



Asko Talja

## Suositus liikennetärinän mittaamisesta ja luokituksesta



# Suositus liikennetärinän mittaamisesta ja luokituksesta

Asko Talja

VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

ISBN 951-38-6523-1 (nid.)  
ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 951-38-6524-X (URL: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/>)  
ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/>)

Copyright © VTT 2004

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT, Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT  
puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 4374

VTT, Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT  
tel. växel 020 722 111, fax 020 722 4374

VTT Technical Research Centre of Finland, Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland  
phone internat. +358 20 722 111, fax +358 20 722 4374

VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Kemistintie 3, PL 1805, 02044 VTT  
puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 7007

VTT Bygg och transport, Kemistvägen 3, PB 1805, 02044 VTT  
tel. växel 020 722 111, fax 020 722 7007

VTT Building and Transport, Kemistintie 3, P.O.Box 1805, FIN-02044 VTT, Finland  
phone internat. +358 20 722 111, fax +358 20 722 7007

Toimitus Maini Manninen

Otamedia Oy, Espoo 2005

Talja, Asko. Suositus liikennetärinän mittaamisesta ja luokituksesta [Recommendation for measurement and classification of traffic-induced vibrations]. Espoo 2004. VTT Tiedotteita – Research Notes 2278. 50 s. + liitt. 15 s.

**Avainsanat** environmental impacts, traffic, traffic-induced vibration, vibration classification, vibration nuisance, vibration measurements, limit values, residential buildings, design values, instructions

## Tiivistelmä

Ympäristönsuojelulaki (N:o 86/2000) ja ympäristöministeriön asetus pohjarakenteista (RaMK B3, 2004) edellyttävät liikennetärinästä aiheutuvat ympäristöhaitat otettavaksi huomioon. Liikennetärinä ei saa aiheuttaa vaurioita rakennukselle eikä kohtuutonta häiriötä rakennuksessa oleville ihmisille. Tämän julkaisun päätarkoitus on esittää liikennetärinää koskevaa ohjeistusta suunnittelijoille ja päättäjille, jotta liikennetärinästä aiheutuva haitta voidaan ottaa entistä paremmin huomioon yhdyskunta-, liikenne- ja rakennesuunnittelussa.

Tutkimuksessa suositeltu asumisviihtyvyyteen perustuva liikennetärinän luokitus ja luokkien rajat ovat samat kuin Norjan standardissa NS 8176 (1999). Värähtelytarkastelu perustuu standardin ISO 2631-2 (2003) mukaiseen värähtelyn nopeuden taajuuspainotettuun tehollisarvoon. Värähtelyn tunnuslukuna käytetään asuintiloista yhden viikon aikana mitattua tilastollisesti suurinta tehollisarvoa. Käytännössä tunnusluku määritetään 15 liikennevälineestä, jotka ovat aiheuttaneet suurimmat värähtelyt. Vanhoille asuinalueille suositellaan värähtelyluokkaa, jonka raja on 0,6 mm/s. Uusille asuinalueille suositellaan parempaa luokkaa, jonka raja on 0,3 mm/s. VTT:n mittaamasta 16 kohteesta saadut tulokset osoittavat, että NS 8176:ssa esitetyt raja-arvot soveltuvat myös Suomeen. Kaikissa niissä kohteissa, joissa värähtelyn tunnusluku oli suurempi kuin 0,6 mm/s, värähtely koettiin kohtalaisen tai hyvin epämiellyttäväksi. Niissä kohteissa, joissa tunnusluku oli alle 0,3 mm/s, värähtely koettiin enimmillään vain hieman epämiellyttäväksi.

Tutkimuksessa on myös verrattu asuintilojen värähtelyä maanpinnan pystyvärähtelyyn. Mitatuista rakennuksista saatuun kokemukseen perustuen on erittäin epätodennäköistä, että lattian pystyvärähtelyn tai kaksikerroksisen talon toisen kerroksen vaakavärähtelyn tunnusluku olisi yli kaksinkertainen maasta mitattuun värähtelyn tunnuslukuun nähden. Paaluperustuksen havaittiin vaimentavan selvästi rakennuksen pystyvärähtelyä, mutta vaakavärähtelyihin ei paalutuksella havaittu olevan oleellista vaikutusta.

Talja, Asko. Suositus liikennetärinän mittaamisesta ja luokituksesta [Recommendation for measurement and classification of traffic-induced vibrations]. Espoo 2004. VTT Tiedotteita – Research Notes 2278. 50 p. + app. 15 p.

**Keywords** environmental impacts, traffic, traffic-induced vibration, vibration classification, vibration nuisance, vibration measurements, limit values, residential buildings, design values, instructions

## Abstract

The Environmental Protection Act (86/2000) and National building code of Finland (B3/2004) obligate the environmental impacts of traffic induced vibrations to be taken into consideration. The vibration must not cause damage to the building nor excessive disturbance to the people inside the building. The main object of the report is to produce advice for planners and decision-makers so that the vibration nuisance can be considered in community, traffic and construction planning.

Recommendation for disturbance-based vibration classification of the dwellings is proposed. The classification and the vibration limits of the classes are same as given in Norwegian standard NS 8176 (1999). The vibration measure is the frequency weighted rms velocity according to ISO 2631-2 (2003). The vibration class is based on statistical maximum rms velocity measured during one week. In practice the statistical maximum value is determined from 15 vehicle pass-bys, which generate the maximum vibrations. The vibration limit for existing buildings is 0.6 mm/s and 0.3 mm/s for new residential buildings. Sixteen dwellings were studied more closely by VTT. The experience proved that the classification given in NS 8176 is also applicable in Finland. In all of the dwellings, where the statistical maximum value was higher than 0.6 mm/s, the vibration were highly or moderately disturbing the occupants. When the value was less than 0.3 mm/s, the vibrations were only slightly disturbing or not disturbing.

The report also includes a comparison of the statistical maximum vibration in the dwelling with the vertical vibration of the ground. Based on the experience from the dwellings studied by VTT, the vertical vibrations of the floors and the horizontal vibrations of the second floor are very probably not more than twice the vibrations in ground. Lower vertical vibrations were found in houses on pile foundation. Pile foundation prevents vertical vibrations, but the effect on the horizontal vibrations of the second floor is negligible.

## Alkusanat

Liikenteen aiheuttama tärinä on liikennemelun kaltainen ympäristöhaitta, joka tulisi ottaa huomioon suunniteltaessa uusia asuntoja nykyisten liikenneväylien läheisyyteen tai rakennettaessa uusia väyliä vanhoille asuinalueille. Liikennetärinäistä aiheutuvat haitat tunnetaan kaavoituksessa huonosti eikä mahdollisia haittoja siksi yleensä arvioida riittävästi. Ympäristöministeriön asetuksessa pohjarakenteista (Suomen rakentamismääräyskokoelman 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. Suomessa ei kuitenkaan ole ohjearvoja liikennetärinälle eikä vakiintunutta tärinän mittauskäytäntöä.

Julkaisun päätarkoitus on esittää asuinviihtyvyyteen perustuva suositus liikennetärinän ohjearvoiksi. Lisäksi annetaan suositus tärinän mittaamisesta sekä ohjeita asuintilojen tärinän arvioimisesta, kun arviointi perustuu maaperästä tehtyihin tärinämittauksiin.

Julkaisu liittyy ympäristöministeriön *Ympäristöklusterin tutkimusohjelman kolmannen vaiheen 2003–2005: Ekotehokas yhteiskunta* projektiin *Liikenneperäisen tärinän huomioiminen maankäytön, liikenteen ja rakennusten suunnittelussa*. Julkaisu on projektin ensimmäinen vaiheen: *Vaatimustasot ja vaatimuksenmukaisuuden osoittaminen (LIIKEVÄ 1)* loppuraportti. Projekti on alkanut vuonna 2002 jo ennen tutkimusohjelman käynnistymistä. Tutkimus jatkuu klusterihankeessa toisella vaiheella: *Tärinän leviäminen maaperässä (LIIKEVÄ 2)*, jota koskeva projekti on alkanut vuonna 2004 ja päättyy syksyllä 2005. Tutkimusta ovat rahoittaneet ympäristöministeriö, liikenne- ja viestintäministeriö, Ratahallintokeskus, Tiehallinto ja VTT sekä Helsingin, Espoon, Vantaan, Tampereen ja Turun kaupungit.

Raporttiin on koottu yhteenveto, jonka perusteena ovat projektin aikana laaditut tekniset raportit. Raportit käsittelevät junien ja hidastetöyssyjen aiheuttamaa tärinän leviämistä maassa (liittyy *LIIKEVÄ 2:een*), tärinälle eri maissa annettuja suositusarvoja, tärinän mittaamiskäytäntöjä ja rakennustyypin vaikutusta tärinän voimakkuuteen. Lisäksi projektissa suoritettiin rakennusten tärinämittauksia, joiden tuloksista on laadittu kohdekohtaiset mittausraportit Helsingin, Espoon, Tampereen ja Turun kaupungeille sekä Ratahallintokeskukselle. Tutkittavia rakennuskohteita oli yhteensä 14, joista kaksi oli kerrostaloja. Muut kohteet olivat enintään kaksikerroksisia pientaloja tai rivitaloja. Kolmessa kohteessa tärinä aiheutui junaliikenteestä, muissa kohteissa tärinä aiheutui ajoneuvoliikenteestä kadulla, jolla oli epätasaisuuksia tai hidastetöyssyjä. Kaksi kohteista mitattiin kahteen kertaan erilaisissa olosuhteissa.

Tutkimushankkeen johtoryhmätyöskentelyyn ovat osallistuneet seuraavat henkilöt:

Anni Rimpiläinen	Ympäristöministeriö
Tuomo Viitala	Ratahallintokeskus
Anja Leinonen	Ympäristöministeriö
Risto Saari	Liikenne- ja viestintäministeriö
Tuula Säämänen	Tiehallinto
Anders Jansson	Tiehallinto
Osmo Torvinen	Helsingin kaupunki
Eila Suojala	Helsingin kaupunki
Päivi Ahlroos	Espoon kaupunki
Risto Jokinen	Espoon kaupunki
Matti Kaurila	Vantaan kaupunki
Matti Holtari	Vantaan kaupunki
Jaakko Lindholm	Turun kaupunki
Ari Elsilä	Tampereen kaupunki
Kaija Puhakka	Oulun kaupunki
Mauri Marttila	Suomen Kiinteistöliitto ry
Vesa Valpasvuo	Suomen Kuntaliitto ry
Jukka Peura	Uudenmaan ympäristökeskus
Leena Silfverberg	Uudenmaan ympäristökeskus
Matti Hakulinen	Geomatti Oy
Esa Patjas	SITO-yhtiöt
Osmo Rasimus	Tekes
Matti Kokkala	VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka
Jouko Törnqvist	VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

Johtoryhmän puheenjohtajana on toiminut ylitarkastaja Anni Rimpiläinen ympäristöministeriöstä. Tutkimuksen vastuullisena johtajana on VTT:llä toiminut tutkimuspäällikkö Matti Kokkala ja projektipäällikkönä erikoistutkija Asko Talja. Mittauksista ja mittaus-tuloksien analysoinnista VTT:llä ovat vastanneet Juha Kurkela, Erkki Järvinen ja Jukka Mäkinen.

Kiitän tutkimuksen johtoryhmän jäseniä, rahoittajia ja kaikkia työn suorittamiseen osallistuneita onnistuneesta yhteistyöstä.

Asko Talja



# Sisällysluettelo

Tiivistelmä.....	3
Abstract.....	4
Alkusanat.....	5
1. Johdanto.....	9
1.1 Taustaa.....	9
1.2 Lait ja asetukset.....	9
1.3 Tutkimuksen rajaus.....	10
2. Tärinä ympäristöhaittana.....	11
2.1 Tärinän ilmeneminen ja sen haitat.....	11
2.2 Tärinän syntyminen ja siirtyminen asuintiloihin.....	12
2.3 Ihmisen herkkyys liikennetärinöille.....	13
2.4 Tärinän vaikutusalue eri maalajeilla.....	14
2.4.1 Tärinän vaimeneminen.....	14
2.4.2 Junien vaikutusalue.....	14
2.4.3 Hidastetöyssyjen vaikutusalue.....	16
3. Suositus tärinän arvioimisesta mittaamalla.....	18
3.1 Mittauksessa käytettävä laitteisto.....	18
3.2 Tarkasteltavat mittauspisteet.....	18
3.3 Värähtelyn tehollisarvon määrittäminen.....	20
3.4 Tunnusluvun määrittäminen.....	23
4. Suositus tärinän luokituksiksi.....	25
4.1 Värähtelyluokkien rajat.....	25
4.2 Värähtelyluokituksen tausta.....	26
4.2.1 Norjan tutkimukset.....	26
4.2.2 Muut suositukset.....	29
4.2.3 VTT:n mittaukset.....	30
4.3 Huippu- ja tehollisarvon välinen riippuvuus.....	31
5. Kyselytutkimusten käyttö.....	34
6. Maaperän värähtelyn siirtyminen rakennukseen.....	35
6.1 Resonanssi-ilmiö.....	35
6.2 Maaperän värähtelytaajuudet.....	37
6.3 Rungon värähtelyjen voimistuminen.....	38

6.3.1	Värähtelytaajuuudet ja vaimennukset .....	38
6.3.2	Värähtelyn voimistuminen .....	39
6.4	Lattian värähtelyjen voimistuminen .....	41
6.4.1	Värähtelytaajuus ja vaimennukset.....	41
6.4.2	Värähtelyn voimistuminen .....	41
7.	Yhteenveto ja jatkotutkimustarpeet .....	43
7.1	Yhteenveto.....	43
7.2	Jatkotutkimustarpeet.....	46
	Lähdeluettelo .....	49
Liitteet		
	Liite A: Liikennetärinään liittyviä käsitteitä	
	Liite B: Malli kohdetietojen esittämisestä	
	Liite C: Yhteenveto VTT:n mittaamista kohteista	
	Liite D: Malli kyselytutkimuksen suorittamisesta	

# 1. Johdanto

## 1.1 Taustaa

Asutuksen keskittyminen teiden ja ratojen läheisyyteen on yleinen ilmiö Euroopassa. Raskaan liikenteen määrän ja akselipainojen kasvu lisäävät teiden ja ratojen varsien tärinäongelmia. Yhdyskuntarakenteen tiivistyminen houkuttelee rakentamaan myös sellaisille alueille, esimerkiksi pehmeille savimaille, joilla tärinähaitat korostuvat. Myös asukkaiden ja viranomaisten vaatimukset asuinympäristön laadulle ovat lisääntyneet.

Tärinän ympäristövaikutusten selvitys on melun tapaan nousemassa merkittäväksi kriteeriksi kaavoitus- ja rakentamispäätöksiä tehtäessä. Ongelmana on, että vaikka laissa ja asetuksissa liikennetärinän ympäristöhaitat edellytetään otettavaksi huomioon, liikennetärinän haittojen arviointia ei osata ja siksi haittojen arviointi jää usein puutteelliseksi.

## 1.2 Lait ja asetukset

Tärinä on mielletävä melun kaltaiseksi ympäristöhaitaksi. Liikenteen rakennuksille aiheuttamat haitat rajoittuvat yleensä viihtyvyystekijöihin, harvemmin niistä aiheutuu rakenteellisia vaurioita. Tapauksissa, joissa häiriö haittaa lepoa tai keskittymiskykyä, värähtelyistä voi olla myös terveydellistä vaaraa. Värähtelyt voivat haitata myös herkki-en laitteiden toimintaa.

Ympäristönsuojelulain (N:o 86/2000) tavoitteena on ehkäistä ihmisen toiminnasta joh-tuvaa ympäristön pilaantumista. Laki koskee myös tärinän päästämistä tai jättämistä ympäristöön, jos siitä aiheutuu terveyshaittaa, yleisen viihtyisyyden vähenemistä tai haittaa omaisuudelle. Yleisenä periaatteena on, että toiminnan harjoittajan tulee ehkäistä ennakoita ympäristöhaitat tai rajoittaa ne mahdollisimman vähäisiksi.

Uudistetussa ympäristöministeriön asetuksessa pohjarakenteista (Suomen rakentamis-määräyskokoelman osa B3, 2004) liikenteen vaikutukset on esitetty otettavaksi huomi-oon. Asetuksessa mainitaan, että ennen rakentamista on tarvittaessa selvitettävä, että liikennetärinä ei aiheuta rakennuksessa oleville ihmisille kohtuutonta häiriötä.

Maankäyttö- ja rakennuslain (N:o 132/1999) nojalla annetussa Maankäyttö- ja raken-nusasetuksessa (N:o 895/1999) edellytetään kaavaa laadittaessa selvitettäväksi myös vaikutukset ihmisten elinoloihin ja elinympäristöön. Laki yleisistä teistä (N:o 243/1954) määrää tien sijoittamisesta ja tekemisestä siten, että tien ja liikenteen ympäristölle aihe-uttamat haitat jäävät mahdollisimman vähäisiksi.

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. Vahinko korvataan lain perusteella, jollei häiriön sietämistä ole pidettävä kohtuullisena.

### 1.3 Tutkimuksen rajaus

Tässä julkaisussa keskitytään tarkastelemaan liikennetärinää asuntojen viihtyvyys- ja ympäristöongelmana. Haitallisiksi muodostuvat usein myös liikenteestä rakennukseen kovan maaperän ja kallion kautta siirtyvät runkoäänät, joita tämä tutkimus ei käsittele.

Julkaisun päätarkoitus on esittää asumisviihtyvyyteen perustuva suositus liikennetärinän ohjearvojen perusteeksi. Suosituksen taustaksi kuvataan aluksi tärinän ilmenemistä ympäristöhaittana. Sen jälkeen esitetään suositus tärinän mittaamisesta, tärinäluokitukselta ja luokkien rajoista. Lopuksi esitetään, miten maaperästä tehtyjen tärinämittausten avulla voidaan arvioida asuintiloissa esiintyvää tärinää.

Suosituksien perusteena ovat kirjallisuusselvityksien tulokset sekä rakennuksista tehtyjen värähtelymittausten tulokset. Tämän raportin tulokset perustuvat seuraaviin taustaraportteihin:

- Kirjallisuusselvitys tärinän arvioinnista, VTT:n sisäinen raportti RTE50-IR-13/2004
- Kirjallisuusselvitys raja-arvoista ja tärinän mittaamisesta, VTT:n sisäinen raportti RTE50-IR-5/2003
- Rakennuksen vaikutus värähtelyihin, VTT:n sisäinen raportti RTE50-IR-19/2004
- Tampereen kohteiden mittaustulokset, VTT:n sisäinen raportti RTE50-IR-7/2004
- Turun kohteiden mittaustulokset, VTT:n sisäinen raportti RTE50-IR-8/2004
- Helsingin kohteiden mittaustulokset, VTT:n sisäinen raportti RTE50-IR-15/2004
- Espoon kohteiden mittaustulokset, VTT:n sisäinen raportti RTE50-IR-14/2004
- Vantaan kohteiden mittaustulokset, VTT:n sisäinen raportti RTE50-IR-17/2004
- Urjalan kohteiden mittaustulokset, VTT:n sisäinen raportti RTE50-IR-18/2004.

Julkaisua lukiessa on eduksi, että lukija tuntee värähtelymekaniikan peruskäsitteet, mutta julkaisu soveltuu myös ensi kertaa aiheeseen perehtyvälle. Sitä varten liitteeseen A on koottu raportissa käytettyä liikennetärinään liittyvää termistöä.

## 2. Tärinä ympäristöhaittana

### 2.1 Tärinän ilmeneminen ja sen haitat

Asukas voi tuntea rakennuksen tärinän suoraan kehossaan tai esineet voivat tärinän vuoksi helistä ja heilua (kuva 1). Tärinän haittoja ovat mm:

- asumismukavuuden väheneminen
- keskittymiskyvyn häiriintyminen
- nukkumisen häiriintyminen
- pelko rakennevaurioista tai
- pelko kiinteistön arvon alenemisesta.



*Kuva 1. Tärinän ilmeneminen ja sen haitat [<http://www.ngi.no>].*

Yleensä asumismukavuuteen liittyvät haitat ilmenevät ennen rakenteellisia vaurioita. Uuden asunnon hankkijalle tärinä tulee usein yllätyksenä, jolloin haitan merkitys korostuu.

Tärinän aistiminen ja sen haitat riippuvat paljon henkilöstä. Vaikka tärinä olisi selvästi havaittavissa, siitä on harvoin aiheutunut sellaista haittaa, joka ylittää valittamiskynnysen. Nykyisin kun ympäristöön ja asuinmukavuuteen liittyviin asioihin kiinnitetään yhä enemmän huomiota ja ongelmat tiedostetaan entistä paremmin, myös valittamiskynnys on laskenut.

## 2.2 Tärinän syntyminen ja siirtyminen asuintiloihin

Liikenteen aiheuttaman tärinän syntymiseen ja tärinän siirtymiseen rakennukseen vaikuttavia tekijöitä ja epävarmuuksia on niin paljon, että värähtelyn suuruutta rakennuksessa on lähes mahdoton arvioida tarkasti laskennallisilla keinoilla.

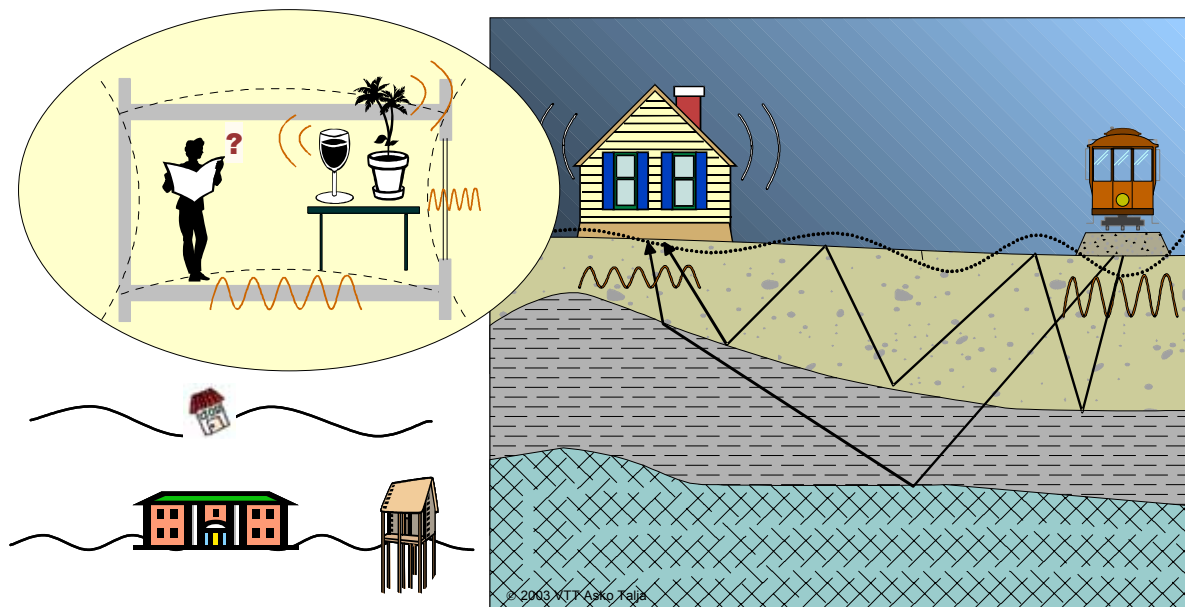
Tärinän syntymiseen vaikuttavat mm:

- liikenneväyän kaluston tyyppi ja kunto, paino ja nopeus
- maaperä, väylän rakenne ja perustamistapa sekä
- väylän kunto, kuten epätasaisuudet tai hidastetöyssyt.

Tärinä leviää maan pinnalla aaltoina, jotka ovat rinnastettavissa veden aaltoiluun (kuva 2). Tärinän leviämiseen maaperässä vaikuttavat mm. maaperän laatu, pehmeän maakerrokseen paksuus ja sen kerroksellisuus. Tekijät vaikuttavat sekä värähtelyn suuruuteen että taajuussisältöön. Erityisesti pehmeikköalueilla tärinä voi levitä hyvin laajalle alueelle.

Lisäksi tärinän siirtymiseen ja vahvistumiseen rakennuksessa vaikuttavat (kuva 2):

- rakennuksen koko
- perustamistapa ja
- rakenneosien massat ja jäykkyydet.

