

Asko Talja, Ari Vepsä, Juha Kurkela & Matti Halonen

Rakennukseen siirtyvän liikennetärinän arviointi

Rakennukseen siirtyvän liikennetärinän arviointi

Asko Talja, Ari Vepsä, Juha Kurkela & Matti Halonen

ISBN 978-951-38-7197-0 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)
ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)

Copyright © VTT 2008

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

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

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

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

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

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

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

Talja, Asko, Vepsä, Ari, Kurkela, Juha & Halonen, Matti. Rakennukseen siirtyvän liikennetärinän arviointi [Assessment of traffic-induced vibrations in buildings]. Espoo 2008. VTT Tiedotteita – Research Notes 2425. 95 s. + liitt. 69 s.

Avainsanat traffic, traffic-induced vibration, vibration classification, vibration nuisance, vibration measurements, limit values, residential buildings, vibration design, vibration analysis, vibration magnification, resonance vibration, frame, floors, instructions

Tiivistelmä

Suomessa liikennetärinän suhteen erityisen ongelmallisia ovat savikkolaaksopainanteet, joita reunustavat kallioiset tai soraiset mäki-alueet. Tällaisilla, usein alle 10 metrin paksuisilla savikkoalueilla värähtely leviää tehokkaasti ja leviämisen arviointi on vaikeaa. Vaakavärähtely voi olla pystyvärähtelyä suurempi, ja värähtelyssä dominoi hyvin ka-
pea, alle 10 Hz:n taajuusalue. Tällaisilla alueilla ongelmalliseksi muodostuu erityisesti pientaloilla rakennuksen rungon resonanssivärähtely, koska normaalisti myös rakennuksen rungon ominaistajuus on alle 10 Hz. Koska kevyiden välipohjien ja lyhytjäteisten betonivälipohjien ominaistajuus on yli 10 Hz, lattian resonanssivärähtelyä ei yleensä esiinny hyvin pehmeillä alueilla, mutta se on mahdollinen kovemmillä alueilla, joilla maaperän värähtelyssä dominoivat korkeammat taajuudet. Resonanssin ilmeneminen on sattumanvaraista, mutta esiintyessään resonanssi on erittäin ongelmallinen.

Julkaisussa esitetään rakennuksen rungon ja lattian värähtelysuunnittelua varten menetelmä, joka ottaa huomioon maaperästä mitatun värähtelyn suunnan ja taajuussisällön. Rakennuksessa esiintyvän värähtelyn arviointi perustuu kahteen eri lähestymistapaan. Toisessa otetaan huomioon rungon ja lattian alimmalla ominaistajuudella esiintyvän maaperän värähtelyn voimistuminen resonanssin vuoksi ja toisessa otetaan huomioon maaperän värähtelyn koko taajuusalueen kattava yleinen voimistuminen. Yleiselle voimistumiselle esitetty värähtelyn suurennuskerroin on huomattavasti pienempi kuin resonanssin vuoksi tapahtuvalle värähtelyn voimistumiselle esitetty kerroin. Rungon resonanssitarkastelu perustuu maaperän vaakavärähtelyyn ja lattian resonanssitarkastelu maaperän pystyvärähtelyyn.

Asuintiloissa esiintyvän tärinän arvioimiseksi esitetty menetelmä perustuu rakennuksista tehtyihin mittauksiin, FE-laskentaan ja kirjallisuuslähteisiin. Kaikkiaan mittaushetkellä on 36. Kohteista seitsemän on vähintään kolmikerroksisia kerrostaloja ja muut 29 ovat yksi- tai kaksikerroksisia omakoti- tai rivitaloja. Kaikki kerrostalokohteet ovat savikko-alueilta. Pientalokohteista seitsemän on hiekka- tai soramaa-alueella ja muut ovat savikko-alueilta. Tärinä on aiheutunut junaliikenteestä 22 kohteessa ja muissa 14 kohteessa tärinä on aiheutunut katuliikenteestä. Rungon FE-tarkastelu perustuu 2–3-kerroksiseen tasokehämalliin ja lattian tarkastelu yksinkertaisesti tuettuun palkkimalliin. FE-tarkastelu on tehty sekä tilastomatemattiseen resonanssitarkasteluun että mitattuun herätteeseen perustuen.

Talja, Asko, Vepsä, Ari, Kurkela, Juha & Halonen, Matti. Rakennukseen siirtyvän liikennetärinän arviointi [Assessment of traffic-induced vibrations in buildings]. Espoo 2008. VTT Tiedotteita – Research Notes 2425. 95 p. + app. 69 p.

Keywords traffic, traffic-induced vibration, vibration classification, vibration nuisance, vibration measurements, limit values, residential buildings, vibration design, vibration analysis, vibration magnification, resonance vibration, frame, floors, instructions

Abstract

In regard to traffic-induced vibrations, clay areas with surrounding rocky or gravelly hills are especially problematic in Finland. The thickness of the soft layer is often less than 10 metres. The vibrations spread effectively in such layers and they are difficult to evaluate. Often the horizontal vibrations of the ground can be higher than the vertical component and frequencies under 10 Hz with a very narrow band dominate. The areas are problematic especially for detached houses, because natural frequencies below 10 Hz are typical for the building frame, and resonance vibration may occur. Because lightweight floors and short-span concrete floors usually have natural frequencies above 10 Hz, resonance of floors does not usually appear in soft clay areas but is possible in harder soils where higher frequencies dominate. The resonance phenomenon is not very common, but when it does appear it poses a real problem.

A method for the vibration design of the frame and floor of the building is presented, which takes the direction and frequency content of the soil into consideration. The design is based on measured ground vibrations. The evaluation is based on two approaches: one considers the uniform magnification of the vibration and the other the magnification in the resonance. The resonance design of the frame is based on the horizontal, and the resonance design of the floor on the vertical, vibration of the ground. In resonance design only the 1/3 octave band that coincides with the fundamental frequency is studied.

The design method is based on the vibration measurements of buildings, on FE calculations and on a literature study. Altogether 36 buildings were measured. Seven of them are at least three-storey houses and other 29 are one- or two-storey low-rise houses. All the high-rise buildings are from clay areas. Seven of the low-rise buildings are from sand or gravel and others are from clay areas. The vibration is induced by railway traffic in 22 houses and by street traffic in 14 houses. FE analysis of the frame is based on a simple two- to three-storey plane model and the examination of the floor on a simply supported beam model. The FE study was based both on the statistical resonance study and on the measured vibration signals.

Appendix A of the publication presents an English summary of the study.

Alkusanat

Suomessa otetaan yhä enemmän käyttöön liikennetärinän suhteen ongelmallisia väylien läheisyydessä sijaitsevia savikkoalueita, joilla matalataajuuksinen maaperän värähtely leviää tehokkaasti. Joissakin rakennuksissa havaittujen voimakkaiden värähtelyjen vuoksi on noussut esille tarve rakennusten värähtelysuunnittelua koskevien menetelmien kehittämiseen. Ilman erityistä rakennuksen rungon ja lattian värähtelysuunnittelua on olemassa riski, että rakennuksessa rungon tai lattian värähtely kasvaa resonanssin vuoksi moninkertaiseksi maaperän värähtelyyn nähden.

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. Ohjetekstissä mainitaan lisäksi, että kun tärinä mitataan maasta, tulee tärinän vahvistuminen rakennuksessa arvioida erikseen. Myös siksi rakennuksen rungon ja lattian värähtelysuunnittelua varten tarvitaan menetelmä, jolla värähtelysuunnittelussa voidaan ottaa huomioon maaperästä mitatun värähtelyn suunta ja taajuussisältö.

Liikennetärinään liittyen VTT on aikaisemmin julkaissut suosituksen liikennetärinän mittaamisesta ja luokituksista (VTT Tiedotteita 2278, 2004) sekä suosituksen liikennetärinän arvioimiseksi maankäytön suunnittelussa (VTT Working Papers 50, 2006). Tämä rakennukseen siirtyvän liikennetärinän arvioimiseen keskittyvä kolmas julkaisu on jatkoa edellisille. Se sisältää myös tiivistetyn ja päivitetyn yhteenvedon aikaisemmin esitetyistä asioista niiltä osin, kuin ne ovat arviointimenetelmän käytön kannalta oleellisia.

Tämän julkaisun lisäksi johtoryhmän jäsenille on jaettu kohdekohtaiset mittausraportit, FE-laskentaan liittyvät kaksi raporttia ja tekninen yhteenvetoraportti, joissa tuloksia on käsitelty tarkemmin. Yhteenvetoraportissa esitetyissä vertailuissa kohde on yksilöity sen osoitteen mukaan tässä julkaisussa käytetyn kohdetta kuvaavan tunnuksen sijaan.

Tutkimuksen vastuullisena johtajana toimi VTT:ssä teknologiapäällikkö Eila Lehmus ja projektipäällikkönä erikoistutkija Asko Talja. Mittauksista ja mittaustuloksien analysoinnista VTT:ssä vastasivat Juha Kurkela, Matti Halonen, Erkki Järvinen ja Jukka Mäkinen. FE-laskelmista vastasi Ari Vepsä. Tutkimustulokset saattoi ohjeiksi ja tämän julkaisun kirjoitti Asko Talja. Englanninkielisen tekstin tarkasti Adelaide Lönnberg.

