

OULUN YLIOPISTO  
UNIVERSITY of OULU

TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

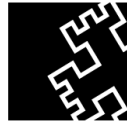
**JUNAN NOPEUDEN VAIKUTUS  
RAUTATIELIIKENTEEN AIHEUTTAMAAN  
TÄRINÄÄN**

Pauliina Sutela

YMPÄRISTÖTEKNIIKAN KOULUTUSOHJELMA

Diplomityö

Huhtikuu 2016



OULUN YLIOPISTO  
UNIVERSITY of OULU

TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**JUNAN NOPEUDEN VAIKUTUS  
RAUTATIELIIKENTEEN AIHEUTTAMAAN  
TÄRINÄÄN**

Pauliina Sutela

Ohjaajat: Prof. Kauko Kujala, DI Anne Tuomela

YMPÄRISTÖTEKNIIKAN KOULUTUSOHJELMA

Diplomityö

Huhtikuu 2016

# TIIVISTELMÄ

## OPINNÄYTETYÖSTÄ Oulun yliopisto Teknillinen tiedekunta

Koulutusohjelma (kandidaatintyö, diplomityö) Ympäristötekniikan koulutusohjelma		Pääaineopinnojen ala (lisensiaatintyö)	
Tekijä Sutela, Pauliina		Työn ohjaaja yliopistolla Kujala K, Prof Tuomela A, DI	
Työn nimi Junan nopeuden vaikutus rautatieliikenteen aiheuttamaan tärinään			
Opintosuunta Vesi- ja yhdyskuntatekniikka	Työn laji Diplomityö	Aika Huhtikuu 2016	Sivumäärä 82 s., 5 liitettä
<b>Tiivistelmä</b> <p>Työssä tarkastellaan junan nopeuden vaikutusta raskaan rautatieliikenteen aiheuttamaan tärinään. Junan nopeuden rajoittaminen on tällä hetkellä tärkein keino ehkäistä tärinähaittoja Suomessa, ja tärinästä johtuvia nopeusrajoituksia on rataverkolla 18. Nopeusrajoitusta asetettaessa junan nopeus on yleensä laskettu ensin nopeuteen 60 km/h, ja jos tämä ei ole toiminut, on rajoitusta laskettu nopeuteen 40 km/h. Nopeuden vaikutusta tärinään ei ole kuitenkaan usein tarkemmin tutkittu. Työn tavoitteena oli selvittää, miten junan nopeuden laskeminen vaikuttaa rautatieliikenteen aiheuttaman tärinän suuruuteen ja taajuussisältöön. Oletuksena oli, että junan nopeuden laskiessa myös tärinä pienenee.</p> <p>Työtä varten suoritettiin liikennetärinämittauksia Limingan kunnassa Pohjanmaan radan varressa. Kohteeksi valittiin alue, jossa asukkaat olivat valittaneet tärinästä. Radan ja asuinrakennuksen väliin asennettiin neljän mittarin mittalinja, joka mittasi tärinää maaperässä. Lisäksi kaksi mittaria asennettiin mittalinjan päähän asuinrakennukseen. Mittalinja oli pidempi kuin liikennetärinämittauksissa yleensä, ja ulottui noin 600 m päähän radasta. Mittarit mittasivat kaikkia kolmea tärinän suuntakomponenttia kolmen viikon ajan. Tänä aikana raskaat tavarajunat ohjeistettiin ajamaan kohteen ohi eri nopeuksilla, jotka vaihtelivat välillä 40–70 km/h. Tarkasteltaviksi valittiin mahdollisimman samanpainoisia junia. Mittaustuloksia tarkasteltiin värähtelyn heilahdusnopeuden huippuarvon sekä värähtelyn hallitsevan taajuuden kautta.</p> <p>Mittausten perusteella todettiin, että junan nopeuden alentaminen vaikuttaa tärinän suuruuteen laskevasti. Kuitenkin nopeuksilla 58–60 km/h tärinä yllättäen kasvoi muodostaen paikallisen tärinähuipun. Etäisyyden kasvaessa liian suureksi yhteyttä ei voitu enää havaita, sillä tärinä oli hyvin vähäistä. Rakennuksesta mitatut tärinän arvot olivat hyvin alhaisia. Junan nopeudella oli myös selkeä yhteys tärinän hallitsevaan taajuuteen. Junan nopeuden kasvaessa tärinän hallitseva taajuus muuttui korkeammaksi. Yhteys oli nähtävissä myös kauempana radasta, ja näkyi myös rakennuksesta mitatussa tärinässä. Tärinän taajuus pysyi samana etäisyyden kasvaessa.</p> <p>Junan nopeuden rajoittaminen vähentää tärinähaittaa työn perusteella useimmissa tapauksissa. Nopeusrajoitusta asetettaessa on kuitenkin otettava huomioon, että ns. kriittisen nopeuden kohdalla ilmenevän tärinähuipun esiintyminen on muissakin kohteissa mahdollista. Kriittinen nopeus on todennäköisesti kohteelle ominainen, eikä tässä työssä löydetty nopeus ole yleistettävissä kaikille kohteille. Pienelläkin muutoksella junan nopeudessa voi kuitenkin olla yllättävän suuri merkitys tärinän suuruuteen.</p>			
Muita tietoja			

# ABSTRACT FOR THESIS

University of Oulu Faculty of Technology

Degree Programme (Bachelor's Thesis, Master's Thesis) Environmental Engineering		Major Subject (Licentiate Thesis)	
Author Sutela, Pauliina		Thesis Supervisor Kujala K, Prof Tuomela A, M.Sc. (tech.)	
Title of Thesis The Effect of Train Speed on Train-Induced Vibration			
Major Subject Water and Civil Engineering	Type of Thesis Master's thesis	Submission Date April 2016	Number of Pages 82 p., 5 App.
<b>Abstract</b> <p>The thesis concentrates on train-induced vibration caused by heavy freight trains. Limiting the train speed is the most important mitigation measure of train-induced vibration in Finland at the moment. There are 18 sites with speed limits due to vibration on the Finnish railway network. Speed limits are usually set by first limiting the speed to 60 km/h. If the 60 km/h speed limit seems to have no effect on the vibration the speed is limited to 40 km/h. However, the effects of restricting train speed are rarely studied further. The aim of this research was to find out how restricting train speed affects vibration magnitude and frequency. The hypothesis was that restricting train speed would mitigate vibration.</p> <p>Traffic vibration levels were measured at a test site in Liminka for this research. The site was chosen due to complaints about vibration from the residents. A survey line with four vibration monitors was installed on the ground between the track and a dwelling. In addition, two monitors measured vibration in the house. The survey line was 600 m long. The monitors recorded vibration in all three dimensions for three weeks. During the measurements the passing trains were instructed to drive at different speed in the speed range of 40–70 km/h. The trains in the same weight range were chosen to be studied. The results were evaluated by examining particle vibration velocity and dominant frequency.</p> <p>According to the measurements, restricting the train speed mitigates vibration. However, when the train speed was 58–60 km/h the vibration level grew suddenly higher forming a vibration peak. As the distance from the track grew, the effect of train speed could not be observed due to low vibrations levels. The vibration level in the dwelling house was also low. The train speed had a clear relation to the dominant frequency of the vibration. Increasing the train speed made the frequency higher. This relation could be observed also at longer distances from the track and it be observed in the house as well. The frequency did not depend on the distance.</p> <p>Limiting the train speed mitigates vibration in most cases according to the study. However, when setting the speed limit the possibility of vibration peak occurring at a critical speed should be taken into account. The critical speed is likely to depend on the site. Thus the critical speed found in this study cannot be generalized. Nevertheless, even small changes of the train speed could have significant effects on the vibration.</p>			
Additional Information			

## ALKUSANAT

Tämä työ on tehty Liikenneviraston tilauksesta VR Track Oy:llä. Diplomityön tavoitteena oli tutkia junan nopeuden vaikutusta rautatieliikenteen aiheuttamaan tärinäan. Kiitokset aiheen esille nostamisesta ja rahoittamisesta kuuluvat Liikennevirastolle. Erityisesti haluan kiittää Liikenneviraston Erkki Poikolaista, jonka ansiosta työ saatiin käyntiin.

Työtä varten koottiin ohjausryhmä, johon kuuluivat Erkki Poikolaisen lisäksi Juha Tuovinen Suomen Louhintakonsultit Oy:stä sekä Hannu Siira VR Track Oy:stä. Lisäksi työn ohjaajina toimivat Kauko Kujala ja Anne Tuomela Oulun yliopistosta. Haluan kiittää kaikki työn ohjaamiseen osallistuneita korvaamattomasta avusta työn tekemisessä. Kiitokset Juha Tuoviselle asiantuntevista neuvoista ja perehdytyksestä aiheen piiriin. Ohjausryhmän lisäksi haluan kiittää sekä koko VR Track Oy:tä että VR-Yhtymä Oy:tä, jotka mahdollistivat monelta osalta työn tekemisen.

Lopuksi haluan kiittää opiskelukavereitani, ystäviäni ja perhettäni tuesta ja kannustuksesta yliopistourani aikana. Työkavereilleni kiitos avusta työtä tehdessä. Kiitokset Mikolle tuesta ja ymmärryksestä työn tekemisen aikana. Kiitokset Oulun yliopiston Ympäristörakentajakillalle ikimuistoisista opiskeluvuosista.

Oulussa, 28.4.2016

Pauliina Sutela

# SISÄLLYSLUETTELO

1 Johdanto .....	9
2 Tärinä ilmiönä.....	11
2.1 Värähtelyn perusteet.....	11
2.2 Rautatietärinän erityispiirteet.....	14
2.3 Tärinän synty .....	17
2.3.1 Juna herätteenä.....	18
2.3.2 Pohjamaan merkitys tärinän synnyssä.....	20
2.4 Tärinän kulkeutuminen maaperässä .....	22
2.5 Tärinän vaimeneminen .....	25
2.6 Junan nopeuden vaikutus tärinään .....	28
2.7 Tärinän siirtyminen rakennuksiin .....	31
2.7.1 Taajuuden ja resonanssin merkitys .....	32
2.7.2 Rakennuksen ominaisuuksien merkitys .....	34
3 Tärinähaitta ihmisen kokemana.....	37
3.1 Ihmisen kokemus tärinästä .....	37
3.2 Tärinän tunnusluku.....	39
3.3 Suositusarvot Suomessa .....	43
3.4 Kansainväliset suositukset.....	45
4 Tärinän ehkäisy.....	47
4.1 Tärinäesteet.....	48
4.2 Nopeuden alentaminen .....	48
5 Suoritetut mittaukset .....	50
5.1 Tutkimuskohteen esittely.....	50
5.2 Mittausten suoritus .....	53
6 Tulokset.....	55
6.1 Tärinä maaperässä.....	55
6.1.1 Mittauspiste MP1 .....	56
6.1.2 Mittauspiste MP2 .....	58
6.1.3 Mittauspiste MP3 .....	60
6.1.4 Mittauspiste MP4 .....	62
6.1.5 Hallitseva taajuus maaperässä .....	63
6.2 Tärinä rakennuksessa .....	65
6.2.1 Mittauspiste MP5 talon perusmuurissa .....	65

6.2.2 Mittauspiste MP6 talon yläkerrassa .....	66
6.2.3 Hallitseva taajuus rakennuksessa .....	67
6.3 Tulosten tilastollinen merkitsevyys.....	69
7 Tulosten tarkastelu .....	72
8 Johtopäätökset .....	75
9 Yhteenveto.....	76

#### LIITTEET:

- Liite 1. Taulukko junanumeroista ja junien painoista.
- Liite 2. Esimerkki tärinämittausraportista.
- Liite 3. Heilahdusnopeuden vektorisumman huippuarvot eri nopeuksilla mittauspisteillä MP1–MP3.
- Liite 4. Mittauspisteillä MP1–MP4 mitatut tärinän hallitsevat taajuudet mittauspisteittäin.
- Liite 5. Tuloksia mittauspisteiltä MP5 ja MP6.

## MERKINNÄT JA LYHENTEET

A	amplitudi
A	nopeuseksponentti
$A_i$	tärinäamplitudin suuruus etäisyydellä $r_i$
$c_s$	leikkausaallon nopeus
f	taajuus
$f_0$	maapohjan alin ominaistajuus
E	kimmomoduuli
H	pehmeän maakerroksen paksuus
$k_D$	etäisyyskerroin
$k_S$	junan nopeudesta riippuva kerroin
$k_G$	junan painosta riippuva kerroin
$k_R$	junan kunnosta riippuva kerroin
$L_v$	maaperän värähtelytaajuuden taso desibeleinä ilmaistuna
$R^2$	selitysaste
$S_0$	vertailunopeus
S	tarkasteltavan junan nopeus
T	jaksonaika
U	junan nopeus
v	junan nopeus
$v_{ref}$	referenssinopeus
$v_{max}$	heilahdusnopeuden huippuarvo
$v_{max, tran}$	poikittaisen heilahdusnopeuden huippuarvo
$v_{max, long}$	pitkittäisen heilahdusnopeuden huippuarvo
$v_{max, vert}$	pystysuuntaisen heilahdusnopeuden huippuarvo
$v_{max, PVS}$	heilahdusnopeuden vektorisumman huippuarvo
$v_P$	P-aallon etenemisnopeus
$v_S$	S-aallon etenemisnopeus
$v_w$	värähtelyn painotettu tehollisarvo
$v_{w,95}$	värähtelyn tunnusluku
$v_{z,max}$	pystysuoran heilahdusnopeuden maksimin odotusarvo
W	taajuuspainotuskerroin



PVS	vektorisumman huippuarvo (Peak Vector Sum)
$\alpha$	sisäisen vaimennuksen tekijä
$\beta$	geometrisen vaimennuksen tekijä
$\lambda$	aallonpituus
$\lambda$	Lamé-vakio
$\mu$	Lamé-vakio
$\rho$	tiheys
$\sigma$	keskihajonta
$\nu$	Poissonin luku

# 1 JOHDANTO

Rautatieliikenteen aiheuttama tärinä on kasvava ympäristöongelma. Samalla kun asutus keskittyy entistä enemmän kasvukeskuksiin, tarve tiivistää asuinrakentamista kasvaa. Tällöin käytävissä olevat maa-alueet halutaan hyödyntää mahdollisimman tehokkaasti, ja uusia asuinalueita kaavoitetaan myös radan varteen. Samaan aikaan rautateiden kuormitus on kasvanut raskaan tavaraliikenteen akselipainojen kasvaessa.

Lisäksi ihmisten tietoisuus ympäristöongelmista kasvaa jatkuvasti. Ihmiset osaavat entistä herkemmin vaatia häiriötöntä asuinympäristöä. Kun tietoisuus ja vaatimustaso kasvavat, ihmiset puuttuvat tärinäongelmaan yhä useammin. Siksi on tärkeää löytää entistä parempia keinoja, joilla rautatieliikenteen aiheuttamaa tärinää voidaan ehkäistä.

Suomen maaperässä on runsaasti pehmeitä maalajeja, kuten savea, silttiä ja turvetta. Pehmeillä ja vesipitoisilla mailla tärinähaittoja syntyy herkästi. Mitä pehmeämpää maa on, sitä herkemmin tärinää syntyy, ja sitä kauemmas tärinä myös kulkeutuu. Suomen rautatieverkko on rakennettu pääosin yli 100 vuotta sitten, eikä tärinähaittaa silloin ole ratojen suunnittelussa otettu huomioon. Radan geometrian kannalta rata on helpoin rakentaa mahdollisimman tasaiselle maalle, mikä usein tarkoittaa tärinälle altista maaperää.

Eniten tärinähaittoja Suomessa aiheuttavat raskaat tavarajunat. Raskas tavaraliikenne aiheuttaa huomattavasti suuremman kuormituksen rataan kuin henkilöliikenne. Vaikka rautatieliikenteen aiheuttamalle tärinälle on muitakin syntymekanismia, tässä työssä keskitytään tarkastelemaan nimenomaan raskaan tavaraliikenteen aiheuttamaa tärinää.

Suomessa rautatieliikenteen aiheuttamaa tärinää on tähän mennessä ehkäisty lähinnä asettamalla junaliikenteelle nopeusrajoituksia. Muitakin keinoja on kokeiltu, mutta ne eivät ole vielä vakiintuneet käytännöiksi vaihtelevan onnistumisen takia. Kokemusperäisesti on todettu, että junan nopeuden alentaminen vähentää tärinää useimmissa tapauksissa. Eräissä mittauksissa junan nopeuden laskemisen on havaittu kuitenkin jopa kasvattavan tärinää. Aiheesta ei ole vielä tarpeeksi tutkimustietoa, joten Liikennevirasto on käynnistämässä hanketta aiheen tutkimiseksi 2016.

Tärinästä johtuvia nopeusrajoituksia on tällä hetkellä Suomen rataverkolla 18 (Liikennevirasto 2013). Nopeusrajoitus haittaa kuitenkin merkittävästi raideliikenteen sujuvuutta, eikä nopeusrajoitusten käyttö ole toivottavaa. Nopeusrajoitusta asetettaessa tehdään aina kompromissi tärinähaitan ja liikenteen sujuvuuden välillä. Rajoitus asetetaan kokemukseräisen tiedon perusteella kohteesta riippuen sopivaksi arvioidulle tasolle.

Tässä työssä tutkitaan, miten junan nopeuden laskeminen vaikuttaa tärinään. Työtä varten suoritettiin liikennetärinämittauksia alueella, jossa rautatieliikenteen aiheuttama tärinä tiedettiin ongelmaksi. Tärinämittauksien ajan raskaat tavarajunat ajoivat normaalin nopeutensa lisäksi kolmea eri alennettua nopeutta, jotta nopeuden alentaminen vaikutus tärinään saataisiin esille. Työn tavoitteena on tutkia, miten junan nopeuden alentaminen vaikuttaa sekä tärinän suuruuteen että taajuussisältöön. Oletuksena on, että junan nopeuden alentaminen pienentää tärinää. Lisäksi työssä selvitetään, miten junan nopeuden vaikutus näkyy etäisyyden radasta kasvaessa.

## 2 TÄRINÄ ILMIÖNÄ

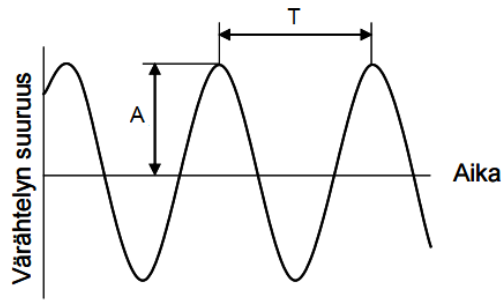
Rautatiellä kulkeva juna aiheuttaa yleensä aina jonkin verran tärinää ympäristöönsä. Suurimmalla osalla rataverkkoa rautatieliikenteen aiheuttama tärinä ei aiheuta ongelmia. Merkittäväksi ongelmaksi se muuttuu kuitenkin silloin, kun ihmiset altistuvat tärinälle asuinympäristössään. Asuinrakennuksen tärinä voi merkittävästi vaikuttaa ihmisten asuinmukavuuteen.

Tärinää voidaan tarkastella neljän eri lähestymistavan kautta (Yang & Hong 2009, 2–3). Tärinän synty, kulkeutuminen ja vastaanotto voidaan erottaa omiksi vaiheikseen. Lisäksi tärinää voidaan tarkastella tärinän ehkäisyn kannalta. Tärinän syntyä tarkasteltaessa keskitytään liikkuvan junaan sekä raiteen ja maaperän käyttäytymiseen kuormituksen alla. Tärinän kulkeutumisella taas tarkoitetaan tärinäaaltojen leviämistä maaperässä. Suuri merkitys on myös tärinän vastaanottajan toimivalla rakennuksella. Tärinän ehkäisyllä taas pyritään erilaisin teknisin ratkaisuin vähentämään tärinää.

Tässä luvussa pyritään avaamaan tärinähaitan syntyyn kuuluvat eri vaiheet sekä perehdytään tärinän luonteeseen fysikaalisena ilmiönä. Rautatieliikenteen aiheuttama tärinä on värähtelyä kuten kaikki aaltoliike. Siihen pätee samat lainalaisuudet kuin muuhunkin mekaaniseen aaltoliikkeeseen. Rautatietärinää tarkasteltaessa värähtelyn lähteenä eli herätteenä toimii juna, joka liikkuu radalla. Maaperä toimii väliaineena, jota pitkin värähtely etenee rakennukseen. Rakennus taas toimii värähtelyn vastaanottajana.

### 2.1 Värähtelyn perusteet

Aaltoliike koostuu värähdyksistä. Värähdykset muodostavat aallon, joka poikkeaa tasapainoasemastaan kuvan 1 mukaisesti. Aallon suurinta poikkeamaa tasapainoasemasta kutsutaan *amplitudiksi*  $A$ . Kuvan 1 värähtely on harmonista ja sen amplitudi on vakio.



Kuva 1. Aaltoliikkeen periaate (Talja 2004, A1).

Yhtä värähdystä, eli edestakaista liikettä tasapainoaseman suhteen, kutsutaan jaksoksi. Värähtelyn *jaksonaika*  $T$  on aika, joka kuuluu värähtelijän yhteen värähdykseen. *Taajuus*  $f$  taas saadaan jaksonajan käänteislukuna, ja se kuvaa, montako värähdystä tapahtuu yhdessä aikayksikössä.

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

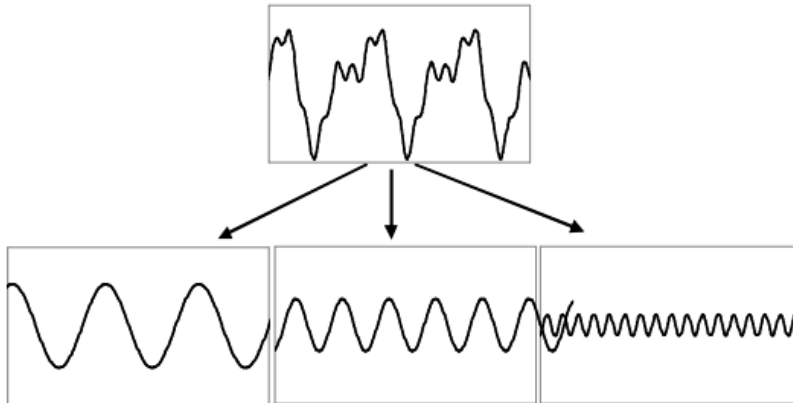
missä  $T$  on jaksonaika.

Aallonpituus  $\lambda$  on aallonharjojen välinen etäisyys. Aaltoliike etenee yhden jakson jaksonaikana  $T$  yhden aallonpituuden verran. Aaltoliikkeen etenemisnopeus voidaan laskea aaltoliikkeen perusyhtälöstä:

$$v = f\lambda, \quad (2)$$

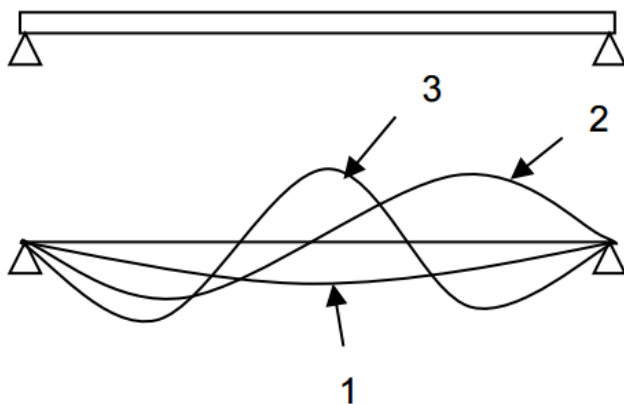
missä  $f$  on taajuus ja  
 $\lambda$  aallonpituus.

Aaltoliike voi koostua useista eri taajuuksista. Useista taajuuskomponenteista koostuvasta tärinästä voidaan erottaa eri taajuuskomponentit, joiden amplitudi on vakio kuvan 2 mukaisesti.



Kuva 2. Useista eri taajuuskomponenteista koostuva värähtely (Talja 2004, A1).

Jokaisella kappaleella on *ominaistaajuus*, jolla se värähtelee saadessaan värähdellä vapaasti. Mitä monimutkaisempi kappale on kyseessä, sitä enemmän ominaistaajuuksia sillä voi olla. Pienintä kappaleelle ominaista värähtelytaajuutta kutsutaan alimmaksi ominaistaajuudeksi. Kuvassa 3 on esitetty palkki ja sen kolme alinta ominaistaajuutta.



Kuva 3. Palkin kolme alinta ominaistaajuutta (Talja 2004, A1).

Kun ulkoinen voima vaikuttaa kappaleeseen sen ominaistaajuudella, syntyy *resonanssi*. Tällöin värähtelyn amplitudi kasvaa suureksi. Resonanssin voi aiheuttaa esimerkiksi toinen värähtelijä, joka värähtelee samalla taajuudella kuin resonoivan kappaleen ominaistaajuus.

## 2.2 Rautatietärinän erityispiirteet

Yleensä ympäristötärinät jaetaan kahteen eri luokkaan tärinän keston mukaan: lyhytkestoiseen ja pitkäkestoiseen tärinään. Muun muassa saksalainen standardi DIN 4150-3 (1999) käyttää tätä jakoa. Sen mukaan lyhytkestoiseksi tärinäksi lasketaan tärinä, joka ei kestä tarpeeksi pitkään aiheuttaakseen rakenteellisia vaurioita eikä aiheuta resonanssia rakenteessa. Pitkäkestoiseen tärinään lasketaan kaikki se tärinä, joka ei täyty lyhytkestoisen tärinän määritelmää. Lyhytkestoista ympäristötärinää aiheuttavat mm. räjäytystyöt, kun taas pitkäkestoista tärinää syntyy esimerkiksi teollisuuskoneista.

Rautatieliikenteen aiheuttama tärinä asettuu kestoltaan lyhyt- ja pitkäaikaisen tärinän välimaastoon. Se on tarpeeksi pitkäaikaista, jotta se voi aiheuttaa resonanssia tai rakennevaurioita, mutta ei kuitenkaan jatkuvaa. Tieliikenne voi aiheuttaa tärinää lähes katkottomasti vilkasliikenteisellä tiellä. Rautateillä taas tärinää esiintyy vain ajoittain, mutta toisaalta tärinä voi olla hyvinkin säännöllisesti toistuvaa, sillä junat noudattavat usein varsin säännöllistä aikataulua.

Rautatieliikenteen aiheuttama tärinä eroaa muista tärinän muodoista amplitudinsa ja taajuutensa vuoksi. Rautatietärinän amplitudi on todella pieni verrattuna esimerkiksi rakentamisen tai maanjäristyksien aiheuttamaan tärinään. Taajuus taas on todella matala verrattuna muihin tärinälähteisiin, ja vaihtelee tyypillisesti välillä 3–30 Hz. (Xia ym. 2013, 14)

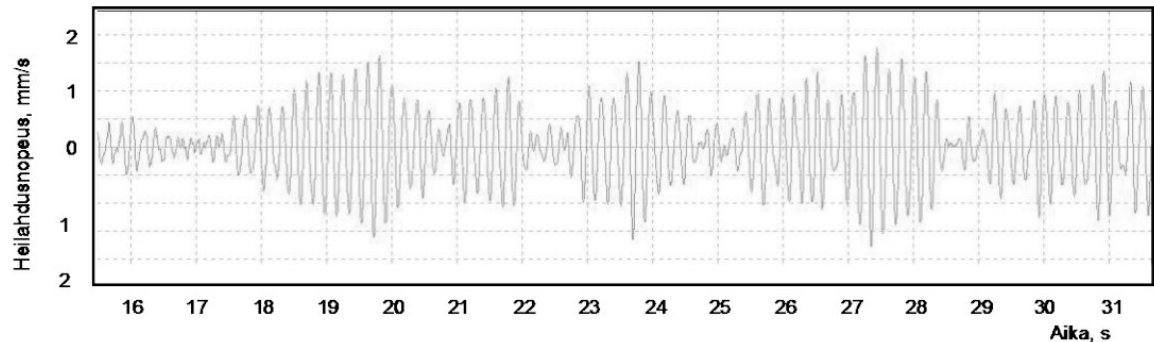
Rautateiden aiheuttaman tärinän suuruutta voidaan mitata usean eri suureen kautta. Yleisimmät näistä ovat

- heilahdusnopeus [mm/s],
- heilahduskiihtyvyys [mm/s<sup>2</sup>] ja
- siirtymä [mm].

Useimmiten rautatietärinää mitattaessa suurena käytetään joko heilahdusnopeutta tai -kiihtyvyyttä. Ulkomaisissa julkaisuissa tärinää voidaan kuvata myös desibeleinä (mm. Yang ym. 2003, Volberg 1983), mutta käytäntö ei ole yleinen suomalaisissa julkaisuissa (esimerkiksi Talja 2004). Tässä työssä tärinän suuruutta kuvataan juuri heilahdusnopeuden avulla. Nämä suureet eivät kuitenkaan ota huomioon sitä, miten

ihminen kokee tärinän suuruuden. Tätä varten voidaan määritellä värähtelyn tunnusluku, jota on käsitelty enemmän luvussa 3.2.

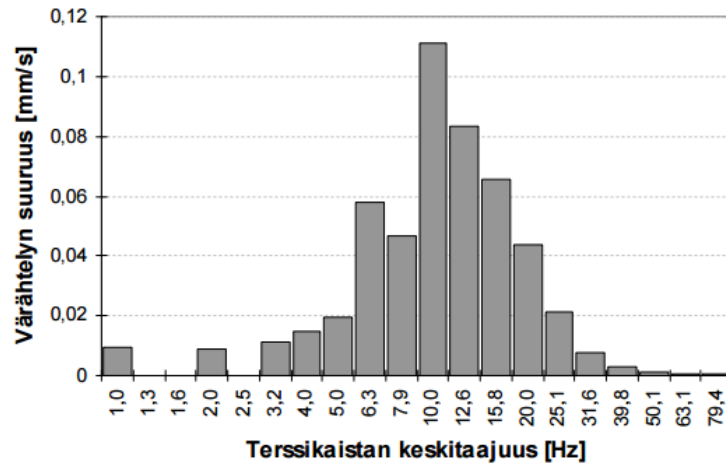
Tärinämittausten tulokset voidaan esittää esimerkiksi heilahdusnopeuden suuruutena ajan suhteen. Kuvassa 4 on esitetty tyypillinen junan aiheuttama värähtely maaperässä, kun tärinän herätetaajuus on lähellä maaperän ominaistaajuutta.



Kuva 4. Tyypillinen värähtely maaperässä, kun herätteen taajuus on lähellä maaperän ominaistaajuutta (Talja & Törnqvist 2014, B41).