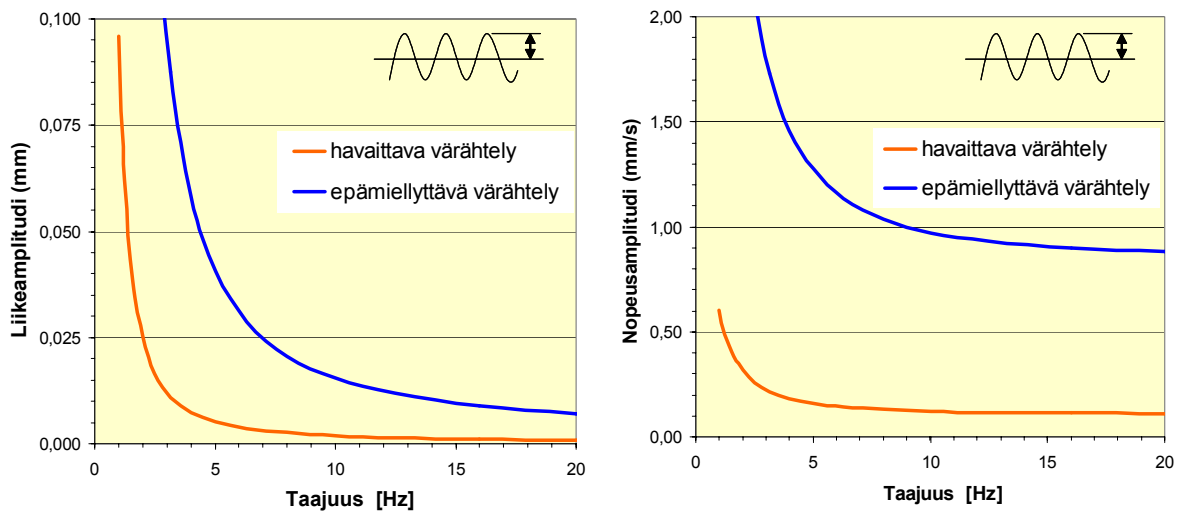


Kuva 2. Tärinän leviämiseen vaikuttavia tekijöitä ja tärinän ilmeneminen asuintiloissa.

## 2.3 Ihmisen herkkyys liikennetärinöille

Tärinän aiheuttamaa maanpinnan värähtelyä voidaan kuvata sekä siirtymän, värähtelyn nopeuden että kiihtyvyyden avulla.

Ihminen aistii erittäin pienet värähtelyt. Herkkyys värähtelyille riippuu värähtelyn suuruuden lisäksi myös sen taajuudesta. Kun värähtelyn suuruutta kuvataan siirtymän avulla, suurilla taajuuksilla jo alle 0,01 mm:n liikeamplitudi on häiritsevä. Pienilläkin taajuuksilla värähtely, jonka liikeamplitudi on alle 0,1 mm, koetaan yleensä häiritseväksi (kuva 3). Ihmisen kokeman värähtelyn merkittävin taajuusalue on yleensä pehmeillä savimailla välillä 5–15 Hz ja kovilla soramailla välillä 10–25 Hz.



Kuva 3. Ihmisen herkkyys vakioamplitusille värähtelylle, kun värähtely esitetään liikkeen (vasen kuva) tai värähtelyn nopeuden avulla (oikea kuva).

Yleensä värähtelyiden suuruutta kuvataan siirtymän sijasta värähtelyn nopeudella. Tällöin ihmisen herkkyys on yli 10 Hz:n taajuuksilla käytännössä riippumaton nopeusamplitudista (kuva 3). Tällä taajuusalueella useimmat ihmiset kokevat yli 1 mm/s:n värähtelyt epämiellyttäväksi, kun värähtely on liikenteestä aiheutuvaa. Alhaisilla taajuuksilla ihminen on epäherkempi värähtelyille.

Muutos värähtelyn suuruudessa ei ole suoraan verrannollinen ihmisen kokemaan värähtelyyn. Tarvitaan suuri muutos värähtelytasossa, ennen kuin ihminen aistii värähtelyn selvästi pienentyneen. Yleensä vasta värähtelytason puolittumista voidaan pitää merkittävänä parannuksena värähtelyongelmissa. Ihmisen kuulo reagoi vastaavalla tavalla ääneen. Äänenvoimakkuuden laskeminen 6 dB:llä vastaa äänenpainetason puolittumista.

## 2.4 Tärinän vaikutusalue eri maalajeilla

Värähtelyn aiheuttavaa tekijää kutsutaan herätteeksi. Herätteestä aiheutuva värähtely on pääsääntöisesti sitä pienempi, mitä kauempana herätelähteestä ollaan. Värähtelyn suuruuteen eri etäisyyksillä vaikuttaa erityisesti maaperän pehmeimpien kerrosten dynaaminen kimmokerroin, joka on suhteessa maaperän lujuuteen. Rakenteellisen lujuuden perusteella maalajeja kutsutaan hyvin pehmeiksi, pehmeiksi, sitkeiksi, koviksi tai hyvin koviksi. Maakerrosten rakenteellista lujuutta kuvataan yleensä leikkauslujuuden avulla. Geoteknistä maalajiluokitusta on kuvattu tarkemmin lähteessä [Tielaitos 1993].

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 kivennäismaalajeissa vaikutusalue on pienempi. Pienin liikennetärinän vaikutusalue on kovissa karkearakenteisissa kivennäismaalajeissa (sora, hiekka) ja moreenimaalajeissa (silttimoreeni, hiekkamoreeni, soramoreeni) sekä kalliossa.

### 2.4.1 Tärinän vaimeneminen

Tärinän vaimeneminen riippuu pääasiassa maaperän tyypistä, mutta myös herätelähteestä ja tarkasteltavasta etäisyydestä. Karkeasti voidaan arvioida, että rautatieliikenteellä värähtelyn puolittuminen tapahtuu, kun etäisyys radasta kasvaa

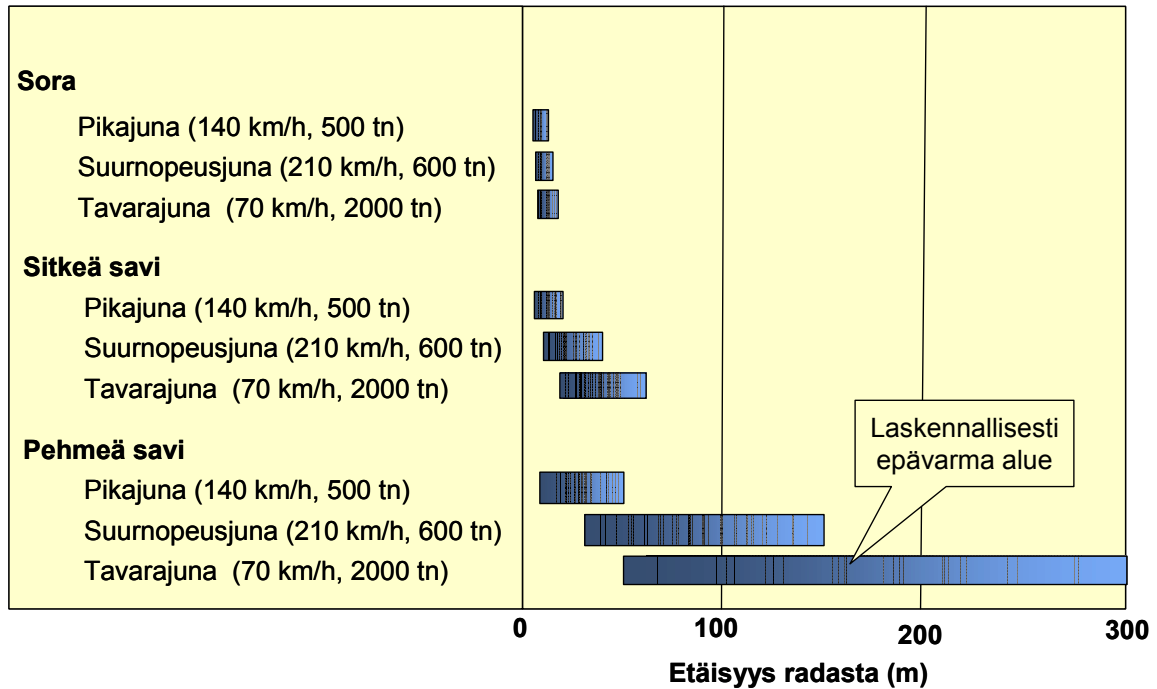
- soramailla noin 1,5-kertaiseksi
- sitkeillä savimailla noin 3-kertaiseksi ja
- pehmeillä savimailla noin 6-kertaiseksi.

Hidastetöyssyn ylittävästä raskaasta ajoneuvosta aiheutuvan värähtelyn voidaan arvioida puolittuvan kaikilla maatyypeillä, kun etäisyys väylästä kasvaa noin 2,5-kertaiseksi.

### 2.4.2 Junien vaikutusalue

Kuvassa 4 esitetään arvio etäisyydestä, jota pienemmällä etäisyydellä vanhoilla asuinalueilla tulisi arvioida mahdollisuuksia tärinähaitan vähentämiseksi. Arvion perusteena on standardin NS 8176 [1999] värähtelyluokka D. Värähtelyluokkien rajoja kuvataan tarkemmin luvussa 4.1. Kuva 4 perustuu normaalikuntoiselle radalle tehtyyn laskennalliseen arvioon ja sen laatimisessa on oletettu, että rakenteiden resonanssi-ilmiöstä johtuen värähtelyt asuintiloissa ovat kaksinkertaiset maaperän värähtelyihin nähden.





Kuva 4. Suuntaa-antava arvio etäisyydestä eri maalajeilla, jolloin junista aiheutuva tärinä voi olla haitallinen. Varjostetut alueet kuvaavat laskennallisesti epävarmaa aluetta.

Laskentaparametrien epävarmuuden vuoksi kuvassa on esitetty laskennallisesti epävarmat alueet. Alueen vasemman reunan etäisyyksillä on hyvin todennäköistä, että värähtelyluokan D raja ylitetään. Vastaavasti oikean reunan etäisyyksillä värähtelyluokan D rajan ylittyminen on hyvin epätodennäköistä.

Yleensä rautatieliikenteen ongelmana ovat pehmeät savimaat ja tavarajunat. Kuvasta nähdään, että kun tavarajuna paino on 2 000 tn ja sen nopeus on 70 km/h, vasta yli 300 m:n etäisyydellä voidaan olla suhteellisen varmoja, että luokan D raja ei ylity. Toisaalta voidaan olla melko varmoja, että alle 50 m:n etäisyydellä raja ylittyy. Laskennallisen tarkastelun epävarmuuteen vaikuttaa erityisesti maaperän kerroksellisuus ja eri maakerrosten paksuuden ja vaihtelu. Esimerkiksi savimailla, joilla tärinän vaikutusalue ulottuu kauas herätteestä, maaperä voi vaihdella paljon sekä radan suunnassa että rataa vastaan kohtisuorassa suunnassa.

Jos pyritään värähtelyluokkaan C, jota NS 8176 suosittelee uusille asuinalueille, kuvassa esitetyt etäisyydet tulee sorailla kertoa arvolla 1,5, kovilla savimailla arvolla 3 ja pehmeillä savimailla arvolla 6. Tällöin pehmeillä savimailla alue, jolla luokan tunnusluku voi ylittyä, voi tavarajunaliikenteellä pahimmassa tapauksessa ulottua jopa 1 000 metriin.

Suurnopeusjunilla on kuvan vertailussa oletettu, että junan nopeus ei saavuta junasta aiheutuvan värähtelyaallon nopeutta. Pehmeillä savimailla olettamus ei välttämättä päde. Tällöin laskennallisesti epävarma alue voi ulottua yhtä kauas kuin tavarajunilla.

Yksinkertaisiin laskelmiin perustuva rakennuksen tärinän laskennallinen arviointi on epätarkkaa. Siksi värähtelyt tulisi epävarmassa tapauksessa mitata maastosta ja siellä sijaitsevasta referenssikohteesta aina kun se vain on mahdollista.

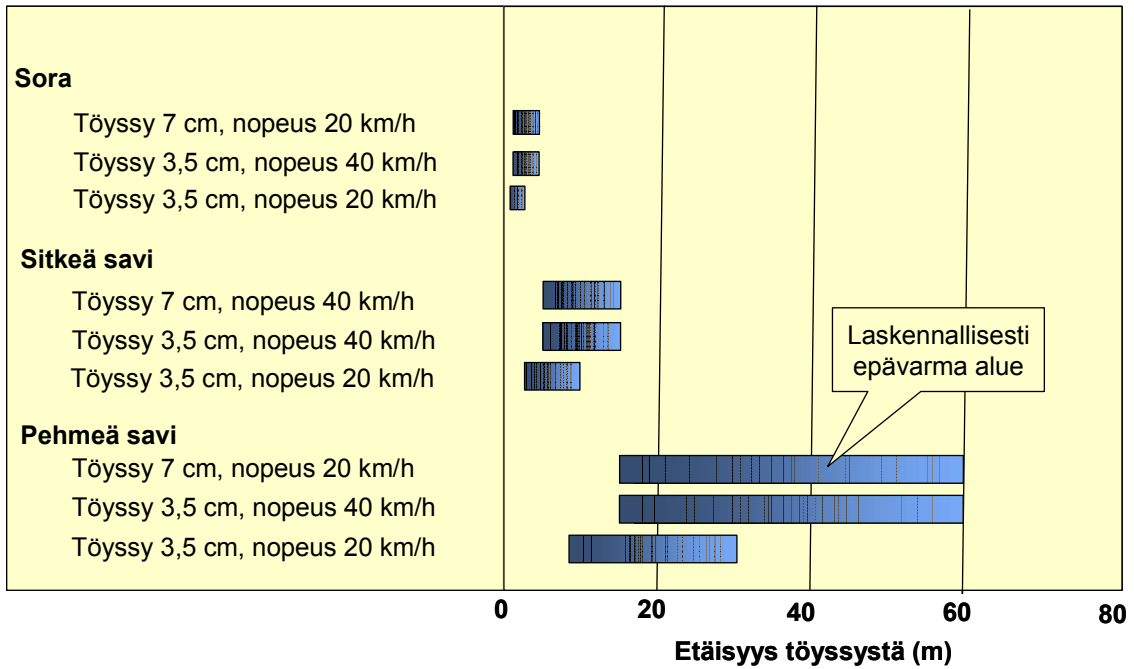
### **2.4.3 Hidastetöyssyjen vaikutusalue**

Kuvassa 5 esitetään arvio etäisyydestä, jota pienemmällä etäisyydellä vanhoilla asuinalueilla tulisi arvioida mahdollisuutta raskaan liikenteen aiheuttaman tärinän vähentämiseksi. Arvion perusteena on standardin NS 8176 [1999] värähtelyluokan D raja. Kuva perustuu laskennalliseen arvioon ja sen laatimisessa on oletettu, että rakenteiden resonanssi-ilmiöstä johtuen värähtelyt asuintiloissa ovat kaksinkertaiset maaperän värähtelyihin nähden. Oletus pätee parhaiten paaluttamattomille pientaloille. Laskentaparametrien epävarmuuden vuoksi kuvassa on esitetty laskennallisesti epävarman alueen laajuus.

Yleensä maantieliikenteen ongelmana ovat pehmeikköalueet, korkeat töyssyt ja raskas rekka- tai bussiliikenne. Koska värähtelyn suuruus on suoraan verrannollinen ajonopeuteen ja töyssyn korkeuteen, kuvan avulla voidaan arvioida myös muiden epätasaisuuksien vaikutusta. Kuvasta 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 etäisyydet tulee kertoa arvolla 2,5. Tällöin pehmeillä savimailla alue, jolla luokan tunnusluku voi ylittyä, voi ulottua pahimmassa tapauksessa jopa noin 200 metriin.



Kuva 5. Suuntaa-antava arvio etäisyydestä eri maalajeilla, jolloin hidastetöyssyn ylittäneen raskaan ajoneuvon aiheuttama värähtely voi olla haitallinen. Varjostetut alueet kuvaavat laskennallisesti epävarmaa aluetta.

### 3. Suositus tärinän arvioimisesta mittaamalla

Yhtenäinen ja yksikäsitteinen käytäntö tärinän mittaamisesta ja värähtelyn tunnusluvun määrittämisestä on tärkeää, jotta tulokset ovat luotettavia. Käytäntö, joka on sekä kansainvälisesti että kansallisesti mahdollisimman yleisesti hyväksytty, luo luotettavan pohjan tiedon hyödyntämiselle ja alan kehittämislle.

#### 3.1 Mittauksessa käytettävä laitteisto

Mittauslaitteisto koostuu mittausantureista, niiden vahvistimista, signaalin esisuodattimista sekä tallennusjärjestelmästä. Mittauksessa voidaan käyttää joko kiihtyvyyssantureita tai geofoneja. Laitteiston tulee toimia luotettavasti taajuusalueella 1–80 Hz. Mittaus-signaalin painotus voidaan tehdä joko mittauslaitteeseen internoidulla analysaattorilla tai jälkikäteen erillisellä analysointiohjelmistolla.

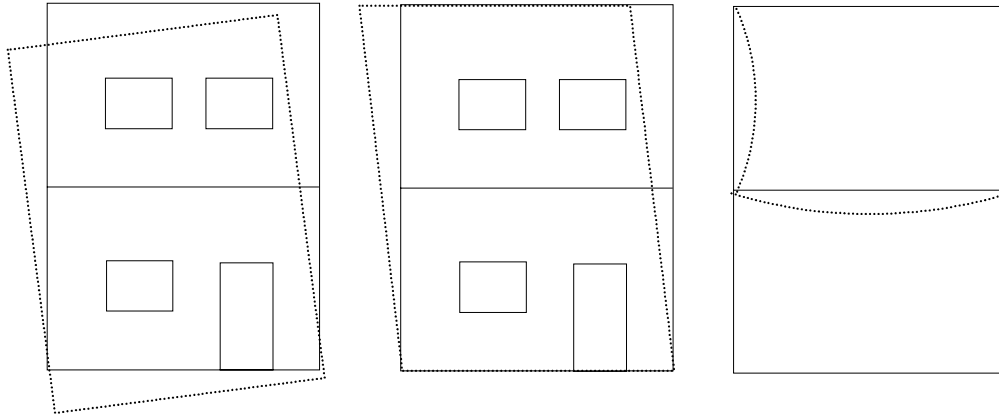
Signaalin käsittelyä ja mittauslaitteistolle asetettavia vaatimuksia on kuvattu tarkemmin standardeissa NS 8176 (1999) ja ISO2631-2 (2003). Vaatimukset koskevat mm.

- signaalin esisuodatusta
- anturien ja vahvistimen lineaarisuutta taajuusvälillä 1–80 Hz
- mittausantureiden tarkkuutta käytetyllä taajuusalueella
- koko mittauslaitteiston tarkkuutta käytetyllä mittausalueella
- suodattimien ominaisuuksia
- mittauslaitteiden kalibrointia ja
- mittauslaitteiden herkkyyttä sähkömagneettisille ilmiöille.

#### 3.2 Tarkasteltavat mittauspisteet

Mittauksissa on tavoitteena selvittää suurin asukkaan kokema värähtely. Rakennus voi värähdellä kokonaisuutena tai värähtely voi olla vain paikallista (kuva 6). Värähtelyä mitataan kolmessa pääsuunnassa: pystysuunnassa (z-suunta) ja kahdessa vaakasuunnassa (x- ja y-suunnat). Vaakasuunnat valitaan talon pääsuuntien mukaan, x-suunnaksi valitaan talon pituussuunta (harjan suunta, muuten suuremman pituuden suunta) ja y-suunnaksi talon poikittaissuunta.

Rakennuksen vaakasuuntainen värähtely tulee mitata vähintään rakennuksen ylimmän kerroksen lattiatasolta. Lattian värähtely tulee mitata ainakin sen lattian keskipisteestä, jolla kantavan rakenteen jänneväli on suurin tai jossa asukas kokee värähtelyn voimakkaimpina. Jos rakennuksen lattiarakenteet ovat erilaisia, värähtely tulee mitata useamman huoneen lattiasta.



*Kuva 6. Esimerkkejä rakennuksen värähtelymuodoista. Vasemmalla koko rakennuksen liike, keskellä seinien leikkausmuodonmuutos ja oikealla eri osien taivutusmuodonmuutoksia.*

Huoneistosta mitattujen värähtelyjen lisäksi mitataan mahdollisuuksien mukaan myös perustuksen värähtelyt ja maaperän pystysuuntainen värähtely. Perustuksesta mitattuja värähtelyjä käytetään usein, kun arvioidaan värähtelyjen merkitystä rakennuksen vaurioitumiseen. Maaperän ja rakennuksen eri kohtien värähtelyitä vertaamalla saadaan hyödyllistä tietoa rakennuksen vaikutuksesta asuintilojen värähtelyyn. Maaperän värähtelyä käytetään usein myös automaattisen mittauksen käynnistämiseen.

Jos mahdollista, automaattisen mittauksen yhteydessä tulee myös valokuvata värähtelyn aiheuttaja. Kuva-aineiston ja eri pisteistä mitattujen signaalien vertailulla voidaan varmistaa, että värähtely ei ole asukkaan itsensä aiheuttama.

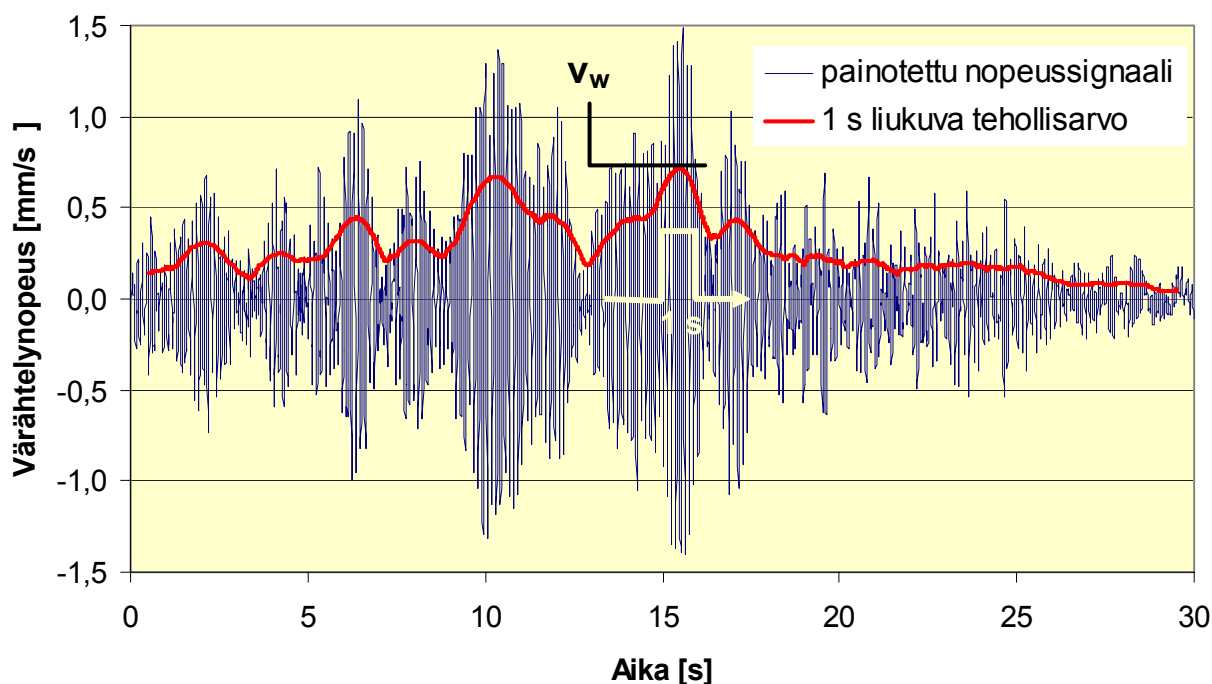
Perustuksen värähtelyt voidaan mitata rakennuksen sisäpuolelta sellaisesta kantavan rakenteen kohdasta, jossa rakennus liittyy perustuksiin. Yleensä tällaisia kohtia ovat mm. kantavien seinien alareunat ja pilarien tyvet. Maaperän mittauspisteen tulisi olla riittävän kaukaa rakennuksesta, jotta rakennus ei vaikuta maaperän värähtelyihin. Toisaalta mittauspisteen tulisi olla niin lähellä rakennusta, että se edustaa maaperän värähtelyä rakennuksen kohdalla. Siksi mittauspisteen tulisi sijaita samalla etäisyydellä väylästä kuin rakennuksen ulkoseinä. Lisäksi mittauspisteen tulisi sijaita noin 5–6 metrin etäisyydellä perustuksesta.

Mittauskohteen tiedot ja mittauspisteet esitetään liitteessä B esitetyn mallilomakkeen mukaisesti.

