereen käyttäytyminen on dynaamisesti täysin lineaarista ja niiden rakenne homogeenista, pitäisi teorian mukaan junien tiheystasojen olla jokaisella etäisyydellä määritettynä sama. Alapuolella esitetystä kuvasta 38 huomataan, että käytännössä näin ei kuitenkaan ole. Verbrakenin mukaan ilmiö johtuu siitä, että keinoherätteillä muodostettu linjamainen värähtelynjohtavuus ei pysty ottamaan huomioon junan liikettä, mikä aiheuttaa Dopplerin ilmiön maaperän värähtelyihin [53]. Muita syitä voivat olla epävarmuudet viivalähteen muodostamisissa.

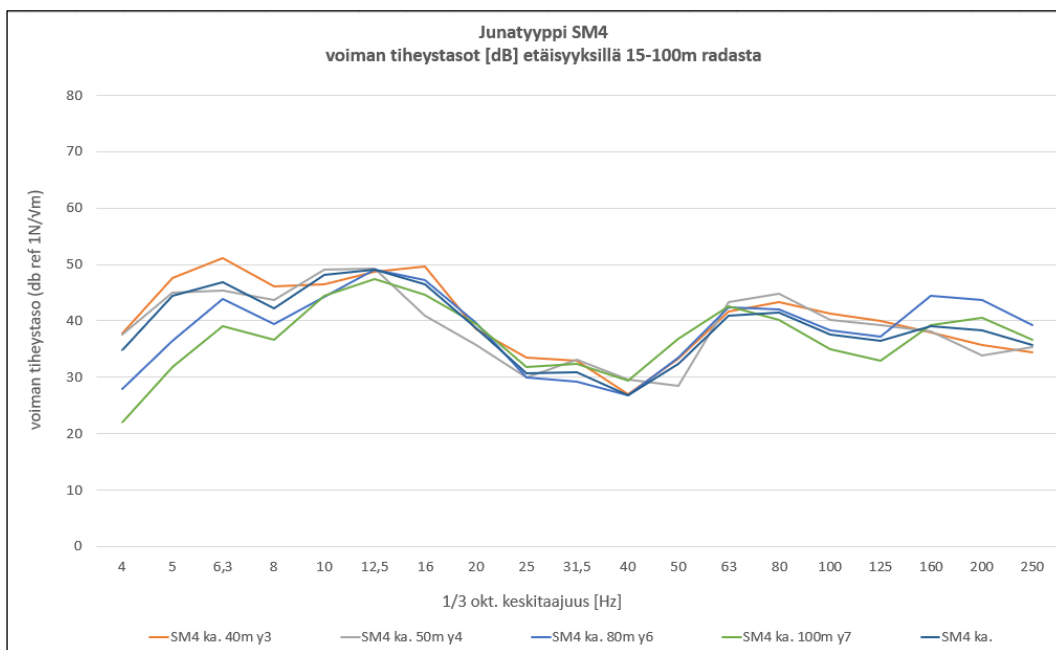


Kuva 38. Junatyypin SM4 voiman tiheystasot etäisyyksillä 15–100 m radasta.

Eri etäisyyksillä määritetyt voiman tiheystasot ovat kohtalaisen lähekkäin toisiaan lukuun ottamatta tarkastelupisteitä Y1 ja Y5. Pisteessä Y5 osalta tilanteeseen vaikuttaa siihen määritetty suuri värähtelynjohtavuus, jolle ei kyetty löytämään järkevää selitystä. Tämä johtaa pieneen junan voiman tiheyteen. Pisteessä Y1 määritetty junatyypin voiman tiheystaso erottuu muiden pisteiden vastaavista 25 Hz terssi-kaistan läpuolella.

Syyksi pohdittiin ilmiötä, jossa ratapenger ei vaimentaisi värähtelyä tasaisesti vaan toimisisi alipäästösuotimena, joka päästää alle 25 Hz terssikaistan taajuudet lävitseen lähes täydellä vaikutuksella, mutta vaimentaa voimakkaammin yläpuolella olevat taajuusalueet. Värähtelynjohtavuuden herätepisteet sijaitsevat puolestaan ratapenkereen juuressa, eli vastaavaa vaimennusta ei tapahtunut sen osalta millään taajuusalueella. Kauemmaksi radasta siirryttäessä yli 25 Hz taajuudet ehtivät vaimeta maaperässä muutenkin, joten ilmiötä ei ole havaittavissa. Oletettavasti värähtelyn lähikenttä, missä runkoaaltojen vaikutus on pinta-aaltojen vaikutusta suurempi, liittyy myös ilmiöön. Asiaan liittyvät ilmiöt vaativat lisätutkimuksia.

Kun pisteissä Y1 ja Y5 määritetyt voiman tiheystasot poistetaan, on kuvassa 39 esitetty käyrästä huomattavan tiivis terssikaistojen 10–160 Hz välillä.



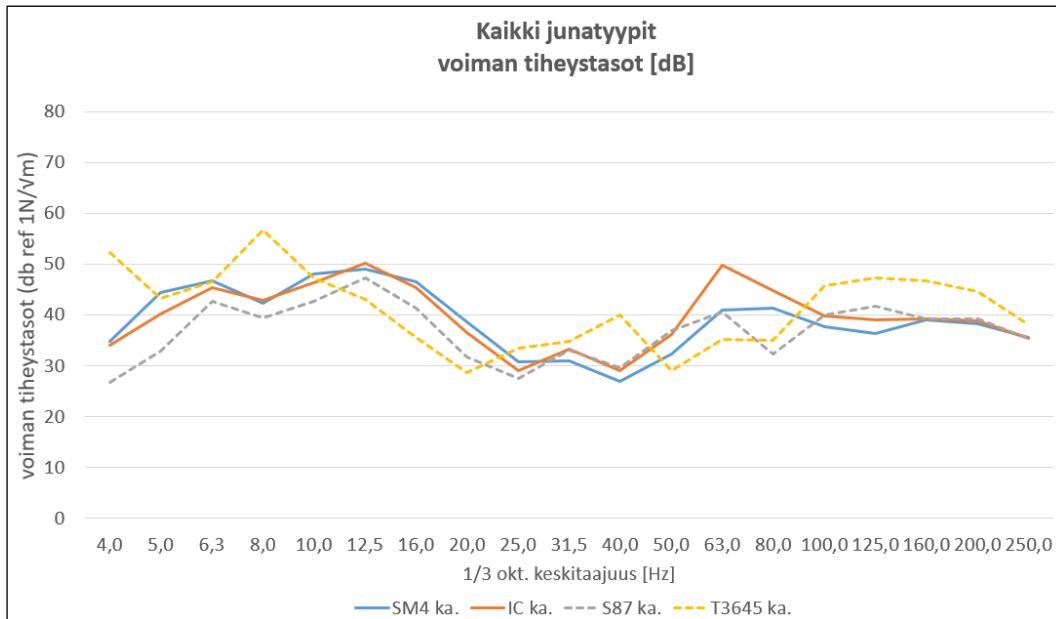
Kuva 39. SM4 voiman tiheystasot. Y1 ja Y5 käyrät poistettu.