Liikennetärinämittausten tuloksia tarkasteltaessa tulokset esitetään myös terssi- eli kolmannesoktaavikaistoittain, jotta esitystapa kuvaisi paremmin tärinän taajuussisältöä (kuva 5). Tällöin tärinän koko taajuussisältö jaetaan osiin, joita kutsutaan kaistoiksi. Liikennetärinätarkasteluissa käytetään taajuuden jakamista terssi- eli kolmannesoktaavikaistoihin niin, että seuraavan kaistan taajuus on edellisen kaistan taajuus kerrottuna kahden neliöjuurella. Tällöin kaistojen keskitaajuudet ovat 2, 2,5, 3,2, 4, 5, 6,3, 8, 10, 25, 32, 40, 50, 63 ja 80 Hz (Talja & Törnqvist 2014, A36). Liikennetärinän taajuus on yleensä alle 80 Hz, joten tarkasteluväliksi riittää 0–80 Hz.





Kuva 5. Esimerkki kolmannesoktaavikaistoittain esitetystä värähtelystä (Talja 2011, 19).

Vaikka rautateiden aiheuttamaa tärinää käsitellään usein yhtenä kokonaisuutena, rautatiet aiheuttavat eri tilanteissa erilaista tärinää. Rautatietärinä voidaan Jonesin (2009, 399) mukaan jakaa kolmeen eri kategoriaan tärinän syntyyn vaikuttavien tekijöiden mukaan:

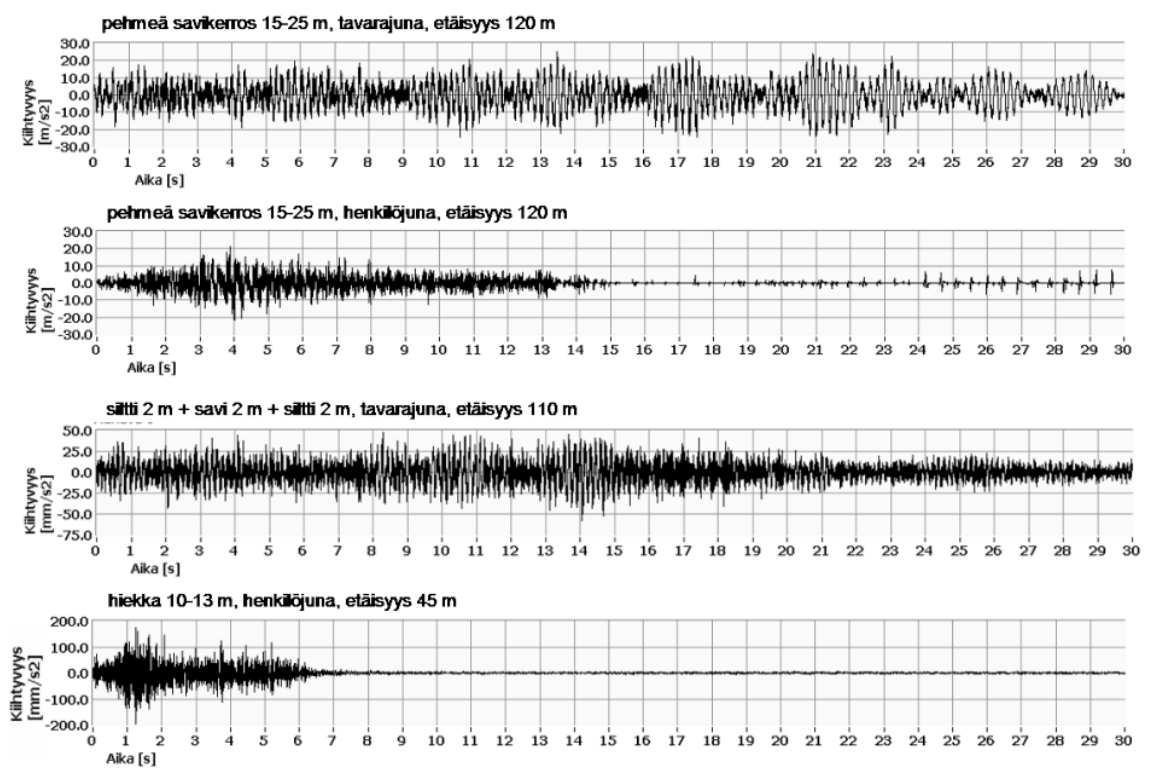
*Raskas tavaraliikenne* aiheuttaa värähtelyä, jonka amplitudi on verrattain suuri. Tavarajunien nopeus on yleensä suhteellisen alhainen verrattuna muuhun rautatieliikenteeseen. Tavaraliikenne aiheuttaa tärinää tyypillisesti juuri pehmeillä savimailla, joilla tärinä voi kantaa huomattaman kauas. Toinen tunnusomainen piirre raskaiden tavarajunien aiheuttamalle tärinälle on sen todella alhainen taajuusisältö. Hallitsevat taajuudet ovat yleensä alle 10 Hz. Tällainen värähtely siirtyy herkästi lähellä oleviin rakennuksiin saaden ne täriseämään. Tässä työssä tarkastellaan juuri raskaan liikenteen aiheuttamaa tärinää.

*Suurnopeusjunat* voivat kulkea niin nopeasti, että junan nopeus ylittää maassa kulkevan tärinäaallon nopeuden. Tätä ilmiötä voidaan verrata äänennopeutta nopeammin lentävien lentokoneiden aiheuttamaan äänivallin rikkoutumiseen. Rautatiellä sattuessa ilmiö voi aiheuttaa merkittäviä siirtymiä rautatien rakenteisiin. Vaikka ilmiö on harvinainen, sitä on tutkittu suhteellisen paljon suurnopeusratojen yleistyessä (mm. Madshus & Kaynia 2000, Bian ym. 2014, Zhai ym. 2015).

*Maanalaiset junat* tunneleissa aiheuttavat myös tärinää yläpuolisiin rakennuksiin. Tärinä on huomattavasti korkeataajuisempaa kuin maan päällä kulkevan junan

aiheuttama tärinä. Tärinä on ihmisen kuulorajan ala-asteikolla (30 – 250 Hz), minkä takia tärinä voi aiheuttaa meluhaittoja rakennuksiin. Ilmiötä kutsutaan myös runkomeluksi.

Maaperällä on suuri merkitystä siihen, kuinka laajalle alueelle tärinähaitta ulottuu. Tärinän leviää parhaiten pehmeissä ja vesipitoisissa maalajeissa, kuten savissa, silteissä, liejuissa ja turpeissa (Talja & Törnqvist 2014, B38). Karkearakeisilla maalajeilla tärinä ei leviä yhtä tehokkaasti. Kuvassa 6 on esimerkkejä junien aiheuttamasta värähtelystä eri maalajeilla.



Kuva 6. Esimerkkejä junien aiheuttamasta värähtelystä erilaisissa maaperissä (Talja & Törnqvist 2014, B42).

### 2.3 Tärinän synty

Tärinän syntyyn vaikuttavista tekijöistä tärkeimmät ovat herätteenä toimiva juna sekä ratarakenne ja maaperä. Radalla liikennöi useita erilaisia junia, joiden ominaisuudet vaihtelevat suuresti. Näin ollen kaikki radalla liikennöivät junat eivät suinkaan aiheuta

tärinähaittaa lähialueen rakennuksiin, vaan yleensä kyseessä on tietyt junatyypit. Junan ominaisuuksista olennaisimmat tekijät ovat

- junan ominaisuudet, kuten kunto ja telivälit,
- junan kuorman suuruus ja
- junan nopeus.

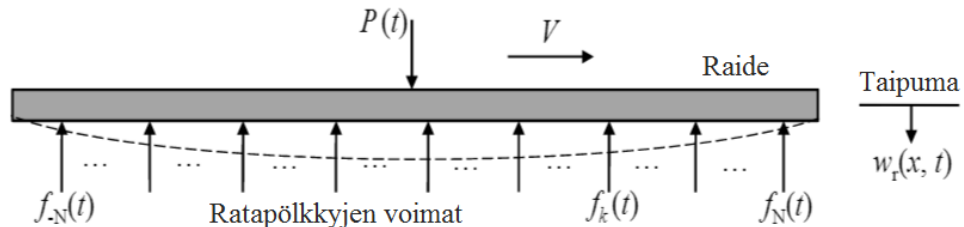
### 2.3.1 Juna herätteenä

Rautatieliikenteen tärinän synnyttää herätteenä toimiva juna. Rautatieliikenteen aiheuttama tärinä syntyy yksinkertaistettuna junan rataa aiheuttaman palautuvan siirtymätilan ja radan epätasaisuuksien yhteisvaikutuksesta. Kuitenkin tarkempi syntymekanismien tarkastelu paljastaa, ettei junan ja raiteen vuorovaikutuksen mallintaminen ole yksinkertaista. Vaikka raiteissa tai junan pyörissä ei esiintyisi minkäänlaista epätasaisuutta, voi tärinää synnyttää jo pelkästään junan akselien rataa aiheuttama liikkuva kuorma, joka toistuu säännöllisesti seuraavien akseleiden ylittäessä tarkastelupisteen (Yang & Hong 2009, 2). Syntymekanismia tarkasteltaessa kuormitus jaetaan kvasistaattiseen ja dynaamiseen kuormitukseen.

Junan voidaan ajatella olevan kvasistaattinen eli näennäisesti staattinen kuorma. Tällä tarkoitetaan sitä, että junan liikkuva kuorma ajatellaan mallintaessa näennäisesti staattiseksi. Krylov ja Ferguson (1994) kehittivät mallin, jossa kvasistaattisen kuorman aiheuttamaa raiteen taipumista mallinnetaan kimmoisella alustalla taipuvana palkkina. Ensin raidetta mallinnettiin Euler-Bernoulli-palkkina, mutta tarkempia tuloksia saatiin mallintamalla palkki Timoshenko-palkkiteorian mukaan (Chen ym. 2001).

Junan akseleiden aiheuttama kuorma saa raiteen taipumaan pyörien alla kuvan 7 mukaisesti. Kuorman aiheuttama palautuva taipuma liikkuu junan nopeudella saaden aikaan aaltomaisen liikkeen. Junan massa vaikuttaa siihen, millaiset teli- ja akselikuormat juna rataa kohdistaa. Kaikki raiteen painuman alueella sijaitsevat ratapölkkyt saavat näin osansa akselikuormasta. Täten jokainen vaikutuksen alainen pölkky käyttäytyy kuin siihen kohdistuisi pystysuuntainen kuorma niin kauan kuin se on taipuman vaikutuksen alaisena. Lisäksi tämä taipuminen toistuu säännöllisin välein, kun otetaan huomioon, että jokaisessa junassa on useampia vaunuja, joiden mitat ovat samanlaiset. Jokaisessa vaunussa on kaksi teliä, joissa taas on tietyin välein kaksi

akselia. Nämä mittasuhteet taas vaihtelevat junatyypistä riippuen. Pääsääntöisesti voidaan sanoa, että junan suuri kokonaismassa kasvattaa tärinän suuruutta.

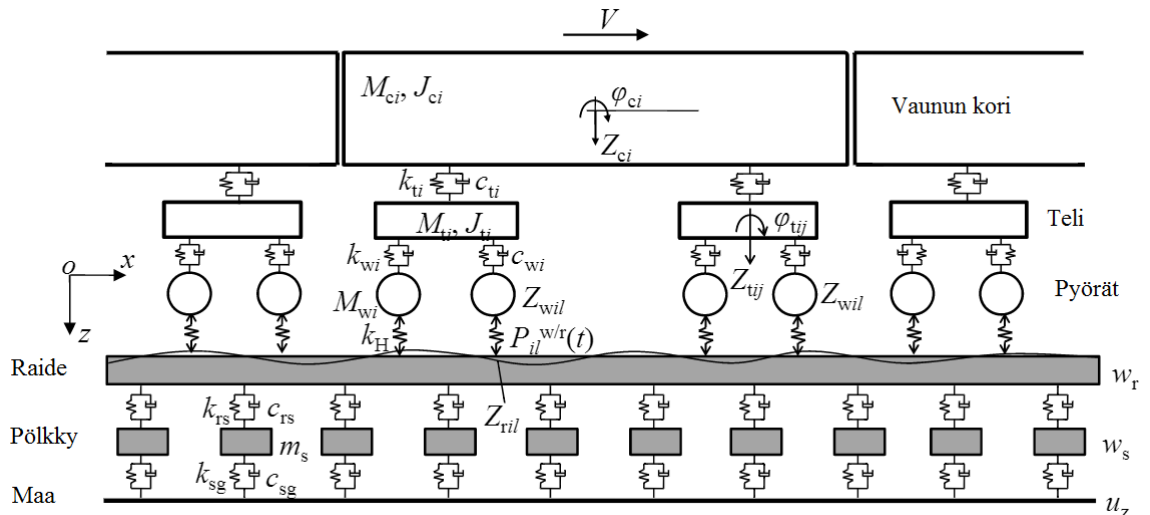


Kuva 7. Radan käyttäytyminen junan akselikuorman alla (mukaiillen Cao ym. 2013, 354).

Radan lähialueella, noin 30 m radasta, radan pölkkyväli toimii määräävänä tekijänä korkeataajuisen tärinän synnylle. Tärinän taajuussisällön yhtä hallitsevaa taajuusaluetta voidaan arvioida jakamalla junan nopeus ratapölkkyvälillä. Kauempana radasta määrääväksi tekijäksi nousee kuitenkin junan teliväli pölkkyjen välin sijaan. Nämä tekijät eivät kuitenkaan yksin selitä tärinän koko taajuussisältöä vaan vain osan siitä. (Törnqvist & Talja 2006, C2)

Tärinän syntyä mallinnettaessa ei kuitenkaan riitä, että mallinnetaan pelkkää junan aiheuttamaa kvasistaattista kuormaa. Kvasistaattisen kuorman lisäksi tärinän syntyyn vaikuttavat raiteen ja pyörien epätasaisuudet (Jones & Block 1996), jotka muodostavat dynaamisen kuorman. Esimerkiksi voimakkaasti kuluneet lovipyörät voivat kasvattaa merkittävästi tärinän suuruutta (Müller ym. 2013). Raiteen tasaisuudella on myös suuri merkitys, ja esimerkiksi roudan aiheuttamat epätasaisuudet kasvattavat dynaamista kuormaa.

Juna, raide ja maa muodostavat yhdessä moniosaisen värähtelysteemin kuvan 8 mukaisesti. Systemi koostuu jousista ja vaimentimista, joita junan vaunun, telien pyörien sekä raiteen, pölkkyjen ja maan välillä voidaan ajatella olevan.



Kuva 8. Vuorovaikutukset junan, raiteen ja maaperän välillä (Cao ym. 2013, 349).

Maaperä mallinnetaan usein puoliavaruudeksi, joka koostuu viskoelastisista kerroksista. Analyytisesti viskoelastisen maaperän käyttäytymistä tarkastelivat tutkimuksissaan Karlström ja Boström (2006). Maaperän värähtelyä voidaan kuitenkin mallintaa myös numeerisesti FEM-mallinnuksen (Finite Element Method) avulla, kuten esimerkiksi Yang ym. (2003) tutkimuksissaan. FEM-mallinnuksen avulla tärinää maaperässä on mallinnettu sekä 2D-malleilla (Lei & Noda 2002) että 3D-malleilla (Galvín ym. 2010). 3D-mallinnus vie kuitenkin todella paljon laskentatehoa, joten tärinää mallinnetaan usein käyttäen kevyempää 2.5D-mallinnusta (Hung ym. 2013, Gao ym. 2012).

### 2.3.2 Pohjamaan merkitys tärinän synnyssä

Junakaluston lisäksi merkittävä rooli on myös radan rakenteella ja pohjamaalla. Radan päällysrakenteen ja penkereen käyttäytyminen junakaluston kanssa ratkaisee, miten tärinä välittyy pohjamaahan. Mitä pienempi junan telien aiheuttama jännitys on pohjamaassa, sitä pienempi on pohjamaan muodonmuutos. Vastaavasti taas mitä pienempi on maan dynaaminen muodonmuutos, sitä pienempi on myös tärinäheräte. (Törnqvist & Talja 2006, C2)

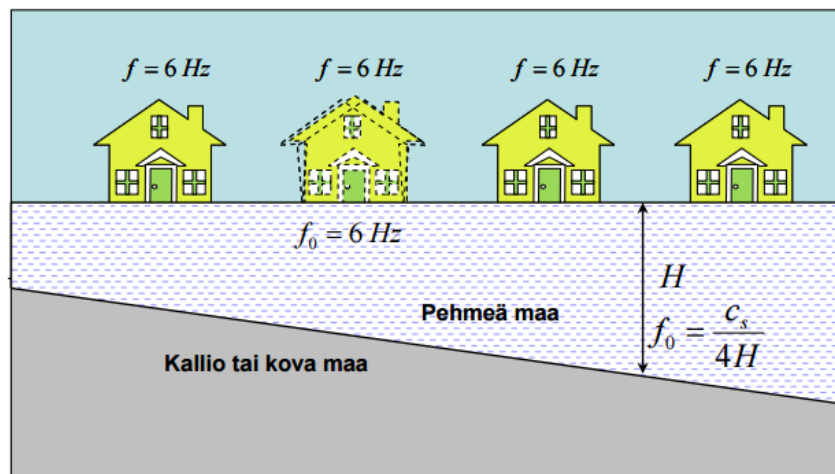
Maaperä vaikuttaa sekä tärinän suuruuteen että sen taajuussisältöön. Tärinäherätteen taajuussisältö ei välttämättä siirry sellaisenaan maaperään, vaan maaperän ominaisuuksista riippuen tietyt taajuusalueet korostuvat. Värähtelyn suuruus ja taajuussisältö muuttuvat myös etäisyyden kasvaessa. Tärinän kulkeutumista maaperässä sekä vaimenemista on käsitelty tarkemmin kohdassa 2.5 ja 2.6.

Kuten rakenteillakin, myös maaperällä on sille ominaiset värähtelytaajuudet. Maaperän taajuussisältö riippuu maaperän ominaisuuksista, kerroksellisuudesta sekä peruskallion topografiasta. Bachmannin ym. (1997) mukaan pehmeille maalajeille voidaan karkeasti arvioida maapohjan alin ominaistaajuus leikkausaallon ja maakerroksen paksuuden perusteella yhtälöä (3) hyödyntäen. (Talja ym. 2008, B6)

$$f_0 = \frac{c_s}{4H} , \quad (3)$$

missä  $c_s$  on leikkausaallon nopeus ja  
 $H$  pehmeän maakerroksen paksuus.

Kaava ei kuitenkaan ole tarpeeksi tarkka, jotta sitä voisi käyttää suunnittelutarkoitukseen. Kokemusperäiset havainnot kuitenkin osoittavat, että pehmeillä savimailla merkittävimmät värähtelytaajuudet ovat yleensä taajuusalueella 4 – 10 Hz (Talja ym. 2008, B6). Maakerroksen paksuuden merkitystä on havainnollistettu kuvassa 9.



Kuva 9. Pohjasuhteiden vaikutus värähtelyn ilmenemiseen asuinrakennuksessa (Talja ym. 2008, B19).

Resonanssilla on suuri merkitys värähtelyhaitan syntymiseen asuintiloissa. Resonanssin ilmeneminen riippuu kuitenkin lukuisista eri tekijöistä, mikä tekee sen ennustamisesta vaikeaa. Pienetkin erot pohjasuhteissa voivat vaikuttaa resonanssin syntymiseen asuinrakennuksessa (Talja & Törnqvist 2014, C46). Kun lisäksi vielä otetaan huomioon

eri rakennusten eri ominaisuudet, voi tärinähaitta samalla asuinalueella vaihdella huomattavasti. Naapurissa sijaitseva talo ei välttämättä tärise ollenkaan, vaikka viereisessä talossa tärinä on suuri ongelma.

Värähtelyn suuruuteen taas eri etäisyyksillä vaikuttaa erityisesti maaperän lujuus. Maaperän lujuus taas riippuu maaperän pehmeimpien kerrosten dynaamisesta kimmokertoimesta. Tärinähaitan kannalta olennaista on se, miten nopeasti tärinän suuruus muuttuu etäisyyden kasvaessa. (Törnqvist & Talja 2006, A4)

## 2.4 Tärinän kulkeutuminen maaperässä

Maaperän ominaisuudet vaikuttavat merkittävästi siihen, miten tärinä maaperässä etenee. Lisäksi maaperä on harvoin tasalaatuista, vaan maaperä koostuu erilaisista maalajeista, jotka ovat kerrostuneet eripaksuiksi kerroksiksi. Tärinän etenemistä on siis vaikea arvioida tuntematta maaperän ominaisuuksia.

Väliaineena maaperä on kiinteä joustava materiaali, jossa värähtely etenee kahtena erityyppisenä värähtelynä: puristus- ja leikkausaaltoina (Jones 2009, 405). Puristusaaltoa kutsutaan myös primääri- eli P-aalloksi ja leikkausaaltoa sekundaari- eli S-aalloksi. Puristusaalto etenee maassa pitkittäisenä liikkeenä, jossa maan tilavuus muuttuu aallon edetessä, kun taas leikkausaalto etenee poikittaisena liikkeenä, johon ei liity tilavuuden muutoksia, vaan aalto aiheuttaa partikkeleiden kiertoliikettä maassa (Yang & Hong 2009, 6). P- ja S-aaltojen eteneminen maassa on kuvattu kuvassa 10. Sen lisäksi, että aaltojen värähtelysuunta on eri, ne etenevät myös eri nopeutta. P-aalto etenee maassa nopeammin kuin S-aalto (Jones 2009, 407).

P-aallon etenemisnopeus riippuu väliaineen ominaisuuksista yhtälön (4) mukaisesti:

$$v_P = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}, \quad (4)$$

missä  $\lambda$  ja  $\mu$  Lamé-vakioita ja  $\rho$  tiheys.

S-aallon etenemisnopeus taas lasketaan yhtälöstä (5):

$$v_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}, \quad (5)$$

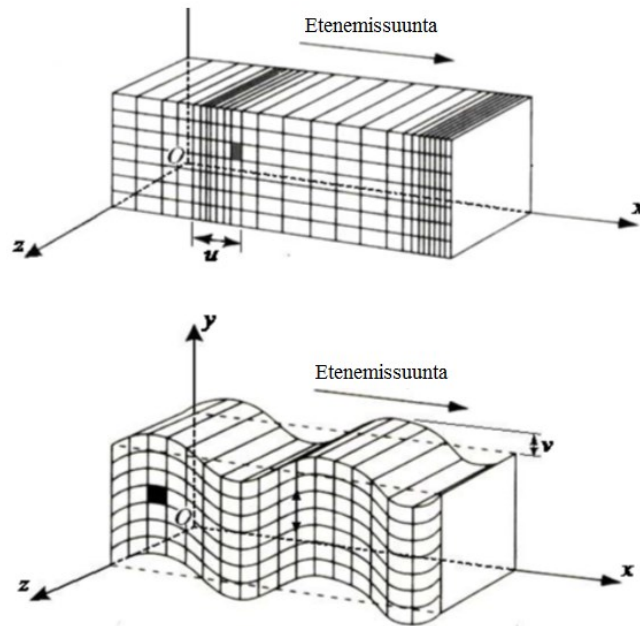
missä  $\mu$  on Lamé-vakio ja  
 $\rho$  tiheys.

Lamé-vakiot taas lasketaan yhtälöiden (6) ja (7) mukaisesti:

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \text{ ja} \quad (6)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad (7)$$

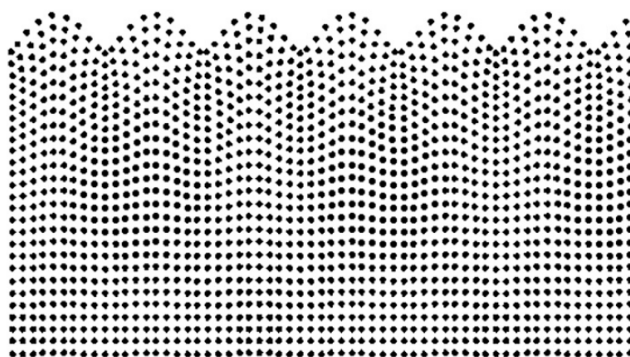
missä  $E$  on kimmomoduuli ja  
 $\nu$  Poissonin luku.



Kuva 10. P-aallon (ylhällä) ja S-aallon (alhaalla) eteneminen väliaineessa (mukaiillen Cao ym. 2013, 98).



Maaperä on väliaineena puoliavaruuden muotoinen. Näin ollen tärinä käyttäytyy eri tavalla maan pinnassa kuin sen sisällä. P- ja S-aaltojen yhdistyessä maan pinnassa syntyy Rayleigh- eli R-aalto, joka muistuttaa veden pinnan aaltoilua. R-aalto on yhdistelmä leikkaus- ja puristusaaltoa, jotka ilmenevät väliaineen rajapinnan tuntumassa kuvan 11 mukaisesti. R-aallossa pysty- ja vaakaliikkeet ovat eri vaiheessa toistensa kanssa niin, että partikkelit liikkuvat ellipsin muotoista rataa (Jones 2009, 407). R-aalto on suurimmillaan maan pinnassa ja vaimenee syvemmälle mentäessä. Syvyydellä, joka vastaa R-aallon pituutta, on pystyvärähtelyn amplitudi enää noin 30 % ja vaakavärähtelyn vain 15 % maan pinnan arvosta (Talja & Törnqvist 2014, B37).



Kuva 11. Partikkeleiden liike Rayleigh-aallon edetessä (Jones 2009, 408).

Rayleigh-aalto on aalloista hitain, sillä sen nopeus on vain noin 87–95 % S-aallon nopeudesta (Jones 2009, 407). Pehmeillä maalajeilla R-aallon nopeus on noin 100 m/s, kun taas kovemmilla maalajeilla nopeus on noin 300 m/s (Jones 2009, 408). R-aallon vaikutus tärinän haitallisuuden kannalta on suuri, sillä se vastaa 67 % aallon kuljettamasta kokonaisenergiasta, kun taas S-aalto kuljettaa 26 % ja P-aalto vain 7 % (Cao ym. 2013, 96) energiasta. Vaikka R-aalto vaimenee nopeasti syvyyden kasvaessa, on vaimeneminen etäisyyden kasvaessa hidasta (Cao ym. 2013, 99). R-aallot siis kulkeutuvat pinnassa helposti pitkiä matkoja, toisin kuin S- ja P-aallot (Yang & Hong 2009, 10).

Todellisissa olosuhteissa maaperä ei kuitenkaan ole koskaan homogeeninen väliaine. Maaperä sisältää aina ominaisuuksiltaan vaihtelevia kerroksia, joiden paksuus vaihtelee. Lisäksi peruskallion topografia voi vaihdella hyvin paljon kohteesta riippuen. Kun kaikki nämä tekijät otetaan huomioon, muuttuu tärinän etenemisen tarkastelu huomattavasti monimutkaisemmaksi. Kun erityyppiset aallot kohtaavat rajapinnan,

kuten maanpinnan tai maakerrosten rajan, aalloissa tapahtuu heijastumista ja taittumista. Tällöin P-aallot voivat muuttua S-aalloiksi ja päinvastoin. Heijastuminen ja taittuminen voivat aiheuttaa odottamattoman suuria värinäarvoja etenkin pehmeissä maalajeissa. Pienikin muutos värinälähteessä voi siis johtaa yllättäviin muutoksiin värinän ilmenemisessä. Nämä ilmiöt selittävät sen, miksi esimerkiksi junien eri nopeuksilla voi olla odottamaton vaikutus värinään. (Talja ym. 2008, B3)

Mitä laajemmalle alueelle värinä radasta leviää, sitä useampi ihminen altistuu sille. Värinän leviämisen kannalta merkittävimiksi ominaisuuksiksi VTT (Törnqvist & Talja 2006, A4) on listannut seuraavaa:

- maalaji ja sen rakeisuus
- maakerroksen tiiveys ja lujuus
- maakerroksen kimmomoduuli ja sen
- vesipitoisuus.

Pehmeissä hienorakeisissa maalajeissa värinä leviää pidemmälle kuin karkearakeisissa. Mitä pehmeämpi maalaji on, sitä laajemmalle värinä leviää. Tämä johtuu siitä, että veden kyllästämissä pehmeissä maalajeissa maan sisäinen värinän vaimeneminen on pienempää. Lisäksi pehmeillä mailla värinän taajuus on alhaisempi, ja alhaiset taajuudet leviävät laajemmalle kuin korkeat. Toisaalta pehmeillä maalajeilla jo maaperän herätepoikkeama on suurempi kuin karkeilla, mikä ennestään kasvattaa värinän suuruutta. (Törnqvist & Talja 2006, C3)

## **2.5 Värinän vaimeneminen**

Värinä vaimenee edetessään kahdella eri tavalla: geometrisena vaimennuksena ja sisäisenä vaimennuksena (Cao ym. 2013, 96). Geometrinen vaimennus johtuu värinäaallon itsensä leviämisestä aina vain laajemmalle alueelle edetessään. Samalla aallon energiatiheys ja amplitudi pienevät etäisyyden aaltolähteestä kasvaessa. Sisäinen vaimennus taas johtuu energian absorboitumisesta materiaaliin, jossa aalto etenee. Tällöin vaimennus tapahtuu mm. kitkan ja viskositeetin vaikutuksesta.

Geometrisen vaimennuksen mukaan tärinän suuruus on kääntäen verrannollinen etäisyyden neliöön. Tällä tavalla voidaan periaatteessa arvioida S- ja P-aaltojen vaimentumista etäisyyden kasvaessa. Tilanne ei kuitenkaan todellisuudessa ole niin yksinkertainen, sillä myös sisäinen vaimennus vaikuttaa tärinän vaimenemiseen. Yleisesti ottaen tärinä vaimenee voimakkaimmin maaperän yläosalla, ja syvämmälle mentäessä vaimeneminen vähenee (Connolly ym. 2015).

