

# Suositus liikennetärinän arvioimiseksi maankäytön suunnittelussa

Jouko Törnqvist & Asko Talja

ISBN 951-38-6602-5 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)  
ISSN 1459-7683 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)

Copyright © VTT 2006

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT, Vuorimiehentie 3, PL 1000, 02044 VTT  
puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 4374

VTT, Bergsmansvägen 3, PB 1000, 02044 VTT  
tel. växel 020 722 111, fax 020 722 4374

VTT Technical Research Centre of Finland, Vuorimiehentie 3, P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland  
phone internat. +358 20 722 111, fax + 358 20 722 4374

VTT, Kemistintie 3, PL 1000, 02044 VTT  
puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 7007

VTT, Kemistvägen 3, PB 1000, 02044 VTT  
tel. växel 020 722 111, fax 020 722 7007

VTT Technical Research Centre of Finland, Kemistintie 3, P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland  
phone internat. +358 20 722 111, fax +358 20 722 7007

Tekijä(t) Törnqvist, Jouko & Talja, Asko		
Nimeke <b>Suositus liikennetärinän arvioimiseksi maankäytön suunnittelussa</b>		
Tiivistelmä Julkaisussa käsitellään liikennetärinän syntymistä ja sen asumisviihtyvyydelle aiheuttamia haittoja, tärinän arviointia laskennallisesti ja mittaamalla sekä annetaan suositukset maankäytön suunnittelua varten. Erityisesti keskitytään tärinän leviämisen arviointiin maaperässä. Julkaisu täydentää VTT Tiedotteessa 2278 (2004) annettua suositusta liikennetärinän mittaamisesta ja luokitukselta.  Maankäytön suunnittelussa tärinän arviointi jaetaan tarkkuutensa perusteella kolmeen eri tasoon. Arviointitaso 1 perustuu kokemuseräiseen suojaetäisyyteen, jota kauempana värähtelytarkastelua ei pidetä tarpeellisena. Arviointitaso 2 perustuu yleensä laskennalliseen arviointiin tai mittauksiin, ja siinä liikenne ja maaperän ominaisuudet otetaan tarkemmin huomioon. Arviointitaso 3 edellyttää aina maaperästä tehtäviä värähtelymittauksia.  Tutkimuksen yhteydessä on tehty kenttämittauksia ja FEM-laskelmia. Lisäksi on kehitetty kokeiluvärsio laskentaohjelmasta TREMOR, jolla voidaan tutkia junan aiheuttaman tärinän leviämistä kerrostuneessa maaperässä. Julkaisun liitteissä esitetään myös käsinlaskentaan soveltuvia arviointitapoja rautatie- ja maantieliikenteelle. Saadun kokemuksen perusteella paras tapa arvioida tärinän leviämistä on mittaaminen, jonka käytöstä julkaisussa annetaan suositukset. Muiden laskentamenetelmien tarkkuus riittää lähinnä tärinän suurusluokan ja eri parametrien suhteellisten vaikutusten arviointiin.		
Avainsanat environmental impacts, traffic, traffic-induced vibration, vibration classification, vibration nuisance, vibration measurements, limit values, residential buildings, design values, instructions		
ISBN 951-38-6602-5 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/publications/index.jsp">http://www.vtt.fi/publications/index.jsp</a> )		
Avainnimeke ja ISSN VTT Working Papers 1459-7683 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/publications/index.jsp">http://www.vtt.fi/publications/index.jsp</a> )		Projektinumero 985-R4SU00056
Julkaisuaika Toukokuu 2006	Kieli Suomi, engl. abstr.	Sivuja 46 s. + liitt. 33 s.
Projektin nimi Liikenneperäisen tärinän huomioiminen maankäytön, liikenteen ja rakennusten suunnittelussa	Toimeksiantaja(t) ympäristöministeriö, liikenne- ja viestintäministeriö, Ratahallintokeskus, Tiehallinto, Helsingin, Espoon, Vantaan ja Turun kaupungit	
Yhteystiedot VTT PL 1000, 02044 VTT Puh. 020 722 111 Faksi 020 722 7007	Julkaisija VTT PL 1000, 02044 VTT Puh. 020 722 4404 Faksi 020 722 4374	

Published by



Series title, number and  
report code of publication

VTT Working Papers 50  
VTT-WORK-50

Author(s) Törnqvist, Jouko & Talja, Asko		
Title <b>Recommendation for evaluation of traffic-induced vibrations in planning of land use</b>		
Abstract The vibration generation and the nuisance of the vibrations for pleasant environment are studied in the publication. Advice and design tools for planners and decision-makers are given. The recommendations cover both the use of calculation and field testing in prediction of the vibrations. The publication complements the recommendations for measurements and classification of vibrations given in VTT Research Notes 2278.  Three design levels with different accuracy are proposed. Level 1 is based on the empirical precaution distances, which determine either the land use is safe or not on the point of vibrations. Level 2 is usually based on design equations or vibration measurements. Then also data of traffic and ground are more detailed taken into consideration. Level 3 requires always the vibration measurements from the ground.  The publication is based on field measurements and FEM calculations. Also simplified estimation procedures for rail and road traffic are shown in the appendices. The results show that the vibration measurements, for which detailed recommendations are given, are the best way for assessment of the vibration propagation. The accuracy of other evaluation methods is adequate only for evaluation the order of vibration magnitude and for estimating the relative influence of different parameters.		
Keywords environmental impacts, traffic, traffic-induced vibration, vibration classification, vibration nuisance, vibration measurements, limit values, residential buildings, design values, instructions		
ISBN 951-38-6602-5 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/publications/index.jsp">http://www.vtt.fi/publications/index.jsp</a> )		
Series title and ISSN VTT Working Papers 1459-7683 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/publications/index.jsp">http://www.vtt.fi/publications/index.jsp</a> )		Project number 985-R4SU00056
Date May 2006	Language Finnish, English abstr.	Pages 46 p. + app. 33 p.
Name of project Liikenneperäisen tärinän huomioiminen maankäytön, liikenteen ja rakennusten suunnittelussa	Commissioned by Ministry of the Environment, Ministry of Transport and Communications, Finnish Rail Administration, Finnish Road Administration, cities of Helsinki, Espoo, Vantaa and Turku	
Contact VTT Technical Research Centre of Finland P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 20 722 111 Fax +358 20 722 7007	Publisher VTT P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 20 722 4404 Fax +358 20 722 4374	

# Alkusanat

Liikenteen aiheuttama tärinä on liikennemelun kaltainen ympäristöhaitta, joka tulee ottaa huomioon suunniteltaessa uusia asuntoja nykyisten liikenneväylien läheisyyteen tai rakennettaessa uusia väyliä vanhoille asuinalueille. Liikennetärinän vaikutukset asuinmukavuuteen tunnetaan huonosti, eikä mahdollisia haittoja siksi yleensä arvioida kaavoituksessa riittävästi.

Ympäristöministeriön asetuksessa pohjarakenteista (Suomen rakentamismääräyskoelman osa B3, 2004) liikenteen vaikutukset on esitetty otettavaksi huomioon. Asetuksessa mainitaan, että ennen rakentamista on tarvittaessa selvitettävä, että liikennetärinä ei aiheuta rakennuksessa oleville ihmisille kohtuutonta häiriötä.

Tämän julkaisun päätarkoitus on esittää suosituksia koskien liikennetärinän vaikutusten arviointia maankäytön suunnittelussa. Tutkimus liittyy ympäristöministeriön *Ympäristöklusterin tutkimusohjelman kolmannen vaiheen 2003–2005: Ekotehokas yhteiskunta* projektiin *Liikenneperäisen tärinän huomioiminen maankäytön, liikenteen ja rakennusten suunnittelussa*. Julkaisu täydentää VTT Tiedotetta 2278 (Talja 2004e), jossa esitetään suositukset liikennetärinän mittaamisesta ja luokituksesta. Tutkimusta ovat rahoittaneet ympäristöministeriö, liikenne- ja viestintäministeriö, Ratahallintokeskus, Tiehallinto sekä Helsingin, Espoon, Vantaan ja Turun kaupungit.

Tutkimushankkeen johtoryhmään ovat kuuluneet seuraavat henkilöt:

Tuomo Viitala	Ratahallintokeskus
Anja Leinonen	ympäristöministeriö
Risto Saari	liikenne- ja viestintäministeriö
Tuula Säämänen	Tiehallinto
Osmo Torvinen	Helsingin kaupunki
Harri Tanska	Espoon kaupunki
Matti Holtari	Vantaan kaupunki
Jaakko Lindholm	Turun kaupunki
Matti Kokkala	VTT

Lisäksi johtoryhmätyöskentelyyn ovat osallistuneet asiantuntijajäseninä seuraavat henkilöt:

Anni Rimpiläinen	ympäristöministeriö
Anders Jansson	Tiehallinto
Risto Jokinen	Espoon kaupunki
Matti Hakulinen	Geomatti Oy (SGY:n nimeämä edustaja)
Esa Patjas	SITO-yhtiöt (SKOL:n nimeämä edustaja)
Osmo Rasimus	Tekes
Mauri Marttila	Kiinteistöliitto
Vesa Valpasvuo	Kuntaliitto
Jouko Törnqvist	VTT

Johtoryhmän puheenjohtajana on toiminut ylitarkastaja Tuomo Viitala Ratahallintokeskuksesta.

Tutkimuksen vastuullisena johtajana on VTT:ssä toiminut tutkimuspäällikkö Matti Kokkala ja projektipäällikkönä erikoistutkija Asko Talja. Mittauksista ja mittaustulosten analysoinnista VTT:ssä ovat vastanneet Asko Talja, Juha Kurkela, Erkki Järvinen, Jukka Mäkinen ja Pekka Ahlgren. Analyytisistä laskentamenetelmistä ja FEM-laskennasta ovat vastanneet Tuomo Kärnä, Auli Lastunen ja Juha Kurkela. Tutkimustulosten saattamisen ohjeiksi ja tämän yhteenvetojulkaisun kirjoittamisen ovat tehneet Asko Talja ja Jouko Törnqvist yhdessä lukuun ottamatta liitteitä A, C ja D, jotka ovat Jouko Törnqvistin laatimia.

Kiitämme projektin johtoryhmän jäseniä, rahoittajia ja kaikkia työn suorittamiseen osallistuneita henkilöitä aktiivisuudesta ja hyvin onnistuneesta yhteistyöstä.

Asko Talja

Jouko Törnqvist

# Sisällysluettelo

Alkusanat .....	5
1. Johdanto .....	8
1.1 Tutkimuksen tausta .....	8
1.2 Taustaselvitykset .....	9
1.3 Lait ja asetukset .....	10
2. Tärinä ympäristöhaittana .....	11
2.1 Tärinän syntyminen ja kokeminen .....	11
2.2 Tärinän suuruuden kuvaaminen .....	12
2.3 Suositukset tärinän raja-arvoiksi .....	15
3. Suositus tärinän arvioimiseksi maankäytön suunnittelussa .....	18
3.1 Arviointitaso 1 .....	18
3.2 Arviointitaso 2 .....	20
3.3 Arviointitaso 3 .....	21
4. Tärinän arviointi mittauksin .....	22
4.1 Suositukset maaperän värähtelyn mittauksen suorittamisesta .....	22
4.2 Suositukset rakennuksen tärinän mittauksen suorittamisesta .....	25
4.3 Koekohteista mitatut maaperän värähtelyt .....	26
4.4 Taajuussisällön vaikutus rakennuksen värähtelyihin .....	31
4.5 Koekohteista mitatut rakennuksen värähtelyt .....	32
5. Tärinän laskennallinen arviointi .....	34
5.1 Käsineläskentämenetelmät .....	34
5.2 Tarkemmat laskentamenetelmät .....	35
5.3 FEM-laskenta .....	37
6. Yhteenveto ja jatkotutkimustarpeet .....	40
6.1 Yhteenveto .....	40
6.2 Jatkotutkimustarpeet .....	41
Lähdeluettelo .....	44
Liitteet	
Liite A: Maaperäominaisuudet ja niiden määrittäminen tärinän kannalta	
Liite B: Yhteenveto koekohteista mitatuista maaperän värähtelyistä	
Liite C: Junaliikenne – Tärinään vaikuttavat tekijät ja laskennallinen arviointi	
Liite D: Tie- ja katuliikenne – Tärinän syntyminen ja laskennallinen arviointi	
Liite E: Esimerkki taajuussisällön vaikutuksesta rakennuksen värähtelyihin	

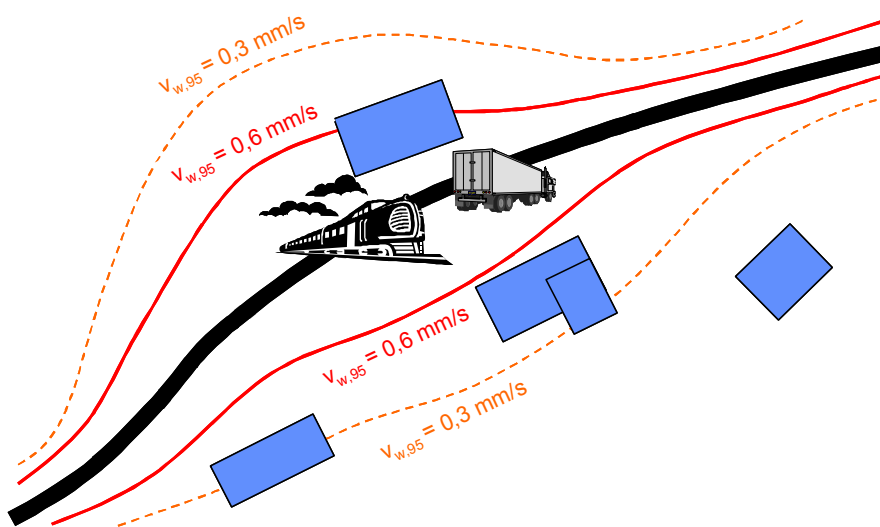
# 1. Johdanto

Tässä julkaisussa tarkastellaan liikennetärinää asuinmukavuuteen liittyvänä ongelmana. Tällöin tärinä tulee mieltää liikennemelun kaltaiseksi haitaksi. Tapauksissa, joissa häiriö häiritsee lepoa, siitä voi olla myös terveydellistä haittaa.

Haitallisiksi voivat muodostua myös liikenteestä rakennukseen kovan maaperän ja kallion kautta siirtyvät runkoäänet, joita tämä tutkimus ei käsittele. Se ei käsittele myöskään rakenteiden vaurioitumista. Rakennuksen vaurioitumista koskevat suositusarvot tärinän raja-arvoiksi ovat yleensä suurempia kuin asuinmukavuudelle esitetyt arvot. Tärinä voi haitata myös herkkien laitteiden toimintaa. Herkkien laitteiden värähtelylle asetettavat raja-arvot ovat yleensä huomattavasti pienempiä kuin asuinmukavuudelle asetut suositusarvot.

## 1.1 Tutkimuksen tausta

Yhdyskuntien toimivuuden edellytyksenä ovat toimivat liikenneväylät. Luonnollisena seurauksena tästä on, että hyvien liikenneyhteyksien varteen sijoittuvia, jo rakentamiskäyttöön otettuja alueita pyritään kehittämään edelleen ja niiden maankäyttöä tehostamaan. Yhdyskuntarakenteen tiivistyminen houkuttelee rakentamaan asuntoja myös sellaisille alueille, esimerkiksi pehmeille savimaille, joilla tärinähaitat korostuvat (kuva 1). Myös raskaan liikenteen määrän ja akselipainojen kasvu lisäävät teiden ja ratojen varsien tärinäongelmia. Samanaikaisesti asukkaiden ja viranomaisten vaatimukset asuinympäristön laadulle ovat lisääntyneet.



Kuva 1. Tärinän leviäminen ympäristöön. Kuvassa esitetään värähtelynopeuden tunnusluku eri etäisyydellä väylästä.



Karkeasti arvioiden Suomessa katu- ja tieliikenteestä johtuva, ympäristöön leviävä tärinä voidaan kokea epämiellyttäväksi noin 1 000 kerrostalossa ja noin 30 000 pientalossa. Näissä rakennuksissa asuu noin 80 000 asukasta. Rataliikenteen osalta määrät voivat tie- ja katuliikenteeseen verrattuna olla jopa kaksinkertaisia. Rakennuksia, joissa tärinä voi saada aikaan rakenteellisiakin vaurioita, on tuhansia.

Tärinä on melun tapaan noussut merkittäväksi kriteeriksi kaavoitus- ja rakentamispäätöksiä tehtäessä. Ongelmana on ollut, että vaikka lainsäädännössä liikennetärinän ympäristöhaitat on edellytetty otettavaksi huomioon, sopivien kriteerien puuttuessa liikennetärinän haitta-arviota ei ole pystytty tekemään.

## 1.2 Taustaselvitykset

Ympäristöministeriön, sektoriviranomaisten ja useiden kuntien ohjaamana VTT julkaisi vuonna 2004 asumisviihtyvyyteen perustuvan suosituksen liikennetärinän mittaamisesta ja luokituksesta (Talja 2004e).

Tässä julkaisussa otetaan huomioon VTT Tiedotteen 2278 julkaisemisen jälkeen saadut uudet tutkimustulokset. Uutena asiana julkaisussa keskitytään liikennetärinän vaikutusten arviointimenetelmiin ja annetaan suosituksia tärinän arvioimiseksi maankäytön suunnittelussa. Lukemisen helpottamiseksi julkaisussa toistetaan myös VTT Tiedotteessa 2278 esitettyjä asioita. Julkaisu perustuu kirjallisuusselvityksiin, tehtyihin kenttämittauksiin, FEM-laskelmiin ja VTT:ssä kehitettyyn laskentaohjelmaan. Näistä osatehtävistä on laadittu seuraavat taustaraportit:

- Liikenneperäisen tärinän leviäminen maaperässä – Tärinän arviointi mittauksin (Talja 2005)
- Liikennetärinän leviäminen – Maaperän värähtelyn määrittäminen FEM-laskennan avulla (Kurkela 2005)
- Laskentaohjelma TREMOR 1.0 raideliikenteen aiheuttaman tärinän arvioimiseksi (Kärnä & Lastunen 2006).

Lisäksi VTT Tiedotteen 2278 perustana ovat seuraavat taustaraportit:

- Kirjallisuusselvitys raja-arvoista ja tärinän mittaamisesta (Talja 2003)
- Liikenneperäinen tärinä – Kirjallisuusselvitys tärinän arvioinnista (Talja 2004c)
- Liikenneperäinen tärinä – Rakennuksen vaikutus värähtelyihin (Talja 2004d)
- Tampereen kohteiden mittaustulokset (Talja 2003f)
- Turun kohteiden mittaustulokset (Talja 2004g)
- Helsingin kohteiden mittaustulokset (Talja 2004b)
- Espoon kohteiden mittaustulokset (Talja 2004a)
- Vantaan kohteiden mittaustulokset (Talja 2004h)
- Urjalan kohteiden mittaustulokset (Talja 2004i).

### 1.3 Lait ja asetukset

Tärinä rinnastetaan ympäristönsuojelussa meluun. Liikennemelun ja -tärinän huomioon ottamisessa lainsäädäntö pyrkii siihen, että riskialueilla sekä rakennusten että liikenneväylien sijoituksessa otetaan etukäteen huomioon niistä mahdollisesti aiheutuvat haitat. Jälkikäteen tärinähaittojen vähentäminen on teknisesti vaikeaa ja kallista.

Maankäyttö- ja rakennuslaki (N:o 132/1999) asettaa alueiden käytön suunnittelulle ja rakentamisen ohjaukselle tavoitteeksi turvallisen, terveellisen ja viihtyisän ympäristön luomisen. Lain nojalla annetussa Maankäyttö- ja rakennusasetuksessa (N:o 895/1999) edellytetään kaavaa laadittaessa selvitettäväksi myös vaikutukset ihmisten elinoloihin ja elinympäristöön. Maantielaki (N:o 503/2005) edellyttää, että maantien suunnittelussa ja rakentamisessa on otettava huomioon ympäristönäkökohdat.

Myös ympäristöministeriön asetuksessa pohjarakenteista (Suomen rakentamismääräyskokoelman osa B3, 2004) liikenteen tärinävaikutukset on esitetty otettavaksi huomioon. Asetuksessa mainitaan, että ennen rakentamista on tarvittaessa selvitettävä, että liikennetärinä ei aiheuta rakennuksessa oleville ihmisille kohtuutonta häiriötä.

Tärinä mainitaan myös ympäristönsuojelulaissa (N:o 86/2000). Lain yleisenä tavoitteena on ehkäistä ihmisen toiminnasta johtuvaa ympäristön pilaantumista. Lain periaatteena on, että toiminnan harjoittajan tulee ehkäistä ennakolta ympäristöhaitat tai rajoittaa ne mahdollisimman vähäisiksi. Laki koskee myös tärinän päästämistä tai jättämistä ympäristöön, jos siitä aiheutuu terveyshaittaa, yleisen viihtyisyyden vähenemistä tai haittaa omaisuudelle.

Laki ympäristövahinkojen korvaamisesta (N:o 737/1994) korostaa kaavoittajien ja vahingon aiheuttamiseen osallistuvien vastuuta. Laki suojaa yksityisten henkilöiden oikeuden saada korvausta myös liikennetärinän aiheuttamasta vahingosta. Korvausvelvollisuus on sillä, jonka aiheuttamasta toiminnasta vahinko johtuu. Lain mukaan ympäristövahinko korvataan, ellei häiriön sietämistä ole pidettävä kohtuullisena, ottaen muun ohella huomioon paikalliset olosuhteet ja häiriön syntymiseen johtanut tilanne kokonaisuudessaan sekä häiriön yleisyys vastaavissa olosuhteissa muutoin.

## 2. Tärinä ympäristöhaittana

### 2.1 Tärinän syntyminen ja kokeminen

Tärinän aiheuttaa ajoväylän epätasaisuus tai väylän pintaan ajoneuvosta aiheutuvat muodonmuutokset. Väylällä kulkevan liikennevälineen, väylän ominaisuuksien ja väylän alla olevan maaperän vuorovaikutuksen vuoksi maaperä joutuu värähtelyyn, jota kutsutaan yleisesti liikennetärinäksi. Rakennuksen kohdalla maaperän värähtely siirtyy edelleen rakennuksen perustukseen. Perustuksen värähtely johtaa edelleen rakennuksen rungon ja lattioiden värähtelyyn. Kuvassa 2 esitetään periaate junaliikenteen aiheuttaman tärinän siirtymisestä herätelähteestä rakennuksessa koettavaksi värähtelyksi.

Liikenteestä aiheutuvan herätteen suuruuteen vaikuttavat mm.

- ajoneuvon ominaisuudet
- väylän ominaisuudet
- ajonopeus.

Tärinän leviämiseen maaperässä vaikuttavat mm.

- maaperän laatu
- etäisyydet
- maaperän kerroksellisuus.

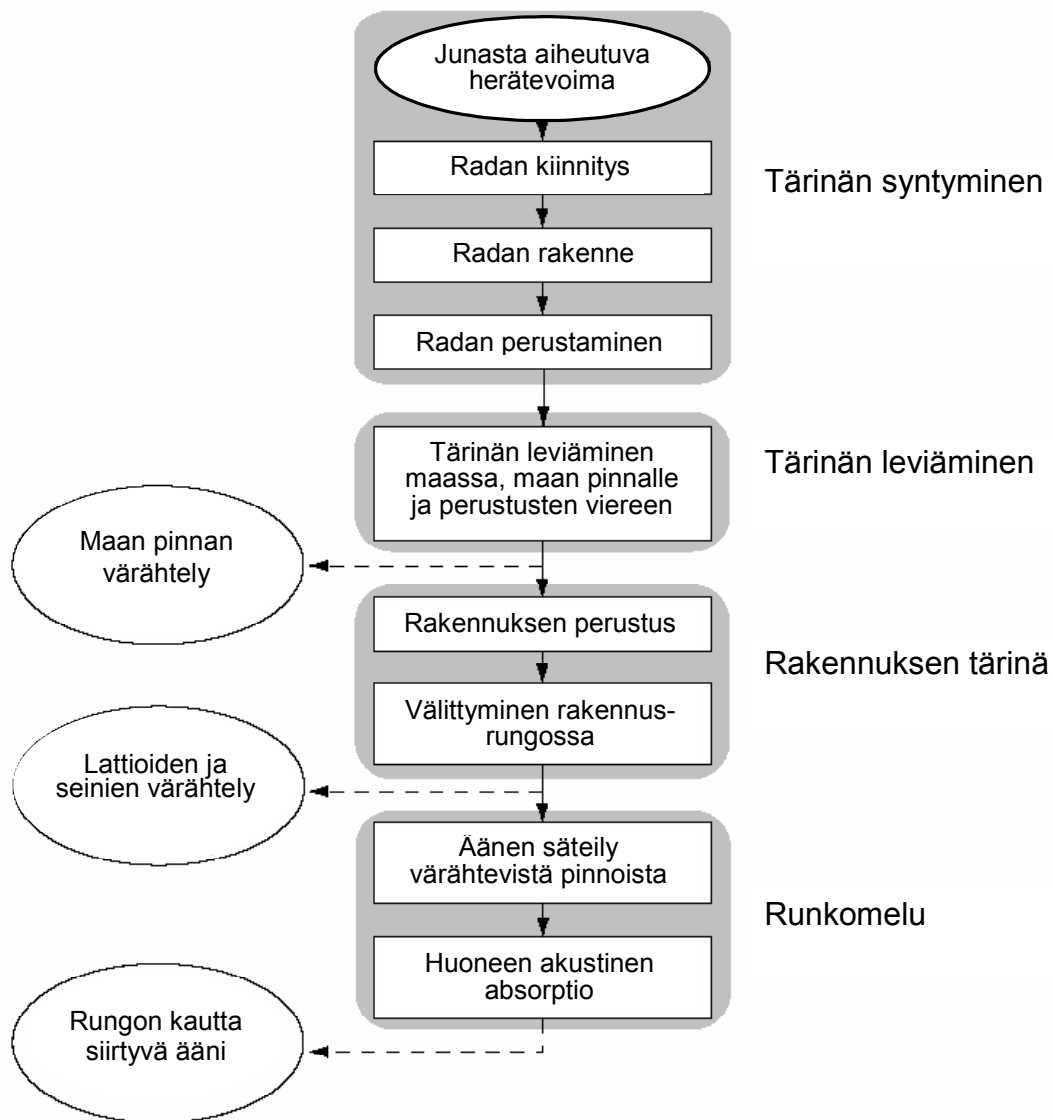
Tärinän siirtymiseen rakennuksessa vaikuttavat mm.

- perustamistapa
- rakennuksen mitat
- rungon resonanssi-ilmiö
- välipohjan ja muiden rakenneosien resonanssi-ilmiö.

Lopulta asukas kokee rakenneosien tärinän yleensä

- häiritsevinä kehon tuntemuksina
- rakennusosista ja esineistä välittyvinä ääninä
- mahdollisena pelkona rakenteiden vaurioitumisesta.

Liikenteestä aiheutuvan tärinän haitallisuus riippuu useista eri parametreista, ja siksi arviointi perustuu suurelta osin kokemusperäiseen tietoon. Tärinän suuruuteen vaikuttavat herätteen suuruus, väylän ominaisuudet, maaperän ominaisuudet ja rakennuksen ominaisuudet. Tärinän syntyminen ja leviämiseen vaikuttavia tekijöitä kuvataan tarkemmin maaperän osalta liitteessä A ja liikenteen osalta liitteissä C ja D.



Kuva 2. Periaatekuva junaliikenteen aiheuttaman tärinän syntymisestä ja siirtymisestä asukkaan havaitsemaksi tärinäksi (FRA 1995). Tämä julkaisu ei käsittele kuvassa esitetyä liikenteestä aiheutuvaa runkomelua.