Yllä olevan perusteella näyttäisi olevan hyödyllistä muodostaa voiman tiheystasot mahdollisimman monessa pisteessä. Erilaisten anomalioiden poistamisen jälkeen keskimääräinen voiman tiheys voidaan esittää eri etäisyyksille muodostettujen voiman tiheystasojen energettisenä keskiarvona taajuuden funktiona.

IC-junatyypin voiman tiheyden spektri on huomattavan samankaltainen SM4 junatyypin kanssa. Tämä on luonnollista, sillä jo junien värähtelyvasteet maaperässä olivat lähes identtiset ja junien teknisten tietojen voidaan olettaa olevan samaa luokkaa telityyppien, akselimassojen ja jousittamattomien massojen suhteen.

Pendolinojen ja tavarajunien värähtelyvasteita saatiin mittauspäivänä tallennettua vain yksi kappale kummastakin. Määrä on liian pieni arvioimaan niiden voiman tiheystasoa tarkoituksellisen laajasti, mutta perustuen muiden junatyypien värähtelyvasteiden pieneen hajontaan voidaan niitä kuitenkin käyttää jonkinlaisena arvioina ennen kuin kattavampaa tietoa on saatavilla. Kuvassa 40 on esitetty junatyypien voiman tiheystasot keskiarvona jokaiselta tarkisteluetaisyydeltä.





Kuva 40. Voiman tiheystasot. Kaikkien junatyyppien keskiarvot.

SM4 ja IC-kaluston maahan tuottama voima on hyvin samankaltaista. Todennäköisesti pölkkyjen ylityksestä aiheutuva parametrinen heräte 63 Hz terssikaistan kohdalla on näiden mittausten perusteella noin 10 dB suurempi IC-kalustolla. Ero voi johtua esimerkiksi jousituksen jäykkyyksien eroista.

Tavarajunien ja S-junien (Pendolino) ohituksia tallennettiin vain yksi kumpaakin tyyppiä. Alustavasti näyttäisi siltä, että kevyen tavarajunan värähtelyä aiheuttava voiman tiheystaso on tersseillä 4–10 Hz suurin. Erityisesti 8 Hz terssikaista on korostuu. Syynä voivat olla esimerkiksi pyöräviat kalustossa ja sen aiheuttaman värähtelyn mahdollinen korostuminen maaperän ominaistuuksilla. Pyörävika ilmenee taajuudella, joka saadaan huomioimalla junan etenemisnopeus ja pyörän kehän kaaren pituus. Iskemä maahan tapahtuu junan edetessä yhden kehän kaaren mittaisen matkan.

Suuremmilla taajuusalueilla voiman tiheystaso pienenee huomattavasti, mutta pölkkyjen ylityksen parametrinen heräte terssikaistan 40 Hz kohdalla on huomattavissa. Tämän jälkeen voiman tiheys kasvaa henkilöjunien yläpuolelle.

Pendolinojen osalta voitaneen todeta, niiden olevan näiden mittauksien perusteella kaikista junatyypeistä pienimmän värähtelyvoiman tuottavia. Parametrinen heräte on havaittavissa 63 Hz terssikaistalla heikommin kuin IC-kalustolla, mutta mikään taajuusalue ei sen lisäksi korostu erityisesti.

Koska junien vasteissa ( $L_v$ ) ja maaperän värähtelyjohtavuudessa ( $LSTM$ ) on käytössä sama taajuuspainotus, poistuu sen vaikutus miinuslaskutoimituksen yhteydessä. Näin ollen saadut voiman tiheystasot ovat ilman taajuuspainotusta.

## 7.2 Epävarmuudet

Epävarmuudet voiman tiheyksien määrittelyssä voidaan jakaa kahteen luokkaan ja niiden yhdistelmiin. Epävarmuudet maaperän värähtelyjohtavuutta tutkittaessa,

epävarmuudet junien vasteita mitattaessa sekä eri olosuhteissa tapahtuneiden mitausten yhteensovittamisesta. Lisäksi epävarmuutta aiheuttaa mittaustulosten käsittelyn ja mahdollisten korjausten käyttäminen.

Erilaisten kalusto-ongelmien takia mittaukset jouduttiin jakamaan kahdelle erilliselle päivällä, joiden välillä sääolosuhteet vaihtelivat. 17.11.2021 pellon hiesuinen maaperä oli huomattavan märkä ja 30.11.2021 routaa oli maaperässä noin 10 cm syvyyteen asti. Vaikka herätepään kiihtyvyyssanturit kiinnitettiin maapiikeillä sulana olleeseen maaperään, vaikutti routa todennäköisesti värähtelynjohtavuuden mittauksiin ainakin herätepään aluslevyn alla sekä mahdollisesti myös maaperässä siirtoreitillä. Vastaava tilanne on todennäköinen myös tulevaisuudessa FTA:n menetelmää hyödyntäessä. Toisaalta sama epävarmuus liittyy myös suorien junista aiheutuvien värähtelyvasteiden mittauksiin. Maaperän mittaushetken olosuhteilla lienee vaikutusta saatuihin tuloksiin.

Varsinaista maaperän värähtelynjohtavuutta määritettäessä mittausdatan laadukkuus vaihtelee paljon. Koherenssi alittaa tason 0,5 noin 50 metrin etäisyydellä ja 100 metrin etäisyydellä radasta käyttökelpoista värähtelynjohtavuuden tietoa saadaan vain alueelta johon voiman tuotto keinoherätteellä on suurinta. Koska koherenssi on tilastollinen arvo, voidaan sitä mahdollista parantaa lisäämällä keinoherätteen toistomääriä. Nyt käytetty 10 iskua per herätepiste ei todennäköisesti anna parasta mahdollista laatua. Toisaalta missään ei ole määritetty mikä on tarvittava taso koherenssille. Tutkimuspapereissa esiintyy arvoja 0,3 ja 0,5 ilman varsinaisia perusteluja.