### 3.3 Värähtelyn tehollisarvon määrittäminen

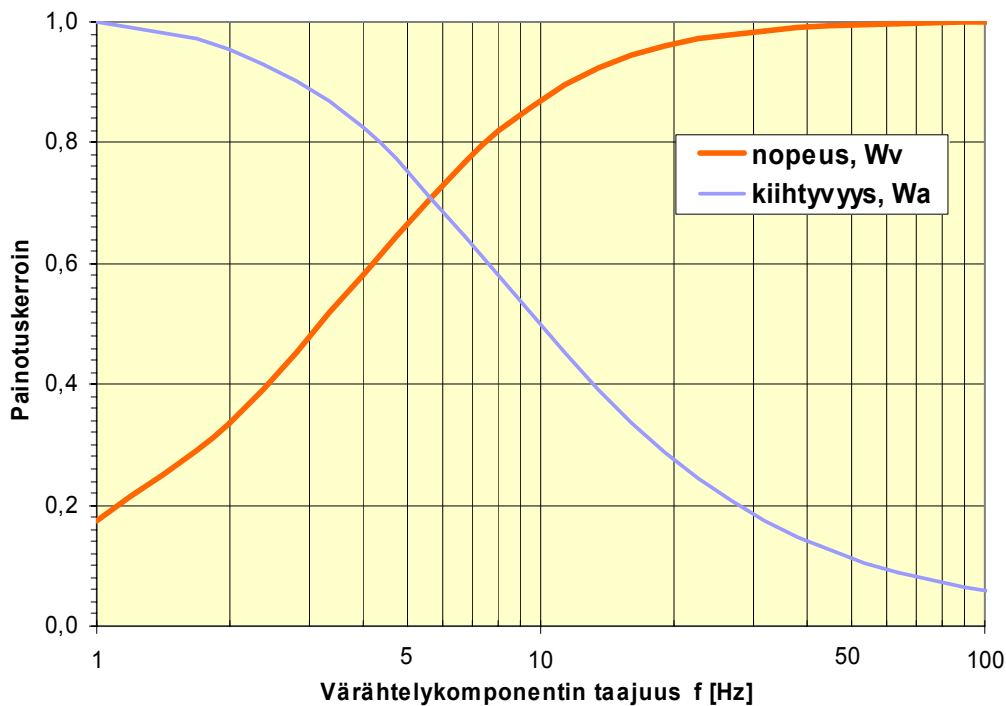
Eri pisteistä mitatut pysty- ja molemmat vaakasuuntaiset värähtelyt tarkastellaan toisiaan riippumattomina. Eri pisteistä mitatuista signaaleista tarkistetaan, että ne edustavat liikenteestä aiheutuvaa värähtelyä. Tarkistus perustuu kuva-aineistoon, signaalin muotoon ja eri mittauskanavien antamaan samanaikaiseen informaatioon. Mittausjakson ajalta mitatuista värähtelynäytteistä määritetään jokaiselle suunnalle värähtelyn tunnusluku, jota verrataan värähtelyn ohjearvoihin.

Liikenteestä aiheutuva värähtelysignaalin muoto on hyvin vaihteleva (kuva 7). Mitatusta signaalista määritetään se yhden sekunnin pituinen ajanjakso, jolloin värähtelyn painotettu tehollisarvo  $v_w$  on suurin. Koska ihmisen herkkyys riippuu värähtelyn taajuudesta ja tarkasteltava signaali sisältää paljon eritaajuuksisia värähtelykomponentteja, signaali jaetaan komponentteihin. Jokainen värähtelykomponentti painotetaan erikseen ihmisen herkkyyttä vastaavaksi. Taajuuspainotuksen jälkeen värähtelysignaalista määritetään suurin tehollisarvo. Tässä suosituksessa taajuuspainotuksen lähtökohtana on standardi ISO 2631-2 [2003]. Samaa painotusta on käytetty myös standardeissa DIN 4150-2 [1999] ja NS 8176 [1999].



Kuva 7. Suurimman tehollisarvon  $v_w$  määrittäminen painotetusta nopeussignaalista.

Värähtelymittaukset voidaan tehdä joko kiihtyvyyss- tai nopeusmittauksina. Myös painotettu tehollisarvo voidaan määrittää sekä kiihtyvyyss- että nopeussignaalista, mutta painotus tulee tehdä niitä vastaavilla painotuskertoimilla (kuva 8).



Kuva 8. Värähtelykomponenttien painotuskerroin nopeus- ja kiihtyvyyssignaalille.

Jos analysoidaan mitattua nopeussignaalia, värähtelykomponentin painotus taajuudella  $f$  on

$$W_v = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_0}{f}\right)^2}}, \text{ jossa } f_0 = 5,6 \text{ Hz.} \quad (1)$$

Jos analysoidaan mitattua kiihtyvyyssignaalia, painotus on

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

Painotettu tehollisarvo määritetään aikatasossa lausekkeesta

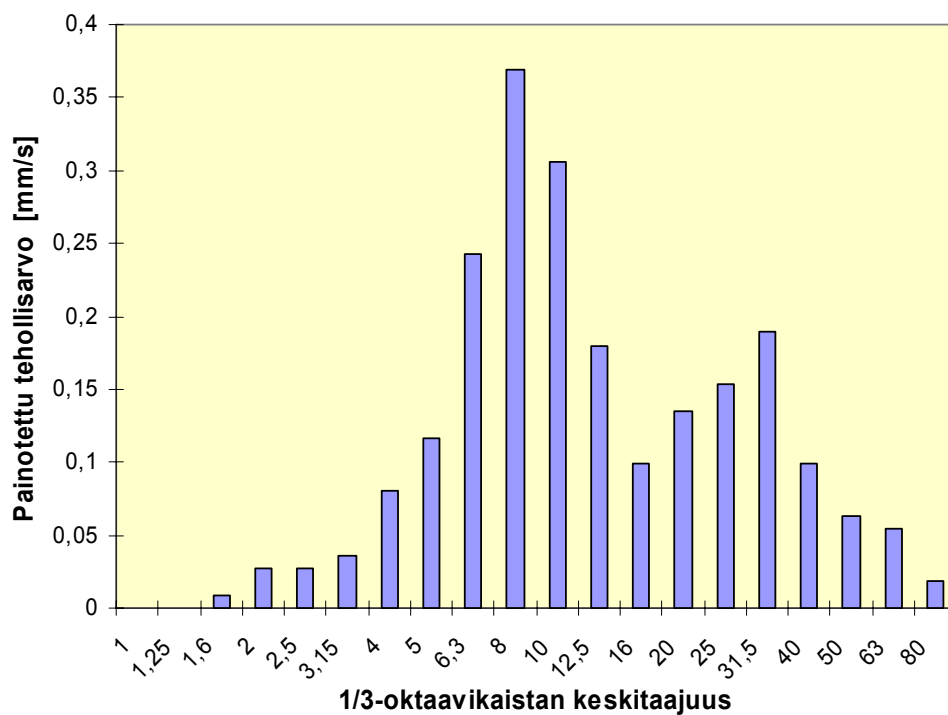
$$v_w(t_0) = \left\{ \frac{1}{\tau} \int_{t_0 - \tau}^{t_0} [v_w(t)]^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

jossa  $\tau = 1$  s ja  $v_w(t_0)$  on painotetun kiihtyvyyssignaalin  $v_w(t)$  tehollisarvo ajanhetkenä  $t_0$ . Vastaavasti voidaan analysoida mitattua kiihtyvyyssignaalia, jolloin lausekkeessa (3) nopeus  $v_w(t)$  korvataan kiihtyvyydellä  $a_w(t)$ .

Painotettu tehollisarvo voidaan määrittää vaihtoehtoisesti myös taajuustasossa. Tällöin tarkastelu tehdään kolmannesosaoktaaveittain. Näytteestä määritetään suurin hetkellinen 1 sekunnin jakson tehollisarvo lausekkeella

$$v_w = \sqrt{\sum_i (W_{v,i} v_i)^2} , \quad (4)$$

jossa  $W_{v,i} v_i$  on kolmannesosaoktaavikaistalla  $i$  tapahtuvien värähtelyiden painotettu tehollisarvo (kuva 9). Tämän tarkastelun etuna on, että tarkastelu osoittaa myös tehollisarvoon vaikuttavat taajuusalueet.



Kuva 9. Värähtelysignaalin painotetut tehollisarvot  $W_{v,i} v_i$  kolmannesosaoktaaveittain.

Kun kiihtyvyyss- ja nopeussignaalit painotetaan kuvassa 8 esitetyillä kertoimilla, painotetun nopeuden tehollisarvon  $v_w$  (mm/s) ja painotetun kiihtyvyyden tehollisarvon  $a_w$  (mm/s<sup>2</sup>) suhde on vakio

$$a_w = 35,7 \cdot v_w . \quad (5)$$



### 3.4 Tunnusluvun määrittäminen

Yksi mittaussignaali ei kuvaa todellista liikennettä. Todellisessa liikenteessä vaihtelee sekä kaluston tyyppi, paino että nopeus. Siksi mittaustuloksia, joihin värähtelyn tunnusluku perustuu, tulee olla useampia ja pidemmältä ajalta.

Tilastollisesta tarkastelusta ei ole olemassa yksikäsitteisiä ehdotuksia. Tässä suosituksessa lähtökohtana on NS 8176 [1999]. Sen mukaan mittaustuloksista määritetyn tunnusluvun tulee edustaa 95 %:n todennäköisyydellä kaikkia liikennevälineitä. Standardin NS 8176 mukaan värähtelyt pitää mitata ainakin 15 yksittäisestä liikennevälineestä, olipa kyse junasta, metrosta, raitiovaunusta tai tieliikenteestä. Rautatieliikenteessä näistä vähintään 30 %:n tulee edustaa suurimman värähtelyn aiheuttavia junia, useimmiten tavarajunia. Tieliikenteessä mitattavien liikennevälineiden tulee olla kokonaispainoltaan suurempia kuin 3 500 kg. Mitattavissa kohteissa väylän kunnon, liikennejakauman ja ajonopeuksien tulee edustaa todellista tilannetta. Esitetyn tarkastelun tilastomatematiikka taustaa ja vertailua mittaustuloksiin on kuvattu tarkemmin lähteessä [Turunen-Rise et al. 2003].

Standardi NS 8176 ei ota kantaa siihen, miltä ajalta mittaukset suoritetaan. Miten esimerkiksi tieliikenteessä mitattavat yli 3 500 kg:n ajoneuvot valitaan. Voidaanko ne ottaa lyhyenä aikana vaikkapa peräkkäisistä busseista. Tai millä perusteella ja miltä ajalta valitaan mitattavat junat?

Tämä suositus noudattaa NS 8176:n menettelyä, mutta perusteena on yhden viikon pituinen mittausjakso. Mikäli mittaus kestää useampia viikkoja, kukin viikko käsitellään omana mittausjaksonaan. Tarkastelu toteutetaan siten, että jakson aikana mitatuista tuloksista analysoidaan 15 merkitsevintä näytettä, joiden analyysi ja tilastollinen tarkastelu tehdään NS 8176:n mukaan. Merkitsevimmät näytteet valitaan maanpinnan tai perustuksen pystysuuntaisen värähtelyn perusteella.

Tilastollinen tarkastelu suoritetaan seuraavasti (kuva 10). Kustakin signaalista ( $N=15$ ) määritetään suurin painotettu tehollisarvo  $v_{w,j}$  kohdan 3.3 mukaisesti. Painotetuista suureista lasketaan keskiarvo

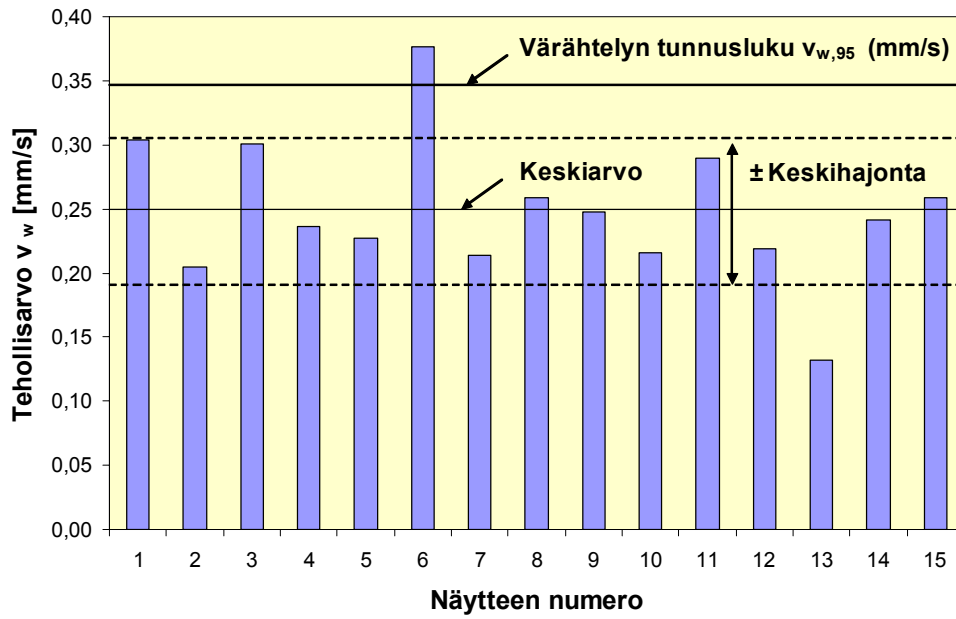
$$\bar{v}_w = \frac{\sum_{j=1}^N v_{w,j}}{N} \quad (6)$$

ja keskihajonta

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (v_{w,j} - \overline{v_w})^2} . \quad (7)$$

Värähtelyn tunnuslukuna käytettävä ominaisarvo määritetään lausekkeesta

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



Kuva 10. Periaatekuva värähtelyn tunnusluvun määrittämisestä.

## 4. Suositus tärinän luokitukseksi

### 4.1 Värähtelyluokkien rajat

Liikennetärinästä aiheutuva haitta voidaan rinnastaa melusta aiheutuvaan haittaan. Tällöin värähtelyn havaittavuus, koettavuus ja hyväksyttävyyys ovat eri asioita. Kuten melutasokin, värähtelyn hyväksyttävyytaso on erilainen eri henkilöillä.

Taulukossa 1 on esitetty alun perin Norjan standardissa NS 8176 [1999] esitetty suositus rakennusten värähtelyluokituksesta liikennetärinöille. Tätä luokitusta ehdotetaan käytettäväksi myös Suomessa. Suositus on sopuinnussa sekä useissa muissa maissa esiettyjen suositusten että VTT:n saaman kokemuksen kanssa. Nämä vertailut esitetään myöhemmin kappaleissa 4.2.2 ja 4.2.3. Suosituksen perusteena on värähtelyn tunnusluku  $v_{w,95}$ , joka on määritetty siten, että se vastaa asuintiloissa esiintyvän värähtelyn tilastollista maksimiarvoa, kun mittausjakson pituus on yksi viikko. Suositus koskee sekä yö- että päiväaikaa.

*Taulukko 1. Suositus rakennusten värähtelyluokituksesta [NS 8176, 1999].*

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

Värähtelyluokan C mukaan arvioitaviksi alueiksi katsotaan

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

Yksittäiset olemassa olevien väylien varrella sijaitsevat uudisrakennukset 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.

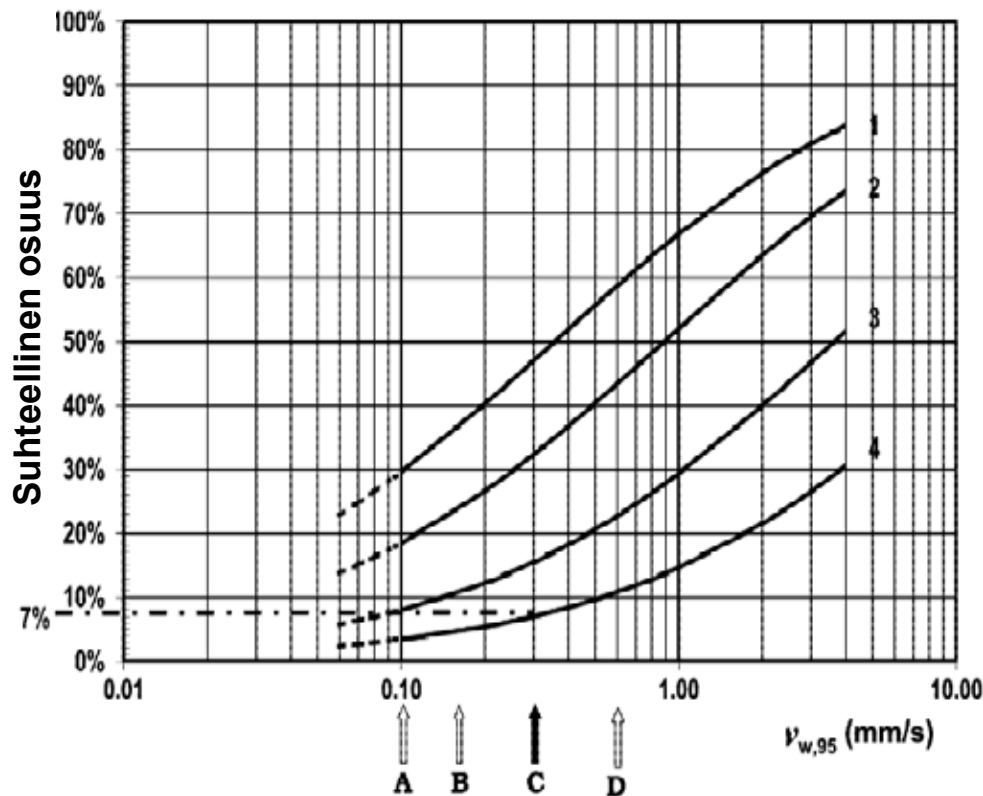
Taulukkoa 1 ei sovelleta rakennuksille, joissa ihmiset ovat pääasiassa liikkeessä tai muut kuin liikenteestä aiheutuvat häiriöt voivat olla merkittävämpiä (esim. toimistot, kaupat, kahvilat, ostoskeskukset, tavaratalot, liikuntatilat).

## **4.2 Värähtelyluokituksen tausta**

### **4.2.1 Norjan tutkimukset**

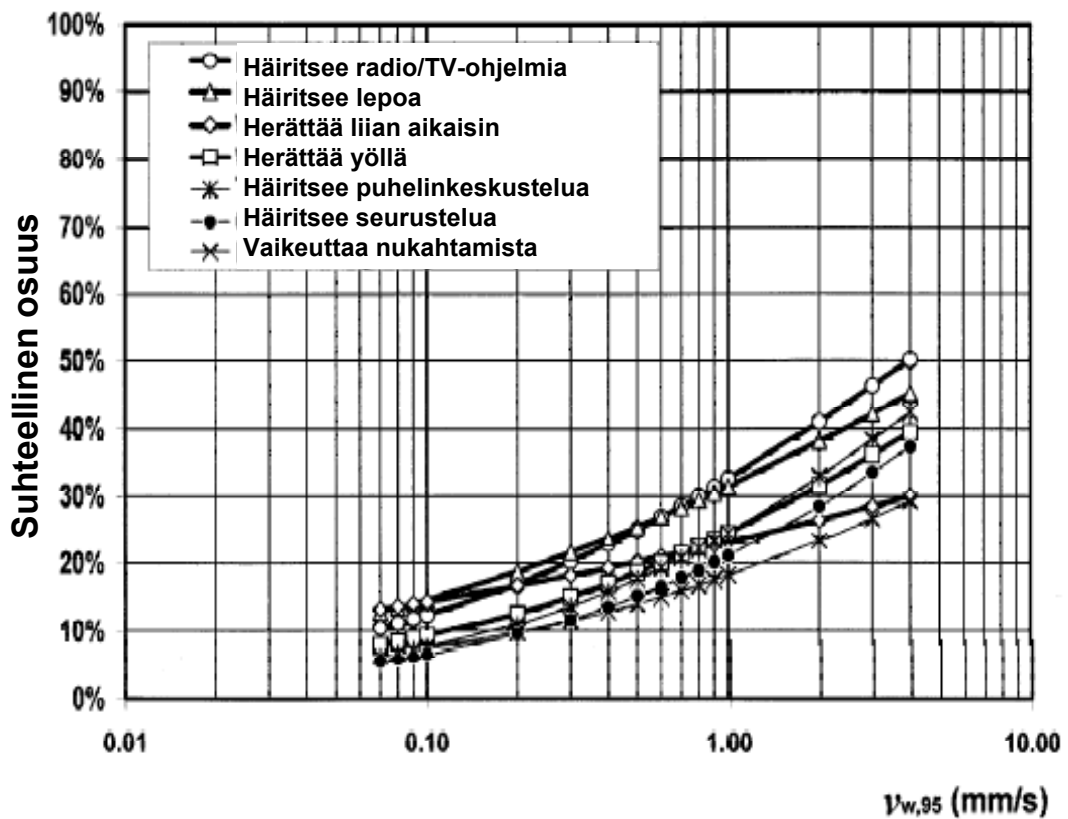
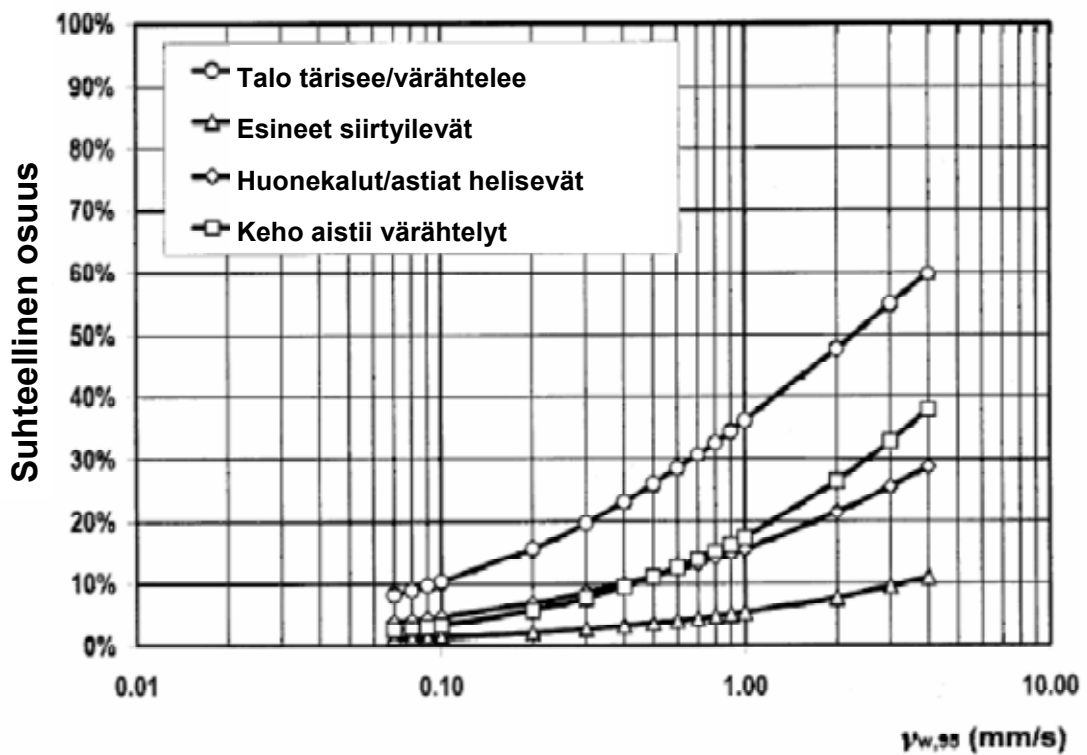
Taulukossa 1 esitetty luokitus perustuu standardiin NS 8176 [1999]. Luokittelu perustuu asukkaiden haastatteluihin värähtelyiden häiritsevyydestä sekä kohteista saatuun mittaukseen. Luokittelun perusteena olevassa tutkimuksessa on yhteensä yli 1 400 vertailuarvoa. Tutkimuksen [Klæboe et al. 2003] mukaan ihmisen herkkyyden ei todettu riippuvan värähtelylähteestä (auto, juna, metro, raitiovaunu). Iällä, sukupuolella, sosiaalisella asemalla tai asuinalueella ei myöskään havaittu olevan oleellista merkitystä.