## 2.2 Tärinän suuruuden kuvaaminen

Kuvassa 3 esitetään tärinän suuruuden kuvaamiseen liittyviä käsitteitä. Kun kyse on asumisviihtyvyydestä, tärinän arvioimisessa käytetään yleensä värähtelyn tehollisarvoa  $v_{\text{rms}}$  (mm/s) (NS 8176E, 1999, ISO 2631-1, 2003, DIN 4150-2, 1999). Tällöin yksittäisestä liikennevälineestä mitatun värähtelysignaalin eritaajuuksiset komponentit tehdään ensin ihmisen herkkyyden suhteen samanarvoisiksi painottamalla ne taajuudesta riippuvalla painotuskertoimella. Tämän jälkeen taajuuspainotetusta värähtelysignaalista määritetään suurin tehollisarvo  $v_w$  (mm/s), jota käytetään mitatusta ajoneuvosta aiheutuvan

tärinän kuvaamiseen. Mittauksen suorittamista ja tulosten analysointia kuvataan tarkemmin VTT Tiedotteessa 2278 (Talja 2004e).

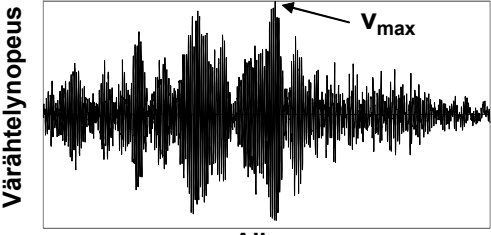
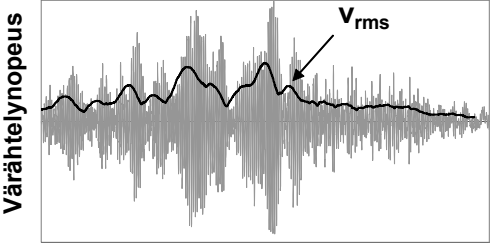
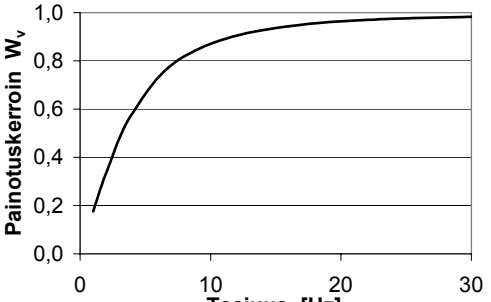
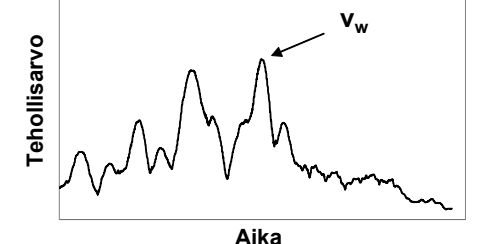
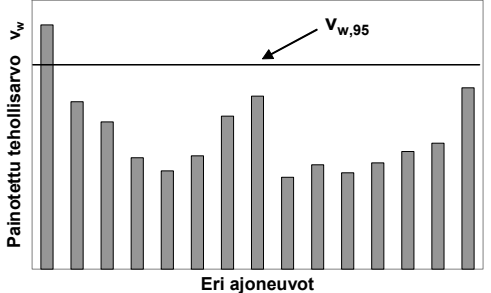
Asuinmukavuutta arvioitaessa eri liikennevälineistä mitatuista värähtelysignaalien tehollisarvoista määritetään värähtelyn tunnusluku  $v_{w,95}$  (mm/s) (kuva 3). Se kuvaa värähtelyn maksimiarvon odotusarvoa, joka määritellään mittaustuloksista 95 %:n todennäköisyyttä vastaavaksi tilastollisesti suurimmaksi arvoksi. Tunnusluvun perusteena ovat yhden viikon aikana mitatut 15 suurinta, suurimmat värähtelyt aiheuttavaa ajoneuvoa. Kustakin niistä määritetään suurin painotettu värähtelyn tehollisarvo  $v_w$ . Lopuksi värähtelyn tunnusluku  $v_{w,95}$  lasketaan 15 yksittäisen tehollisarvon  $v_w$  keskiarvona lisättynä 1,8-kertaisella hajonnalla:

$$v_{w,95} = \overline{v_w} + 1,8 \cdot \sigma . \quad (1)$$

Kun arvioidaan rakennusten, rakenteiden ja laitteiden kestävyyttä tärinälle, vertailuarvona käytetään yleensä värähtelyn huippuarvoa  $v_{\max}$  (mm/s). Värähtelyn tehollisarvoon perustuvan tunnusluvun  $v_{w,95}$  ja värähtelyn huippuarvoon perustuvan tunnusluvun  $v_{\max,95}$  välillä ei ole voimassa yksiselitteistä vuorosuhdetta. VTT Tiedotteen 2278 mukaan likiarvona voidaan liikennetärinälle käyttää kaavan (2) vuorosuhdetta, jolla tunnusluku  $v_{\max,95}$  saadaan hallitsevan värähtelytaajuuden  $f$  funktiona, kun referenssitaajuus  $f_0=3,5$  Hz:

$$v_w \leq 0,55 \cdot v_{\max} \cdot \sqrt{1 + (f_0 / f)^2} . \quad (2)$$

Tätä lauseketta voidaan käyttää likimääräisarviona, kun arvioidaan värähtelyn tunnuslukua  $v_{w,95}$  huippuarvojen avulla määritetyn tunnusluvun  $v_{\max,95}$  perusteella. Yleensä  $v_{w,95} = (0,4 \dots 0,6) \cdot v_{\max,95}$ .

	<p><b>Värähtelyn huippuarvo <math>v_{max}</math> [mm/s]</b></p> <p>Mitatus värähtelysignaalin itseisarvoltaan suurin arvo. Vakioamplitudisella värähtelyllä huippuarvo on sama kuin värähtelyn amplitudi.</p>
	<p><b>Värähtelyn tehollisarvo <math>v_{rms}</math> [mm/s]</b></p> <p>Mitatus värähtelysignaalin <math>v(t)</math> tehollisarvo ajanhetkellä <math>t_0</math> on</p> $v_{rms}(t_0) = \left\{ \frac{1}{\tau} \int_{t_0-\tau}^{t_0} [v(t)]^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}},$ <p>jossa aikaikkunan pituus <math>\tau</math> on 1 sekunti.</p>
	<p><b>Värähtelyn taajuuspainotus <math>W_v(f)</math> [-]</b></p> <p>Mitatus signaalin eri värähtelykomponentit tehdään ihmisen herkkyyden suhteen samanarvoisiksi painottamalla värähtelykomponentteja taajuudesta riippuvalla painotuskertoimella.</p>
	<p><b>Painotettu värähtelyn tehollisarvo <math>v_w</math> [mm/s]</b></p> <p>Taajuuspainotetusta värähtelysignaalista <math>v_w(t)</math> määritetty suurin tehollisarvo.</p>
	<p><b>Värähtelyn tunnusluku <math>v_{w,95}</math> [mm/s]</b></p> <p>Painotetun värähtelyn <math>v_w</math> tilastollinen maksimi. Arvo perustuu yhden viikon ajalta 15 merkittävimmistä ajoneuvosta mitattuun värähtelyyn.</p>

Kuva 3. Tärinän suuruuden kuvaamiseen liittyviä käsitteitä.

## 2.3 Suositukset tärinän raja-arvoiksi

Arvioitaessa liikennetärinästä aiheutuvaa haittaa asuinmukavuudelle kriteerinä käytetään värähtelyn tunnuslukua  $v_{w,95}$  (mm/s). Taulukossa 1 on VTT Tiedotteessa 2278 (Talja 2004e) annettu suositus värähtelyluokituksesta. Se perustuu Norjan standardiin (NS 8176E, 1999) ja VTT Tiedotteessa 2278 esitettyihin mittaustuloksiin. Myös ohjeet (DIN 4150-2, 1999, Banverket 1997, FRA 1998) tukevat esitettyä suositusta.

Luokituskriteerin on toteuduttava pystyvärähtelyn osalta rakennuksen kaikissa lattioissa ja vaakavärähtelyn osalta rakennuksen jokaisessa kerroksessa. Vaakavärähtelyt ovat yleensä suurimmat joko rakennuksen alimmassa tai ylimmässä kerroksessa. Lattioissa esiintyvää suurinta värähtelyä on lattioiden eroista johtuen vaikeampi etukäteen arvioida.

Taulukko 1. Suositus rakennusten värähtelyluokituksesta (NS 8176E, 1999).

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

Värähtelyluokan C mukaan arvioitaviksi alueiksi katsotaan

- olemassa olevien väylien varsien alueet, joiden kaavaa laaditaan tai merkittävästi muutetaan
- alueet, joihin kohdistuvat ympäristövaikutukset muuttuvat uuden väylän vuoksi.

Yksittäinen olemassa olevan väylän varrella tapahtuva täydennysrakentaminen tai väylän vähäiset muutokset arvioidaan luokan D mukaan.

Kun kyse on junista, nykyisillä rata- ja asuinalueilla taulukossa 1 esitetty luokan D raja ylitetään usein. Tällöin tulee tapauskohtaisesti arvioida haitan kohtuullisuus ja mahdollisuudet tärinähaitan pienentämiseksi.

Taulukossa 1 esitetty värähtelyluokitus koskee normaaleja asuinrakennuksia. Mikäli rakennus on tarkoituksellisesti suunniteltu häiriöttömäksi (esim. korkeatasoiset asuinrakennukset, lepokodit, sairaalat), värähtelyluokan tulee olla yhtä värähtelyluokkaa korkeampi. Taulukkoa 1 ei sovelleta rakennuksille, joissa ihmiset ovat pääasiassa liikkeessä tai muut kuin liikenteestä aiheutuvat häiriöt voivat olla merkittävämpiä (esim. toimistot, kaupat, kahvilat, ostoskeskukset, tavaratalot, liikuntatilat).

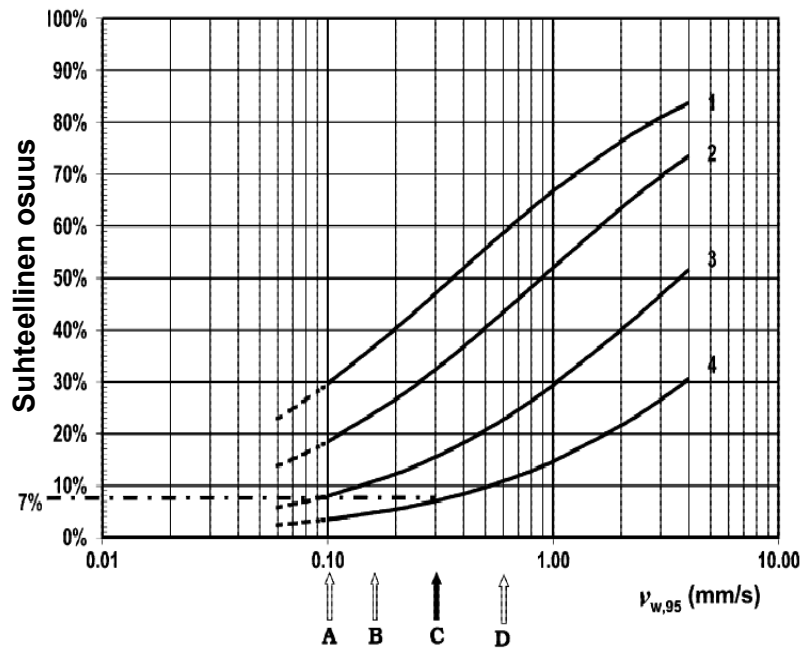
Taulukon 1 tärinäluokitus perustuu asukkaiden haastatteluihin tärinän häiritsevyydestä sekä kohteista saatuun mittauksetietoon. Norjan standardin perusteena on yhteensä yli 1 400 vertailuarvoa. Tutkimuksen (Klæboe et al. 2003) mukaan ihmisen herkkyyden ei ole todettu riippuvan tärinälähteestä (auto, juna, metro, raitiovaunu). Iällä, sukupuolella, sosiaalisella asemalla tai asuinalueella ei myöskään havaittu olevan oleellista merkitystä.

Taulukon 1 luokituksessa on käytetty pohjana liikennemelulle käytettyjä häiritsevyysskriteereitä. Tällöin lähteen (Turunen-Rise et al. 2003) mukaan värähtelyluokassa C 7–8 % asukkaista voi pitää häiriötä erittäin häiritsevänä ja noin 15 %:n voidaan olettaa valittavan häiriöstä (kuva 4). Luokan D ylärajalla 10 % asukkaista pitää tärinää erittäin häiritsevänä ja noin 25 %:n voidaan odottaa valittavan häiriöstä. Luokan B asunnot ovat värähtelyteknisesti suhteellisen hyviä, mutta edelleen muutamat valitukset ovat mahdollisia. Luokan A asunnoissa asukkaat eivät yleensä havaitse liikenteestä aiheutuvaa tärinää.

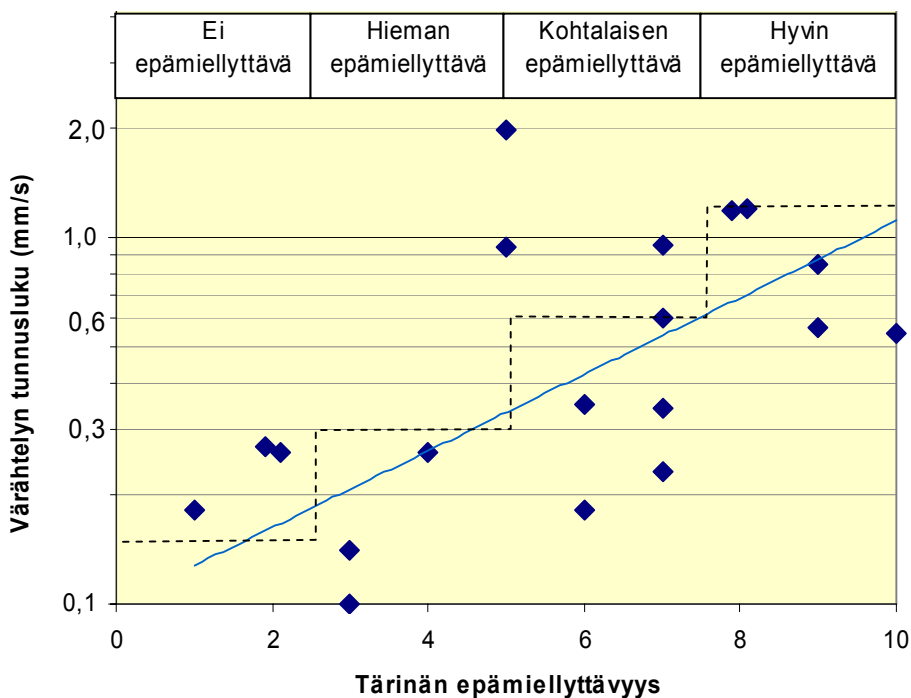
Liikennetärinälle esitetty luokitus on sopusoinnussa niiden suositusten kanssa, jotka on annettu ihmisten liikkeistä (Talja & Toratti 2002) ja pesukoneista (Kolari & Talja 2003) aiheutuvalla tärinällä. Suositus naapureiden liikkeistä aiheutuvalla tärinällä on värähtelyluokka D ja naapurin pesukoneesta aiheutuvilla tärinällä suositusluokka on C. Mikäli värähtelyn aiheuttaja on omassa huoneistossa, suositus on yhtä värähtelyluokkaa alhaisempi. Tarkemmin taulukossa 1 esitetyn suosituksen taustaa ja arvojen vertailua muissa lähteissä esitettyihin suosituksiin esitetään VTT Tiedotteessa 2278 (Talja 2004e).

VTT Tiedotteessa 2278 on yhteenveto asukkaiden kokemuksista Suomessa. Kuvassa 5 esitetyt VTT:n tulokset ovat kohteista, joissa asukkaat ovat havainneet tärinän. Kuva 5 vahvistaa käsityksen, että eri ihmiset kokevat saman tärinän hyvin eri tavoin. Samansuuruisen tärinän häiriöksi kokeminen voi vaihdella viisi yksikköä 10-portaisella asteikolla. Silti VTT:n mittaamasta 16 kohteesta saadut tulokset tukevat taulukossa 1 esitettyä suositusta. Kaikissa niissä kohteissa, joissa värähtelyn tunnusluku oli suurempi kuin 0,6 mm/s, tärinä on koettu kohtalaisen tai hyvin epämiellyttäväksi. Niissä kohteissa, joissa tunnusluku oli alle 0,3 mm/s, tärinä on koettu yleensä vain hieman epämiellyttäväksi.





Kuva 4. Se vastaajien osuus, joka kokee eritasoisen liikenteestä aiheutuvan tärinän häiritsevänä asuintiloissa (Klæboe et al. 2003). Häiritsevyytaset: (1) havaittava tärinä, (2) vähintään vähän häiritsevä tärinä, (3) vähintään kohtalaisesti häiritsevä tärinä ja (4) erittäin häiritsevä tärinä. Kuvaan on merkitty myös taulukossa 1 esitetty värähtelyluokitus.



Kuva 5. Mitatun värähtelyn  $v_{w,95}$  ja asukkaan kokeman tärinän häiritsevyyden riippuvuus VTT:n tutkimustulosten mukaan.

### **3. Suositus tärinän arvioimiseksi maankäytön suunnittelussa**

Tärinän arviointi maankäytön suunnittelussa suositellaan tehtäväksi kolmella eri tasolla. Tarvittava arviointitaso riippuu halutusta tarkkuudesta. Arviointitaso 1 perustuu kokemusperäiseen suojaetäisyyteen, jota kauempana värähtelytarkastelua ei pidetä tarpeellisenä. Arviointitaso 2 perustuu yleensä laskennalliseen arvioon tai mittauksiin, ja siinä liikenne ja maaperän ominaisuudet otetaan tarkemmin huomioon. Arviointitaso 3 edellyttää aina maaperästä tehtäviä värähtelymittauksia.

Arviointitasosta riippuen maaperäominaisuudet ja liikenne on tunnettava eri tarkkuudella. Liitteessä A kuvataan maaperäominaisuuksia ja niiden määrittämistä tärinän kannalta. Liitteissä C ja D kuvataan juna- ja maantieliikenteen osalta tärinään vaikuttavia tekijöitä.

Erilaisia maankäytön suunnitteluun liittyviä kaavoja ovat maakuntakaava (ent. seutukaava), yleiskaava (tai osayleiskaava) ja asemakaava (entiset asema-, rakennus- ja rantakaavat). Kaavoissa tulee ottaa huomioon asuinalueiden sijoitus ja väylien linjauksista aiheutuvat ympäristövaikutukset (melu, tärinä, päästöt jne.). Mikäli liikennetärinästä aiheutuva haitta on eri arviointitasoilla arvioituna mahdollinen, tärinäselvityksen tarpeen ja selvitystilanteen tulee aina näkyä kaavaselostuksessa.

#### **3.1 Arviointitaso 1**

Arviointitason 1 tarkastelulla selvitetään, onko värähtelytarkastelu lainkaan tarpeen. Tarkemman selvitystarpeen arvioinnissa suositellaan käytettäväksi uusilla asuinalueilla taulukossa 2 esitettyjä turvaetäisyyksiä. Arviossa tarvitaan lähtötietona vain arvio liikennetyypistä ja väylän alla esiintyvistä pehmeimmistä maalajityypistä. Liikennetyypin arvioinnissa on pyrittävä arvioimaan myös tulevaisuuden muutostarpeita.

Kauimmaksi liikennetärinän vaikutusalue ulottuu hienorakeisissa, hyvin pehmeissä ja pehmeissä kivennäismaalajeissa (runsaasti vettä sisältävät savet ja siltit) sekä pehmeissä eloperäisissä maalajeissa (turve ja lieju). Pienin liikennetärinän vaikutusalue on kovissa karkearakenteisilla kivennäismaalajeilla (hiekkajämsä ja sora), moreenimaalajeilla (siltimoreeni, hiekkamoreeni ja soramoreeni) sekä kalliolla.

Taulukon 2 etäisyydet perustuvat kirjallisuudesta ja värähtelymittauksista saatuun kokemukseen. Taulukon perusteena on värähtelyluokka C. Turvaetäisyytenä voidaan käyttää puolta taulukossa esitettyistä arvoista, mikäli

- rakennuksen lattiat ovat maanvaraiset
- rakennus on yksikerroksinen ja perustus on rakennettu paaluille tai
- rakennus on vähintään 5-kerroksinen.

Taulukko 2. Arvio etäisyyksistä, joita suuremmilla arvoilla tarkempi värähtelyselvitys ei ole tarpeen.

Suosittelava turvaetäisyys	Liikennetyyppi	Pehmein maalaji väylän alla
500 m	Tavarajunaliikenne (3 500 tn, 90 km/h)	Pehmeä maa
200 m	Pikajunaliikenne (140 km/h)	Pehmeä maa
100 m	Tavara- ja pikajunat	Kova maa
100 m	Raskas maantieliikenne (100 km/h, sileä)	Pehmeä maa
100 m	Hidastetöyssyt, raskas liikenne (40 km/h)	Pehmeä maa
50 m	Raskas katuliikenne (40 km/h, sileä)	Pehmeä maa
15 m <sup>*)</sup>	Raskas maantie- ja katuliikenne (myös töyssyt)	Kova maa

<sup>\*)</sup> Ei koske väyliä, joilla on vain tilapäisesti raskasta liikennettä.

Arviointitasoa 1 suositellaan käytettäväksi maakuntakaavatasolla ja yleiskaavatasolla, kun rakentamista ohjataan yleispiirteisillä aluevarauksilla. Käsittelyssä otetaan huomioon mm.

- rakennusalueiden etäisyys väylään nähden
- rakennusalueiden käyttötarkoitus (esim. teollisuusalue, asuinalue, liikealue).

Pohjasuhteiden arvioinnin perusteena on esimerkiksi maaperäkartta 1:20 000 (<http://geokartta.gtk.fi/>). Mikäli maaperäkarttaa ei ole tarkasteltavalta alueelta käytettävissä, voidaan apuna käyttää topografiakarttaa yhdessä maastokatselmuksen kanssa. Myös väylien rakennuttajilta voi saada tietoa pohjasuhteista väylän alla.

Mikäli pehmein maalaji suunnitellun rakennuksen kohdalla on tiedossa ja se on kovempi kuin pehmein maalaji väylän alla, taulukon 2 mukainen arvio voidaan tehdä rakennuksen kohdalla olevan pehmeimmän maalajin perusteella.

## 3.2 Arviointitaso 2

Mikäli arviointitason 1 perusteella rakennusalue on riskialuetta, arviointia voidaan tarkentaa laskentakaavoihin perustuvalla asiantuntija-arvioinnilla tai tarvittaessa tarkistusluonteisten värinämittausten avulla.

Arvioinnin pääperiaatteena on, että laskentakaavoilla tai mittaamalla selvitetään maanpinnan pystyvärtelyyn tunnusluku  $v_{w,95}$ . Asuintiloissa esiintyvä värähtely arvioidaan kertomalla maaperän pystyvärtely rakennuksen tyypistä riippuvalla kertoimella. Kerroin on 2,0 lukuun ottamatta seuraavia tapauksia, joille kerroin on 1,0:

- Rakennuksen lattiat ovat maanvaraiset.
- Rakennus on yksikerroksinen ja perustettu paaluille.
- Rakennus on vähintään 5-kerroksinen.

Asuintiloissa arvioitua värähtelyä verrataan taulukossa 1 esitettyyn raja-arvoon 0,3 mm/s (värähtelyluokka C). Arviointitason 2 tarkastelussa otetaan huomioon myös liikenteen paino, nopeus, väylän ominaisuudet ja maaperäolosuhteet suunniteltujen rakennusten ja väylän läheisyydessä.

Tällä hetkellä käsinlaskentamenetelmiä on käytetty mm. junaliikenteen aiheuttamalle värinälle ja hidastetöyssyjen aiheuttamalle värinälle. Menetelmiä on esitelty tarkemmin myöhemmin kohdassa 5.1. Menetelmät on laadittu homogeeniselle maaperälle, joten niillä laskettavien tulosten luotettavuus suositellaan tarkistettavaksi alueelta pistokokein tehtävin mittauksin.

Arviointitason 2 tarkastelun apuna voidaan käyttää kyselytutkimusta. Kyselytutkimuksella selvitetään eri etäisyydellä sijaitsevilla taloissa asuvien ihmisten mielipiteet värinän ilmenemisestä ja häiritsevyydestä. Kyselytutkimus voidaan suorittaa esimerkiksi käyttäen VTT Tiedotteen 2278 (Talja 2004e) liitteessä D esitettyä lomaketta.

Arviointitasoa 2 suositellaan käytettäväksi, kun yleiskaavassa tai asemakaavassa rakentamista ohjataan yksityiskohtaisesti määrätyllä alueella ja arviointitason 1 perusteella alue on riskialuetta. Käsittelyssä otetaan huomioon mm.

- maaperäolosuhteet suunniteltujen rakennusten ja väylän läheisyydessä
- rakennusten sijainti väylään nähden
- rakennusten sijoittelu käyttötarkoituksen ja värinähaitan merkittävyyden suhteen (esim. teollisuusrakennus, toimistorakennus, asuintalo, erityistä häiriöttömyyttä vaativa rakennus)
- rakennusten koko ja kerrosmäärä
- väylän perustamistapa (myös paalutus).

Arviointitasoa 2 suositellaan käytettäväksi myös liikenneväylien ympäristövaikutusten arvioinnin yhteydessä. Ratapihat, terminaali-alueet yms. tulee tarkastella erikseen.

Pohjasuhteiden arvioinnin perusteena tulisi olla alueellisen rakennettavuusselvityksen pohjasuhdetiedot. Pohjasuhdetiedot tulisi olla selvitetty suunniteltujen rakennusten ja väylän läheisyydessä 20–50 metrin pistetiheydellä kairauksilla, maalajimääryyksillä ja pohjaveden korkeushavainnoilla.

### **3.3 Arviointitaso 3**

Arviointitaso 3 perustuu maaperän tärinämittauksiin. Arviointitason 3 käyttöä tarvitaan, mikäli arviointitason 2 laskennallisella tarkastelulla ei saada riittävän luotettavaa kuvaa maaperän pystyvärähtelyn suuruudesta, tai halutaan rakentaa alueelle, jolla arviointitason 2 mukaan tärinä voi ylittää suositusarvon. Arviointitason 2 menettelyihin sisältyy useimmissa olosuhteissa edelleen niin suuria epävarmuuksia, että tärinämittauksin varmistettu arviointi on useissa tapauksissa kaavataloudellisesti perusteltua. Maaperän värähtelyjen mittaamista koskevat suositukset annetaan kohdassa 4.1.

Arviointitasoa 3 suositellaan käytettäväksi arviointitason 2 rinnalla, kun yleiskaavassa tai asemakaavassa ohjataan rakentamista yksityiskohtaisesti tarkasti määrätyllä alueella. Kun arvioinnissa käytetään mittauksia, arviointitasolla 2 tarvittava alueen maaperäominaisuuksien tarkka selvittäminen ei ole välttämätön, jos mittaukset tehdään suunniteltujen rakennusten kohdalta. Jos alueen pohjasuhteet ovat tiedossa arviointitason 2 tarkkuudella ja pohjasuhteet vaihtelevat, mittausten määrää voidaan vähentää tekemällä mittaukset epäedullisimpien pohjasuhteiden alueelta.

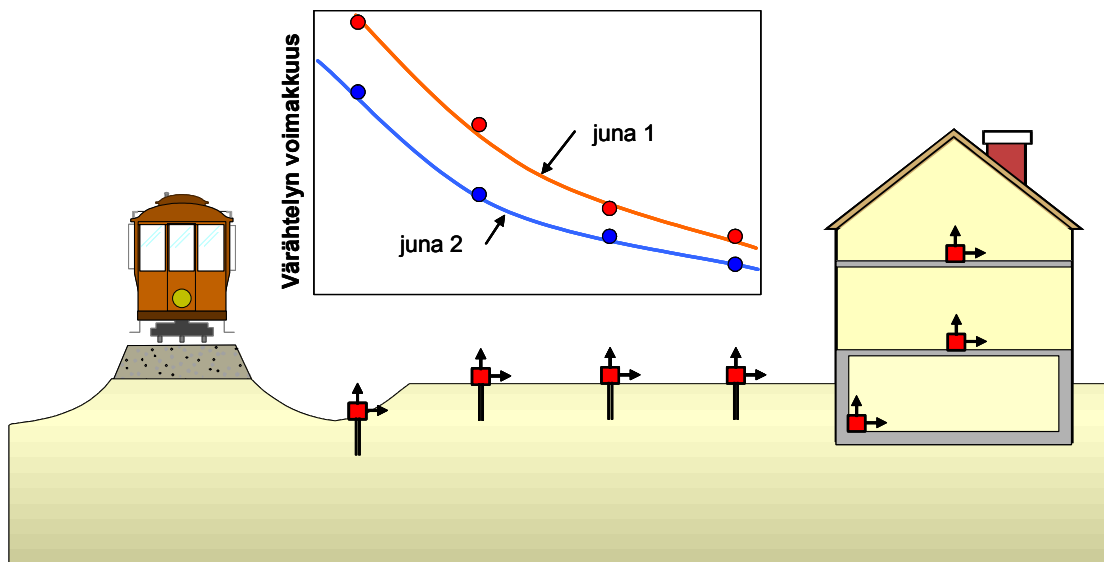
Värähtelyn taajuussisältö tulee mitata, mikäli tärinän vaikutusta halutaan pienentää rakenneteknisin ratkaisuin. Todellisuudessa näennäisesti samanlaisissakin rakennuksissa maapohjan värähtelyn siirtyessä rakennukseen tärinä voi yhtä todennäköisesti pienentyä puoleen kuin kasvaa kaksinkertaiseksi, sillä värähtelyn suuruuteen vaikuttavat voimakkaasti rakennuksen dynaamiset ominaisuudet. Värähtelyn taajuussisällön merkitystä kuvataan tarkemmin kohdassa 4.4 ja liitteessä E.