Tutkimushankkeen johtoryhmään kuuluivat seuraavat rahoittajien edustajat:

Ilkka Jussila, Tekes
Tuomo Viitala, Ratahallintokeskus
Pentti Salo, Tiehallinto
Jarkko Karttunen, Helsingin kaupunki
Harri Tanska, Espoon kaupunki
Matti Holtari, Vantaan kaupunki
Jaakko Lindholm, Turun kaupunki
Tapio Reijonen, Keravan kaupunki
Pekka Nurro, Metsäteollisuus ry
Hannu Jokiniemi, Rautaruukki Oy
Sami Viitanen, YIT Rakennus Oy
Markku Intke, YH-Suomi Oy
Riitta Ilomäki-Vänttinen, NCC Rakennus Oy
Eila Lehmus, VTT

Lisäksi johtoryhmätyöskentelyyn osallistui seuraavat asiantuntijajäsenet:

Risto Saari, liikenne- ja viestintäministeriö
Anni Rimpiläinen, ympäristöministeriö
Erkki Poikolainen, Ratahallintokeskus
Osmo Torvinen, Helsingin kaupunki
Aila Elo, Keravan kaupunki
Esa Patjas, SITO-yhtiöt
Matti Hakulinen, Geomatti Oy
Juha Tuovinen, Kalliotekniikka Oy
Vesa Valpasvuo, Suomen Kuntaliitto ry
Mauri Marttila, Suomen Kiinteistöliitto ry
Jouko Törnqvist, VTT

Johtoryhmän puheenjohtajana toimi ylitarkastaja Tuomo Viitala Ratahallintokeskuksesta.

Kiitän projektin johtoryhmän jäseniä, rahoittajia ja kaikkia työhön osallistuneita henkilöitä aktiivisuudesta ja hyvin onnistuneesta yhteistyöstä. Lisäksi osoitan erityiskiitokseni asukkaille, jotka tukivat tutkimusta antamalla asuntonsa mittauskäyttöön.

Asko Talja

Sisällysluettelo

Tiivistelmä.....	3
Abstract.....	4
Alkusanat.....	5
1. Johdanto.....	9
1.1 Liikennetärinä ympäristöhaittana.....	9
1.2 Ihmisen herkkyys tärinälle.....	11
1.3 Liikennetärinää koskevat lait ja vastuut.....	12
2. Tärinän raja-arvot asuinmukavuudelle.....	13
2.1 Värähtelyn suuruuden kuvaaminen.....	13
2.2 Suositukset värähtelyn raja-arvoiksi.....	15
2.3 Raja-arvojen tausta.....	17
3. Rakennuksen tärinän arviointitasot.....	19
3.1 Arviointitaso 1.....	19
3.2 Arviointitaso 2.....	20
3.3 Arviointitaso 3.....	21
4. Rakennukseen siirtyvän tärinän arviointi.....	22
4.1 Rakennuksen tärinään vaikuttavia tekijöitä.....	22
4.2 Arvioinnin yleisperiaate.....	23
4.3 Maaperän värähtelyn ja sen taajuussisällön määrittäminen.....	24
4.4 Perustuksen värähtelyn arviointi.....	25
4.5 Rungon värähtelyn arviointi.....	26
4.6 Lattian värähtelyn arviointi.....	27
4.7 Arviointiesimerkit.....	28
4.7.1 Herätetaajuus korkea ja värähtely laajakaistainen.....	28
4.7.2 Herätetaajuus matala ja värähtely kapeakaistainen.....	29
5. Vertailu mittaustuloksiin.....	31
5.1 Mittauskohteet.....	31
5.2 Mittaustuloksiin vaikuttavat epätarkkuudet.....	33
5.3 Värähtelyn siirtyminen perustuksiin.....	35
5.3.1 Pientalot.....	35
5.3.2 Kerrostalot.....	41
5.4 Rungon värähtely.....	46
5.4.1 Pientalot.....	46

5.4.2	Kerrostalot.....	55
5.5	Lattioiden värähtely.....	61
5.6	Yhteenveto vertailusta mittaustuloksiin.....	65
6.	Vertailu FE-laskennan tuloksiin.....	67
6.1	Tilastomatemattinen tarkastelu.....	67
6.1.1	Laskentamalli.....	67
6.1.2	Rakenteen dynaamisten ominaisuuksien vaikutus.....	68
6.1.3	Tilastomatemattinen tarkastelu.....	69
6.2	Mitattuun herätteeseen perustuva tarkastelu.....	71
6.2.1	Mitatut herätteet.....	72
6.2.2	Pientalon runko jäykällä perustuksella.....	73
6.2.3	Pientalon runko joustavalla perustuksella.....	74
6.2.4	Lattian värähtely.....	76
6.3	Yhteenveto FEM-laskennan tuloksista.....	78
7.	Vertailu kirjallisuuslähteiden tuloksiin.....	80
8.	Keinot tärinähaittojen vähentämiseksi.....	82
8.1	Maankäytön suunnittelu.....	82
8.2	Väylä- ja liikennesuunnittelu.....	83
8.3	Rakennesuunnittelu.....	84
9.	Yhteenveto ja jatkotutkimustarpeet.....	87
9.1	Yhteenveto.....	87
9.2	Jatkotutkimustarpeet.....	91
	Lähdeluettelo.....	94

Liitteet

Liite A: Assessment of traffic-induced vibrations in buildings

Liite B: Rakennuksen tärinään vaikuttavat tekijät

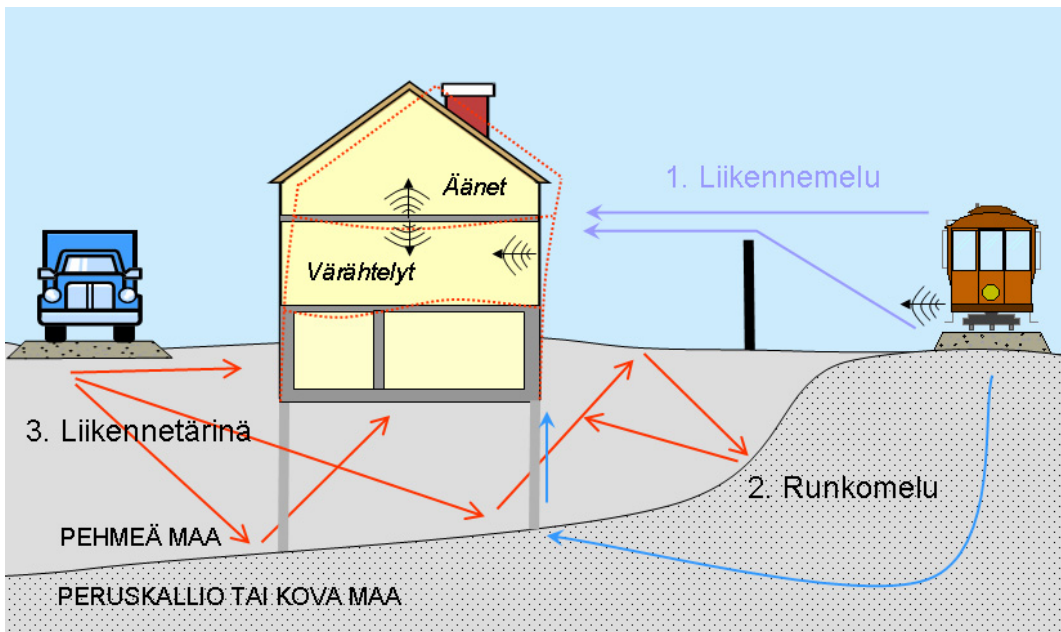
Liite C: Yhteenveto mittauskohteista

Liite D: Värähtelyn taajuussisältöön perustuva vertailu

1. Johdanto

1.1 Liikennetärinä ympäristöhaittana

Liikennetärinä on juna- tai tieliikenteen aiheuttamaa maan kautta välittyvää värähtelyä, jonka ihminen kokee joko suoraan kehossaan rakennuksen värähtelynä tai välillisesti astioiden ja esineiden helinänä. Kiskon ja junan pyörien tai tienpinnan ja renkaiden kosketuksesta voi aiheutua myös äänitaajuuksista värähtelyä, joka välittyy ilman tai maaperän kautta läheisiin rakennuksiin. Tällöin värähtely voi ilmetä liikennemeluna tai runkomeluna (kuva 1). Tässä julkaisussa tarkastellaan vain liikennetärinää ja sen siirtymistä rakennukseen.



Kuva 1. Periaatekuva liikenteestä aiheutuvasta värähtelystä, jonka asukas voi kokea liikennetärinä, runkomeluna tai liikennemeluna.

Asutuksen keskittyminen teiden ja ratojen läheisyyteen on yleinen ilmiö kaikkialla. Yhdyskuntarakenteen tiivistyminen ja tonttipula luovat painetta rakentaa myös sellaisille alueille, esimerkiksi pehmeille savimaille, joilla tärinähaitat korostuvat. Asutuksen keskittyminen pienentää liikenteestä aiheutuvia haitallisia päästöjä, mutta samalla liikenteestä aiheutuvien melu- ja tärinähaittojen riski kasvaa. Myös raskaan liikenteen määrän ja akselipainojen kasvu lisää liikenteestä aiheutuvia haittoja. Lisäksi asukkaat ovat yhä laatumietoisempia ja viranomaisten vaatimukset asuinympäristön laadulle ovat kasvaneet. Siksi liikennetärinän haitat ovat liikennemelun tapaan nousseet merkittäväksi kriteeriksi kaavoitus- ja rakentamispäätöksiä tehtäessä. Vaikka laeissa ja asetuksissa liikennetärinän ympäristöhaitat edellytetään otettavaksi huomioon, ohjeistuksen puuttuessa haittojen arviointi on usein jäänyt puutteelliseksi.

Karkeasti arvioiden liikennetärinä voi haitata asumista yli sadassatuhannessa rakennuksessa ja koskee useita satojatuhansia asukkaita. Rakennuksia, joissa tärinä on niin suurta, että siitä voi aiheutua rakenteellisiakin vaurioita, on tuhansia. Noin joka kolmannessa tapauksessa tärinä aiheutuu autoliikenteestä ja muissa tapauksissa raideliikenteestä.

Liikennetärinää tarkastellaan yleensä taajuusalueella 1–80 Hz. Tärinän syntymiseen ja sen taajuussisältöön vaikuttavat mm.

- liikennöivän kaluston tyyppi, kunto, paino, jousitus ja nopeus
- maaperä väylän ja rakennuksen alla sekä lähialueella
- väylän rakenne ja perustamistapa
- väylän kunto, epätasaisuudet ja hidastetöyssyt.