Luokituksessa on käytetty apuna liikennemelulle asetettuja suositusarvoja. Liikennetärinän häiritsevyys luokan C ylärajalla vastaa liikenteestä aiheutuvaa 55 dB:n ulkomelun häiritsevyyttä päiväsaikaan. Tällöin lähteen [Turunen-Rise et al. 2003] mukaan 7–8 % asukkaista pitää häiriötä erittäin häiritsevänä ja noin 15 %:n voidaan olettaa valittavan häiriöstä (kuva 11). Tätä luokkaa suositellaan minivaatimuksena uusien asuinrakennuksien tai liikenneväylien rakentamisessa. Luokaa D, jonka ylärajalla 10 % asukkaista pitää värähtelyä erittäin häiritsevänä ja noin 25 %:n voidaan odottaa valittavan häiriöstä, suositellaan käytettäväksi vain vanhoilla rakennuksilla arvioitaessa suojatoimenpiteitä värähtelyn suhteen. Luokan B asunnot ovat värähtelyteknisesti suhteellisen hyviä, mutta muutamat valitukset ovat mahdollisia. Luokan A asunnoissa asukkaat eivät normaalisti havaitse liikenteestä aiheutuvaa värähtelyä.



Kuva 11. Se vastaajien osuus, joka kokee eritasoisen liikenteestä aiheutuvan värähtelyn häiritsevänä asuintiloissa [Klæboe et al. 2003]. Häiritsevyytaset: (1) havaittavat värähtelyt, (2) vähintään vähän häiritsevät värähtelyt, (3) vähintään kohtalaisesti häiritsevät värähtelyt ja (4) erittäin häiritsevät värähtelyt. Kuvaan on merkitty myös taulukossa 1 esitetty värähtelyluokitus.

Värähtelyt voidaan kokea eri tavoin. Useimmat tutkimuksessa haastatellut asukkaat ilmoittivat, että värähtely ilmenee talon vavahteluna tai tärinänä. Kun värähtelyarvo oli 0,3 mm/s, noin 20 % vastaajista ilmoitti että talo tärisee usein ja 9 % ilmoitti, että huonekalut tai taloustavarat pitävät ääntä ja että keho aistii värähtelyt (kuva 12). Usein värähtelyt häiritsivät myös radion kuuntelua ja TV:n katselua (kuva 12). Lisäksi 10–15 % vastaajista ilmoitti levon ja unen häiriintymisestä jopa niinkin alhaisilla kuin 0,1 mm/s:n värähtelytasolla. Näissä tapauksissa on kuitenkin oletettavaa, että häiriö on aiheutunut enemmän värähtelyyn liittyvästä äänestä kuin itse värähtelyn tuntemisesta.



Kuva 12. Yläkuvassa eri tavoin värähtelyt havainneiden vastaajien osuus ja alakuvassa eri tavoin värähtelyt häiritseviksi kokeneiden vastaajien osuus [Klæboe et al. 2003].

## 4.2.2 Muut suositukset

Taulukossa 2 on esitetty eri lähteissä esitettyjä suosituksia painotetun tehollisarvon  $v_w$  ohjearvoiksi. Taulukko osoittaa, että Saksan [DIN 4150, 1999], USA:n [FRA 1998] ja Ruotsin [Banverket 1997] suositukset tukevat Norjan standardiin NS 8176 perustuvaa ehdotusta liikennetärinän luokitukselta. Ehdotettu NS 8176:n mukainen suositus on hie- man vaativampi kuin Ruotsin suositus, mutta vähemmän vaativa kuin Saksan suositus.

Taulukko 2. Eri lähteiden suosituksia värähtelyiden ohjearvoiksi.

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

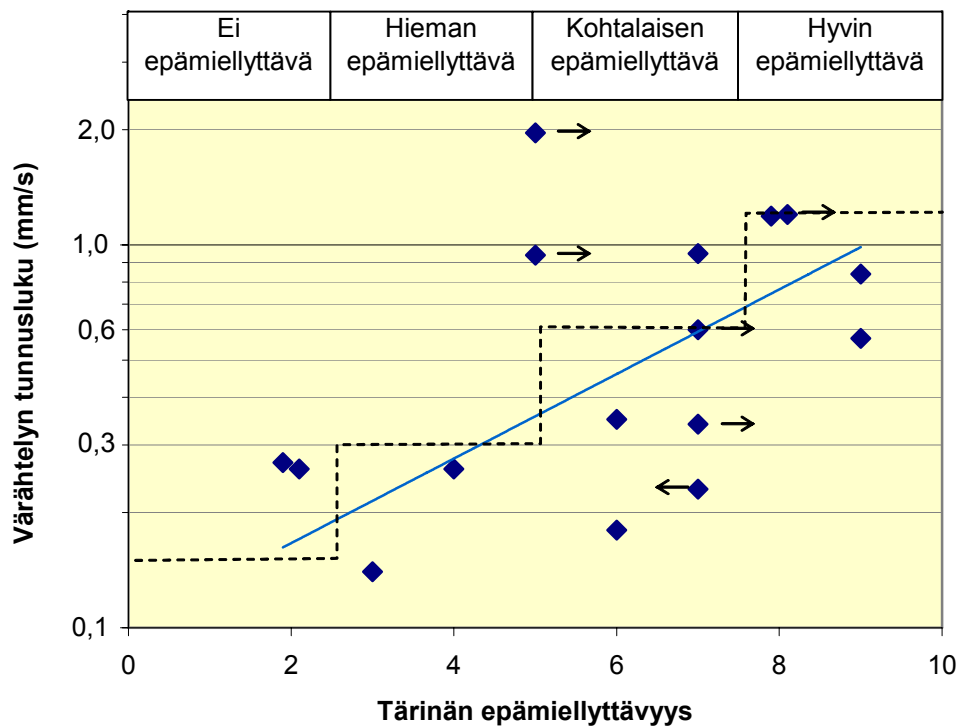
- 1) Jos yksittäisen junan arvo on maanpäällisellä kiskoliikenteellä arvoa suurempi, häiriön syy on selvitettävä (esim. lovipyörät) ja vika korjattava mahdollisimman nopeasti. Olemassa olevan junaliikenteen tapauksessa vanhoilla alueilla arvioidaan alueesta riippumatta tapauskohtaisesti haitan kohtuullisuus ja sen pienentämisen mahdollisuus.

Taulukossa esitetyt DIN 4150-2:n ja FRA:n tehollisarvot ovat tarkasti vertailukelpoisia vain kun nopeussignaali yli 10 Hz:n taajuudet ovat vallitsevia, sillä DIN käyttää tehollisarvon määrittämisessä lyhyempää aikaikkunaa ( $\tau=0,125$  s lausekkeessa 3) ja FRA ei käytä lainkaan värähtelynopeuden taajuuspainotusta (kuva 8). Huomattava on myös, että muut kuin NS 8176 eivät anna ohjeita tilastollisen maksimi-arvon  $v_{w,95}$  määrittämiseksi ja että vain DIN ja NS koskevat myös muuta kuin rautatieliikennettä.

### 4.2.3 VTT:n mittaukset

Kuvassa 13 on esitetty yhteenveto kuudentoista VTT:n mittaaman kohteen tuloksista. Kaikki VTT:n tulokset ovat kohteista, jossa asukkaat ovat havainneet värähtelyä. Kuvassa esitetty värähtelyn tunnusluku on määritetty siitä rakennuksen kohdasta, jossa mitatut värähtelyt ovat suurimmat. Kohteet on kuvattu liitteessä C.

Kuva osoittaa, että värähtelyn kokeminen on logaritmisessa suhteessa värähtelyn tunnusluvuun  $v_{w,95}$ . Tunnusluvun kaksinkertaistuminen johtaa miellyttävyysindeksin kaksinkertaistumiseen. Käytetty miellyttävyysindeksi 0 tarkoittaa, että värähtelyt eivät ole havaittavia ja 10 tarkoittaa, että värähtelyt ovat erittäin epämiellyttäviä.



Kuva 13. Värähtelyn tunnusluvun  $v_{w,95}$  ja tärinän epämiellyttävyuden riippuvuus VTT:n mittaustuloksen mukaan. Oikealle osoittavat nuolet kuvaavat tapauksia, joissa asukas sanoo tottuneensa värähtelyihin ja vasemmalle osoittavan nuolen tapauksessa asukas sanoo aikaisemmin herkistyneensä värähtelylle.

Kuva 13 vahvistaa myös käsityksen, että eri ihmiset kokevat saman värähtelyn hyvin eri tavoin. Samansuuruisen värähtelyn miellyttävyys voi vaihdella 5 yksikköä 10-numeroisella asteikolla. Joku voi esimerkiksi kokea värähtelyn vain hieman epämiellyttäväksi, kun joku toinen voi kokea sen hyvin epämiellyttäväksi. Kuva antaa myös viitteitä siitä, että värähtelyihin voidaan tottua tai niille voidaan herkistyä.



Kuvasta 13 ei liian pienen tulosjoukon vuoksi voida tehdä todennäköisyysperusteisia johtopäätöksiä. Kuvasta ilmenevät kuitenkin seuraavat tulokset:

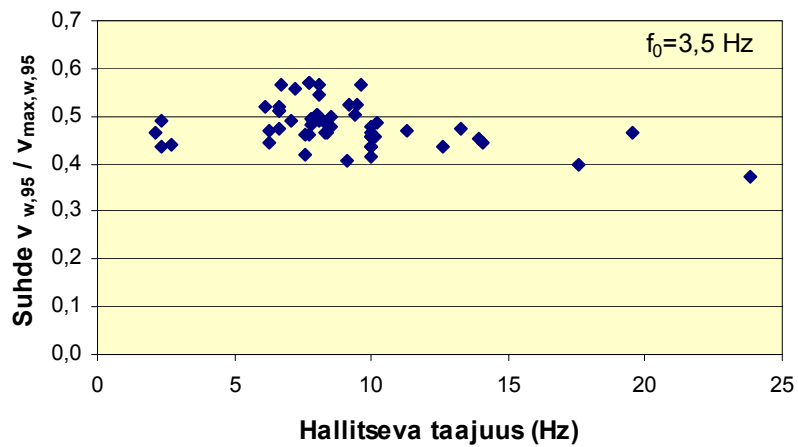
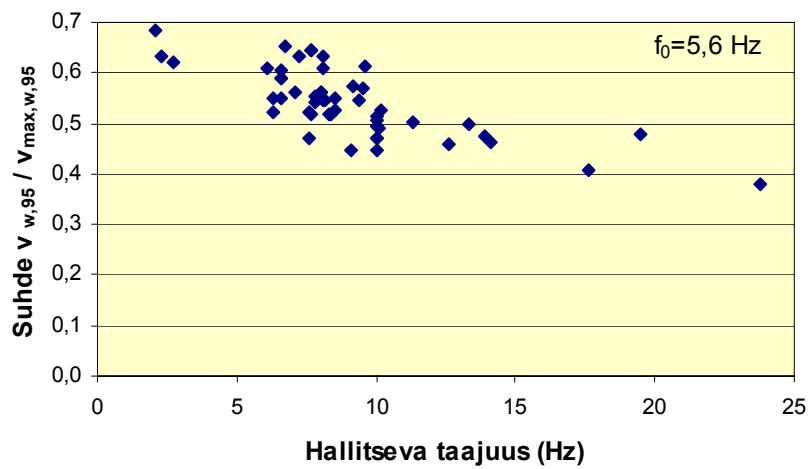
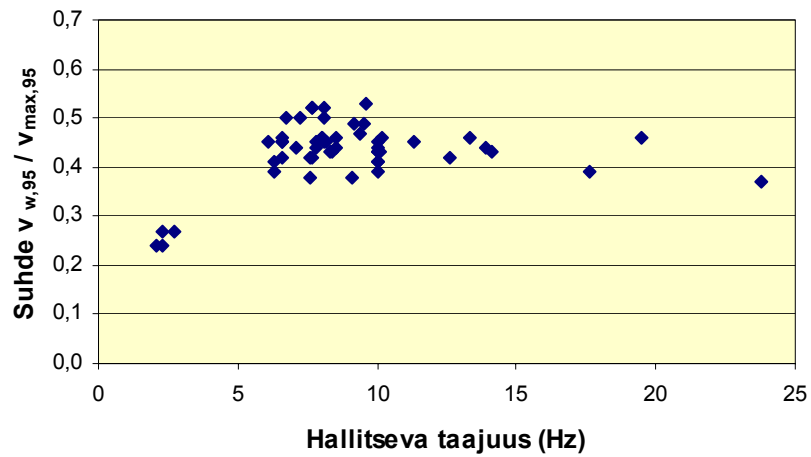
- Jos värähtelyn tunnusluku  $v_{w,95}$  on alle 0,3 mm/s, värähtelyt on koettu yleensä enintään hieman epämiellyttäväiksi. Poikkeuksellisesti kahdessa tapauksessa kuudesta tällaiset värähtelyt on koettu myös kohtalaisen epämiellyttäväiksi.
- Jos värähtelyn tunnusluku  $v_{w,95}$  on alle 0,6 mm/s, värähtelyt on koettu enintään kohtalaisen epämiellyttäväiksi.
- Jos värähtelyn tunnusluku  $v_{w,95}$  on yli 0,6 mm/s, värähtelyt on koettu aina hyvin epämiellyttäväiksi tai kohtalaisen epämiellyttäväiksi.

Tulosten perusteella standardin NS 8176 [1999] todennäköisyysperusteinen luokitus pätee myös Suomessa. Kun otetaan huomioon, että kaikissa VTT:n mittaamisissa kohteissa asukkaat ovat havainneet värähtelyt, värähtelyn tunnusluvun ja epämiellyttävyyden riippuvuus on jopa parempi kuin kuvassa 11 esitetystä NS 8176:n mukaisessa tausta-aineistossa.

### 4.3 Huippu- ja tehollisarvon välinen riippuvuus

Useat värähtelämittauksessa käytettävät laitteistot ilmoittavat värähtelyn huippuarvon ja signaalissa hallitsevan 1/3-oktaavikaistan värähtelytaajuuden (vrt. kuvat 7 ja 9). Värähtelyn huippuarvojen  $v_{\max}$  avulla määritettyä tunnuslukua  $v_{\max,95}$  voidaan käyttää suunta-antavana likiarvona värähtelyn tunnusluvulle  $v_{w,95}$ . Tällöin tunnusluku  $v_{\max,95}$  määritetään viikon aikana suurimmat värähtelyt aiheuttavista ajoneuvoista samalla tavalla kuin tunnusluku  $v_{w,95}$  määritetään, mutta vertailussa käytetään värähtelyn tehollisarvon sijaan värähtelyn huippuarvoa. Värähtelyn huippuarvo on värähtelysignaalin itseisarvoltaan suurin arvo.

Kuvassa 14 on verrattu tunnusluvun  $v_{w,95}$  suhdetta tunnuslukuun  $v_{\max,95}$ . Vertailu perustuu VTT:n mittaustuloksiin ja aineisto käsittää sekä maaperän, rakennuksen rungon että lattian värähtelyistä määritettyjä tunnuslukuja.



Kuva 14. Tehollisarvoon perustuvan tunnusluvun  $v_{w,95}$  suhde huippuarvoon perustuvaan tunnuslukuun  $v_{max,95}$ . Ylimmässä kuvassa ei ole käytetty korjausta ja kahdessa alimmassa kuvassa tunnusluku  $v_{max,95}$  on kerrottu signaalin hallitsevasta taajuudesta riippuvalla lausekkeen (9) mukaisella korjauskertoimella.

Kun vertailussa ei käytetä minkäänlaista korjausta, värähtelyn tehollisarvoon perustuva tunnusluku on noin 40–50 % värähtelyn huippuarvoon perustuvasta tunnusluvusta. Poikkeuksena ovat näytteet, joissa hallitseva 1/3-oktaavikaistan keskitaajuus on alle 6 Hz. Nämä tunnusluvut edustavat kahden 7-kerroksisen talon vaakavärähtelyä. Ilman näitä matalataajuisia värähtelyjä suhteen keskiarvo on 0,45 ja keskihajonta 0,04.

Mikäli tunnuslukua korjataan kertomalla tunnusluku  $v_{\max,95}$  korjauskertoimella

$$k = \sqrt{1 + (f_0 / f)^2}, \quad (9)$$

jossa  $f_0=5,6$  Hz ja  $f$  on signaalissa hallitsevan 1/3-oktaavikaistan keskitaajuus, suhde  $v_{w,95} / v_{\max,95}$  kasvaa alhaisilla taajuuksilla liian suureksi. Lausekkeessa (9) esitetty korjauskertoimen on lausekkeessa (1) esitetyn painotuskertoimen käänteisluku.

Parhaaseen vastaavuuteen päästään, kun lausekkeen (9) mukaisessa huippuarvon korjauskertoimessa käytetään vertailutaajuutena arvoa  $f_0=3,5$  Hz. Tällöin huippuarvoon perustuva tunnusluku on noin 40–55% värähtelyn tehollisarvoon perustuvasta tunnusluvusta. Suhteen  $v_{w,95} / v_{\max,95}$  keskiarvo on 0,48 ja keskihajonta 0,04, josta saadaan suhteelle  $v_{w,95} / v_{\max,95}$  ominaisarvoksi 0,55. Ominaisarvo on laskettu lisäämällä keskiarvoon hajonta 1,7-kertaisena (95 %:n fraktiili).

Tuloksen perusteella voidaan olettaa, että kun vertailu perustuu tunnuslukuun  $v_{\max,95}$ , hallitsevaan värähtelytaajuuteen  $f$  ja kun  $f_0=3,5$  Hz, niin

$$v_{w,95} \leq 0,55 \cdot v_{\max,95} \cdot \sqrt{1 + (f_0 / f)^2}. \quad (10)$$

Tätä lauseketta voidaan käyttää, kun arvioidaan värähtelyn tunnuslukua  $v_{w,95}$  huippuarvojen avulla määritetyn tunnusluvun  $v_{\max,95}$  perusteella.

## 5. Kyselytutkimusten käyttö

Kyselytutkimuksen käyttö on käyttökelpoinen lisäkeino selvittää asukkaiden mielipidettä tehtyjen muutosten vaikutuksesta. Muutokset voivat koskea väylän parantamista tai liikenteessä tapahtuvia muutoksia. Kyselytutkimus toteutetaan ennen muutosten tekemistä ja muutosten tekemisen jälkeen. Kyselytutkimusta voidaan käyttää myös mahdollisten ongelma-alueiden kartoituksessa.

Liitteessä D on esitetty mallilomake, jota voidaan käyttää kyselytutkimuksen tekemisessä. Lomake käsittää mm. kysymykset:

- miten paljon liikenteen aiheuttama tärinä häiritsee
- kuinka usein tärinä häiritsee
- millä tavoin tärinästä aiheutuva haitta ilmenee
- mihin vuorokaudenaikaan haitta ilmenee
- mikä yksittäinen liikenneväline häiritsee eniten yöllä ja päivällä
- vaikuttaako vuodenaika tärinöiden haitallisuuteen
- miten liikenteestä aiheutuva melu häiritsee ja
- onko tärinästä tai melusta valitettu.

Arviossa kysytään myös tietoja liikennemelusta, jotta saadaan käsitys myös siitä, miten tärinän häiritsevyys on suhteessa liikennemelusta aiheutuvaan häiriöön. Samalla vastaja joutuu miettimään, missä määrin häiriö saattaa johtua liikennemelusta. Kysymykset perustuvat pääosin Nordtestin (2001) tekemään ehdotukseen liikenneperäisen tärinän kyselytutkimuksen suorittamisesta.

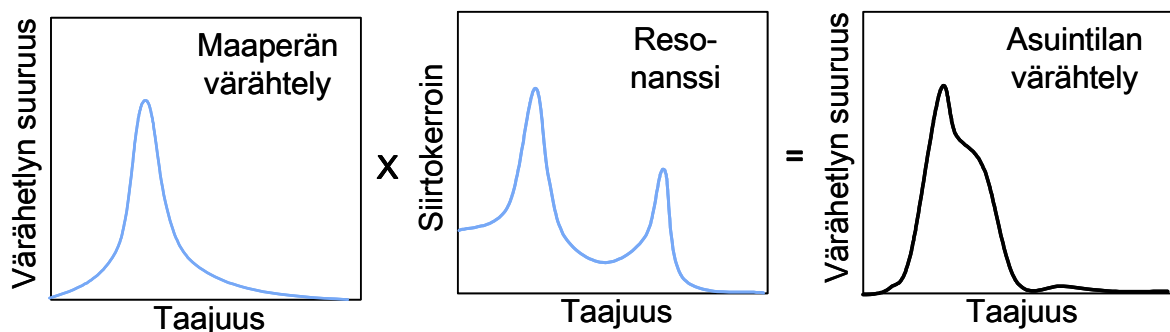
## 6. Maaperän värähtelyn siirtyminen rakennukseen

Rakennuksen dynaamiset ominaisuudet ja rakennuksen vuorovaikutus maan kanssa vaikuttavat rakennuksen värähtelyihin. Sekä rakennuksen värähtelyn suuruus että värähtelyn taajuussisältö eroavat maaperästä mitatuista värähtelyistä (kuva 15). Rakennuksen pysty- ja vaakavärähtelyt arvioidaan yleensä vain maaperän pystyvärähtelyyn perustuen. Rakennuksen värähtelyihin vaikuttavat myös maaperän vaakasuuntaiset värähtelyt, mutta kolmen maaperän värähtelykomponentin yhteisvaikutus on vaikeasti mallinnettavissa ja vaakasuuntaisten värähtelysuunnan mittaaminen kasvattaa mitattavien värähtelyiden lukumäärän kolminkertaiseksi.

Tärinän siirtymiseen rakennuksessa vaikuttavat mm.

- perustamistapa
- maaperän värähtelyn taajuussisältö
- pinta-aallon pituus (vrt. kuvan 2 osakuva)
- rakennuksen mitat
- rungon resonanssi sekä
- välipohjan ja muiden rakenneosien resonanssi.

Asuintiloissa merkittävin värähtely on yleensä rakennuksen rungon vaakasuuntainen tai lattian pystysuuntainen värähtely, koska ihminen voi tuntea sen suoraan kehossaan. Rungon ja lattian lisäksi rakennuksessa on paljon erilaisia osia ja kalusteita, jotka voivat alkaa värähdellä ja johtaa niiden tai niihin kiinnitettyjen tavaroiden heilumiseen tai helinään.

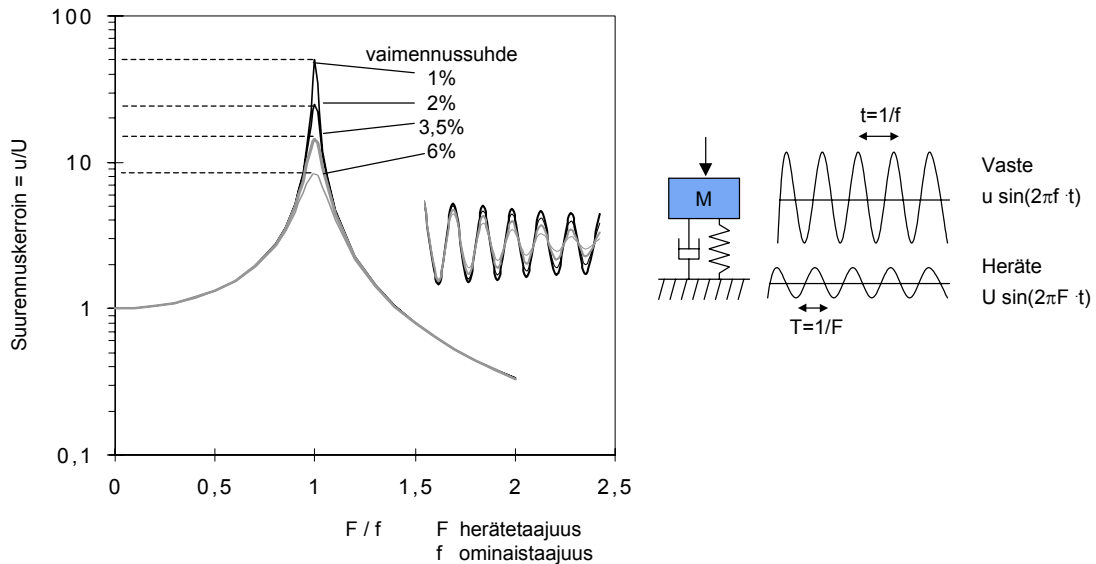


Kuva 15. Kaaviomainen esitys rakennuksen resonanssin vaikutuksesta värähtelyihin.

### 6.1 Resonanssi-ilmiö

Rakennuksen eri osien värähtelykäyttäytymisen ymmärtämiseksi on tunnettava resonanssi-ilmiö. Kun esimerkiksi maaperän värähtelyn jokin taajuus sattuu lähelle raken-

teen omaa ominaisvärähtelytaajuutta, syntyy resonanssi. Tällöin rakenne vahvistaa voimakkaasti värähtelyä. Jos rakenteeseen kohdistuvan värähtelyn taajuus on huomattavasti pienempi kuin resonanssitaajuus, värähtelyt siirtyvät samansuuruisina rakenteeseen. Jos taas rakenteeseen kohdistuva taajuus on huomattavasti resonanssitaajuutta suurempi, niin värähtelyt vaimenevat (kuva 16).