Analyttisissä menetelmissä tärinäaallon kokonaisvaimennus kuvataan yleensä VTT:n mukaan (Törnqvist & Talja 2006, A7) maan pinnalla vaikuttavan R-aallon vaimennuksena. Vaimennus voidaan laskea yhtälöllä (8).

$$\frac{A_1}{A_2} = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^\beta \cdot e^{\alpha(r_1-r_2)}, \quad (8)$$

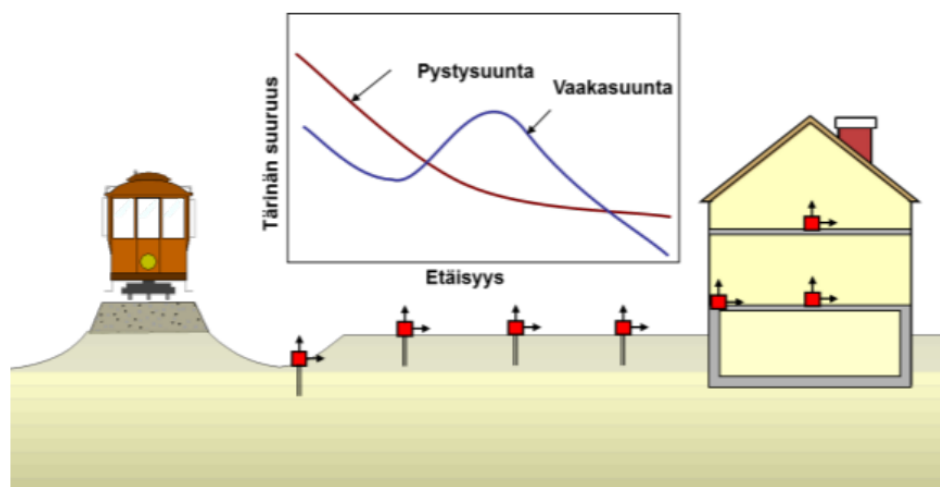
missä  $A_1$  on tärinäamplitudin suuruus etäisyydellä  $r_1$ ,  
 $A_2$  tärinäamplitudin suuruus etäisyydellä  $r_2$ ,  
 $\beta$  geometrisen vaimennuksen tekijä ja  
 $\alpha$  sisäisen vaimennuksen tekijä.

Yhtälö kuvaa tilannetta, jossa maaperän oletetaan olevan homogeeninen. Näin ei kuitenkaan koskaan todellisuudessa ole, mutta kaavan avulla on kuitenkin helppo ymmärtää, miksi R-aallot muodostuvat etäisyyden kasvaessa merkittävimmäksi tärinän kannalta. R-aallon geometrinen vaimennustekijä  $\beta$  on 0,5, kun taas muille aaltomuodoille se on huomattavasti suurempi. (Törnqvist & Talja 2006, A7)

Värähtelun vaimeneminen kuitenkin riippuu useista tekijöistä, joten tarkka laskennallinen arvioiminen on haastavaa. VTT on kuitenkin esittänyt (Talja 2004, 14), että tärinän suuruus voidaan karkeasti arvioida puolittuneeksi, kun etäisyys radalla kasvaa

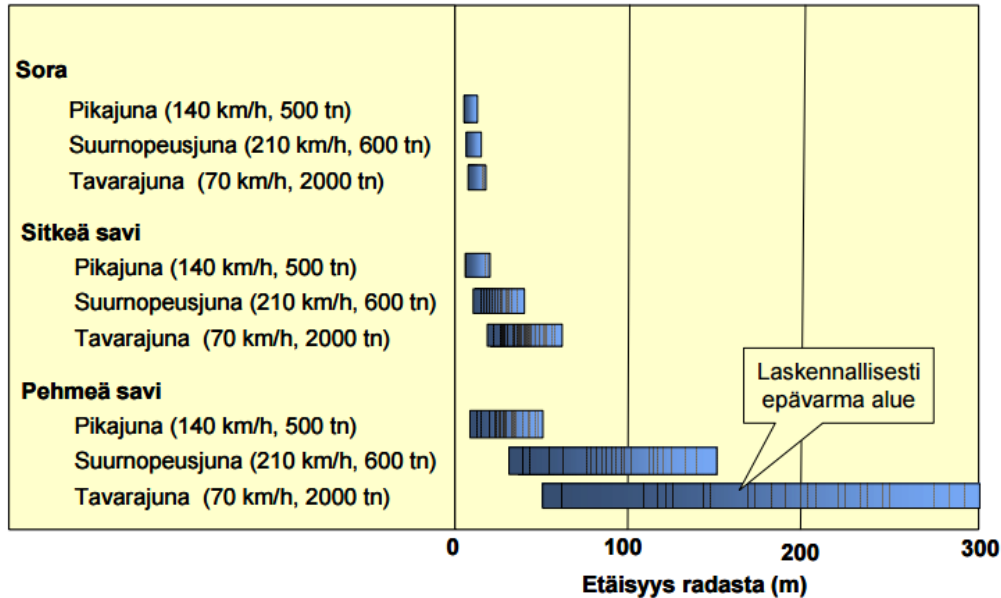
- soramailla noin 1,5-kertaiseksi
- sitkeillä savimailla noin 3-kertaiseksi ja
- pehmeillä savimailla noin 6-kertaiseksi.

Pysty- ja vaakavärähtely eivät vaimene samassa suhteessa etäisyyden kasvaessa. Maanpinnan pystysuuntainen värähtely vaimenee yleensä tasaisesti tärinän edetessä kauemmaksi radasta, mutta vaakavärähtelyn kohdalla tilanne on erilainen (kuva 12). Kokemusperäiset havainnot osoittavat, että teoreettisesta olettamuksesta huolimatta vaakavärähtely voi olla pystyvärähtelyä suurempaa jonkin matkan päässä radasta. Vaakavärähtely voi saavuttaa maksiminsa vasta hieman kauempana radasta ja pehmeillä maalajeilla vaakavärähtely voi olla hallitsevaa melko kaukanakin radasta. (Talja & Törnqvist 2014, B38)



Kuva 12. Maaperästä eri etäisyyksiltä mitattujen pysty- ja vaakasuuntaisten tärinöiden suuruudet (Talja & Törnqvist 2014, 12).

Selvää kuitenkin on, että tärinä vaimenee hitaimmin pehmeillä savimailla. VTT on listannut kuvassa 13 suuntaa-antavia etäisyyksiä, kuinka kauas tärinä voi ulottua eri maalajeille eri junatyypeistä johtuen. Kuvasta nähdään, että painavatkaan tavarajunat eivät yleensä aiheuta ongelmia soramaalla, sillä tärinä ei etene kovin kauas radasta.



Kuva 13. Suuntaa-antava arvio etäisyydestä, jolla rautateiden aiheuttama tärinä voi aiheuttaa haittaa (Talja 2004, 15).

## 2.6 Junan nopeuden vaikutus tärinään

Yleensä junan nopeuden alentaminen pienentää tärinää. Kuitenkin esimerkiksi Lombaert ja Degrande (2009) totesivat tutkimuksessaan, että junan nopeuden kasvaessa tärinän suuruus kasvaa vain lievästi sekä kokeellisissa mittauksissa että laskennallisissa ennustuksissa. Mittauksissa oli kuitenkin tarkasteltu vain suurjunia, joiden nopeus ylitti 150 km/h, eikä alhaisemmilla nopeuksilla kulkevia raskaita tavarajunia. Junan nopeudella on selkeä yhteys myös tärinän hallitseviin taajuuksiin, mikä on osoitettu useissa tutkimuksissa (Sheng ym. 2003, Auersch 2006). Junan nopeuden kasvaessa myös tärinän taajuussisältö muuttuu korkeammaksi (Degrande & Schillemans 2001).

Varsinaisia yhtälöitä, joilla junan nopeuden vaikutusta tärinän suuruuteen arvioidaan, on kuitenkin vähän. Madshus ym. (1996) kehittivät Norjassa mallin matalataajuisen rautatieliikenteestä aiheutuvan tärinän ennustamiseksi. Mallissa myös junan nopeus otetaan huomioon. Suomessa mallia on edelleen korjattu kokemukseräisesti, ja käytössä oleva malli on esitelty VTT:n julkaisussa *Suositus liikennetärinän arvioimiseksi maankäytön suunnittelussa* (Törnqvist & Talja 2006). Laskentamalli huomio junan nopeuden, mutta vasta nopeuden ollessa yli 70 km/h. Laskentamallin perusyhtälöllä (9) voidaan laskea pystysuora heilahdusnopeuden maksimin odotusarvo maanvaraisesti perustetulle radalle.

$$v_{z,max} = v_{z,15} \cdot k_D \cdot k_S \cdot k_G \cdot k_R, \quad (9)$$

- missä  $v_{z,15}$  on pystysuora vertailuheilahdusnopeus maassa etäisyydellä  $D=15$  raiteen keskilinjasta,  
 $k_D$  etäisyyskerroin,  
 $k_S$  junan nopeudesta riippuva kerroin,  
 $k_G$  junan painosta riippuva kerroin ja  
 $k_R$  junan kunnosta riippuva kerroin.

Tällöin junankerroin saadaan yhtälöstä (10). Nopeuskerrointa käytetään kuitenkin vain nopeuksilla, jotka ovat alle 70 km/h.

$$k_S = \left(\frac{S}{S_0}\right)^A, \quad (10)$$

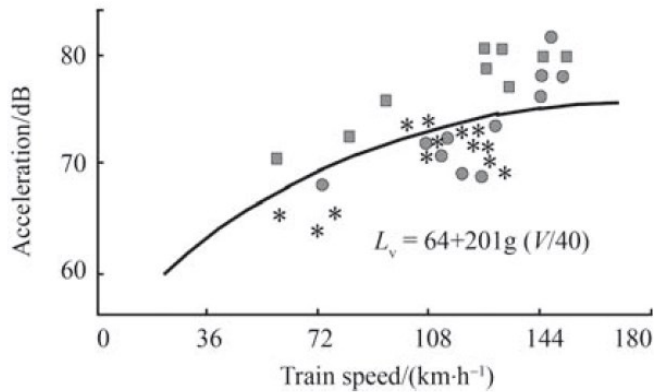
- missä  $S_0$  on vertailunopeutena käytetty 70 km/h,  
 $S$  tarkasteltavan junan nopeus ja  
 $A$  nopeuseksponentti, jonka ohjearvo vaihtelee 0,1–1,1.

Tutkimuksia junan nopeuden vaikutuksesta tärinän suuruuteen nopeuksilla, jotka ovat alle suurnopeusjunien nopeuksien, ei ole kovin paljoa saatavilla. Espanjassa tehdyssä tutkimuksessa Volberg esitti (Volberg 1983), että junan nopeuden vaikutus tärinän suuruuteen noin 50 Hz taajuudella voidaan arvioida yhtälön (11) mukaisesti.

$$L_{v\ 50\ Hz} = 64 + 20 \lg\left(\frac{U}{40}\right), \quad (11)$$

- missä  $L_v$  on maaperän värähtelytaajuuden taso desibeleinä ilmaistuna, kun referenssinä on  $5 \cdot 10^{-8}$  m/s ja  
 $U$  junan nopeus [km/h].

Tutkimuksen nopeusalue oli tällöinkin lähinnä yli 70 km/h, joten tulokset eivät kata matalampia nopeuksia. Volbergin mukaan junan nopeus kuitenkin vaikuttaa tärinään kuvan 14 mukaisesti.



Kuva 14. Junan nopeuden vaikutus tärinään Volbergin mukaan (Xia ym. 2007).

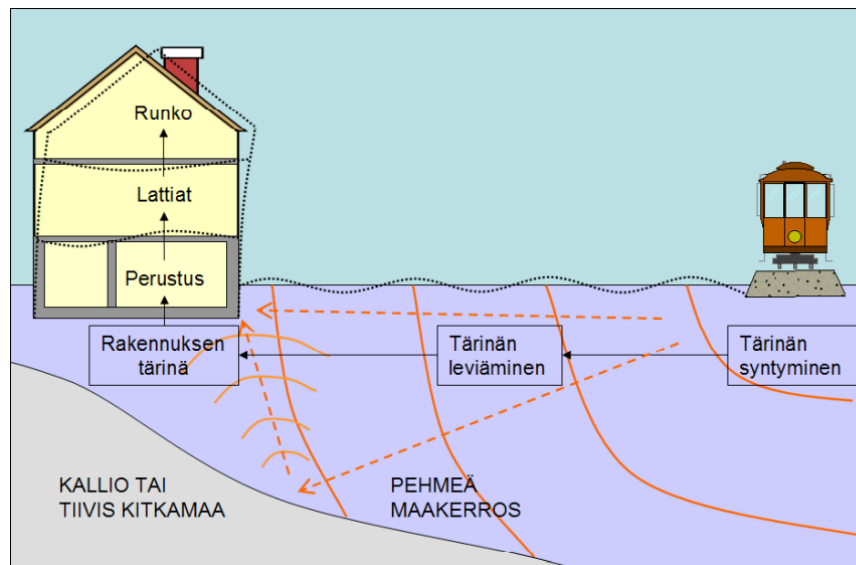
Samansuuntaista arviota käyttää myös FRA (Federal Railroad Administration) Yhdysvalloissa. Arvio on kuitenkin tarkoitettu nimenomaan suurnopeusjunille. FRA:n mukaan tärinän desibelitasoa alustavassa arvioinnissa voidaan arvioida lisäämällä referenssinopeuden desibelitasolle yhtälön (12) mukainen lisäys (FRA 2012).

$$adjustment = 20 \cdot \lg\left(\frac{v}{v_{ref}}\right), \quad (12)$$

missä  $v$  on junan nopeus ja  
 $v_{ref}$  referenssinopeus.

## 2.7 Tärinän siirtyminen rakennuksiin

Jotta tärinä muodostuisi ongelmaksi, täytyy olosuhteiden olla sellaiset, että tärinä pääsee siirtymään maaperästä rakennukseen. Tärinä siirtyy radasta maaperän välityksellä rakennuksen perustuksiin, mikä taas saa rakennuksen rungon ja lattiat värähtelemään, kuten kuvassa 15. Asukas taas havaitsee rungon ja lattian tärinän herkästi ja voi kokea sen häiritseväksi.



Kuva 15. Tärinän siirtyminen rautatieltä rakennukseen (Törnqvist & Talja 2006, 1).

Tärinän siirryessä rakennukseen sen taajuussisältö ja suuruus muuttuvat. Rakennuksen sisältä mitattu värähtely ei siis ole samanlaista kuin maaperässä. Tärinän siirryessä maasta rakennukseen se voi tilanteesta riippuen joko vaimentua tai voimistua. Se, miten tärinä siirtyy maasta rakennukseen, riippuu sekä maaperän että rakennuksen ominaisuuksista. VTT:n (Talja ym. 2008, 22) mukaan maasta perustukseen siirtyvän värähtelyn suuruuteen vaikuttavat:

- maaperän värähtelyn suuruus, suunta ja taajuussisältö,
- rakennuksen vaakadimensiot,
- perustamistapa,
- perustuksen jäykkyys ja
- rakennuksen massa.



Vastaavasti perustuksesta rakennukseen siirtyvään värähtelyyn vaikuttavat:

- perustuksen värähtelyn suuruus, suunta ja taajuussisältö sekä
- rungon ja lattian dynaamiset ominaisuudet.

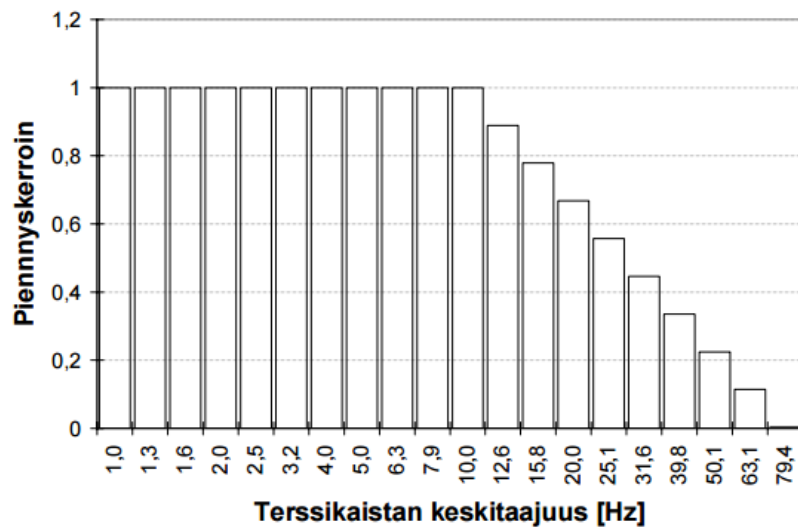
Usein oletetaan, että maaperän värähdellessä rakennuksen perustukset liikkuvat maan kanssa samassa vaiheessa ja yhtä paljon kuin maa. Tämä pitääkin kohtuullisen hyvin paikkaansa, kun tärinän taajuus on alhainen ja perustukset ovat kevyitä ja niiden jäykkyys on alhainen. Tällaisia perustuksia ovat esimerkiksi muuratut kiviperustukset sekä raudoittamattomat betoniperustukset. Näihin perustuksiin värähtely vaikuttaa samalla tavoin kuin aalto kevyeen ja joustavaan ponttonilaituriin. Tällöin dynaamisilla voimilla ei ole suurta merkitystä rakennusta kuvattaessa, vaan rakennus voidaan ajatella staattiseksi. (RIL 253 2010, 67–68)

Jäykissä, massiivisissa teräsbetoniperustuksissa tärinän aiheuttamat siirtymät voivat jäädä selvästi pienemmiksi kuin maaperän värähtely. Rakenne käyttäytyy samoin kuin suuren tankkilaivan runko, johon aallot lyövät. Jos rakenne on taas sivumitoiltaan pieni ja jäykkä, se liikkuu aaltojen päällä kuin ongen koho aallokossa. Tällöin siirtymät voivat olla huomattavan suuria. (RIL 253 2010, 68–69)

Pääsääntönä voidaan pitää sitä, että mitä massiivisempi rakennus on, sitä enemmän rakennus vaimentaa allaan olevan maaperän värähtelyä. Siksi kevyemmät rakennukset voivat olla herkempiä värähtelylle, vaikka rakennusten dynaamiset ominaisuudet olisivat muuten samat. Rakennusten massa ei kuitenkaan ole ainoa erottava tekijä, sillä massiiviset rakennukset ovat yleensä myös korkeampia, jolloin rungon ominaistaajuus ei ole yhtä otollinen liikennetärinälle (Talja ym. 2008, B9).

### **2.7.1 Taajuuden ja resonanssin merkitys**

Liikennetärinä on pääosin matalataajuisista tärinää. Juuri matala taajuus tekee liikennetärinästä ongelmallisen. Korkeataajuiset värähtelyt siirtyvät perustuksiin huomommin kuin matalataajuiset (Talja 2011, 20). Tärinän vaimeneminen on sitä suurempaa, mitä korkeampi taajuus on (RIL 253 2010, 68). Kun tärinän siirtymistä maaperästä perustukseen arvioidaan, voidaan VTT:n (2011) mukaan käyttää korkeilla taajuuksilla kuvan 16 mukaista pienennyskerrointa.

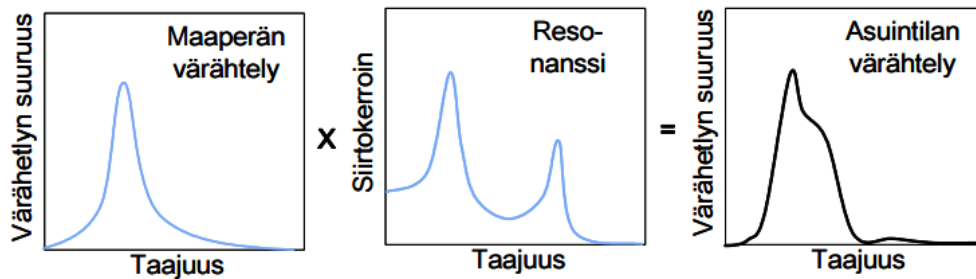


Kuva 16. Pienennyskerroin korkeataajuisen värähtelyn perustuksiin siirtymisen arvioimiseksi (Talja 2011, 20).

Maaperän värähtely kuitenkin sisältää eritaajuisia värähtelyitä, jotka rakennukseen siirryessään käyttäytyvät kukin eri tavoin. Tärinä voi voimistua rakennuksessa kahdella eri tavalla: *tasaisena voimistumisena* tai *resonanssin* kautta.

Tärinän *tasainen voimistuminen* tarkoittaa koko taajuusalueen kattavaa yleistä tärinän voimistumista (RIL 253 2010, 69). Tasaiselle voimistumiselle käytetään VTT:n (2011, 22) mukaan pääsääntöisesti suurennuskerrointa 1,5. Kerrointa ei kuitenkaan käytetä rakennuksilla, joiden lattia ja perustus ovat suorassa yhteydessä maahan sekä pysty- että vaakasuunnassa. Tällöin värähtelyn katsotaan siirtyvän rakennukseen sellaisenaan voimistumatta. Tällaisia rakennuksia ovat yksikerroksiset rakennukset joissa lattia on maanvarainen eikä perustusta ole tuettu paaluille.

Tasaiselle värähtelylle määritetty suurennuskerroin on kuitenkin huomattavasti pienempi kuin resonanssin aikaansaama tärinän voimistuskero (RIL 253 2010, 69). Näin ollen merkittävin ilmiö, joka määrittää rakennukseen siirtyvän värähtelyn suuruutta, on *resonanssi*. Tällöin maaperän tärinä voi voimistua rakennuksessa jopa monikymmenkertaiseksi (Talja 2004, 36). Resonanssin vaikutusta värähtelyn suuruuteen on kuvattu kuvassa 17.



Kuva 17. Rakennuksen resonanssin vaikutus värähtelyn suuruuteen rakennuksessa (Talja 2004, 35).

Yleisesti ottaen värähtely voi siis olla taajuudeltaan joko suurempaa, pienempää tai samansuuruista kuin rakenteiden resonanssitaajuus. Jos rakenteeseen kohdistuvan värähtelyn taajuus on huomattavasti pienempää kuin rakenteen resonanssitaajuus, värähtely siirtyy lähes samansuuruiseksi rakennukseen. Resonanssialueella taas värähtelyn suuruus voimistuu merkittävästi. Jos taas värähtelyn taajuus on huomattavasti resonanssitaajuutta korkeampi, värähtelyt vaimenevat rakennukseen siirtyessään. (Talja 2004, 36)

### 2.7.2 Rakennuksen ominaisuuksien merkitys

Resonanssin vaikutusta voidaan arvioida VTT:n ohjeen *Ohjeita liikennetärinän arviointiin* (2011) mukaan erikseen lattialle ja rungolle. Lattian resonanssitarkastelu perustuu maan pystyvärähtelyyn. Lattian resonanssitapauksissa voidaan olettaa pystysuuntaisen värähtelyn voimistuvan kuusinkertaiseksi. Rungon resonanssia tarkasteltaessa taas vaakavärähtelyn voidaan olettaa voimistuvan nelinkertaiseksi maaperään nähden.

Ohjeen perusteella arviointi tehdään nimenomaan pystyvärähtelyn avulla. Vaakasuuntaisten värähtelyiden vaikutuksesta on toistaiseksi vielä vähän tietoa, vaikka sen vaikutus on arvioitu merkittäväksi (Törnqvist & Talja 2006, 29). Jatkossa myös vaakavärähtelyn vaikutusta rakennuksiin tulisi tutkia enemmän.

Rakennusta suunniteltaessa voidaan vaikuttaa sen ominaisuuksiin niin, että tärinän siirtyminen rakennukseen saataisiin minimoitua. Rungon värähtely on rakennuksen värähtelyistä merkittävin, sillä se saa koko rakennuksen värähtelemään (Talja 2004, 38). Rungon värähtely on erityisen haitallista 2–3-kerroksisissa rakennuksissa.

Korkeammissa rakennuksissa taas rungon värähtelyn merkitys pienenee, sillä niiden ominaistajuus on yleensä pienempi kuin maaperässä esiintyvät värähtelytaajuudet. Yksikerroksissa rakennuksissa taas rungon resonanssilla ei ole merkitystä.

Rungon värähtelysuunnittelussa olennaisinta on valita rakennuksen korkeus oikein. Rakennusten kerrosten lukumäärän lisääntyessä rungon ominaistajuus pienenee taulukon 1 mukaisesti. Savimailla maan värähtely esiintyy yleensä taajuuksilla 4–110 Hz. Näin ollen voidaan taulukon X perusteella nähdä, että juuri 1½–2-kerroksisilla taloilla on suurin riski joutua tärinähaitan kohteeksi pehmeillä mailla. Haittoja voidaan kuitenkin ehkäistä mm. kasvattamalla rungon jäykkyyttä. Jos rakennukset taas ovat vähintään 5-kerroksisia, liikennetärinä ei yleensä enää aiheuta ongelmia rungon resonanssin vuoksi. (Talja 2011, 30–31).

Taulukko 1. Rakennuksen kerrosten lukumäärän vaikutus rakennuksen ominaistajuuteen (mukaillen Talja & Törnqvist 2014, C46).

<i>Kerrosten lukumäärä</i>	<i>Terssikaistan keskitaajuus</i>									
	1,6	2	2,5	3,2	4	5	6,3	8	10	12,5
1½ – 2						X	X	X	X	
3				X	X	X	X			
4			X	X	X	X				
5		X	X	X	X					
6 – 7	X	X	X	X						
8	X	X	X							
9 – 10	X	X								

Rakennusta suunniteltaessa rungon lisäksi on kiinnitettävä huomiota lattiaan. Lattian tyyppi ja jänneväli voidaan valita niin, ettei resonanssia pääsisi syntymään. Erilaisten lattioiden tyypilliset ominaistajuudet löytyvät taulukosta 2. Yleensä lattian resonanssisuunnittelussa lattian ominaistajuus pyritään suunnittelemaan hallitsevaa taajuusalueetta suuremmaksi, sillä alemman taajuusalueen käyttö edellyttää niin suurta jänneväliä, etteivät muut mitoituskriteerit täyty (Talja 2011, 28).

Taulukko 2. Erilaisten lattioiden tyypillinen ominaistajuus (mukaillen Talja & Törnqvist 2014, C47)

<i>Lattian tyyppi ja jänneväli L</i>	<i>Terssikaistan keskitaajuus</i>									
	3,2	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25
Kevyet lattiat L = 3 – 7 m				X	X	X	X	X	X	X
Ontelolaatta L = 6 – 14 m	X	X	X	X	X	X	X	X		
Pitkät jännevälit L = 12 – 18 m	X	X	X	X	X					

### **3 TÄRINÄHAITTA IHMISEN KOKEMANA**

Jokainen ihminen kokee tärinän eri tavalla. Joitakin ihmisiä tärinä häiritsee herkemmin kuin toisia. Siksi tärinän haittavaikutusten arvioiminen on haasteellista ja riippuu pitkälti henkilöstä. Vaikka tärinä olisi selvästi havaittavissa, useimmissa tapauksissa valituskyky on korkealla. Ihmisten tietoisuus ympäristöhaitoista on lisääntynyt ja ihmiset osaavat vaatia parempia asuinolosuhteita kuin aikaisemmin. Näin ollen myös liikennetärinän merkitys ongelmana on kasvanut. VTT (Talja 2004, 11) on listannut tärinän haittoiksi muun muassa seuraavat:

- asumismukavuuden vähentyminen
- keskittymiskyvyn häiriintyminen
- nukkumisen häiriintyminen
- pelko rakenneaurioista tai
- pelko kiinteistön arvon alenemisesta.

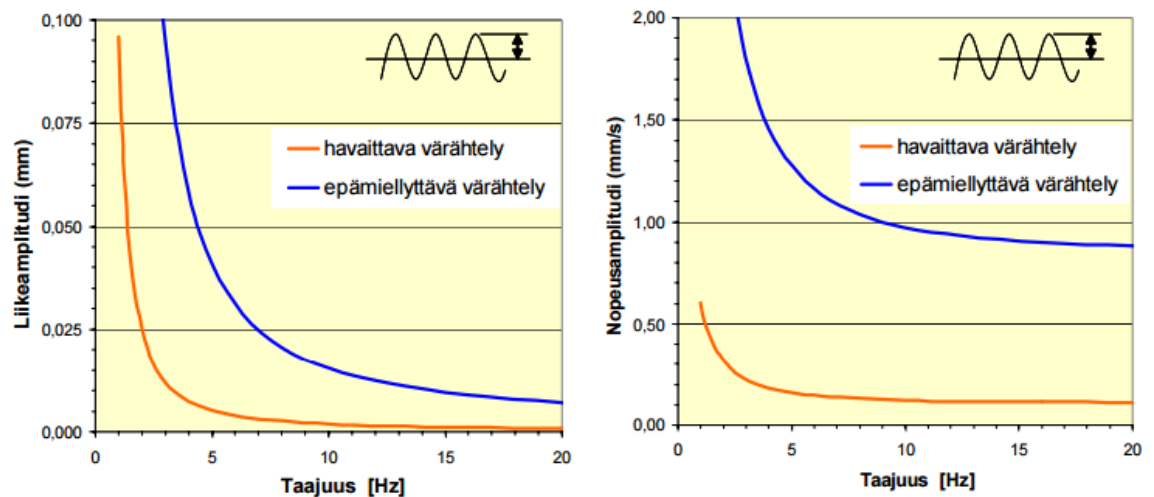
Vaikka pelko tärinän aiheuttamista rakenneaurioista on yleinen, on se usein aiheeton. Vain poikkeustapauksissa liikennetärinän voidaan katsoa olleen pääsyyinä rakenteellisiin vaurioihin, vaikka ihmisen arvioivat tuntemuksiensa mukaan tärinän vaurioittavan rakenteita (Talja & Törnqvist 2014, 24). Rakenteellisia vaurioita aiheuttava värähtely edellyttää yleensä moninkertaisesti suurempaa värähtelyä kuin värähtely, jonka ihminen kokee häiritsevän asuinmukavuutta (Talja & Törnqvist 2014, 24).

#### **3.1 Ihmisen kokemus tärinästä**

Kun ihminen altistuu värähtelylle, ei värähtely itsessään välttämättä vaurioita kehoa, mutta se voi silti merkittävästi vaikuttaa elämänlaatuun. Tärinä öisin voi häiritä nukkumista, ja huono unenlaatu voi vaikuttaa ihmisen terveyteen laajemminkin. Päivisin tärinä voi taas häiritä keskittymistä työhön tai opiskeluun. Ihminen kokee tärinän haitat yleensä epämiellyttävien tuntemusten kautta. Se, miten ihminen tärinän kokee, riippuu pitkälti tärinän laadusta. Ihmisten välillä on suuria eroja siinä, miten ihminen tärinän kokee.

Ihmisen keho reagoi erilaiseen tärinään eri tavalla. Tärkeimmät vaikuttavat tekijät ovat tärinän taajuus, amplitudi ja kesto. Ihminen pystyy havaitsemaan tärinää, jonka taajuus vaihtelee 1–1000 Hz. Herkimmin ihminen kuitenkin aistii tärinän taajuuksilla 1–80 Hz. Tälle välille asettuvat ihmisen elinten omat ominaistaajuudet. Ihmisen keho koostuu erilaisista joustavista kudoksista, kuten lihakset ja jänteet. Näin ollen ihmisen reaktio tärinään muistuttaa monimutkaista mekaanista systeemiä. Ihmisen reaktioon vaikuttaa kuitenkin myös se, missä asennossa ihminen on. Esimerkiksi seisova ihminen on herkin taajuuksille 4–8 Hz, kun taas makuuasennossa ihminen reagoi herkimmin taajuuksiin 1–2 Hz. (Xia ym. 2013, 5–6)

Taajuuden vaikutus ihmisen kokemukseen tärinästä on otettava huomioon, jos halutaan arvioida tärinän tason haitallisuutta ihmiselle. Ihmisen kokeman värähtelyn merkittävin taajuusalue pehmeillä savimailla on 5–15 Hz, kun taas kovilla soramailla se on 10–25 Hz (Talja 2004, 13). Yleisesti voidaan sanoa, että todella alhaisilla taajuuksilla ihminen ei ole yhtä herkkä värähtelylle, kuin korkeammilla taajuuksilla. Ihmisen herkkyys eri taajuuksilla värähtelevälle tärinälle on esitetty kuvassa 18 liikeamplitudin ja värähtelyn nopeuden kautta.