Värähtelyn leviämiseen maaperässä ja sen taajuussisältöön vaikuttavat erityisesti maalaji, pehmeän maakerrokseen paksuus ja sen alla olevan peruskallion tai kovan maapohjan topografia (kuva 1). Suomessa liikennetärinä on yleensä koettu haitallisimmaksi pehmeillä savimailla, joilla maaperän värähtelyssä dominoiva taajuusalue on 4–10 Hz. Kovemmissa saviperäisissä maissa dominoiva taajuus on yleensä 10–20 Hz. Kalliossa sekä sora- ja hiekkamaissa värähtelytaajuus on usein yli 40 Hz, jolloin runkomelu voi muodostua liikennetärinää haitallisemmaksi tekijäksi.

Maaperän värähtely siirtyy rakennuksen perustukseen, mikä johtaa edelleen rakennuksen rungon ja lattioiden värähtelyyn. Usein tärinä on voimakkuudeltaan niin pientä, ettei siitä aiheudu rakennukseen vaurioita, mutta se voidaan kokea muuten epämiellyttäväksi. Asukas voi tuntea rakennuksen tärinän suoraan kehossaan, tai esineet voivat tärinän vuoksi helistä ja heilua. Tärinästä seuraa haittoja, joita ovat mm.

- asumismukavuuden väheneminen
- keskittymiskyvyn häiriintyminen
- nukkumisen häiriintyminen ja siitä mahdollisesti aiheutuvat terveyshaitat
- pelko rakennevaurioista
- pelko kiinteistön arvon alenemisesta.

Kun värähtely välittyy väylän ja rakennuksen välissä olevan kovan maaperän kautta, värähtely voi aiheuttaa runkomelua. Liikenteestä aiheutuvaa runkomelua tarkastellaan yleensä taajuusalueella 16–250 Hz. Asunnoissa äänitaajuuksinen runkomelu ilmenee matalataajuisena kumuna, joka muistuttaa kaukana olevan ukkosen tai lentokoneen aiheuttamaa jylinää. Runkomeluun liittyvä värähtely on voimakkuudeltaan yleensä niin pientä, että sitä ei havaita rakennuksen tärinä.

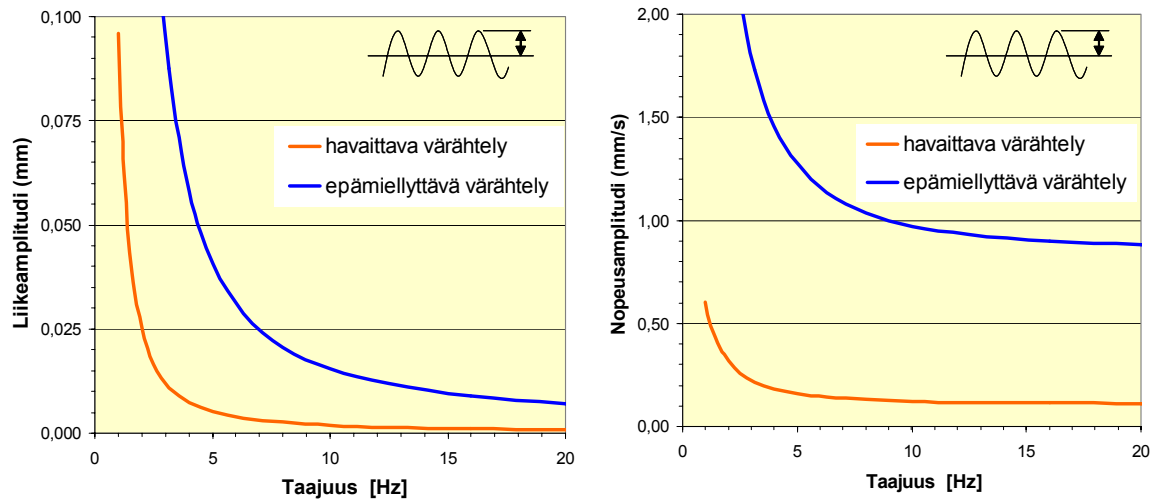
Kun värähtely välittyy asuntoon väylän ja rakennuksen välissä olevan ulkoilman välityksellä, värähtely voi aiheuttaa liikennemeluhaitan. Melu syntyy pääasiassa ajoneuvon

kiskon ja junan pyörien tai tienpinnan ja renkaiden kosketuksesta, moottorin äänestä ja ilmapirtauksista.

1.2 Ihmisen herkkyys värinälle

Ihmisen keho aistii hyvin pienet värinäinä koetut värähtelyt. Herkkyys värähtelyille riippuu värähtelyn suuruuden lisäksi myös sen taajuudesta. Värähtely voidaan esittää siirtymän, värähtelynopeuden ja kiihtyvyyden avulla.

Kun värähtelyn suuruutta kuvataan siirtymän avulla, hyvin pehmeillä savimailla, joilla dominoiva taajuus on usein 4–10 Hz, epämiellyttävän värähtelyn raja on alle 0,2–0,6 mm (kuva 2). Kovilla maaperillä, joilla dominoiva taajuus on usein yli 20 Hz, jo 0,01 mm:n liikeamplitudit koetaan yleensä epämiellyttäväksi.



Kuva 2. Ihmisen herkkyys säännölliselle harmoniselle värähtelylle. Vasemmassa kuvassa värähtely esitetään siirtymän ja oikeassa kuvassa värähtelynopeuden avulla. (Talja 2004.)

Tärinän yhteydessä värähtelyn suuruutta kuvataan yleensä siirtymän sijaan värähtelynopeudella. Tällöin ihmisen herkkyys yli 10 Hz:n taajuuksilla on käytännössä riippumaton nopeusamplitudista (kuva 2). Tällä taajuuksialueella useimmat ihmiset kokevat yli 1 mm/s:n värähtelyt epämiellyttäväksi, kun tärinä on liikenteen aiheuttama.

Muutos värähtelyn suuruudessa ei ole suoraan verrannollinen ihmisen kokemaan tärinään. Tarvitaan suuri muutos värähtelytasossa, ennen kuin ihminen aistii tärinän selvästi pienentyneen. Yleensä vasta värähtelytason puolittumista voidaan pitää merkittävänä parannuksena tärinäongelmissa.

1.3 Liikennetärinää koskevat lait ja vastuut

Nykyinen lainsäädäntö edellyttää tärinähaitan huomioimista kaavasuunnittelussa ja rakentamisessa. Siksi tulee varmistua siitä, että tieto tärinäriskistä ja kaavoituksen yhteydessä tehdyistä tärinäselvityksistä siirtyy aluesuunnittelusta rakennusvalvontaan ja rakennuttajalle. Myös asunnon ostajan tulee saada tietoa liikennetärinäalueelle rakennetun rakennuksen tärinätasosta. Asunnon ostajan kannattaa kiinnittää huomiota liikennetärinähaittaan vähintään yhtä paljon kuin hän kiinnittää huomiota liikennemeluun. Hänen tulee myös osata kysyä tärinän haitoista, olipa sitten kyse uudesta tai jo käytössä olevasta huoneistosta.

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

Maankäyttö- ja rakennuslaki (132/1999) asettaa alueiden käytön suunnittelulle ja rakentamisen ohjaukselle tavoitteeksi turvallisen, terveellisen ja viihtyisän ympäristön luomisen. Maankäyttö- ja rakennusasetuksessa (895/1999) edellytetään kaavaa laadittaessa selvitettäväksi kaavan vaikutukset ihmisten elinoloihin ja elinympäristöön. Maankäyttö- ja rakennuslain perusteella annettu ympäristöministeriön asetus pohjarakenteista (RaMK B3/2004) edellyttää liikennetärinän otettavaksi huomioon suunnittelussa ja rakentamisessa sekä rakentamisen valvonnassa siten, että se ei aiheuta vaurioita rakennukselle tai kohtuutonta häiriötä rakennuksessa oleville ihmisille.

Maantielaki (503/2005) edellyttää, että maantien suunnittelussa ja rakentamisessa on otettava huomioon ympäristönäkökohdat. Tärinä mainitaan myös ympäristönsuojelulaisissa (86/2000), jonka yleisenä tavoitteena on ehkäistä ihmisen toiminnasta johtuvaa ympäristön pilaantumista. Lain periaatteena on, että toiminnan harjoittajan tulee ehkäistä ennakolta ympäristöhaitat tai rajoittaa ne mahdollisimman vähäisiksi. Laki koskee myös tärinän päästämistä tai jättämistä ympäristöön, jos siitä aiheutuu terveyshaittaa, yleisen viihtyisyyden vähenemistä tai haittaa omaisuudelle.

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

2. Tärinän raja-arvot asuinmukavuudelle

2.1 Värähtelyn suuruuden kuvaaminen

Kun kyse on asumisviihtyvyydestä, tärinän arvioimisessa käytetään mitatusta värähtelysignaalista määritettyä värähtelyn tehollisarvoa v_{rms} (mm/s) (NS 8176, 1999, ISO 2631-2, 2003, DIN 4150-2, 1999, FTA 2006, FRA 2005). Yleensä ihmisen herkkyyks otetaan huomioon painottamalla signaalin eritaajuuksiset komponentit taajuudesta riippuvalla painokertoimella, jolloin taajuuspainotetusta värähtelyn tehollisarvosta käytetään merkintää v_w (mm/s). Taulukossa 1 esitetään tärinän suuruuden kuvaamiseen liittyviä käsitteitä. Mittauksen suorittamista ja tulosten analysointia kuvataan tarkemmin VTT Tiedotteessa 2278 (Talja 2004).