Junien vasteita määritettäessä epävarmuudet liittyvät lähinnä pieneen määrään tallennettuja ohituksia S-junista (Pendolino) ja tavarajunista. Lisäksi kiihtyvyyssanturit näyttäisivät tuottavan sisäistä kohinaa matalilla taajuuksilla, mikä aiheuttaa vastaavasti epävarmuutta ja hajontaa tulkittaessa matalien taajuuksien voiman tiheyksiä. Kokonaisuutena junien aiheuttamien värähtelyvasteiden mittaaminen lienee kuitenkin menetelmässä vähiten ongelmia tuottava osa.

Tuntemattomin ja vähiten liikennetärinä- tai runkomelututkimukseen liittyvä osa on värähtelynjohtavuuteen liittyvä mittausdatan käsittely ja sen jalostaminen. Mitatustietoa valmistuu menetelmää käytettäessä paljon, eikä jokaista nauhoitettua signaalia ole mahdollista käydä silmämääräisesti läpi jälkikäteen. Erilaisia häiriöitä voi päästä mittaustuloksiin mukaan, jolloin toistomäärät olisi hyvä pitää mahdollisimman suurena. Toisena hankaluutena on soveltaa tarvittavalla tasolla signaalien laatuun vaikuttavia työkaluja. Todennäköisesti perehtymällä tarkemmin käytettävän ohjelmiston ominaisuuksiin ja signaalinkäsittelyn yleiseen teoriaan, epävarmuuksia tuloksissa olisi mahdollista pienentää.

Ehkä suurin menetelmän periaatteellinen ongelma on se, että voiman tiheydet perustuvat mittauksiin, joissa tarkasteltava junatyyppi on liikkunut tietyllä nopeudella tietynlaisella ratarakenteella. Epävarmuus syntyy, kun tätä tietoa käytetään arvioitaessa aluetta, jossa liikenne tulee kulkemaan erilaisella nopeudella ja maaperän olosuhteet ovat erilaisia. FTA neuvoo käyttämään mahdollisia korjauskertoimia junan nopeuden huomioimiseen, mutta ei selosta miten yksilukuvarvon vaikutus pitää jakaa eri taajuuskaistoille.

Maaperän vaikutusta epävarmuuteen voidaan pienentää määrittämällä voiman tiheydet junatyypeille erilaisilla maaperillä ja käyttämällä niitä vastaavilla uusilla suunnittelualueilla.

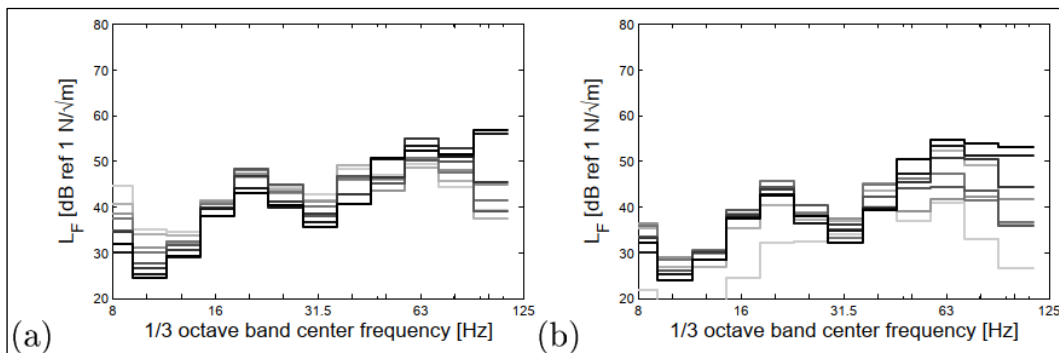
Luvun 5.1 mukaan keinoherätteillä muodostetun viivalähteen pitäisi täsmätä jokseenkin ohittavien junien pituuksiin. Verbraken ja muut tutkivat asiaa määrittämällä eri mittaisia viivalähteitä (LSTM) Lincentsissä 2011 ja 2012. Tuloksissa todetaan, että 100 m ja 200 m mittaisilla viivalähteillä on lähes olematon ero värähtelynohtavuudessa. Syyksi esitetään, että tietyn matkan jälkeen kaukaisimmilla herätepisteillä on vain pieni vaikutus muodostuvan viivalähteen suuruuteen. Vastavasti huomattiin 10 m ja 20 m etäisyyksien herätepisteiden välillä tuottavan lähes saman lopputuloksen, kun taas 40 m välimatka herätepisteissä antoi huomattavasti erilaisemman lopputuloksen. [52]

Monnissa muodostetun viivalähteen pituus oli 90 metriä ja herätepisteiden välimatka 10 metriä. Yllä olevan perusteella voidaan todeta, että mittausjärjestelyistä ei aiheutunut etäisyyksien osalta huomattavaa epävarmuutta, vaikka osa junista oli yli 90 m pituisia.

### 7.3 Vertailut maailmalla tehtyihin mittauksiin

Junien voiman tiheystasojen mittauksia on suoritettu ainakin Leuvenin yliopiston toimesta Belgiassa. Suurin osa julkisesti saatavilla olevista tiedoista liittyy Degranden, Lombaertin ja Verbrakenin erilaisiin tutkimuksiin. Varsinaista vertailua on haasteellista suorittaa jokseenkin erilaisten ratarakenteiden ja kaluston osalta.

Alapuolen kuvassa 41 esitellään Verbrakenin väitöskirjan Lincentsissä määritettyjä voiman tiheyden tasoja IC-kalustolle etenemässä nopeudella 200 km/h. Kyseessä on tuplaraiteen omaava rata ilman pengerrystä. Rakennekerrosten alla (tiheys 1 700 kg/m<sup>3</sup>) on Verbrakenin mukaan yhden metrin paksuinen stabilointikerros. Rakennetta voidaan pitää jokseenkin erilaisena Monnin vastaavaan.



Kuva 41. IC-kaluston voiman tiheyksiä Lincentsissä määritettynä [53].

Kuvaajassa (a) junien voiman tiheydet on määritetty keinoherätepisteillä keskeltä rataa. Kuvaajassa (b) keinoherätepisteet olivat radan vieressä kuten tämän diplomityön tutkimuksessa Monnissa. Harmaa viiva on määritetty voiman tiheys 6 m etäisyydellä radasta ja musta viiva voiman tiheys 64 m etäisyydellä radasta. Verbrakenin mukaan herätepisteiden sijoittaminen radan ulkopuolelle lisää hajontaa määritetyissä tuloksissa kuten on huomattavissa kuvaajasta (b). Hajontaa huomattiin myös Monnissa määritetyissä tuloksissa. [53]

Kauttaaltaan tulokset ovat kuitenkin jokseenkin saman suuntaisia, mikä kannustaa jatkotutkimusten suorittamiseen Suomen olosuhteissa. Myös Monnin mittauksen voiman tiheyden huippuarvot olivat luokkaa 50–60 dB eri etäisyyksillä. Verbrakenin

tuloksissa ei esitetä alle 8 Hz terssikaistan tuloksia, joten jää epäselväksi, kuinka lähellä toisiaan alataajuuksien tulokset olivat. Pölkkyjen ylityksestä aiheutuva parametrisen heräte on Monnin mittauksissa selvemmin havaittavissa. Syinä voivat olla esimerkiksi pienemmät painumaerot Belgian ratatyypeissä radalla liikuttaessa.