Kuva 18. Ihmisen herkkyys vakioamplitudiselle värähtelylle liikeamplitudin ja värähtelyn nopeuden kannalta (Talja 2004, 13).

Ihminen aistii suurilla taajuuksilla jo alle 0,01 mm liikeamplitudin (Talja 2004, 13). Jos värähtelyn taajuus on vakio, mitä suurempi amplitudi on, sitä suurempi on myös vaikutus ihmisen kehoon (Xia ym. 2013, 6). Amplitudia ei kuitenkaan yleensä käytetä

suurena liikennetärinää mitattaessa tai arvioidessa, vaan suurena toimii värähtelynopeus tai -kiihtyvyys.

Lisäksi ihmisen kokemukseen tärinästä vaikuttaa tärinän kesto. Yhden tavarajunan ohitus voi kestää jopa muutamia minuutteja. Periaatteena voidaan kuitenkin pitää sitä, että mitä pidempään ihminen on altistuneena tärinälle, sitä haitallisempaa tärinä on (Xia ym. 2013, 6). Rautatieliikenteen aiheuttaman tärinän haitallisuuden arvioinnissa on kuitenkin huomioitava myös keston lisäksi tärinän toistuvuus. Usein tavarajunat ajavat saman paikan ohi useita kertoja päivässä toistuvina kellonaikoina.

### 3.2 Tärinän tunnusluku

Koska ihmisen kokemus tärinästä ei vastaa suoraan yhtä mitattavissa olevaa suuretta, kuten heilahdusnopeuden tai -kiihtyvyyden maksimia, on tärinän suositusarvot annettava tunnuslukuna. Tunnusluvun avulla on helpompi määrittellä tärinälle suositusarvot, joihin asuinmukavuuden kannalta tulisi pyrkiä. Eri maat ovat laatineet omat standardinsa suositusarvoista. Suomessa ei ole käytössä lainvoimaisia raja-arvoja tärinälle, vaan arvioiminen perustuu VTT:n antamiin suosituksiin liikennetärinästä. Suomen suositusarvot perustuvat norjalaiseen standardiin NS 8176 vuodelta 1999 (Talja 2004, 23). Tärinän tunnusluku lasketaan VTT:n tiedotteen *Suositus liikennetärinän mittaamisesta ja luokituksesta* mukaisesti. Tunnusluku ottaa huomioon sekä sen, miten ihminen tärinän kokee, että kuinka tilastollisesti todennäköistä tärinä on.

Tärinän tunnusluvun määrittämiseksi on mitattava värähtelyä ainakin 15 yksittäisen junan aiheuttamaa värähtelyä. Mitattavana suurena voi olla joko värähtelynopeus tai värähtelykiihtyvyys. Mittausjakson ajalta määritetyistä värähtelytapahtumista määritetään tunnusluku jokaiselle kolmelle suunnalle. Tunnuslukuja verrataan suositusarvoihin, jotka on esitelty kappaleessa 3.3.

Tunnusluvun saamiseksi on ensin laskettava *painotettu tehollisarvo*  $v_w$ . Koska tarkasteltava signaali sisältää paljon erilaisia taajuuskomponentteja, signaali jaetaan värähtelykomponentteihin. Jokainen värähtelykomponentti painotetaan ensin ihmisen herkkyyttä vastaavaksi painotuskertoimen avulla. Jos analysoidaan mitattua värähtelynopeutta, lasketaan painotuskerroin VTT:n mukaan yhtälöllä (13):



$$W_v = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_0}{f}\right)^2}}, \quad (13)$$

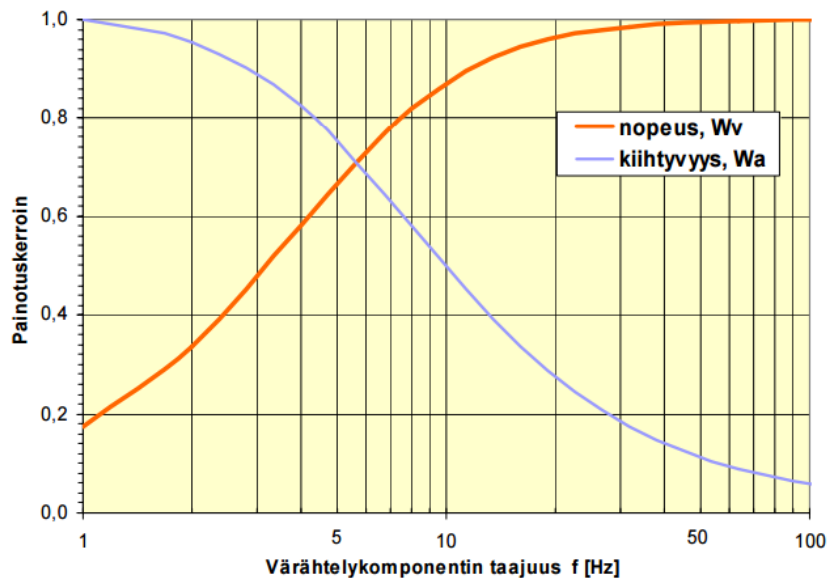
missä  $f_0$  on 5,6 Hz ja  
 $f$  taajuus [Hz].

Jos mitattu suure on värähtelykiihtyvyys, käytetään painotuskertoimen laskemiseen kaavaa:

$$W_a = \frac{35,7}{2\pi \cdot f} \cdot W_v, \quad (14)$$

missä  $f$  on taajuus ja  
 $W_v$  värähtelyn nopeuden painotuskerroin.

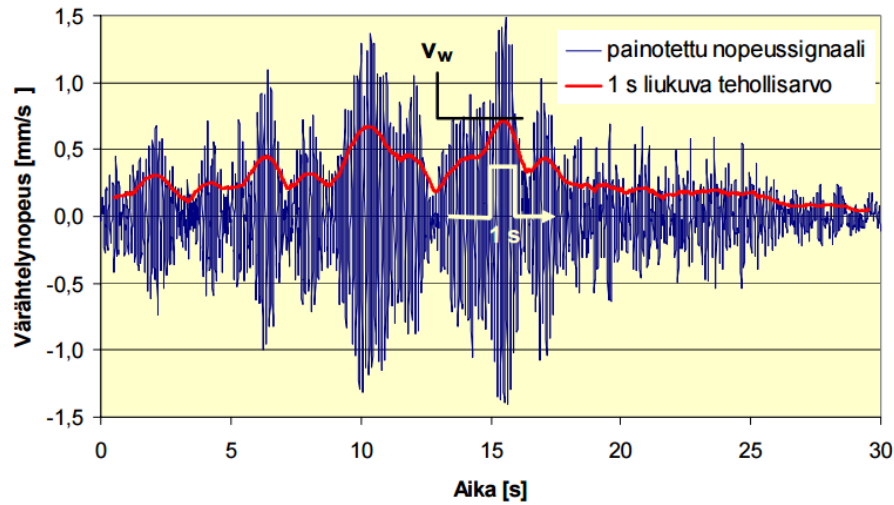
Värähtelykomponenttien painotuskertoimet heilahdusnopeudelle ja -kiihtyvyydelle on esitetty kuvassa 19.



Kuva 19. Värähtelykomponenttien painotuskertoimet  $W_v$  ja  $W_a$  eri taajuuksille (Talja 2004, 21).

Painotuksen jälkeen voidaan arvoista laskea painotettu tehollisarvo. Tehollisarvo kuvaa värähtelytapautumaa yhden sekunnin ajalta. Tehollisarvo lasketaan värähtelyn jokaiselle

hetkelle, mutta painotettu tehollisarvo  $v_w$  otetaan siltä ajanhetkeltä, jolloin arvo on suurin. Kuvassa 20 on esitetty painotettu tehollisarvo koko mittaustapahtuman ajalta.



Kuva 20. Suurimman tehollisarvon määrittäminen painotetun värähtelyn nopeuden avulla (Talja 2004, 20).

Painotettu tehollisarvo määritetään tietylle ajan hetkelle seuraavasti:

$$v_w(t_0) = \left\{ \frac{1}{\tau} \int_{t_0-\tau}^{t_0} [v_w(t)]^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (15)$$

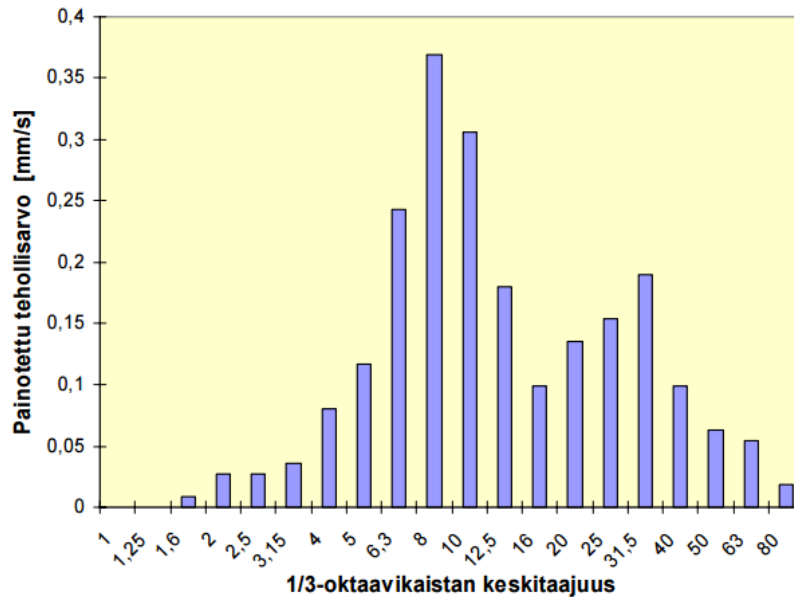
missä  $v_w(t)$  on painotettu kiihtyvyyssignaali  
 $t_0$  tarkasteltava ajan hetki ja  
 $\tau$  1 s.

Jos tehollisarvoa lasketaan heilahduskiiktyvyyden avulla, korvataan kaavassa nopeus  $v_w(t)$  korvataan kiihtyvyydellä  $a_w(t)$ .

Tehollisarvoa voidaan tarkastella myös taajuuden kautta. Tämä mahdollistaa myös värähtelyn tehollisarvoon vaikuttavien taajuusalueiden tarkastelun. Tällöin värähtelytapahtuman värähtelysisältö jaetaan kolmannesoktaaveittain niin, että jokaiselle kolmannesoktaaville lasketaan oma painotettu tehollisarvo, kuten kuvassa 21. Värähtelytapahtumasta määritetään suurin yhden sekunnin jakson tehollisarvo, kuten aikatasossa tarkasteltaessa, mutta määrittäminen tapahtuu käyttämällä yhtälöä (16):

$$v_w = \sqrt{\sum_i (W_{v,i} v_i)^2}, \quad (16)$$

missä  $W_{v,i} v_i$  on kolmannesoktaavikaistalla  $i$  tapahtuvien värähtelyiden painotettu tehollisarvo.



Kuva 21. Värähtelyn painotetut tehollisarvot kolmannesoktaaveittain (Talja 2004, 22).

Kun painotetut tehollisarvot jokaiselle mitatulle värähtelytapahtumalle on saatu laskettua, voidaan tehollisarvojen avulla määrittää värähtelyn tunnusluku  $v_{w,95}$  standardissa NS 8176.E (2005) määritetyllä tavalla. Värähtelyn tunnusluku kuvaa tietyssä kohteessa esiintyvää tärinää. Tunnuslukua varten on kohteessa suoritettu tärinämittauksia niin, että on saatu mitattua vähintään 15 erillistä junan aiheuttamaa tärinä tapahtumaa. Värähtelyn tunnuslukua varten mitatusta kohteesta tarkastellaan näitä 15 erillisistä mitattua värähtelytapahtumaa, joiden suurimpien painotettujen tehollisarvojen  $v_{w,j}$  avulla lasketaan tilastollinen tarkastelu. Tilastollisesti tunnusluku edustaa 95 prosentin todennäköisyydellä kaikkia liikennevälineitä kuvan 22 mukaisesti. Näistä 15 painotetusta tehollisarvosta lasketaan keskiarvo:

$$\bar{v}_w = \frac{\sum_{j=1}^N v_{w,j}}{N}, \quad (17)$$

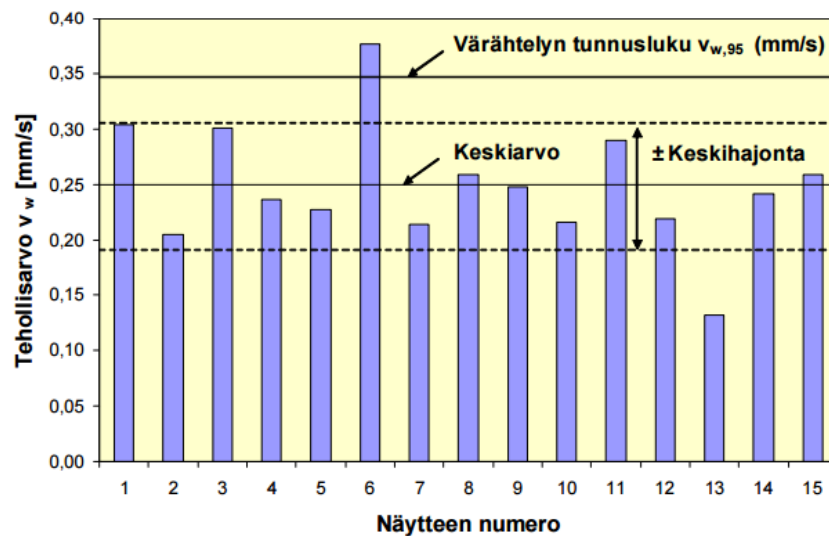
missä  $v_w$  on suurin painotettu tehollisarvo ja  
 $N$  mitattujen ohitusten määrä.

Keskihajonta taas lasketaan yhtälöstä:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (v_{w,j} - \bar{v}_w)^2} \quad (18)$$

Värähtelyn tunnusluku määritetään keskiarvon ja keskihajonnan avulla yhtälöstä:

$$v_{w,95} = \bar{v}_w + 1,8 \cdot \sigma \quad (19)$$



Kuva 22. Värähtelyn tunnusluvun määrittäminen painotettujen tehollisarvojen avulla (Talja 2004, 24).

### 3.3 Suositusarvot Suomessa

VTT on esittänyt suositusarvot liikennetärinän haitan arvioimiseksi taulukon 3 mukaisesti. Luokitus perustuu Norjan standardiin NS 8176, mutta suositusta on täydennetty myös VTT:n omilla kokemuksilla. Suositusten perusteena toimii värähtelyn tunnusluku  $v_{w,95}$ , joka vastaa asuintiloissa esiintyvän värähtelyn tilastollista maksimia

viikon mittausjakson aikana. Suosituksessa ei ole eroteltu yö- ja päiväaikaa erikseen, vaan sama tunnusluku koskee molempia. Suositus on samoilla linjoilla ulkomaisten suositusten kanssa. (Talja 2004, 25)

Taulukko 3. Suositus rakennusten värähtelyluokitukselta (Talja 2004, 25).

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

Värähtelyluokkaa C käytetään suositusarvona uusien väylien ja rakennusten suunnittelussa. Tällä tarkoitetaan tilanteita, joissa olemassa olevien väylien varsilla sijaitsevien alueiden kaavaa laaditaan tai merkittävästi muutetaan sekä tilanteita, joissa uusi väylä aiheuttaa uusia ympäristövaikutuksia alueelle. Kuitenkaan yksittäiset uudisrakennukset tai väylän vähäiset muutokset eivät kuulu luokan C piiriin, vaan ne lasketaan kuuluvaksi vanhoille rakennuksille käytettävään luokkaan D. (Talja 2004, 26)

Tärinäluokitus ei ole täysin ehdoton. Junien aiheuttama tärinä ylittää usein suositukset jo rakennetuilla asuinalueilla. Tällöin on tapauskohtaisesti arvioitava, onko haitta kohtuutonta ja millaiset mahdollisuudet haitan torjuntaan ylipäänsä on. Jos rakennus on suunniteltu häiriöttömäksi, kuten esimerkiksi sairaala, värähtelyluokan täytyy olla yhtä korkeampi. Toisaalta taas luokitus on tehty nimenomaan asuinrakennuksille, eikä koske esimerkiksi toimistoja ja liikehuoneistoja. (Talja 2004, 26)

### 3.4 Kansainväliset suositukset

Eri maat sekä kansainvälinen standardoimisorganisaatio ISO ovat julkaisseet omia raja-arvojaan liikennetärinälle. Julkaisujen lainvoimaisuus vaihtelee Suomen tapaan suosituksista lainvoimaisiin raja-arvoihin. Eri standardeja on esitelty mm. VTT:n tiedotteessa *Suositus liikennetärinän mittaamisesta ja luokituksesta* (2004). Lisäksi Turo Auvisen diplomityössä (2010) on melko kattavasti esitelty eri maiden standardeja. Näin ollen tämä työ ei keskity vertaamaan eri maiden käytäntöjä, vaan luo yleisellä tasolla katsauksen muiden maiden suosituksiin.

VTT:n tiedotteessa on vertailtu Saksan (DIN 4150 1999), USA:n (FRA 1998), Ruotsin (Banverket 1997) ja Norjan (NS 8176 1999) standardeja, joista Norjan standardi on pitkälti sama kuin Suomessa annetut suositukset. Nämä ohjearvot on annettu painotetun tehollisarvon  $v_w$  muodossa. Vertailu on esitetty taulukossa 4. Arvot eivät täysin ole vertailukelpoisia, vaan maiden välillä on pieniä eroja arvojen määrittävissä ja sovellusalassa. Suomessa suositellut raja-arvot ovat karkeasti ottaen hieman tiukemmat kuin Ruotsissa, mutta eivät yhtä vaativat kuin Saksassa (Talja 2004, 29).

Taulukko 4. Eri maiden standardien suosituksia värähtelyn raja-arvoiksi (Talja 2004, 29).

$v_w$ [mm/s]	<i>Soveltamisalue, häiriöalue ja viite</i>
$\leq 1,0$	Vanhat rata- ja asuinalueet, junat [Banverket 1997]
$\leq 0,6$	<i>Olosuhteet, joihin pyritään vanhoilla asuinalueilla, kisko- ja tieliikenne</i> [NS 8176]
$\leq 0,6$	Uudet teollisuusalueet, kisko- ja tieliikenne [DIN 4150-2 1999]
$\leq 0,6$	Maanpäällinen kiskoliikenne vanhoilla asuinalueilla [DIN 4150-2 1999]
$\leq 0,4$	Uudet asuinalueet ja peruskorjattavat väylät, junat [Banverket 1997]
$\leq 0,36$	Uudet toimistoalueet, junat [FRA 1998]
$\leq 0,3$	<i>Suositus uusien rakennusten ja väylien suunnittelussa, kisko- ja tieliikenne</i> [NS 8176 1999]
$\leq 0,3$	Uudet seka-alueet, kisko- ja tieliikenne [DIN 4150-2 1999]
$\leq 0,3$	Maanalainen kiskoliikenne vanhoilla asuinalueilla [DIN 4150-2 1999]
$\leq 0,25$	Uudet asuinalueet, junat [FRA 1998]
$\leq 0,20$	Uudet asuinalueet, kisko- ja tieliikenne [DIN 4150-2 1999]
$\leq 0,15$	<i>Suhteellisen hyvät olosuhteet, kisko- ja tieliikenne</i> [NS 8176 1999]
$\leq 0,15$	Erityisrakennukset (kisko- ja tieliikenne), jotka on tarkoituksellisesti suunniteltu häiriöttömiksi [DIN 4150-2 1999]
$\leq 0,10$	<i>Hyvät asuinolosuhteet, kisko- ja tieliikenne</i> [NS 8176 1999]

Kansainvälinen ISO-standardi 2631 taas tarkastelee tärinää laajemmassa mielessä, eikä keskity pelkästään liikennetärinään. Standardi antaa tärinälle painotuskertoimet sen mukaan, missä asennossa ihminen on tärinälle altistuessaan sekä määrittelee hyväksyttävän tärinän määrän erilaisissa rakennuksissa (Auvinen 2010, 34).

Iso-Britannian standardi BS 6472 taas vastaa ISO-standardia sisällöltään, mutta on huomattavasti yksinkertaisempi. Britanniassa tärinän vaikutuksia käsitellään samalla tavalla kuin melua. Värähtelyjen kokonaismäärän arviointia varten määritellään värähtelyannoksen lukuarvo. (Auvinen 2010, 34)

## 4 TÄRINÄN EHKÄISY

Tärinähaittojen ehkäisyssä voidaan ongelmaa lähestyä kolmelta eri kannalta. Tärinää voidaan ehkäistä vaikuttamalla sen syntyyn, kulkeutumiseen maaperässä tai siirtymiseen rakennuksiin. Tärinän ehkäisyyn kannalta ideaalein tilanne olisi, että tärinä otettaisiin huomioon jo rataa rakentaessa. Suomen rataverkko on kuitenkin pääosin rakennettu yli 100 vuotta sitten. Näin ollen käytettävissä olevia keinoja mietittäessä on otettava huomioon se, että rata on jo olemassa.

Tärinän syntyä ehkäistäessä voidaan yrittää luoda sellaiset olosuhteet, ettei tärinää synny. Esimerkiksi junakaluston kuntoon, junan lastaukseen, painoon ja nopeuteen vaikuttamalla voidaan huomattavasti vähentää syntyvää tärinää. Radan rakenteeseen voidaan vaikuttaa niin, että tärinää syntyisi tai syntynyt tärinä leviäisi. Tällaisia keinoja ovat muun muassa erilaiset kumiset matot, jotka asennetaan ratapölkyn alle (Johansson ym. 2008). Nämä matot eivät kuitenkaan ehkäise merkittävästi matalataajuista tärinää.

Paras tapa ehkäistä tärinähaittoja on rakentaa radan alusrakenne oikein. Suomessa tehokkain keino olisi rakentaa rata paalulaatan päälle. Paalulaatan päälle rakentaminen on kuitenkin kallista, sillä se vaatii koko radan rakentamisen uudelleen. Suomen rataverkko on suurimmaksi osaksi vanhaa, eikä uusia ratoja juuri rakenneta. Vanha rataverkko rajoittaa käytössä olevaa keinovalikoimaa huomattavasti.

Radan rakenteiden ja varsinkin alusrakenteen muuttaminen jälkikäteen on kallista. Usein rataan puuttuminen ei ole mahdollista, joten tärinää pyritään ehkäisemään estämällä sen kulkeutuminen maassa. Tätä varten on kehitetty muun muassa erilaisia tärinäesteitä, jolla tärinän kulkeutuminen maaperässä voidaan katkaista. Tärinäesteenä voi toimia esimerkiksi tavallinen ponttiseinä. Näiden katkaisuseinien etuna on, että ne voidaan asentaa koskematta itse rataan.

Jos tärinän syntyä tai kulkeutumista ei voida estää, voidaan vaikuttaa tärinähaittojen syntyyn itse rakennusta suunniteltaessa. Tällöin on tärkeää luoda rakennukseen sellaiset olosuhteet, ettei tärinä pääse siirtymään maaperästä rakennukseen. Esimerkiksi rakennuksen rungon ja välipohjan suunnittelulla voidaan ehkäistä tärinän vahvistumista (Talja & Törnqvist 2014, 17–18).



## 4.1 Tärinäesteet

Tärinäesteiden toiminta perustuu siihen, että niissä käytetyn materiaalin jäykkyys poikkeaa huomattavasti maan jäykkyydestä. Tärinäesteet asennetaan maan sisään radan ja rakennuksen väliin niin, ettei tärinä pääsisi kulkeutumaan maata pitkin rakennukseen.

Tärinäesteitä on toimintaperiaatteeltaan kahdenlaisia: toisissa materiaali on maaperää huomattavasti jäykempää ja toisissa taas jäykkyys on maan jäykkyyttä merkittävästi pienempi. Maata jäykempänä tärinäesteenä voi toimia esimerkiksi maahan upotettu teräsponsittiseinä (Dijckmans ym. 2016) tai pilaristabiloiduista pilareista koostuva este (With ym. 2009). Suomessa VTT (Talja ym. 2015, 3–7) on kokeillut teräsponsitti- ja pilaristabilointiseiniä vuosina 2006–2013 viidessä eri kohteessa. Kokeiluissa saavutettu pystytärinän pieneneminen vaihtelee eri kohteissa. Yhdessä kohteessa pienenemistä ei havaittu ollenkaan. Heti esteen takana pystyvärähtelyn havaittiin kyllä pienentyneen, mutta kauemmaksi mentäessä pienentyminen oli vähäisempää. Vaakavärähtelyn pieneneminen oli vielä vaihtelevampaa.

Tärinän kulkeutumisen estämiseksi on esitetty myös mm. pohjamaan jäykistämistä radan läheisyydessä esimerkiksi betonin avulla (Thompson ym. 2015) tai painavia massoja radan läheisyydessä (Dijckmans ym. 2015). Painavana massana voi toimia esimerkiksi tärinäesteenä käytetyt kivi-koreista koostuvat seinät.

Tärinäeste voidaan toteuttaa myös kaivannon muodossa. Maahan kaivetaan pystysuora, seinämäinen kaivanto, joka jätetään joko avoimeksi (Klein ym. 1997) tai täytetään kevyellä väliaineella. Tällaisena väliaineena voi toimia esimerkiksi keventeenä käytettävä polyuretaani eli GeoFoam (Alzawi & Hesham El Naggar 2011, Murillo ym. 2009). Kaivantoja ei kuitenkaan ole käytössä Suomessa, vaikka VTT on suunnitellut kumirouheella täytetyn kaivannon testaamista (Talja ym. 2009, 39).

## 4.2 Nopeuden alentaminen

Suomessa yleisimmin käytetty tärinäehkäisykeino on junan nopeuden rajoittaminen. Tärinästä aiheutuvat nopeusrajoitukset on listattu Liikenneviraston julkaisemassa *Rautateiden verkkoselostuksessa* vuosittain. Mittauksia tehtäessä 2015 Suomessa oli

voimassa 18 tärinästä johtuvaa nopeusrajoitusta (Liikennevirasto 2013). Nopeusrajoitukset asetetaan yleensä koskemaan yli 3000 tonnia painavia junia, sillä painonsa vuoksi ne aiheuttavat eniten tärinähaittaa. Poikkeuksena on kuitenkin Keravalle ja Kouvolaan asetetut nopeusrajoitukset, jotka koskevat kaikkia junia.

Tärinästä johtuva nopeusrajoitus on yleensä 40 km/h. Nopeusrajoituksina on kuitenkin yksittäisissä kohteissa käytetty myös nopeuksia 30, 50 ja 60 km/h (Liikennevirasto 2013). Nopeusrajoitusta asettaessa on yhdistettävä sekä rajoituksen toimivuus että liikenteen sujuvuus. Oletuksena on, että mitä hitaammin juna kulkee, sitä vähemmin se aiheuttaa tärinää. Nopeusrajoitusta asettaessa nopeus lasketaan usein ensin nopeuteen 60 km/h, ja jos tämä ei toimi, lasketaan nopeutta edelleen tasolle 40 km/h. Eräässä mittauksessa nopeuden laskeminen nopeudesta 40 km/h nopeuteen 30 km/h kuitenkin kasvatti tärinän suuruutta. Rajoitusta asettaessa on myös huomioitava junakaluston ja radan geometrian asettamat rajoitukset. Jos nopeus lasketaan liian alas, kalusto ei välttämättä pysty kiihdyttämään halutulla tavalla. Nopeusrajoitus on aina kompromissi sujuvan liikennöinnin ja tärinähaitan välillä. (Poikolainen 2016)

Sujuvan radalla liikennöinnin kannalta olisi parempi, mitä vähemmän nopeutta joudutaan rajoittamaan. Jos siis tärinähaitta vähenisi merkittävästi jo laskemalla nopeus esimerkiksi 60 km/h, vaikutukset liikenteen sujuvuuteen olisivat huomattavasti pienemmät. Periaatteessa Liikennevirasto on vastuussa siitä, että rata on liikennöitävässä kunnossa. Tällöin Liikennevirasto on korvausvelvollinen liikennöitsijälle, jos radalla joudutaan ajamaan hitaampaa.

## **5 SUORITETUT MITTAUKSET**

Työtä varten suoritettiin liikennetärimittauksia Limingan kunnan alueella Tupoksessa 24.11.–14.12.2015. Alue valikoitiin tutkimukseen, koska alueella sijaitsevan asuinrakennuksen asukkaat olivat valittaneet tärinähaitasta. Työtä varten asennettiin neljän tärinämittarin linja suoraan maahan. Lisäksi kaksi mittaria asennettiin mittalinjan päässä olevaan asuinrakennuksessa. Mittausten ajan raskaat tavarajunat ajoivat neljää eri nopeutta mittausta paikan ohi. Tutkittaviksi nopeuksiksi valittiin 40, 50, 60 ja 70 km/h km/h, joka oli vallitseva nopeusrajoitus raskaalle liikenteelle tutkimushetkellä.