Kuva 16. Värähtelyn suurennuskerroin herätetaajuuden ja jousi-massa -systemin ominaistaajuuden suhteen ( $F/f$ ) funktiona, kun vaimennussuhteet ovat 1 %, 2 %, 3,5 % ja 6 %. Kuvassa on esitetty myös näytteet eri vaimennussuhteilla tapahtuvasta värähtelyn vaimenemisesta.

Maaperän värähtely sisältää eritaajuuksisia värähtelyjä. Rakennukseen siirtyessään maaperästä tulevan värähtelyn kukin taajuuskomponentti käyttäytyy eri tavoin. Ominaistaajuuden alapuolella komponentit eivät juuri muutu, resonanssialueella komponentit voivat kasvaa jopa monikymmenkertaisiksi ja ominaistaajuuden yläpuolella komponentit voivat pienetä jopa kymmenesosaan.

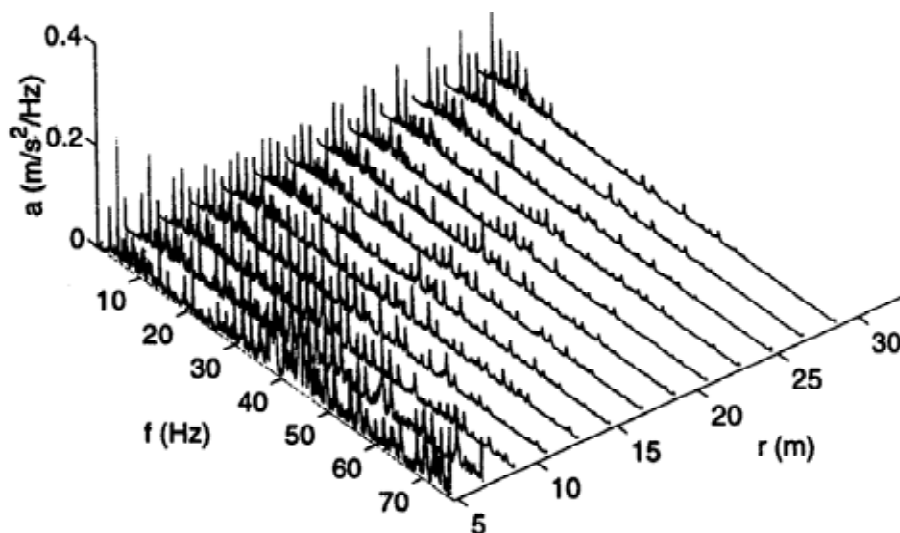
Koska värähtelyn tehollisarvo lasketaan kaikkien taajuuskomponenttien yhteisvaikutuksena (vrt. lauseke 4), rakennuksesta ja maaperästä mitatut tehollisarvot voivat poiketa oleellisesti suuruudeltaan. Erityisesti siinä tapauksessa, että maaperän värähtely on kaapeakaistaista, resonanssin merkitys on suuri. Erityisen merkittävä on välillä 0,75–1,25 kertaa resonanssitaajuus oleva taajuusalue. Esimerkiksi jos rakennuksen rungon alin ominaistaajuus on 8 Hz ja maaperän värähtelykomponentit jakaantuvat tasaisesti taajuusalueelle 6–10 Hz, rakenteen vaimennuksesta riippuen maaperän värähtelyn tehollisarvo voi rakennuksessa voimistua 5–12-kertaisiksi. Toisaalta jos kaikki maaperän värähtelyt tapahtuvat yli 10 Hz:n taajuusalueella, rungon värähtelyn tehollisarvo voi olla vain murto-osa maaperän värähtelyn tehollisarvosta.

Jos maaperän värähtelyn taajuussisältö tunnetaan, rakennesuunnittelulla voidaan pienentää resonanssin merkitystä. Suunnittelussa on kuitenkin muistettava, että myös rakenteen ylemmillä ominaistajuuksilla voi olla merkitystä. Rungon ja lattian ylemmätkin värähtelymuodot voivat herätä resonanssiin, vaikka alimpien ominaismuotojen merkitystä pidetään yleensä merkittävimpänä.

Eri rakenneosien värähtelyiden vertailu voi perustua joko eri mittauspisteistä mitattuun samanaikaiseen värähtelyyn tai eri mittauspisteissä määritettyihin värähtelyn tunnuslukuuihin. Sovellettavuuden kannalta selkein tapa on verrata rakennuksen värähtelyjä suoraan maaperän pystyvärähtelyn tunnuslukuun. Tällöin sekä rungon että lattian värähtelyn tunnusluku voidaan arvioida maaperästä mitatun värähtelyn tunnusluvun avulla.

## 6.2 Maaperän värähtelytaajuudet

Herätteestä, esimerkiksi junasta tai hidastetöyssyn ylittävästä ajoneuvosta, aiheutuu maaperään värähtely, joka sisältää useita taajuuskomponentteja. Ympäristöön leviävän värähtelyn taajuussisältö riippuu merkittävästi maaperän laadusta. Yli 15 metrin etäisyydellä värähtelylähteestä pehmeillä savimailla dominoivat yleensä matalat taajuudet (5–15 Hz) ja kovilla moreenimailla korkeammat taajuudet (10–25 Hz). Taajuussisältö riippuu etäisyydestä. Matalat taajuudet vaimenevat hitaammin kuin korkeat taajuudet (kuva 17).



Kuva 17. Esimerkki etäisyyden vaikutuksesta värähtelyn taajuussisältöön. Kyseessä on tavaraajuna ja pehmeä, noin 40 m syvä savikerros. Kuvassa  $a$  esittää maanpinnan pystysuuntaisen värähtelyn taajuuskomponentin  $f$  voimakkuutta etäisyydellä  $r$ . [Jonsson 2000].

Neljästätoista VTT:n mittaamasta kohteesta (liite C) saatujen tulosten mukaan 60–100 % maaperän värähtelyn painotetusta tehollisarvosta  $v_w$  muodostuu pehmeillä savi- mailla yleensä värähtelyistä, joiden taajuus on 6–10 Hz. Poikkeuksena oli kaksi kohdetta, joilla merkitsevimmät taajuudet olivat alueella 15 Hz ja 25 Hz. Vaikka kaikki kohdet on ilmoituksen mukaan perustettu savimaalle, korkeammat taajuudet viittaavat pehmeää savea kovempaan maalajiin. Ainakin toisen poikkeavan kohteen (taajuus 25 Hz) perustuksen voidaan arvella ulottuvan sorakerrokseen, sillä talo on rinneratkaisu ja rakennettu soraharjun rinteeseen.

## 6.3 Rungon värähtelyjen voimistuminen

Rungon värähtely on värähtelyistä merkittävin, koska se saa koko rakennuksen värähtelemään. Erityisesti se on haitallista 2–3-kerroksisissa rakennuksissa. Korkeissa rakennuksissa rungon värähtelyn merkitys on vähäisempää, koska niissä ominaistaajuus on yleensä pienempi kuin maaperässä esiintyvät värähtelytaajuudet.

### 6.3.1 Värähtelytaajuudet ja vaimennukset

Standardin ISO 4866 lisäyksessä [ISO 4866, 1994] on esitetty 96 pientalon rungon alimmat mitatut ominaistaajuudet ja vaimennukset. Mittaukset on tehty USA:ssa 1-, 1<sup>1/2</sup>- ja 2-kerroksisista pientaloista. Mittaukset käsittävät sekä kellarikerroksellisia että ryömintätilallisia rakennuksia. Lisäksi VTT on mitannut 34 pientalon rungon ominaistaajuuden. Mitatut talot ovat 1–2-kerroksisia. Kuvan 18 mukaan pientalojen rungon alimmat ominaistaajuudet ovat yleensä 5–14 Hz, keskimäärin 6–8 Hz.

Lähteen [ISO 4866, 1994] mukaan suhteelliset vaimennukset ovat mitatuissa kohteissa 2–7 %, keskimäärin 4–5 %. Talon iällä, sijainnilla ja mittasuhteilla ei mitatuissa kohteissa havaittu olevan oleellista merkitystä ominaistaajuuteen. Korkeammissa taloissa havaittiin kuitenkin yleensä hieman alhaisemmat ominaistaajuudet kuin matalissa taloissa.

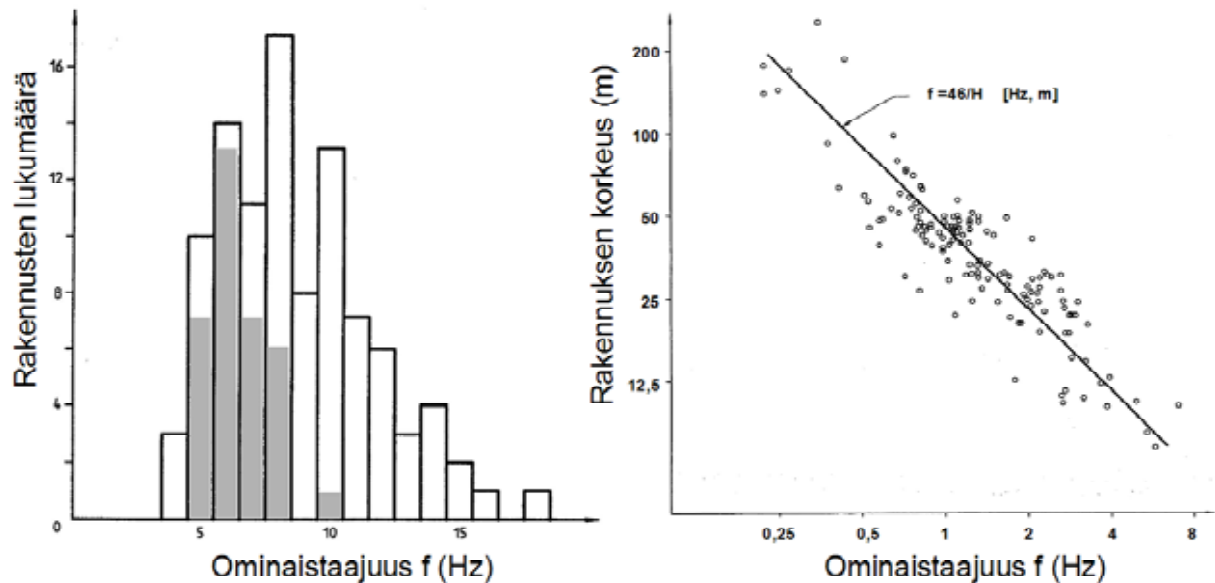
Standardin ISO 4866 lisäyksessä [ISO 4866, 1994] on esitetty myös 163 kerrostalon rungon alimmat mitatut ominaistaajuudet sekä joidenkin tyypillisten kerrostalojen vaimennuksia. Kuvassa 18 on esitetty rakennuksista mitatut alimmat ominaistaajuudet. Tulosten mukaan ominaistaajuuden suuruutta voidaan karkeasti arvioida lausekkeella

$$f = \frac{46}{H} \quad (11)$$



jossa H on rakennuksen korkeus metreinä. Esimerkiksi tyypillisen 7–8-kerroksisen talon ominaistajuuks on noin 2 Hz. Arvo vastaa VTT:n kahdesta 7- ja 8-kerroksisesta talosta saamia tuloksia (kohdekuvaukset liitteessä C).

Kerrostaloilla suhteelliset vaimennukset ovat välillä 0,5–2,1 %. Arvot ovat huomattavasti pienempiä kuin pientaloista mitatut vaimennukset.



Kuva 18. Rakennusten ominaistaajuuksia. Vasemmalla: Pientaloista mitatut alimmat ominaistaajuudet. Oikealla: Kerrostalon ominaistaajuuden riippuvuus rakennuksen korkeudesta [ISO 4866, 1994]. Vasempaan kuvaan lisätyt harmaat pylväät esittävät VTT:n mittaustuloksia.

### 6.3.2 Värähtelyn voimistuminen

Rungon vaakasuuntaisia värähtelyjä on tutkittu hyvin vähän. Lähteen [Madshus et al. 1996] kaksikerroksisen puutalon rungon toisen kerroksen vaakavärähtelyn ja maaperän pystyvärähtelyn tehollisarvojen suhde on keskimäärin 1,9 ja suhteen keskihajonta 1,2. Tämän mukaan rakennuksen värähtelyiden arvioinnissa tulisi maaperästä mitatut värähtelyt kertoa vähintään kertoimella 4.

Kun vertailu perustuu eri mittauspisteistä mitattuun samanaikaiseen värähtelyyn, VTT:n eri kohteista (liite C) määritetty vaakavärähtelyn ja maaperän pystyvärähtelyn painotettujen tehollisarvojen suhde on eri kohteilla keskimäärin välillä 0,28–1,58. Yksittäisestä kohteesta mitattu suurin arvo on 2,21. Tämä suhde on kuitenkin sellaisesta näytteestä, jolla vaakasuuntaiset värähtelyt ovat vain 40 % mitatusta suurimmasta vaakasuuntaises-

ta arvosta. Resonanssin syntyminen on siis osittain satunnaista, suurin maaperän värähtely ei välttämättä johda suurimpaan rungon värähtelyyn.

Kun vertailu perustuu värähtelyn tunnuslukuun  $v_{w,95}$ , toisen kerroksen vaakavärähtelyn ja maaperän värähtelyn suhde on 0,34–1,54. Suhteen keskiarvo on 0,86 ja keskihajonta 0,36, joista rungon vaakavärähtelyn ja maaperän pystyvärähtelyn tunnuslukujen suhteelle saadaan ominaisarvoksi 1,50. Ominaisarvo on laskettu lisäämällä keskiarvoon hajonta 1,8-kertaisena.

Vaikka vaaka- ja pystyvärähtelyn tunnusluvun suhde ei näytä merkittävää värähtelyjen voimistumista, rungon resonanssin merkitys värähtelyihin on suuri. Toisen kerroksen ja perustuksen vaakavärähtelyjen suhteen keskiarvo on 3,00 ja keskihajonta 1,35, joista rungon ja perustuksen vaakavärähtelyjen tunnuslukujen suhteelle saadaan ominaisarvoksi 5,4. Suurin mitattu toisen kerroksen vaakavärähtely on jopa 7,8-kertainen perustuksen samansuuntaiseen värähtelyyn nähden. Koska tässä tapauksessa perustuksen vaakavärähtely on kuitenkin vain noin 10 % maaperän pystyvärähtelystä, rakennuksen vaakavärähtelyn suhde maaperän pystyvärähtelyyn on vain 0,8. Vaikka osa toisen kerroksen vaakavärähtelystä voi johtua myös rakennuksen keinumisesta maan pinta-aloilla (vrt. kuva 2), rungon resonanssi-ilmiön vaikutus on silti merkittävä.

Rakennuksen rungon materiaaleilla ei VTT:n mittausten perusteella voida arvioida olevan selvää vaikutusta vaakavärähtelyjen suuruuteen. Perustamistavan, kuten antura- ja laattaperustuksen, kellarikerroksen tai rakennuksen paalutuksen, ei myöskään havaittu aiheuttavan tuloksiin johdonmukaista eroa.

Kahdesta VTT:n mittaamasta kerrostalokohteesta saatujen tulosten perusteella 7–8-kerroksisilla taloilla rakennuksen vaakasuuntaiset värähtelyt eivät ole merkittäviä. Näillä taloilla rungon alin ominaistajuus oli noin 2 Hz. Matalampia kerrostaloja, joiden rungon ominaistajuus on noin 3–5 Hz (vrt. kuva 18), ei tutkimuksessa ollut.

Yhteenvetona voidaan todeta, että kaavoituksessa on puolitoista- ja kaksikerroksisilla rakennuksilla materiaaleista ja perustamistavoista riippumatta varauduttava rakennuksen vaakasuuntaiseen värähtelyyn, jonka tunnusluku on kaksi kertaa maasta mitattu pystysuuntaisen värähtelyn tunnusluku  $v_{w,maa}$ . Korkeilla kerrostaloilla liikenteestä aiheutuvan vaakasuuntaisen värähtelyn ei havaittu olevan merkittävää.

## 6.4 Lattian värähtelyjen voimistuminen

Rungon värähtelyn lisäksi myös rakennuksen lattioiden värähtely voi olla häiritsevää. Koska pystyrakenteet siirtävät perustuksen pystyvärähtelyt myös ylempiin kerroksiin, lattioiden värähtely voi olla myös korkeiden kerrostalojen ongelma.

### 6.4.1 Värähtelytaajuus ja vaimennukset

Lattialla on useita erilaisia värähtelymuotoja, joiden herääminen riippuu herätteen taajuussällöstä. Värähtelymuotoja on sitä enemmän, mitä suurempi on lattian pituus- ja poikittais-suuntaisen jäykkyyden ero. Yleensä alinta ominaistajuutta vastaavaa värähtelymuotoa pidetään kuitenkin pahimpana, kun kyse on liikenteen aiheuttamasta värähtelystä.

Lattian ominaistajuuteen vaikuttaa oleellisesti lattian tyyppi ja jänneväli. Alin ominaistajuus vaihtelee yleensä välillä 3–30 Hz ja se on helposti arvioitavissa laskennallisesti [Talja & Toratti 2002]. Kevyiden puu- tai teräsrunkoisten lattioiden jänneväli on yleensä 3–8 m, ominaistajuus 8–30 Hz ja vaimennus 3–7 %. Mitä lyhyempi on jänneväli, sitä suuremmat ovat ominaistajuudet. Raskaammilla ja pitempijänteisillä ontelolaattalattioilla ominaistajuus on yleensä alempi, 6–20 Hz. Pitkäjänteisillä teräsbetoniliittorakenteilla ominaistajuudet voivat olla vielä alhaisempia, yleensä välillä 3–8 Hz. Ontelolaattalattioilla ja muilla raskailla lattioilla vaimennus vaihtelee väliseinien yms. varusteiden määrästä riippuen ja on yleensä välillä 2–4 %.

### 6.4.2 Värähtelyn voimistuminen

Lattioiden värähtelyä on tutkittu enemmän kuin rakennuksen rungon värähtelyä. Lähteen [Madshus et al. 1996] mukaan puutalon lattian pystyvärähtelyn ja maaperän pystyvärähtelyn suhde on keskimäärin 1,3 ja suhteen keskihajonta 1,0. Tämän mukaan rakennuksen värähtelyiden arvioinnissa tulisi maaperästä mitatut värähtelyt kertoa vähintään kertoimella 3.

Lähteessä [Hunaidi & Tremblay 1997] esitetyn yhdeksän pien- ja pienkerrostalon mittauksien mukaan lattian pystyvärähtelyn ja maaperän pystyvärähtelyn tehollisarvojen suhde on keskimäärin 1,35 ja suhteen keskihajonta on 0,82.

Kun vertailu perustuu eri mittauspisteistä mitattuun samanaikaiseen värähtelyyn, VTT:n eri kohteista määritetty lattian ja maaperän pystyvärähtelyn painotettujen tehollisarvojen suhde on paalutettuja taloja ja maanvaraista lattiaa lukuunottamatta keskimäärin välillä 0,64–1,04, vaikka yksittäisestä kohteesta mitattu suurin arvo on 2,72.

Kun vertailu perustuu värähtelyn tunnuslukuun  $v_{w,95}$ , lattian värähtelyn ja maaperän värähtelyn suhde on paalutettuja taloja ja laatalle perustettuja taloja lukuun ottamatta välillä 0,78–1,35. Suhteen keskiarvo on 1,09 ja keskihajonta 0,21, joista lattian ja maaperän pystyvärähtelyn tunnuslukujen suhteelle saadaan ominaisarvoksi 1,47. Mitatuilla kahdella paalutetulla talolla lattian ja maaperän värähtelyn tunnuslukujen suhde oli 0,14–0,63. Laattaperustuksilla olevilla taloilla suurimmat värähtelyt esiintyvät usein lattian reuna-alueella. Mitatuissa kahdessa kohteessa lattian reunan pystyvärähtelyn ja maaperän pystyvärähtelyn suhde oli 0,56–0,72. Muuten lattian materiaaleilla ei VTT:n mittauksissa ilmennyt selviä eroja.

Kahdesta VTT:n mittaamasta kerrostalokohteesta saadut tulokset osoittavat, että rakennuksen kantavalla linjalla pystyvärähtelyt ovat ylä- ja alakerroksissa yhtä suuret. Tarkastelluista kohteissa lattian keskeltä mitatut värähtelyt ovat samaa suuruusluokkaa kuin kantavalla linjalla. Mittauksissa ei selvitetty lattian maaperän värähtelyn suhdetta lattian pystyvärähtelyihin. Lähteen [FRA 1998] mukaan kerrostalon perustuksen pystyvärähtelyt voivat olla noin puolet pientalojen perustuksen pystyvärähtelyistä, joka yhdistettynä pientalojen lattioista saatuun kokemukseen osoittaisi, että lattian pystyvärähtelyissä riittäisi varautuminen maaperän pystyvärähtelyjen suuruiseen värähtelyyn. Menettelyn käyttö tulee kuitenkin varmentaa laajemmalla mittausohjelmalla, sillä kerrostalolla kaikkia huoneistoja koskeva tärinä on suurempi ongelma kuin yhdellä pientalolla.

Yhteenvetona voidaan todeta, että kaavoituksessa on sekä pien- että kerrostalojen kaikissa kerroksissa materiaaleista riippumatta varauduttava lattian pystysuuntaiseen värähtelyyn, jonka tunnusluku on kaksi kertaa maasta mitattu pystysuuntaisen värähtelyn tunnusluku  $v_{w,maa}$ . Poikkeuksena ovat maanvaraiset lattiat sekä paalutetut rakennukset, jolloin lattian värähtelyssä ei tarvitse varautua maaperän värähtelyn tunnuslukua suurempiin arvoihin.

## 7. Yhteenveto ja jatkotutkimustarpeet

### 7.1 Yhteenveto

Tässä tutkimuksessa liikennetärinää on tarkasteltu asuntojen viihtyvyys- ja ympäristöongelmana. Tutkimuksessa on kuvattu tärinän merkitystä ympäristöhaittana, esitetty suositus liikennetärinän tärinän mittaamisesta ja luokituksesta sekä esitetty arvioita rakennukseen siirtyvän tärinän suuruudesta. Joskus haitallisiksi voivat muodostua myös liikenteen aiheuttavat runkoäänet rakennuksessa tai suuremmilla tärinöillä rakennusten vaurioituminen, joita tämä tutkimus ei käsittele. Tutkimus ei myöskään arvioi esitettyjen suositusten vaikutusta nykyiseen asuntokantaan tai aluesuunnitteluun.

Tärinän merkitys ympäristöhaittana korostuu liikenteen ja maankäytön suunnittelussa sekä rakentamisessa. Ympäristönsuojelulaki (N:o 86/2000), Maankäyttö- ja rakennusasetus (N:o 895/1999) ja pohjarakenteita koskeva Suomen rakentamismääräyskokoelman osa B3 (2004) velvoittavat tärinästä aiheutuvat ympäristöhaitat otettavaksi huomioon. Laki ympäristövahinkojen korvaamisesta (N:o 737/1994) korostaa kaavoittajien ja vahingon aiheuttamiseen osallistuvien vastuuta.

Liikenteen aiheuttamat haitat ovat suuria erityisesti pehmeillä savimailla. Tällöin värähtely voi olla haitallista vielä, kun rakennukseen etäisyys väylästä on tavarajunaliikenteellä 50–300 m (kuva 4). Vastaava etäisyys on tieliikenteellä 15–60 m, kun kyse on raskaista ajoneuvoista ja suurista epätasaisuuksista, kuten hidastetöyssyistä (kuva 5). Etäisyys riippuu voimakkaasti maaperän ominaisuuksista, kerroksellisuudesta ja rakennuksen tyypistä (kuva 2). Uusilla asuinalueilla tulee pyrkiä vanhoja asuinalueita pienempiin värähtelyihin. Tällöin etäisyydet voivat olla moninkertaiset edellä esitettyihin arvoihin nähden.

#### Suositus tärinän mittaamisesta ja ohjearvoista

Tutkimuksessa esitetty suositus liikennetärinän luokituksesta ja luokkien rajat perustuvat Norjan standardiin NS 8176 [1999]. Tärinän mittaus perustuu standardin ISO 2631-2 [2003] mukaiseen värähtelynopeuden taajuuspainotettuun tehollisarvoon. Värähtelyn tunnuslukuna käytetään asuintiloista yhden viikon aikana mitattua tilastollisesti suurinta tehollisarvoa. Käytännössä tunnusluku määritetään 15 liikennevälineestä, jotka ovat aiheuttaneet suurimmat värähtelyt.