Olenlaisin ja periaatteellisin ero Lincenin ja Monnin mittausten välillä liittyy radan pengerrykseen. Monnin rata on perustettu huomattavalle pengerrykselle, mutta maaperän värähtelynjohtavuuden herätepisteet olivat sijoitettuna penkereen juurella. Tästä voidaan johtaa, että todellisuudessa Monnissa määritettiin junatyypin ja penkereen kokonaisuuden aiheuttamaa voimia ja niiden tiheystasoja. Lincenissä herätepisteet olivat sijoitettuna suoraan radalle, eli junatyypin voimat ja tiheystasot käsittävät pelkästään junan aiheuttaman ilmiön. Tämä eroavaisuus voi olla osaselitys mittaustulosten eroavaisuudelle erityisesti suuremmilla taajuuksilla.

## 8 Yhteenveto

### 8.1 Päätelmät

Työn tavoitteena oli tutustua rautatiekaluston aiheuttaman värähtelyn syntymekanismeihin ja pyrkiä arvioimaan erilaisille junatyypeille ominaisia radan kautta maaperään vaikuttavia voimia empiirisesti. Junatyypille ominaista voimaa tai voiman tiheyttä voidaan tämän jälkeen hyödyntää muissa tarkastelukohteissa määrittämällä siellä pelkkä maaperän värähtelyjohtavuus. Näin toimimalla on mahdollista arvioida tulevan liikennöivän kaluston vaikutuksia, vaikka rataa tarkastelualueelle ei vielä olisi rakennetukkaan. Lisäksi on hyödyllistä tietää, aiheutuuko maaperästä todennettu suuri värähtelyvaste sille taajuusalueelle syötetystä voiman suuruudesta vai hyvästä värähtelyjohtavuudesta samalla taajuusalueella.

Voiman määrittämiseen liittyvät mittaukset suoritettiin Hausjärvellä pääradan varressa marraskuussa 2021. Alueen värähtelyjohtavuus arvioitiin etukäteen hyväksi ja liikenne tiedettiin vilkkaaksi. Mittauspäivänä suurin osa liikenteestä oli erimittaisia SM4 lähijunia ja Intercity-kalustoa.

ISO-14837 standardin mukaan systeemi jaettiin herätteeseen, värähtelyn johtavuuteen ja tarkastelupisteen värähtelyvasteeseen. Maaperän ISO 2631-2 mukaisesti taajuuspainotettu värähtelyjohtavuus selvitettiin keinoherätteen avulla. Tämän jälkeen junien rataan kohdistaman voiman määrittäminen on yksinkertainen tehtävä hyödyntäen edellä mainittua värähtelyjohtavuutta sekä junien aiheuttamia värähtelyvasteita maaperässä. Maaperän värähtelyjohtavuus määritettiin rakentamalla laite, jonka maahan kohdistama voima voidaan määrittää.

Menetelmän vastaavuus erilaisten rakenteiden värähtelytutkimuksiin ja moodianalyysiin on vahva. Tästä syystä alan kirjallisuutta hyödynnettiin työn kirjallisuustutkimuksessa kattavasti. Kun pistemäisen lähteen taajuusvastefunktiot oli selvitetty, yhdistettiin ne epäkoherentteina pisteinä kuvaamaan junamaista viivalähdetä. Mikäli tämä viivalähde on tarpeeksi lähellä tarkisteltavien junien pituuksia, voidaan sitä hyödyntää niiden voiman tiheyksiä määrittäessä.

Junatyypin voimien tiheyksien määrittäminen onnistui kohtalaisen hyvin. Suurin haaste liittyy maaperän värähtelyjohtavuuden määrittämiseen. Tarpeeksi suuren signaali-kohinasuhteen muodostaminen ihmisvoimin keinoherätteellä koko kiinnostavalle taajuusalueelle on haastava tehtävä. Lisäksi taajuusvastefunktioita arvioivien estimaattoreiden toimintatapa perustuu suureen näytemäärään ja herätepisteitä on useita. Tästä muodostuu mittaustyön fyysiseen osuuteen ja laitteiston kestävyteen omat haasteensa.

Voiman tiheyksiä tutkittaessa paljastui, että SM4 paikallisjunien sekä Intercity-kaluston voiman tiheydet ovat hyvin lähellä toisiaan, vaikka kalustojen kokonaisuusmassojen erot ovat huomattavia. Tieto on mielenkiintoinen sillä nykyään ainakin VTT:n esittämä yleisesti käytössä oleva laskentamalli huomioi vain kokonaisuusmassan. Yksi tulevaisuuden tutkimuskohteita voisi olla pyrkiä tarkentamaan massojen (jousitettu ja jousittamaton) vaikutusta aiheutuviin värähtelytasoihin liikennetärinän ja runkomelun osalta.

Pendolinojen ja tavarajunien ohituksia nauhoitettiin mittauspäivänä vain yksi kumpaakin junatyyppejä. Niiden perusteella Pendolinon voiman tiheys on SM4 ja Intercity-junia pienempi. Toisaalta jo tyhjä tavarajuna aiheuttaa yhden näytteen perusteella mahdollisesti suuremman maaperään kohdistuvan voiman kuin mikään mitatuista henkilöjunista, kun värähtelyä tarkistellaan yli 15 metrin etäisyydellä radasta.

Junien aiheuttamista vasteista tarkasteltiin ohituksen yhden sekunnin enimmäisvärähtelytasoa (1 s RMS), joka taajuuspainotettiin ISO 2631-2 mukaisesti. Vastaava taajuuspainotus ja enimmäisvärähtelytason tarkastelu on käytössä VTT:n ohjeistuksessa, eli junien voimien tiheyksistä johdetut värähtelyvasteet jossakin toisessa tarkastelupaikassa ovat suoraan vertailukelpoisia VTT:n asettamiin ohjearvoihin.