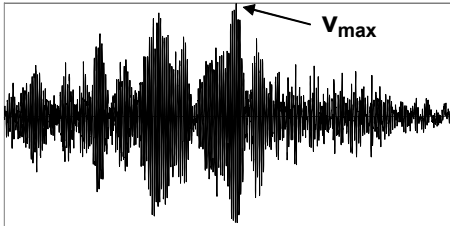
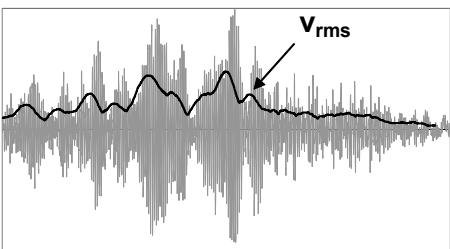
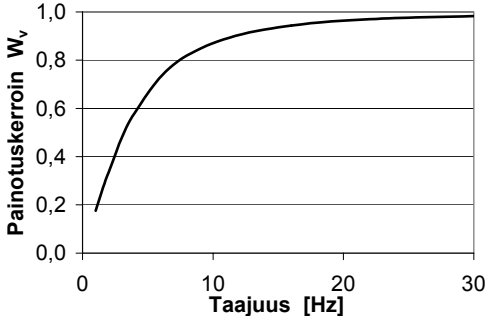
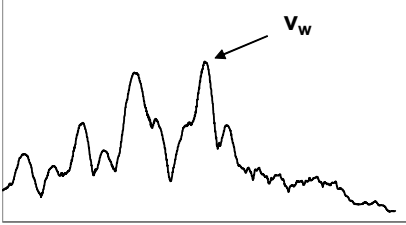
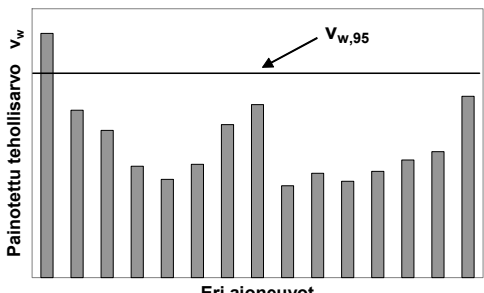
Asumisviihtyvyyttä arvioitaessa eri liikennevälineistä mitatuista värähtelysignaalien tehollisarvoista määritetään värähtelyn tunnusluku $v_{w,95}$ (mm/s) (taulukko 1). Se kuvaa värähtelyn maksimi-arvon odotusarvoa, joka määritellään mittaustuloksista 95 %:n todennäköisyyttä vastaavaksi tilastollisesti suurimmaksi arvoksi. Tunnusluvun perusteena ovat yhden viikon aikana mitatut 15 suurinta, suurimmat värähtelyt sisältävää näytettä. Kustakin signaalista määritetään suurin painotettu värähtelyn tehollisarvo v_w ja värähtelyn tunnusluku $v_{w,95}$ lasketaan näiden 15 signaalien tehollisarvon v_w keskiarvona lisättynä 1,8-kertaisella hajonnalla:

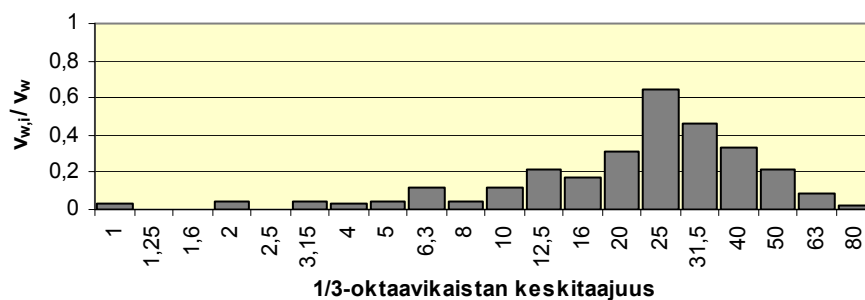
$$v_{w,95} = \overline{v_w} + 1,8 \cdot \sigma . \quad (1)$$

Usein, esimerkiksi arvioitaessa rakennuksen rungon tai lattian herkkyyttä värähtelylle, on tarpeen tietää myös tunnuslukua vastaava näytteiden taajuussisältö. Tällöin värähtelyn tunnusluvun $v_{w,95}$ perusteena käytetystä 15 tehollisarvosta v_w määritetään määrävän 1 sekunnin aikaikkunan pituisen jakson taajuuspainotetut värähtelykomponentit $v_{w,i}$ 1/3-oktaavikaistoittain. Tuloksena esitetään laskettujen suhteiden $v_{w,i}/v_w$ keskiarvokuvaaja (kuva 3). Koska värähtelyn tehollisarvo v_w on taajuustasossa määritettynä

$$v_w = \sqrt{\sum_i (v_{w,i})^2} , \text{ kuvan 3 esityksessä tulee olla } \left(\frac{v_{w,i}}{v_w} \right)^2 = 1,0 . \quad (2)$$

Taulukko 1. Tärinän suuruuden kuvaamiseen liittyviä käsitteitä (Talja 2004).

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



Kuva 3. Esimerkki värähtelyn keskimääräisen taajuussisällön esittämisestä. Kuvaaja on kaikista 15 analysoidusta värähtelynäytteestä määritetty keskiarvo.

Kun arvioidaan rakennusten, rakenteiden ja laitteiden kestävyyttä tärinälle, vertailuarvona käytetään yleensä taajuuspainottamattoman värähtelyn huippuarvoa v_{\max} (mm/s). Värähtelyn tehollisarvoon perustuvan tunnusluvun $v_{w,95}$ ja värähtelyn huippuarvoon perustuvan tunnusluvun $v_{\max,95}$ välillä ei ole voimassa yksiselitteistä riippuvuutta. Siksi tunnusluvun $v_{\max,95}$ määrittämisessä käytetyt v_{\max} -arvot määritetään ensisijaisesti mitatusta signaalista. Ellei se ole mahdollista, likiarvo voidaan VTT Tiedotteen 2278 (Talja 2004) mukaan arvioida seuraavasta empiirisestä lausekkeesta:

$$v_w \leq 0,55 \cdot v_{\max} \cdot \sqrt{1 + (f_0 / f)^2} . \quad (3)$$

Lausekkeessa esiintyvä referenssitajuus $f_0 = 3,5$ Hz. Usein $v_{w,95} = (0,4 \dots 0,6) \cdot v_{\max,95}$.

2.2 Suositukset värähtelyn raja-arvoiksi

Koska tärinähaitan arviointi on uutta ja haittojen arviointiin liittyy parhaassakin arviointimenettelyssä epävarmuustekijöitä, riskialueelle rakennetun rakennuksen todellinen tärinäluokitus tulisi aina varmistaa rakennuksista tehdyin mittauksin. Kohdetiedot mitatuista suositellaan raportoitavaksi lähteen Talja (2004) liitteen B mukaisesti. Kun arvioidaan liikennetärinästä aiheutuvaa haittaa asuinmukavuudelle, värähtelykriteerinä käytetään värähtelyn tunnuslukua $v_{w,95}$ (mm/s). Taulukossa 2 on VTT Tiedotteessa 2278 esitetty suositus värähtelyluokituksesta. Se perustuu Norjan standardiin (NS 8176, 1999) ja VTT:n mittaustuloksiin. Myös ohjeet DIN 4150-2 (1999), Banverket (1997), FRA (2005) ja FTA (2006) tukevat esitettyä suositusta (Talja 2004).

Taulukko 2. Suositus rakennusten värähtelyluokituksesta.

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

Luokituskriteerin on toteuduttava pystyvärähtelyn osalta rakennuksen kaikissa lattioissa ja vaakavärähtelyn osalta rakennuksen jokaisessa kerroksessa. Vaakavärähtelyt ovat yleensä suurimmat rakennuksen alimmassa tai ylimmässä kerroksessa. Lattian suurin pystyvärähtely esiintyy yleensä alimmassa kerroksessa, mikäli eri kerrosten lattiat ovat samanlaiset.

Taulukossa 2 esitetty värähtelyluokitus koskee normaaleja asuinrakennuksia. Mikäli rakennus suunnitellaan tarkoituksellisesti häiriöttömäksi (esim. korkeatasoiset asuinrakennukset, lepokodit, sairaalat), värähtelyluokan tulee olla yhtä värähtelyluokkaa korkeampi. Taulukkoa 2 ei sovelleta rakennuksille, joissa ihmiset ovat paljon liikkeessä tai muut kuin liikenteestä aiheutuvat häiriöt voivat olla merkittävämpiä (esim. toimistot, kaupat, kahvilat, ostoskeskukset, tavaratalot, liikuntatilat).

Värähtelyluokan C mukaan arvioitaviksi alueiksi katsotaan

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

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

Vanhoilla asuinalueilla, joille tärinäarviointia ei ole tehty, saatetaan taulukossa 1 esitetty luokan D raja ylittää usein. Samoin saattaa huolellisestikin suunnitellussa uudisrakennuskohteessa ilmetä poikkeustapauksia, joissa luokan C tavoite ei täyty. Tällöin tulee tapauskohtaisesti arvioida haitan kohtuullisuus ja mahdollisuudet tärinähaitan pienentämiseksi.