Luokituksen mukaan värähtelyn tunnusluvun tulisi vanhoilla asuinalueilla olla alle 0,6 mm/s ja uusilla asuinalueilla alle 0,3 mm/s (taulukko 1). Norjan standardi perustuu laajaan tilastolliseen aineistoon. Siinä esitetyt suositukset vastaavat eri maissa esitetty-

jen suositusten keskimääräistä tasoa (taulukko 2). Myös VTT:n mittaustulokset tukevat esitetyn suosituksen soveltuvuutta. Noin puolessa VTT:n mittaamista 16 kohteesta värähtelyn tunnusluku oli suurempi kuin 0,6 mm/s ja kaikissa näissä kohteissa asukkaat kokivat värähtelyt kohtalaisen tai hyvin epämiellyttäväksi (kuva 13). Kun värähtelyt olivat alle 0,3 mm/s, asukkaat kokivat värähtelyt yleensä enintään hieman epämiellyttäväksi (kuva 13).

### Rakennukseen siirtyvän värähtelyn arviointi

Maaperän pysty- ja vaakavärähtelyjen siirtyminen rakennukseen riippuu rakennuksen dynaamisten ominaisuuksien lisäksi maaperän värähtelyn taajuusjakaumasta, pinta-aallon pituudesta sekä perustuksen ja maaperän vuorovaikutuksesta (kuva 2). Rakennuksen värähtelyissä merkittävimmät ovat rungon vaakasuuntaiset värähtelyt ja lattian pystysuuntaiset värähtelyt. Erityisen merkittäviä ovat ne maaperän värähtelykomponentit, jotka ovat lähellä rungon tai lattian ominaistajuuksia, sillä resonanssi-ilmiö voi kasvattaa ominaistajuutta lähellä olevien värähtelykomponenttien suuruuden jopa 10–30-kertaiseksi. Resonanssin merkitys riippuu merkittävästi liikennevälineestä, suurin maaperän värähtelyn tehollisarvo ei välttämättä johda suurimpaan rakennuksen värähtelyn tehollisarvoon.

Tutkimuksessa on verrattu asuintiloista määritettyä värähtelyn tunnuslukua maaperän pystysuuntaisen värähtelyn tunnuslukuun. Kirjallisuudesta löytyneiden tulosten mukaan kaksikerroksisilla taloilla rungon vaakasuuntaiset ja lattian pystysuuntaiset värähtelyt ovat keskimäärin noin 1,5-kertaiset ja voivat olla jopa 3–4-kertaiset maaperän pystysuuntaisiin värähtelyihin nähden.

VTT:n 14 eri pientalosta saadut tulokset osoittavat, että sekä toisen kerroksen vaakavärähtelyn että lattian pystyvärähtelyn tunnusluvun suhde maaperän värähtelyn tunnuslukuun on paaluttamattomilla rakennuksilla useimmiten välillä 0,7–1,3. Tilastollinen maksimi on 1,5. Paalutus pienentää pystysuuntaista värähtelyä, mutta vaakasuuntaisiin värähtelyihin paalutuksella ei ole selvää vaikutusta. VTT:n mittauskohteet olivat pehmeillä savialueilla, joilla yli 60 % maaperän värähtelyn tunnusluvusta määräytyi 6–10 Hz:n värähtelykomponenteista. Pientalojen rungon värähtelytaajuus on yleensä tällä 6–10 Hz:n taajuusalueella (kuva 18), mutta pientalojen lattian värähtelytaajuus on yleensä yli 10 Hz.

Tulosten perusteella suositellaan, että suunnittelun perusteena käytetään maaperän pystysuuntaista värähtelyn tunnuslukua. Yksikerroksisilla rakennuksilla vaakavärähtelyä ei tarvitse huomioida. Kaksikerroksisen rakennusten vaakavärähtelyssä on varauduttava kaksinkertaiseen värähtelyn tunnuslukuun. Myös ala- ja välipohjien pystysuuntaisessa

värähtelyssä on yleensä varauduttava kaksinkertaiseen värähtelyn tunnuslukuun. Poikkeuksena ovat paaluille perustettujen 1–2-kerroksisten talojen ala- ja välipohjat sekä maanvaraiset lattiat, joilla on varauduttava samansuuruiseen 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 varautuminen maaperän pystyvärähtelyiden suuruiseen värähtelyyn. Menettelyn käyttö tulee kuitenkin varmentaa laajemmalla koesarjalla, sillä kerrostalossa lattioiden tärinästä aiheutuva riski on suurempi kuin yksittäisessä pientalossa.

### Suosituksset maankäytön suunnitteluun

Maankäytön suunnittelussa tulee olla tavoitteena, että uusissa asunnoissa värähtelyn tunnusluku ei ylitä arvoa 0,3 mm/s. Tärinähaitan pienentäminen myöhemmin on vaikeaa. Toistaiseksi rakentamattoman alueen värähtelyjen arviointiin ei ole olemassa tarkkaa menetelmää, ja siksi värähtelyn arviointi perustuu todennäköisyysperusteiseen arviointiin.

Tärinätarkastelun ensimmäisessä vaiheessa tehdään riskiarviointi, joka perustuu aikaisempaan kokemukseen tai asiantuntijan tekemään arviointiin. Aikaisempi kokemus voi perustua samalta tai vastaavalta alueelta tehtyihin valituksiin, suoritettuihin mittauksiin tai erikseen tehtyyn kyselyselvitykseen. Junaliikenteellä riskialueen suunta-antavassa arvioinnissa voidaan käyttää apuna kuvaa 4. Tärinän merkitys tulee arvioida tarkemmin ainakin siinä tapauksessa, että asunnon etäisyys radasta ulottuu kuvassa esitetylle epävarmalle alueelle. Tieliikenteellä riskialueen laajuus riippuu voimakkaasti tien kunnosta. Huonokuntoisilla teillä ja kaduilla riskialuetta voidaan arvioida kuvan 5 perusteella.

Mikäli asunto sijoittuu riskialueelle, tulee tärinästä mahdollisesti aiheutuvat haitat arvioida tarkemmin. Tärinätarkastelun toinen vaihe suositellaan tehtäväksi mittaamalla. Mittauksen avulla määritetään maaperän pystyvärähtelyn tunnusluku eri etäisyyksillä väylästä. Tunnusluvun määrittäminen tehdään tässä raportissa esitetyn suosituksen mukaisesti. Mittaustuloksista kannattaa analysoida myös maaperän värähtelyn taajuussisältö, jota voidaan käyttää rakennesuunnittelun apuna.

Tärinätarkastelun kolmannessa vaiheessa asunnossa esiintyvä värähtely arvioidaan kertomalla maaperästä mitattu rakennuksen värähtely tässä raportissa esitetyn suosituksen mukaisesti rakennuksen tyypistä riippuvalla korjauskertoimella. Asunnossa värähtelyn tunnusluvun tulee olla alle 0,3 mm/s. Mikäli arvo ylitetään ja jos maaperän värähtelyta-

juudet on mitattu, asiantuntija voi joissakin tapauksissa rakenteiden dynaamisia ominaisuuksia optimoimalla pienentää asuntoon siirtyvien värähtelyiden suuruutta.

## 7.2 Jatkotutkimustarpeet

Jatkotutkimuksissa on erityisen tärkeää, että kootaan lisää tietoa ehdotetun luokituksen soveltuvuudesta tärinän raja-arvoiksi, kehitetään tärinän siirtymisen ehkäisykeinoja ja kehitetään entistä tarkempia menetelmiä sekä maaperän että rakennuksen tärinän arvioimiseksi. Pehmeillä savimailla maaperän värähtelyjen vaikutusalue voi ulottua tavara- ja junajunaliikenteellä pahimmassa tapauksessa jopa 1 000 metriin ja raskaalla tieliikenteelläkin 200 metriin. Jos rakennukseen värähtelyt saadaan puolitettua, liikenteen vaikutusalue pienenee murto-osaan alkuperäisestä. Parannus merkitsee oleellista asuinkäyttöön soveltuvan maa-alueen lisääntymistä.

### Suosittelujen saattaminen ohjeiksi

Ennen ehdotetun tärinäluokituksen muuttamista virallisiksi raja-arvoiksi tulee luokituksesta hankkia käyttökokemusta, jotta saadaan lisää tilastollista luotettavuutta ehdotetun tärinäluokituksen soveltuvuudesta. Erityisesti tulee mitata lisää kohteita, joissa tärinästä on valitettu. Tulosten vertailukelpoisuuden vuoksi tulokset tulee esittää tässä raportissa ehdotetun menetelmän mukaisesti. Lisäksi tulee seurata kansainvälistä raja-arvojen kehitystä.

Ennen raja-arvojen käyttöönottoa tulee pystyä arvioimaan siitä aiheutuvat seuraukset. Erityisen tärkeää on tietää, kuinka suurta asuntokantaa raja-arvot koskevat. Lisäksi tulee tuntea realistiset keinot tärinähaittojen pienentämiseksi ja niiden kustannusvaikutukset.

Uusilla asuinalueilla ongelmana on, että vaikka maaperän tärinä voidaan mitata tarkasti, rakennukseen siirtyvän värähtelyn arviointi on epätarkkaa. Arviointiin liittyvän riskin minimoimiseksi tulee ennen raja-arvojen käyttöönottoa hallita paremmin eri rakennustyyppien ja perustamistapojen vaikutus asunnossa esiintyviin värähtelyihin.

### Tärinän ehkäisy

Tärinälähteen ja asunnon välillä käytettävät tärinän ehkäisemiseen käytetyt menetelmät tunnetaan huonosti. Siksi tärinähaitan pienentämiseksi käytettyjen erilaisten teknisten ratkaisujen todellinen parannusvaikutus tulee selvittää. Teknisillä ratkaisuilla vaikuttaa joko värähtelyn syntymiseen tai se leviämiseen. Tärinän syntymistä pienentävät



mm. tärinäeristeet, maaperän stabilointi ja paalutus. Tärinän siirtymisen estämiseksi on kokeiltu mm. erilaisia maaperään rakennettavia seinärakenteita.

Lisäksi on kokeiltu rakennuksen ja perustuksen väliin asennettavia tärinäeristimiä. Eri-tyisesti pientaloille soveltuvia tärinän eristämis- ja vaimentamiskäytännöjä tulee tutkia ja kehittää ja kehitystyön tuloksia pitää testata koerakentamiskohteissa.

### Maaperän tärinän arviointi

Tärinän suuruuteen vaikuttavat oleellisesti liikenteen tyyppi, kaluston paino ja kunto, liikenteen nopeus sekä ajoradan kunto ja perustamistapa. Näiden asioiden tunteminen on tärkeää, jotta pystytään varautumaan liikenteen painossa ja nopeudessa tapahtuviin muutoksiin. Junaliikenteen tapauksessa eri rataosuksilta pitää olla helposti käytettävissä kalustotyypeittäin liikenteen nopeus, keskimääräinen paino ja painon tilastollinen vaihtelu sekä radan kuntoluokitus. Lisäksi tulee osata arvioida liikennettä koskevat tulevaisuuden muutostarpeet.

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

Tärinän arviointia varten tulee kehittää esikartoitukseen soveltuvia laskentamalleja, joissa käytettävillä parametreilla voitaisiin entistä tarkemmin arvioida kaluston tyypin, nopeuden ja kunnan sekä väylän kunnan merkitystä. Myös tarkempia laskentamalleja, joilla voidaan ottaa huomioon esimerkiksi maaperän kerroksellisuuden vaikutus, tulee kehittää. Lisäksi tulee selvittää, mikä on maaperän eri kerrosten ja niiden muodon vaikutus maaperän tärinään. Suurnopeusjunille tyypillistä ongelmaa, jossa junan nopeus saavuttaa pinta-aallon nopeuden, tulee myös selvittää.

Maaperän tärinän arviointimenetelmiä kehitetään tällä hetkellä projektissa *Liikenneperäisen tärinän huomioiminen maankäytön, liikenteen ja rakennusten suunnittelussa – Tärinän leviäminen maaperässä (LIIKEVÄ 2)*. Projekti liittyy ympäristöministeriön *Ympäristöklusterin tutkimusohjelman kolmanteen vaiheeseen (2003–2005)*. Projektissa on päätetty keskittyä kerroksellista maaperää koskevien laskenta- ja mittausten kehittämiseen. Kehitettävällä laskentaohjelmalla voidaan ottaa huomioon sekä maaperän eri kerrosten dynaamiset ominaisuudet että kerrosten paksuudet. Eriyistäpaikse-  
na tutkitaan FEM-laskennan avulla pehmeän maakerroksen alla olevan kovan peruskal-  
lion muodon vaikutusta maanpinnan värähtelyn suuruuteen.

## Rakennukseen siirtyvän tärinän arviointi

Rakennusten dynaamisilla ominaisuuksilla on merkitystä maaperästä tulevien värähtelyjen voimistumiseen rakennuksessa. Mittauksista saadut rakennuskohtaiset erot ovat suuria. Värähtelyiden siirtymiseen rakennukseen vaikuttavat mm. rakennuksen perustamistapa, rakennuksen koko ja käytetyt materiaalit.

Matalista kerrostaloista (3–5 kerrosta), sekä paalutetuista että paaluttamattomista, tulee hankkia kokemusta sekä rungon että lattioiden käyttäytymisestä. Tällä hetkellä mittaus tuloksia on pääasiassa savimaalle rakennetuista pientaloista, joilla rungon resonanssin merkitys korostuu. Lattian resonanssi-ilmiön merkityksen selvittämiseksi mittaustuloksia tulee hankkia myös kovemmilta maaperiltä.

Rakennuksen eri osien dynaamisten ominaisuuksien sekä perustuksen ja maaperän vuorovaikutusilmiön merkitystä tulee selvittää laajemmin. Tällä hetkellä maaperästä rakennukseen siirtyvää värähtelyä on tarkasteltu todennäköisyysperusteisesti. Koska nykyisin maaperän värähtelyt ja niiden taajuudet voidaan määrittää tarkasti maaperästä tehdyin mittauksin, rakennuksen perustuksen ja eri rakenneosien dynaamisten ominaisuuksien merkitystä on mahdollista tarkastella yksityiskohtaisemmin. Tarkastelussa tulee mittausten lisäksi käyttää FEM-laskentaa, jossa tulee huomioida myös maanpinnan aaltoilun vaikutus ja maaperän vaakasuuntainen värähtely. Rakennustyypeistä ja perustamistapojen vaikutuksista tulee myöhemmin luoda ohjeistus, jonka avulla voidaan tapauskohtaisesti arvioida maaperästä rakennukseen siirtyvää värähtelyä.

## Lähdeluettelo

Banverket. 1997. Buller och vibrationer från spårbunden linjetrafik – Riktlinjer och tillämpning. 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. 1998. High-speed ground transportation noise and vibration impact assessment. Report No. 293630-1. Washington: Federal Railroad Administration. 180 s. + liitt. 40 s.

Hunaidi, O. & Tremblay, M. 1997. Traffic-induced building vibration in Montreal. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 24, No. 5, p. 736–753.

ISO 2631-1. 1997. Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration. Geneva: International Organization for Standardization. Part 1: General requirements. 31 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.

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.

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. ISSN 0346-718X.

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.

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.

Nordtest. 2001. Assessment of annoyance caused by vibrations in dwellings from road and rail traffic by means of socio-vibrational and social surveys. Nordtest Method NT ACOU 106. Espoo: Nordtest. 21 s.

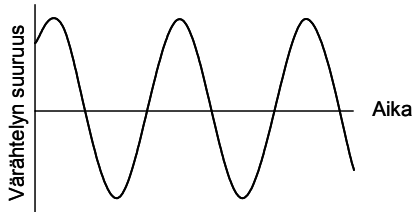
NS 8176. 1999. Vibrasjoner og støt. Måling i bygninger av vibrasjoner fra landbasert samferdsel og veiledning for bedømmelse av virkning på mennesker. Oslo: Norges Standardiseringsförbund (NSF), 27 s.

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

Tielaitos. 1993. Tienrakennustöiden yleiset laatuvaatimukset ja työselitykset. Yleiset perusteet. Helsinki: Tielaitos. 47 s.

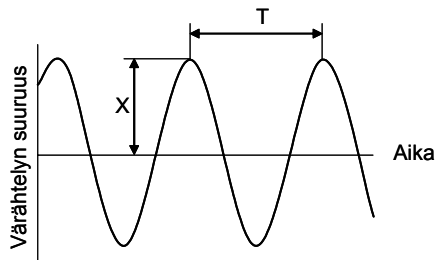
Turunen-Rise, I.H., Brekke, A, Hårvik, L., L., Madshus, C. & Klæboe, R. 2003. Vibration in dwellings from road and rail traffic – Part I: a new Norwegian measurement standard and classification system. Applied Acoustics 64, s. 71–87.

# Liite A: Liikennetärinään liittyviä käsitteitä



## Vakioamplitudinen värähtely

Harmoninen, siniaallon muotoinen värähtely.

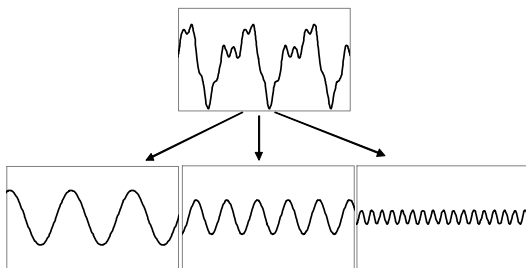


## Värähtelyamplitudi

Vakioamplitudisen värähtelyn amplitudi. Se on puolet värähtelyn vaihteluvälistä.

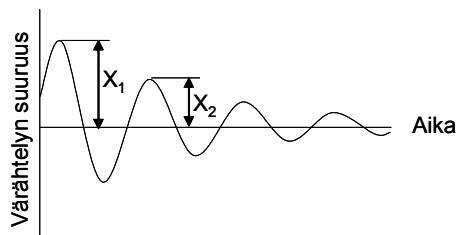
## Värähtelytaajuus $f$ [Hz]

Vakioamplitudisen värähtelyn vakiojaksojen lukumäärä sekunnissa. Kun yhden värähtelyjakson kesto on  $T$  sekuntia, värähtelytaajuus  $f=1/T$ .



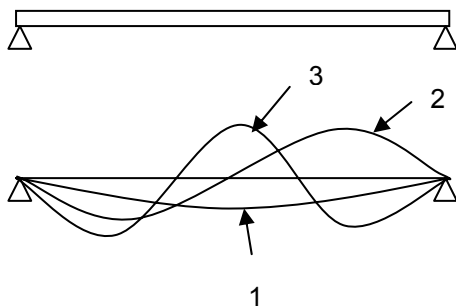
## Värähtelykomponentti

Useasta taajuuskomponentista muodostuvan värähtelyn yksi vakioamplitudinen komponentti.



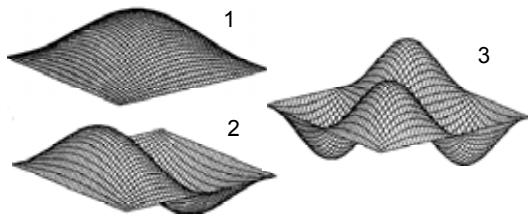
## Suhteellinen vaimennus $\zeta$ [-]

Tekijä, joka ilmaisee vapaasti vaimenevan värähtelyn vaimenemisnopeuden. Kun perättäisten jaksojen amplitudiin suhde on  $X_1/X_2$ ,  $\zeta = \ln(X_1/X_2)/(2\pi)$



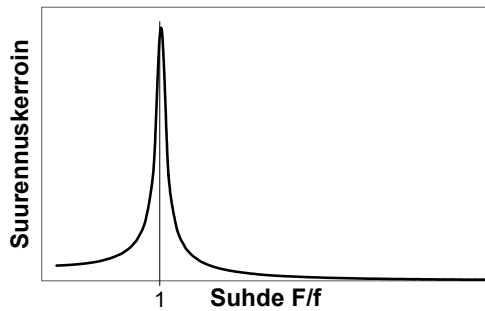
## Oinaismuoto, alin ominaismuoto

Rakenteelle ominainen värähtelymuoto, kun rakenne saatetaan värähtelemään ja sen annetaan värähdellä vapaasti. Rakenteella on paljon eri taajuuksilla värähteleviä ominaismuotoja. Alin ominaismuoto on se muoto, jolla on pienin värähtelytaajuus. Kuvassa on palkin kolme alimpaa ominaistajuutta vastaavat ominaismuodot.



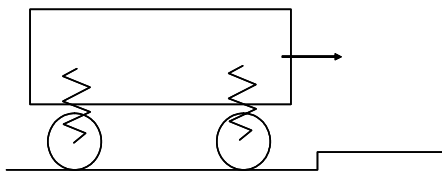
## Ominaistaajuus, alin ominaistaajuus [Hz]

Rakenteelle ominainen värähtelytaajuus, kun rakenne saatetaan värähtelemään ja sen annetaan värähdellä vapaasti. Rakenteella on paljon eri ominaistaajuuksilla värähteleviä ominaismuotoja. Alin ominaistaajuus vastaa pienintä värähtelytaajuutta. Kuvassa on esitetty lattiatason ominaismuotoja.



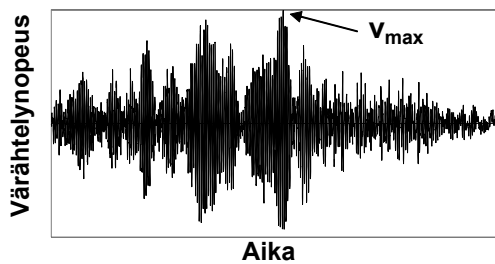
## Resonanssi

Värähtelyn voimakas vahvistuminen, kun herätteen taajuus ( $F$ ) sattuu lähelle rakenteen ominaistaajuutta ( $f$ ). Suurennuskertoimen maksimi on kääntäen verrannollinen suhteelliseen vaimennukseen.



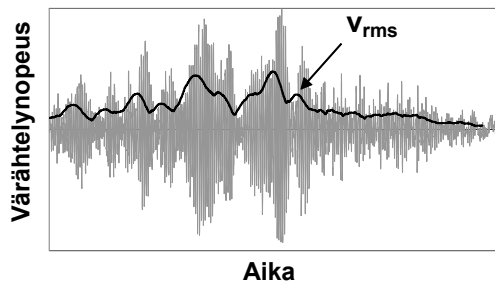
## Heräte

Värähtelyn aiheuttava tekijä. Liikenteessä heräte aiheutuu kulkuvälineestä ja väylän epätasaisuuksista.



## Värähtelyn huippuarvo $v_{\max}$ [mm/s]

Mitatus värähtelysignaalin itseisarvoltaan suurin arvo. Vakioamplitudisella värähtelyllä huippuarvo on sama kuin värähtelyn amplitudi.

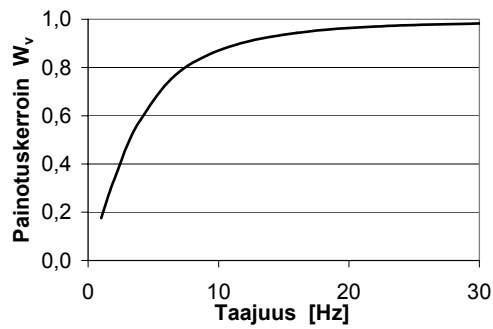


## Värähtelyn tehollisarvo $v_{rms}$ [mm/s]

Mitatus värähtelysignaalin  $v(t)$  tehollisarvo ajanhetkellä  $t_0$  on

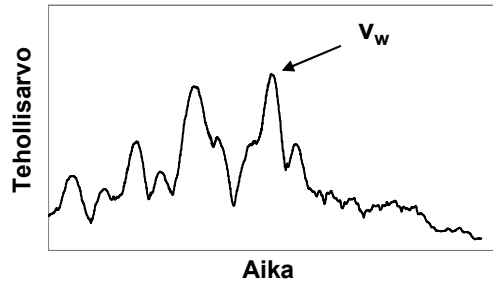
$$v_{rms}(t_0) = \left\{ \frac{1}{\tau} \int_{t_0-\tau}^{t_0} [v(t)]^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}},$$

jossa aikaikkunan pituus  $\tau$  on 1 sekunti. Vakioamplitudisella värähtelyllä, kun  $T \ll \tau$   $v_{rms} = v_{\max} / \sqrt{2}$ .