### **5.1 Tutkimuskohteen esittely**

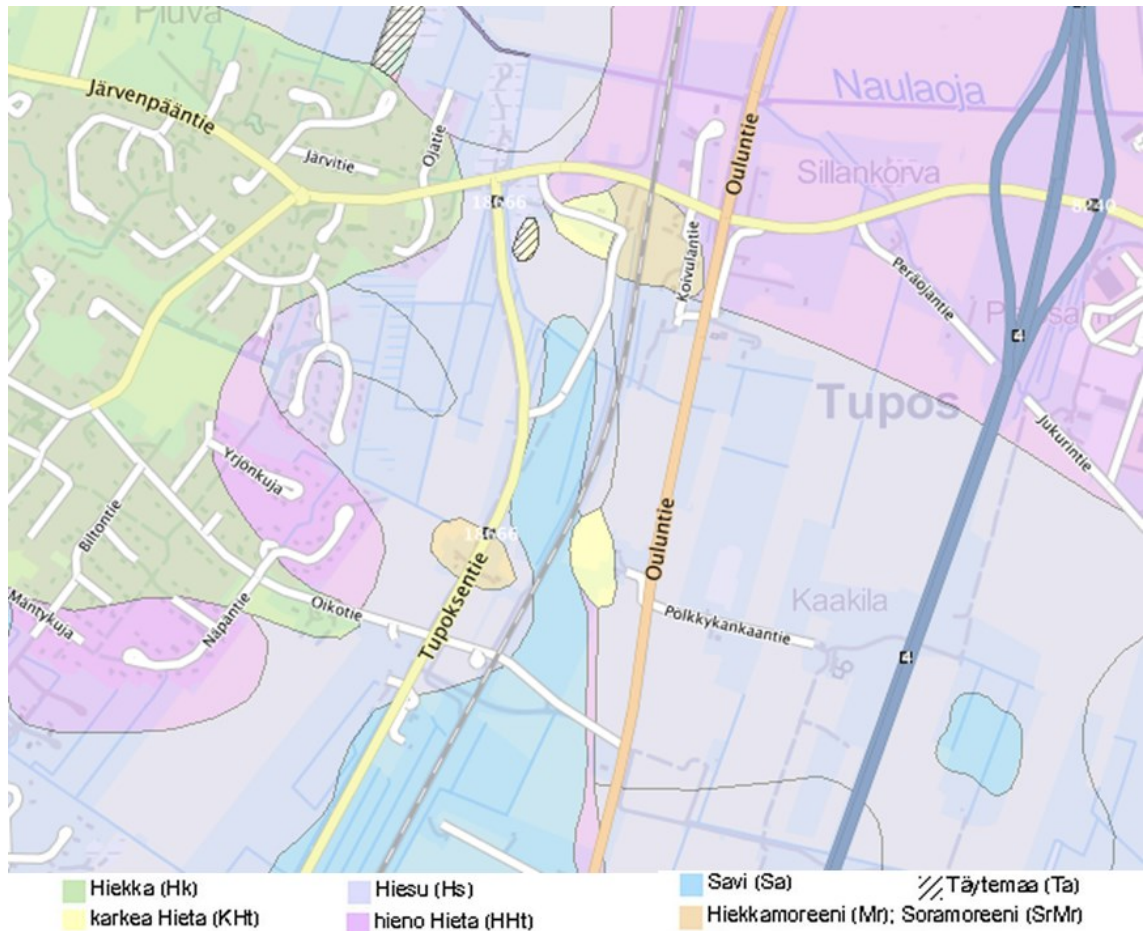
Tutkimuskohde sijaitsee Pohjanmaan radan varressa noin 20 km Oulusta etelään, ratakilometrillä 735+500. Rataosuus kuuluu osaksi Euroopan laajuista TEN-verkkoa ja kuuluu sen ydinverkkoon (Liikennevirasto 2013). Rata on rakennettu 1880-luvulla, minkä jälkeen sitä on perusparannettu 1960–70-luvulla. Rataosuudella on tällä hetkellä käynnissä Seinäjoki–Oulu-ratahanke, jonka valmistuttua radan nopeus- ja painorajoituksia voidaan nostaa.

Rata kulkee alueella peltomaiseman läpi, eikä korkeuseroja juuri esiinny. Radan välittömässä läheisyydessä on vain yksi asuinkäytössä oleva rakennus. Varsinainen asuinalue alkaa noin 500 m päässä radasta. Mittauskohteeksi valittiin kaksikerroksinen puutalo, jonka asukkaat olivat kokeneet liikennetärinän haitalliseksi. Mittauksen suoritettiin radan ja asuinrakennuksen välissä olevilla pelloilla sekä asuinrakennuksessa ja sen pihalla (kuva 23).



Kuva 23. Havainnekuva mittalinjasta.

Alue on entistä merenpohjaa ja koostuu pääosin siltistä ja savesta (kuva 24), mutta tarkempia kairauksia alueelta on vähän. Radalla on tehty kairauksia vuosina 1970-luvulla. Kairauksien mukaan alueella on 4–15 m savista silttiä, jonka jälkeen on siltistä hiekkaa (GTK 2016). Alueen maaperästä kauempana radasta ei ole tarkempaa tietoa.



Kuva 24. Pohjamaalajit tutkimusalueella yhden metrin syvyydellä (MML 2016).

Mittausten hetkellä rataosan sallittu akselipaino on 22,5 tonnia. Seinäjoki–Ouluratahankkeen myötä akselipaino on tarkoitus nostaa 25 tonniin. Henkilöjunien nopeusrajoitus rataosuudella on 140 km/h ja raskaiden tavarajunien 70 km/h. Radalla kulkevista junista kiinnostavimmiksi arvioitiin painavimmat junat. Rataosuudella kulkee Venäjältä tulevia malmijunia, jotka voivat painaa jopa yli 5000 tonnia. Tällaisia junia kulkee radalla päivässä 3–5 kappaletta.

Radalla Tupoksen läheisyydessä on kaksi tärinistä johtuvaa nopeusrajoitusta (Liikennevirasto 2013). Nopeusrajoitukset koskevat yli 3000 tonnin painoisia junia, ja niiden nopeus on rajoitettu nopeuteen 50 km/h. Toinen nopeusrajoitus sijoittuu 6 km päähän Tupoksen eteläpuolelle Limingan liikennepaikalle ja sen eteläpuolelle. Rajoitus on asetettu noin 2 km matkalle. Toinen rajoitus sijaitsee Tupoksen pohjoispuolella Kempeleen liikennepaikalla ja sen pohjoispuolella, noin 5 km päässä tutkimuskohteesta. Rajoitetun alueen pituus on noin 8 km.

## 5.2 Mittausten suoritus

Mittauksissa käytettiin kahdenlaisia antureita. Mittalinjalla käytettiin Instantelin Micromate-mittareita, jotka asennettiin suoraan maahan. Mittarin anturissa on kolmiaksaalinen geofoni, joka mittaa värinää poikittaiseen, pitkittäiseen ja pystysuuntaan. Mittarin mitta-alue ulottuu heilahdusnopeuteen 254 mm/s asti ja kattaa taajuuudet 2–250 Hz. Talon perusmuurissa ja yläkerrassa käytettiin Sigicommin INFRA V12 -mittareita, jotka mittaavat Micromaten tavoin värinää kaikissa kolmessa suunnassa.

Nopeusrajoitukset toteutettiin siten, että junien kuljettajia pyydettiin ajamaan tiettyä nopeutta tiettyinä päivinä. Junien nopeustiedot kerättiin hyödyntämällä Operaatiokeskuksen tila -sovellusta (Opti). Sovellus on tarkoitettu VR-konsernin operaatiokeskuksen käyttöön ja sitä hyödynnetään mm. kunnossapidon tarpeisiin. Sovellus esittää rataverkolla kulkevat junat kartalla GPS-paikannuksen avulla. Sovellusta ei käytetä junien nopeuksien seurantaan, mutta sovellukseen oli mahdollista ohjelmoida hetkellisesti toiminto, joka tallensi Tupoksen ohi kulkevien junien nopeudet mittausjakson ajalta.

Mittalinja asennettiin VTT:n antamien suositusten mukaisesti. Mittalinjalla mittauspisteissä MP1–4 anturi asennettiin suoraan maahan (kuva 25). Ennen asentamista irtonainen pintamaa ja kasvillisuus poistettiin kaivamalla pieni kuoppa mittaria varten. Toisin kuin muut mittarit, mittari MP1 kiinnitettiin maahan metallitangolla maan pehmeiden vuoksi. Mittauspiste MP5 oli pultattu kiinni talon perusmuuriin ja MP6 asetettu talon yläkerran lattialle ilman kiinnitystä. Mittalinja ulottui huomattavasti kauemmaksi radasta kuin mittalinjat liikennetärinämittauksissa yleensä ulottuvat. Mittauspisteen MP1 etäisyys radasta oli 90 m, MP2 280 m, MP3 400 m ja MP4 570 m.



Kuva 25. Tärinäanturi maahan asennettuna mittauspisteellä MP2. Anturi on asennettu suoraan maahan ja mittari peitetty jätesäkillä.

Mittareille ohjelmoitiin kynnyсарvo, jonka ylittyessä mittari tallentaa havainnon. Radan läheisyydessä tärinää esiintyi niin paljon, että kynnyсарvo jouduttiin asettamaan korkeammalle kuin muualla. Lähimmälle mittarille asetettiin näin ollen kynnyсарvoksi 0,45 mm/s ja muille mittareille 0,25 mm/s.

Mittausten kesto arvioitiin sen perusteella, että riittävän moni raskas tavarajuna oli ehtinyt ohittaa mittauskohteen eri nopeuksilla. Mittarit tyhjennettiin ja ladattiin mittausjakson aikana muutaman kerran. Mittausaikana maassa oli jonkin verran lunta, mutta maa ei ehtinyt routaantua. Näin ollen routa ei vaikuttanut mittauksiin.

## 6 TULOKSET

Tarkasteltaviksi juniksi valittiin kaikki raskaat tavarajunat, jotka ajoivat tutkimuskohteen ohi. Jotta junat olisivat keskenään vertailukelpoisia, valittiin tarkasteluun mahdollisimman samanpainoisia junia. Tarkasteltavien junien paino vaihteli välillä 3982–4029 tonnia. Näin painon vaihtelun vaikutus tärinän suuruuteen saatiin minimoitua. Junanumerot ja junien painot on esitetty liitteessä 1.

Mittausten tuloksia tarkastellaan värähtelyn heilahdusnopeuden huippuarvon  $v_{\max}$  kautta, sillä heilahdusnopeus on Suomessa yleisesti käytetty suure liikennetärinän suuruutta mitattaessa. Tuloksista olisi mahdollista laskea myös värähtelyn tunnusluku  $v_{w,95}$ , mutta tunnusluku on tilastollinen luku, joka ei anna todellista kuvaa värähtelyn suuruudesta. Mittaustuloksista tarkasteltiin myös tärinän hallitsevaa taajuutta. Esimerkkejä mittausten tuloksina saaduista värähtelykuvaajista on esitetty liitteessä 2.

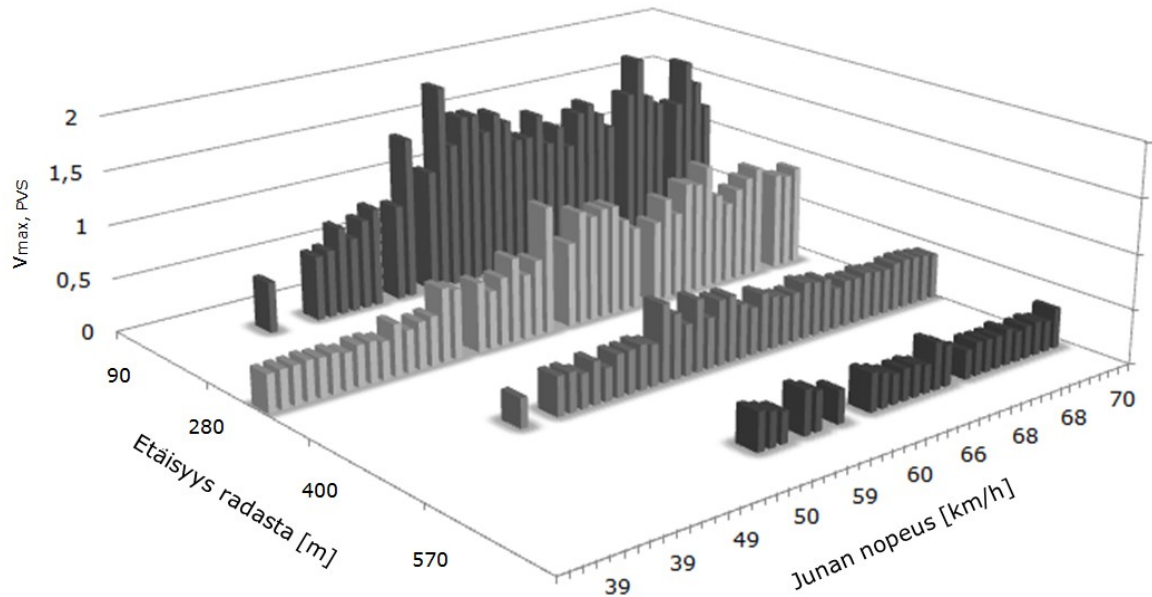
Jokaiselta mittauspisteeltä saadut tulokset on esitetty erikseen, sillä etäisyys radasta vaikuttaa tärinään merkittävästi. Värähtelystä on erotettu kaikki kolme eri suuntakomponenttia: pitkittäinen värähtely ( $v_{\max, \text{long}}$ ), poikittainen värähtely ( $v_{\max, \text{tran}}$ ) ja pystysuuntainen värähtely ( $v_{\max, \text{vert}}$ ). Näin junan nopeuden vaikutus jokaiseen tärinän eri suuntaan saataisiin esille. Lisäksi tärinän suuruus on esitetty vektorisumman huippuarvona (Peak Vector Sum, PVS), joka kuvaa eri värähtelykomponenttien yhteisvaikutusta. Tulokset on esitetty kuvaamalla tärinän suuruutta ja hallitsevaa taajuutta junan nopeuden funktiona.

### 6.1 Tärinä maaperässä

Junan nopeuden vaikutus maaperän tärinään oli selvimmin nähtävissä lähellä rataa (kuva 26). Junan nopeuden laskiessa myös heilahdusnopeuden huippuarvo laski. Poikkeuksena kuitenkin olivat tulokset nopeuksilta 58–60 km/h. Näillä nopeuksilla maaperän tärinä yllättäen kasvoi. Kauemmas radasta mentäessä mitatut tärinäarvot olivat pienempiä, eikä yhteyttä junan nopeuteen ollut havaittavissa. Kuvassa junan nopeuden vaikutusta on tarkasteltu heilahdusnopeuden vektorisumman huippuarvon avulla, jotta värähtelysuuntien yhteisvaikutus saataisiin esiin. Etäisyydellä 90 m radasta kynnyksarvona oli 0,45 mm/s, kun taas muilla etäisyyksillä 0,25 mm/s. Kynnyksarvojen



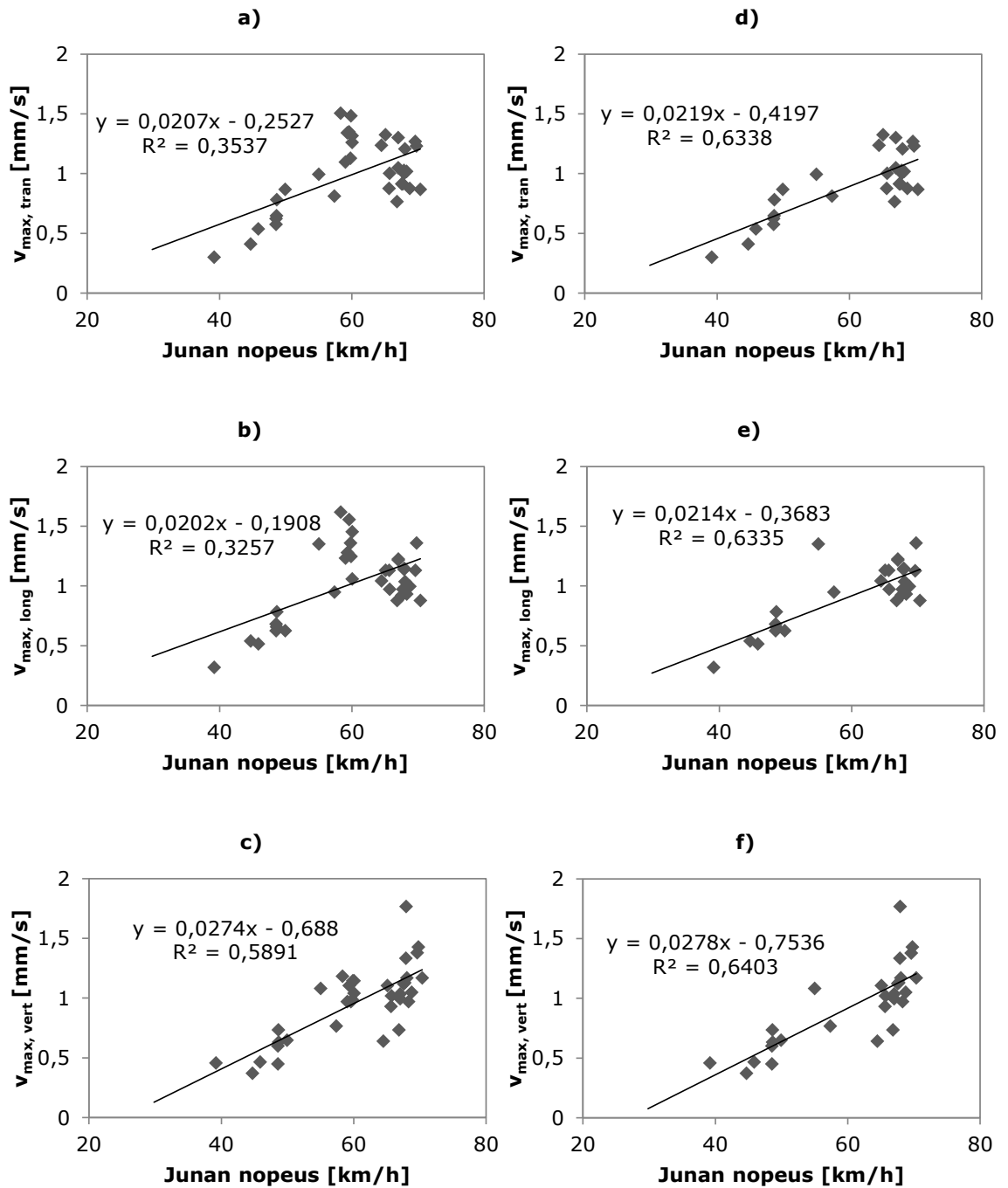
vaikutus näkyy kuvassa. Erilliset kuvaajat junan nopeuden vaikutuksesta heilahdusnopeuden vektorisummaan on esitetty mittauspisteittäin liitteessä 3. Tulokset eri värähtelysuunnittain jokaisella mittauspisteellä on esitetty tarkemmin seuraavissa kappaleissa.



Kuva 26. Junan nopeuden vaikutus tärinän heilahdusnopeuden vektorisumman huippuarvoon  $v_{max, PVS}$  eri etäisyyksillä radasta. Etäisyydellä 90 m radasta kynnyisarvo oli 0,45 mm/s, kun taas muilla etäisyyksillä 0,25 mm/s.

### 6.1.1 Mittauspiste MP1

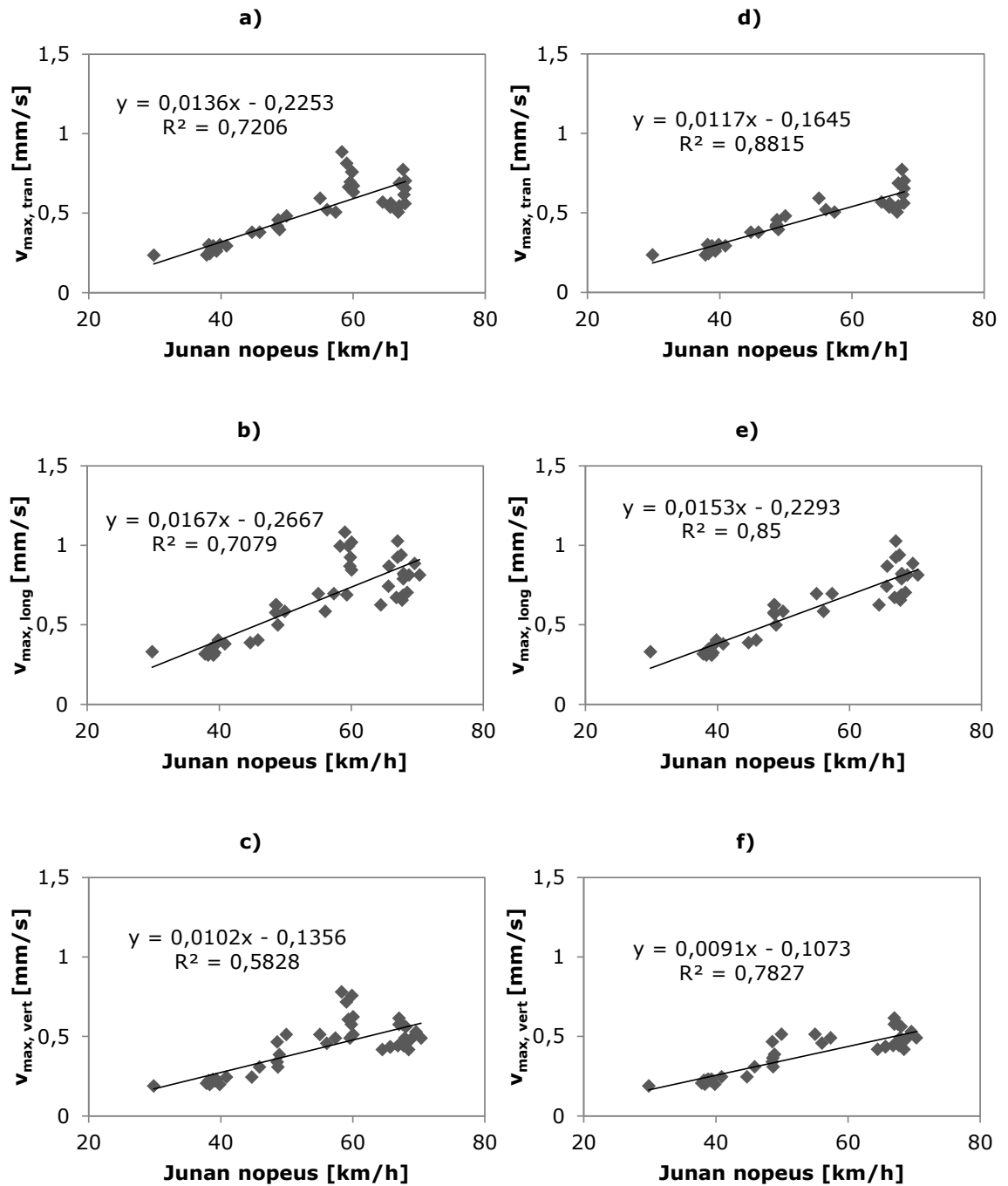
Mittauspiste MP1 on lähimpänä rataa ja sijaitsee 90 m päässä radasta. Mittarin kynnyisarvoksi asetettiin 0,45 mm/s, joten mittauspisteeltä saadut havainnot alkavat arvosta 0,45 mm/s. Kuvassa 27 on esitetty heilahdusnopeuden huippuarvot  $v_{max}$  kaikkiin kolmeen eri suuntaan. Kuten kuvasta voidaan todeta, yleisesti ottaen junan nopeuden kasvaessa myös heilahdusnopeuden huippuarvo kasvaa. Kuitenkin nopeuksien 58–60 km/h kohdalla  $v_{max}$  yllättäen kasvaa poikittaisessa ja pitkittäisessä tärinässä. Pystysuuntaisen tärinän kohdalla ilmiö ei ole yhtä voimakkaasti nähtävissä. Kuvassa 27 tulokset on esitetty myös ilman nopeuksilta 58–60 km/h saatuja tuloksia. Tällöin junan nopeuden kasvaessa  $v_{max}$  kasvaa johdonmukaisesti, ja tulokset noudattavat paremmin nousevaa trendiä.



Kuva 27. Heilahdusnopeuden huippuarvot mittauspisteellä MP1 kaikilla nopeuksilla a) poikittaiselle tärinälle, b) pitkittäiselle tärinälle ja c) pystysuuntaiselle tärinälle sekä ilman nopeuksia 58–60 km/h d) poikittaiselle tärinälle, e) pitkittäiselle tärinälle ja f) pystysuuntaiselle tärinälle.

### 6.1.2 Mittauspiste MP2

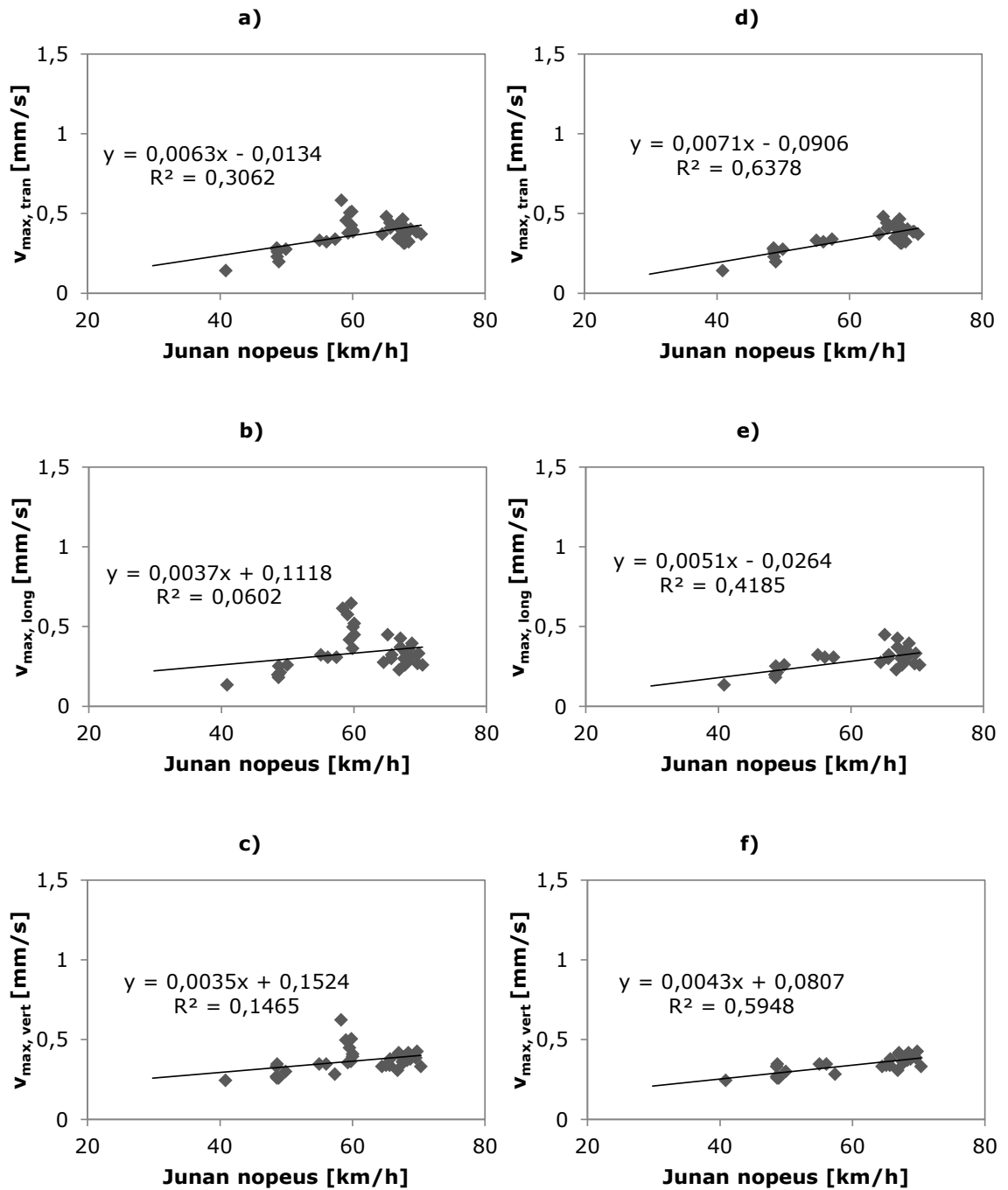
Mittauspiste MP2 sijaitsee 280 m etäisyydellä radasta. Mittarin kynnysarvo oli 0,25 mm/s, joten mittauspisteeltä on kattavammin tuloksia kuin mittauspisteeltä MP1, jonka kynnysarvo oli korkeampi. Heilahdusnopeuden huippuarvo  $v_{\max}$  kasvaa junan nopeuden kasvaessa, aivan kuten mittauspisteellä MP1 (kuva 28). Junan nopeuksien 58–60 km/h kohdalla on myös havaittavissa merkittävää kasvua, joka ei noudata nousevaa trendiä. Poiketen mittauspisteestä MP1, tärinähuippu näkyy kuitenkin myös pystysuuntaisessa tärinässä. Kun tulokset nopeuksilla 58–60 km/h poistetaan tarkastelusta, noudattaa  $v_{\max}$  selkeämmin lineaarista kasvavaa trendiä.



Kuva 28. Heilahdusnopeuden huippuarvot mittauspisteellä MP2 kaikilla nopeuksilla a) poikittaiselle tärinälle, b) pitkittäiselle tärinälle ja c) pystysuuntaiselle tärinälle sekä ilman nopeuksia 58–60 km/h d) poikittaiselle tärinälle, e) pitkittäiselle tärinälle ja f) pystysuuntaiselle tärinälle.

### 6.1.3 Mittauspiste MP3

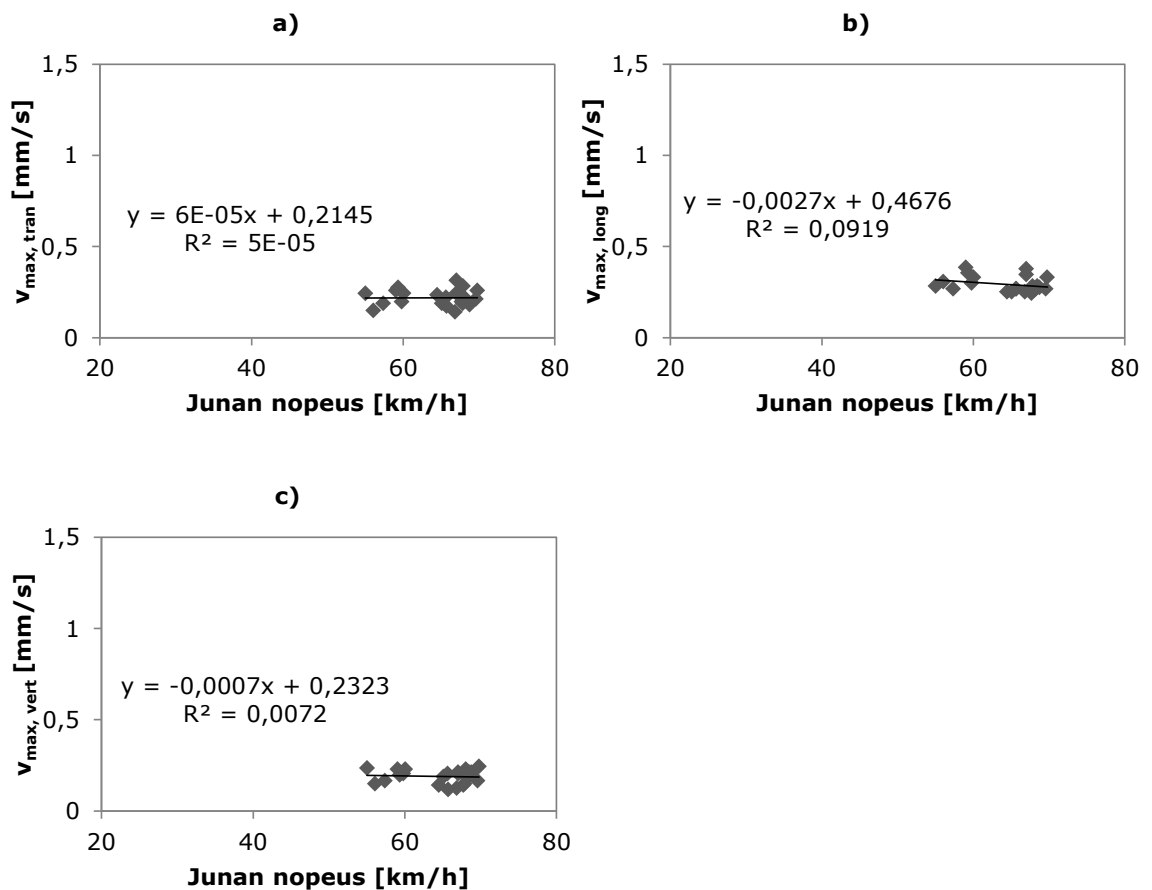
Mittauspisteen MP3 tulokset on esitetty muiden mittauspisteiden tavoin (kuvat 29). Mittauspiste sijaitsee 400 m päässä radasta, ja heilahdusnopeuden huippuarvot ovat pienempiä kuin mittauspisteillä MP1 ja MP2. Kuitenkin yhteys junan nopeuden ja heilahdusnopeuden huippuarvon välillä on selkeä, ja junan nopeuden kasvaessa myös  $v_{\max}$  kasvaa. Myös tärinähuippu nopeuksien 58–60 km/h kohdalla on selkeästi havaittavissa.