Varmin arvio rakennuksen värähtelystä saadaan, kun tärinä mitataan suoraan edustavasta vertailukohteesta (ks. 4.1, luettelon kohta 8). Tällaisesta mittauksesta voi olla hyötyä esimerkiksi arvioitaessa täydennysrakentamisen mahdollisuutta tai tärinän vaimentamisratkaisujen toimivuutta.

## 4. Tärinän arviointi mittauksin

Mittaukset ovat luotettavin tapa arvioida tärinän siirtymistä. Tällöin kaikki tärinän siirtymiseen vaikuttavat tekijät tulevat otetuksi huomioon. Jos selvitetään tärinän vaimenemista, värähtelyt mitataan yleensä väylään nähden kohtisuoraan olevilta linjoilta ja usealta eri etäisyydeltä. Jos alueella on olemassa rakennuksia, voidaan mitata myös niiden värähtelyt (kuva 6).

Maaperästä mitatut pystysuuntaiset värähtelyt ovat perusteena suunnitteilla olevan asuinalueen rakennusten värähtelyiden arvioinnissa. Rakennuksesta mitatut värähtelyt ovat perusteena rakennuksen värähtelyluokitukselle (taulukko 1).



Kuva 6. Periaatekuva maaperän ja rakennuksen värähtelyn mittaamisesta.

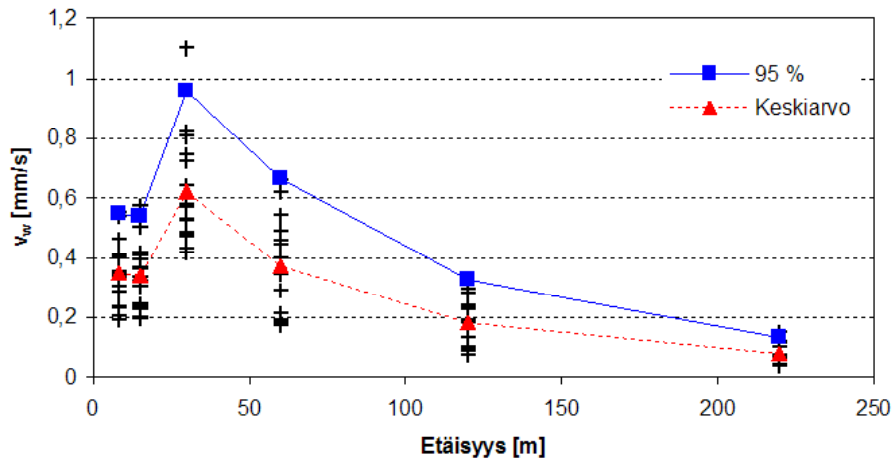
### 4.1 Suositukset maaperän värähtelyn mittauksen suorittamisesta

Maaperästä tehtävien värähtelymittausten ja mittaustulosten raportoinnin yhdenmukais-  
tamiseksi esitetään seuraavat suositukset:

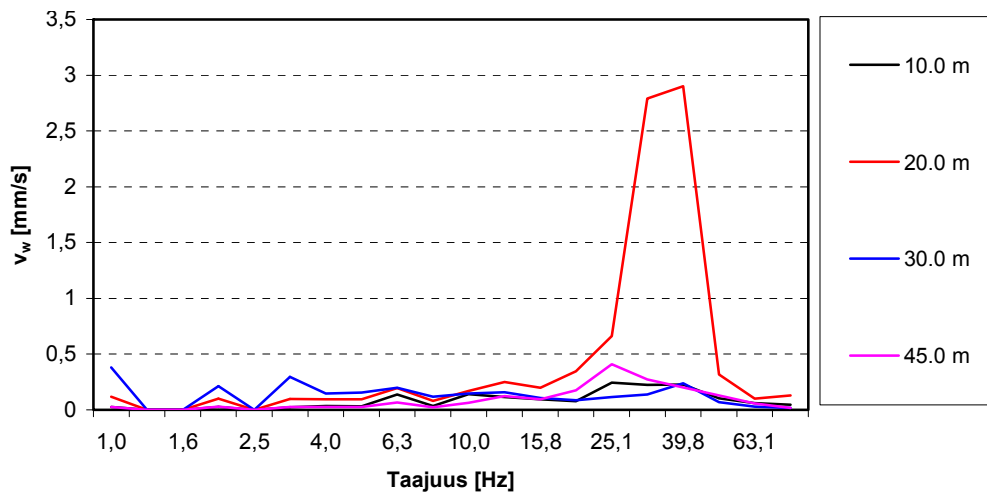
- 1) Värähtely ilmoitetaan värähtelyn tunnusluvun  $v_{w,95}$  (mm/s) avulla. Tulokset analysoidaan VTT Tiedotteen 2278 (Talja 2004e) mukaisesti. Tunnusluku perustuu viikon tarkastelujaksoon ja sen aikana viiteentoista suurimmat värähtelyt aiheuttavaan liikennevälineeseen (kuva 7). Tarkastelujakso tulee määrittää siten, että se sisältää myös viikkoa harvemmin toistuvan säännöllisen kuljetuksen, mikäli kuljetus voidaan perustellusti olettaa erityisen häiritseväksi. Mittaukset tulee pääsääntöisesti

tehdä sulan maan aikaan, sillä pienelläkin routakerroksella voi olla vaikutusta tuloksiin.

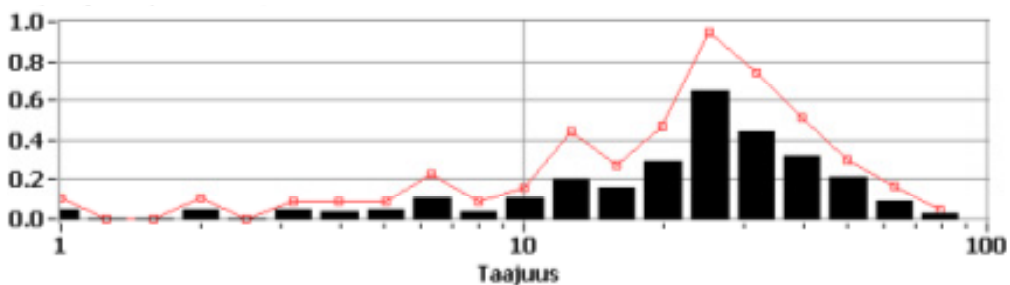
- 2) Tunnusluku  $v_{w,95}$  määritetään väylän suunnassa, väylään nähden kohtisuorassa suunnassa ja pystysuunnassa. Vaikka vaakavärähtelyjen on havaittu olevan useissa tapauksissa pystyvärähtelyä suurempia, asuintilojen värähtelyjen arvioinnissa suositellaan toistaiseksi käytettäväksi pystyvärähtelyä VTT Tiedotteen 2278 mukaisesti. Menettelytavan valintaa perustellaan kohdassa 4.3.
- 3) Tunnusluvun määrittämisessä käytetyistä näytteistä esitetään kustakin erikseen painotettujen värähtelykomponenttien suuruus 1/3-oktaaveittain. Tuloksena esitetään kaikista 15 näytteestä määritetty taajuuskomponenttien keskiarvo sekä todellisena (kuva 8) että koko näytteen tehollisarvoon  $v_w$  suhteutettuna (kuva 9).
- 4) Värähtelyn nopeuden huippuarvon ja taajuussisällön esittämistä myös taajuuspainotamattomana suositellaan, jos halutaan arvioida värähtelyn vaikutusta rakennusten vaurioitumiseen. Vaihtoehtoisesti värähtelyn nopeuden huippuarvo  $v_{max,95}$  voidaan arvioida värähtelyn tunnusluvusta  $v_{w,95}$  lausekkeen 2 avulla.
- 5) Mittausraporteissa tulee maaperäolosuhteet (myös routatilanne) ja väylän tyyppi raportoida niin hyvin, että tulokset ovat hyödynnettävissä muiden vastaavien kohteiden arvioinnissa. Kohdetiedot mitatuista rakennuksista ja asukkaan kokema häiriö tulee raportoida VTT Tiedotteen 2278 liitteiden B ja D mukaisesti.
- 6) Mittausraportissa tulee esittää niiden liikennevälineiden yksityiskohtaiset tiedot, joiden perusteella värähtelyn tunnusluku on määritetty (esim. ajankohta ja värähtelyn suuruus referenssipisteessä; junaliikenteessä lisäksi junan numero, junan kokonaispaino, junan pituus, veturin tyyppi, suurimman vaunun paino, junan nopeus, kulkusuunta).
- 7) Jos tarkastelujakson aikana kulkee erilaista kalustoa, mittaustulokset suositellaan analysoitavaksi myös kalustotyypeittäin eriteltyinä (esim. erittäin häiritsevät junat, muut tavarajunat, pikajunat, IC-junat ja Pendolinot).
- 8) Kun arvioidaan uuden väylän vaikutusta maaperän värähtelyä, suositetaan käyttämään referenssinä mahdollisimman identtiseltä alueelta mitattua värähtelyä. Tällöin ympäröivän maaperän (mm. lujuus ja jäykkyys, paksuus, kerroksellisuus, pohjaveden korkeus), liikenteen ja väylän tyyppin ja perustamisen tulisi olla mahdollisimman identtisiä. Jos mahdollista, värähtelyt tulee mitata myös rakennuksesta.



Kuva 7. Viidentoista junan aiheuttama pystyvärähtely eri etäisyyksillä, keskiarvo ja värähtelyn tunnusluku (95 %).



Kuva 8. Värähtelyn taajuuskomponenttien keskiarvo 1/3-oktaaveittain etäisyyksillä 10, 20, 30 ja 40 m. Keskiarvo on laskettu tunnusluvun määrittämisessä käytetyistä viidestätoista junasta.



Kuva 9. Eri värähtelykomponenttien suuruus suhteessa tehollisarvoon  $v_w$ . Värähtelyn tunnusluvun määrittämisessä käytetyistä viidestätoista junasta määritetty suhteen keskiarvo ja maksimi.

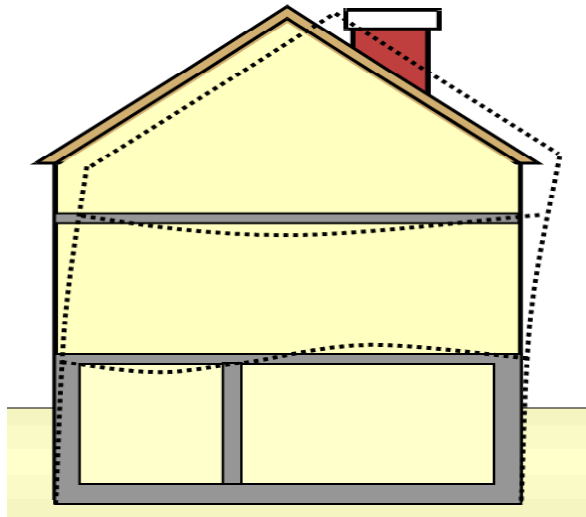


## 4.2 Suositukset rakennuksen värinän mittauksen suorittamisesta

Asuintilojen värähtelytarkastelussa otetaan huomioon värähtelyn kaikki kolme pääsuuntaa. Värähtelytarkastelun tavoitteena on selvittää suurin asukkaan kokema värinä. Rakennuksen värähtelyluokan (taulukko 1) määrää suurin rakennuksesta määritetty värähtelyn tunnusluku.

Mittausantureiden sijoittamista varten pyritään etukäteen arvioimaan rakennuksen ne kohdat, joissa värähtelyt ovat suurimmat. Rakennuksen vaakavärähtely on yleensä suurinta joko rakennuksen alimmassa tai ylimmässä kerroksessa. Lattian värähtelyyn vaikuttavat lattian värähtelyominaisuudet ja maaperän värähtelyn taajuussisältö. Jos rakennuksen kaikki lattiat ovat samantyyppiset, värähtelyt ovat useimmiten suurimmat sen lattian keskellä, jonka jänneväli on suurin. Jos rakennuksen lattiarakenteet ovat massaltaan ja jäykkyydeltään erilaisia, värähtelyn suuruus tulee selvittää useammasta huoneesta. Mittauspisteiden valinnassa otetaan huomioon myös asukkaiden tekemät havainnot.

Yksikerroksissa ja yli 5-kerroksisissa rakennuksissa pystysuuntainen värähtely jonkin lattian keskellä on yleensä määräävä, mutta 2–5-kerroksisissa rakennuksissa suurimmat värähtelyt esiintyvät usein rakennuksen vaakasuunnassa (kuva 10).



*Kuva 10. Maaperän värinän aiheuttamat rakennuksen värähtelymuodot.*

Lattioista tehtyjen mittaustulosten analysoinnin yhteydessä tulee varmistaa esimerkiksi mittauksen aikaisen kuva-aineiston tai eri pisteistä mitattujen samanaikaisten signaalien vertailulla, että värähtely on liikenteestä aiheutuva.

Rakennuksesta tehtävien värähtelymittausten ja mittaustulosten raportointi suositellaan tehtäväksi kohdan 4.1 mukaan lukuun ottamatta luettelon kohtia 2, 7 ja 8, jotka koskevat vain maaperän värähtelyjen mittaamista.

Huoneistosta mitattujen värähtelyjen lisäksi mitataan mahdollisuuksien mukaan myös perustuksen ja maaperän värähtely kaikissa kolmessa pääsuunnassa. Maaperän mittauspisteen tulisi sijaita samalla etäisyydellä väylästä kuin rakennuksen ulkoseinä, mutta vähintään 6 metrin etäisyydellä rakennuksen perustuksesta, jotta rakennuksen vaikutus värähtelyihin ei olisi merkittävä. Perustuksesta mitattuja värähtelyjä käytetään usein, kun arvioidaan värähtelyjen merkitystä rakennuksen vaurioitumiseen. Maaperän ja rakennuksen eri kohtien värähtelyitä vertaamalla saadaan hyödyllistä tietoa myös rakenteiden vaikutuksesta asuintilojen tärinään.

### **4.3 Koekohteista mitatut maaperän värähtelyt**

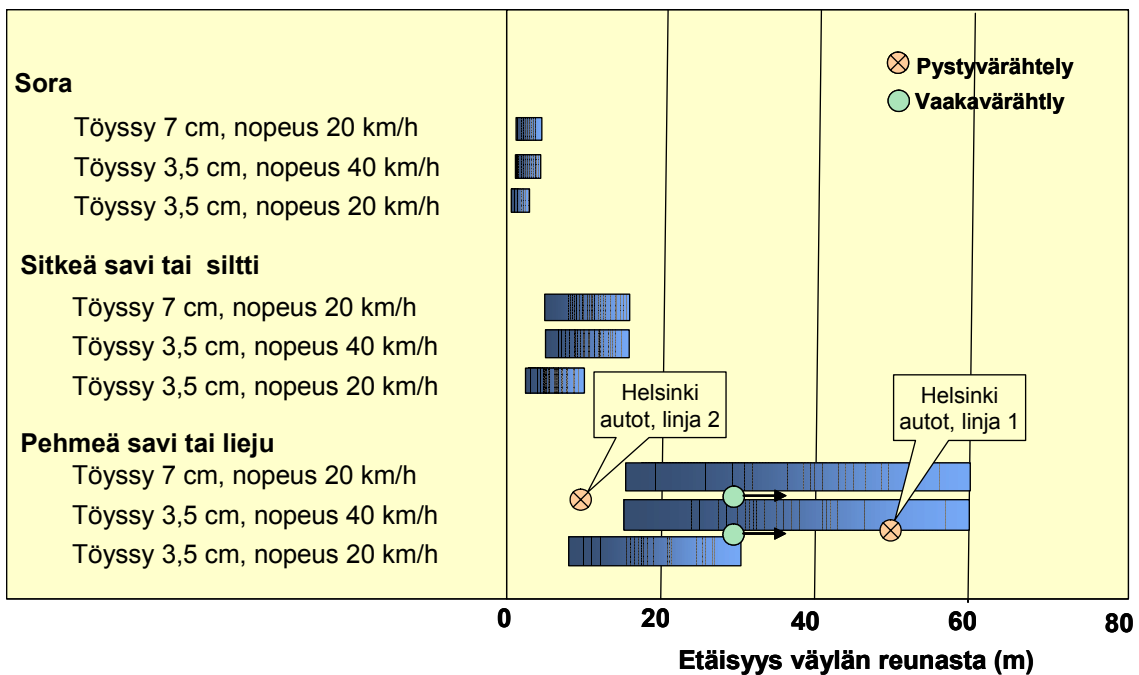
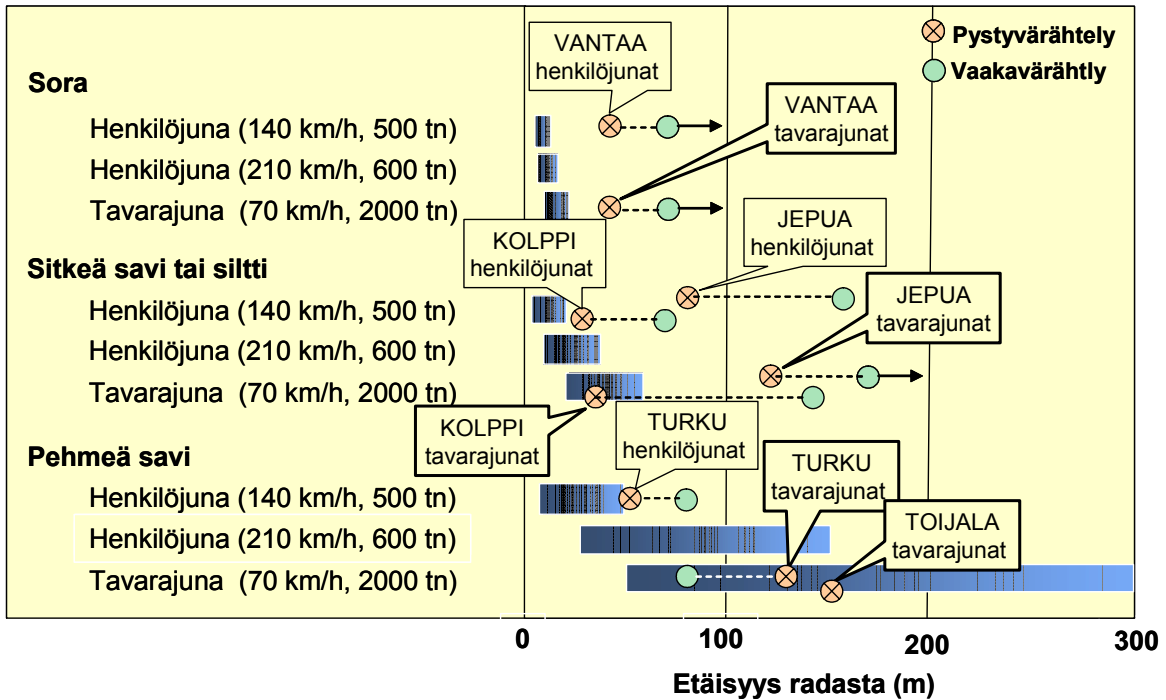
Kohdassa 4.1 suositettua mittaussuunnitelmaa VTT on käyttänyt mm. tärinämittauksissa Turussa, Vantaalla, Helsingissä, Jepualla (Uusikaarlepyy) ja Kolpissa (Uusikaarlepyy). Lisäksi tiedossa on myös Toijalan kohde (Promethor 2005), jossa mittaus vastaa pääpiirteiltään esitettyä suositusta. Helsingin mittaukset koskevat autoliikennettä, muut mittaukset koskevat junaliikennettä. Taulukossa 3 esitetään mitattujen alueiden pohjasuhteet. Mittauskohteita käsitellään tarkemmin liitteessä B esitetyissä kohdekohtaisissa yhteenvedoissa ja lähteessä (Talja 2005).

Kuvassa 11 mittauksista saadut tulokset on koottu VTT Tiedotteessa 2278 esitettyihin kuviin, joiden tarkoituksena on ollut esittää suuntaa antavaa arvio siitä, milloin liikenteestä aiheutuva tärinä voi olla haitallinen vanhoilla asuinalueilla. Kuvan perusteena on maaperän pystyvärähtelyn tunnusluku  $v_{w,95} = 0,3$  mm/s (värähtelyluokka C). Tällöin asuintiloissa värähtely on 0,6 mm/s, jos värähtelyn oletetaan vahvistuvan rakennuksessa kaksinkertaiseksi resonanssi-ilmiön vuoksi. Tunnuslukua 0,6 mm/s suositellaan sovellettavaksi vanhoilla asuinalueilla. Uusien alueiden suunnittelussa suositellaan VTT Tiedotteessa 2278 käytettäväksi asuintiloissa tunnuslukua 0,3 mm/s, jolloin kuvassa esitetyt etäisyydet olisivat vähintään kaksinkertaiset.

*Taulukko 3. Mitattujen alueiden pohjasuhteet.*

Mittauskohde	Maalajikerrokset mittausalueella
Turku	Savikerroksen paksuus on 15–25 m sekä rautatien alla että mitatulla linjalla.
Toijala	Savimaa, paksuus ei tiedossa.
Jepua	Rautatien alla kova maaperä on 4–6 metrin syvyydellä. Sen päällä silttiä, välissä 1,5–2,5 metrin pehmeä savikerros, joka alkaa syvyydeltä 1–1,5 m. Mittauslinjalla kerrosten paksuus ei tiedossa.
Kolppi	Rautatien alla kova maaperä on 2–5 metrin syvyydellä. Sen päällä silttiä, joka pehmenee syvyydellä 1,5–2,0 m. Mittauslinjalla kerrosten paksuus ei tiedossa.
Vantaa	Hiekkakerroksen paksuus on 10–13 m sekä rautatien alla että mitatulla linjalla.
Helsinki	Kadun alla savikerroksen paksuus on 2–4 m. Toisella linjalla saven paksuus 3–4 m ja toisella noin 2 m.

Kuvan 11 tulokset osoittavat, että maaperän pystyvärähtelyn leviäminen voi erota merkittävästi näennäisesti samanlaisilla alueilla. Tästä ovat hyvinä esimerkkeinä suuri ero Kolpin ja Jepuan mittaustuloksissa sekä Helsingissä saman kadun varresta mitattujen kahden mittauslinjan tulosten ero. Tulokset osoittavat myös, että hiekkamailla junaliikenteen vaikutusalue on laajempi kuin VTT Tiedotteen 2278 suuntaa antavassa arvioissa on esitetty. Myös pikajunilla ja raskaalla maantieliikenteellä savimaan tapauksessa vaikutusalue on aikaisempaa arvioita laajempi. Nämä uudet tulokset on otettu huomioon arviointitason 1 suojaetäisyyksissä (taulukko 2).



Kuva 11. Mittaustulokset verrattuna VTT Tiedotteessa 2278 esitettyyn tärinähaitan suuntaa antavaan arvioon. Yläkuvassa rautatieliikenne ja alakuvassa maantieliikenne.

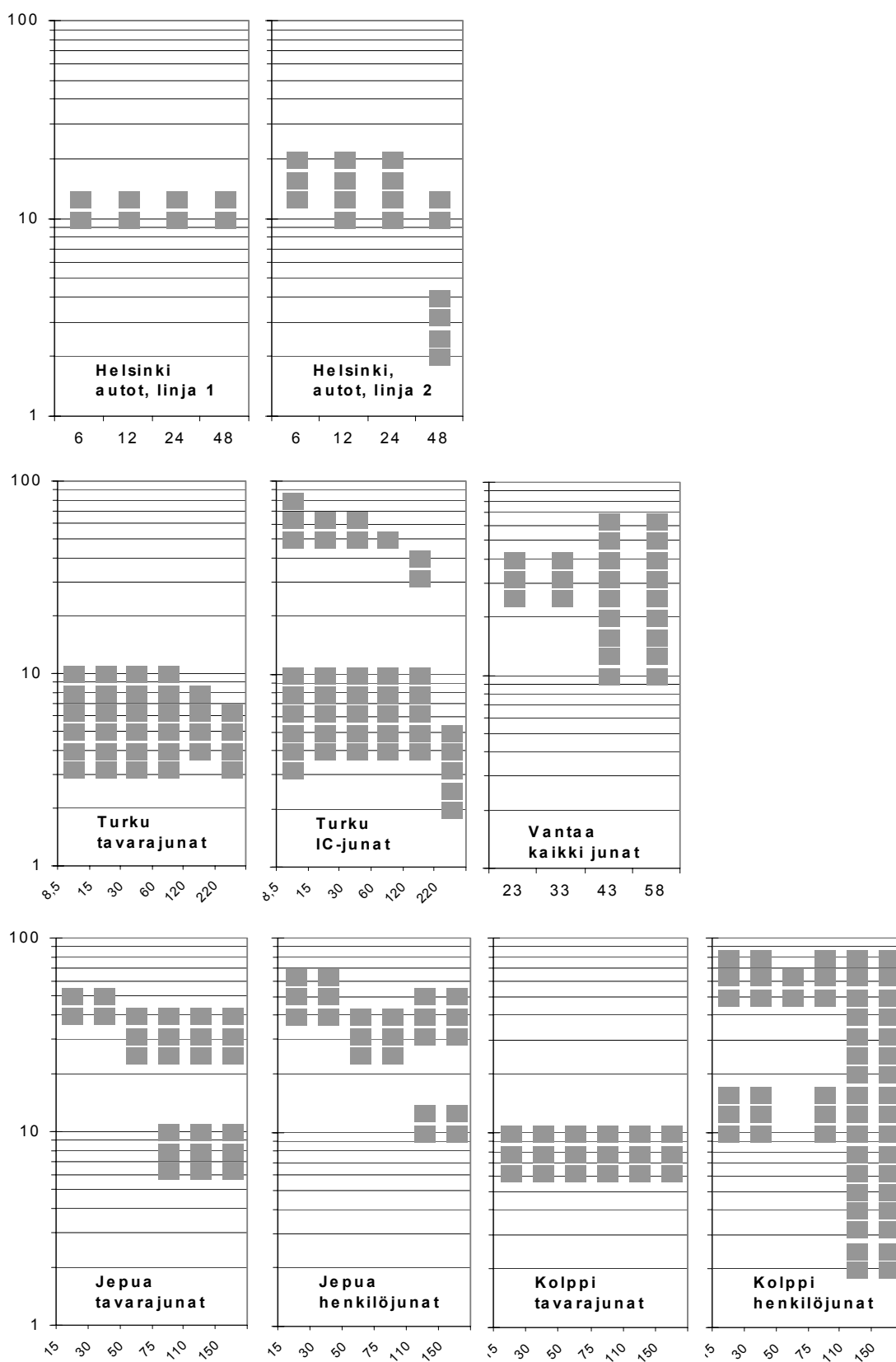
Mittaustulokset osoittavat myös, että usein tehdystä oletuksesta poiketen maan pinnalla vaakavärähtely on usein pystyvärähtelyä suurempi. Savimailla vaakavärähtelyiden merkitys korostuu lähietäisyyksillä (rautateilla alle 100 m, maanteilla alle 50 m). Kovemmilla maaperillä (hiekkä, sora, kuiva siltti) vaakavärähtely voi olla suurin kaikilla etäisyyksillä. Tällöin sekä väylän suuntaiset että väylää vastaan kohtisuorassa suunnassa olevat värähtelyt voivat olla suurempia kuin pystyvärähtelyt. Merkille pantavaa on

myös se, että vaikka pystyvärähtely pienenee yleensä tasaisesti etäisyyden kasvaessa, vaakavärähtely saavuttaa usein maksiminsa vasta kauempana väylästä. Siksi pystyvärähtelyn perusteella ei ole mahdollista arvioida luotettavasti vaakavärähtelyn suuruutta. Syitä erisuuntaisten komponenttien suhteiden vaihtelulle on periaatteessa kaksi. Lähellä tärinäherätteen syntymistä tärinä leviää useina erilaisina aaltomuotoina (nk. runko- ja pinta-aaltoina), joiden yhteisvaikutus ei ole selkeästi ennakoitavissa. Toisaalta maapohjan kerroksellisuus sekä kerrosten, mm. kovan maapohjan, pinnanmuodot säätelevät eri komponenttien suhteita kauempana herätelähteestä.