Teorian mukaan junien voiman tiheyksien pitäisi muodostua samoiksi eri etäisyyksillä rataa määritettäessä. Kirjallisuustutkimuksen mukaan oli selvää, että näin ei tässäkään tapauksessa käy, vaan hajonta eri etäisyyksien voiman tiheyksien välillä tulee olemaan vähintäänkin huomattavaa. Linjamainen keinoheräte ja siihen perustuva teoria ei osaa huomioida liikkuvan junan aiheuttamaa Doppler-ilmiötä maaperässä minkä lisäksi maaperän värähtelynjohtavuuden määrittämiseen liittyy tiettyjä epävarmuuksia, joista ei voida päästä kokonaan eroon. Kun värähtelynjohtavuudessa huomatu poikkeamat jätettiin huomiotta ovat eri etäisyyksillä määritetyt junakalustojen voiman tiheystasot kuitenkin huomattavan saman kaltaisia.

Käytettäessä määritettyjä voiman tiheyksiä uudella alueella, suurin tarkkuus saavutetaan, kun rata, pengeri ja maaperä ovat mahdollisimman samankaltaisia verrattuna olosuhteisiin, missä junatyyppiin voiman tiheys alun perin määritettiin. Tämän lisäksi tarkastelupisteen etäisyys radasta olisi hyvä vastata etäisyyttä, jolla voiman tiheys oli alun perin määritetty.

Tässä tutkimuksessa värähtelyn johtavuus määritettiin penkereen juurelta tarkastelupisteisiin, eli ratapenkereen vaikutus sisältyy junien voiman tiheystasojen arvoihin. Mittausten perusteella penkereen voidaan olettaa vaimentavan värähtelyä ainakin 20 Hz terssikaistan yläpuolella. Ymmärrystä penkereen vaikutuksesta värähtelyyn ja tärinään olisi hyvä pyrkiä lisäämään.

Tämän työn tuloksia ei ehditty tämän raportin kirjoitushetkeen mennessä validoida. Validoinnissa vertailussa olisivat olleet tässä tutkimuksessa selvitetty voimien tiheydet yhdistettynä validointipaikan maaperän värähtelynjohtavuuteen. Näiden yhdistelmästä saatua värähtelyn suuruutta olisi tämän jälkeen verrattu junien aiheuttamiin värähtelyihin maaperässä. Koska varsinaista mittauksiin perustuvaa validointia ei vielä ole tehty, mitattuja tuloksia vertailtiin maailmalla tehtyihin tutkimuksiin. Tulokset ovat hyvinkin saman suuntaisia, mikä kannustaa lisätutkimusten suorittamiseen.

## 8.2 Jatkokehitystarpeet

Mittauksia suoritettaessa suurimmaksi rajoitukseksi osoittautui niiden suuri kenttätyömäärä ja siihen kuluva aika. Impulssimaisia herätteitä täytyy antaa vähintään kymmeniä, ellei satoja per mittauspaikka. Kehittämällä välineistö, mikä mahdollistaa suuremman herätevoiman tuottamisen, mahdollisesti koneellisesti, pystytään

samalla parantamaan myös värähtelynjohtavuuden mittauksien signaali-kohinasuhdetta ja parantamaan siten arviointien luotettavuutta. Tämän lisäksi tilavaatimus radan varressa aiheuttaa omat haasteensa, mistä syystä menetelmää voi olla vaikeuksia soveltaa kaupunkiympäristöön ilman liikennejärjestelyitä. Periaatteessa maaperän värähtelynjohtavuus voidaan olettaa samanlaiseksi kummallakin puolella mittauslinjaa, jolloin tarvitaan vain puolet herätepisteistä.

Tutkimuksessa jäi epäselväksi, kuinka suuri vaikutus maaperän muuttuvilla olosuhteilla on saatuihin tuloksiin. Mittausolosuhteiden vaihtelu on normaalia liikennetärintää määritettäessä, mistä syystä olisi hyvä sopia millaisissa olosuhteissa maaperän värähtelynjohtavuus on määritettävä. Lisäksi pitäisi pohtia voidaanko vastavasti junien vasteita mitata voiman tiheystasojen määrittämiseen millaisissa olosuhteissa.

Mittauskaluston teknisistä vaatimuksista voidaan todeta, että vaikka käytettävät signaalinkäsittelyn välineet ovat hyvin perinteisiä moodianalyysien työkaluja, ei niitä voida kuitenkaan pitää liikennetärintän arvioinnissa yleisinä. Toisaalta samaa voidaan sanoa myös numeeristen mallinnusmenetelmien työkaluista, joiden käyttö Suomessa on myös vielä nykyään vähäistä.

Menetelmän yhdeksi kehityskohteeksi ja ideaksi nousi yhdistää numeerisesti mallinnettu junakaluston voima ja yhdistää se empiirisesti määritettyyn maaperän värähtelynjohtavuuteen. Maaperän värähtelyn johtavuuden mallintaminen nykyaikaisilla työkaluilla on mahdollista, mutta hyväksyttävä tarkkuus on saavutettavissa vain kattavilla maaperätutkimuksilla. Empiirinen menetelmä ottaa nämä maaperän epävarmuudet automaattisesti huomioon. Lisäksi maaperän värähtelynjohtavuuden määrittämisen työkalulla lienee käyttökohteita esimerkiksi erilaisten värähtelyn vaimennusratkaisujen toiminnallisuuden tarkasteluissa.

Yleisellä tasolla FTA:n menetelmän tarkkuutta ja sen käyttökohteita mietittäessä on hyvä muistaa että, vertailussa tulisi olla mukana myös muilla arviointimenetelmillä saatuja arvioita samoilta tutkimusalueilta. Tämä mahdollistaa tarkkuuden vertailun muihin arviointimenetelmiin eikä pelkästään mitattuihin junien ohituksiin. Maaperän värähtelyn arviointi tai mallintaminen on haastava tehtävä ja jokaiseen arviointimenetelmään sisältyy omat luontaiset epävarmuudet.