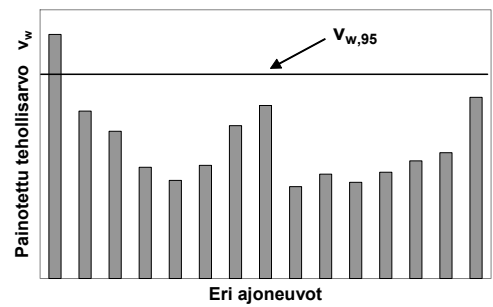
### Värähtelyn taajuuspainotus $W_v(f)$ [-]

Mitatun signaalin eri värähtelykomponentit tehdään ihmisen herkkyuden suhteen samanarvoiseksi painottamalla värähtelykomponentteja taajuudesta riippuvalla painotuskertoimella.



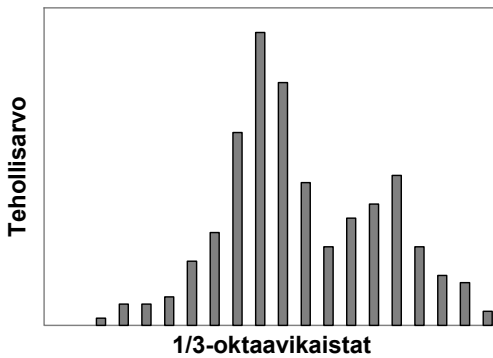
### Painotettu värähtelyn tehollisarvo $v_w$ [mm/s]

Taajuuspainotetusta värähtelysignaalista  $v_w(t)$  määritetty suurin tehollisarvo.



### Värähtelyn tunnusluku $v_{w,95}$ [mm/s]

Painotetun värähtelyn  $v_w$  tilastollinen maksimi. Arvo perustuu yhden viikon ajalta 15 merkittävimmästä ajoneuvosta mitattuun värähtelyyn.

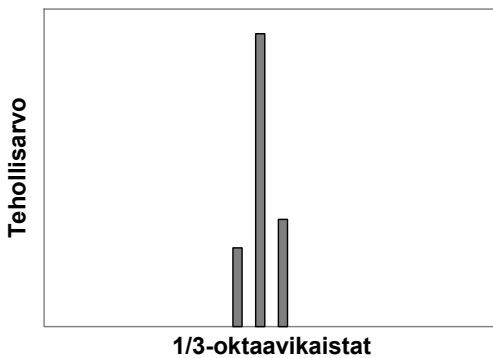


### Kolmannesosaoktaavikaista

Taajuuskaistat, joiden keskitaajuudet [Hz] ovat .. 1, 1,25, 1,6, 2 .. 40, 50, 63, 80 ..

### Kolmannesosaoktaavikaistan tehollisarvo

Yhden kolmannesosaoktaavikaistan alueella esiintyvien värähtelykomponenttien tehollisarvo.



### Kapeakaistainen värähtely

Värähtely sisältää vain kapealla taajuusalueella olevia värähtelykomponentteja.





## Liite B: Malli kohdetietojen esittämisestä

### KOHTEEN YLEISTIEDOT

Kohteen tiedot Paikkakunta: Osoite: Liikennetyyppi: (juna/auto/metro/...) Etäisyys väylään:	Omistajan yhteystiedot Nimi: Osoite: Puhelin: Sähköposti:
Kaavio kohteen sijainnista  (periaatepiirros, josta selviää kohteen ja väylän sijainti, etäisyydet, talon asento väylään nähden, erityisesti häiritsevä väylän kohta jne.)	Kuva kohteesta  (valokuva väylältä kuvattuna tai väylän suuntaan kuvattuna, mikäli molemmat mahtuvat samaan kuvaan)

### RAKENNUKSEN KUVAUS

Rakennustyyppi: (pien/rivi/kerros/...) Käyttötarkoitus: (asunto/toimisto/hotelli/...) Kerrosmäärä: (1, 1½, 2, N /rinne/kellari) Valmistumisvuosi: Perustus (antura/laatta/pilari/...) Paalutus (bet/teräs/puu/maanvar/...) Maaperä: (lieju/savi/sora/syvyys...)	Rungon materiaali: (puu/harkko/teräs/...) Ulkoverhoilu: (puu/tiili/harkko/...) Sisäverhoilu: (levy/laatta/harkko/...) Alapohjan materiaali: (ont.laatta/valu/puu/...) Välipohjan materiaali: (ont.laatta/valu/puu/...) Katon runko: (puu/teräs/betoni/...) Katon materiaali: (tiili/huopa/pelti/...)
---	--

### LIIKENTEEN KUVAUS

Liikenteen tyyppi  (erityyppisen ja painoisen liikenteen tiheys tunnissa eri vuorokaudenaikoina; rautateilla esim. erityyppiset tavarajunat, suurnopeusjunat ja henkilöjunat; kaduilla ja maanteilla yhdistelmärekat, kuorma-autot, bus- sit)
Liikenteen nopeus (nopeusrajoitukset/eri vuorokaudenajat/eri kalustot)
Väylän kunto  (tieliikenteellä epätasaisuuden syy/korkeus tai syvyys/kokonaispituus/muoto/tasaisen harjan tai montun pituus, junaliikenteellä ainakin radan kuntoluokitus)

### AIKAISEMMAT SELVITYKSET

	Vuosi	Tekijä	Tilaja
Tärinämittaukset			
Maaperätutkimukset			

Mittauslaite:

Mittausajankohta:

### MITTAUSTIEDOT

Mittausvastaavan yhteystiedot Nimi: Osoite: Puhelin: Sähköposti:	Muut mittaukseen osallistuneet
--	--------------------------------

### MITTAUSKANAVIEN NUMEROT (z on pystysuunta, x on talon pituussuunta, x-suunta esitetty kuvassa)

Mittauspiste 1	x	y	z	Mittauspiste 2	x	y	z
Kanava				Kanava			
<p>(periaatepiirros, josta selviää mittauspisteen sijainti ja etäisyydet, tilojen päämitat ja x-suunta)</p> <p>(vaihtoehtoisesti/lisäksi tässä kohdassa esitettävä mittauspisteen sijainti voidaan osoittaa myös valokuvalla)</p>							
Asennusalusta:				Asennusalusta:			
Mittauspiste 3	x	y	z	Mittauspiste 4	x	y	z
Kanava				Kanava			
Asennusalusta:				Asennusalusta:			
Mittauspiste 5	x	y	z	Mittauspiste 6	x	y	z
Kanava				Kanava			
Asennusalusta				Asennusalusta:			

# Liite C: Yhteenveto VTT:n mittaamista kohteista

## 1. Puolitoistakerroksinen 1950-luvulla rautatien varteen rakennettu puurunkoinen pientalo

Rakennuksen ulkoseinä sijaitsee 31 metrin etäisyydellä radasta. Rakennus on savimaalla ja perustuksena on anturaperustus. Asuinkerroksen lattia on betonirunkoinen ja ullakko-kerroksen lattia puurunkoinen. Junia kulkee useita tunnissa, joista noin puolet on tavarajunia. Myös yöllä liikennettä on vähintään yksi tavarajuna tunnissa. Tavarajunien nopeusrajoitus alueella on 100 km/h.

Asukas on tuntenut ajoittain talon tärisevän ja havainnut myös ikkunoiden helinää. Tärinä on koettu hieman epämiellyttävänä (5/10). Asukas sanoo tottuneensa tärinään. Asukas on ollut talon ostaessaan tietoinen mahdollisista tärinähaitoista. Asukas pitää meluhaittaa tärinähaittaa suurempana ongelmana. Mittauksen aikana havaitut värähtelyt ilmenivät juuri havaittavana talon värähtelynä, jota asukas ei kuitenkaan pitänyt häiritseväenä. Tärinästä ei ole valitettu.

Suurimmat asuintilojen värähtelyt mitattiin yläkerroksessa rakennuksen pituussuunnassa (radan suunnassa). Värähtelyistä laskettu värähtelyn tunnusluku  $v_{w,95}$  on 0,94 mm/s. Alakerroksessa suurin arvo 0,67 mm/s mitattiin pystysuunnassa.

## 2. Kaksikerroksinen vuonna 1990 valmistunut rautatien varteen rakennettu puurunkoinen ja tiiliverhoiltu rinnetalo

Rakennus on paritalo, jonka ulkoseinä on 23 metrin etäisyydellä radasta. Paikka on so-  
raharjun lievealueella ja perustuksena on anturaperustus. Asuinkerroksen lattia on puu/betoni-liittorakenteinen ja kellarikerroksen lattia on maanvarainen betonilaatta. Radalla kulkee tavarajunia, yöllä noin 45 minuutin välein. Tavarajunien nopeusrajoitus on alueella 100 km/h.

Asukas on tuntenut junien aiheuttavan talon tärinää useita kertoja päivässä. Tärinä aiheuttaa myös kaapissa olevien astioiden helinää. Kesäaikaan asukas on kokenut tärinän kohtalaisen epämiellyttäväksi (7/10). Asukas on asunut aina radan varressa ja siten tottunut tärinään. Routa-aikaan tärinä on asukkaan mielestä huomattavasti voimakkaampaa kuin mittauksen aikana. Mittauksen aikana asukas piti värähtelyjä enintään vähän häiritsevinä. Tärinästä ei ole valitettu.

Suurimmat asuintilojen värähtelyt mitattiin yläkerran lattian keskeltä lattian pystysuunnassa. Värähtelyistä laskettu värähtelyn tunnusluku  $v_{w,95}$  on 0,34 mm/s. Alakerran lattiasta pystysuunnassa vastaava arvo on 0,29 mm/s.

### **3. Kaksikerroksinen vuonna 1981 valmistunut, rautatien varteen rakennettu, betonielementtirakenteinen omakotitalo**

Rakennus on rinnetalo, jonka ulkoseinä sijaitsee 18 metrin etäisyydellä radasta. Paikka on soraharjun lievealueella ja perustuksena on anturaperustus. Yläkerran lattia on ontelolaattarakenteinen ja kellarikerroksen lattia on maanvarainen betonilaatta. Radalla kulkee tavarajunia, yöllä noin 45 minuutin välein. Tavarajunien nopeusrajoitus on alueella 100 km/h.

Asukas on huomannut joskus tärinää kaapissa olevien astioiden helinää. Asukas on kokenut tärinän hieman epämiellyttäväksi (4/10), mutta tärinää ei ole koettu haitaksi. Asukas pitää junista aiheutuvaa meluhaittaa tärinähaittaa suurempana ongelmana. Mittauksen aikana havaitut värähtelyt ilmenivät yleensä kehon tuntemuksina ja parissa tapauksessa myös esineiden helinänä. Asukas ei pitänyt mittauksen aikaisia havaintoja häiritsevinä. Tärinästä ei ole valitettu.

Suurimmat asuintilojen värähtelyt mitattiin yläkerran lattian keskeltä lattian pystysuunnassa. Värähtelyistä laskettu värähtelyn tunnusluku  $v_{w,95}$  on 0,26 mm/s.

### **4. Puolitoistakerroksinen vuonna 1902 rakennettu ja vuonna 1992 peruskorjattu kellarikerroksellinen pientalo**

Rakennus on vilkasliikenteisen kadun varrella. Rakennuksen ulkoseinä sijaitsee 4 metrin etäisyydellä ajoväylän reunasta. Rakennus on savimaalla ja perustuksena on luonnonkiviperustus. Talo on rakennettu puupaaluille. Paalutusta on vahvistettu peruskorjauksen yhteydessä. Asuinkerroksen lattia on puurunkoinen ja kellarikerroksen lattia on maanvarainen betonilattia. Kadulla kulkee 6–7 rekkaa tunnissa päivin ja öin. Kadulla on myös bussiliikennettä. Alueella on nopeusrajoitus 50 km/h. Kadulla ei ole havaittavia epätasaisuuksia.

Asukas on ajoittain havainnut sohvalla istuessaan talon tärisevän ja ikkunoiden helisevän. Asukas on kokenut tärinän kohtalaisen epämiellyttäväksi (7/10), vaikka ei ole pitänyt sitä häiritseväenä. Asukas sanoo tottuneensa tärinään ja pitää melusta aiheutuvaa haittaa tärinää suurempana ongelmana. Mittauksen aikana havaitut värähtelyt ilmenivät mm. esineiden helinänä. Tärinästä ei ole valitettu.

Suurimmat asuintilojen värähtelyt mitattiin rakennuksen kellarikerroksesta pystysuunnassa. Värähtelyistä laskettu värähtelyn tunnusluku  $v_{w,95}$  on 0,60 mm/s. Yläkerrassa suurin arvo 0,47 mm/s mitattiin vaakasuunnassa.

### **5. Yksikerroksinen vuonna 1974 valmistunut, lähelle tietä rakennettu puurunkoinen ja tiiliverhoiltu omakotitalo**

Rakennus sijaitsee 24 m tiestä. Rakennus on perustettu 2–3 m paksun savikerroksen päälle valetulle laatalle. Asuinkerroksen lattia on maanvarainen betonilattia. Asukas pitää häiritsevänä tiellä kulkevia kuorma-autoja, rekkoja ja busseja, joita kulkee molempiin suuntiin noin 20 kpl tunnissa. Alueella on nopeusrajoitus 50 km/h. Kadulla ei erityisiä epätasaisuuksia.

Asukas on havainnut talon värähtelevän useita kertoja päivässä. Tärinä on koettu kohtalaisen epämiellyttäväksi (6/10). Asukas pitää melusta aiheutuvaa haittaa hyvin epämiellyttävänä ja tärinähaittaa suurempana ongelmana. Liikennemelu lisää merkittävästi myös tärinähaitan epämiellyttävyyttä. Mittauksen aikana ilmenneitä värähtelyitä asukas piti vain vähän häiritsevinä. Tärinästä on myös valitettu.

Suurimmat asuintilojen värähtelyt mitattiin pystysuunnassa ja värähtelyistä laskettu värähtelyn tunnusluku  $v_{w,95}$  on 0,18 mm/s.

### **6. Puolitoistakerroksinen vuonna 1995 valmistunut, lähelle katua rakennettu puurunkoinen ja tiiliverhoiltu omakotitalo**

Rakennuksen ulkoseinä sijaitsee 39 metrin etäisyydellä kadusta. Rakennus on savimaalla ja perustettu betonipaaluille. Alakerroksen lattia on betonilaatta ja ullakkokerroksen lattia on puurunkoinen. Kadulla on 8 cm korkeat tyynyhidasteet talon kohdalla. Kadulla kulkee vilkkaimpaan aikaan bussiliikennettä 6 vuoroa tunnissa molempiin suuntiin. Alueella on nopeusrajoitus 40 km/h. Tärinästä on myös valitettu.

Asukas on tuntenut talon tärisevän useita kertoja päivässä ja lisäksi joskus havainnut ikkunoiden ja astioiden helinää. Tärinä on koettu hyvin epämiellyttäväksi (9/10). Liikenteestä on meluhaittaakin, mutta asukas pitää tärinähaittaa meluhaittaa suurempana ongelmana. Mittauksen aikana värähtelyt ilmenivät yleensä selvänä, joskus jopa voimakkaana talon ja hyllyjen värähtelynä. Asukas piti värähtelyä erittäin häiritsevänä.

Suurimmat asuintilojen värähtelyt 0,84 mm/s mitattiin vaakasuunnassa rakennuksen yläkerrasta. Pystysuunnassa suurimmat värähtelyt olivat 0,32 mm/s.

### **7. Yksikerroksinen vuonna 1965 valmistunut, lähellä katua sijaitseva puurunkoinen ja lautaverhoiltu omakotitalo**

Rakennus on savimaalla ja perustettu reunavahvistetulle laatalle. Lattia on maanvarainen betonilaatta. Rakennuksen ulkoseinä sijaitsee 11 metrin etäisyydellä kadusta, jolla kulkee bussiliikennettä noin 10 vuoroa tunnissa molempiin suuntiin. Kadulla ei ole erityisiä epätasaisuuksia. Alueella on nopeusrajoitus 40 km/h.

Asukas on tuntenut talon tärisevän useita kertoja päivässä. Lisäksi asukas on joskus havainnut esineiden helinää, taulujen kääntymistä ja tavaroiden siirtymistä hyllyissä. Tärinä on koettu hyvin epämiellyttäväksi (8/10). Asukas sanoo tottuneensa tärinään. Tärinä on talvella voimakkaampaa kuin kesällä. Liikenteestä on meluhaittaakin, mutta asukas pitää tärinähaittaa meluhaittaa suurempana ongelmana. Mittauksen aikana havaitut värähtelyt olivat voimakkaita ja ilmenivät yleensä kehon tuntemuksina ja esineiden helinänä. Asukas piti havaintoja erittäin häiritsevinä. Tärinästä on myös valitettu.

Suurimmat asuintilojen värähtelyt mitattiin pystysuunnassa rakennuksen päädystä. Värähtelyistä laskettu värähtelyn tunnusluku  $v_{w,95}$  on 1,19 mm/s. Lattian keskialueella värähtelyn tunnusluku on 0,70 mm/s.

#### **8. Puolitoistakerroksinen vuonna 1995 valmistunut, lähelle katua rakennettu puurunkoinen ja tiiliverhoiltu omakotitalo**

Kohde on sama kuin kohde 6, mutta mittaukset on tehty sen jälkeen, kun kadulla olevat tyynyhidasteet on poistettu. Rakennuksen ulkoseinä sijaitsee 39 metrin etäisyydellä kadusta. Rakennus on savimaalla ja perustettu betonipaaluille. Alakerroksen lattia on betonilaatta ja ullakkokerroksen lattia on puurunkoinen.

Vaikka tyynyhidasteita ei enää olekaan, asukas aistii värähtelyt silloin tällöin. Asukas katsoo mahdollisesti herkistyneensä tärinän huomaamiselle. Tärinä on koettu kohtalaisen epämiellyttäväksi, mutta se ei häiritse enää merkittävästi (7/10). Astioiden ja esineiden helinää ei myöskään esiinny. Tärinästä ei ole enää valitettu.

Suurimmat asuintilojen värähtelyt mitattiin rakennuksen yläkerrasta. Suurimmat värähtelyt tapahtuvat rakennuksen poikittaissuunnassa ja värähtelyistä laskettu värähtelyn tunnusluku  $v_{w,95}$  on 0,23 mm/s. Hidastetöyssyjen poistamisen jälkeen värähtelyt ovat noin 40 % aikaisemmin mitatuista arvoista, vaikka ajohidasteiden poistaminen on saattanut nostaa ajonopeuksia.

#### **9. Kaksikerroksinen vuonna 1989 valmistunut, lähelle katua rakennettu betoni-runkoinen neljän asuinhuoneiston pienkerrostalo**

Rakennuksen väli- ja päätyseinät ovat kantavia, paikalla valettuja betoniseiniä. Pituussuuntaiset seinät ovat puurunkoisia. Rakennus on savimaalla ja väliseinät on perustettu betonipaaluille. Ala- ja välipohja on tehty ontelolaatoista. Rakennuksen ulkoseinä sijaitsee 8,5 metrin etäisyydellä kadusta, jolla kulkee enimmillään 6 bussivuoroa tunnissa molempiin suuntiin ja lisäksi raskasta rekkaliikennettä. Etäisyydelle 22 m talosta on suojatien molemmin puolin rakennettu 8 cm korkeat tyynyhidasteet. Alueella on nopeusrajoitus 40 km/h. Tärinästä on myös valitettu.

Asukas on havainnut talon tärisevän ja tavaroiden helisevän pahimmillaan useita kertoja tunnissa. Tärinä on koettu hyvin epämiellyttäväksi (7/10). Liikenteestä on meluhaittaakin, erityisesti jarrutuksesta ja kiihdytyksestä hidasteen kohdalla, mutta asukas pitää tärinähaittaa meluhaittaa suurempana ongelmana.

Suurimmat asuintilojen värähtelyt mitattiin rakennuksen yläkerrasta. Suurimmat värähtelyt tapahtuvat rakennuksen pituussuunnassa ja värähtelyistä laskettu värähtelyn tunnusluku  $v_{w,95}$  on 0,95 mm/s. Alakerrassa vaakavärähtelyjen tunnusluku on 0,58 mm/s ja pystyvärähtelyjen tunnusluku on 0,68 mm/s. Yläkerrassa pystyvärähtelyiden tunnusluku on 0,60 mm/s.

#### **10. Kaksikerroksinen vuonna 1978 valmistunut, lähellä katua oleva puurunkoinen ja tiiliverhoiltu omakotitalo**

Rakennus on savimaalla ja perustettu reunavahvistetulle laatalle. Alakerroksen lattia on valettu betonilaatta ja yläkerroksen lattia on puurunkoinen. Rakennuksen ulkoseinä sijaitsee 10 metrin etäisyydellä kadusta jossa kulkee bussiliikennettä vilkkaimpaan aikaan noin 6 vuoroa tunnissa molempiin suuntiin ja lisäksi kuorma-autoliikennettä. Kadulla 10 metriä talosta on korotettu suojatie, jonka korkeus on 12–14 cm. Alueella on nopeusrajoitus 40 km/h. Tärinästä on myös valitettu.

Asukas on tuntenut talon tärisevän useita kertoja päivässä ja lisäksi joskus havainnut hyllyissä olevien astioiden helinää. Talviaikaan tärinä on koettu hyvin epämiellyttäväksi (9/10) ja kesäaikaan kohtalaisen epämiellyttäväksi (6/10). Tärinä on aiheuttanut joskus nukkumisongelmia ja pelkoa rakenneaurioista. Liikenteestä on meluhaittaakin, erityisesti jarrutuksesta ja kiihdytyksestä hidasteen kohdalla, mutta asukas pitää tärinähaittaa meluhaittaa suurempana ongelmana.

Suurimmat asuintilojen värähtelyt  $v_w=0,35$  mm/s mitattiin yläkerran lattian keskeltä pystysuunnassa. Suurin vaakasuuntainen värähtely  $v_w=0,26$  mm/s mitattiin yläkerrasta rakennuksen poikittaissuunnassa.

#### **11. Puolitoistakerroksinen kellarikerroksellinen vuonna 1946 valmistunut, lähelle katua rakennettu puutalo**

Rakennus on savimaalla ja perustettu valetuille anturoille. Kellarikerroksen lattia on maanvarainen betonilaatta, alakerran lattia on betonirunkoinen ja yläkerran lattia on puurunkoinen. Rakennuksen ulkoseinä sijaitsee 15,5 metrin etäisyydellä kadusta, jolla on vilkkaimpaan aikaan bussiliikennettä noin 4 vuoroa tunnissa molempiin suuntiin. Lisäksi kadulla kulkee kuorma-autoja sekä kaupungin varikolle ajavia työkoneita. Katua on paikkailtu, mistä johtuen katu on epätasainen. Alueella on nopeusrajoitus 40 km/h. Tärinästä on myös valitettu.

Asukas on tuntenut talon tärisevän sekä ikkunoiden ja esineiden helisevän pahimpaan aikaan useita kertoja tunnissa. Tärinä on koettu kohtalaisen epämiellyttäväksi (5/10) ja asukas kertoo osittain jo tottuneensa siihen. Liikenteestä aiheuttavaa meluhaittaa asukas ei pidä merkittävänä.

Suurimmat asuintilojen värähtelyt mitattiin yläkerrasta rakennuksen poikittaissuunnassa. Värähtelyistä laskettu värähtelyn tunnusluku  $v_{w,95}$  on poikittaissuunnassa 1,96 mm/s ja pystysuunnassa 1,42 mm/s. Alakerrassa värähtelyn tunnusluku on pystysuunnassa 1,09 mm/s ja vaakasuunnassa 0,60 mm/s.

## **12. Kaksikerroksinen vuonna 1974 valmistunut, lähelle katua rakennettu betoni-runkoinen rivitalo**

Rakennuksen väli- ja päätyseinät ovat kantavia, paikalla valettuja betoniseiniä. Pituussuuntaiset seinät ovat puurunkoisia. Rakennus on savimaalla ja väliseinät on perustettu betonipaaluille. Alakerroksen lattia on maanvarainen betonilaatta ja yläkerroksen lattia on koottu betonielementeistä. Rakennuksen ulkoseinä sijaitsee 10 m:n etäisyydellä kadusta, jolla kulkee busseja päiväaikaan vilkkaimmillaan noin 25 vuoroa tunnissa molempiin suuntiin ja lisäksi jakeluautoja ja rekkaliikennettä. Kadussa on vain pieniä painaamia. Alueella on nopeusrajoitus 40 km/h. Tärinästä ei ole valitettu.

Asukas on havainnut talon tärisevän sekä ikkunoiden ja astioiden helisevän silloin tällöin. Tärinä on koettu hieman epämiellyttäväksi (3/10). Liikenteestä aiheuttavaa melua asukas ei pidä merkittävänä, lentomelu on suurempi haitta.