Vaikka maaperän vaakasuuntaiset värähtelyt ovat useissa tapauksissa suuremmat kuin pystysuuntaiset värähtelyt, maaperän vaakasuuntaisten värähtelyjen vaikutuksesta rakennuksen värähtelyihin ei ole vertailuja. Havaittu ilmiö on kuitenkin merkittävä, ja sen vaikutukset rakennusten värähtelyihin tulisi ohjeistaa jatkotutkimuksissa. Toistaiseksi asuintilojen värähtelyjen arvioinnissa suositellaan käytettäväksi edelleen maaperän pystyvärähtelyä luvun 3 mukaisesti, kunnes maaperän vaakasuuntaisten värähtelyjen vaikutuksesta rakennuksen värähtelyihin on olemassa luotettavaa tietoa.

Maaperästä tulevan värähtelyn taajuussisältö on tarpeen tietää, mikäli rakennuksessa värähtelyyn halutaan vaikuttaa rakenneteknisin toimenpitein. Kuvassa 12 on yhteenveto mitatuista merkittävimmistä taajuuskomponenteista eri mittauskohteissa. Merkittävimmät taajuuskomponentit on määritetty taajuuspainotetuista värähtelynäytteistä.

Hiekkamaalla (Vantaa) merkittävimmät värähtelytaajuudet ovat yli 10 Hz. Paksulla savimaalla (Turku) merkittävimmät värähtelyt esiintyvät 4–10 Hz:n taajuusalueella. Ohuilla savimailla (Helsinki) merkittävimmät taajuudet esiintyvät taajuusalueella 10–20 Hz. Silttimailla, joissa on myös pehmeä kerros (Jepua), merkittävimmät värähtelyt esiintyvät lähellä rataa taajuusalueella 25–60 Hz, mutta kauempana radasta esiintyy myös toinen merkittävä taajuusalue 6–12 Hz. Joissakin tapauksissa tavara- ja henkilöjunien aiheuttamat taajuussisällöt voivat poiketa merkittävästi toisistaan (Jepua). Lähellä tärinäherätteen syntymistä taajuuteen vaikuttavat ajoneuvon ja väylän ominaisuudet (esim. akseli ja telivälit sekä väylän jäykkyys), mutta kauempana kohteesta vaikuttavat lisäksi maapohjan ominaisuudet.



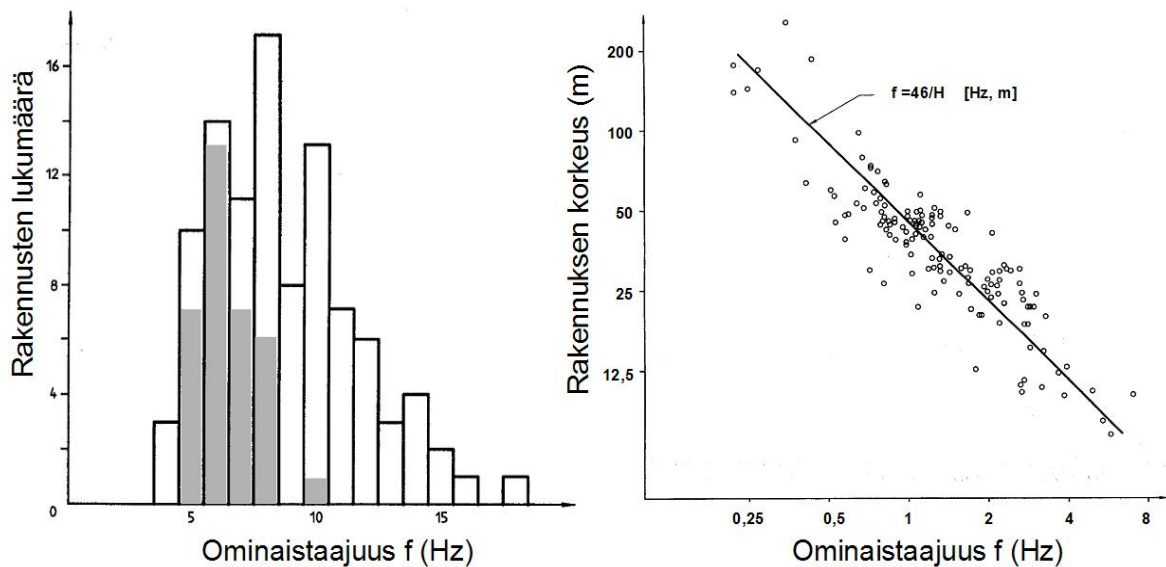
Kuva 12. Yhteenveto merkittävimmistä värähtelykomponenteista. Logaritmisella pysty-akselilla on taajuus (Hz) ja vaaka-akselilla etäisyys väylästä (m).

## 4.4 Taajuussisällön vaikutus rakennuksen värähtelyihin

Maaperän eritaajuuksisten värähtelykomponenttien vahvistumiseen tai vaimenemiseen rakennuksessa vaikuttaa olennaisesti resonanssi-ilmiö. Resonanssissa rakenteen tai rakenneosan omalle värähtelytaajuudelle, ns. ominaistajuudelle, sattuvat taajuuskomponentit vahvistuvat voimakkaimmin. Ominaistajuuteen vaikuttavat rakenteen tai rakenneosan dynaamiset ominaisuudet, jotka riippuvat massa-, jäykkyys- ja vaimennustekijöistä.

Yleensä merkittävimmät ongelmat pientaloissa ilmenevät rakennuksen rungon vaakavärähtelynä tai lattian pystyvärähtelynä (kuva 10), kun niiden alimmat ominaistajuudet sattuvat maaperästä tulevien merkittävimpien taajuuskomponenttien alueelle. Tarkemmin resonanssi-ilmiön vaikutusta havainnollistetaan liitteen E esimerkillä.

Kuvassa 13 on havaintoja pientalojen ja kerrostalojen rungon alimmista ominaistajuuksista. Koska savimailla maaperän merkittävimmät taajuuskomponentit sattuvat usein samalle taajuusalueelle kuin pientalojen ja matalien kerrostalojen ominaistajuudet, savimailla merkittävimmät ongelmat ilmenevät yleensä rakennuksen vaakavärähtelynä.



Kuva 13. Rakennusten ominaistajuuksia. Vasemmalla on pientaloista mitattuja ominaistajuuksia. Oikealla on kerrostalon ominaistajuuden riippuvuus rakennuksen korkeudesta (ISO 4866, 1994). Vasempaan kuvaan lisätyt harmaat pylväät esittävät VTT:n mittaustuloksia Suomessa tyypillisistä taloista.

Lattian ominaistajuuteen vaikuttavat oleellisesti lattian runkomateriaali, massa ja jänneväli. Alin ominaistajuus vaihtelee yleensä välillä 3 ja 30 Hz, ja se on helposti arvioitavissa laskennallisesti (Talja & Toratti 2002). Kevyillä puu- tai teräsrunkoisilla lattioilla, joiden jänneväli on 3–8 m, alin ominaistajuus on uusissa rakennuksissa yleensä 8–30 Hz. Mitä lyhyempi on jänneväli, sitä korkeampi on ominaistajuus. Pitkäjänteisillä ontelolaattalattioilla alin ominaistajuus on yleensä 6–20 Hz. Hyvin pitkäjänteisillä teräsbetoniliittorakenteilla ominaistajuus voi olla niinkin alhainen kuin 3–6 Hz. Suuren ominaistajuuden vaihteluvälin vuoksi lattian resonanssiongelmat voivat ilmetä pehmeiden savimaiden lisäksi myös kovilla maaperillä.

#### **4.5 Koekohteista mitatut rakennuksen värähtelyt**

Tällä hetkellä rakennuksen tärinää arvioidaan maaperän pystyvärähtelyn perusteella, jota korjataan rakennuksen koon mukaan. Menetelmä esitetään VTT Tiedotteessa 2278 (Talja 2004e). Ehdotettu menetelmä on suuntaa antava eikä ota huomioon kohdassa 4.4 esitettyä maaperän värähtelyn suuntaa, taajuussisältöä eikä rakennusten dynaamisten ominaisuuksien vaikutusta.

Menetelmä perustuu kirjallisuustutkimukseen ja mittauksiin, joissa asuintiloista määritettyä värähtelyn tunnuslukua on verrattu maaperästä määritettyyn pystysuuntaisen värähtelyn tunnuslukuun. Kirjallisuudesta löytyneiden tulosten mukaan kaksikerroksisilla taloilla rungon vaakasuuntainen värähtely ja lattian pystysuuntainen värähtely ovat keskimäärin noin 1,5-kertaiset ja voivat olla jopa 3–4-kertaiset maaperän pystysuuntaisiin värähtelyihin nähden.

VTT:n 14:stä eri pientalosta saadut tulokset osoittavat kuitenkin, että sekä toisen kerroksen vaakavärähtelyn että lattian pystyvärähtelyn tunnusluvun suhde maaperän värähtelyn tunnuslukuun on paaluttamattomilla rakennuksilla useimmiten 0,7–1,3. Tilastollinen maksimi on 1,5. Paalutus pienentää pystysuuntaista värähtelyä, mutta vaakasuuntaisiin värähtelyihin paalutuksella ei ole selvää vaikutusta. VTT:n mittauskohteet ovat pehmeillä savialueilla, joilla yli 60 % maaperän värähtelyn tunnusluvusta määräytyi 6–10 Hz:n värähtelykomponenteista.

Tulosten perusteella on annettu suositus, että suunnittelun perusteena käytetään maaperän pystysuuntaisen värähtelyn tunnuslukua. Yksikerroksisilla rakennuksilla vaakavärähtelyä ei tarvitse huomioida. Kaksikerroksisten rakennusten vaakavärähtelyssä on suositeltu varautumista kaksinkertaiseen värähtelyn tunnuslukuun. Myös ala- ja välipohjien pystysuuntaisessa värähtelyssä suositellaan varautumista kaksinkertaiseen värähtelyn tunnuslukuun. Poikkeuksena ovat paaluille perustettujen 1–2-kerroksisten talojen



ala- ja välipohjat sekä maanvaraiset lattiat, joilla riittää varautuminen maaperän värähtelyn suuruiseen tunnuslukuun.

Kahden VTT:n mittaaman 6- ja 7-kerroksisen talon tulokset osoittavat, että rungon pystysuuntainen värähtely voi olla yhtä suurta ylä- ja alakerroksissa. Näissä kohteissa mitatut vaakasuuntaiset värähtelyt olivat pieniä. Kirjallisuuden mukaan kerrostaloilla perustuksen pystyvärähtelyt voivat olla noin puolet pientalojen pystyvärähtelyistä, joten pientaloista saadun kokemuksen mukaan lattian pystyvärähtelyissä riittäisi kerrostaloilla varautuminen maaperän pystyvärähtelyiden suuruiseen värähtelyyn. Menettelyn käyttö suositellaan kuitenkin varmennettavaksi laajemmalla koesarjalla, sillä kerrostalossa lattioiden tärinästä aiheutuva riski on suurempi kuin yksittäisessä pientalossa.

Yhteenveto mitatuista rakennuskohteista ja tulosten tarkempi vertailu on VTT Tiedotteessa 2278 (Talja 2004e).

## 5. Tärinän laskennallinen arviointi

### 5.1 Käsinlaskentamenetelmät

Käsinlaskentaa varten kehitetyt mallit ovat luonteeltaan kerroinmalleja, joissa näennäisesti toisistaan riippumattomien tekijöiden vaikutus otetaan huomioon eri tekijöiden kerroinarvojen tulona.

Junan aiheuttaman tärinän leviämistä etäisyydelle  $D$  kuvataan usein lausekkeella

$$v = v_0 \cdot \left( \frac{D_0}{D} \right)^B \cdot k_S \cdot k_G \cdot k_R, \quad (3)$$

jossa  $v_0$  on maanpinnan pystysuuntaisen värähtelyn vertailuarvo etäisyydellä  $D_0 = 15$  m radasta. Kerroin  $k_S$  ottaa huomioon junan nopeuden,  $k_G$  ottaa huomioon junan painon ja kerroin  $k_R$  radan ja kaluston laadun. Junaliikenteellä käytettyä laskentamallia kuvataan tarkemmin liitteessä C.

Vastaavanlaista lähestymistapaa on käytetty tie- ja katuliikenteelle, mutta koska liikenne on kevyempää ja tarkasteluetaisyys siten pienempi, pystysuuntaisen värähtelyn vertailuarvo  $v_0$  määritetään lähempää, yleensä etäisyydeltä  $D_0 = 6$  m väylän reunasta. Erästä tie- ja katuliikenteelle käytettyä laskentamallia kuvataan liitteessä D.

Tärinälaskelmien epävarmuus on huomattavasti suurempi kuin esimerkiksi melulaskelmien, koska tärinään vaikuttaa suuri joukko vaikeasti arvioitavia tekijöitä. Merkittävimmät epävarmuudet johtuvat

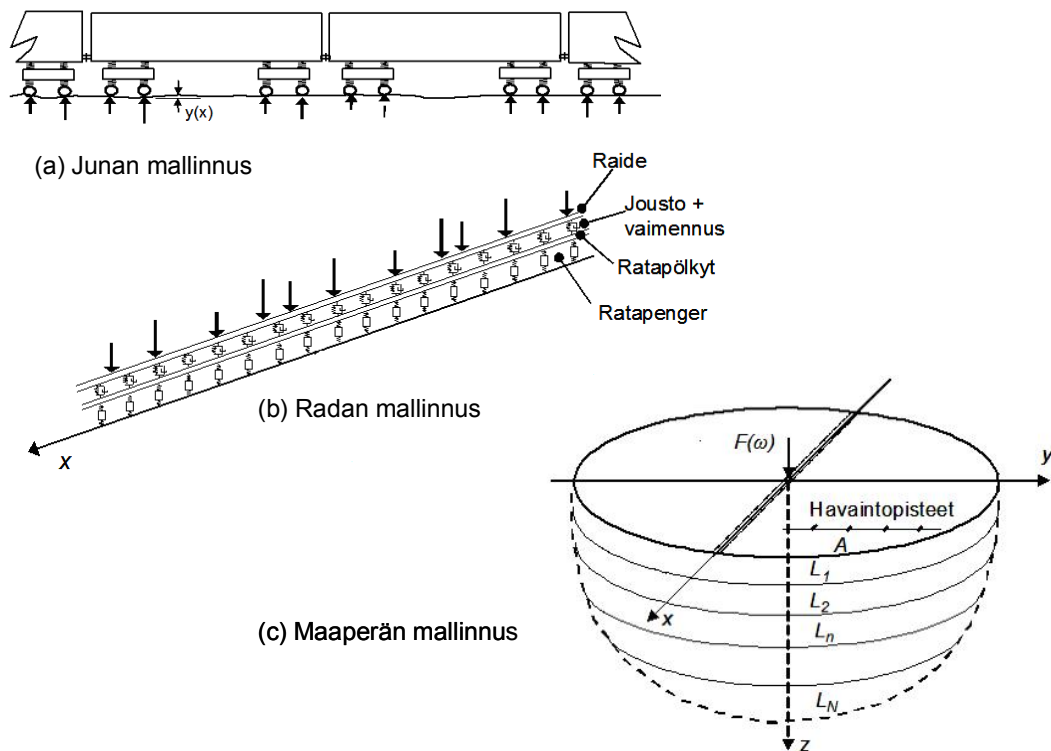
- liikennöivän kaluston suuresta vaihtelusta, kaluston jousituksista ja pyörästäistä
- maapohjan vaihtelusta tärinän leviämisalueella ja rakennusten perustamisalueella
- tärinän välittymistapaeroista maapohjasta rakennukseen eri tavalla perustetuilla rakennuksilla
- lattiarakenteiden ja rakennusten runkorakenteiden värähtelytapaeroista erityyppisillä rakennuksilla, materiaaleilla sekä jännemitoilla.

Tärinämalleilla lasketun maanpinnan tärinän suuruuden ennusteissa on virhemahdollisuus edellä luetelluista syistä kertaluokkaa  $\pm 50$  %. Tärinäriskin arviointia tulee edellä mainituista syistä siksi aina tarkentaa aluekohtaisesti, mikäli arvioituille riskialueille sijoitetaan uutta rakennuskantaa. Tarkentaminen voidaan tehdä alueellisin tärinänmittauksin. Arviossa voidaan tällöin huomioida paremmin myös paikallisten rakennusten todelliset ominaisuudet.

## 5.2 Tarkemmat laskentamenetelmät

Tarkemmissa laskentamalleissa voidaan mallintaa niin liikenneväline, väylä kuin maaperä (kuva 14). Tällaisilla laskentaohjelmilla voidaan yleensä määrittää myös värähtelyn taajuussisältö.

Malleissa värähtely kuvataan aiheutuvaksi väylän epätasaisuudesta ja maapohjan kvasi-staattisesta painumisesta. Painuma voi esiintyä paikallisena pintarakenteen painumisena pyörien alla tai laajempänä maapohjan painumisena ajoneuvon alla.



Kuva 14. Periaatekuva tarkempien laskentamallien osamalleista.

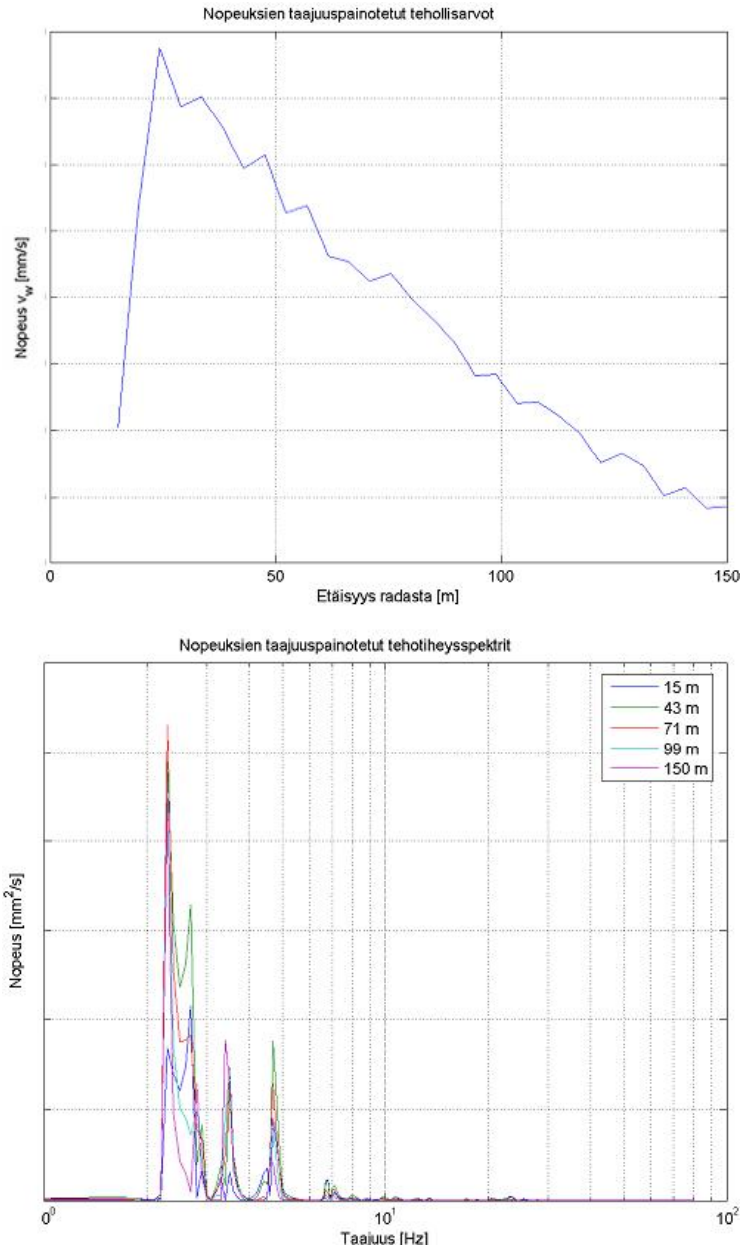
VTT on kehittämässä ensimmäistä versiota ohjelmasta TREMOR, jolla voidaan arvioida junaliikenteen aiheuttamaa värähtelyä. Ohjelma sisältää myös kerroksellisen maaperän laskennan. Toistaiseksi ohjelma ei ota huomioon vaunun tai telin painosta aiheutuvaa pintarakenteen ja maapohjan kvasi-staattista (näennäisesti staattista) painumista. Laskentaohjelmaan annetaan lähtötietoina

- junan kokoonpano ja nopeus
- kiskojen epätasaisuus
- suurin tarkasteltava etäisyys radasta
- maan parametrit
- laskettavan värähtelytaajuuden pienin ja suurin arvo.

Laskennan tuloksena saadaan (kuva 15)

- maanpinnan värähtely pystysuunnassa, väylän suunnassa ja väylää vastaan kohtisuorassa suunnassa
- värähtelyn taajuussisältö.

Ohjelmaa kuvataan tarkemmin lähteessä (Kärnä & Lastunen 2006). Julkaisun kirjoittamishetkellä ohjelman tekeminen on vielä kesken.

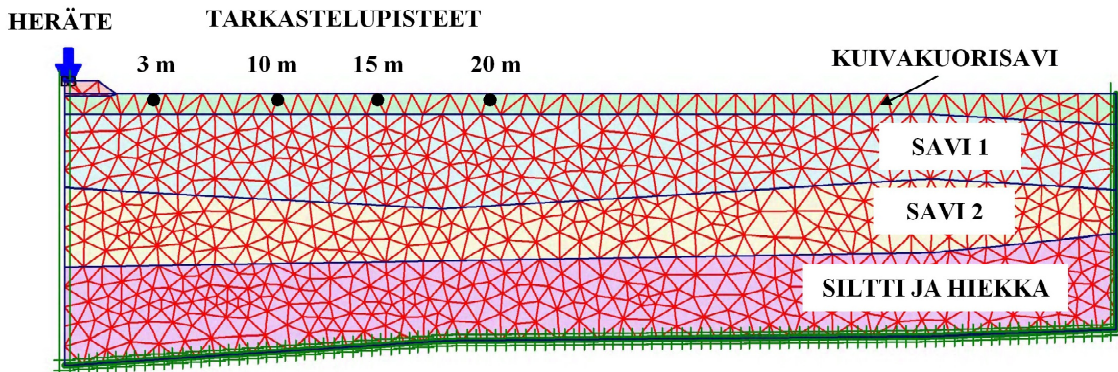


Kuva 15. Esimerkki kehitteillä olevan laskentaohjelman TREMOR 1.0 tulostuksesta. Yläkuvassa on värähtelyn suuruus eri etäisyyksillä ja alakuvassa värähtelyn tehotiheyspektrit. Laskettu tapaus: tavarajuna (5 vaunua à 100 t, nopeus 90 km/h). – Maalajit maanpinnasta lukien: siltti 4 m ja savi 4 m, joiden alla kova kallio.

### 5.3 FEM-laskenta

Tärinävaikutusten yksityiskohtaisempaa arviointia voidaan tehdä myös elementtimenetelmään perustuvilla laskelmilla (FEM-laskenta). Koska tarkkoihin ennusteisiin pääseminen edellyttää hyviä maaperätutkimuksia, dynaamisten materiaaliparametrien tuntemusta sekä suuria laskentamalleja, menetelmän käyttö on toistaiseksi rajoittunut tutkimustyöhön. Parhaiten FEM-laskenta soveltuu erilaisten suhteellisten vaikutusten arviointiin.

FEM-laskennassa käytetyn elementin koko määräytyy tarkasteltavan korkeimman taajuuden perusteella. Koska laskennassa joudutaan käyttämään usein alle 0,5 metrin elementtikokoa ja tarkasteltava alue hyvin laaja, laskentamallista tulee suuri ja laskennasta raskas. Siksi laskennassa rajoitutaan yleensä kaksiulotteiseen tasomalliin, jossa kuvataan vain maaperän rakenne väylää vastaan kohtisuorassa poikkileikkauksessa (kuva 16).



Kuva 16. Esimerkki kaksiulotteisesta FEM-mallista (Koivisto 2004).

VTT:ssä on tarkasteltu tärinän leviämistä erilaisilla pehmeillä maakerroksilla ABAQUS-ohjelman avulla. Käytetty FEM-malli oli kaksiulotteinen. Simuloinnin tavoitteena oli selvittää myös maapohjan kohouman vaikutusta eritaajuuksisten värähtelykomponenttien leviämiseen. Mallissa ei kuvattu rataa eikä todellista junasta aiheutuvaa herätettä.

Kuormituksena oli harmoninen voima, jonka taajuus vaihteli välillä 1 ja 100 Hz. Värähtelytarkastelu tehtiin suhteellisena, joten kaikki maaperään aiheutuvat värähtelykomponentit normeerattiin herätteen kohdalla samansuuruisiksi. Eri etäisyyksillä esiintyvistä värähtelykomponenteista laskettiin painotettu värähtelynopeuden tehollisarvo.

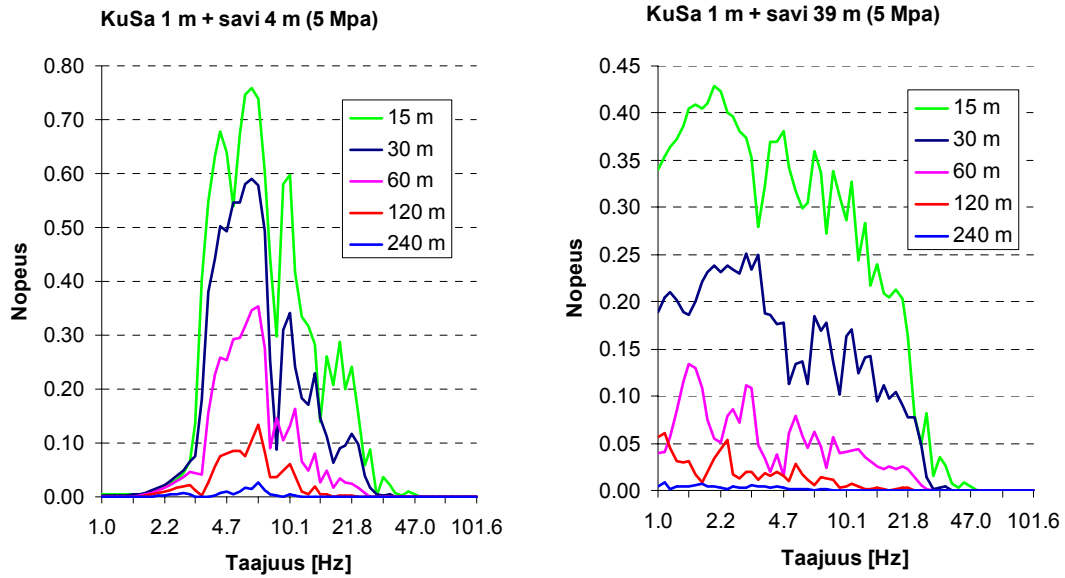
Tutkimuksessa mallinnettiin erilaisia maapohjia ja selvitettiin niiden vaikutusta tärinän suhteelliseen suuruuteen. Maaperämalleissa päämateriaali oli pehmeä tai sitkeä savi. Useampikerroksisissa malleissa ylin kerros oli kuivakuorisavea. Silttiä, hiekkaa ja kalliota käytettiin mallintamaan nousevaa kovaa maapohjaa. Materiaalit oletettiin kimmoisiksi.