2.3 Raja-arvojen tausta

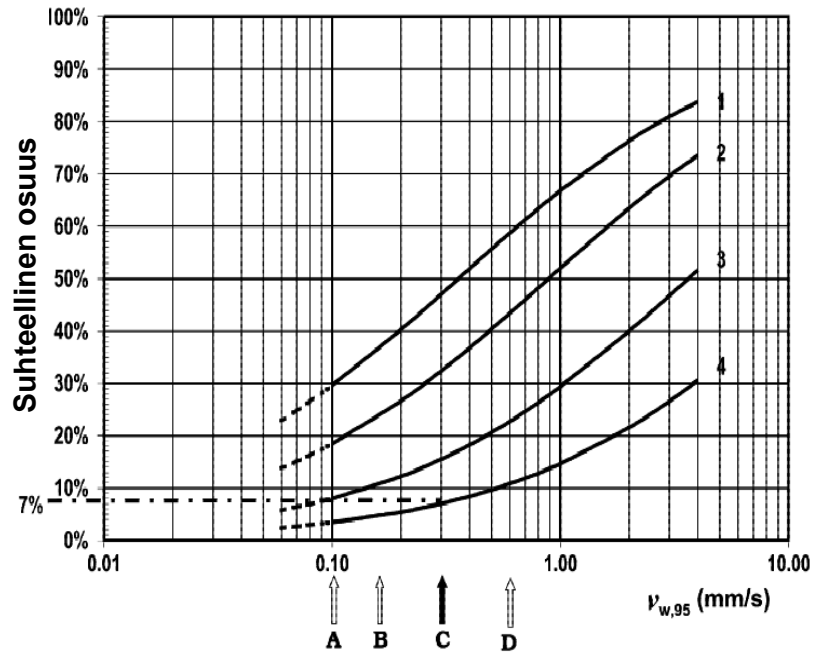
Taulukon 2 tärinäluokitus perustuu asukkailta kysytyyn tärinän häiritsevyyteen ja koh-teista määritettyyn värähtelyn tunnuslukuun. Norjan standardin perusteena on yhteensä yli 1 400 vertailuarvoa. Tutkimuksen (Klæboe et al. 2003) mukaan ihmisen herkkyyden ei ole todettu riippuvan tärinälähteestä (auto, juna, metro, raitiovaunu). Iällä, sukupuolella, sosiaalisella asemalla tai asuinalueella ei myöskään havaittu olevan oleellista merkitystä.

Taulukon 2 luokituksessa on käytetty pohjana liikennemelulle käytettyjä häiritsevyysskri-teereitä. Tällöin lähteen Turunen-Rise et al. (2003) mukaan värähtelyluokassa C 7–8 % asukkaista voi pitää häiriötä erittäin häiritsevänä ja noin 15 %:n voidaan olettaa valittavan häiriöstä (kuva 4). Luokan D ylärajalla 10 % asukkaista pitää tärinää erittäin häiritsevänä ja noin 25 %:n voidaan odottaa valittavan häiriöstä. Luokan B asunnot ovat värähtelytek-nisesti suhteellisen hyviä, mutta edelleen muutamat valitukset ovat mahdollisia. Luokan A asunnoissa asukkaat eivät yleensä havaitse liikenteestä aiheutuvaa tärinää.

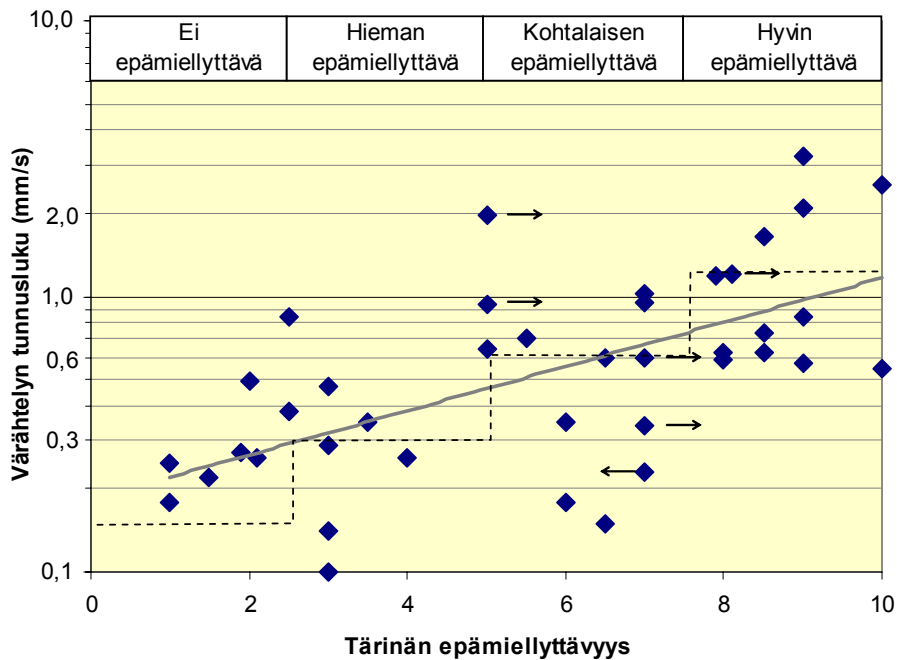
Kuvassa 5 on yhteenveto Suomen tuloksista. VTT Tiedotteessa 2278 (Talja 2004) esi-tettyyn kuvaan on lisätty tässä julkaisussa esitetyistä uusista mittauskohteista saadut tulokset. Kaikissa kuvassa esitetyissä kohteissa asukkaat ovat havainneet tärinän. Yh-teensä 40 kohteesta saadut tulokset tukevat taulukossa 2 esitettyä suositusta. Kaikissa niissä kohteissa, joissa tärinä on koettu hyvin epämiellyttäväksi, värähtelyn tunnusluku on vähintään 0,6 mm/s. Toisaalta niissä kohteissa, joissa tärinä on koettu enintään hieman epämiellyttäväksi, ainoastaan yhdessä kohteessa värähtelyn tunnusluku on suurempi kuin 0,6 mm/s. Kuva vahvistaa käsityksen, että eri ihmiset kokevat saman tärinän eri tavoin ja että tärinään voi tottua tai sille voi myös herkistyä. Samansuuruisen tärinän häiriöksi kokeminen voi vaihdella jopa viisi yksikköä 10-portaisella asteikolla.

Liikennetärinälle esitetty luokitus on sopusoinnussa niiden suositusten kanssa, jotka on annettu ihmisten liikkeistä (Talja & Toratti 2002) ja pesukoneista (Kolari & Talja 2003) aiheutuvalle tärinälle. Suositus naapureiden liikkeistä aiheutuvalle tärinälle vastaa vä-rähtelyluokkaa D ja naapurin pesukoneesta aiheutuvalle tärinälle luokkaa C. Mikäli vä-rähtelyn aiheuttaja on omassa huoneistossa, suositus on yhtä värähtelyluokkaa alhaisempi.

Taulukossa 2 esitetyt raja-arvot ovat samat yö- ja päiväaikaan tapahtuvalle liikennetä-rinälle. Koska tärinähaitta on suurimmillaan lepoaikaan, päivällä suositus voisi olla yhtä värähtelyluokkaa alhaisempi. Koska Suomessa ei käytetä yleisesti yöajan liikennöintira-joituksia, erottelua ei ole toistaiseksi pidetty tarpeellisena. Poiketen liikennemelun yh-teydessä käytetystä melutason vuorokaudenajasta riippuvasta ekvivalenttiarvosta liiken-teestä aiheutuvan tärinän, kuten myös liikenteestä aiheutuvan runkomelun, määrää yk-sittäisten liikennevälineiden aiheuttama maksimiarvo.



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



Kuva 5. Mitatun värähtelyn $v_{w,95}$ ja asukkaan kokeman tärinän häiritsevyyden riippuvuus VTT:n tulosten mukaan. Oikealle osoittavat nuolet esittävät tapauksia, joissa asukas sanoo tottuneensa tärinään, ja vasemmalle osoittavan nuolen tapauksessa asukas sanoo aikaisemmin herkistyneensä tärinälle.

3. Rakennuksen tärinän arviointitasot

Tärinän arviointi voidaan tehdä kolmella eri tasolla (Törnqvist & Talja 2006). Arviointitaso 1 perustuu kokemusperäiseen turvaetäisyyteen, jota kauempana tarkempaa värähtelytarkastelua ei pidetä tarpeellisena. Arviointitaso 2 perustuu yleensä maaperän tärinän laskennalliseen arvioon, ja siinä liikenne ja maaperän ominaisuudet voidaan ottaa tarkemmin huomioon. Arviointitaso 3 edellyttää rakennuspaikalta tehtäviä värähtelymittauksia. Valittava arviointitaso riippuu tilanteesta ja halutusta tarkkuudesta.

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

3.1 Arviointitaso 1

Arviointitason 1 tarkastelulla selvitetään, onko tarkempi värähtelytarkastelu tarpeen. Arvioinnissa suositellaan käytettäväksi taulukossa 3 esitettyjä turvaetäisyyksiä. Arviossa tarvitaan lähtötietona vain arvio liikennetyypistä ja väylän alla esiintyvistä pehmeimmistä maalajityypistä. Liikennetyypin arvioinnissa on pyrittävä ennakoimaan myös tulevaisuuden muutostarpeita.

Kauimmaksi liikennetärinän vaikutusalue ulottuu hienorakeisissa, hyvin pehmeissä ja pehmeissä kivennäismaalajeissa (runsaasti vettä sisältävät savet ja siltit) sekä pehmeissä eloperäisissä maalajeissa (turve ja lieju). Pienin liikennetärinän vaikutusalue on kovissa karkearakenteisissa kivennäismaalajeissa (hiekkä ja sora), moreenimaalajeissa (siltimoreeni, hiekkamoreeni ja soramoreeni) sekä kalliossa.

Taulukon 3 etäisyydet perustuvat kirjallisuudesta ja värähtelymittauksista saatuun kokemukseen. Taulukon perusteena on värähtelyluokka C. Turvaetäisyytenä voidaan käyttää puolta taulukossa esitetyistä arvoista, mikäli maaperän värähtelyn ei arvioida vahvistuvan voimakkaasti rungon tai lattian resonanssi-ilmiön vuoksi. Tällaisia tapauksia ovat mm.

- pehmeälle maalle rakennetut 1-kerroksiset tai vähintään 5-kerroksiset talot
- kovalle maalle rakennetut yksikerroksiset talot, joiden lattia on maanvarainen.

Taulukko 3. Arvio turvaetäisyydestä, jota kauempana tarkempi värähtelyselvitys ei uusilla asuinalueilla ole tarpeen.