Kuva 29. Heilahdusnopeuden huippuarvot mittauspisteellä MP3 kaikilla nopeuksilla a) poikittaiselle tärinälle, b) pitkittäiselle tärinälle ja c) pystysuuntaiselle tärinälle sekä ilman nopeuksia 58–60 km/h d) poikittaiselle tärinälle, e) pitkittäiselle tärinälle ja f) pystysuuntaiselle tärinälle.

### 6.1.4 Mittauspiste MP4

Mittauspiste MP4 sijaitsee 570 m päässä radasta tutkimukseen kuuluvan rakennuksen pihalla. Mittauspisteellä MP4 ei havaittu yhteyttä junan nopeuden ja tärinän suuruuden välillä (kuva 30). Mittarit eivät havainneet tuloksia alhaisista nopeuksista ollenkaan, kun kynnyksiarvo oli 0,25 mm/s.

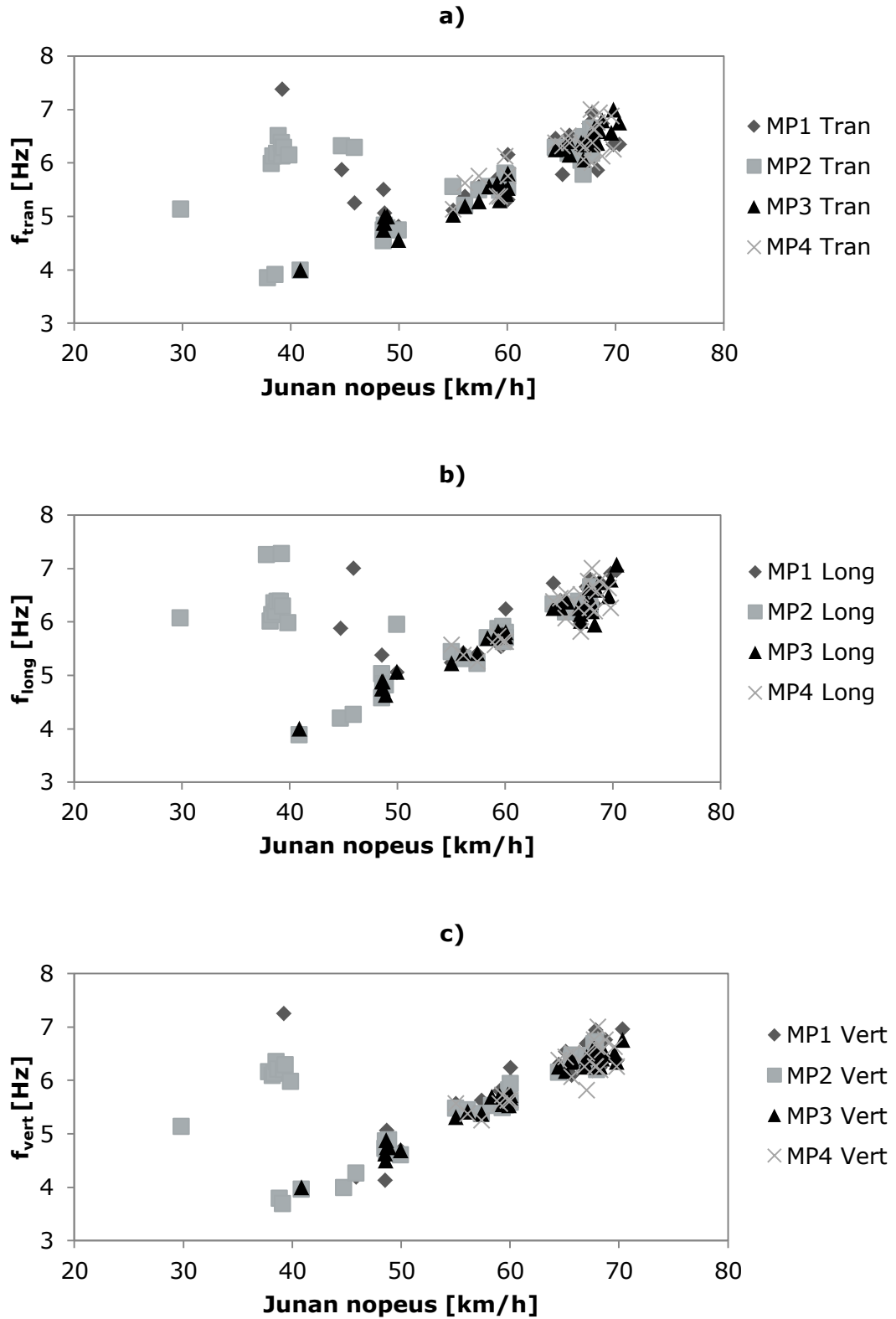


Kuva 30. Heilahdusnopeuden huippuarvot a) poikittaiselle tärinälle, b) pitkittäiselle tärinälle ja c) pystysuuntaiselle tärinälle mittauspisteellä MP4.

### **6.1.5 Hallitseva taajuus maaperässä**

Tärinän taajuussisällöstä poimittiin esitettäväksi tärinän hallitseva taajuus. Jossakin tapauksissa tärinä oli kapeataajuista, ja kaikki värähtely esiintyi kapealla taajuusalueella. Tällöin hallitsevan taajuuden erottaminen oli helppoa. Kuitenkin värähtelyn suuruuden ollessa pieni, värähtelyn taajuus oli usein laajemmalla taajuusalueella eikä hallitseva taajuus erottunut yhtä selkeästi. Tulokset mittauspisteiltä MP1–MP4 on esitetty kuvassa 31. Tulokset jokaiselta mittauspisteeltä erikseen on koottu liitteeseen 4. Junan nopeuden kasvaessa tärinän taajuus muuttuu korkeammaksi. Poikkeuksena ovat kuitenkin mittauspisteet MP1 ja MP2, joissa tärinä on korkeataajuisempaa alhaisilla nopeuksilla.



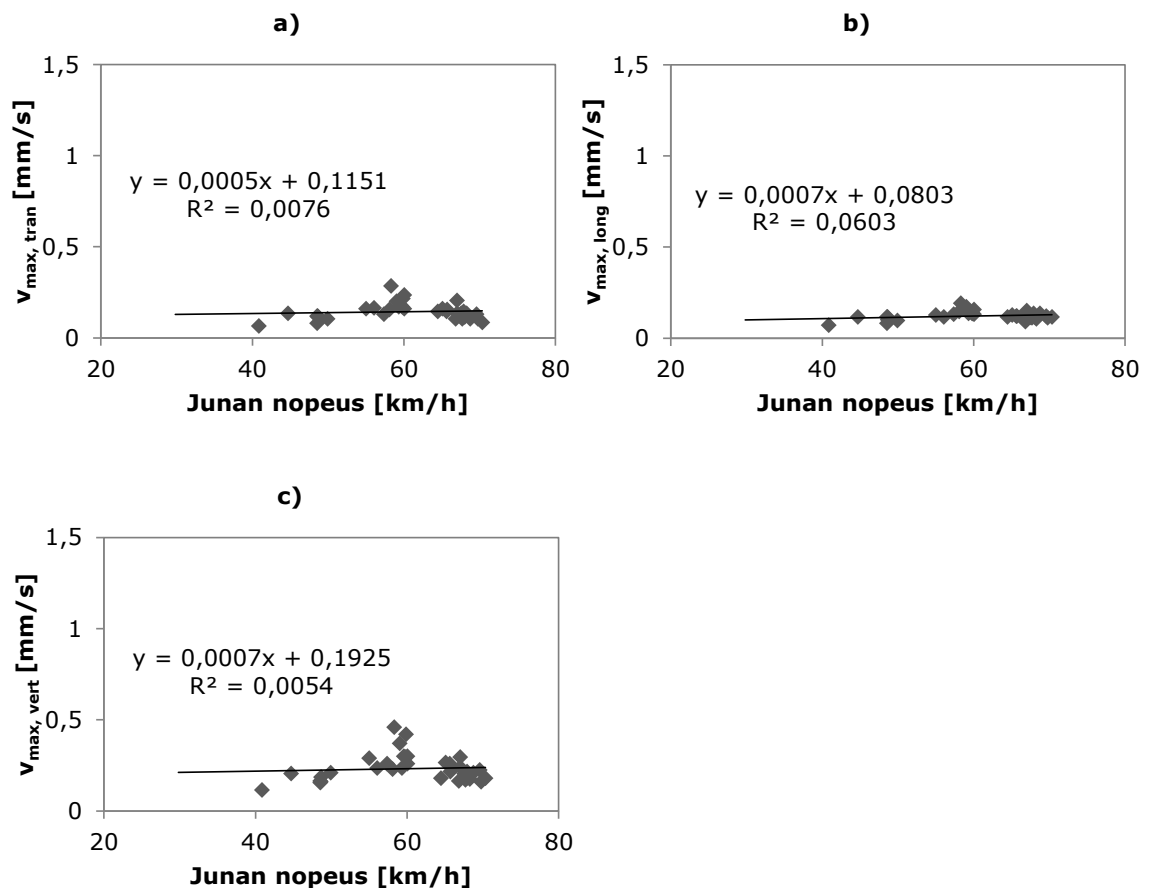


Kuva 31. Mittauspisteillä MP1–MP4 mitatut tärinän hallitsevat taajuudet a) poikittaiselle tärinälle, b) pitkittäiselle tärinälle ja c) pystysuuntaiselle tärinälle.

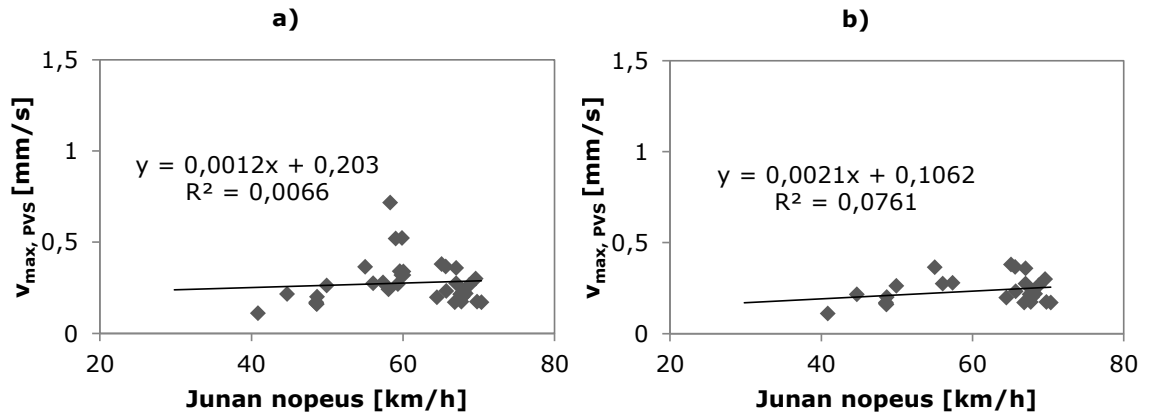
## 6.2 Tärinä rakennuksessa

### 6.2.1 Mittauspiste MP5 talon perusmuurissa

Mittauspiste MP5 mittasi tärinää talon perusmuurissa. Heilahdusnopeuden huippuarvot pysyivät suhteellisen pieninä, kun niitä verrataan muihin mittauspisteisiin (kuva 32). Lisäksi tulokset näyttävät pysyvän lähes tasaisina nopeudesta riippumatta. Kuitenkin 58–60 km/h on havaittavissa heilahdusnopeuden pientä nousua. Selkeimmin nousua on pystysuuntaisessa tärinässä. Liitteessä 5 on esitetty, miten tasaisena tärinä pysyy, jos nopeuksia 58–60 km/h ei oteta huomioon. Kun tarkastellaan tärinää vektorisumman kautta, erottuu nopeuksilla 58–60 km/h esiintyvä tärinähuippu kuitenkin selvemmin (kuva 33).



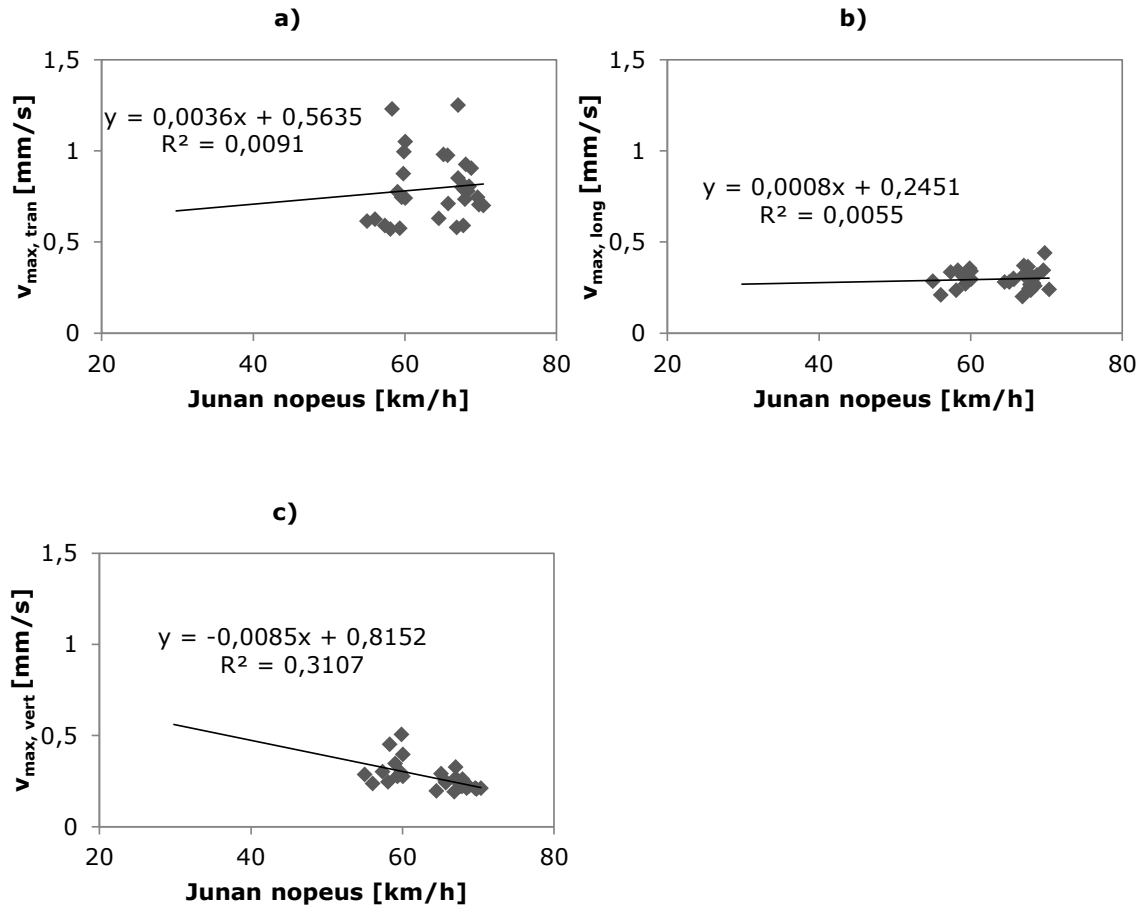
Kuva 32. Mittauspisteellä MP5 mitatut tärinän hallitsevat taajuudet a) poikittaiselle tärinälle, b) pitkittäiselle tärinälle ja c) pystysuuntaiselle tärinälle.



Kuva 33. Heilahdusnopeuden vektorisumman huippuarvot mittauspisteellä MP5. Kuvissa on esitetty a) kaikki nopeudet ja b) ilman nopeuksia 58–60 km/h.

### 6.2.2 Mittauspiste MP6 talon yläkerrassa

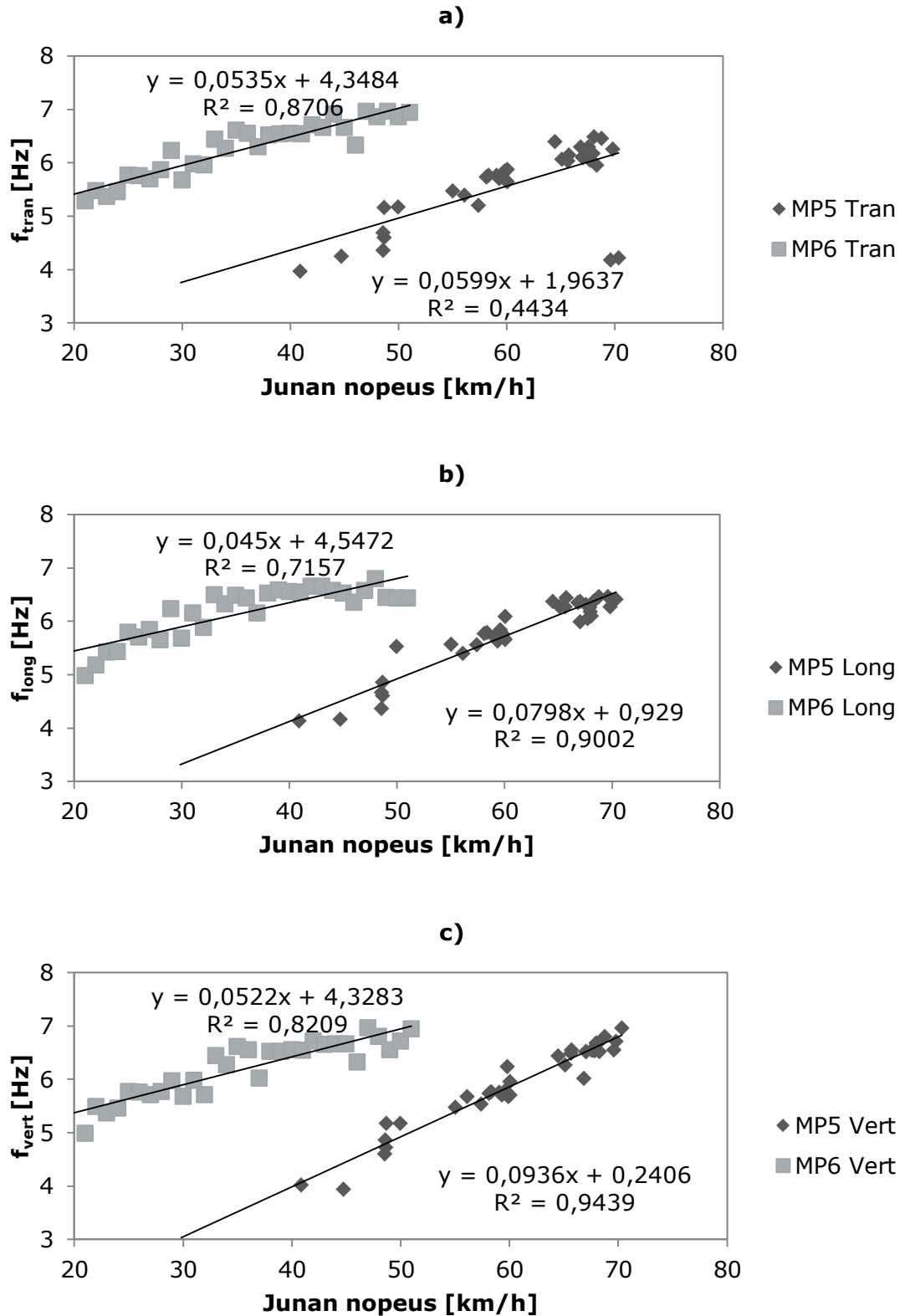
Mittauspiste MP6 mittasi tärinää talon yläkerrassa. Junan nopeudella ei näytä olevan selkeää yhteyttä tärinän suuruuteen talon yläkerrassa (kuva 34). Kuitenkin poikittainen tärinä vaikuttaa korostuvan muita suuntia enemmän. Nopeuksilla 58–60 km/h tärinä vaikuttaisi olevan hieman suurempaa vain pystysuunnassa. Tuloksissa ilman nopeuksia 58–60 km/h tai tuloksissa vektorisumman kautta esitettyinä ei ole myöskään havaittavissa yhteyttä (liite 5).



Kuva 34. Mittauspisteellä MP6 mitatut tärinän hallitsevat taajuudet a) poikittaiselle tärinälle, b) pitkittäiselle tärinälle ja c) pystysuuntaiselle tärinälle.

### 6.2.3 Hallitseva taajuus rakennuksessa

Vaikka junan nopeudella ei ole havaittavaa yhteyttä mitatun tärinän suuruuteen rakennuksessa, tärinän taajuuteen junan nopeus vaikuttaa rakennuksessa samoin kuin muillakin mittauspisteillä (kuva 35). Tärinän taajuus siis kasvaa junan nopeuden kasvaessa myös rakennuksessa. Tärinän taajuus rakennuksen yläkerrassa mittauspisteellä MP6 oli kuitenkin korkeampaa kuin tärinän perusmuurissa.



Kuva 35. Mittauspisteillä MP5 ja MP6 mitatut tärinän hallitsevat taajuudet a) poikittaiselle tärinälle, b) pitkittäiselle tärinälle ja c) pystysuuntaiselle tärinälle.

### 6.3 Tulosten tilastollinen merkitsevyys

Tulosten merkitsevyyden selvittämiseksi jokaiselle kuvaajalle laskettiin selitysaste  $R^2$  ja p-arvo. Selitysaste kuvaa sitä, kuinka monta prosenttia tuloksista lineaarinen malli selittää. Mitä suurempi selitysaste on, sitä paremmin lineaarinen malli selittää tulokset. P-arvo taas kuvaa, onko muuttujien välillä tilastollisesti merkitsevä yhteys. Jos p-arvo on pienempi kuin 0,05, voidaan tilastollista yhteyttä pitää merkitsevänä. Periaatteessa, mitä pienempi p-arvo on, sitä voimakkaampi on tilastollinen yhteys. Jos taas p-arvo on pienempi kuin 0,001, voidaan yhteyttä pitää tilastollisesti erittäin merkitsevänä.

Taulukkoon 5 on koottu selitysasteet ja p-arvot, jotka kuvaavat junan nopeuden tilastollista yhteyttä tärinän heilahdusnopeuden huippuarvoon. Arvot on laskettu sekä tarkastelulle, jossa on mukana kaikki nopeudet, että tarkastelulle, jossa nopeuksia 58–60 km/h ei ole huomioitu. Kun verrataan selitysasteita kahden eri tarkastelun välillä, on selkeästi nähtävissä, kuinka junan nopeuden ja tärinän suuruuden välillä on selkeä lineaarinen yhteys, kun nopeuksilla 58–60 km/h tapahtuva tärinähuippu jätetään huomioimatta. P-arvoja tarkastelemalla voidaan havaita, että yhteys junan nopeuden ja tärinän suuruuden välillä on merkitsevä mittauspisteiltä MP1, MP2 ja MP3 saaduilla tuloksilla. Samanlaista yhteyttä ei voi löytää mittauspisteiltä MP4, MP5 ja MP6.

Taulukko 5. Selitysasteet ja p-arvot junan nopeuden ja heilahdusnopeuden huippuarvon väliselle yhteydelle eri mittauspisteillä.

Mittauspiste	R <sup>2</sup>		p-arvo	
	<i>Kaikki nopeudet</i>	<i>Ilman nopeuksia 58-60 km/h</i>	<i>Kaikki nopeudet</i>	<i>Ilman nopeuksia 58-60 km/h</i>
MP1	<i>n=35</i>	<i>n=27</i>	<i>n=35</i>	<i>n=27</i>
<i>Tran</i>	0,3537	0,6338	<0,001	<0,001
<i>Vert</i>	0,5891	0,6403	<0,001	<0,001
<i>Long</i>	0,3257	0,6335	<0,001	<0,001
<i>PVS</i>	0,4912	0,7238	<0,001	<0,001
MP2	<i>n=47</i>	<i>n=39</i>	<i>n=47</i>	<i>n=39</i>
<i>Tran</i>	0,7206	0,8815	<0,001	<0,001
<i>Vert</i>	0,5828	0,7827	<0,001	<0,001
<i>Long</i>	0,7079	0,8500	<0,001	<0,001
<i>PVS</i>	0,7581	0,8730	<0,001	<0,001
MP3	<i>n=37</i>	<i>n=29</i>	<i>n=37</i>	<i>n=29</i>
<i>Tran</i>	0,3062	0,6378	<0,001	<0,001
<i>Vert</i>	0,1465	0,5948	≤0,05	<0,001
<i>Long</i>	0,0602	0,4185	>0,05	<0,001
<i>PVS</i>	0,1250	0,5905	≤0,05	<0,001
MP4	<i>n=24</i>	<i>n=20</i>	<i>n=24</i>	<i>n=20</i>
<i>Tran</i>	0,0001	0,0384	>0,05	>0,05
<i>Vert</i>	0,0072	0,0100	>0,05	>0,05
<i>Long</i>	0,0919	0,0000	>0,05	>0,05
<i>PVS</i>	0,0645	0,0056	>0,05	>0,05
MP5	<i>n=36</i>	<i>n=27</i>	<i>n=36</i>	<i>n=27</i>
<i>Tran</i>	0,0076	0,0716	>0,05	>0,05
<i>Vert</i>	0,0054	0,0714	>0,05	>0,05
<i>Long</i>	0,0603	0,2566	>0,05	≤0,05
<i>PVS</i>	0,0066	0,0761	>0,05	>0,05
MP6	<i>n=31</i>	<i>n=22</i>	<i>n=31</i>	<i>n=22</i>
<i>Tran</i>	0,0091	0,1182	>0,05	>0,05
<i>Vert</i>	0,3107	0,2087	≤0,05	≤0,05
<i>Long</i>	0,0055	0,0344	>0,05	>0,05
<i>PVS</i>	0,0000	0,0567	>0,05	>0,05

Taulukkoon 6 taas on koottu selitysasteet ja p-arvot, jotka kuvaavat junan nopeuden tilastollista yhteyttä tärinän hallitsevaan taajuuteen eri mittauspisteillä. Kuten taulukosta käy ilmi, lähes kaikilla mittauspisteillä tilastollinen yhteys muuttujien välillä on erittäin merkitsevä. Myös selitysasteet ovat korkeita. Mittauspisteellä MP2 yhteyttä pystysuuntaiselle tärinälle ei kuitenkaan ole havaittavissa. Kun nopeuksilla 58–60 km/h mitatut tulokset poistettiin tarkastelusta, tilastollinen yhteys ei muuttunut merkittävästi,

kuten heilahdusnopeutta tarkastellessa. Näin ollen yhteys on lineaarinen koko tarkasteluvälillä.

Taulukko 6. Selitysasteet ja p-arvot junan nopeuden ja hallitsevan taajuuden väliselle yhteydelle eri mittauspisteillä.

Mittauspiste	R <sup>2</sup>		p-arvo	
	<i>Kaikki nopeudet</i>	<i>Ilman nopeuksia 58-60 km/h</i>	<i>Kaikki nopeudet</i>	<i>Ilman nopeuksia 58-60 km/h</i>
MP1	<i>n=32</i>	<i>n=26</i>	<i>n=32</i>	<i>n=26</i>
	<i>Tran</i> 0,2225	0,2324	≤0,05	≤0,05
	<i>Vert</i> 0,5139	0,5189	<0,001	<0,001
	<i>Long</i> 0,3561	0,3757	<0,001	<0,001
MP2	<i>n=47</i>	<i>n=39</i>	<i>n=47</i>	<i>n=39</i>
	<i>Tran</i> 0,1983	0,2203	≤0,05	≤0,05
	<i>Vert</i> 0,2180	0,2282	<0,001	≤0,05
	<i>Long</i> 0,0480	0,0564	>0,05	>0,05
MP3	<i>n=37</i>	<i>n=29</i>	<i>n=37</i>	<i>n=29</i>
	<i>Tran</i> 0,9368	0,9541	<0,001	<0,001
	<i>Vert</i> 0,9734	0,9766	<0,001	<0,001
	<i>Long</i> 0,9372	0,9386	<0,001	<0,001
MP4	<i>n=24</i>	<i>n=20</i>	<i>n=24</i>	<i>n=20</i>
	<i>Tran</i> 0,6770	0,6236	<0,001	<0,001
	<i>Vert</i> 0,8745	0,8459	<0,001	<0,001
	<i>Long</i> 0,7262	0,6459	<0,001	<0,001
MP5	<i>n=36</i>	<i>n=27</i>	<i>n=36</i>	<i>n=27</i>
	<i>Tran</i> 0,4434	0,4721	<0,001	<0,001
	<i>Vert</i> 0,9439	0,9545	<0,001	<0,001
	<i>Long</i> 0,9002	0,9162	<0,001	<0,001
MP6	<i>n=31</i>	<i>n=22</i>	<i>n=31</i>	<i>n=22</i>
	<i>Tran</i> 0,9079	0,9066	<0,001	<0,001
	<i>Vert</i> 0,8911	0,8621	<0,001	<0,001
	<i>Long</i> 0,8277	0,8546	<0,001	<0,001



## 7 TULOSTEN TARKASTELU

Pääosin tulokset ovat johdonmukaisia ja noudattavat oletuksia. Junan nopeuden laskemisen oletettiin vähentävän tärinää. Junan nopeus vaikutti tärinän suuruuteen laskevasti kaikissa suuntakomponenteissa. Samansuuntaisia havaintoja on saatu muissakin tutkimuksissa (Volberg 1983, Lombaert & Degrande 2009). Tulokset koskevat kuitenkin vain suhteellisen alhaisia nopeuksia (40–70 km/h), eikä niiden perusteella voida päätellä, miten junan nopeus vaikuttaa tärinään korkeammilla nopeuksilla. Tuloksia ei siis voi verrata Volbergin esittämään yhtälöön, sillä se on kehitetty huomattavasti korkeammille nopeuksille. Tulokset eivät myöskään noudata Madshusin yhtälössä esitettyä oletusta, jonka mukaan junan nopeuden ollessa alle 70 km/h, nopeudella ei ole vaikutusta tärinän suuruuteen.