Tässä kohteessa tulokset perustuvat vain vajaan vuorokauden pituisen mittausjakson aikana havaittuihin suurimpiin värähtelyihin. Suurimmat asuintilojen värähtelyt sekä alakerrassa että yläkerrassa olivat  $v_w=0,13..0,14$  mm/s.

## **13. Kaksikerroksinen 1800-luvun lopulla valmistunut, lähelle rautatietä luonnonkiviperustukselle rakennettu hirsitalo**

Rakennus on savimaalla ja perustettu luonnonkiviperustukselle. Ala- ja välipohjat ovat puurunkoisia. Rakennuksen ulkoseinä sijaitsee 45 metrin etäisyydellä rautatiestä, jolla on sekä henkilö- että tavarajunaliikennettä. Tavarajunilla on nopeusrajoitus 80 km/h lukuun ottamatta junia, joissa on venäläisen standardin mukaisia vaunuja, jolloin nopeusrajoitus on 70 km/h. Henkilöjunilla nopeusrajoitus on 120 km/h.

Asukas on havainnut talon tärisevän usein ja joskus havainnut esineiden helinää. Erityisen häiritseviä ovat aamuyöllä kulkevat tavarajunat. Tärinä on koettu hyvin epämiellyttäväksi (8/10). Tärinä vaikuttaa nukkumiseen ja aiheuttaa pelkoa rakennevaurioista. Junista aiheutuvaa meluhaittaa asukas pitää tärinähaittaa pienempänä ongelmana. Tärinästä on valitettu.



Suurimmat asuintilojen värähtelyt mitattiin yläkerrasta rakennuksen pituus- ja poikittaissuunnissa. Molemmissa suunnissa värähtelyn tunnusluku  $v_{w,95}$  on 1,20 mm/s. Alakerrassa pystysuuntaisen värähtelyn tunnusluku on alakerran lattian keskellä 0,40 mm/s ja lattian reunalla 0,27 mm/s. Alakerrassa vaakasuuntaisen värähtelyn tunnusluku on 0,39 mm/s.

#### **14. Puolitoistakerroksinen vuonna 1955 valmistunut, lähelle rautatietä rakennettu puutalo**

Rakennus on savimaalla ja perustettu valetuille betonianturoille. Ala- ja välipohjat ovat puurunkoisia. Rakennuksen ulkoseinä sijaitsee 160 metrin etäisyydellä rautatiestä, jolla on sekä henkilö- että tavarajunaliikennettä. Tavarajunilla on nopeusrajoitus 80 km/h lukuun ottamatta junia, joissa on venäläisen standardin mukaisia vaunuja, jolloin nopeusrajoitus on 70 km/h. Henkilöjunilla nopeusrajoitus on 120 km/h.

Asukas on tuntenut talon tärisevän ja esineiden helisevän. Erityisen häiritsevästä asukas pitää aamuyöllä kulkevia tavarajunia. Tärinä on koettu hyvin epämiellyttäväksi (9/10). Tärinä vaikeuttaa nukkumista ja aiheuttaa pelkoa sekä rakenneaurioista että kiinteistön jälleenmyyntiarvon laskemisesta. Junista aiheutuvaa meluhaittaa asukas pitää tärinähaittaa pienempänä ongelmana. Tärinästä on valitettu.

Suurimmat asuintilojen värähtelyt mitattiin yläkerrasta rakennuksen poikittaissuunnassa. Värähtelyistä laskettu värähtelyn tunnusluku  $v_{w,95}$  on 0,57 mm/s. Pystysuuntaisen värähtelyn tunnusluku on 0,50 mm/s yläkerran lattian keskellä ja 0,32 mm/s alakerran lattian reunalla. Alakerran lattian vaakasuuntaisen värähtelyn tunnusluku on 0,19 mm/s.

#### **15. 8-kerroksinen vuonna 1963 valmistunut kadun varteen rakennettu betonielementtitalo**

Kadulla on talon nurkan kohdalla ajohidasteena toimiva 7 cm korkea ja kymmenen metriä pitkä korotettu suojatie. Rakennuksen ulkoseinä sijaitsee 7,3 metrin etäisyydellä ajoväylästä. Rakennuksen kohdalla on savimaata ja rakennus on perustettu puu- ja kaivinpaaluille. Ala- ja välipohjat ovat paikallavalettuja laattoja. Kadulla kulkee linja-autoja noin 15 minuutin väliajoin molempiin suuntiin. Liikenteen nopeusrajoitus on alueella 40 km/h.

Ennen mittauksia kysyttiin kolmelta asukkaalta liikenteen aiheuttamista tärinähaitoista. Kahden mielipiteen mukaan merkittävää tärinää ei ole esiintynyt koskaan ja yhden mielipiteen mukaan tärinä tuntuu joskus, muttei ole häiritsevää (2/10). Asukkaat pitävät liikenteestä aiheutuvaa meluhaittaa tärinähaittaa paljon suurempana ongelmana, etenkin kesällä, kun ikkunoita joudutaan pitämään auki. Mittauksen aikana havaittavaa värähtelyä ilmeni kolme kertaa, joista kaksi oli itsenäisyyspäivän sotilasparaatista aiheutuneita.

Värähtelyjä ei pidetty häiritsevinä. Haastatellut asukkaat eivät ole valittaneet värähtelyistä, vaikka taloyhtiö olikin niistä valittanut.

Suurimmat värähtelyt mitattiin rakennuksen seitsemännestä kerroksesta. Värähtelyistä laskettu värähtelyn tunnusluku  $v_{w,95}$  on 0,27 mm/s. Viidennessä kerroksessa vastaava tunnusluku on 0,20 mm/s. Ylimmissä kerroksissa määräävä värähtely tapahtuu vaakasuunnassa. Alimmassa kerroksessa määräävä on lattian pystysuuntainen värähtely ja värähtelyn tunnusluku on 0,12 mm/s.

#### **16. 7-kerroksinen vuonna 1980 valmistunut kadun varteen rakennettu betonielementtinen toimistotalo**

Rakennus on vilkasliikenteisen kadun varrella. Rakennus sijaitsee 4,0 metrin etäisyydellä kadusta. Talon edessä on korotettu suoja-atie, jonka korkeus on 12 cm. Rakennuksen runko koostuu pilareista ja palkeista. Pilarianturat on valettu pystypaaluille. Rakennuksen alla on savimaata noin 10 m, jonka alla on hiekkaa 5–10 m.

Ennen mittauksia kysyttiin 3 henkilöltä mielipidettä liikenteen aiheuttamasta tärinähaitasta. Näistä yksi piti tärinää hieman epämiellyttävänä ja kaksi ei pitänyt tärinää lainkaan epämiellyttävänä (2/10). Tärinästä ei ole valitettu.

Suurimmat värähtelyt mitattiin pystysuunnassa. Toisessa kerroksessa värähtelyt olivat 0,22 mm ja kuudennessa kerroksessa 0,26 mm. Suurimmat vaakasuuntaiset värähtelyt 0,11 mm/s esiintyvät kadun suunnassa kuudennessa kerroksessa.

# Liite D: Malli kyselytutkimuksen suorittamisesta

## ASUKKAAN YLEISARVIO

Osoite:

Arvioijan nimi:

1. Oletko kokenut, että liikenne aiheuttaa tärinää tai värähtelyä huoneistossasi? Kyllä  Ei   
Mikäli vastauksesi oli ei, niin siirry kohtaan 13.

2. Kun ajattelet noin 12 viimeisen kuu-  
kauden aikaa, katsotko että tärinä tai  
värähtelyt ovat olleet:

hyvin epämiellyttäviä	
kohtalaisen epämiellyttäviä	
hieman epämiellyttäviä	
eivät lainkaan epämiellyttäviä	
vai etkö ole havainnut värähtelyä lainkaan?	

3. Pyydämme Sinua vastaamaan samaan kysymykseen myös käyttäen numeerista asteikkoa. Valitse numero 0:sta 10:een siten, että 0 merkitsee tilannetta, jossa tärinä tai värähtelyt eivät ole olleet havaittavia ja 10 tilannetta, jossa ne ovat olleet erittäin epämiellyttäviä:

Värähtelyt eivät ole havaittavia	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Värähtelyt ovat erittäin epämiellyttäviä

4. Kuinka usein tärinä ilmenee ja kuinka paljon tärinä häiritsee?

	Kuinka usein ilmenee?			Kuinka paljon häiritsee?		
	Ei koskaan	Joskus	Useita kertoja päivässä	Ei merkitystä	Kohtalaisesti	Paljon
Talo tärisee tai värähtelee						
Kalusteet/astiat/ikkunat helisevät						
Keho aistii värähtelyt						
Muu:						

5. Kuinka usein tärinästä aiheutuva haitta esiintyy ja kuinka paljon haitta häiritsee?

Tärinästä aiheutunut haitta	Kuinka usein esiintyy?			Kuinka paljon häiritsee?		
	Ei koskaan	Joskus	Useita kertoja päivässä	Ei merkitystä	Kohtalaisesti	Paljon
Vaikeuttaa nukahtamista						
Herättää kesken unien						
Häiritsee keskittymistä						
Aiheuttaa pelkoa rakennevaurioista						
Muu:						

6. Mikä on vuorokaudenaika, jolloin tärinästä aiheutuva haitta on suurin?

Ei eroa	07–12	12–18	18–22	22–07

7. Mikä on vuodenaika, jolloin tärinästä aiheutuva haitta on suurin?

Ei eroa	kevät	kesä	syksy	talvi

8. Minä viikonpäivänä ja mihin kellonaikaan yksittäinen liikenneväline aiheuttaa häiritsevimmän tärinän päiväsaikaan (07.00–22.00)?

--

9. Minä viikonpäivänä ja mihin kellonaikaan yksittäinen liikenneväline aiheuttaa häiritsevimmän tärinän yöaikaan (22.00–07.00)?

--

Kysymykset 10–12 koskevat liikenteestä sisätiloihin siirtyvää melua.

10. Kun ajattelet noin 12 viimeisen kuu-  
kauden aikaa, katsotko että melu on  
ollut:

hyvin epämiellyttävää	
kohtalaisen epämiellyttävää	
hieman epämiellyttävää	
ei lainkaan epämiellyttävää	
vai etkö ole havainnut melua lainkaan?	

11. Kuinka usein melusta aiheutuva haitta esiintyy ja kuinka paljon haitta häiritsee?

Melusta aiheutunut haitta	Kuinka usein esiintyy?			Kuinka paljon häiritsee?		
	Ei koskaan	Joskus	Useita kertoja päivässä	Ei merkitystä	Kohtalaisesti	Paljon
Vaikeuttaa nukahtamista						
Herättää kehen unien						
Häiritsee keskittymistä						
Häiritsee keskustelua						
Muu:						

12. Jos myös melu on häiritsevää, niin kuinka paljon liikenne-  
melun poistuminen vaikuttaisi liikenteestä aiheutuvan tärinän  
epämiellyttävyyteen?

Ei merkitystä	Kohtalaisesti	Paljon	En osaa sanoa

13. Kuinka kauan olet asunut nykyisessä asunnossa?  vuotta

14. Onko liikenteen aiheuttamasta tärinästä tehty valitus?

Kyllä  Ei

15. Onko liikenteen aiheuttamasta melusta tehty valitus?

Kyllä  Ei

16. Vastajan sukupuoli Nainen  Mies

17. Vastajan ikä

-10	-20	-30	-40	-50	-60	-70	-80	80+

Tekijä(t) Talja, Asko			
Nimeke <b>Suositus liikennetärinän mittaamisesta ja luokituksesta</b>			
Tiivistelmä <p>Ympäristönsuojelulaki (N:o 86/2000) ja ympäristöministeriön asetus pohjarakenteista (RaMK B3, 2004) edellyttävät liikennetärinästä aiheutuvat ympäristöhaitat otettavaksi huomioon. Liikennetärinä ei saa aiheuttaa vaurioita rakennukselle eikä kohtuutonta häiriötä rakennuksessa oleville ihmisille. Tämän julkaisun päätarkoitus on esittää liikennetärinää koskevaa ohjeistusta suunnittelijoille ja päättäjille, jotta liikennetärinästä aiheutuva haitta voidaan ottaa entistä paremmin huomioon yhdyskunta-, liikenne- ja rakennesuunnittelussa.</p> <p>Tutkimuksessa suositeltu asumisviihtyvyyteen perustuva liikennetärinän luokitus ja luokkien rajat ovat samat kuin Norjan standardissa NS 8176 (1999). Värähtelytarkastelu perustuu standardin ISO 2631-2 (2003) mukaiseen värähtelynopeuden taajuuspainotettuun tehollisarvoon. Värähtelyn tunnuslukuna käytetään asuintiloista yhden viikon aikana mitattua tilastollisesti suurinta tehollisarvoa. Käytännössä tunnusluku määritetään 15 liikennevälineestä, jotka ovat aiheuttaneet suurimmat värähtelyt. Vanhoille asuinalueille suositellaan värähtelyluokkaa, jonka raja on 0,6 mm/s. Uusille asuinalueille suositellaan parempaa luokkaa, jonka raja on 0,3 mm/s. VTT:n mittaamasta 16 kohteesta saadut tulokset osoittavat, että NS 8176:ssa esitetyt raja-arvot soveltuvat myös Suomeen. Kaikissa niissä kohteissa, joissa värähtelyn tunnusluku oli suurempi kuin 0,6 mm/s, värähtely koettiin kohtalaisen tai hyvin epämiellyttäväksi. Niissä kohteissa, joissa tunnusluku oli alle 0,3 mm/s, värähtely koettiin enimmillään vain hieman epämiellyttäväksi.</p> <p>Tutkimuksessa on myös verrattu asuintilojen värähtelyä maanpinnan pystyvärähtelyyn. Mitatuista rakennuksista saatuun kokemukseen perustuen on erittäin epätodennäköistä, että lattian pystyvärähtelyn tai kaksikerroksisen talon toisen kerroksen vaakavärähtelyn tunnusluku olisi yli kaksinkertainen maasta mitattuun värähtelyn tunnuslukuun nähden. Paaluperustuksen havaittiin vaimentavan selvästi rakennuksen pystyvärähtelyä, mutta vaakavärähtelyihin ei paalutuksella havaittu olevan oleellista vaikutusta.</p>			
Avainsanat environmental impacts, traffic, traffic-induced vibration, vibration classification, vibration nuisance, vibration measurements, limit values, residential buildings, design values, instructions			
Toimintayksikkö VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Kemistintie 3, PL 1805, 02044 VTT			
ISBN 951-38-6523-1 (nid.) 951-38-6524-X (URL: <a href="http://www.vtt.fi/inf/pdf/">http://www.vtt.fi/inf/pdf/</a> )		Projektinumero R4SU00056	
Julkaisuaika Joulukuu 2004	Kieli Suomi, engl. tiiv.	Sivuja 50 s. + liitt. 15 s.	Hinta B
Projektin nimi Liikenneperäisen tärinän huomioiminen maankäytön, liikenteen ja rakennusten suunnittelussa		Toimeksiantaja(t) Ympäristöministeriö, liikenne- ja viestintäministeriö, Ratahallintokeskus, Tiehallinto, Helsingin, Espoon, Vantaan, Tampereen ja Turun kaupungit	
Avainnimeke ja ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (nid.) 1455-0865 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/inf/pdf/">http://www.vtt.fi/inf/pdf/</a> )		Myynti: VTT Tietopalvelu PL 2000, 02044 VTT Puh. 020 722 4404 Faksi 020 722 4374	



Author(s) Talja, Asko			
Title <b>Recommendation for measurement and classification of traffic-induced vibrations</b>			
Abstract <p>The Environmental Protection Act (86/2000) and National building code of Finland (B3/2004) obligate the environmental impacts of traffic induced vibrations to be taken into consideration. The vibration must not cause damage to the building nor excessive disturbance to the people inside the building. The main object of the report is to produce advice for planners and decision-makers so that the vibration nuisance can be considered in community, traffic and construction planning.</p> <p>Recommendation for disturbance-based vibration classification of the dwellings is proposed. The classification and the vibration limits of the classes are same as given in Norwegian standard NS 8176 (1999). The vibration measure is the frequency weighted rms velocity according to ISO 2631-2 (2003). The vibration class is based on statistical maximum rms velocity measured during one week. In practice the statistical maximum value is determined from 15 vehicle pass-bys, which generate the maximum vibrations. The vibration limit for existing buildings is 0.6 mm/s and 0.3 mm/s for new residential buildings. Sixteen dwellings were studied more closely by VTT. The experience proved that the classification given in NS 8176 is also applicable in Finland. In all of the dwellings, where the statistical maximum value was higher than 0.6 mm/s, the vibration were highly or moderately disturbing the occupants. When the value was less than 0.3 mm/s, the vibrations were only slightly disturbing or not disturbing.</p> <p>The report also includes a comparison of the statistical maximum vibration in the dwelling with the vertical vibration of the ground. Based on the experience from the dwellings studied by VTT, the vertical vibrations of the floors and the horizontal vibrations of the second floor are very probably not more than twice the vibrations in ground. Lower vertical vibrations were found in houses on pile foundation. Pile foundation prevents vertical vibrations, but the effect on the horizontal vibrations of the second floor is negligible.</p>			
Keywords environmental impacts, traffic, traffic-induced vibration, vibration classification, vibration nuisance, vibration measurements, limit values, residential buildings, design values, instructions			
Activity unit VTT Building and Transport, Kemistintie 3, P.O.Box 1805, FIN-02044 VTT, Finland			
ISBN 951-38-6523-1 (soft back ed.) 951-38-6524-X (URL: <a href="http://www.vtt.fi/inf/pdf/">http://www.vtt.fi/inf/pdf/</a> )		Project number R4SU00056	
Date December 2004	Language Finnish, Engl. abstr.	Pages 50 p. + app. 15 p.	Price B
Name of project Traffic-induced vibrations in land use, traffic and construction planning		Commissioned by Ministry of the Environment, Ministry of Transport and Communications, Finnish Rail Administration, Finnish Road Administration, the cities of Helsinki, Espoo, Vantaa, Tampere and Turku	
Series title and ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (soft back edition) 1455-0865 (URL: <a href="http://www.inf.vtt.fi/pdf/">http://www.inf.vtt.fi/pdf/</a> )		Sold by VTT Information Service P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 20 722 4404 Fax +358 20 722 4374	





## VTT TIEDOTTEITA – RESEARCH NOTES

### VTT RAKENNUS- JA YHDYSKUNTATEKNIikka – VTT BYGG OCH TRANSPORT – VTT BUILDING AND TRANSPORT

- 2214 Ekholm, Virpi. Kerrostalon muuraus- ja rappaustyöt talvella. Toteutusedellytysten kehittäminen. 2003. 80 s. + liitt. 5 s.
- 2218 Ekholm, Virpi & Kauranen, Hannu. Aliurakoitsijakoulutus ja osaamisen siirto rakennusyrityksessä. 2003. 85 s.
- 2224 Turk, Goran & Ranta-Maunus, Alpo. Analysis of strength grading of sawn timber based on numerical simulation. 2003. 38 p. + app. 28 p.
- 2223 Kärnä, Tuomo, Kolari, Kari, Jochmann, Peter, Evers, Karl-Ulrich, Xiangjun, Bi, Määttä, Mauri & Martonen, Petter. Ice action on compliant structures. Laboratory indentation tests. 2003. 43 p. + app. 79 p.
- 2226 Andelin, Mia. Home Service Concept – Technology, Logistics and Business Models. 2004. 76 p. + app. 5 p.
- 2227 Ala-Outinen, Tiina, Harmaajärvi, Irmeli, Kivikoski, Harri, Kouhia, Ilpo, Makkonen, Lasse, Saarelainen, Seppo, Tuhola, Markku & Törnqvist, Jouko. Ilmastonmuutoksen vaikutukset rakennettuun ympäristöön. Yhteenveto projektin tuloksista. 2004. 83 s. + liitt. 6 s.
- 2236 Koski, Hannu. Rakennushankkeen luovutusprosessin kehittäminen. 2004. 37 s. + liitt. 10 s.
- 2239 Kauranen, Hannu. Märkätilaproessin kehittäminen. Talonrakentamisen työmaaproessin re-engineering. 2004. 34 s. + liitt. 4 s.
- 2242 Beilinson, Leif, Rathmayer, Rita & Wuolijoki, Arja. Kuljettajien käsitykset nopeusvalvonnan yleisyydestä ja puuttumiskynnyksistä. 2004. 35 s. + liitt. 9 s.
- 2245 Mroueh, Ulla-Maija, Vahanne, Pasi, Eskola, Paula, Pasanen, Antti, Wahlström, Margareta, Mäkelä, Esa & Laakosonen, Rainer. Pilaantuneiden maiden kunnostushankkeiden hallinta. 2004. 318 s. + liitt. 44 s.
- 2249 Hietaniemi, Jukka, Vaari, Jukka, Hakkarainen, Tuula, Huhta, Jaakko, Jumppanen, Ulla-Maija, Korhonen, Timo, Kouhia, Ilpo, Siiskonen, Jaakko & Weckman, Henry. Ontelotilojen paloturvallisuus. Ontelopalojen ominaispiirteet sekä palojen etenemisen rakenteellinen katkaiseminen ja sammuttaminen. 2004. 74 s. + liitt. 24 s.
- 2252 Nykänen, Esa, Sarvaranta, Leena & Nummelin, Johanna. Home Service Concept. From User Needs to Services. 2004. 31 p. + app. 1 p.
- 2253 Korhonen, Timo & Hietaniemi, Jukka. Puujulkisivujen paloturvallisuus lähiökerrostaloissa. 2004. 58 s. + liitt. 36 s.
- 2256 Heating and Cooling with Focus on Increased Energy Efficiency and Improved Comfort. Guidebook to IEA ECBCS Annex 37 Low Exergy Systems for Heating and Cooling of Buildings. Summary Report. Ala-Juusela, Mia (ed.). 2004. 44 p. + app. 6 p.
- 2261 Leviäkangas, Pekka, Alaruikka, Anna-Maija & Mononen, Petri. PRO TELIO –Oulun seudun liikennejärjestelmä osana tietoyhteiskuntaa. Loppuraportti. 2004. 32 s. + liitt. 8 s. + CD-rom
- 2260 Koppinen, Tiina. & Lahdenperä, Pertti. Road sector experiences on project delivery methods. 2004. 216 p. + app. 32 p.
- 2266 Tillander, Kati, Mangs, Johan & Paloposki, Tuomas. Tulipalojen ympäristövaikutukset. 2004. 72 s. + liitt. 16 s.
- 2268 Kurki, Timo, Spoof, Harri, Malmivuo, Mikko, Petäjä, Sami & Leinonen, Jarkko. Kunnossapitourakoiden toimivuusvaatimukset. 2004. 123 s. + liitt. 7 s.
- 2278 Talja, Asko. Suositus liikennetärinän mittaamisesta ja luokituksista. 2004. 50 s. + liitt. 15 s.

Ympäristönsuojelulaki, maankäyttö- ja rakennuslaki ja ympäristöministeriön asetus pohjarakenteista edellyttävät liikennetärinästä aiheutuvat ympäristöhaitat otettavaksi huomioon. Liikennetärinä ei saa aiheuttaa vaurioita rakennukselle eikä kohtuutonta häiriötä rakennuksessa oleville ihmisille.

Julkaisussa esitetty kuvaus tärinän ympäristöhaitoista auttaa lukijaa ymmärtämään, milloin liikennetärinästä aiheutuvat haitat ovat yleensä mahdollisia. Ehdotus mittauskäytännöstä ja tavasta määrittää tärinää kuvaava tunnusluku yhtenäistää mittauksen suorittamista ja tulosten esittämistä. Asumisviihtyvyyteen perustuva suositus tärinän luokituksista ja luokkien rajoista auttaa lakien ja määräysten soveltamisessa. Lisäksi julkaisussa on kuvattu, miten maaperän värähtelyt siirtyvät rakennukseen ja miten kyselytutkimusta voidaan käyttää apuna tärinävaikutusten arvioinnissa.

Tätä julkaisua myy  
VTT TIETOPALVELU  
PL 2000  
02044 VTT  
Puh. 020 722 4404  
Faksi 020 722 4374

Denna publikation säljs av  
VTT INFORMATIONSTJÄNST  
PB 2000  
02044 VTT  
Tel. 020 722 4404  
Fax 020 722 4374

This publication is available from  
VTT INFORMATION SERVICE  
P.O.Box 2000  
FIN-02044 VTT, Finland  
Phone internat. + 358 20 722 4404  
Fax + 358 20 722 4374