## Lähdeluettelo

- [1] Väyläviraston julkaisu 46/2019. Rautateiden verkkoselostus 2021 (päivitetty 18.6.2022). Viitattu 7.3.2022. Saatavissa: [https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/173530/vj\\_2019-46\\_vs2021\\_978-952-317-725-3.pdf](https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/173530/vj_2019-46_vs2021_978-952-317-725-3.pdf)
- [2] Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 57/2018. Valtakunnalliset liikenne-ennusteet. Viitattu 7.3.2022. Saatavissa: [https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts\\_2018-57\\_valtakunnalliset\\_liikenne-ennusteet\\_web.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts_2018-57_valtakunnalliset_liikenne-ennusteet_web.pdf)
- [3] Uimonen, S. 2008. Suomen infrastruktuuripääoma: Rautatiet. Helsinki: Valtion taloudellinen tutkimuskeskus. Viitattu 7.3.2022. Saatavissa: <https://www.doria.fi/handle/10024/148427>
- [4] Väylävirasto. 2022. Rataverkko. Viitattu 7.3.2022. Saatavissa: <https://vayla.fi/vaylista/rataverkko>
- [5] Väylävirasto. 2022. Hankkeet kartalla. Viitattu 7.2.2022. Saatavissa: <https://vayla.fi/hankkeet-kartalla>
- [6] Liikennevirasto (Nyk. Väylävirasto). 2018. Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 1, Yleiset perusteet. Viitattu 7.3.2022. Saatavissa: [https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo\\_2018-31\\_rato1\\_web.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2018-31_rato1_web.pdf)
- [7] Liikennevirasto (Nyk. Väylävirasto). 2018. Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 3, Radan rakenne. Viitattu 7.3.2022. Saatavissa: [https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo\\_2018-13\\_rato3\\_web.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2018-13_rato3_web.pdf)
- [8] Väylävirasto. 2021. Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 11, Radan päällysrakenne. Viitattu 7.3.2022. Saatavissa: [https://julkaisut.vayla.fi/pdf11/vo\\_2021-29\\_rato11\\_web.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf11/vo_2021-29_rato11_web.pdf)
- [9] Thompson, D. 2008. Railway Noise And Vibration: Mechanisms, Modelling and Means of Control. ISBN: 9780080451473. 518 s.
- [10] Hakulinen, M. & Vuento, A. 2010. Rakentamisen aiheuttamat tärinät - projekti, taustaselvitykset. Tampereen teknillinen yliopisto. Viitattu 7.3.2022. Saatavissa: <https://sgy.fi/wp-content/uploads/2017/04/taustaselvitykset.pdf>
- [11] Loponen, T.-R., Salmenperä, P. & Nurmikoulu, A. 2016. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 14/2016. Liikkuvan kaluston ja raiteen välinen vuorovaikutus ja sen dynaaminen mallinnus. ISBN 978-952-317-230-2. Viitattu 7.3.2022. Saatavissa: [https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts\\_2016-14\\_liikkuvan\\_kaluston\\_web.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts_2016-14_liikkuvan_kaluston_web.pdf)
- [12] Talja, A & Törnqvist, J. 2014. Liikennetärinä: Alueiden tärinäkarttoitus ja rakenteiden vaurioitumisalttius. VTT Technical Research Centre of Finland. Viitattu 7.3.2022. Saatavissa: <https://publications.vtt.fi/julkaisut/muut/2014/VTT-R-04703-14.pdf>



- [13] Talja, A., & Saarinen, A. 2009. Maaliikenteen aiheuttaman runkomelun arviointi: Esiselvitys. VTT Technical Research Centre of Finland. Viitattu 7.3.2022. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2009/T2468.pdf>
- [14] Federal Transit Administration. 2018. Transit Noise and Vibration Impact Assessment Manual. Federal Transit Administration. Viitattu 7.3.2022. Saatavissa: [https://www.transit.dot.gov/sites/fta.dot.gov/files/docs/research-innovation/118131/transit-noise-and-vibration-impact-assessment-manual-fta-report-no-0123\\_0.pdf](https://www.transit.dot.gov/sites/fta.dot.gov/files/docs/research-innovation/118131/transit-noise-and-vibration-impact-assessment-manual-fta-report-no-0123_0.pdf)
- [15] The Commission of the European Communities. 2008. Commission decision: concerning a technical specification for interoperability relating to the 'rolling stock' sub-system of the trans-European high-speed rail system. Official Journal of the European Union.
- [16] Huhtala, T., Oksanen, B & Kylliäinen, M. 2021. Akustiikkapäivät 2021, esitelmä: Pori-Mäntyluoto-Koerataosuuden tärinä- ja runkomelumittaukset. Viitattu 7.3.2022. Saatavissa: [https://www.akustinenseura.fi/wp-content/uploads/2021/11/akustiikkapaivat\\_2021\\_s20.pdf](https://www.akustinenseura.fi/wp-content/uploads/2021/11/akustiikkapaivat_2021_s20.pdf)
- [17] Traficom. 2021. Rautateiden kalustorekisteri. Viitattu 7.3.2022. Saatavissa: <https://www.traficom.fi/fi/ajankohtaista/avoin-data?toggle=Rautateiden%20kalustorekisterin%20avoin%20data>
- [18] Okamoto, I. 1998. Railway Technology Today 5. How Bogies Work. Japan Railway & Transport Review 18. 12/1998. s 52-61.
- [19] Korkeamäki, S. 2011. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 4/2011. Rataan kohdistuva kuormitus liikkuvan kaluston ja radan vuorovaikutuksessa. ISBN 978-952-255-617-2. Viitattu 7.3.2022. Saatavissa: [https://julkaisut.vayla.fi/pdf3/lts\\_2011-04\\_rataan\\_kohdistuva\\_web.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf3/lts_2011-04_rataan_kohdistuva_web.pdf)
- [20] Escudier, M. & Atkins, T. 2013. A Dictionary of Mechanical Engineering. Oxford University Press. ISBN: 9780198832102. 688 s.
- [21] VR-Group. 2022. Kalustoesittely: Vectron. Viitattu 7.3.2022. Saatavissa: <https://www.vrgroup.fi/fi/vrgroup/yrityksemme/liiketoiminnot/junaliikennointi/vectron-veturi/>
- [22] FRA. 2013. Safety Evaluation of High-Speed Rail Bogie Concepts. Viitattu 7.3.2022. Saatavissa: [https://railroads.dot.gov/sites/fra.dot.gov/files/fra\\_net/3416/Safety%20Evaluation%20of%20HS%20Rail%20Bogie%20Concepts\\_FINAL.pdf](https://railroads.dot.gov/sites/fra.dot.gov/files/fra_net/3416/Safety%20Evaluation%20of%20HS%20Rail%20Bogie%20Concepts_FINAL.pdf)
- [23] Siemens mobility Austria GmbH. 2022. SF4 Bogie-platform for electric locomotives. Datasheet. Viitattu 7.3.2022. Saatavissa: [https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:75314190-1879-4a0d-9646-92471db61301/01-mobility-datasheet-bogies-sf4-de-mors-b10023-00enus-144\\_original.pdf](https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:75314190-1879-4a0d-9646-92471db61301/01-mobility-datasheet-bogies-sf4-de-mors-b10023-00enus-144_original.pdf)
- [24] Thompson, D., Kouroussis, G. & Ntotsios, E. 2019. Modelling, simulation and evaluation of ground vibration caused by rail vehicles. Vehicle System Dynamics, 57:7, 936-983. ISSN: 0042-3114