FEM-laskennassa havaittiin, että mallilla pystytään esittämään havainnollisesti, miten maapohjan resonanssitaajuus vaikuttaa värähtelyn taajuussisältöön. Maapohjan resonanssitaajuus riippuu savikerroksen paksuudesta ja kimmomoduulista (kuva 17). Esimerkiksi ohuella savikerroksella (1 m kuivakuorikerrosta ja 4 m pehmeää savea) resonanssihuippu on noin 4–8 Hz:n taajuudella. Paksulla savikerroksella (1 m + 39 m) taajuusjakauma on tasaisempi lasketulla taajuusalueella. Tämä aiheutuu siitä, että maapohjan resonanssitaajuus on lasketun taajuusalueen alapuolella. Tulokset osoittavat myös, että resonanssitaajuutta lähellä olevat taajuudet vaimenevat hitaimmin (kuva 18).

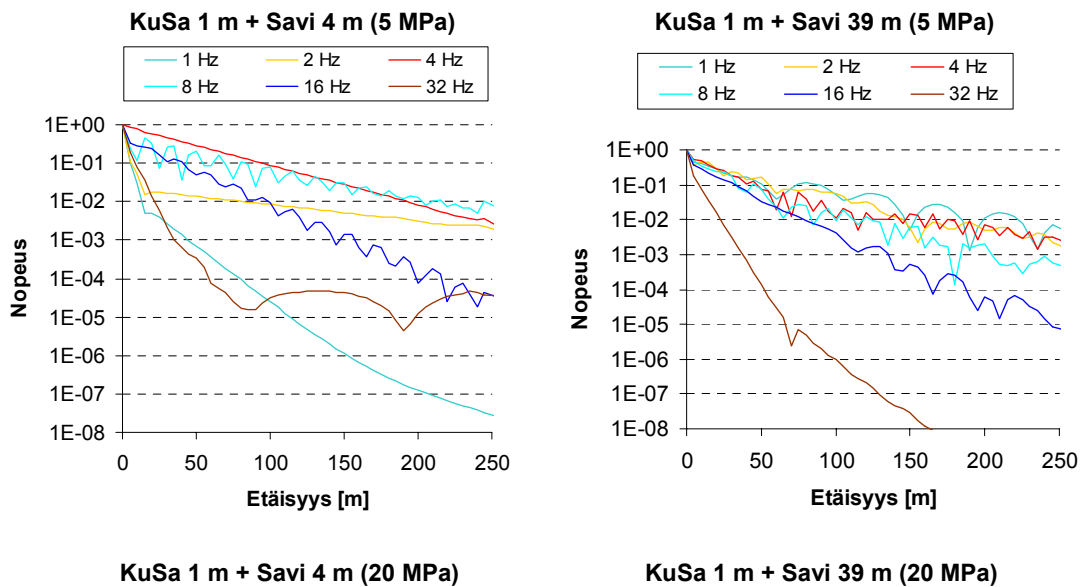
Värähtelyn suuruuden tarkka vertaaminen edellyttäisi erilaisista junista aiheutuvan heijasteen suuruuden tuntemista taajuuskomponenteittain. Heijasteen suuruuteen vaikuttaa myös junan, radan ja radan alla olevan maapohjan vuorovaikutus. Koska tiedot heijasteesta vaihtelevat merkittävästi, tarkka vertailu ei ole mahdollinen. Karkean vertailun perusteella saadut FEM-laskennan tulokset tukevat seuraavia johtopäätöksiä:

- Pehmeällä savella värähtely vaimenee etäisyydellä 15–70 m sitä nopeammin, mitä suurempi on savikerroksen paksuus. Pehmeällä savella vaikutus on erittäin merkittävä. Esimerkiksi paksuudella 4 m värähtely etäisyydellä 70 m on yli kolminkertainen paksuuteen 40 m verrattuna, vaikka etäisyydellä 15 m värähtely on samansuuruinen. Sitkeällä savella savikerroksen paksuuden vaikutus vaimenemisnopeuteen on merkityksellinen.
- Vaakasuuntaisiin värähtelyihin kalteva kova pohja aiheuttaa lisäystä noin 40–60 %. Pystysuuntaisissa värähtelyissä vaikutus riippuu saven jäykkyydestä ja voi olla lisäystä tai vähennystä joitain kymmeniä prosentteja.
- Kovan kohouman syvyys maanpinnasta (2 tai 5 m) vaikuttaa ainoastaan värähtelyihin kohouman päällä. Syvyyden pienetessä myös värähtelyt kohouman päällä pienenevät riippuen saven jäykkyydestä.
- Kovan kohouman materiaalilla (kallio, hiekka tai siltti) tai kaltevuudella (1:10 tai 1:4) ei ole merkittävää vaikutusta värähtelyihin, kunhan kohouman jäykkyys eroaa olennaisesti sen päällä olevan pehmeän kerroksen jäykkyydestä.

FEM-laskennan tuloksia käsitellään yksityiskohtaisesti lähteessä (Kurkela 2004).



Kuva 17. Esimerkki pehmeän savikerroksen paksuuden vaikutuksesta pystysuuntaisen värähtelyn taajuusjakaumaan etäisyyksillä 15–240 m. Kimmomoduulit 5 MPa (savi) ja 40 MPa (kuivakuorisavi, KuSa). Nopeusarvot on skaalattu siten, että herätekohdassa arvo on 1,0.



Kuva 18. Esimerkki savikerroksen paksuuden vaikutuksesta eritaajuuksisten värähtelykomponenttien suhteelliseen pienentymiseen. Kimmomoduulit 5 MPa (savi) ja 40 MPa (kuivakuorisavi, KuSa).

## 6. Yhteenveto ja jatkotutkimustarpeet

Aikaisemmin julkaistussa VTT Tiedotteessa 2278 (Talja 2004e) esitetään suositus liikennetärinän mittaamisesta ja luokituksesta. Tämä julkaisu täydentää aikaisempaa julkaisua ja ottaa huomioon VTT Tiedotteen 2278 julkaisemisen jälkeen saadut uudet tutkimustulokset. Uutena asiana käsitellään liikennetärinän vaikutuksien arviointimenetelmiä ja annetaan suosituksia tärinän arvioimiseksi maankäytön suunnittelussa. Suositusten toivotaan yhtenäistävän tapaa, jolla tärinävaikutuksia arvioidaan.

### 6.1 Yhteenveto

#### Suositukset tärinän luokituksesta

Luokituksen perusteena on liikennetärinästä aiheutuva haitta asuinmukavuudelle. Kriteerinä käytetään värähtelyn tunnuslukua, joka kuvaa asuintiloissa esiintyvää suurinta mitattua tai arvioitua värähtelyn tehollisarvoa. Tavoite uusien rakennusten ja väylien suunnittelussa on värähtelyluokka C (tunnusluku alle 0,3 mm/s). Vanhoilla asuinalueilla tulee pyrkiä värähtelyluokkaan D (tunnusluku alle 0,6 mm/s). Värähtelyluokitus perustuu Norjan standardiin (NS 8176E, 1999) ja VTT:n suorittamiin mittauksiin. Myös monet muut ohjeet, kuten DIN 4150-2 (1999), Banverket (1997) ja FRA (1998) tukevat esitettyä suositusta.

Luokituskriteerin on toteuduttava pystyvärähtelyn osalta rakennuksen kaikissa lattioissa ja vaakavärähtelyn osalta rakennuksen jokaisessa kerroksessa.

#### Suositukset maankäytön suunnitteluun

Maankäytön suunnittelussa tärinän arviointi jaetaan tarkkuutensa perusteella kolmeen eri tasoon. Arviointitaso 1 perustuu kokemusperäiseen suojaetäisyyteen, jota kauempana värähtelytarkastelua ei eri maalajeilla pidetä tarpeellisena. Arviointitaso 2 perustuu yleensä laskennalliseen arvioon, ja siinä liikenne ja maaperän ominaisuudet otetaan tarkemmin huomioon. Arviointitaso 3 edellyttää maaperästä tehtäviä värähtelymittauksia.

Arviointitasoa 1 suositellaan käytettäväksi maakuntakaavatasolla ja yleiskaavatasolla, kun rakentamista ohjataan yleispiirteisillä aluevarauksilla. Arviointitasoa 2 suositellaan käytettäväksi, kun yleiskaavassa tai asemakaavassa rakentamista ohjataan yksityiskohdittaisesti määrätyllä alueella ja arviointitason 1 perusteella alue on riskialuetta. Arviointitason 3 käyttöä tarvitaan, mikäli arviointitason 2 laskennallisella tarkastelulla ei saada



riittävän luotettavaa kuvaa maaperän pystyvärähtelyn suuruudesta tai halutaan rakentaa alueelle, jolla arviointitason 2 mukaan tärinä voi ylittää suositusarvon.

Tärinän leviämistä on kokeilukohteissa voitu vähentää myös maahan asennettavilla teknisillä ratkaisuilla. Teknisten ratkaisujen kehittäminen yleiseen käyttöön edellyttää kuitenkin vielä laajaa kehitystyötä ja käytön ohjeistamista.

### Suositukset tärinän leviämisen arviointiin

Tutkimuksen yhteydessä on tehty kenttämittauksia ja FEM-laskelmia. Lisäksi on kehitetty kokeiluvärsio laskentaohjelmasta TREMOR, jolla voidaan tutkia junan aiheuttaman tärinän leviämistä kerrostuneessa maaperässä. Ohjelmalla voidaan arvioida myös leviävän tärinän taajuussisältöä. Lisäksi julkaisun liitteessä esitetään käsinlaskentaan soveltuvia arviointitapoja rautatie- ja maantieliikenteelle.

Saadun kokemuksen perusteella paras tapa arvioida tärinän leviämistä on edelleen mittaaminen, jonka käytöstä annetaan yksityiskohtaiset suositukset. Muiden laskentamenetelmien tarkkuus riittää lähinnä tärinän suurusluokan ja eri parametrien suhteellisten vaikutusten arviointiin.

## 6.2 Jatkotutkimustarpeet

Useimmat VTT Tiedotteessa 2278 esitetyt jatkotutkimustarpeet ovat edelleen ajankohtaisia. Jatkotutkimuksissa on tärkeää kehittää tärinän syntymisen ja siirtymisen ehkäisykeinoja. Tärkeää on myös kehittää entistä tarkempia laskennallisia arviointimenetelmiä sekä rakennuksen että maaperän tärinän arvioimiseksi.

Jatkokehitystyö on tarpeen, jotta tärinän arviointiin liittyvien epätarkkuuksien vuoksi lähellä liikenneväyliä olevat alueet eivät jää rakentamatta tai rakentamiskustannukset kasva kohtuuttomiksi. Koska rautateiden varrella sijaitsevilla pehmeillä maalajeilla maaperän värähtely  $v_w = 0,3$  mm/s ulottuu rautateillä yleensä etäisyydelle 100–300 m, tärinän huomioiminen koskee suuria maa-alueita.

Seuraavissa kohdissa kuvataan tiivistetysti arviot tärkeimmistä jatkotutkimustarpeista.

## Tärinän syntymisen ja leviämisen ehkäisy

Tärinähaitan pienentämiseksi käytettyjen erilaisten teknisten ratkaisujen todellinen parannusvaikutus värähtelyn eri taajuusalueilla tulisi selvittää. Tärinän vaikutuksien pienentämiseksi on käytetty mm. väylän tai kiskojen alle asennettavia tärinäeristeitä, maaperän stabilointia ja maapohjan paalutusta. Radan tai kiskojen alle asennettavat tärinäeristeet toimivat yleensä vasta yli 20 Hz:n taajuuksilla ja kelluvat laatat vasta yli 10 Hz:n taajuuksilla, joten niiden eristysvaikutus näkyy parhaiten kovilla maapohjilla. Pehmeillä maalajeilla niiden käyttö voi jopa kasvattaa tärinää. Tärinän siirtymisen estämiseksi on kokeiltu myös erilaisia, pehmeitä ja kovia, maaperään rakennettavia seinämärakenteita. Lisäksi on kokeiltu rakennuksen ja perustuksen väliin asennettavia tärinäeristimiä.

## Rakennukseen siirtyvän tärinän arviointi

Kuten kohdassa 4.4 havainnollistettiin, rakennusten dynaamisilla ominaisuuksilla on suuri merkitys maaperästä tulevan tärinän vaimenemiseen tai voimistumiseen rakennuksessa. Mittauksista saadut rakennuskohtaiset erot ovat suuria. Tärinän siirtymiseen rakennukseen vaikuttavat mm. maaperästä tulevan värähtelyn suunta ja taajuussisältö, rakennuksen perustamistapa, rakennuksen koko ja käytetyt materiaalit.

Erityisesti matalista kerrostaloista (3–5 kerrosta), sekä paalutetuista että paaluttamattomista, tulisi hankkia kokemusta rungon ja lattioiden käyttäytymisestä. Tällä hetkellä mittaustuloksia on pääasiassa savimaalle rakennetuista pientaloista, joilla rungon resonanssin merkitys korostuu. Mittaustuloksia tulisi hankkia myös koville maapohjille rakennetuista taloista.

Rakennustyypeistä ja perustamistapojen vaikutuksista tulisi kehittää ohjeistusta siten, että tulevaisuudessa maaperän värähtelyiden taajuussisältö ja rakennuksen dynaamiset ominaisuudet voidaan ottaa suunnittelussa huomioon. Lisäksi pitää selvittää maaperän vaakavärähtelyjen vaikutus rakennukseen, sillä kohdan 4.3 mukaan vaakavärähtelyt ovat useissa tapauksissa pystyvärähtelyä suurempia. Koska vaakavärähtelyn vaikutuksesta rakennuksen värähtelyihin ei ole tällä hetkellä olemassa tutkittua tietoa, asuintilojen värähtelyjen arvioinnin perusteena käytetään toistaiseksi maaperän pystyvärähtelyn tunnuslukua.

## Maaperän tärinän arviointi

Tärinän suuruuteen vaikuttavat oleellisesti liikenteen tyyppi, kaluston paino ja kunto, liikenteen nopeus sekä ajoradan kunto ja perustamistapa. VTT on kehittänyt ensimmäisen version ohjelmasta TREMOR, jolla voidaan arvioida junaliikenteen aiheuttamaa tärinää. Ohjelma sisältää myös Suomessa tyypillisen kerroksellisen maaperän laskennan. Toistaiseksi ohjelma ei ota huomioon vaunun tai telin painosta aiheutuvaa radan ja sen alla olevan maapohjan kvasistaattista painumista. Näiden vaikutus voi usein olla dominoiva, joten ohjelmaa tulisi kehittää paremmin todellisuutta kuvaavaksi. Ohjelma tulisi modifioida myös tieliikenteen tarpeisiin.

Junaliikenteellä tulisi jo tehdyistä ja tulevista mittauksista systemaattisesti analysoida tärinään vaikuttavien eri tekijöiden suhteellinen merkitys. Tieliikenteellä tulisi kerätä tietoa tien kunnan merkityksestä esimerkiksi mittaamalla maaperän tärinää ennen ja jälkeen väylän korjauksen. Samalla tavalla tulisi tutkia myös erilaisten ajohidasteiden, kuten töyssyjen ja tärinäraitojen, suhteellisia eroja.

### Mittaustulosten tallentaminen myöhempää hyödyntämistä varten

Tulosten myöhemmän hyödyntämisen helpottamiseksi suositellaan, että tulevaisuudessa eri tahojen teettämät mittausraportit talletetaan keskitetysti yhteisesti sovittavaan paikkaan.

## Runkoäänet

Tällä hetkellä liikennetärinän haittoja koskeva VTT:n tutkimus on rajoittunut rakennuksen tärinänä havaittavaan värähtelyyn. Liikenteestä ja myös räjäytys- ja paalutustöistä aiheutuvat tärinähaitat voivat ilmetä myös rungon kautta siirtyvänä äänenä. On tärkeää pystyä arvioimaan myös tämän runkomeluna ilmenevän tärinähaitan mahdollisuus. Mm. USA:ssa on junien aiheuttamaa runkomelua koskien annettu empiirisiä arviointiohjeita. Myös Suomessa pitäisi käynnistää aiheeseen liittyvää tutkimusta.

## Lähdeluettelo

Banverket. 1997. Buller och vibrationer från spårbunden linjetrafik – Riktlinjer och tillämping. Stockholm: Banverket och Naturvårdsverket (Dnr. S02-4235/SA60). 82 s.

DIN 4150-2. 1999. Erschütterungen im Bauwesen – Teil 2: Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V. 21 s.

FRA. 1995. Transit noise and vibration impact assessment. Washington D.C: Federal Transit Administration. 190 s. + liitt. 24 s.

FRA. 1998. High-speed ground transportation noise and vibration impact assessment. Report No. 293630-1. Washington: Federal Railroad Administration. 180 s. + liitt. 40 s.

ISO 4866. 1994. Mechanical vibration and shock – Vibration of buildings – Guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on buildings. Amendment 1: Annex D – Predicting natural frequencies and damping of buildings. Geneva: International Organization for Standardization. 7 s.

ISO 2631-2. 2003. Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration. Part 2: Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz). Geneva: International Organization for Standardization. 11 s.

Klæboe, R., Turunen-Rise, I. H., Hårvik, L. & Madshus, C. 2003. Vibration in dwellings from road and rail traffic – Part II: Exposure-effect relationships based on ordinal logit and logistic regression models. *Applied Acoustics* 64, s. 89–109.

Koivisto, K. 2004. Katuliikenteen aiheuttaman tärinän vähentäminen syvästabiloinnin avulla. Espoo: Teknillinen korkeakoulu, rakennus- ja ympäristötekniikan osasto.

Kolari, K. & Talja, A. 2003. Pesukoneen aiheuttamat välipohjan värähtelyt. Sisäinen raportti RTE50-IR-12/2003. Espoo: VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. 41 s.

Kurkela, J. 2005. Liikennetärinän leviäminen – Maaperän tärinän arviointi FEM-laskennan avulla. Sisäinen raportti RTE50-IR-5/2005. Espoo: VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. 46 s. + liitt. 43 s.

Kärnä, T. & Lastunen, A. 2006. Laskentaohjelma TREMOR 1.0 raideliikenteen aiheuttaman tärinän arvioimiseksi. Tutkimusraportin käsikirjoitus 6.3.2006 (julkaistaan kesälä 2006). Espoo: VTT. 57 s. + liitt. 1 s.

NS 8176E. 1999. Vibration and shock. Measurement of vibration in buildings from landbased transport guidance to evaluation of its effects on human beings. Oslo: Norges Standardiseringsförbund (NSF). 27 s.

Promethor. 2005. Raideliikenteen aiheuttaman tärinän mittaus. Heinäkangas, Toijala. 10 s. (<http://www.toijala.fi/Tekninen/Tarinamitt.pdf>.)

Talja, A. 2003. Kirjallisuusselvitys raja-arvoista ja tärinän mittaamisesta. VTT:n sisäinen raportti RTE50-IR-5/2003.

Talja, A. 2004a. Espoon kohteiden mittaustulokset. Sisäinen raportti RTE50-IR-14/2004. Espoo: VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. 20 s. + liitt. 72 s.

Talja, A. 2004b. Helsingin kohteiden mittaustulokset. Sisäinen raportti RTE50-IR-15/2004. Espoo: VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. 34 s. + liitt. 127 s.

Talja, A. 2004c. Liikenneperäinen tärinä – Kirjallisuusselvitys tärinän arvioinnista. VTT:n sisäinen raportti RTE50-IR-13/2004.

Talja, A. 2004d. Liikenneperäinen tärinä – Rakennuksen vaikutus värähtelyihin, Sisäinen raportti RTE50-IR-19/2004. Espoo: VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. 48 s. + liitt. 17 s.

Talja, A. 2004e. Suositus liikennetärinän mittaamista ja luokituksesta. VTT Tiedotteita 2278. Espoo: VTT. 50 s. + liitt. 15 s. Saatavana: <http://virtual.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2004/T2278.pdf>.

Talja, A. 2004f. Tampereen kohteiden mittaustulokset. Sisäinen raportti RTE50-IR-7/2004. Espoo: VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. 20 s. + liitt. 69 s.

Talja, A. 2004g. Turun kohteiden mittaustulokset. Sisäinen raportti RTE50-IR-8/2004. Espoo: VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. 17 s. + liitt. 75 s.

Talja, A. 2004h. Vantaan kohteiden mittaustulokset. Sisäinen raportti RTE50-IR-17/2004. Espoo: VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. 18 s. + liitt. 55 s.

Talja, A. 2004i. Urjalan kohteiden mittaustulokset. Sisäinen raportti RTE50-IR-18/2004. Espoo: VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. 16 s. + liitt. 56 s.

Talja, A. 2005. Liikennetärinän leviäminen maaperässä – Tärinän arviointi mittauksin. Sisäinen raportti RTE50-IR-14/2005. Espoo: VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. 32 s. + liitt. 192 s.

Talja, A. & Toratti, T. 2002. Lattioiden värähtelysuunnittelu. Rakentajain kalenteri 2003. Helsinki: Rakentajain Kustannus. S. 467–478.

Turunen-Rise, I. H., Brekke, A., Hårvik, L., Madshus, C. & Klæboe, R. 2003. Vibration in dwellings from road and rail traffic – Part I: a new Norwegian measurement standard and classification system. *Applied Acoustics* 64, s. 71–87.

# Liite A: Maaperäominaisuudet ja niiden määrittäminen tärinän kannalta

## Maalajit ja niiden esiintyminen Suomessa

Tärinän leviäminen on merkittäväntä pehmeissä ja vesipitoisissa maalajeissa – savissa, silteissä, liejuissa ja turpeissa. Etelä-Suomessa muinaisiin meriin sedimentoituneita savia ja silttejä on pääasiassa vain eteläisen Salpausselän eteläpuolella. Pohjanmaalla niitä esiintyy maankohoamisalueilla aina noin 200 km:n etäisyydelle nykyisestä rantaviivasta. Pohjanmaalla savi- ja silttikerrokset vaihtelevat moreeni- ja turvekerrostumien kanssa. Lounais-Suomessa savikerrostumat ovat tyypillisesti kallioesiintymien välisissä painanteissa. Myös jokikerrostumien alueella ja harjumuodostuminen reuna-alueilla voi silttikerrosten lomassa esiintyä savikerroksia. Savikerrokset voivat olla paksuja. Lounais-Suomessa esiintyy jopa 50...70 m:n paksuisia kerrostumia. Rannikolta sisämaahan päin edetessä savikerrosten paksuudet pääsääntöisesti ohentuvat, mutta paikoitellen myös sisämaassa voi olla paksuja pehmeikköjä. Silttejä esiintyy yleensä ohuina kerroksina myös harju- ja reunamuodostelmien reuna-alueilla. Etelä- ja Keski-Suomen yleistetty maaperägeologinen rakenne ilmenee kuvasta 1.




Maakerrosten ominaisuudet vaihtelevat paitsi alueellisesti myös syvyysuunnassa paikallisesti. Vaikka yleisiä maaperägeologisia rakenteita voidaan päätellä maan pinnanmuotojen ja pintakerrostenkin maalajien perusteella, ainoa luotettava keino maakerrosten määrittämiseen on asiallisen pohjatutkimuksen tekeminen. Maalajit nimetään maalajiryhmän perusteella (taulukko 1). Maalajinimeä kivennäismaalajeissa tarkennetaan edelleen rakeisuuden perusteella (taulukko 2).

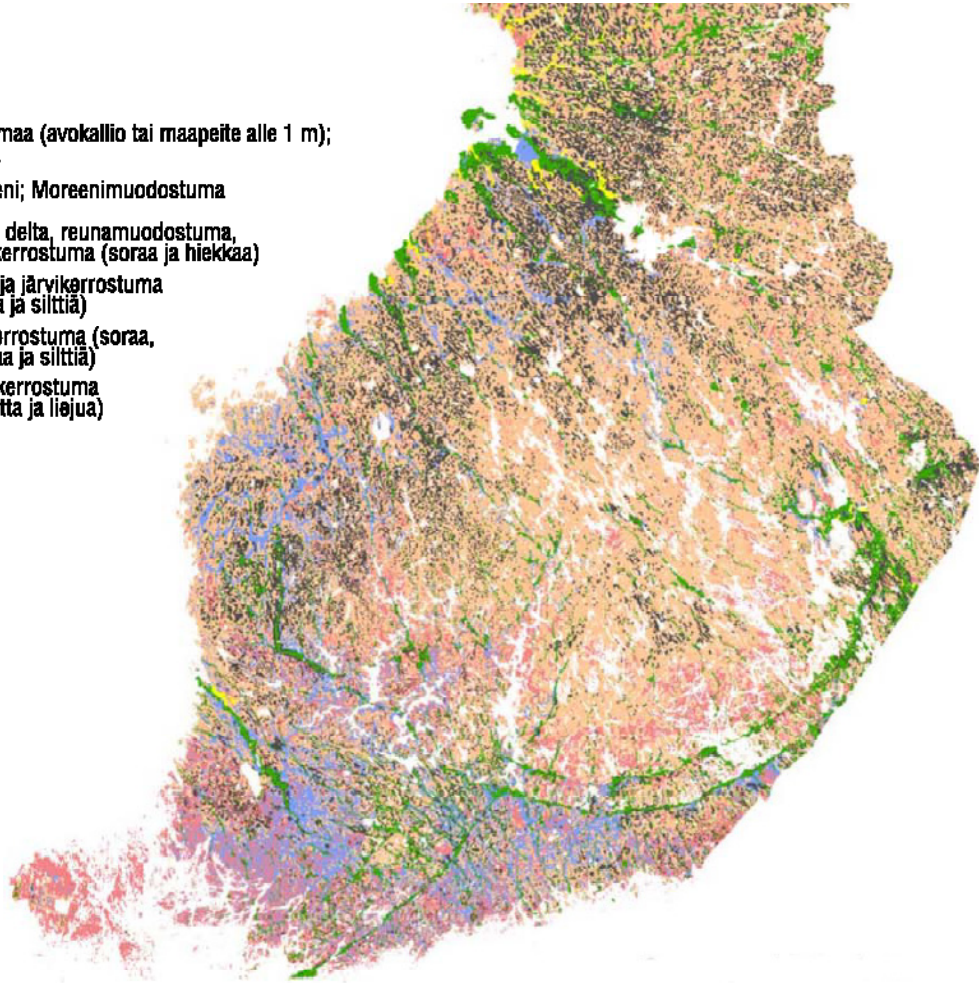
Maalaji nimetään sen rakeisuuden ja humuspitoisuuden perusteella. Kivennäismaalajit nimetään savea lukuun ottamatta  $d_{50}$ -menetelmällä eli maalaji nimetään keskimääräisen raekoon perusteella, rakeisuuskäyrän 50 %:n läpäisyn kohdalta (taulukko 2). Savet nimetään savilajitteen määrän perusteella. Moreeneiksi kutsutaan jääkauden aikana syntyneitä lajittumattomia kivennäismaalajeja. Moreenimaalajit jaetaan  $d_{50}$ -menetelmällä siltti-, hiekka- ja soramoreeneihin.

Eloperäisiä maalajeja ovat turve ja lieju. Turve sisältää maatumisasteeltaan vaihtelevasti kasvien jätettä. Lieju koostuu kasvi- ja eläinjätteistä sekä hienorakeisista kivennäisaineista, ja sen humuspitoisuus on yli 20 %.

Taulukkojen 1 ja 2 kivennäismaalajeja, jotka ovat karkeaa silttiä taikka sitä karkeampia, kutsutaan karkearakeisiksi maalajeiksi ja karkeaa silttiä hienompia kutsutaan hienorakeisiksi maalajeiksi.

## Selite

-  Kalliomaata (avokallio tai maapeite alle 1 m);  
Rakka
-  Moreeni; Moreenimuodostuma
-  Harju, delta, reunamuodostuma,  
rantakerrostuma (sora ja hiekkaa)
-  Meri- ja järviskerrostuma  
(savea ja silttiä)
-  Jokikerrostuma (sora,  
hiekkaa ja silttiä)
-  Turvekerrostuma  
(turvetta ja liejua)



Kuva 1. Keski- ja Etelä-Suomen yleistetty maaperäkartta  
(<http://www.gsf.fi/aineistot/suomenmpyleistys.htm>).