Odottamaton havainto oli, että tärinän suuruus kasvaa yllättäen kapealla nopeusalueella junan nopeuden ollessa 58–60 km/h. Tällaisen ns. kriittisen nopeuden esiintyminen on merkittävä löytö. Aiemmin Suomessa tehdyissä tutkimuksissa ei ole ollut käytettävissä näin tarkkoja nopeustietoja, joten ilmiön löytyminen ei ole ollut usein edes mahdollista. Tärinän suuruuden on havaittu kuitenkin yllättäen kasvavan myös yhdessä aiemmassa liikennetärinämittauksessa. Tällöin kuitenkin tärinä kasvoi vasta, kun junan nopeus laskettiin 30 kilometriin tunnissa. Ilmiö ei siis ehkä ole itsessään harvinainen, vaan luultavasti tällaisen kriittisen nopeuden löytyminen on odotettavissa muissakin kohteissa. Useimmissa liikennetärinämittauksissa nopeustietojen puuttuessa yhteys on ehkä jäänyt löytymättä.

Yhteyttä junan nopeuden ja tärinän suuruuden välillä tarkasteltiin lineaarisena, sillä lineaarinen yhteys sopi parhaiten suurimpaan osaan tuloksista. Tärinähuippu näytti tulosten perusteella olevan vain paikallinen juuri tietyillä nopeuksilla, jotka keskittyivät kapealle alueelle. Ilman tärinähuippua lineaarinen yhteys selitti havainnot paremmin kuin mikään muu malli. Tämän perusteella tulkittiin, että yhteys junan nopeuden ja tärinän suuruuden välillä on lineaarinen tärinähuippua lukuun ottamatta.

Etäisyys radasta vaikutti tuloksiin. Mittauspisteillä MP1–MP3 tärinän suuruus pieneni junan nopeuden laskiessa. Muutos oli sitä suurempaa, mitä lähempänä rataa mittauspiste on. Mittauspisteillä MP1 ja MP2 vaikutus oli selkeämmin nähtävissä, mutta

mittauspisteellä MP3 taas marginaalinen. Tulos oli odotettavissa, sillä tärinän suuruus pienenee muutenkin etäisyyden kasvaessa. Niin kutsutulla kriittisellä nopeudella tärinä kasvoi kuitenkin huomattavasti myös mittauspisteellä MP3. Kasvu oli jopa suurempaa kuin mittauspisteillä MP1 ja MP2. Tämä perusteella voi olettaa, että kriittisen nopeuden vaikutus tärinän suuruuteen voi olla merkittävä myös kauempana radasta.

Mittauspisteellä MP4 junan nopeudella ei vaikuttanut enää olevan yhteyttä tärinän suuruuteen. Havainto selittyy osittain sillä, että mittauspiste MP4 sijaitsi niin kaukana radasta, ettei alhaisilta junan nopeuksilta mitattu tärinää enää ollenkaan. Näin ollen muutoksen havaitseminen kapealta nopeusalueelta on hankalaa. Lisäksi tärinä oli suuruudeltaan jo todella pientä.

Mittauspisteellä MP5 talon perusmuurissa junan nopeus ei vaikuttanut tärinän suuruuteen. Kriittisellä nopeudella on havaittavissa kuitenkin pientä tärinän nousua. Etäisyys talon ja radan välillä on suuri, minkä takia tulokset eivät ole enää kovin luotettavia. Todennäköisesti junan nopeuden vaikutus olisi havaittavissa rakennuksissa, jotka sijaitsevat lähempänä rataa. Tulokset ovat samansuuntaisia kuin talon pihasta MP4:ltä mitatut tulokset. Tärinä siis näyttäisi perusmuurissa olevan samanlaista kuin maaperässä.

Talon yläkerrassa mittauspisteellä MP6 tärinä vaikuttaisi olevan lähes samansuuruista kuin perusmuurissa muutoin kuin poikittaisen tärinän osalta. Poikittainen tärinä korostuu rakennuksessa. Tämä viittaisi siihen, että talon ominaisuuksista johtuen juuri poikittainen tärinä voimistuu rakennuksessa. Kriittisellä nopeudella ei kuitenkaan ole huomattavaa vaikutusta yläkerrassa esiintyvään tärinään. Tämäkin voi johtua siitä, että rakennus sijaitsee liian kaukana radasta, jotta vaikutus olisi havaittavissa alhaisilla nopeuksilla. Jatkossa ilmiötä olisikin tutkittava rakennuksissa, jotka sijaitsevat lähempänä rataa.

Junan nopeudella on tulosten mukaan merkittävä yhteys tärinän hallitsevaan taajuuteen. Kun junan nopeus laskee, myös tärinän hallitseva taajuus laskee. Tulokset noudattavat aiemmin tehtyjä tutkimuksia (Sheng ym. 2003, Auersch 2006). Lineaarinen yhteys selitti havainnot parhaiten. Poikkeuksena oli mittauspisteeltä MP2 saadut tulokset, joissa yhteyttä ei ollut havaittavissa alhaisilla nopeuksilla. Poikkeama johtuu siitä, että junan nopeuden laskiessa lähelle 40 km/h myös mitattu tärinä oli erittäin pientä. Kun

heilahdusnopeudet laskivat tarpeeksi pieneksi, ei tärinästä ollut enää selkeästi erotettavissa yhtä hallitsevaa taajuutta, mikä vääristää tuloksia. Näin ollen MP2:n poikkeavat tulokset voidaan hyvin selittää, ja yleisesti voidaan todeta, että junan nopeuden ja tärinän taajuuden välillä on selkeä yhteys. Hallitseva taajuus ei muuttunut etäisyyden kasvaessa. Tärinän taajuus oli samansuuruista kaikilla mittauspisteillä lukuun ottamatta mittauspistettä MP6. Todennäköisesti talon ominaisuudet vaikuttavat tärinän taajuuteen niin, että tärinän hallitseva taajuus on hieman korkeampi talossa kuin maaperässä.

Syy kriittisen nopeuden esiintymiseen on todennäköisesti yhteydessä värähtelysystemin taajuuteen. Kun tarkastellaan tutkimuksessa esiintyneen tärinähuipun taajuutta, huomataan, että taajuus on kaikilla mittauspisteillä kaikissa suunnissa samalla alueella, noin 5,5–5,8 Hz. Tämä taajuus aiheuttaa todennäköisesti resonanssia jossain värähtelysystemin osassa. Kyseinen taajuus voi olla esimerkiksi lähellä yhtä maan omista ominaistaajuuksista. Ilmiö riippuu todennäköisesti useista eri tekijöistä, kuten alueen pohjasuhteista. Näin ollen ei voida olettaa, että kyseinen nopeus tai taajuus olisi yleisesti kriittinen, vaan kriittinen nopeus on todennäköisesti kohteelle ominainen.

## 8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Pääsääntöisesti junan nopeuden laskeminen laskee tärinän suuruutta. Työn perusteella vaikuttaa kuitenkin siltä, että kohteelle voidaan kuitenkin löytää ns. kriittinen nopeus, jota ajettaessa tärinän suuruus saattaa yllättäen kasvaa. Mahdollisuus kriittisellä nopeudella esiintyvään tärinähuippuun olisi otettava huomioon nopeusrajoitusta asetettaessa. Lisäksi tärinän hallitseva taajuus vaikuttaa riippuvan junan nopeudesta. Muutokset tärinän taajuudessa voivat merkittävästi vaikuttaa tärinähaitan ilmenemiseen. Jos taajuus osuu rakennuksen tai tärinäsystemin muun osan ominaistaajuudelle, voi sillä olla merkittävä vaikutus tärinähaittaan.

Työn perusteella voidaan päätellä, että jo pienikin muutos junan nopeudessa voi vaikuttaa yllättävän paljon tärinän suuruuteen. Nopeusrajoitusta asetettaessa nopeus on yleensä ensin laskettu arvoon 60 km/h, ja ellei rajoitus ole toiminut, on sitä edelleen laskettu arvoon 40 km/h. Työssä tutkitussa kohteessa nopeusrajoitus 60 km/h ei olisi välttämättä vähentänyt tärinää tai olisi jopa kasvattanut sitä. Toisaalta taas nopeuden rajoittaminen tasolle 40 km/h voisi olla tarpeetonta, sillä jo pienellä muutoksella junan nopeudessa voitaisiin nopeus saada pois kriittiseltä alueelta, ja tärinä vähentymään. Näin ollen esimerkiksi nopeusrajoitus 50 km/h voisi olla riittävä.

## 9 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli selvittää, miten junan nopeus vaikuttaa rautatieliikenteen aiheuttaman tärinän suuruuteen ja taajuussisältöön. Työtä varten suoritettiin liikennetärinämittauksia Limingassa Pohjanmaan radan varressa. Työssä tutkittiin samanpainoisia junia, jotka ajoivat nopeuksia 40–70 km/h. Mittausten tuloksena junan nopeutta verrattiin tärinän heilahdusnopeuden huippuarvoon sekä hallitsevaan taajuuteen. Junan nopeuden lasku pienensi tärinän suuruutta odotetusti. Yllättävää havainto oli, että nopeuksilla 58–60 km/h tärinä oli paikallisesti suurempaa muodostaen tärinähuipun. Junan nopeuden ja tärinän suuruuden välillä vaikuttaisi olevan lineaarinen yhteys tärinähuippua lukuun ottamatta. Näin ollen kohteelle löytyi niin sanotusti kriittinen nopeus, jolla tärinä voi kasvaa yllättävän suureksi.

Etäisyyden kasvaessa mitatut tärinän arvot pienenevät. Kauemmaksi radasta mentäessä tärinä oli niin pientä, ettei yhteyttä junan nopeuden ja tärinän välillä enää ollut havaittavissa. Tärinämittauksia suoritettiin myös rakennuksessa, mutta rakennus sijaitsi kuitenkin liian kaukana radasta, jotta selkeää yhteyttä junan nopeuden ja tärinän suuruuden välillä olisi voitu havaita.

Junan nopeudella oli selkeä yhteys tärinän hallitsevaan taajuuteen. Junan nopeuden ollessa korkeampi tärinän hallitseva taajuus muuttui korkeammaksi. Tämä yhteys oli nähtävillä kaikilla mittauspisteillä ja näkyi myös rakennuksessa mitatussa tärinässä. Hallitseva taajuus ei muuttunut etäisyyden kasvaessa. Tärinän hallitseva taajuus oli kriittisellä nopeudella kaikilla mittauspisteillä saman, noin 5,5–5,8 Hz. Tämän perusteella voisi olettaa, että yllättävä tärinähuippu liittyy tähän kyseiseen taajuuteen. Tärinähuippu voi johtua siitä, että taajuus osuu lähelle värähtelysystemin jonkin osan, kuten maaperän, ominaistaajuutta.

Työn perusteella voidaan päätellä, että pienelläkin muutoksella junan nopeudessa voi olla merkitystä, jos muutos osuu junan kriittiselle nopeudelle. Nopeusrajoitusta asetettaessa tulisi ottaa huomioon, että kriittisen nopeuden esiintyminen voi olla mahdollista. Tällöin nopeuden vähäisempikin rajoittaminen saattaisi joissakin tapauksissa riittää.

## LÄHTEET

Alzawi A & Hesham El Naggar M (2011) Full scale experimental study on vibration scattering using open and in-filled (GeoFoam) wave barriers. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 31(3): 306–317.

Auersch L (2006) Ground vibration due to railway traffic - The calculation of the effects of moving static loads and their experimental verification. *Journal of Sound and Vibration* 293(3-5): 599–610.

Auvinen T (2010) Junaliikenteen aiheuttama tärinä ja sen vähentämisen vaikutus asuinviihtyvyyteen. Diplomityö. Aalto-yliopisto, Teknillinen korkeakoulu.

Bian X, Cheng C, Jiang J, Chen R & Chen Y (2016) Numerical analysis of soil vibrations due to train moving at critical speed. *Acta Geotechnica* 11(2): 281–294.

Cao Y, Wei P, Qiao H & Yao J (2013) Railway Traffic Induced Ground Vibration and Its Prediction Approaches. Teoksessa: Xia H & Calçada R (toim.) *Traffic Induced Environmental Vibrations and Controls : Theory and Application*. Hauppauge, Nova Science Publishers: 347–386.

Cao Y, Yu Z & Cui K (2013) Basic Theory and Analysis Approaches in Traffic-Induced Environmental Vibrations. Teoksessa: Xia H & Calçada R (toim.) *Traffic Induced Environmental Vibrations and Controls : Theory and Application*. Hauppauge, Nova Science Publishers: 90–91.

Chen Y -H, Huang Y -H & Shih C -T (2001) Response of an infinite Timoshenko beam on a viscoelastic foundation to a harmonic moving load. *Journal of Sound and Vibration* 241(5): 809–824.

Connolly D P, Kouroussis G, Laghrouche O, Ho C L & Forde M C (2015) Benchmarking railway vibrations - Track, vehicle, ground and buildings effects. *Construction and Building Materials* 92: 64–81.

Degrande G & Schillemans L (2001) Free field vibrations during the passage of a Thalys high-speed train at variable speed. *Journal of Sound and Vibration* 247(1): 131–144.

Dijckmans A, Coulier P, Jiang J, Toward M G R, Thompson D J, Degrande G & Lombaert G (2015) Mitigation of railway induced ground vibrations by heavy masses next to the track. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 75: 158–170.

Dijckmans A, Ekblad A, Smekal G, Degrande G & Lombaert G (2016) Efficacy of a sheet pile wall as a wave barrier for railway induced ground vibration. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 84: 55–69.

DIN 4150-3 (1999) Structural vibration. Part 3: Effects of vibration on structures. DIN Deutsches Institut für Normung.

FRA (2012) High-Speed Ground Transportation - Noise and Vibration Impact Assessment. Federal Railroad Administration, USA.

Galvín P, Romero A & Domínguez J (2010) Fully three-dimensional analysis of high-speed train-track-soil-structure dynamic interaction. *Journal of Sound and Vibration* 329(24): 5147–5163.

Gao G Y, Chen Q S, He J F & Liu F (2012) Investigation of ground vibration due to trains moving on saturated multi-layered ground by 2.5D finite element method. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 40: 87–98.

GTK (2016) Pohjatutkimukset-verkkosivu. Geologian tutkimuslaitos. Saatavissa: <http://gtkdata.gtk.fi/Pohjatutkimukset/index.html> [haettu 7.3.2016].

Hung H H, Chen G H & Yang Y B (2013) Effect of railway roughness on soil vibrations due moving trains by 2.5D finite/infinite element approach. *Engineering Structures* 57: 254–266.

Johansson A, Nielsen J C O, Bolmsvik R, Karlström A & Lundén R (2008) Under sleeper pads - Influence on dynamic train-track interaction. *Wea*, 265(9-10): 1479–1487.

Jones C (2009) *Low Frequency Vibration*. Teoksessa: Thompson D (toim.) *Railway Noise and Vibration*. Oxford: Elsevier: 399–435.

Jones C J C & Block J R (1996) Prediction of ground vibration from freight trains. *Journal of Sound and Vibration* 193(1): 205–213.

Karlström A & Boström A (2006) An analytical model for train-induced ground vibrations from railways. *Journal of Sound and Vibration* 292(1-2): 221–241.

Klein R, Antes H & Le Houédec D (1997) Efficient 3D modelling of vibration isolation by open trenches. *Computers and Structures* 64(1 - 4): 809–817.

Krylov V & Ferguson C (1994) Calculation of Low-Frequency Ground Vibrations from Railway Trains. *Applied Acoustics* 42(3): 199–213.

Lei X & Noda N A (2002) Analyses of dynamic response of vehicle and track coupling system with random irregularity of track vertical profile. *Journal of Sound and Vibration* 258(1): 147–165.

Liikennevirasto (2013) *Rautateiden verkkoselostus 2015*. Liikenneviraston väylätietoja 2/2013. Helsinki: Liikennevirasto.

Lombaert G & Degrande G (2009) Ground-borne vibration due to static and dynamic axle loads of InterCity and high-speed trains. *Journal of Sound and Vibration* 319(5-3): 1036–1066.

Madshus C, Bessason B & Hårvik L (1996) Prediction model for low frequency vibration from high speed railways on soft ground. *Journal of Sound and Vibration* 193(1): 195–203.



Madhus C & Kaynia A M (2000) High-speed railway lines on soft ground: dynamic behaviour at critical train speed. *Journal of Sound and Vibration* 231(3): 689–701.

MML (2016) Paikkatietoikkuna-verkkosivu. Maanmittauslaitos.

Saatavissa: <http://www.paikkatietoikkuna.fi/web/fi/kartta> [haettu 7.3.2016].

Murillo C, Thorel L & Caicedo B (2009) Ground vibration isolation with geofabric barriers: Centrifuge modeling. *Geotextiles and Geomembranes* 27: 423–434.

Müller R, Leibundgut D, Stallaert B, Pesqueux L & Exblad A (2013) Validation of wheel maintenance measures on the rolling stock for reduced excitation of ground vibration. RIVAS. Saatavissa: [http://www.rivas-project.eu/fileadmin/documents/D2.9-Validation\\_of\\_wheel\\_maintenance\\_measures\\_on\\_the\\_rolling\\_stock\\_for\\_reduced\\_excitation\\_of\\_ground\\_vibration.pdf](http://www.rivas-project.eu/fileadmin/documents/D2.9-Validation_of_wheel_maintenance_measures_on_the_rolling_stock_for_reduced_excitation_of_ground_vibration.pdf) [haettu 7.3.2016].

NS 8176.E (2005) Vibration and Shock - Measurement of vibration in buildings from landbased transport and guidance to evaluation of its effects on human beings. Standards Norway.

Poikolainen E (2016) Melu- ja värinäasiantuntija, Liikennevirasto. Haastattelu 24.3.2016.

RIL 253 (2010) Rakentamisen aiheuttamat värinät. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

Sheng X, Jones C J C & Thompson D J (2003) A comparison of a theoretical model for quasi-statically and dynamically induced vibration from trains with measurements. *Journal of Sound and Vibration* 267(3): 621–635.

Talja A (2004) VTT tiedotteita 2278: Suositus liikennetärinän mittaamisesta ja luokituksesta. Espoo: VTT.

Talja A (2011) VTT tiedotteita 2569: Ohjeita liikennetärinän arviointiin. Espoo: VTT.

Talja Asko, Fulop Ludovic, Kurkela Juha, Vepsä Ari & Törnqvist Jouko (2009) *Tärinäesteet liikennetärinän vaimentamisessa*. Espoo: VTT.

Talja A & Törnqvist J (2014) *Liikennetärinä: Alueiden tärinäkartoitus ja rakenteiden vaurioitumisalttius*. Espoo: VTT.

Talja A, Törnqvist J & Niemeläinen E (2015) *Pilaristabilointi- ja ponttiseinät: Tärinäestekokeilujen alustavat tulokset ja jatkotutkimustarpeet*. Espoo: VTT.

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

Thompson D J, Jiang J, Toward M G R, Hussein M F M, Dijckmans A, Coulier P, Degrande G & Lombaert G (2015) *Mitigation of railway-induced vibration by using subgrade stiffening*. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 79: 89–103.

Törnqvist J & Talja A (2006) *Suositus liikennetärinän arvioimiseksi maankäytön suunnittelussa*. Espoo: VTT.

With C, Bahrekazemi M & Bodare A (2009) *Wave barrier of lime-cement columns against train-induced ground-borne vibrations*. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 29(6): 1027–1033.

Volberg G (1983) *Propagation of ground vibrations near railway tracks*. *Journal of Sound and Vibration* 87(2): 371–376.

Xia H, Cao Y, De Guido, R & Degrande G (2007) *Environmental problems of vibrations induced by railway traffic*. *Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China* 1(2): 142–152.

Xia H, Li H & Cui K (2013) *Problem of Traffic-Induced Environmental Vibrations and Controls: An Overview*. Teoksessa: Xia H & Calçada R (toim.) *Traffic Induced Environmental Vibrations and Controls : Theory and Application*. Hauppauge, Nova Science Publishers: 1–48.

Yang Y B, Hung H H & Chang D W (2003) Train-induced wave propagation in layered soils using finite/infinite element simulation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 23(4): 263–278.

Yang Y-B & Hong X (2009) *Wave Propagation for Train-induced Vibrations : A Finite/infinite Element Approach*. Hackensack, NJ: World Scientific Publishing Company.

Zhai W, Wei K, Song X & Shao M (2015) Experimental investigation into ground vibrations induced by very high speed trains on a non-ballasted track. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 72: 24 - 36.

## LIITE 1 (1)

## Junanumerot ja junapainot.

Päivämäärä	Kellonaika	Junanumero	Paino (tonnia)
2015-11-25	00:26:35	T 5400	3986
2015-11-25	03:41:30	T 5416	
2015-11-25	06:30:07	T 55410	4009
2015-11-26	00:30:23	T 5400	3996
2015-11-26	03:34:21	T 5416	3982
2015-11-26	07:07:19	T 55410	3998
2015-11-27	00:21:28	T 55400	4016
2015-11-27	00:42:16	T 5402	3983
2015-11-28	00:21:10	T 5400	4019
2015-11-29	00:34:21	T 55400	4022
2015-11-29	05:53:31	T 55410	4014
2015-11-29	08:45:34	T 55418	4014
2015-11-30	03:39:33	T 5416	4001
2015-11-30	06:29:15	T 55410	4004
2015-11-30	10:22:21	T 55418	4004
2015-12-01	00:45:44	T 5400	4015
2015-12-02	00:41:26	T 5400	4015
2015-12-02	01:07:19	T 5402	4013
2015-12-03	00:21:15	T 5400	4018
2015-12-03	03:38:16	T 5416	4018
2015-12-03	07:44:33	T 55410	4015
2015-12-03	10:17:26	T 55418	4015
2015-12-04	01:01:57	T 5402	4018
2015-12-05	00:57:57	T 5400	3994
2015-12-06	00:23:33	T 55400	4001
2015-12-06	03:36:29	T 55416	3998
2015-12-07	00:20:10	T 5400	3983
2015-12-07	03:31:19	T 5416	3992
2015-12-07	10:41:59	T 55418	3996
2015-12-08	00:16:18	T 5400	4021
2015-12-08	03:42:33	T 5416	4009
2015-12-08	07:09:28	T 55410	4023
2015-12-08	10:16:17	T 55418	4023
2015-12-09	00:20:34	T 5400	4027
2015-12-09	01:20:36	T 5402	4019
2015-12-10	00:26:27	T 5400	4021
2015-12-10	03:37:07	T 5416	4029
2015-12-10	07:11:56	T 55410	4024
2015-12-10	09:24:14	T 55418	4024
2015-12-11	00:21:06	T 5400	4010
2015-12-11	03:29:15	T 5416	4026
2015-12-11	07:19:28	T 55410	4022
2015-12-11	10:18:14	T 55418	4022
2015-12-12	00:20:04	T 5400	
2015-12-12	01:16:04	T 55416	
2015-12-13	00:21:14	T 55400	
2015-12-13	04:11:58	T 55416	
2015-12-13	07:40:16	T 55410	
2015-12-14	00:23:16	T 5400	
2015-12-14	03:23:28	T 5416	
2015-12-14	07:13:41	T 55410	



Event Report

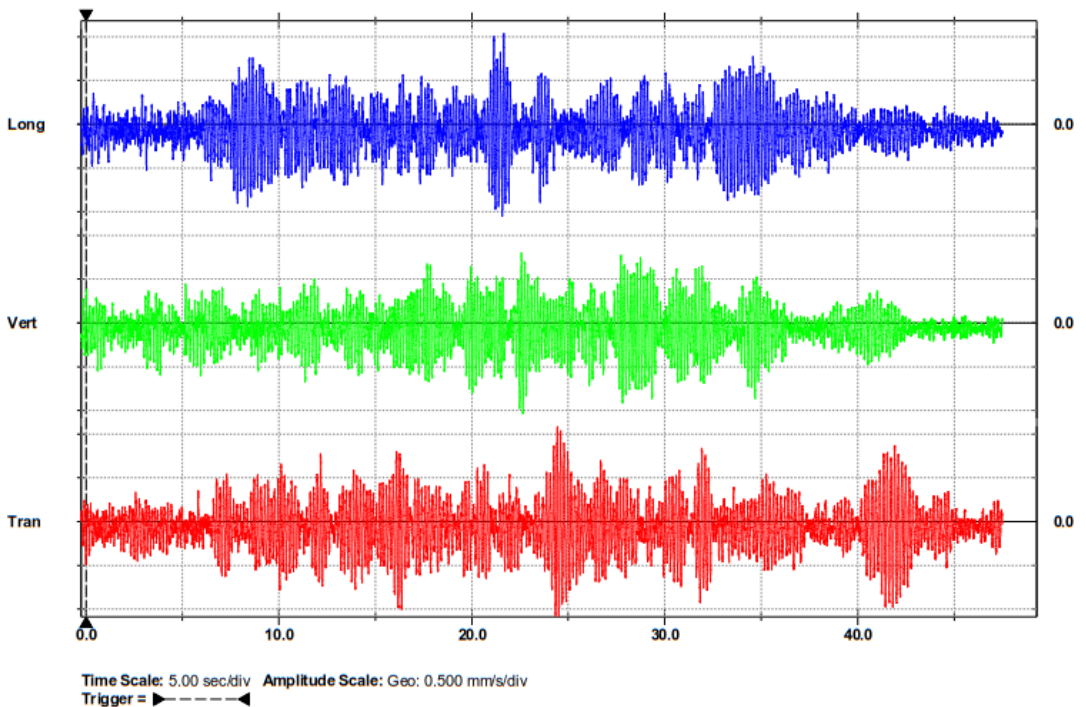
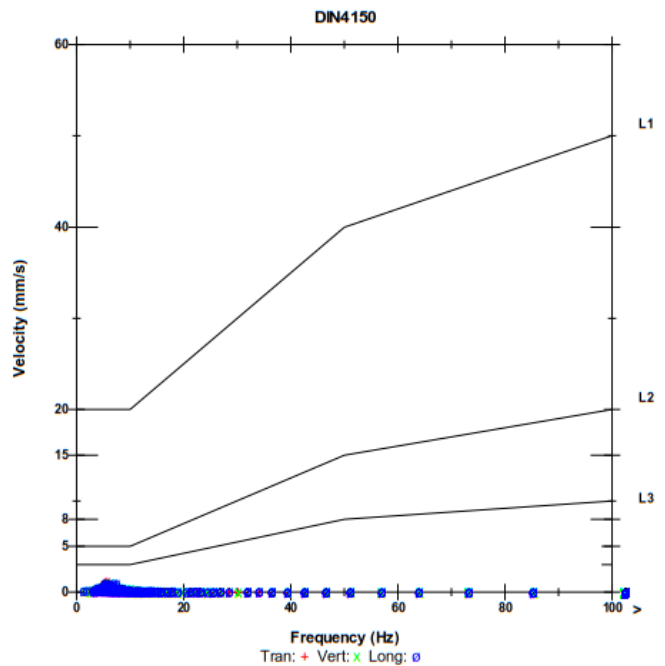
Date/Time Tran at 00:16:13 December 8, 2015  
 Trigger Source Geo: 0.450 mm/s  
 Range Geo: 254.0 mm/s  
 Record Time 47.499 sec (Auto=3Sec) at 1024 sps  
 Job Number: 5049  
 Operator/Setup: Operator/UM6981.MMB

Serial Number UM6981 V 10-76 Micromate DIN  
 Battery Level 3.8 Volts  
 Unit Calibration June 30, 2015 by Instantel  
 File Name UM6981\_20151208001613.IDFW

Notes

Location: XXXXXXXXXX  
 Client: VR Track Oy  
 User Name: VR Track Oy  
 General: MP1

	Tran	Vert	Long	
PPV	1.261	1.040	1.056	mm/s
ZC Freq	5.6	6.1	5.4	Hz
Time (Rel. to Trig)	24.508	22.649	21.579	sec
Peak Acceleration	0.010	0.009	0.010	g
Peak Displacement	0.035	0.026	0.029	mm
Sensor Check	Passed	Passed	Passed	
Peak Vector Sum	1.262 mm/s at 24.508 sec			



Time Scale: 5.00 sec/div Amplitude Scale: Geo: 0.500 mm/s/div  
 Trigger =

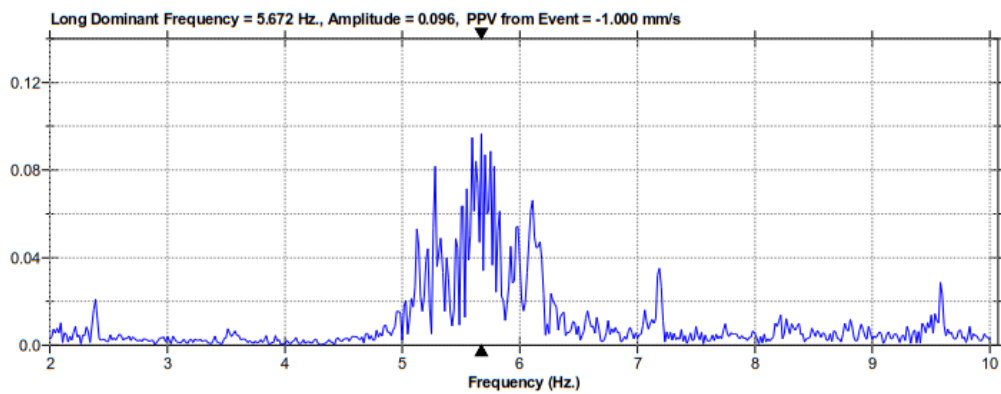
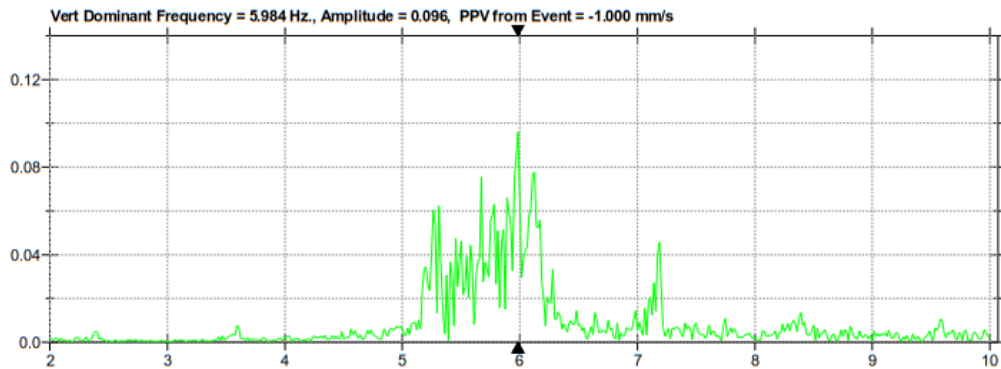
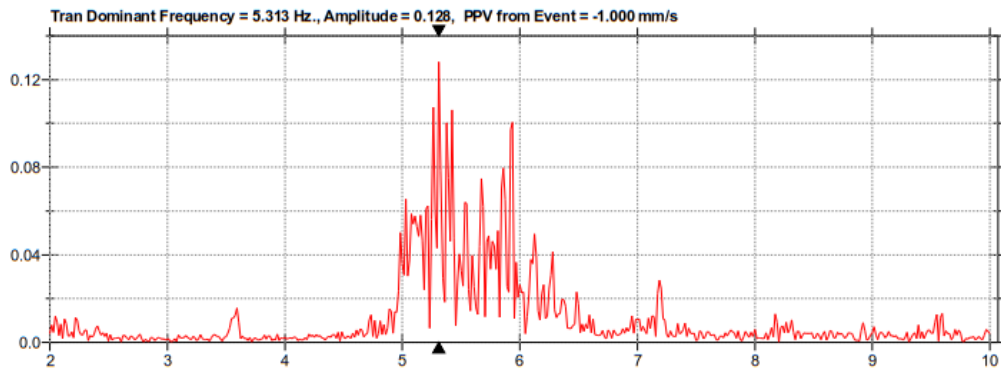