Turvaetäisyys	Liikennetyyppi	Pehmein maalaji väylän alla
500 m	Tavarajunaliikenne (3 500 tn, 90 km/h)	Pehmeä maa
200 m	Pikajunaliikenne (140 km/h)	Pehmeä maa
100 m	Tavara- ja pikajunat	Kova maa
100 m	Metro- ja sähkömoottorijunat (80 km/h)	Pehmeä maa
100 m	Raskas maantieliikenne (100 km/h, sileä)	Pehmeä maa
100 m	Hidastetöyssyt, raskas liikenne (40 km/h)	Pehmeä maa
50 m	Raskas katuliikenne (40 km/h, sileä)	Pehmeä maa
15 m ^{*)}	Raskas maantie- ja katuliikenne (ml. töyssyt)	Kova maa

^{*)} Ei koske väyliä, joilla on vain tilapäisesti raskasta liikennettä.

Arviointitasoa 1 suositellaan käytettäväksi maakuntakaavatasolla ja yleiskaavatasolla, kun rakentamista ohjataan yleispiirteisillä aluevarauksilla. Käsittelyssä otetaan huomioon mm. rakennusalueiden etäisyys väylään nähden ja rakennusalueiden käyttötarkoitus (esim. teollisuusalue, asuinalue, liikealue).

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

3.2 Arviointitaso 2

VTT:n julkaisussa Törnqvist ja Talja (2006) esitetään myös arviointitaso 2, joka perustuu laskentakaavoihin perustuvaan asiantuntija-arvioon. Tämän tutkimuksen perusteella laskentakaavoihin perustuva arvio voi olla useissa tapauksissa epäluotettava, koska laskentakaavoilla ei pystytä arvioimaan riittävän luotettavasti maaperän vaakavärähtelyä. Arviointitaso 1 soveltuu siten käytettäväksi vain, mikäli maaperän värähtelyn ei arvioida vahvistuvan voimakkaasti rungon tai lattian resonanssi-ilmiön vuoksi. Näitä tapauk-

sia ovat pehmeälle maalle rakennetut 1-kerroksiset tai vähintään 5-kerroksiset talot tai kovalle maalle rakennetut yksikerroksiset talot, joiden lattia on maanvarainen. Juna- tai tieliikenteen aiheuttamaa maaperän värähtelyä voidaan arvioida esimerkiksi VTT:n julkaisun Törnqvist ja Talja (2006) liitteiden C ja D avulla. Asuintiloissa esiintyvä värähtely arvioidaan kertomalla laskettu maaperän värähtelyn tehollisarvo kertoimella 1,5.

Vaikka laskennallinen arviointi on epätarkka, laskentamallit antavat hyvän käsityksen värähtelyn suuruuteen vaikuttavista tekijöistä. Tarkastelussa voidaan ottaa huomioon liikenteen paino, nopeus, väylän ominaisuudet ja maaperäolosuhteet. Tällä hetkellä kassinlaskentamenetelmiä on esitetty sekä junaliikenteen aiheuttamalle tärinälle että hidastetöyssyjen aiheuttamalle tärinälle. Arviointimenetelmä perustuu homogeeniseen maaperään, joten tulosten luotettavuus suositellaan tarkistettavaksi alueelta pistokokein tehtävin mittauksin. Arviointitaso 2 tarkastelun apuna voidaan käyttää kyselytutkimusta. Kyselytutkimuksella selvitetään eri etäisyydellä sijaitsevilla taloissa asuvien ihmisten mielipiteet tärinän ilmenemisestä ja häiritsevyydestä. Kyselytutkimus voidaan suorittaa esimerkiksi käyttäen VTT Tiedotteen 2278 (Talja 2004) liitteessä D esitettyä lomaketta.

Arviointitasoa 2 voidaan käyttää, kun yleiskaavassa tai asemakaavassa rakentamista ohjataan yksityiskohtaisesti tietyllä alueella ja arviointitaso 1 perusteella alue on riskialuetta. Arviointitasoa 2 voidaan käyttää myös liikenneväylien ympäristövaikutusten arvioinnissa. Ratapihat, terminaalialueet yms. tulee kuitenkin tarkastella erikseen.

3.3 Arviointitaso 3

Arviointitaso 3 perustuu maaperän tärinämittauksiin ja tässä julkaisussa esitettyyn rakennuksen tärinän arviointimenetelmään. Arviointitaso 2 laskennallisiin menetelmiin sisältyy usein niin suuria epävarmuuksia, että tärinämittauksiin perustuvan arviointitaso 3 käyttö on usein perusteltua.

Arviointitaso 3 käyttöä suositellaan ainakin niissä kohteissa, joissa maaperän värähtelyn voidaan arvioida vahvistuvan voimakkaasti rungon tai lattian resonanssi-ilmion vuoksi. Tässä arviointimenetelmässä otetaan huomioon mahdollinen maaperän vaakavärähtelyn aiheuttama rungon resonanssi ja maaperän pystyvärähtelyn aiheuttama lattian resonanssi. Arviointi tulee kysymykseen myös, mikäli arviointitaso 2 laskennallisella tarkastelulla ei uskota saatavan riittävän luotettavaa kuvaa maaperän pystyvärähtelyn suuruudesta tai halutaan rakentaa alueelle, jolla arviointitaso 2 mukaan tärinä saattaa ylittää sille asetetun suositusarvon.

4. Rakennukseen siirtyvän värähtelyn arviointi

4.1 Rakennuksen värähtelyä vaikuttavia tekijöitä

Kun maaperän värähtely siirtyy maasta perustukseen ja edelleen rakennuksen runkoon tai lattiaan, värähtelyn suuruuden lisäksi muuttuu myös sen taajuussisältö. Kuvassa 6 on esimerkkinä maasta, perustuksesta ja toisen kerroksen lattiatasolta mitattu pientalon vaakavärähtely, kun rakennus on perustettu hiekka- tai savimaalle.

Maasta perustukseen siirtyvän värähtelyn suuruuteen vaikuttavat

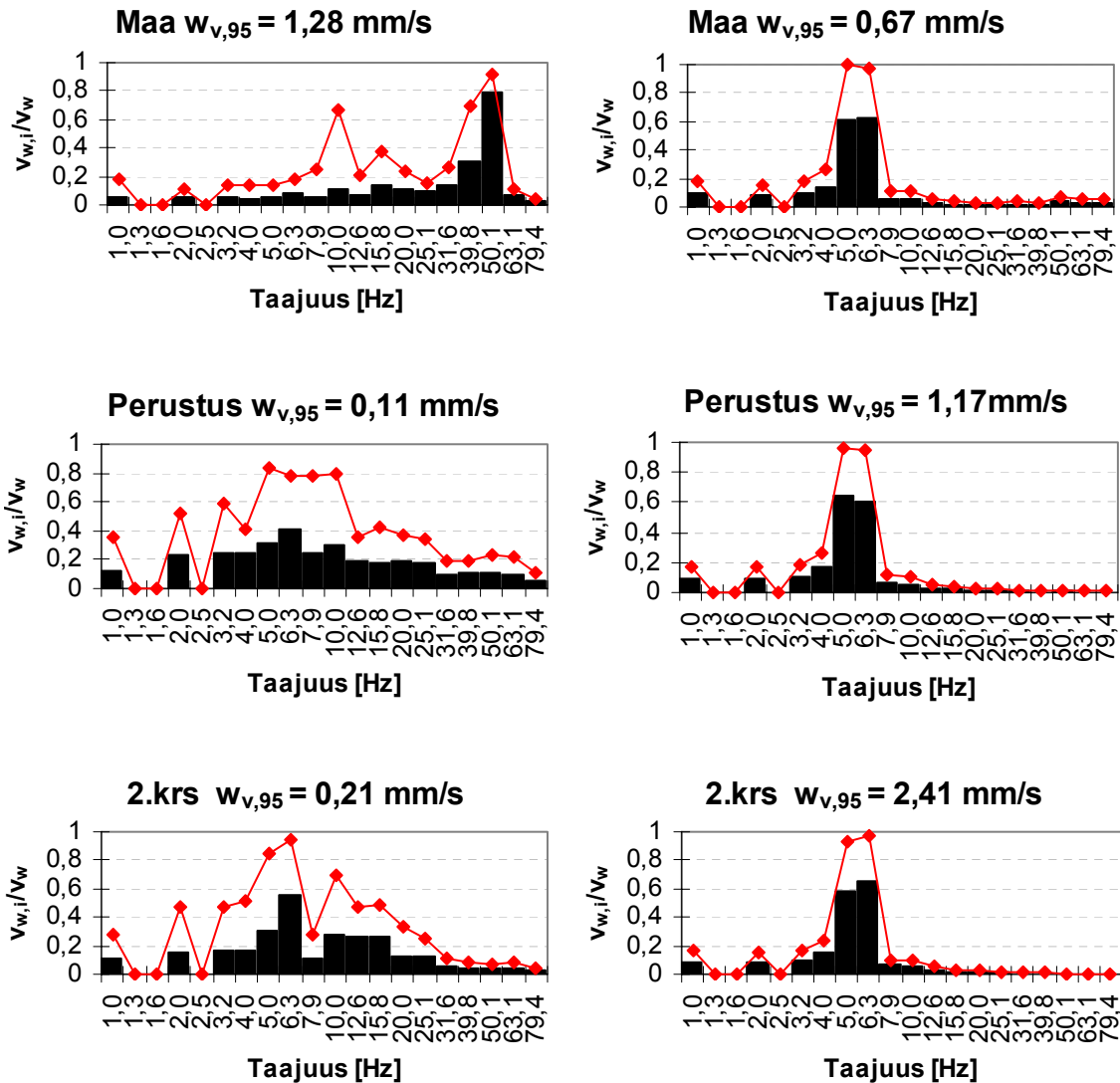
- maaperän värähtelyn suuruus, suunta ja taajuussisältö (herätevärähtely)
- rakennuksen vaakadimensiot
- perustamistapa
- perustuksen jäykkyys
- rakennuksen massa.