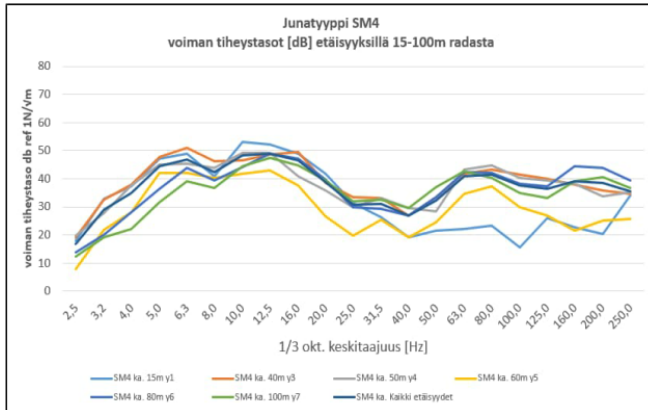
- [25] VR-Transpoint. 2022. Asiakkaan opas, kalusto. Viitattu 18.1.2022. Saatavissa: <https://www.vrtranspoint.fi/fi/vr-transpoint/asiakkaan-opas/kalusto/rautatiekalusto/kotimaan-liikenteen-vaunut/avovaunut/raakapuu-vaunu/raakapuuvaunut-sp-sps-spa-spar/>
- [26] Mansfield, M. & O'Sullivan, C. 2020. Understanding Physics. ISBN: 9781119519508. 656 s.
- [27] Thomson, W. T. 1980. Theory of Vibration with Applications. Third Edition. ISBN : 0-04-445069-9. 467 s.
- [28] Smolczyk, U. 2003. Geotechnical Engineering Handbook, Vol 1. ISBN: 3-433-01452-3. 808 s.
- [29] Connolly, D., Kouroussis, G., Laghrouche, O., Ho, C. & Forde, M. (2014). Benchmarking railway vibrations - Track, vehicle, ground and building effects. Construction & building materials, 2015-09-01, Vol.92, s.64-81. ISSN: 0950-0618
- [30] Gutowski, T.G. & Dym, C. L. Propagation of Ground Vibration: A review. Journal of sound and vibration, 1976, Vol.49 (2), p.179-193
- [31] ISO. 2015. 14837-32:2005 Mechanical vibration — Ground-borne noise and vibration arising from rail systems — Part 32: Measurement of dynamic properties of the ground. 53 s.
- [32] Hiller, D. M.;& Crabb, G. I. 2000. Groundborne Vibration Caused By Mechanised Construction Works. TRL Reports 429.
- [33] Törnqvist, J.;& Talja, A. 2006. Suositus liikennetärinän arvioimiseksi maankäytön suunnittelussa. Espoo: VTT.
- [34] ISO. 2005. 14837-1:2005 Mechanical vibration - ground borne noise and vibration arising from rail systems - Part 1. 45s.
- [35] International Union of Railways. 2017. Railway Induced Vibrations - State of the art report.
- [36] Lombaert, G.;Degrande, G.;Francois, S.;& Thompson, D. 2015. Ground-Borne Vibration due to Railway Traffic: A Review of Excitation Mechanisms, Prediction Methods and mitigation Measures.
- [37] Hall, L. 2003. Simulations and analyses of train-induced ground vibrations in finite element models.
- [38] Kuo, K.; Verbraken, H.; Degrande, G.; & Lombaert, G. (2016). Hybrid predictions of railway induced ground vibration using. Journal of sound and vibration, 2016-07-07, Vol.373, s. 263-284.
- [39] M. Heckl, G. H. 1995. Structure-borne sound and vibration from rail traffic. Journal of Sound and Vibration (1996) 193(1), s. 175–184.

- [40] Madshus, C.; Bessason, B. & Hårvik, L. 1996. Prediction model for low frequency vibration from high-speed railways on soft ground. *Journal of sound vibration* 193(1), s. 195-203.
- [41] Saurenman, H., & Nelson, J. 1988. *A Prediction Procedure for Rail Transportation Groundborne Noise and Vibration*.
- [42] Villot, M., Augis, E., & Guigou-Carter, C. 2016. Vibration emission from railway lines in tunnel – characterization and prediction. doi:10.1080/23248378.2016.1220267
- [43] Ewins, D. 2000. *Modal Testing: Theory, Practice and Application*. Research studies press ltd.
- [44] ISO. 2019. 7626-5 Mechanical vibration and shock - Experimental determination of mechanical mobility. Part 5. ISO.
- [45] McConnel, K., & Varoto, P. 2008. *Vibration Testing: Theory and Practice*. John Wiley & Sons, Inc.
- [46] Väylävirasto 2021. Helsinki-Tampere ratayhteys, yhteysvälikortti.
- [47] Liikennevirasto (Väylävirasto) (2012). Pasila-Riihimäki liikenteen välityskyvyn nostaminen, yleissuunnitelma. Suunnitelmaselostus.
- [48] Levinzon, F. 2015. *Piezoelectric Accelometers with Integral Electronics*. Springer International Publishing.
- [49] ISO. 1997. 266 Acoustics – Preferred frequencies. ISO.
- [50] IEC. 2014. 61260 Electroacoustics – Octave band and fractional octave band filters. IEC.
- [51] Talja, A. 2004. Suositus liikennetärinän mittaamisesta ja luokituksesta. VTT tiedotteita 2278. Viitattu 7.3.2022. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/tiedotteet/2004/T2278.pdf>
- [52] Verbraken, H. 2013. Prediction of railway induced vibration by means of numerical, empirical, and hybrid methods. Väitöskirja. Leuven.
- [53] Verbraken, H.; Degrande, G.; & Lombaert, G. 2012. Experimental and numerical determination of transfer functions along railway tracks. *International Conference on Uncertainty in Structure Dynamics, 2012, Vol.4, s. 2973–2987*.