Taulukko 1. Geoteknisen maajiluokituksen maajiryhmät.

Maajiryhmä	Koostumus
Eloperäiset maajit	Koostuvat olennaisesti eloperäisestä aineksesta (humusta > 20 % pelkän kiviaineksen massasta).
Hienorakenteiset kivennäismaajit	Koostuvat lajittuneesta hienorakeisesta maa-aineksesta. Hienoainespitoisuus (raekoko $\leq 0,06$ mm) $\geq 50$ %. Humusta $\leq 20$ % pelkän kiviaineksen massasta.
Karkearakenteiset kivennäismaajit	Koostuvat lajittuneesta karkearakeisesta maa-aineksesta. Hienoainespitoisuus $< 50$ %. Humusta $\leq 20$ % pelkän kiviaineksen massasta.
Moreenimaajit	Koostuvat lajittumattomasta, sekä hienoja että karkeita rakeita sisältävästä maa-aineksesta.

Taulukko 2. Kivennäismaajien lajitteet ja raekoot.

Päälajite	Alalajite		Rakeiden läpimitta (mm)
Nimi	Lyhenne		
Savi	Sa		< 0,002
Siltti	Si		0,002–0,06
	hSi	Hieno siltti	0,002–0,006
	keSi	Keskisiltti	0,006–0,02
	kaSi	Karkea siltti	0,02–0,06
Hiekka	Hk		0,06–2,0
	hHk	Hieno hiekka	0,06–0,2
	keHk	Keskihiekka	0,2–0,6
	kaHk	Karkea hiekka	0,6–2,0
Sora	Sr		2,0–60,0
	hSr	Hieno sora	2,0–6,0
	keSr	Keskisora	6,0–20,0
	kaSr	Karkea sora	20,0–60,0
Kivet	Ki		60–600
	pKi	Pienet kivet	60–200
	sKi	Suuret kivet	200–600
Lohkareet	Lo		> 600

## Tärinään ja sen leviämiseen liittyvät maaparametrit

Tärinän kannalta olennaisimmat maapohjaominaisuudet ovat maalajin ja sen rakeisuuden lisäksi maan ja maakerrosten

- tiiveys ja lujuus
- kimmomoduuli
- vesipitoisuus.

Näillä ominaisuuksilla maapohja voidaan hyvinkin luokitella edelleen tärinäongelman arvioinnin kannalta. Perussääntöinä voidaan mainita seuraavat lähtökohdat:

- 1) Karkearakeisilla maalajeilla maan jäykkyys kasvaa sen tiiveyden kasvaessa. Karkearakeisten maalajien jäykkyys, joka ilmaistaan kimmo- ja leikkausmoduulina, on pääsääntöisesti aina hienorakeisia maalajeja suurempi. Karkearakeisten maalajien vesipitoisuus on tyypillisesti 5...40 %. Vesipitoisuus on veden määrä suhteessa kuiva-aineksen määrään, ilmaistuna painoprosentteina. Karkearakeisten maalajien sisäinen vaimennus (värähtelyssä maahan sitoutunut energia, joka muuttuu maassa lämmöksi) on usein hienorakeisia maalajeja suurempi.
- 2) Hienorakeisilla maalajeilla maalajia kuvataan tiiveyden sijasta suljetun lujuuden avulla. Mitä suurempi on suljettu leikkauslujuus, sitä suurempi on myös jäykkyys. Vesipitoisuudet ovat tyypillisesti 20...140 %. Vesipitoisuus lisääntyy pääsääntöisesti savilajitepitoisuuden kasvaessa, koska hienoainesrakenteen pinnalle absorboituu sitä enemmän vettä, mitä pienempi on raekoko. Vesipitoisuus lisääntyy myös savessa olevan humusaineksen määrän kasvaessa. Humuspitoista savea kutsutaan liejusaveksi. Maan vesipitoisuuden kasvaessa maan jäykkyys ja lujuus yleensä pienenevät.
- 3) Humuspitoisuuden kasvaessa yli 20 % maalajia kutsutaan eloperäiseksi maalajiksi. Tyypillisiä eloperäisiä maalajeja ovat turpeet, joiden ominaisuuksia säättää merkittävästi niiden maatumisaste (myös turpeen alkuperäisen sammaltyypin laji, kuidun lujuus ja määrä). Turpeiden vesipitoisuudet voivat nousta 800...1 000 %:iin.

## Ominaisuuksien määrittäminen

Maalajien tiiveys ja lujuus määritetään tavallisesti likimäärin kairauksin (paino-, heijari- ja puristinkairaus). Pehmeimpien, hienorakeisten maalajien lujuus määritetään yleensä siipikairauksin, joilla lujuus mitataan suoraan maassa. Tiiveydet ja lujuudet voidaan mitata myös häiriintymättöminä maasta otetuista näytteistä laboratorioissa. Ominaisuuksien määrittämisestä on ohjeita mm. Suomen geoteknillinen yhdistys ry:n julkaisuissa (<http://www.sgy.fi/>).

Dynaamisia ominaisuuksia voidaan määrittää maastossa luotettavimmin seismisen aallon etenemisnopeuden ja maan tiheyden perusteella. Menetelmät ovat suhteellisen harvoin Suomessa käytettyjä. Menetelmiä ovat mm. cross-hole-mittaus, down-hole-mittaus sekä nk. SASW-mittaus (Spectral analysis of seismic waves). Niillä pyritään mittaamaan leikkausaallon ja pinta-aallon etenemisnopeudet suoraan maasta. Leikkausaallon etenemisnopeudesta määritetään nk. initiaalileikkausmoduuli  $G_0$ , joka on maan leikkausjäykkyys silloin, kun muodonmuutokset ovat erittäin pieniä. Moduuli pienenee muodonmuutosten kasvaessa, jolloin saman materiaalin jäykkyys on erilainen esimerkiksi radan alla (suurehkot muodonmuutokset) ja radan vierellä (pienet, vain värinäaallon aikaansaamat muodonmuutokset). Maalajien jäykkyys kasvaa myös vallitsevan jännitystilän – maan painon aikaansaaman jännityksen – kasvaessa. Siten syvällä maassa maa käyttäytyy jähkemmin kuin sama maa maan pinnalla.

Leikkausmoduuli voidaan laskea kaavalla

$$G_0 = \rho v_s^2, \quad (1)$$

missä  $\rho$  on maan tiheys ja  $v_s$  maassa mitattu leikkausaallon nopeus.

Kimmomoduli (initiaalikkimmomoduli  $E_0$ ) saadaan leikkausmoduulista yksinkertaisesti Poisson-luvun  $\nu$  avulla kaavasta

$$E_0 = 2(1+\nu)G_0. \quad (2)$$

Poisson-luku voidaan mitata maastossa ja laboratorioissa, mutta yleensä se tyydytään arvioimaan pelkästään maalajin perusteella.

Leikkaus- ja kimmomodulille esiintyy maadynamiikan kirjallisuudessa lukuisia empirisiä arviointimenettelyjä, jotka perustuvat maapohjan tavanomaisissa pohjatutkimuksissa määritettävien ominaisuuksien määrittämiseen.

Maapohjan jäykkyys karkearakeisilla maalajeilla riippuu merkittävimmin

- maan huokosluvusta ( $e$ ) ja tiiveydestä (suhteellinen tiiveys  $D_r$ )
- maapohjan vallitsevasta, staattisesta jännitystilasta ( $\sigma_m$ )
- rakeisuudesta
- tärinän aikaansaamasta muodonmuutostasosta ( $\gamma$ ).

Hienorakeisilla maalajeilla maapohjan jäykkyys riippuu

- huokosluvusta ( $e$ )
- maapohjan vallitsevasta, staattisesta jännitystilasta ( $\sigma_m$ )
- ylikonsolidoitumisasteesta (OCR)
- vesipitoisuudesta ( $w$ )
- juoksevuus- ( $I_L$ ) ja plastisuusluvusta ( $I_p$ )
- tärinän aikaansaamasta muodonmuutostasosta ( $\gamma$ ).

Maan sisäinen vaimennus riippuu periaatteessa samoista ominaisuuksista kuin jäykkyyskin. Karkearakeisilla maalajeilla vaimennukseen vaikuttaa lisäksi maan vesipitoisuus (sekä vedellä kyllästymisen asteesta  $S_r$ ).

Pohjatutkimusmenetelmät, joilla voidaan arvioida em. ominaisuuksia, ovat tarpeen dynaamisten ominaisuuksien määrittämisessä.

Eri maapohjatyypin ominaisuuksien tyypillisiä vaihtelualueita annetaan seuraavan kohdan taulukossa 3.

## Vaimennus

Kokonaisvaimennus (tärinän amplitudin pienenemisen kuvaussuure) muodostuu kahdesta osasta: geometrisesta amplitudin pienenemisestä ja hystereettisestä eli sisäisestä vaimennuksesta. Geometrisella vaimennuksella huomioidaan täryaallon geometrisen leviämisen aikaansaama energiaintensiteetin pieneneminen etäisyyden kasvaessa herätepisteestä. Analyttisissä menettelyissä kokonaisvaimennus kuvataan yleensä maan pinnalla vaikuttavan pinta-aallon eli Rayleigh-aallon vaimennuksena, jolloin

$$\frac{A_2}{A_1} = \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^\beta \cdot e^{\alpha(r_1-r_2)}, \quad (3)$$

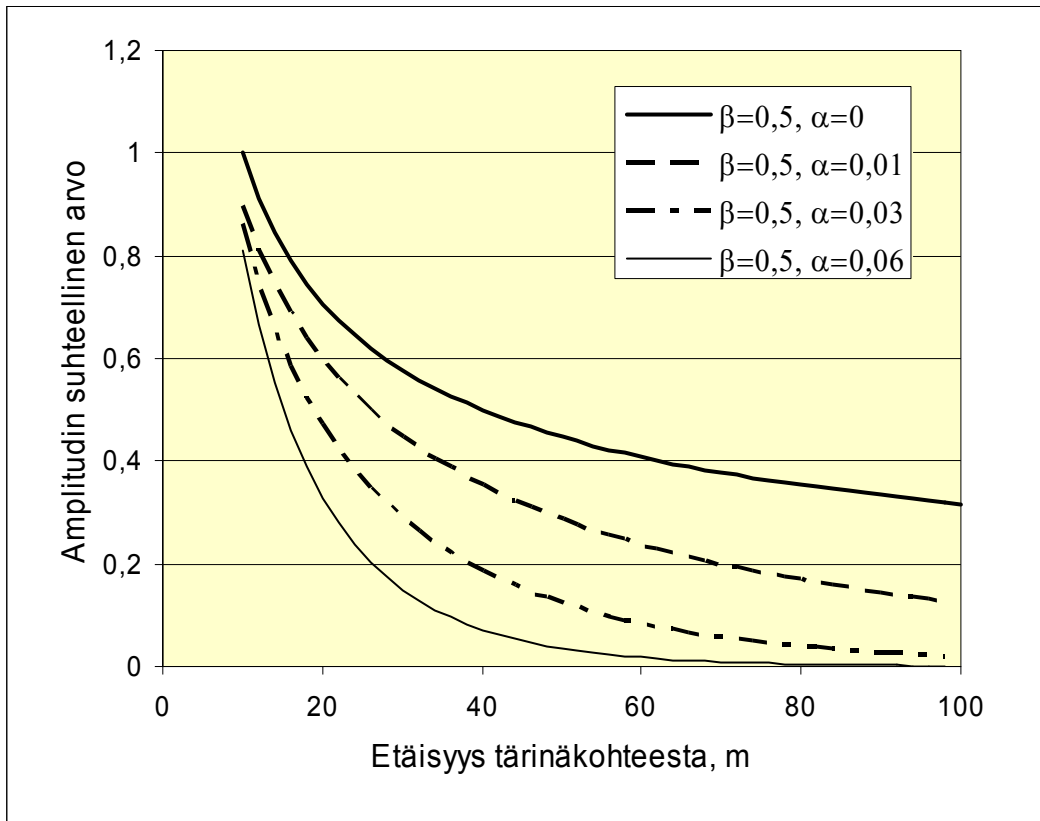
jossa  $A_1$  on tärinäamplitudin suuruus etäisyydellä  $r_1$  tärinäkohteesta ja  $A_2$  on tärinäamplitudin suuruus etäisyydellä  $r_2$  tärinäkohteesta. Kaavan oikean puolen ensimmäinen tekijä (eksponentti  $\beta$ ) kuvaa geometrista vaimennusta ja toinen tekijä (eksponentti  $\alpha$ ) sisäistä vaimennusta.

Rayleigh-aallon teoreettinen (kimmoisassa puoliavaruudessa pätevä) geometrisen vaimennuksen tekijä  $\beta$  on 0,5. Muille aaltomuodoille (puristusaalto, leikkausaalto, Lovenaalto jne.) vaimennustekijä on R-aallon vaimennustekijää suurempi, mistä johtuen kauempana kohteesta R-aalto muodostuu tärinän suuruuteen merkittävimmin vaikuttavaksi aaltomuodoksi. Geometrinen vaimennus on helposti mielletävissä, kun kuvitellaan veden pudotetun kiven aikaansaamaa ja veden pinnalla leviävää aallon pienentymistä etäisyyden kasvaessa.

Sisäiseen muodonmuutostyöhön sitoutuva amplitudin pienentyminen kuvataan yleensä suhteellisena vaimennuksena taikka absorptiokertoimena  $\alpha$ . Absorptiokerroin kuvaa täryaallon metrin etenemää kohden tapahtuvaa pienentymistä. Absorptiokertoimen arvo ja  $\alpha$  eri maapohjatyypeille esitetään taulukossa 3.

Geometrisen vaimennuksen kaltainen amplitudin pienentyminen tapahtuu aaltorintaman läpäistessä jäykkyyseroiltaan erilaisten maakerrosten rajapinnan. Toisaalta ao. rajapinnoissa voi tapahtua myös paikallista amplitudin vahvistumista aaltojen heijastumisten sekä mahdollisen interferenssin johdosta. Todelliset maapohjasuhteet harvoin, jos koskaan, vastaavat kaavan (3) taustalla olevaa olettamusta maan homogeenisesta ja isotrooppisesta jatkumosta. Tästä syystä analyttiset menetelmät tärinän leviämisen arvioinnissa ovat aina yksinkertaistettuja ja arviointi on likimääräistä. Toisaalta jos maapohjasuhteita ei numeerisia menetelmiä sovellettaessa tunneta tai mallinneta tarkasti, arviointi ei johda juuri analyttisiä arviointimenetelmiä parempaan tulokseen.

Kaavan (3) perusteella havaitaan, että sekä geometrisen että hystereettisen vaimennuksen merkitys on värinän kulkeutumisen arvioinnin kannalta olennainen. Kuvassa 2 esitetään amplitudin pienentyminen pinta-aallossa eri absorptiokertoimen arvoilla  $\alpha$  (0, 0,01, 0,03 ja 0,06), kun geometrisen vaimennuksen tekijä  $\beta$  on 0,5.



Kuva 2. Värinäamplitudin suhteellinen pienentyminen geometrisen ja hystereettisen vaimennuksen johdosta, kun lähtökohtana on kimmoisen puoliavaruuden pinnalla oleva pistemäinen herätelähde. Laskenta on tehty siten, että pelkän geometrisen vaimennuksen vaikutuksesta aiheutuvan amplitudin arvo on etäisyydellä 10 m asetettu vastaamaan arvoa 1,0.

Taulukko 3. Maapohjatyypien ominaisuuksia.

Maapohjatyyppe	Suljettu leikkauslujuus (kPa)	Painokai-rausvastus (puolikierronta/1 m)	Leikkausaallon etenemisnopeus $v_s$ , (m/s)	Kimmoduuli pienillä muodonmuutostasoilla (liukuma $\gamma < 10^{-4}$ , MPa)	Sisäinen vaimennus pienillä muodonmuutostasoilla (liukuma $\gamma < 10^{-4} \dots 10^{-5}$ ) ja keskimääräisessä jännitystilassa $\sigma_m = 100$ kPa (absorptiokerroin $\alpha$ )	Poissonin luku
Pehmeä savi, vesipitoisuus 50...120 %	< 10	< 10	< 80	< 3	0,01...0,04	0,45...0,5
Pehmeä savi	10...25	10...30	80...120	3...5	0,02...0,04	0,45...0,5
Sitkeä savi	25...50	30...50	100...200	4...10	0,03...0,06	0,3
Kova savi	50...100	50...100	150...400	10...100	0,05...0,07	0,3
Löyhät väli-maalajit (siltit, silttiset hiekat)	30...70 (menetelmä epäluotettava)	20...80	80...250	15...40	0,02...0,05	0,2...0,4
Tiiviit väli-maalajit (siltit, silttiset hiekat)	(menetelmä epäluotettava)	35...	150...400	20...80	0,01...0,04	0,2...0,4
Löyhät hiekat		50...150	100...200	30...60		0,2...0,35
Tiiviit hiekat ja löyhät keskitiiviit sorat	ei määritettävissä	200...500	150...250	90...180	0,004...0,035	0,2...0,35
Tiiviit sorat ja moreenit	ei määritettävissä	> 200	200...500	400...1 000	0,003...0,06	0,2...0,3
Iskostuneet moreenit	ei määritettävissä	> 300	400...800	1 000...3 000	0,01...0,11	0,3...0,4
Kallio	–	–	> 700	5 000...20 000	0,01	0,45

# Liite B: Yhteenvedo koekohteista mitatuista maaperän värähtelyistä

## Tehdyt mittaukset

Tässä liitteessä esitetään kohdekohtaiset yhteenvedot VTT:n värähtelymittauksista Turussa, Vantaalla, Helsingissä, Jepualla (Uusikaarlepyy) ja Kolpissa (Uusikaarlepyy). Lisäksi tiedoissa on myös Toijalan kohde (<http://www.toijala.fi/Tekninen/Tarinamitt.pdf>), jonka mittaus vastaa pääpiirteiltään VTT:n suositusta (Talja 2004). Helsingin mittaukset koskevat autoliikennettä, muut mittaukset koskevat junaliikennettä.

Mittausjakson pituus oli kaikissa kohteissa vähintään viikko. Mittausjakson aikana mitatuista värähtelyistä määritettiin värähtelyn tunnusluku  $v_w$  (mm/s) VTT:n suosituksen (Talja 2004) mukaan. Lisäksi värähtelyn taajuussisällön kuvaamiseksi määritettiin keskimääräinen värähtelyn tehollisarvo 1/3-oktaavikaistoittain. Taajuussisältö perustuu tunnusluvun määrittämisessä käytettyihin 15 määräävään värähtelynäytteeseen.

## 1. Turun tulokset

Turun mittauskohde sijaitsi Helsinki–Turku-rantaradan varrella. Tutkittavalla alueella pehmeän savikerroksen paksuus on 15–25 m. Radalla liikennöi pääasiassa Pendolino-, InterCity-, pika- ja paikallisjunia, satunnaisesti myös tavarajunia. Mittausjakson aikana tavarajunien kokonaispaino oli alle 1 000 tn. Turkuun saapuvilla junilla on tutkittavalla kohdalla nopeusrajoitus 120 km/h ja lähtevillä junilla 100 km/h. Mittauslinjoja oli yksi, ja se ulottui 220 metrin etäisyydelle radasta.

Suurin värähtely esiintyy pystysuunnassa. Värähtelyn tunnuslukuja 0,6 mm/s ja 0,3 mm/s vastaavat etäisyydet ovat 70 m ja 130 m. Vaakavärähtely on suurimmillaan etäisyydellä 60 m, jolloin värähtelyn tunnusluku on 0,4 mm/s. Vaakavärähtely on suuruusluokaltaan sama sekä radan pituus- että poikittaissuunnassa.

Pystyvärähtelyn suuruus pienenee likimain puoleen, kun etäisyys kasvaa kaksinkertaiseksi. Vaakavärähtelyillä vastaavaa riippuvuutta ei ole nähtävissä.

Suurimmat värähtelyt aiheutuvat yhdistelmästä sepelinpuhdistusharjakone ja raiteen-tukemiskone sekä tavarajunista. Ilman niitä värähtelyn tunnusluku 0,3 mm/s esiintyy



etäisyydellä 50 m. Pelkästään Pendolinoilla, ilman IC- ja pikajunia, arvoa 0,3 mm/s ei ylitettäisi lainkaan.

Värähtelyn merkittävimmät taajuuskomponentit kaikissa suunnissa esiintyvät välillä 4 ja 12 Hz.

## 2. Vantaan tulokset

Vantaan mittauskohde sijaitsi pääradan varrella Hiekkaharjun alueella. Tutkittavalla alueella maaperä on hiekkaa ja hiekkakerroksen paksuus on 10–13 m. Pohjaveden pinta on 2–3 metrin syvyydellä. Radalla liikennöi Pendolino-, InterCity-, pika- ja paikallisjunia sekä tavarajunia. Paikallisliikenteen käyttämällä kahdella itäisimmällä raiteella on nopeusrajoitus 80 km/h. Keskimmaisella raiteella (junat pohjoiseen) on nopeusrajoitus 140 km/h. Mittauslinjoja oli yksi, ja se ulottui 58 metrin etäisyydelle suurimmat värähtelyt aiheuttavasta raiteesta. Mitatulla tontilla on myös omakotitalo, jonka värähtelyt mitattiin.

Pikajunista ja tavarajunista aiheutuva vaakavärähtely  $v_{w,95} = 0,6$  mm/s esiintyy vielä 40–60 m:n etäisyydellä käytetystä raiteesta. Vaakavärähtely  $v_{w,95} = 0,3$  mm/s ulottuu selvästi mitatun alueen ulkopuolelle. Pystyvärähtely  $v_{w,95} = 0,3$  mm/s esiintyy etäisyydellä 40 m. Pystyvärähtelyä  $v_{w,95} = 0,15$  mm/s vastaava etäisyys ei selviä mittauksista, mutta karkea arvio lienee noin 80 m.

Kaikissa suunnissa maaperän värähtelyn merkittävimmät taajuuskomponentit etäisyyksillä 23–33 m esiintyvät alueella 30–50 Hz. Kauempana väylästä merkittävimmät komponentit jakautuvat laajemmalle taajuusalueelle 10–50 Hz.

Etäisyydellä 33 m raiteesta suurimmat värähtelyt aiheutuvat pikajunista, vaikka mitausjakson aikana on kulkenut paljon myös tavarajunia. Suurimmat 15 tavarajunaa olivat kokonaispainoltaan 1 500–1 900 tonnia.

Etäisyydellä 60 m sijaitsevassa omakotitalossa värähtelyn tunnusluku on vintillä 0,60 mm/s (vaakasuunta) ja alakerrassa 0,18 mm/s (lattia, pystysuunta). Perustuksesta ja maanvaraisesta kelluvasta lattiasta mitatut pystyvärähtelyt ovat noin 60–70 % ja yläkerran vaakavärähtelyt noin 75–85 % maasta mitatuista vastaavista värähtelyistä. Maan pystyvärähtelyyn nähden rakennuksen vaakavärähtelyt ovat kuitenkin 1,8–2,2-kertaiset.

### 3. Jepuan tulokset

Jepuan mittauskohde sijaitsi Seinäjoki–Oulu-radan varrella. Tutkittavalla alueella rautatien kohdalla kova maaperä on 4–6 metrin syvyydellä. Sen päällä maaperä on silttiä, jonka välissä on 1,5–2,5 metrin pehmeä savikerros, joka alkaa syvyydeltä 1–1,5 m. Radalla liikennöi runsaasti sekä henkilö- että tavarajunaliikennettä. Ratatekninen nopeusrajoitus on henkilöjunilla 140 km/h (myös Pendolinot). Tavarajunilla ratatekninen nopeusrajoitus on 120 km/h, kun akselipaino on alle 16 tonnia, ja 100 km/h, kun akselipaino on 16–22,5 tonnia. Mitatut suurimmat nopeudet olivat henkilöjunilla 141 km/h ja tavarajunilla 91 km/h. Mittauslinjoja oli yksi, ja se ulottui 150 metrin etäisyydelle raihteesta. Mitatulla tontilla on myös omakotitalo, jonka värähtelyt mitattiin.

Pystyvärähtelyn tunnuslukuja 0,6 mm/s, 0,3 mm/s ja 0,15 mm/s vastaavat etäisyydet ovat tavarajunilla 40 m, 120 m ja 160 m. Henkilöjunilla vastaavat etäisyydet ovat 30 m, 80 m ja 120 m. Suurin mitattu tavarajuna on painoltaan 3 453 tonnia ja pituudeltaan 604 m.

Huomattava on, että kaikilta etäisyyksiltä mitatut maanpinnan vaakasuuntaiset värähtelyt ovat suuremmat kuin pystysuuntaiset värähtelyt. Vaakasuuntaisista värähtelyistä radansuuntainen värähtely on ainakin etäisyydelle 75 m asti suurempi kuin rataa nähden kohtisuora värähtely. Vaakavärähtelyn tunnuslukuja 0,6 mm/s ja 0,3 mm/s vastaavat etäisyydet ovat tavarajunilla 90 m ja vähintään 160 m. Henkilöjunilla vastaavat etäisyydet ovat 80 m ja 140 m.

Yleensä maaperän värähtelyn merkittävimmät taajuudet ovat alueella 25–60 Hz, mutta kauempana radasta esiintyy myös toinen merkittävä taajuusalue 6–12 Hz.

Etäisyydellä 240 m radasta sijaitsevasta hirsirunkoisesta 1890-luvun talosta mitatut värähtelyt ovat erittäin pieniä mittaustarkkuuteen ja tunnuslukuihin 0,3 mm/s ja 0,6 mm/s nähden. Suurin arvo 0,08 mm/s esiintyy yläkerrassa rakennuksen poikittaissuunnassa. Rakennuksen suurimmat värähtelyt esiintyvät taajuusalueella 6–10 Hz. Rakennuksen läheltä mitattu maaperän värähtelyn suurin tehollisarvo 0,02 mm/s esiintyy sekä vaakaa että pystysuunnassa. Myös maaperän värähtelyissä rakennuksen lähellä painottuu 6–10 Hz:n taajuusalue.

### 4. Kolpin tulokset

Kolpin mittauskohde sijaitsi Seinäjoki–Oulu-radan varrella. Tutkittavalla alueella rautatien kohdalla kova maaperä on 2–5 metrin syvyydellä. Sen päällä maaperä on silttiä, joka pehmenee syvyydellä 1,5–2,0 m. Radalla liikennöi runsaasti sekä henkilö- että ta-

varajunaliikennettä. Ratatekninen nopeusrajoitus on henkilöjunilla 140 km/h (myös Pendolinot). Tavarajunilla ratatekninen nopeusrajoitus on 120 km/h, kun akselipaino on alle 16 tonnia, ja 100 km/h, kun akselipaino on 16–22,5 tonnia. Mitatut suurimmat nopeudet olivat henkilöjunilla 141 km/h ja tavarajunilla 89 km/h. Mittauslinjoja oli yksi, ja se ulottui 150 metrin etäisyydelle raiteesta. Mitatulla tontilla on myös omakotitalo, jonka värähtelyt mitattiin.

Pystyvärähtelyn tunnuslukuja 0,6 mm/s, 0,3 mm/s ja 0,15 mm/s vastaavat etäisyydet ovat kaikilla junilla 20 m, 30 m ja 120 m. Pelkästään henkilöjunilla vastaavat etäisyydet ovat < 15 m, 25 m ja 75 m. Suurin mitattu tavarajuna on painoltaan 3 484 tonnia ja pituudeltaan 639 m.

Huomattava on, että kaikilta etäisyyksiltä mitatut maanpinnan vaakasuuntaiset värähtelyt ovat suuremmat kuin pystysuuntaiset värähtelyt. Vaakasuuntaisista värähtelyistä radansuuntainen värähtely on yleensä suurempi kuin rataan nähden kohtisuora värähtely. Vaakavärähtelyn tunnuslukuja 0,6 mm/s ja 0,3 mm/s vastaavat etäisyydet ovat tavarajunilla 90 m ja 140 m. Henkilöjunilla vastaavat etäisyydet ovat 60 m ja 70 m.

Tavarajunilla merkittävimmät taajuudet ovat kaikilla etäisyyksillä pääasiassa 6–10 Hz:n taajuusalueella. Henkilöjunilla esiintyy kaksi merkittävää taajuusaluetta, 50–80 Hz ja 10–16 Hz.