Perustuksesta rakennukseen siirtyvän värähtelyn suuruuteen vaikuttavat

- perustuksen värähtelyn suuruus, suunta ja taajuussisältö (herätevärähtely)
- rungon ja lattian dynaamiset ominaisuudet.

Rungon ja lattian dynaamisiin ominaisuuksiin vaikuttavat taas massa, jäykkyys ja vaimennus. Massa ja jäykkyys vaikuttavat rungon ja lattian värähtelyn ominaistaajuuteen. Pahin tilanne on siinä tapauksessa, että herätevärähtely sattuu rungon tai lattian alimman ominaistaajuuden alueelle, jolloin resonanssi-ilmiö kasvattaa voimakkaasti herätevärähtelyä. Koska resonanssi-ilmiö vahvistaa voimakkaasti vain sitä taajuuskomponenttia, joka sattuu ominaistaajuuden alueelle, resonanssin ilmeneminen voi olla satunnaista, mutta ilmetessään resonanssin merkitys on hyvin suuri. Esimerkiksi kuvaa 6 tarkastelemalla on helposti ymmärrettävissä, että pientaloissa vaakavärähtelyn voimistuminen voi savimaan tapauksessa olla merkittävästi voimakkaampaa kuin hiekkamaan tapauksessa.

Rakennuksen värähtelyyn vaikuttavia tekijöitä kuvataan tarkemmin liitteessä B.



Kuva 6. Esimerkki maasta, perustuksesta ja toisen kerroksen lattiatasosta mitatusta vaakavärähtelyn tunnusluvusta ja värähtelyn taajuussisällöstä. Vasen kuvasarja esittää hiekkamaalle maanvaraisesti rakennettua pientaloa ja oikea kuvasarja savimaalle paa-luille perustettua pientaloa. Pylväät kuvaavat mittaustulosten keskiarvoa ja viiva maksimi-arvoa.

4.2 Arvioinnin yleisperiaate

Arviointi perustuu maaperän mitatusta värähtelystä määritettyyn värähtelyn tunnuslu-kuun ja sitä vastaavaan värähtelyn taajuussisältöön. Siten voidaan ottaa huomioon vä-rähtelyn eritaajuuksisten komponenttien erilainen siirtyminen perustukseen ja edelleen rakennuksen runkoon ja lattioihin. Taajuussisällön huomioivan tarkastelun etuna on paremman tarkkuuden lisäksi se, että rakennesuunnittelussa on mahdollista estää rungon ja lattian resonanssivärähtelyn syntyminen.

Asunnossa esiintyvän värähtelyn arviointi perustuu kahteen eri lähestymistapaan, joista toisessa otetaan huomioon rungon ja lattian alimman ominaistaajuudella esiintyvän maaperän värähtelyn voimistuminen resonanssin vuoksi ja toisessa otetaan huomioon maaperän värähtelyn koko taajuusalueen kattava yleinen voimistuminen. Tasaiselle voimistumiselle esitetty värähtelyn suurenuskerroin on huomattavasti pienempi kuin resonanssin vuoksi tapahtuvalle värähtelyn voimistumiselle esitetty kerroin. Suunniteluarvona käytetään lasketuista värähtelyarvoista suurempaa.

Laskentamallin pitämiseksi mahdollisimman yksinkertaisena mallissa otetaan huomioon vain rungon ja lattian alin ominaisvärähtelymuoto, jonka resonanssia pidetään yleisesti pahimpana. Rakennuksen rungon resonanssin oletetaan syntyvän vain maaperän vaakavärähtelystä ja lattian resonanssin oletetaan syntyvän vain maaperän pystyvärähtelystä. Alin ominaismuoto muistuttaa lattiassa yksinkertaisesti tuetun palkin taipumamuotoa ja rungossa ulokepalkin taipumamuotoa, kun taipuma aiheutuu palkin omasta painosta. Koska samassakin rakennuksessa jäykistävien seinätasojen leikkausjäykkyys vaihtelee, rakennuksen eri pystypoikkileikkauksissa arvioitu rungon alin ominaistaajuus voi vaihdella, mikä on otettava huomioon, kun suunnittelussa tarvittavaa ominaistaajuutta arvioidaan laskemalla tai mittauksin.

Koska värähtelyn korkeat taajuuskomponentit siirtyvät huomattavasti huonommin rakennukseen kuin matalat taajuuskomponentit, esitetty arviointimenetelmä on yleensä edullinen kovan maaperän kohteilla edellyttäen, että lattiat suunnitellaan siten, että niiden alin ominaistaajuus ei satu maaperän pystyvärähtelyn dominoivalle taajuusalueelle. Toisaalta arviointi on usein epäedullinen pehmeän maaperän pien- ja pienkerrostalokohteilla siinä tapauksessa, että maaperän vaakavärähtelyt ovat suuret, ellei runkoa erikseen suunnitella siten, että rungon ominaistaajuus ei satu maaperän dominoivalle taajuusalueelle.

4.3 Maaperän värähtelyn ja sen taajuussisällön määrittäminen

Rakennuksen rungon ja lattian värähtelysuunnittelussa tarvitaan mitattu maaperän värähtelyn tunnusluku ja sitä vastaava värähtelyn taajuussisältö sekä vaak- että pystysuunnassa. Värähtely mitataan ainakin väylää lähinnä olevan julkisivun linjalta. Jos rakennus on pitkä tai pohjasuhteet vaihtelevat merkittävästi, värähtely tulisi mitata rakennuksen molemmista päistä. Koordinaatisto suositellaan valittavaksi siten, että x on rakennuksen pituussuunta (harjan suunta), y on rakennuksen poikittaissuunta ja z on pystysuunta.

Värähtelyn tunnusluku eri suunnissa ja tunnuslukua vastaava keskimääräinen värähtelyn taajuussisältö 1/3-oktaavikaistoittain määritetään kohdan 2.1 mukaan. Tunnusluku perustuu viikon tarkastelujaksoon ja sen aikana viiteentoista suurimmat värähtelyt sisältä-

neeseen signaaliin. Tarkastelujakso tulee määrittää siten, että se sisältää myös viikkoa harvemmin toistuvan säännöllisen kuljetuksen, mikäli kuljetus voidaan perustellusti olettaa erityisen häiritseväksi. Mittaukset tehdään pääsääntöisesti sulan maan aikaan, mutta varmistusmittauksia voidaan tehdä myös talvella syvän roudan aikaan.

Mittausraporteissa tulee esittää maaperäolosuhteet väylän ja rakennuksen alla sekä rakennuksen lähialueella (esimerkiksi geokartta ml. mahdollinen routatilanne) sekä väylän tyyppi, perustamistapa ja kunto. Lisäksi tulee esittää niiden liikennevälineiden yksityiskohtaiset tiedot, joiden perusteella värähtelyn tunnusluku on määritetty (tapahtuma-aika ja värähtelyn suuruus referenssipisteessä; junaliikenteessä lisäksi junan numero, junan kokonaispaino, junan pituus, veturin tyyppi, suurimman vaunun paino, junan nopeus ja kulkusuunta; tieliikenteessä lisäksi ajoneuvotyyppi, nopeus ja kulkusuunta). Jos tarkastelujakson aikana kulkee erilaista kalustoa, mittaustulokset suositellaan analysoitavaksi erikseen kalustotyypeittäin (esim. tavarajunat lastattuna, tavarajunat tyhjinä, pikajunat, IC-junat, Pendolinot, lähijunat).

Kun raportointi on tehty huolella, tuloksia voidaan hyödyntää myöhemmin referenssinä uuden väylän tai uuden asuntoalueen suunnittelussa. Tällaisessa tarkastelussa ympäröivän maaperän (mm. lujuus ja jäykkyys, paksuus, kerroksellisuus, pohjaveden korkeus), liikenteen, väylän tyyppin ja väylän perustamisen tulisi olla mahdollisimman identtistä.

4.4 Perustuksen värähtelyn arviointi

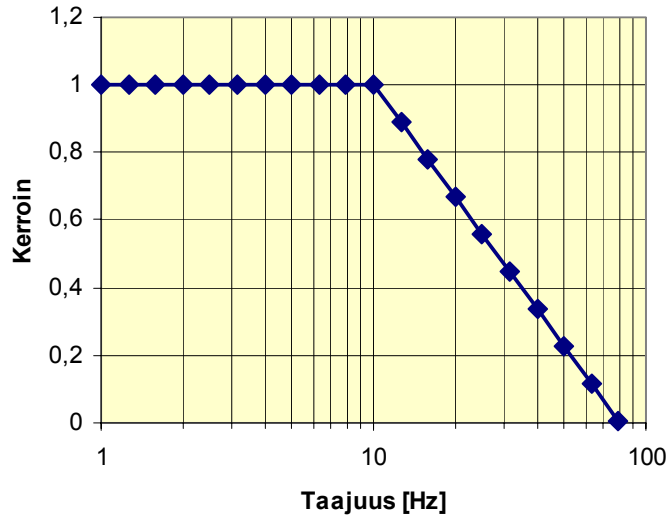
Perustuksen vaaka- ja pystysuuntaiset värähtelykomponentit arvioidaan kertomalla mitattu, kuvan 3 esimerkin mukainen värähtelyn taajuussisältö $\bar{v}_{w,i}^{maa} = v_{w,i} / v_w$ taajuuskais-toittain kertoimella

$$k_i^{per} = -\frac{A}{\lg 8} \cdot \lg\left(\frac{f_i}{80}\right), \text{ mutta kuitenkin } 0 \leq k_i^{per} \leq A. \quad (4)$$

Tekijä f_i on tarkasteltavana olevan 1/3-oktaavikaistan keskitaajuus. Tekijän A arvo on kaikissa tapauksissa $A = 1,0$. Kerroin k_i^{per} esitetään graafisesti kuvassa 7. Käytännössä suuretkin taajuudet voivat siirtyä jossain määrin rakennukseen, mutta silloin ne ilmenevät enemmän runkoääninä kuin kehon kokemana tärinänä. Kerroin vastaa suuruusluokaltaan liitteen B kuvissa 7 ja 8 pientaloille esitettyjä tuloksia, mutta on huomattavasti suurempi kuin betonirunkoisille kerrostaloille liitteen B kuvassa 8 esitetään. Tämän julkaisun kohdan 5.3 perusteella pienemmän kertoimen käytölle ei toistaiseksi ole perusteita.