# Määritettyjä junien värähtelyä tuottavien voimien tiheyksiä

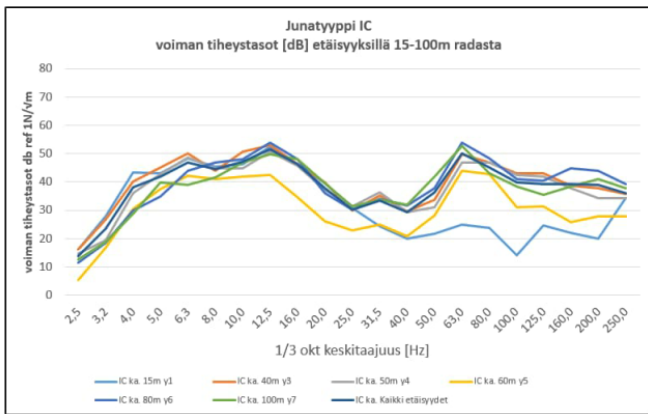
voiman tiheys eri etäisyyksillä radan keskilinjasta dB ref 1N/vm

1/3 Okt. [Hz]	15m	40m	50m	60m	80m	100m	Keskiarvo
2,5	18	19	20	8	14	12	17
3,2	33	33	28	22	20	19	29
4,0	37	38	37	28	28	22	35
5,0	47	48	45	42	37	32	44
6,3	49	51	45	42	44	39	47
8,0	41	46	44	40	39	37	42
10,0	53	46	49	42	44	44	48
12,5	52	49	49	43	49	47	49
16,0	49	50	41	37	47	45	46
20,0	42	38	36	26	40	39	39
25,0	31	34	30	20	30	32	31
31,5	26	33	33	26	29	32	31
40,0	19	27	30	19	27	29	27
50,0	22	33	29	25	33	37	32
63,0	22	42	43	35	42	43	41
80,0	23	43	45	37	42	40	41
100,0	16	41	40	30	38	35	38
125,0	26	40	39	27	37	33	36
160,0	23	38	38	22	44	39	39
200,0	20	36	34	25	44	41	38
250,0	34	34	35	26	39	37	36



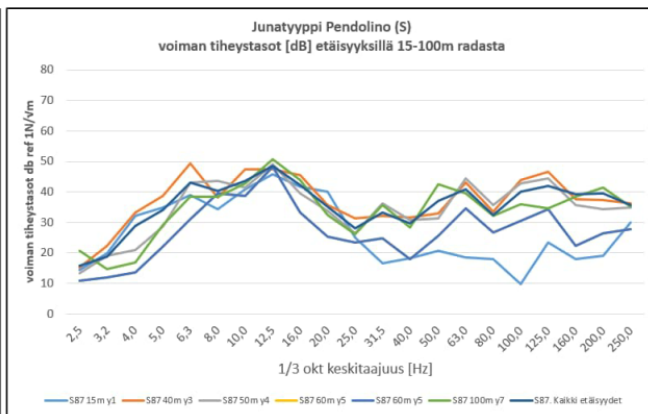
voiman tiheys eri etäisyyksillä radan keskilinjasta dB ref 1N/vm

1/3 Okt. [Hz]	15m	40m	50m	60m	80m	100m	Keskiarvo
2,5	16	16	15	5	12	13	14
3,2	28	27	20	17	19	19	24
4,0	43	40	36	31	30	29	38
5,0	43	45	43	37	35	40	42
6,3	48	50	49	42	44	39	47
8,0	45	44	45	41	47	42	44
10,0	46	51	45	42	48	47	47
12,5	52	53	51	42	54	50	51
16,0	46	46	46	34	48	48	46
20,0	40	40	37	26	36	39	38
25,0	31	30	31	23	30	31	30
31,5	24	35	36	25	34	34	33
40,0	20	30	29	21	32	32	29
50,0	22	34	31	28	38	42	36
63,0	25	50	47	44	54	53	50
80,0	24	47	47	43	48	43	45
100,0	14	43	42	31	41	38	40
125,0	25	43	42	31	40	35	39
160,0	22	39	38	26	45	38	39
200,0	20	38	34	28	44	41	39
250,0	34	36	34	28	39	38	36

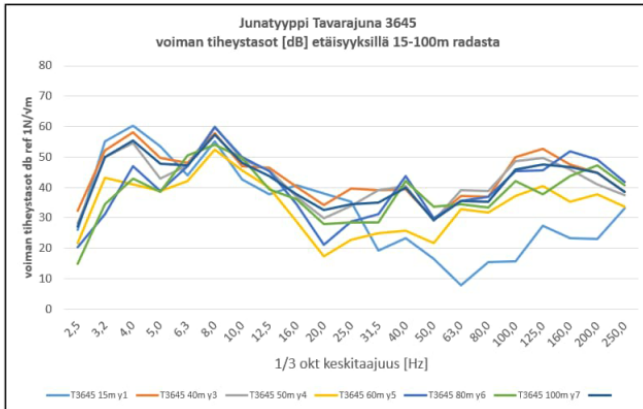


voiman tiheys eri etäisyyksillä radan keskilinjasta dB ref 1N/vm

1/3 Okt. [Hz]	15m	40m	50m	60m	80m	100m	Keskiarvo
2,5	14	15	13	11	12	21	16
3,2	20	22	19	12	18	15	19
4,0	32	33	21	13	28	17	29
5,0	35	39	28	22	35	29	34
6,3	39	49	43	31	36	38	43
8,0	34	38	44	40	42	38	40
10,0	41	47	41	39	44	43	43
12,5	46	47	49	48	49	51	49
16,0	42	45	40	33	41	44	42
20,0	40	36	34	25	31	32	35
25,0	25	31	26	23	31	26	28
31,5	17	32	36	25	35	36	33
40,0	18	32	31	18	33	28	30
50,0	21	33	31	26	39	43	37
63,0	19	43	44	35	41	40	41
80,0	18	33	36	27	34	32	32
100,0	10	44	43	31	41	36	40
125,0	24	46	44	34	42	35	42
160,0	18	38	36	22	45	38	39
200,0	19	37	34	27	45	41	39
250,0	30	36	35	28	40	35	36



voiman tiheys eri etäisyyksillä radan keskilinjasta dB ref 1N/vm							
1/3 Okt. [Hz]	15m	40m	50m	60m	80m	100m	Keskiarvo
2,5	26	32	28	22	20	15	27
3,2	55	52	50	43	31	35	50
4,0	60	58	55	41	47	43	55
5,0	54	50	43	39	39	38	48
6,3	44	48	47	42	47	50	47
8,0	55	58	60	52	60	54	57
10,0	43	47	49	46	50	50	48
12,5	38	46	46	40	45	39	44
16,0	41	40	37	29	34	36	38
20,0	38	34	30	17	21	28	33
25,0	35	40	34	23	29	28	34
31,5	19	39	39	25	31	28	35
40,0	23	39	40	26	44	42	40
50,0	16	30	29	22	30	34	29
63,0	8	37	39	33	35	35	36
80,0	16	37	39	32	37	33	35
100,0	16	50	49	37	45	42	46
125,0	27	53	50	40	46	38	47
160,0	23	48	46	35	52	44	47
200,0	23	45	41	38	49	47	45
250,0	33	38	38	34	42	41	39





Väylävirasto  
Trafikledsverket

ISSN 2490-1202  
ISBN 978-952-405-043-2  
[www.vayla.fi](http://www.vayla.fi)