Etäisyydellä 50 m radasta sijaitsevan 1950-luvun talosta mitattu suurin värähtelyn tunnusluku 0,55 mm/s esiintyy rakennuksen toisessa kerroksessa vaakasuunnassa. Rungon vaakavärähtelyn tunnusluku on 2,1-kertainen perustuksesta mitattuun vastaavaan tunnuslukuun nähden. Maasta 20 m:n etäisyydellä talosta mitatut vaakavärähtelyt ovat 0,17 ja 1,01 mm/s. Ensimmäisen kerroksen lattian värähtelyn tunnusluku on 0,18 mm/s, joka on samaa suuruusluokkaa maasta 20 m:n etäisyydellä talosta mitatun värähtelyn kanssa. Rakennuksen värähtelyt kaikissa mittauspisteissä ja kaikissa suunnissa esiintyvät taajuusalueella 6–10 Hz.

## 5. Helsingin tulokset

Helsingin mittauskohde sijaitsi Suutarilassa. Tutkittavalla alueella maaperä on pehmeää savea ja savikerroksen paksuus on 2–5 m. Alueella kulkee vilkasta bussi- ja kuorma-autoliikennettä. Alueella on nopeusrajoitus 60 km/h. Ajouradan kunto oli hyvä. Mittauslinjoja oli kaksi, ja ne ulottuivat 48 metrin etäisyydelle ajoradan reunasta.

Vaikka maaperätietojen perusteella molemmilta mittauslinjoilta oletettiin saatavan samat tulokset, tulokset erosivat merkittävästi toisistaan. Toisella linjalla määräävä on

pystyvärähtely ja värähtelyn tunnuslukuja 0,6 mm/s ja 0,3 mm/s vastaavat etäisyydet ovat 35 ja 50 m. Merkittävin värähtelyn taajuusalue kaikissa suunnissa on 8–13 Hz.

Toisella linjalla vaakavärähtely on määräävä, mutta värähtely on vähäisempää. Arvoa 0,6 mm/s suurempaa vaakavärähtelyn tunnuslukua ei mitattu, ja vaakavärähtelyn 0,3 mm/s voidaan arvioida esiintyvän vielä etäisyydellä 30 m. Pystyvärähtelyn tunnuslukuja 0,3 mm/s ja 0,15 mm/s vastaavat etäisyydet ovat 10 ja 20 m. Merkittävin värähtelyn taajuusalue on 10–25 Hz.

Koska savikerroksen paksuus on suhteellisen pieni, tien perustamistavalla, rummuilla ja maaperän ominaisuuksien vaihtelulla on suuri merkitys. Suuremmat värähtelyt esiintyvät linjalla, jolla arvioitu savikerroksen paksuus on 3–4 m, ja pienemmät värähtelyt linjalla, jolla arvioitu savikerroksen paksuus on vain 2 m.

Erot bussien, kuorma-autojen ja rekkojen aiheuttamissa värähtelyissä eivät olleet merkittäviä.

## **7. Toijalan mittaustulokset**

Myös Toijalassa on tehty maaperämittauksia VTT Tiedotteen 2278 (Talja 2004) mukaisesti. Mittaukset on tehty savimaa-alueelta, ja suurimman tärinän ovat aiheuttaneet tavarajunat, joiden paino on 1 000–3 500 tonnia. Savikerroksen paksuutta ei mittausraportissa ole ilmoitettu. Mittaukset on tehty kahdelta eri mittauslinjalta etäisyyksiltä 20–160 m.

Mittaustulosten perusteella kummassakin mittauslinjassa radan läheisyydessä kaikkien värähtelysuuntien värähtelytasot ovat lähes samansuuruiset. Kauempana radasta (yli 80 m) pystysuuntainen värähtely on kuitenkin aina poikittaista värähtelyä voimakkaampaa. Eri linjoilta mitatut, pystysuuntaisen värähtelyn tunnuslukuja 0,6 mm/s ja 0,3 mm/s vastaavat etäisyydet ovat 110–120 m ja 140–160 m. Värähtely pienenee suurusluokaltaan puoleen, kun etäisyys kasvaa kaksinkertaiseksi.

Kaikissa mittauspisteissä dominoivat taajuudet olivat 5–11 Hz.

## **Lähdeluettelo**

Talja, A. 2004. Suositus liikennetärinän mittaamista ja luokituksesta. VTT Tiedotteita 2278. Espoo: VTT. 50 s. + liitt. 15 s. Saatavana: <http://virtual.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2004/T2278.pdf>.

# **Liite C: Junaliikenne – Tärinään vaikuttavat tekijät ja laskennallinen arviointi**

## **Tärinän syntymiseen ja leviämiseen vaikuttavat tekijät**

### **Junakalusto**

Junaliikenne on kokonaisuutena tärinän kannalta varsin hankalasti arvioitavissa oleva kokonaisuus. Kuorman välittyminen kiskoihin ja edelleen pölkytyksen kautta radan päällysrakenteeseen, penkereeseen ja pohjamaahan sisältää monia vaikeasti arvioitavia, mutta olennaisesti syntyvän tärinän suuruuteen ja taajuuteen vaikuttavia tekijöitä. Junaliikennetärinän syntyminen ja leviämisen käynnistyminen ei yksinkertaisilla tavoilla ja yleispiirteisillä tiedoilla ole 50...100 %:n virhetasoa paremmin arvioitavissa.

Junakalusto erityisesti tavaraliikenteen kuljetuksessa vaihtelee suuresti kuljetettavasta tavarasta riippuen. Tavaravaunutyyppejä on kymmeniä erilaisia niin kotimaisessa kuin transitoliikenteessäkin. Jokaisella on omat telivälinsä, jousituksensa ja vaunurungon omat dynaamiset ominaisuutensa. Juna muodostetaan kuljetustarpeen mukaan, jolloin siinä oleva kalusto, kuormituksen täyttöaste ja kaluston kunto vaihtelevat laajasti. Jokainen juna on siten lopulta myös tärinäherätteenä oma ainutkertainen kokonaisuutensa.

Junilla radan itsensä tärinän voimakkuuteen vaikuttavat kiskoon kohdistuvat dynaamiset pysty- ja vaakasuuntaiset voimat. Myös nämä voimat vaihtelevat riippuen junan nopeudesta, staattisista akselipainoista, akselien jousituksista, pyörän ja kiskon kunnosta sekä kiskon suoruudesta. Pyörissä tai kiskoissa esiintyvä erityisen voimakas kuluneisuus, lovipyörät ja vaihteet voivat merkittävästi kasvattaa radan tärinän tasoa hyväkuntoiseen rataan ja kalustoon verrattuna.

Olennaisimmat kalustosta ja liikennöinnistä riippuvat – yksinkertaistetut – tärinän tekijät ovat kuormituksen suuruus, junanopeus ja telivälit. Kuormituksen suuruus – akseli- ja telipainot – vaikuttaa paikalliseen radan taipumaan ja siten lähes suoraan tärinän suuruuteen. Yksinkertaistetuissa laskentamalleissa on käytetty selittävänä tekijänä junan kokonaismassaa, jonka on havaittu vaikuttavan ympäristötärinän suuruuteen. Kokonaismassalla on erityinen merkityksensä laaja-alaisilla, paksuilla pehmeiköillä, joissa tärinä syntyy pitkän junan eri osien yhteisvaikutuksesta junan eri vaunujen aikaansaaman tärinän yhdistyessä etäisyydessä. Olosuhteissa, joissa maasto-olosuhteet vaihtelevat pienpiirteisesti, junan kokonaismassaa paremmin tärinää kuvaava tekijä lienee kuitenkin kuormitusintensiteetin maksimi. Esimerkiksi raskasta junaa vetävät kolme perättäistä veturia voivat yksinään aikaansaada suuremman ympäristötärinän kuin junan vaunut.

Junan nopeus ei myöskään ole yksiselitteinen tärinän selittäjä, vaikka yleensä tärinä kasvaa suoraan junan nopeuden kasvaessa. Junan nopeus, teliväli ja ratarakenne-maapohja-kokonaisuus säätelevät tärinän suuruutta ja taajuussisältöä, jolloin paikkakoh-  
taisia poikkeamia perussääntöön esiintyy.

## **Ratarakenne ja radan kunto**

Radan päällysrakenteen ja -penkereen yhteistoiminta junakaluston kanssa ratkaisee, kuinka tärinä välittyy maapohjaan taikka radan perustuksiin. Mitä pienempi on junan telin aikaansaama jännitys maapohjassa, sitä pienempi on maapohjan muodonmuutos. Mitä pienempi on maapohjan dynaaminen muodonmuutos, sitä pienempi on myös tärinäheräte.

Pölkytyksen merkitys tärinän syntymiseen ei ole yksiselitteinen. Pääsäännöksi voidaan olettaa, että jäykkä betonipölkky jakaa kuormaa tehokkaammin kuin puupölkky ja sitä kautta pienentää tärinäherätettä. Betonipölkky toisaalta siirtää suuremman jäykkyytensä johdosta tehokkaammin korkeita taajuuksia kuin joustavampi puupölkky. Koska radan vieressä oleva maapohja säätelee ympäristöön leviävän tärinän taajuutta, voidaan arvioida, että pölkytyyppin merkitystä ei voida arvioida ottamatta huomioon myös maapohjasuhteita. Koska pääsääntöisesti korkeat taajuudet vaimenevat maapohjassa matalia taajuuksia nopeammin, betonipölkyn korkeampi ominaistaajuus edesauttaa tärinän vaimentumista.

Radan lähialueella, noin 30 metrin etäisyydelle radasta, ratapölkkyväli 61 cm näkyy korkeiden taajuuksien herätteessä. Junan nopeus jaettuna ratapölkkyvälillä on taajuudessa yksi nouseva kohta. Kauempana radasta junanopeuden ja telivälin suhteen määräävä herätetaajuus sekä maapohjan ominaistaajuudet ja sen monikerrat pyrkivät pölkkyvälin säätelemää taajuutta dominoivammaksi ja alkavat näkyä myös ympäristöön leviävän tärinän taajuussisällössä.

Kiskon selän tasaisuus säätelee, samoin kuin teilläkin, syntyvän dynaamisen kuorman suuruutta. Tämä on voitu osoittaa myös tilastollisesti käsitellyin mittauksin. Koska radan kunnossapidotaso vaikuttaa olennaisesti radan pituussuuntaiseen tasaisuuteen, myös kunnossapidolla ja sen tiheydellä on oma vaikutuksensa tärinään. Toisaalta rata-alueen pohjasuhteiden tärinän syntymistä edesauttaviin ominaisuuksiin ei pystytä vaikuttamaan kunnossapidollakaan. Viimeaikaisten havaintojen ja teoreettisten tarkastelujen perusteella pölkytyksen joustot suhteessa ratarakenteen tukikerrokseen ovat merkittävä tärinää synnyttävä erillistekijä.

Tukikerroksesta irti oleva pölkky iskeytyy junan ylittäessä alustaansa ja aikaansaa herätelupulssin. Ratarakenne ei ole – varsinkaan vanhimmilla rataosilla – perustettu routimat-  
tomasti, jolloin ratarakenne elää talvella ja kiskon selän siirtymät oikaistaan ensimmäi-  
sen kerran keväällä kunnossapitotoimenpitein. Koska kisko-pölkky-tukikerros-  
kokonaisuus kuitenkin elää jatkuvasti myös lämpimänä vuodenaikana, kunnossapidon  
tiheydellä vaikutetaan pölkkyjen kiinnittymisen jäykkyyseroihin ja siten viime kädessä  
myös tärinäherätteeseen.

Radoilla pelkkä pystysuuntainen jäykistäminen ei aina ole riittävää toimenpide tärinän  
pienentämiseen, vaan rataa tulisi pehmeiköillä jäykistää myös vaakasuuntaisesti. Var-  
teenotettavia vaikutuksia saavutetaan siten vasta paaluttamalla tai maapohjaa vahvista-  
malla. Menettelyt ovat varsin kalliita toimenpiteitä. Toisaalta rakenteen jäykistäminen  
saattaa olla kustannustehokas tapa silloin, kun väylän läheisyydessä on paljon tärinästä  
kärsiviä rakennuksia ja ihmisiä.

## **Pohjamaan merkitys**

### **Tärinän vaikutusalue eri maalajeilla**

Värähtelyn suuruuteen eri etäisyyksillä radasta vaikuttaa erityisesti maaperän pehmeim-  
pien kerrosten dynaaminen kimmokerroin, joka on vuorosuhteessa maaperän lujuuteen.  
Rakenteellisen lujuuden perusteella maalajeja kutsutaan hyvin pehmeiksi, pehmeiksi,  
sitkeiksi, koviksi tai hyvin koviksi. Maakerrosten rakenteellista lujuutta hienorakentei-  
sillä maapohjilla kuvataan yleensä maakerroksen leikkauslujuuden avulla.

Kauimmaksi liikennetärinän vaikutusalue ulottuu hienorakeisissa hyvin pehmeissä tai  
pehmeissä kivennäismaalajeissa (savi, siltti) sekä pehmeissä eloperäisissä maalajeissa  
(turve, lieju), joilla suljettu leikkauslujuus on alle 25 kN/m<sup>2</sup>. Kovissa kivennäismaala-  
jeissa vaikutusalue on pienempi. Pienin liikennetärinän vaikutusalue on kovissa kar-  
kearakenteisissa kivennäismaalajeissa (sora, hiekka) ja moreenimaalajeissa (silttimoreeni,  
hiekkamoreeni, soramoreeni) sekä kalliossa.

Merkittävin ympäristöön leviävän tärinän suuruuteen vaikuttavista tekijöistä on maa-  
pohjan laatu – niin väylärakenteen alla, sen vierellä kuin rakennusalueellakin. Turpeis-  
sa, pehmeissä savissa ja osin myös löyhissä silteissä tärinä leviää pitkälle. Tämä johtuu  
siitä, että veden kyllästämissä pehmeissä maissa maan sisäinen tärinän vaimennus on  
karkearakeisia maita pienempi, leviävä värähtely muodostuu heikosti vaimentuvista,  
matalista taajuuksista ja itse herätepoikkeama radan tai tien pohjassa on alun perinkin

suuri. Pehmeiköillä maapohja voi lisäksi joutua pitkällä junilla resonanssinomaiseen interferenssiin.

Karkearakeisilla maapohjilla – hiekoista moreeneihin – tärinän leviäminen on edellä mainittuja hienorakeisia ja eloperäisiä maapohjia merkittävästi pienempää. Kalliopohjilla tärinän suuruus on merkityksetöntä lähes aina jo välittömästi väylän vierellä. Ongelmaksi voi kallioalueilla muodostua kuitenkin kalliota pitkin leviävä runkoääni, joka usein mielletään myös tärinäksi.

Maapohjan laadulla, sekä radan alla että raiteen vierellä, on suuri merkitys paitsi värähtelyn leviämisen vaimentumiseen, myös ympäristöön välittyvän värähtelyn taajuuteen. Pehmeissä ja paksuissa maakerroksissa välittyvät hyvin matalat taajuudet 2...8 Hz. Jäykistä ja ohuista maakerroksista muodostuneilla alueilla dominoiva taajuus on yleensä korkeahko 8...40 Hz. Korkeat taajuudet, yli 50...60 Hz, suodattuvat yleensä pois maan sisäisen vaimennuksen johdosta jo suhteellisen lähellä rataa.

### Tärinän vaimeneminen maapohjassa

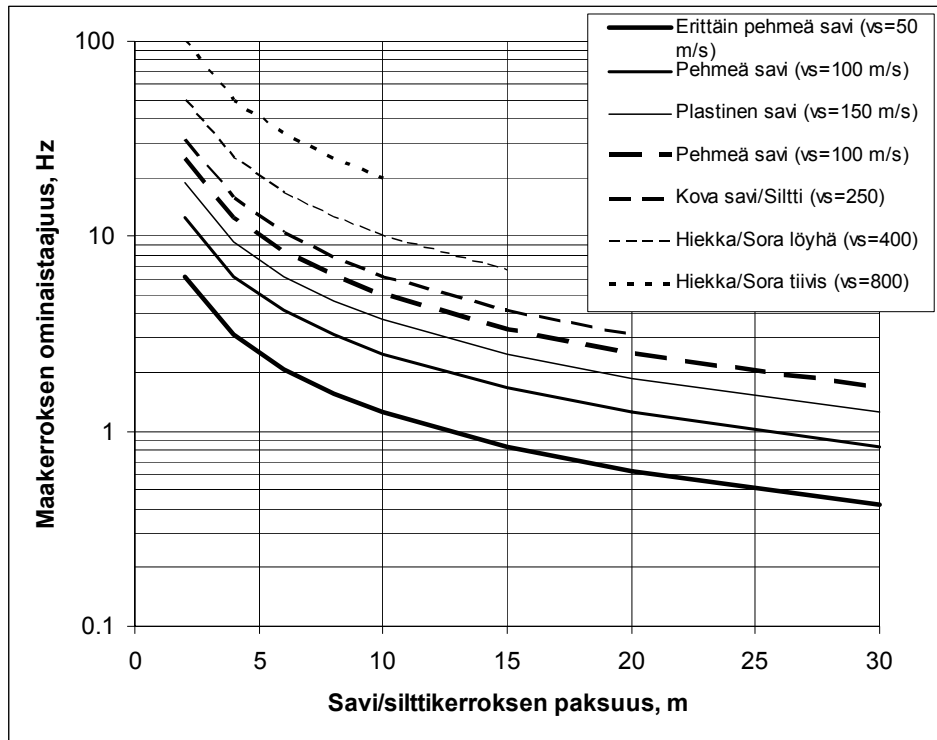
Tärinän vaimeneminen riippuu pääasiassa maaperän tyypistä, mutta myös herätelähteestä ja tarkasteltavasta etäisyydestä. Vaimentuminen riippuu geometrisesta vaimennuksesta ja hystereettisestä vaimennuksesta. Vaimennuksen merkitystä tarkastellaan tämän julkaisun liitteessä A.

### Tärinän taajuus maapohjassa

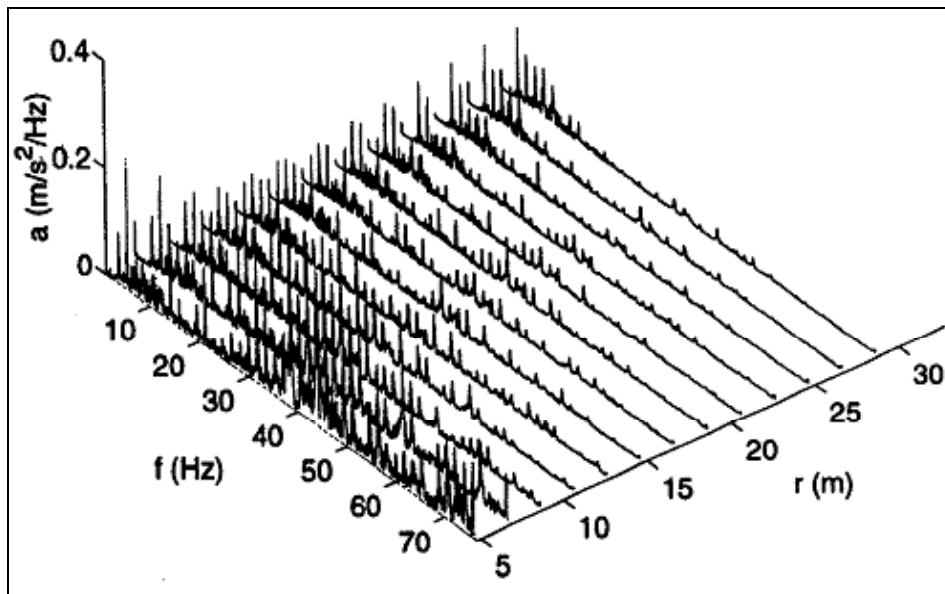
Leviävän tärinän likimääräinen, maapohjasta riippuva dominoiva taajuus voidaan arvioida kuvasta 1. Mikäli maapohjassa on useita tasapaksuja kerroksia, esim. 5 m pehmeä savi ( $f_0$ , dominoiva taajuus 2,5 Hz) ja 10 m hiekkakerros (dominoiva taajuus 10 Hz), nämä molemmat taajuudet voivat esiintyä. Kuvaan 1 on laskettu tyypillisiä maapohjien ominaistaajuuksia.

Maan pinnalta mitattavassa tärinässä osa taajuuksista johtuu junan ja ratapenkereen ominaisuuksista ja osa maapohjan ominaisuuksista. Lähellä rataa junan ja penkereen ominaisuudet ovat pääsääntöisesti merkittävimmin taajuussisältöön vaikuttavia, mutta etäämmällä radasta nousevat maapohjan ominaisuuksien vaikutukset merkittävimpiin asemaan (kuva 2). Paksuilla ja pehmeillä maapohjilla matalat taajuudet voivat olla dominoivia jo välittömästi radan vierellä, jos juna on aikaansaanut koko pehmeikköalueen laaja-alaisen värähtelyn maapohjan ominaistaajuuksilla.





Kuva 1. Maapohjan alimman, vallitsevan taajuuden arviointi kerrospaksuuden ja maalajin avulla.  $v_s$  on leikkausaallon etenemisnopeus.



Kuva 2. Esimerkki etäisyyden ( $r$ ) vaikutuksesta eritaajuuksisten ( $f$ ) värähtelykomponenttien suuruuteen. Mittaustulokset tavarajunasta, kun kyseessä on pehmeä, noin 40 m syvä savikerros (Jonsson 2000).

## Laskentamalli tärinän suuruuden arvioimiseksi

Laskentamalli perustuu Norjassa kehitettyyn puoliempiiriseen ennustemalliin (Madshus et al. 1996). Alkuperäinen malli pohjautuu sekä tunnettuihin fysikaalisiin lainalaisuuksiin että Norjassa ja Ruotsissa tehtyihin tärinämittauksiin. Mallia on edelleen korjattu Suomessa saatujen kokemusten perusteella huomioimalla junan kokonaisuudessa yhdeksi muuttujaksi. Mallin puutteena on mm. se, ettei pohjamaan pehmeiden kerrosten paksumutta eikä alueellista ulottuvuutta ole huomioitu mallissa. Malli ei siten huomioi myöskään pohjasuhteiden muuttumista rata-alueelta rakennusalueelle. Tässä esitetyssä muodossa malli soveltuu suhteellisen raskaille junille.

### Perusyhtälö

Pystysuora heilahdusnopeuden maksimin odotusarvo lasketaan maanvaraisesti perustetulle radalle perusyhtälöstä

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

missä

$v_{z,\max}$	on laskennallinen tärinän pystyheilahdusnopeus maan pinnalla halutussa tarkastelupisteessä
$v_{z,15}$	pystysuora vertailuheilahdusnopeus maassa etäisyydellä $D = 15$ m raiteen keskilinjasta
$k_D$	etäisyyskerroin
$k_S$	junan nopeudesta riippuva kerroin
$k_G$	junan painosta riippuva kerroin
$k_R$	radan kunnosta riippuva kerroin.

Vertailuheilahdusnopeus  $v_{z,15}$  määritetään maapohjatyypeittäin taulukosta 1.

Mikäli rataosalla ei ole raskasta tavaraliikennettä, voidaan käyttää henkilöjunien arvoja. Nopeudella yli 160 km/h kulkeville junille arvot tulee tarkistaa tapauskohtaisesti mittauksilla, koska niistä on toistaiseksi varsin vähän mittauksia Suomessa. Pehmeillä maapohjilla on viime vuosina havaittu junien suuriin nopeuksiin liittyvä tärinän kasvu, kun junan nopeus lähestyy maanpinnan pinta-aallon etenemisnopeuden arvoa.

Taulukko 1. Tärinän laskentamallin pystysuora vertailuheilahdusnopeus etäisyydellä  $D_0 = 15$  m raiteen keskeltä. Arvot suluiissa on tarkoitettu henkilöjunille.

Määräävä tärinää johtava maalaji <sup>*)</sup>	Vertailuheilahdusnopeus $v_{z,15}$ (mm/s)	
	Alaraja	Yläraja
Tärinäherkkä koheesiomaa (ljSa, ljSi, Lj)	1,1 (0,7)	1,7 (1,2)
Normaali koheesiomaa (Sa, saSi, Si)	0,7 (0,5)	1,2 (0,9)
Välimaalajit (karkeaSi, hkSi, siHk, hienoHk)	0,4 (0,3)	0,9 (0,6)
Karkearakeinen (Hk, Sr, HkMr, SrMr)	0,3 (0,2)	0,6 (0,4)

<sup>\*)</sup> Maalajiselitykset: ljSa – liejuinen savi, liSa – lihava savi, Lj – lieju, Sa – savi, saSi – savinen siltti, Si – siltti (vastaava geologinen nimike hiesu), karkeaSi – karkea siltti (vastaava geologinen nimike hieta), hkSi – silttinen hiekka (hieta), hienoHk – hieno hiekka, Hk – hiekka, Sr – sora, HkMr – hiekkainen moreeni, SrMr – sorainen moreeni.

Maapohjatyypin raiteen ja rakennuksen välille arvioidaan likimäärin karttatiedon perusteella. Topografiakarttoja ja suurimittakaavaisia yleismaaperäkarttoja luotettavampaa on Geologisen tutkimuskeskuksen luoma maaperäkarttatieto niillä alueilla, joilla se on käytettävissä mittakaavassa 1:20 000 (<http://www.gsf.fi/palvelut/info/kartat/mp1-20000.htm>). Maaperäkarttatietoa tulee pyrkiä täydentämään paikallisin pohjasuhdetiedoin, koska maaperäkarttakuvaukset on aina yleispiirteinen ja maaperätieto kuvaa siinä pelkästään maan pinnan ominaisuuksia.

### Etäisyyskerroin $k_D$

Tarkastelupisteen etäisyys radasta otetaan huomioon etäisyyskerroimen avulla. Etäisyyskerroin lasketaan kaavalla

$$k_D = \left( \frac{D_0}{D} \right)^B, \quad (2)$$

missä

$D_0$  on vertailuetäisyys 15 m

$D$  on tarkastelupisteen etäisyys raiteen keskeltä

$B$  on etäisyyskerroin.

Etäisyyskseenponentti kuvaa sitä, kuinka nopeasti tärinä vaimenee etäisyyden suhteen. Mitä suurempi on eksponentti, sitä nopeammin tärinä vaimenee. Etäisyyskseenponentti voidaan kohdekohtaisesti määrittää tekemällä tärinämittauksia eri etäisyyksillä. Ellei mittauksia ole olemassa, voidaan yleispiirteiseen arviointiin käyttää taulukon 2 ohjearvoja.

*Taulukko 2. Tärinän laskentamallin etäisyyskseenponentti B.*

Maalaji	Etäisyyskseenponentti B	
	Alaraja	Yläaraja
Tärinäherkkä koheesiomaa (ljSa, ljSi, Lj)	0,3	0,6
Normaali koheesiomaa (Sa, saSi, Si)	0,5	1,0
Välimaalajit (karkeaSi, hkSi, siHk, hienoHk)	0,9	1,5
Karkearakeinen (Hk, Sr, HkMr, SrMr)	1,4	2,0
Kallio	2	2

### Nopeuskerroin $k_S$

Junan nopeus otetaan huomioon kertoimella  $k_S$ , joka lasketaan kaavalla

$$k_S = \left( \frac{S}{S_0} \right)^A, \quad (3)$$

missä

$S_0$  on vertailunopeus  $S_0 = 70$  km/h

$S$  on tarkasteltavan junan nopeus

$A$  on nopeusekseenponentti, ohjearvo  $A = 0,9 \dots 1,1$ .

Nopeusekseenponentin arvolla  $A = 1,0$  on junanopeuden ja heilahdusnopeuden yhteys lineaarinen. Matalilla nopeuksilla heilahdusnopeuden on havaittu olevan useimmiten junan nopeudesta riippumaton. Nopeuskerrointa käytetään vain nopeuksilla  $S \geq 70$  km/h. Alemmilla nopeuksilla ei nopeuskerrointa suositella käytettäväksi, jolloin asetetaan  $k_S = 1$ .

## Junan painokerroin $k_G$

Junan paino otetaan huomioon kertoimella  $k_G$ , joka lasketaan kaavalla

$$k_G = \frac{G}{G_0}, \quad (4)$$

missä

$G_0$  on vertailupaino  $G_0 = 2\,000$  tn

$G$  on tarkasteltavan junan kokonaispaino.