FFT Report

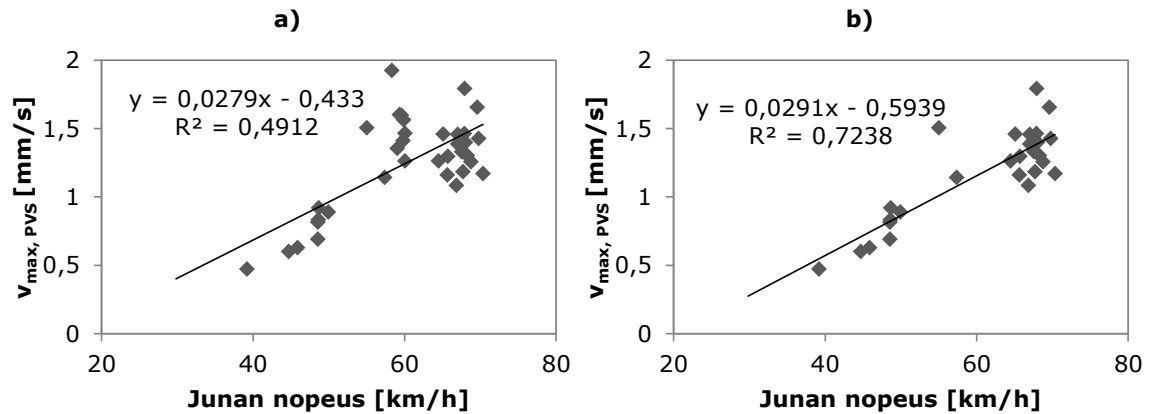
Date/Time Tran at 00:16:13 December 8, 2015  
 Trigger Source Geo: 0.450 mm/s  
 Range Geo: 254.0 mm/s  
 Record Time 47.499 sec (Auto=3Sec) at 1024 sps  
 Job Number: 5049  
 Operator/Setup: Operator/UM6981.MMB

Serial Number UM6981 V 10-76 Micromate DIN  
 Battery Level 3.8 Volts  
 Unit Calibration June 30, 2015 by Instantel  
 File Name UM6981\_20151208001613.IDFW

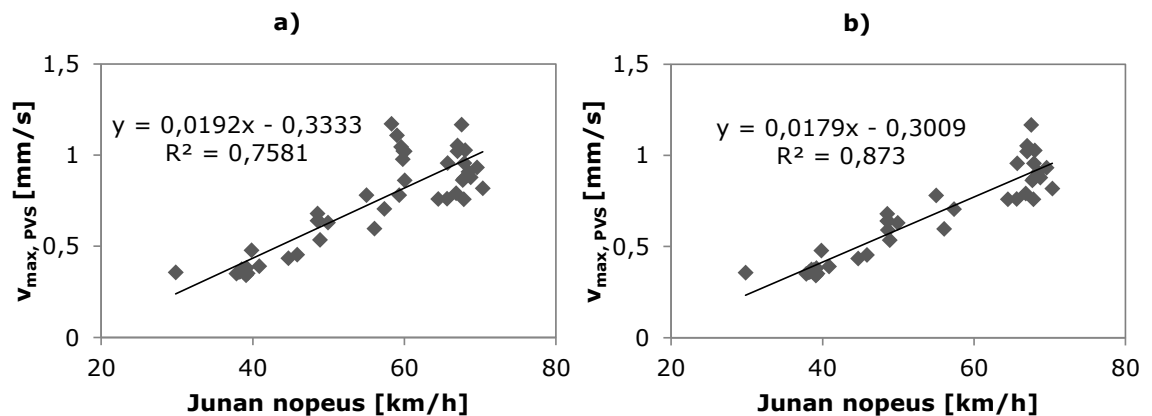
Notes  
 Location: [REDACTED]  
 Client: VR Track Oy  
 User Name: VR Track Oy  
 General: MP1



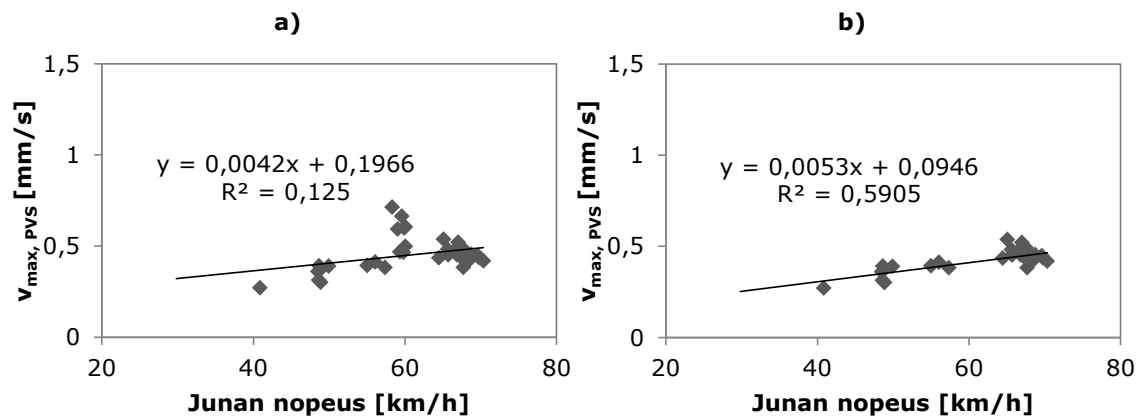
Heilahdusnopeuden vektorisumman huippuarvot eri nopeuksilla mittauspisteillä MP1–MP3.



Kuva 1. Heilahdusnopeuden vektorisumman huippuarvot mittauspisteellä MP1. Kuvissa on esitetty a) kaikki nopeudet ja b) ilman nopeuksia 58–60 km/h.



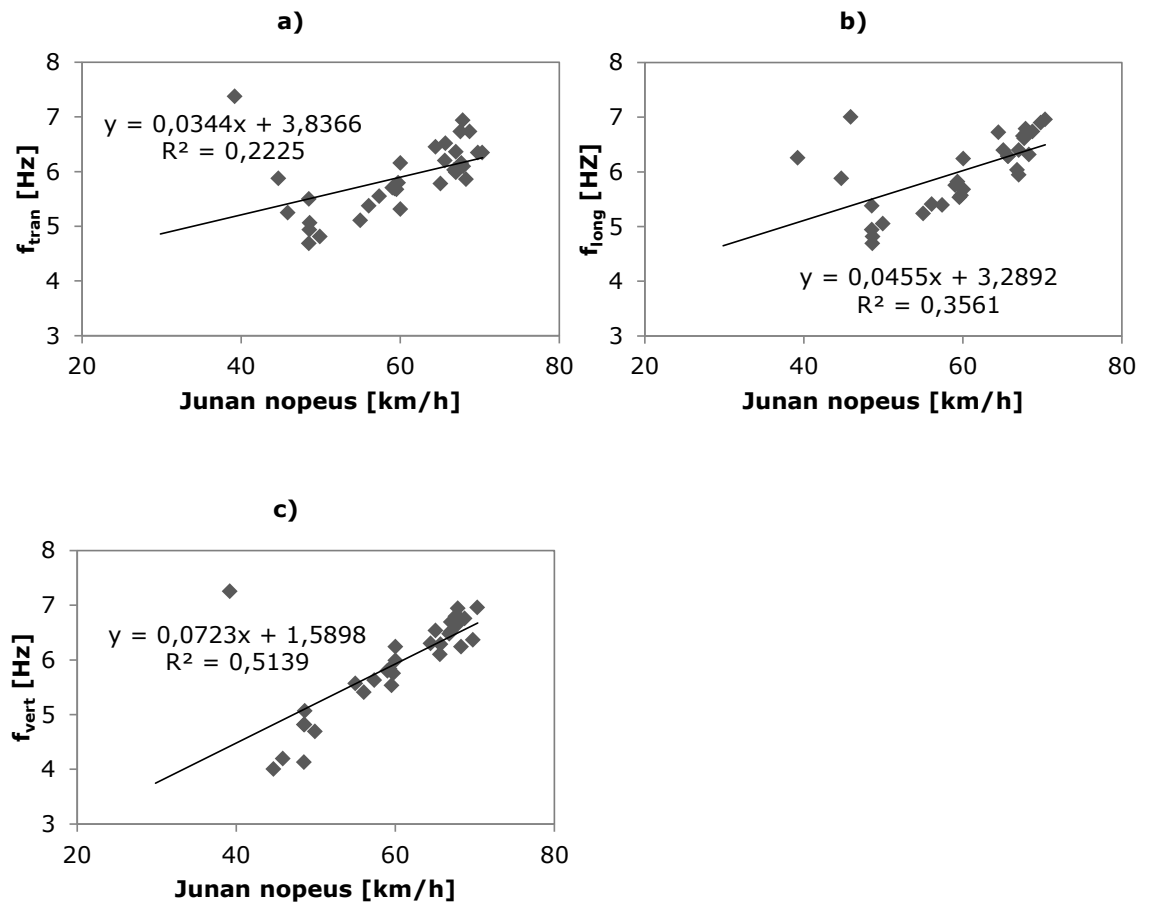
Kuva 2. Heilahdusnopeuden vektorisumman huippuarvot mittauspisteellä MP2. Kuvissa on esitetty a) kaikki nopeudet ja b) ilman nopeuksia 58–60 km/h.



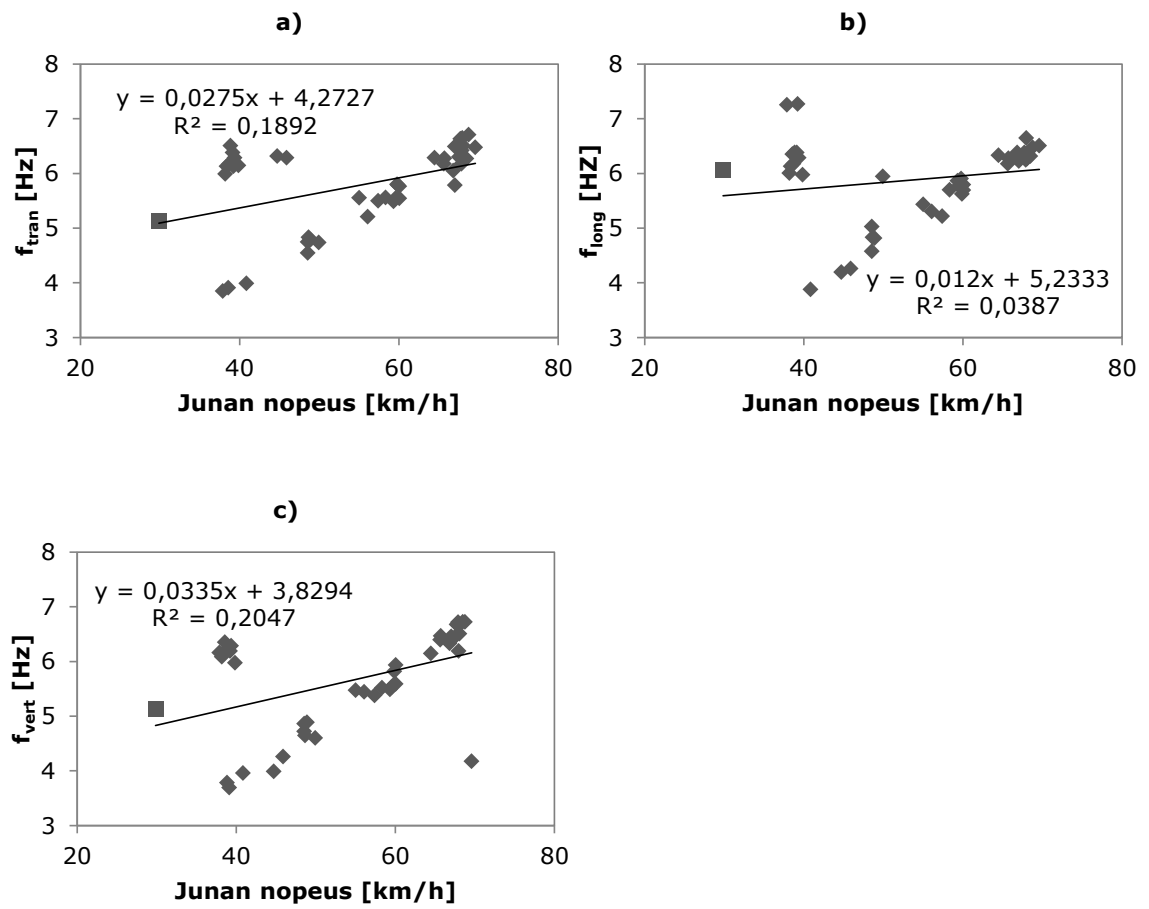
Kuva 3. Heilahdusnopeuden vektorisumman huippuarvot mittauspisteellä MP3. Kuvissa on esitetty a) kaikki nopeudet ja b) ilman nopeuksia 58–60 km/h.



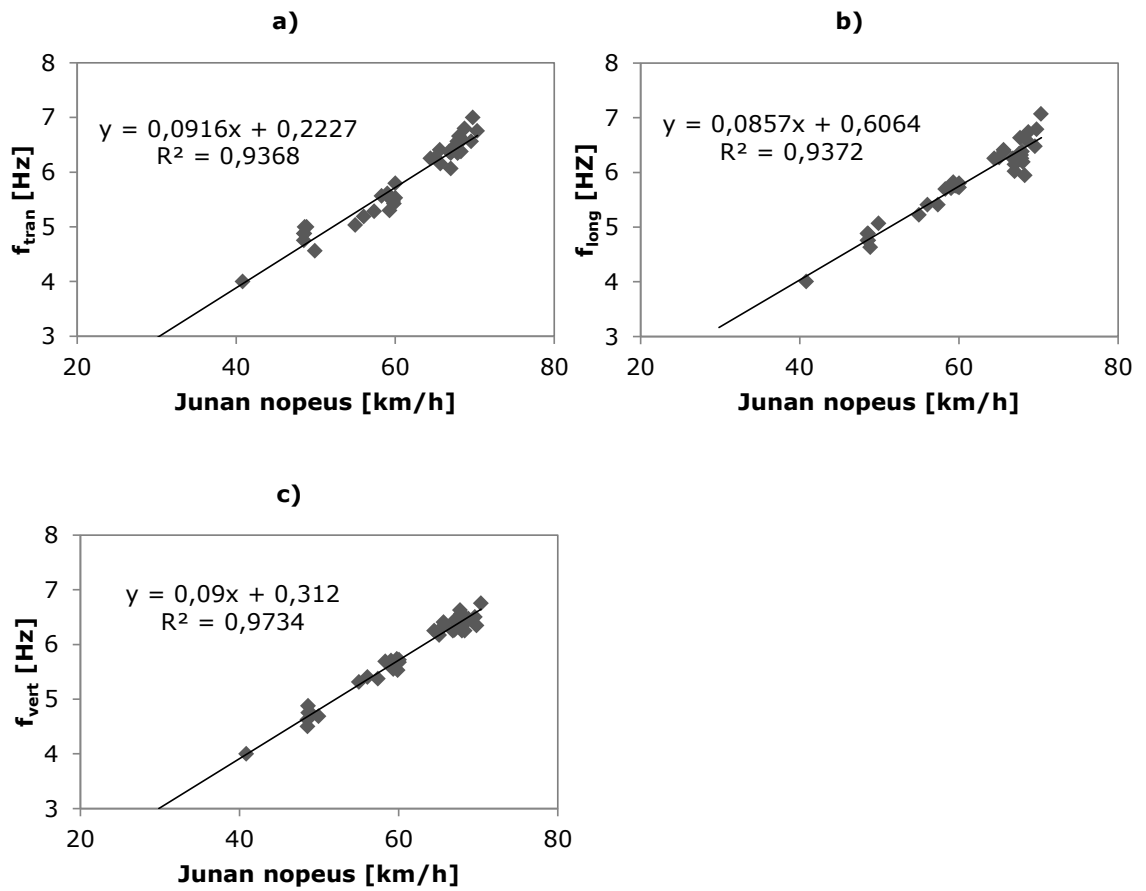
Mittauspisteillä MP1–MP4 mitatut värinän hallitsevat taajuudet mittauspisteittäin.



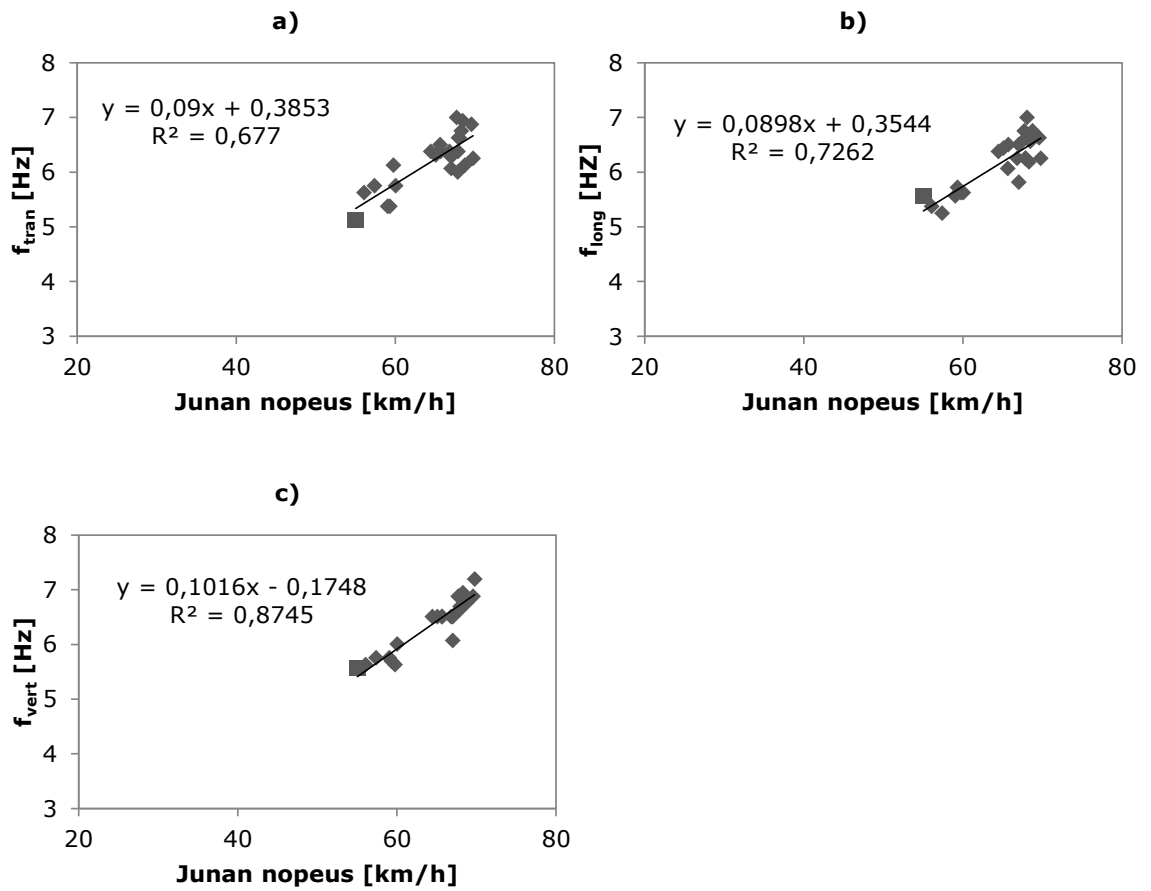
Kuva 1. Mittauspisteellä MP1 mitatut värinän hallitsevat taajuudet a) poikittaiselle värinälle, b) pitkittäiselle värinälle ja c) pystysuuntaiselle värinälle.



Kuva 2. Mittauspisteellä MP2 mitatut värinän hallitsevat taajuudet a) poikittaiselle värinälle, b) pitkittäiselle värinälle ja c) pystysuuntaiselle värinälle.

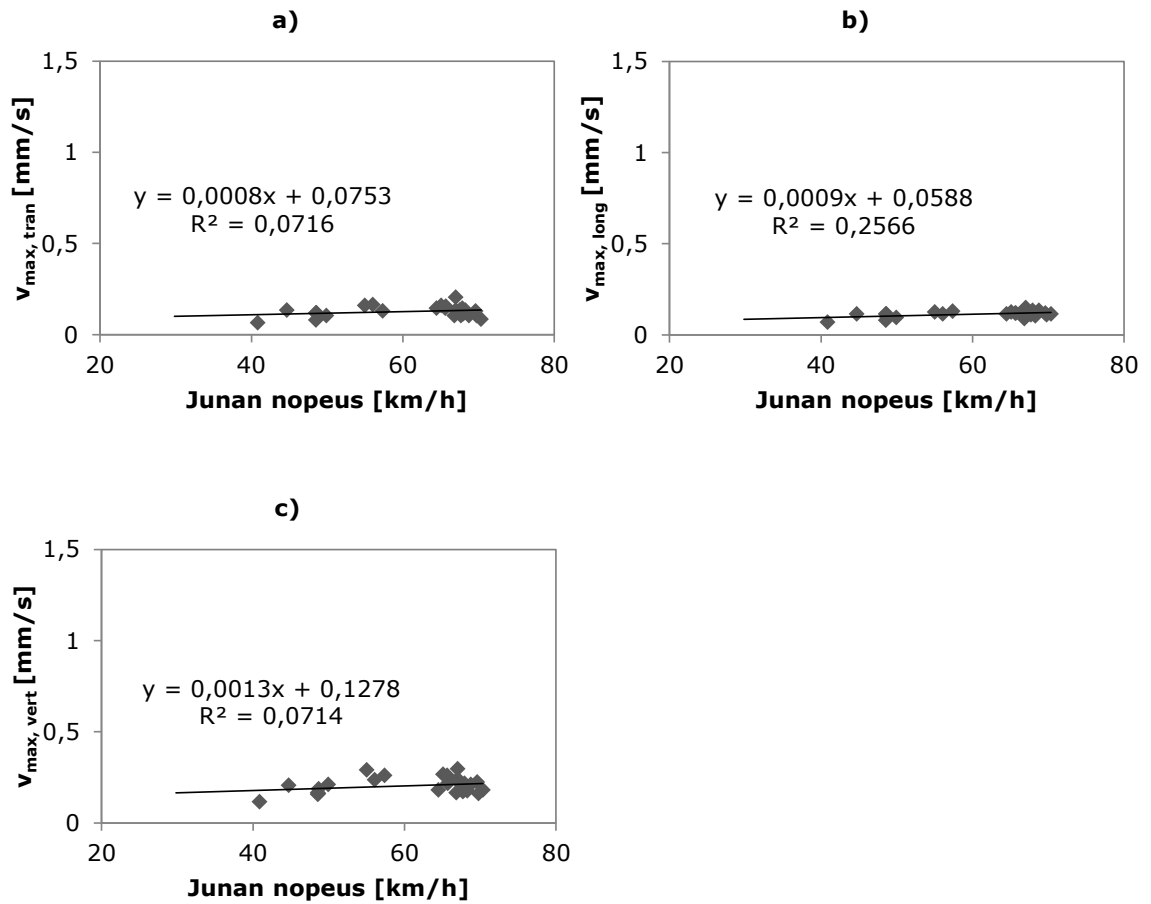


Kuva 3. Mittauspisteellä MP3 mitatut tärinän hallitsevat taajuudet a) poikittaiselle tärinälle, b) pitkittäiselle tärinälle ja c) pystysuuntaiselle tärinälle.

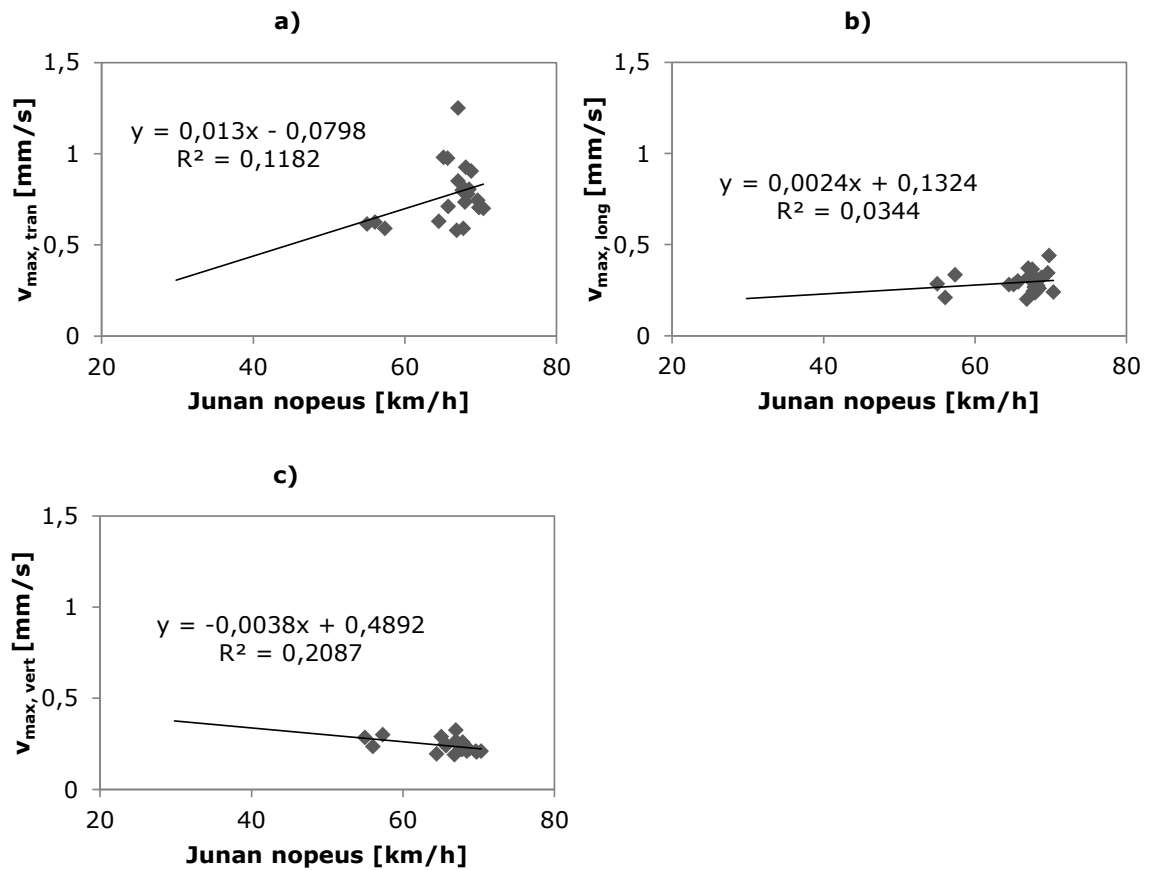


Kuva 4. Mittauspisteellä MP4 mitatut tärinän hallitsevat taajuudet a) poikittaiselle tärinälle, b) pitkittäiselle tärinälle ja c) pystysuuntaiselle tärinälle.

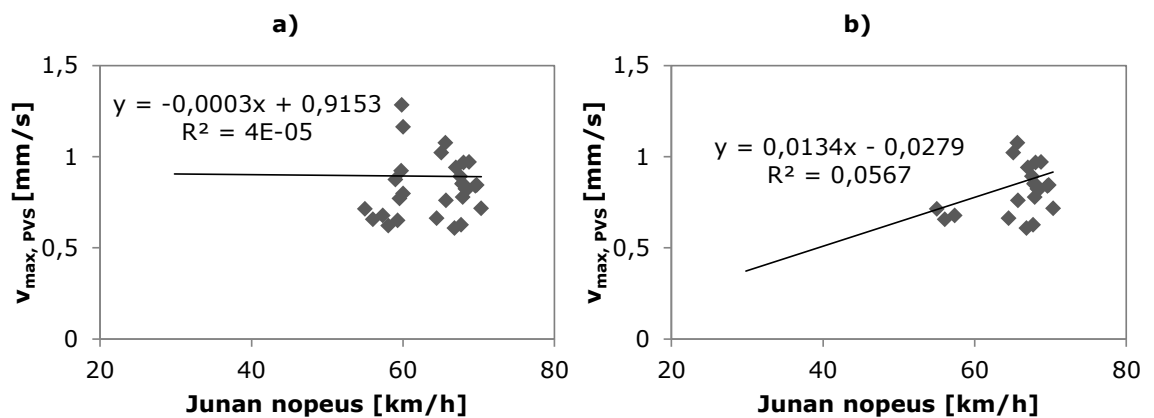
Tuloksia mittauspisteiltä MP5 ja MP6.



Kuva 1. Heilahdusnopeuden huippuarvot a) poikittaiselle tärinälle, b) pitkittäiselle tärinälle ja c) pystysuuntaiselle tärinälle mittauspisteellä MP5 ilman nopeuksia 58–60 km/h.



Kuva 2. Heilahdusnopeuden huippuarvot a) poikittaiselle tärinälle, b) pitkittäiselle tärinälle ja c) pystysuuntaiselle tärinälle mittauspisteellä MP6 ilman nopeuksia 58–60 km/h.



Kuva 3. Heilahdusnopeuden vektorisumman huippuarvot mittauspisteellä MP6. Kuvissa on esitetty a) kaikki nopeudet ja b) ilman nopeuksia 58–60 km/h.