## Radan kunnosta riippuva kerroin $k_R$

Radan kunto vaikuttaa ympäristöön leviävän tärinän suuruuteen. Tärinän syntyyn vaikuttaa mm. kiskojen tasaisuus. Maapohjaan syntyvän muodonmuutoksen suuruuteen vaikuttavat penkereen massa ja jäykkyys.

Mikäli kohdekohtaisia tärinämittauksia ei ole tehty, voidaan radan kunnosta johtuva kerroin arvioida seuraavien tyyppillisten arvojen väliltä:

- vanha yksiraiteinen rata,  $k_R = 1,3$
- uusi moniraiteinen rata,  $k_R = 0,7$ .

Edellä mainitut arvot eivät välttämättä ole ääriarvoja. Huonokuntoisella vanhalla radalla kerroin voi olla vielä suurempi kuin edellä esitetty. Uuden radan kerroin voi olla vastavasti pienempikin kuin edellä esitetty.

Suuri penkereen korkeus pienentää syntyvää tärinää pienentämällä maapohjaan syntyvää dynaamista muodonmuutosta. Vaikutuksista ei ole kuitenkaan siinä määrin luotettavaa tietoa, että niitä voidaan varmuudella käyttää arvioinnissa hyväksi. Sen sijaan radan alle tehdyt pohjarakenteet ja pohjavahvistustoimenpiteet, kuten stabilointi ja radan perustaminen paaluille, pienentävät pystysuuntaista tärinää. Niidenkin vaikutuksista on vasta vähän tutkittua tietoa. Paaluille perustaminen pienentää pystysuuntaisen tärinän suuruutta merkittävästi, suuruusluokkaa 60...90 %.

Mikäli käytössä ei ole mittaustuloksia vastaavista pohjasuhteista ja liikenteestä, tulee maankäytön suunnittelussa huomioida perusyhtälön (1) käyttöön sisältyvä epävarmuus käyttämällä varmuuskerrointa  $F$ , jolloin

$$v_{z,\max,mitoitus} = v_{z,\max} \cdot F. \quad (5)$$

Epävarmuus riippuu mm. vaikuttavien tekijöiden määrittystarkkuudesta ja myös siitä, että radan ja rakennusalueen välillä olevan maapohjan vaihtelun merkitystä ei kyetä hyvilläkään lähtötiedoilla täysin hallitsemaan. Myös pitkien junien aikaansaamaa interferenssiriskiä ei ole peruskaavassa huomioitu. Varmuusluvun  $F$  minimiarvo on 1,5 ja suositusarvo 2. Mikäli perusyhtälön kalibrointi on tehty tarkasteltaviin pohjasuhteisiin tärinänmittauksilla, varmuuskerroin voidaan jättää huomioimatta ( $F = 1$ ).

### Asuintilojen tärinän arviointi

Maapohjasta rakennukseen välittyvä tärinä arvioidaan rakennustyyppikohtaisesti kokemusperäisellä suurennussuhteella, jota kuvataan tämän julkaisun kohdissa 3.2 ja 4.5.

Taajuuspainotetun tehollisarvon  $v_w$  likiarvo voidaan arvioida maan pinnan pystysuuntaisesta heilahdusnopeudesta  $v_{z,max}$  kertomalla se luvulla 0,4...0,6. Kerroin riippuu värähtelyn dominoivasta taajuudesta. Kertoimen suuruuden määräytyminen esitetään tämän julkaisun kohdassa 2.2.

## Lähdeluettelo

Jonsson, J. O. 2000. On ground and structural vibrations related to railway traffic. Thesis for the degree of doctor of philosophy (publication S 00:6). Göteborg: Chalmers University of Technology. 172 s.

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), s. 195–203.

# Liite D: Tie- ja katuliikenne – Tärinän syntyminen ja laskennallinen arviointi

## Tärinän syntymiseen vaikuttavat tekijät

Tärinän syntyminen vaikuttaa ajoneuvon pyörä-, akseli- taikka telikuorma lähes suoraan verrannollisesti sen suuruuteen. Siksi raskaan, kertaluokkaa 10 tonnin akselikuormaisen kuorma-auton aikaansaama tärinä on merkittävästi suurempaa kuin 400...800 kg akselikuormaisen henkilöauton. Ajoneuvon nopeus ja kadun epätasaisuus lisäävät tärinää lähinnä sen johdosta, että nopeamman ajoneuvon ylittäessä esimerkiksi tiessä olevan kuopan taikka kaivon kannen pyörän sysäysvoima kasvaa. Voima tien pintaan voi olla lähes kaksinkertainen staattiseen pyöräkuormaan verrattuna. Voiman kasvu riippuu ajoneuvon jousituksesta ja vaimennuksesta mukaan lukien renkaiden paineistus ja rengastus ylipäättänsä. Tasaisella tiellä taikka kadulla ajoneuvon nopeudella itsessään on pienempi vaikutus syntyvään tärinään.

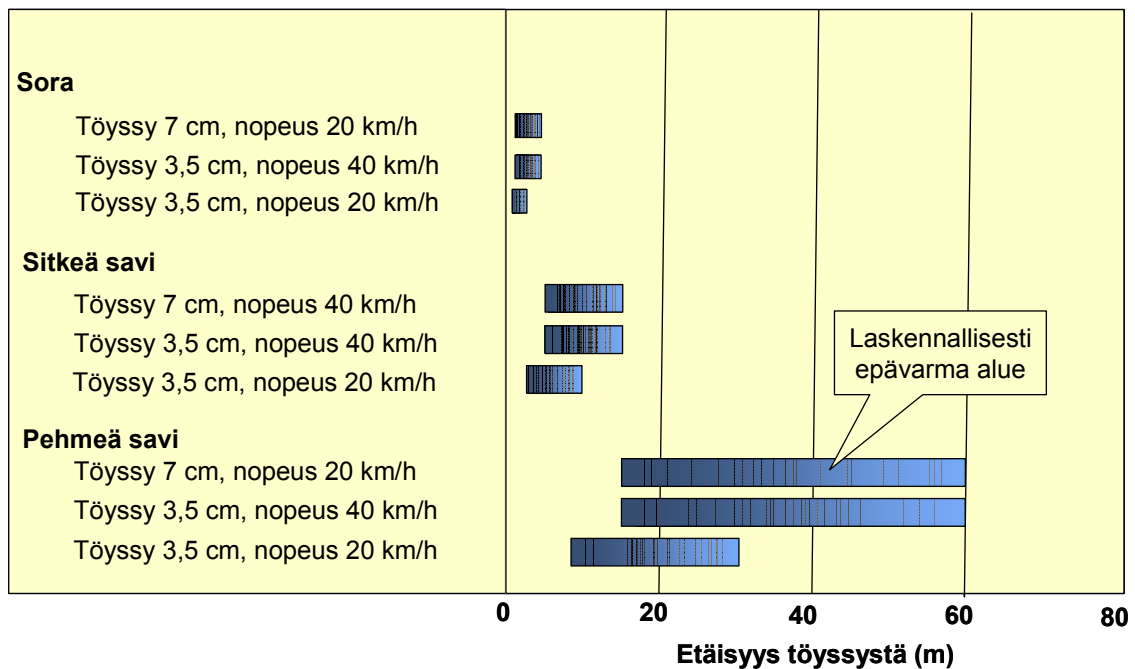
Raskaan ajoneuvon pyörä painaa tavanomaiseen tiehen tai katuun pienen, kertaluokkaa enintään muutaman millimetrin palautuvan, kimmoisen painuman. Painuma kasvaa kuitenkin ohuilla tie- ja katurakenteilla pehmeällä maapohjalla mahdollisesti useisiin millimetreihin. Mikäli tiepohjan jäykkyydet tielinjalla äkillisesti muuttuvat, esimerkiksi tiessä olevien rakenteiden, kuten putkijohtokaivantojen taikka rumpujen vaikutuksesta, pyörän painuma ja myös voima tien pintaan muuttuvat myös alun perin tasaisilla teillä. Pohjasuhteiden muutosvyöhykkeissä, esimerkiksi siltojen tausta-alueilla ja putkijohtojen kohdilla, toistuva liikenne yleensä asteittain aikaansaa myös pysyviä tasaisuuden muutoksia, mikä edelleen kasvattaa epätasaisuuskohtaan kohdistuvia kuormia ja sitä kautta syntyvää tärinää.

Raskaiden ajoneuvojen jousituksen ja iskunvaimennuksen aikaansaama ajoneuvon pyörän värähtelyn ominaistajuus on kertaluokkaa 10...14 Hz. Ajoneuvon pyörän kohdatessa tien pinnassa olevan epätasaisen kohdan ajoneuvosta maahan syntyvä voimavaikutus oskilloi muutaman kerran ennen vaimentumistaan tuolla ominaisella taajuudellaan. Kuorman vahvistumisen toistuessa aina samalla paikalla tien pintaan saattaa lopulta syntyä pysyviä muodonmuutoksia, jotka toistuvat keskimääräisen ominaistajuuden ja ajoneuvojen keskimääräisen ajonopeuden säätämällä taajuudella tien pinnassa. Esimerkiksi ajettaessa keskimäärin nopeutta 50 km/h, heitot syntyvät tien pintaan keskimäärin 1...1,5 m välein. Sorateillä likimain vastaavaa ilmiötä kutsutaan ”nimismiehen kiharoiksi”.

Pysyvät muodonmuutokset syntyvät sitä nopeammin ja sitä suurempina, mitä pehmeämpi on kadun alapuolella oleva maapohja ja mitä ohuemmat ovat tien päällysrakenteet. Ympäristöön leviävän tärinän herätetaajuudessa ovat tällöin voimakkaampina taa-

juudet 10...15 Hz ja sen monikerrat. Mikäli myös maapohjan ominaistajuus on samalla taajuusalueella, pyrkii värinä vahvistumaan entisestään tuolle taajuudelle.

Katuliikenteessä erityinen värinäriskiä aikaansaava kohta ovat hidastetöyssyt. Mikäli katu hidastetöyssyjen sijoittamisalueella on perustettu pehmeiden maakerrosten varaan, värinä syntyy merkittävämpänä ja leviää pitkälle. Värinän taajuus on myös sitä alhaisempi, mitä paksumpi ja pehmeämpi maapohja on töyssyn alueella. Karkearakeisilla maapohjilla, tiiviillä hiekoilla, sorilla ja moreenimaapohjilla töyssyn aikaansaama värinä on pientä, korkeataajuisista ja siten pienentyy myös ympäristössä nopeasti merkityksettömäksi. Värinän suuruuteen vaikuttaa lisäksi töyssyn korkeus ja muotoilu, ajoneuvot ao. kadulla sekä ajonopeus, jolla töyssy kohdataan. Kuvassa 1 on arvioituja haitallisen värinän leviämistäisyyksiä vanhoilla asuinalueilla.



Kuva 1. Värähtelyluokkaa D vastaava etäisyys töyssystä: laskennallinen, suuntaa antava arvo (Talja 2004).

Kuvasta 1 nähdään, että kun töyssyn korkeus on 7 cm ja sen yli ajetaan nopeudella 20 km/h, vasta yli 60 m:n etäisyydellä voidaan olla suhteellisen varmoja, että luokan D raja ei ylity. Toisaalta voidaan olla melko varmoja, että alle 15 m:n etäisyydellä raja ylittyy. Töyssyn tai ajonopeuden alentaminen puoleen vähentää myös värähtelyt puoleen. Toisaalta töyssyn madaltaminen lisää ajonopeuksia.



Jos pyritään värähtelyluokkaan C, joka on suositus uusille asuinalueille, kuvassa esitetyt laskennalliset arvot tulee kertoa arvolla 2,5. Tällöin pehmeillä savimailla alue, jolla luokan tunnusluku voi ylittyä, voi ulottua pahimmassa tapauksessa jopa noin 200 metriin.

Kaduilla erityisongelmaksi voivat muodostua myös erilaiset kiviverhoilut, erityisesti noppa- ja nupukivet. Sinällään yksittäisen kiven mitat suhteessa pyörän kokoon ja ajoneuvon jousitusjärjestelmän ominaisuuksiin on pieni, jolloin ajoneuvon ja kiveyksen välistä oskillointiriskiä ei pinnaltaan perustasaisella kadulla ole. Ajoneuvon pyörän ja kiveyksen kohtaamisaajuuden korkeudesta johtuen syntyvä värinä on korkeataajuisista ja vaimenee nopeasti.

Puutteellisesti perustetulla kiveyksellä, pehmeällä maapohjalla perustetuilla kaduilla taikka epätasaisesti routivilla kaduilla kiveys aikaansaa kuitenkin riskin paikallisten epätasaisuuksien syntymiseen esimerkiksi kiveyksen painumisen taikka kivien irtoamisen ja rikkoutumisen johdosta. Sidottu sitkeämpi asfalttipäällyste säilyttää yleensä syntyvät epätasaisuuden muutokset jouhevampina kuin kiveys. Myös riittävän paksu sidekivirakenne säilyttää muotonsa sitkeämmin kuin sitomattomat kivet. Toisaalta syntyneen epätasaisuuden korjaaminen on yleensä myös sidekivillä hankalammin poistettavissa tavanomaisella ylläpitotoimenpiteillä.

Raskaan liikenteen kivipintaiset kadut on edellä mainituista syistä perustettava tukevasti ja routimattomasti, ja erityisesti kivien liikemahdollisuudet tulisi minimoida huolellisella alustatyöllä.

Katurakenteen jäätyminen ja sulaminen lisäävät riskiä sekä jäykkyydeltään poikkeavien kohtien syntymiseen katuun että alustan epätasaiseen kantavuuteen niissä kohdissa, joissa jäätyminen ja sulaminen tapahtuvat eriaikaisesti. Katurakenteen putkijohtokaivantojen täyttömateriaalien tulisi siksi vastata mahdollisimman hyvin katurakenteen muiden osien ominaisuuksia, jottei epätasaisuuksia pääsisi syntymään. Lämpöä tuottavat putket – viemärit ja kaukolämpöputket – tulee tarvittaessa lämpöeristää huolellisesti, jotta katurakenne myös talvella säilyttäisi mahdollisimman homogeenisena jäykkyysominaisuutensa. Liikennevirtaan nähden poikittaisilla putkirakenteilla sekä lämpöeristäminen että kadun pintakantavuuden homogeenisena pitäminen ovat erityisen tärkeitä.

Pohjamaan merkitystä värinän syntymiseen ja leviämiseen käsitellään tämän julkaisun liitteissä A ja C.

## Tie- ja katuliikenteen aikaansaama tärinä – laskennallinen arviointi

Kumipyöriäisten raskaiden ajoneuvojen aikaansaaman tärinän leviämiseen on hidastettyssyillä käytetty lähteen (Watts & Krylov 2000) laskentamallia. Tässä esityksessä laskentamallia on laajennettu kuvamaan myös tien muita epätasaisuuksia. Laskentamalla arvioidaan maanpinnan pystysuuntaisen heilahdusnopeuden maksimiarvoa. Tierakenteen päällysrakenteen paksuus on 0,8 m.

### Perusyhtälö

Pystysuora heilahdusnopeuden maksimin odotusarvo lasketaan maanvaraisesti perustetulle radalle perusyhtälöstä

$$v_{z,\max} = 0,006 \cdot a \cdot v \cdot g \cdot p \cdot \left(\frac{r}{6}\right)^x \cdot M, \quad (1)$$

jossa

- a on epätasaisuuden suurin arvo, mm
- g maaperäkerroin (taulukko 1)
- p epätasaisuuden leveys (p = 1, jos epätasaisuus osuu molempien pyörien alle, p = 0,75, jos se osuu vain toisen pyörän alle)
- v ajoneuvon nopeus, km/h
- r tarkastelupisteen etäisyys epätasaisuudesta, m
- x maaperästä riippuva eksponentti, jolla huomioidaan tärinän vaimentuminen (taulukko 1)
- M suurennuskerroin maasta rakennukseen.

Paksut rakennekerrokset pienentävät leviävää tärinää verrattuna ohuisiin rakennekerroksiin. Pehmeissä maapohjissa alusrakenteen painumasuppilo on syvyydeltään suurempi kuin kovilla maapohjilla, mikä on huomioitu maaperäkertoimessa. Epätasaisuutena käytetään taulukossa 2 esitettyjä arvoja, ellei tien tai kadun pinnan epätasaisuutta dynaamisen 50 kN pyöräkuorman alla ole erikseen mittaamalla määritetty.

Taulukko 1. Maaperäkerroin  $g$  ja eksponentti  $x$ . Taulukossa on sovellettu lähdettä (Watts & Krylov 2000).

Maalajityyppi katualueella ja sen vierellä	Maaperäkerroin $g$	Maaperäeksponentti $x$
Pehmeät savet	1,2	-1,1
Kovat savet	0,5	-1,05
Hiekat, sorat	0,3	-0,75
Moreeni	0,2	-0,95
Kallio	0,1	-1,1

Taulukko 2. Epätasaisuuskerroin.

Tien ja kadun laatu	Epätasaisuus $a$ , mm
Uusi AB-päällyste	1...2
Kulunut reikiintymätön AB-päällyste	2...4
Reikiintynyt AB-päällyste	5...10
Nupukivipäällyste	3...8
Sorapäällyste, hyväkuntoinen	4...8
Sorapäällyste, huonokuntoinen	5...15
Koholla oleva rumpu kadussa, koholla oleva taikka painunut kaivon kansi kadussa (suurin ero 5 m:n oikolaudalla mitattuna)	10...20

### Asuintilojen tärinän arviointi

Maapohjasta rakennukseen välittyvä tärinä (kerroin  $M$ ) arvioidaan rakennustyyppikohtaisesti kokemuseräisellä suurennussuhteella, jota on kuvattu tämän julkaisun kohdissa 3.2 ja 4.5.

Taajuuspainotetun tehollisarvon  $v_w$  likiarvo voidaan arvioida maan pinnan pystysuuntaisesta heilahdusnopeudesta  $v_{z,max}$  kertomalla se luvulla 0,4...0,6. Kerroin riippuu vä-

rähtelyn dominoivasta taajuudesta. Kertoimen suuruuden määräytyminen on esitetty tämän julkaisun kohdassa 2.2.

## **Lähdeluettelo**

Talja, A. 2004. Liikenneperäinen tärinä – Kirjallisuusselvitys tärinän arvioinnista. VTT:n sisäinen raportti RTE50-IR-13/2004.

Watts, G. R. & Krylov, V. V. 2000. Ground-borne vibration generated by vehicles crossing road humps and speed control cushions. *Applied Acoustics* 59, s. 221–236.

## Liite E: Esimerkki taajuussisällön vaikutuksesta rakennuksen värähtelyihin

Maaperän eritaajuuksisten värähtelykomponenttien vahvistumiseen tai vaimenemiseen rakennuksessa vaikuttaa olennaisesti resonanssi-ilmiö. Resonanssissa rakenteen tai rakenneosan omalle värähtelytaajuudelle, ns. ominaistajuudelle, sattuvat taajuuskomponentit vahvistuvat voimakkaimmin. Ominaistaajuuteen vaikuttavat rakenteen tai rakenneosan dynaamiset ominaisuudet, jotka riippuvat massa-, jäykkyys- ja vaimennustekijöistä.

### Resonanssi-ilmiö

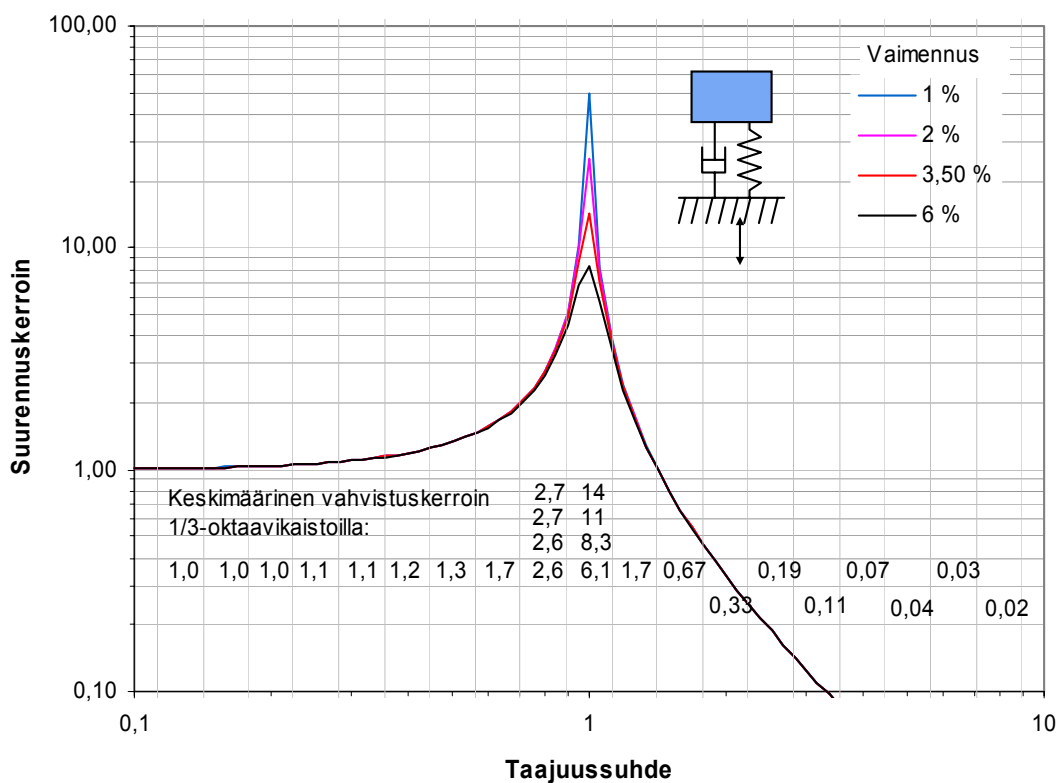
Kuvassa 1 esitetään yhden vapausasteen jousi-massa-systeemiin värähtelyn suurennuskerroin 1/3-oktaavikaistoittain. Suurennuskerroin on massan ja perustuksen siirtymäamplitudien suhde. Kuvasta nähdään, että sillä taajuuskaistalla, jolle rakenteen ominaistaajuus sattuu, keskimääräinen värähtelyn suurennuskerroin saa vaimennuksesta riippuen arvon 6–14. Viereisillä 1/3-oktaavikaistoilla suurennuskerroin on merkittävästi pienempi eikä juuri riipu vaimennuksesta. Olennaista on havaita, että kun tärinän taajuus on pienempi kuin systeemin ominaistaajuus, tärinä välittyy suuruuttaan muuttamatta (suurennuskerroin 1). Kun herätetärinän taajuus ylittää ominaistaajuuden, välittynyt tärinä on herätettä pienempi (suurennuskerroin alle 1).

### Esimerkki

Tarkastellaan esimerkkinä tapausta, jossa perustukseen tulevan värähtelyn taajuussisältö käsittää useita taajuuskomponentteja ja jousi-massa-systeemin ominaistaajuus ( $f$ ) vaihtelee. Jousi-massa-systeemin voi muodostaa esimerkiksi rakennuksen runko tai lattia. Tarkasteltavassa esimerkissä systeemin vaimennuksena käytetään arvoa 3,5 %, joka on tyypillinen rakennuksissa esiintyvä arvo.

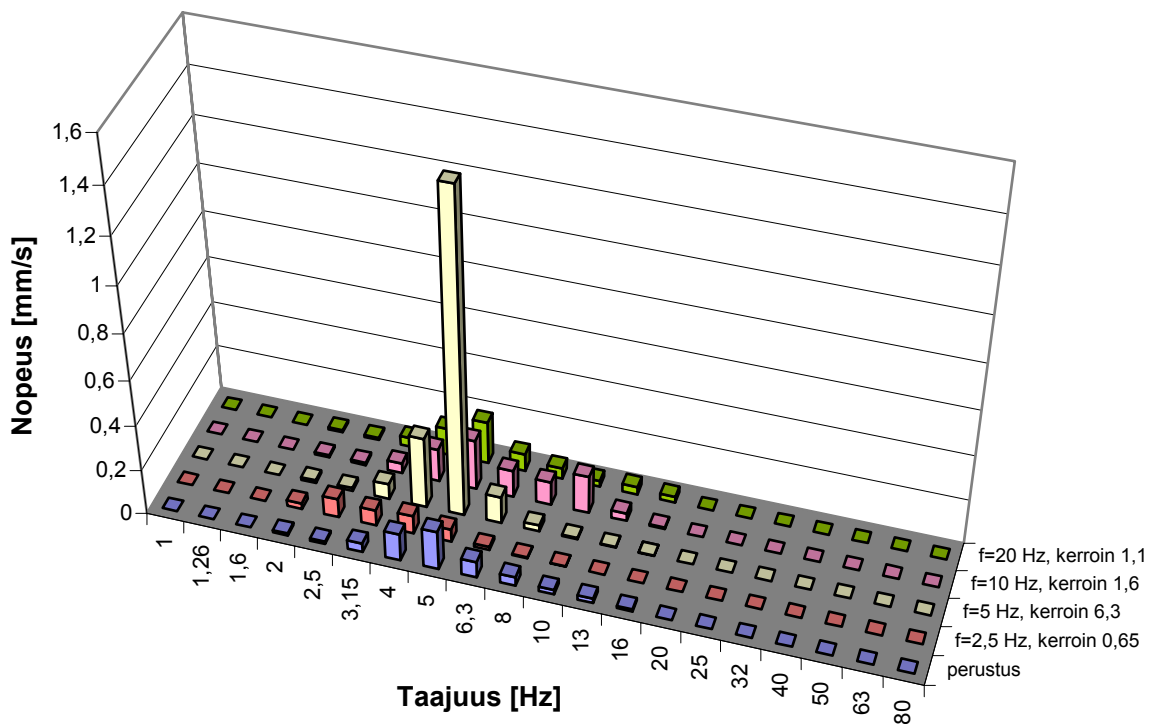
Kuvan 2 ensimmäisellä rivillä esitetään perustuksen värähtelykomponentit 1/3-oktaaveittain. Esitetty taajuusjakauma on tyypillinen savimailla. Muilla riveillä esitetään värähtelyn suuruus, kun jousi-massa-systeemin ominaistaajuus ( $f$ ) on 2,5 Hz, 5 Hz, 10 Hz tai 20 Hz. Kuvassa jousi-massa-systeemin ominaistaajuuden ( $f$ ) perässä esitetty kerroin, ns. suurennuskerroin, on jousen päällä liikkuvan massan värähtelyn  $v_w$  suhde maaperän värähtelyn tehollisarvoon. Koko värähtelyn tehollisarvo  $v_w$  lasketaan eri taajuuskomponenttien tehollisarvoista  $v_{w,i}$  lausekkeella

$$v_w = \sqrt{\sum v_{w,i}^2}. \quad (1)$$



Kuva 1. Esimerkki värähtelyn sisällön muuttumisesta 1/3-oktaaveittain ja vaikutuksesta värähtelyn voimistumista kuvaavaan tehollisarvon kertoimeen, kun jousi-massasysteemin ominaistajuus  $f$  vaihtelee.

Kuvasta 2 ja siinä esitetystä tehollisarvon suurennoskertoimesta nähdään, että jos systeemin ominaistajuus on herätteessä esiintyvien värähtelytaajuuksien ylärajalla ( $f = 20$  Hz), esimerkin tapauksessa perustuksen värähtelyt siirtyvät likimain samansuuruisina massaan. Kun systeemin ominaistajuus sattuu herätevärähtelyn hallitsevien taajuuksien kanssa samalle alueelle ( $f = 5$  Hz), värähtelyn tehollisarvo voimistuu noin 6-kertaiseksi. Jos taas systeemin ominaistajuus on herätteessä esiintyvien värähtelytaajuuksien alarajalla (2,5 Hz), värähtely vaimenee.



Kuva 2. Värähtelyn tehollisarvon muuttuminen jousi-massa-systeemissä, kun sen ominaistajuus vaihtelee (vaimennus 3,5 %). Vaaka-akselilla värähtelyn taajuus 1/3-oktaaveittain, pystyakselilla värähtelyn nopeuden tehollisarvo eri 1/3-oktaavikaistoilla. Oikeassa reunassa koko värähtelyn tehollisarvon suurennuskerroin eri jousi-massa-systeemin ominaistajuuksilla.