Perustuksen värähtelyn tunnusluvut x, y ja z -suunnissa lasketaan maasta mitatun sa-
mansuuntaisen värähtelyn tunnusluvun avulla lausekkeesta

$$v_{w,95}^{per} = v_{w,95}^{maa} \cdot \bar{v}_{w,95}^{per}, \text{ jossa } \bar{v}_{w,95}^{per} = \sqrt{\sum_i (k_i^{per} \cdot \bar{v}_{w,i}^{maa})^2}. \quad (5)$$



Kuva 7. Perustuksen värähtelyn arvioimisessa käytetty maaperän värähtelyn pienennyskerroin.

4.5 Rungon värähtelyn arviointi

Värähtelyn yleiseen voimistumiseen perustuva rungon vaakavärähtely lasketaan suurimman perustuksen värähtelyn tunnusluvun avulla lausekkeesta

$$v_{w1}^{runko} = k_1^{runko} \cdot \max(v_{w,95}^{per,x}, v_{w,95}^{per,y}, v_{w,95}^{per,z}), \quad (6)$$

missä kerroin

- $k_1^{runko} = 1,5$ kaikille kaksi- tai useampikerroksisille rakennuksille ja yksikerroksisille paaluille perustetuille rakennuksille
- $k_1^{runko} = 1,0$ yksikerroksisille rakennuksille, kun perustus ei ole paaluilla.

Kaksi tai useampikerroksisille rakennuksille tehdään lisäksi rungon resonanssitarkastelu. Vaakavärähtely perustuu siihen suurimpaan, x tai y -suuntaiseen, 1/3-oktaavikaistan värähtelykomponenttiin $v_{w,j}^{per,x/y}$, jolle rungon ominaistaajuus sattuu. Vaakavärähtely lasketaan lausekkeesta

$$v_{w2}^{runko} = k_2^{runko} \cdot v_{w,j}^{per,x/y}, \quad (7)$$

missä kerroin $k_2^{runko} = 4,0$. Ellei tarkemmin ole tiedossa, rungon alimman ominaistajuuden arvioidaan sattuvan taulukossa 4 esitetyle taajuusalueelle. Taulukko perustuu liitteen B kuvassa 14 esitettyyn tausta-aineistoon.

Vertailussa käytettävä värähtelyn tunnusluku $v_{w,95}^{runko}$ on suurin arvoista v_{w1}^{runko} ja v_{w2}^{runko} .

Taulukko 4. Arvio siitä taajuusalueesta, jolle rakennuksen rungon ominaistajuuden arvioidaan sattuvan.

Kerrosten lukumäärä	1/3-oktaavikaistan keskitajuus									
	1,6	2	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5
1½–2						X	X	X	X	
3				X	X	X	X			
4			X	X	X	X				
5		X	X	X	X					
6–7	X	X	X	X						
8	X	X	X							
9–10	X	X								

4.6 Lattian värähtelyn arviointi

Värähtelyn yleiseen voimistumiseen perustuva lattian vaakavärähtely arvioidaan perustuksen pystyvärähtelyn tunnusluvun avulla lausekkeesta

$$v_{w1}^{lattia} = k_1^{lattia} \cdot v_{w,95}^{per,z}, \quad (8)$$

missä kerroin $k_1^{lattia} = 1,5$.

Lisäksi lattialle tehdään resonanssitarkastelu, jossa lattian pystyvärähtely perustuu siihen suurimpaan z-suuntaiseen 1/3-oktaavikaistan värähtelykomponenttiin $v_{w,j}^{per}$, jolle lattian ominaistajuus sattuu. Pystyvärähtely lasketaan lausekkeesta

$$v_{w2}^{lattia} = k_2^{lattia} \cdot v_{w,j}^{per,z}, \quad (9)$$

missä kerroin $k_2^{lattia} = 6,0$. Lattian ominaistajuus arvioidaan liitteen B kohdassa 2.4 esitettyjen lausekkeiden avulla. Ominaisajuuteen liittyvän laskentaepätarkkuuden

vuoksi suunnittelussa tulee olettaa, että ominaistaajuus voi sattua myös lasketun taajuuskaistan viereisille 1/3-oktaavikaistoille.

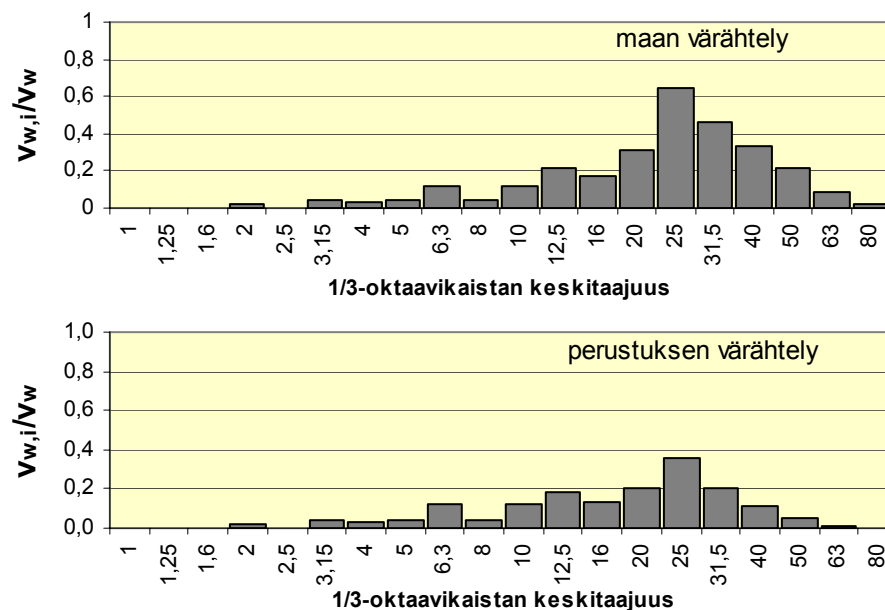
Vertailussa käytävä värähtelyn tunnusluku $v_{w,95}^{lattia}$ on suurin arvoista v_{w1}^{lattia} ja v_{w2}^{lattia} .

4.7 Arviointiesimerkit

Seuraavat esimerkit havainnollistavat, miten maaperän värähtelyn dominoiva taajuus ja dominoivan taajuusalueen leveys vaikuttavat kaksikerroksisen talon rungon ja lattian värähtelyyn.

4.7.1 Herätetaajuus korkea ja värähtely laajakaistainen

Maaperästä mitatun värähtelyn tunnusluku $v_{w,95}^{maa} = 0,3$ mm/s ja sitä vastaava värähtelyn taajuussisältö on kuvan 8 yläkuvan mukainen. Kuvan 8 alakuvassa esitetään lausekkeen (4) avulla arvioitu perustukseen siirtyvän värähtelyn taajuussisältö. Lausekkeen (5) avulla saadaan perustuksen värähtelyn tunnusluvuksi $v_{w,95}^{per} = 0,3 \cdot 0,56 = 0,17$ mm/s. Lausekkeen (6) perusteella $v_{w1}^{runko} = 1,5 \cdot 0,17 = 0,25$ mm/s.



Kuva 8. Esimerkki laajakaistaisen värähtelyn taajuussisällöstä (yläkuva) ja sen perusteella arvioitu perustuksen värähtelyn taajuussisältö (alakuva).

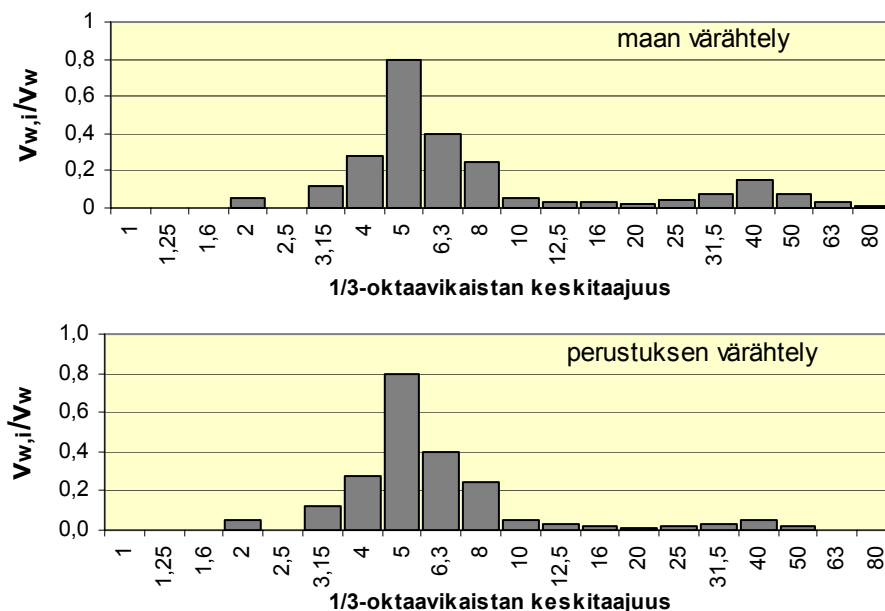
Rungon tarkastelussa oletetaan, että mitattu värähtely on rakennuksen kohdalta mitattu vaakavärähtely. Taulukon 4 perusteella 2-kerroksisen talon rungon ominaistaajuus voi

sattua 1/3-oktaavikaistoille 5–10 Hz. Kuvan 8 alakuvan perusteella suurin tällä taajuusalueella oleva perustuksen värähtelykomponentti $v_{w,j}^{per,x/y} = 0,12 \cdot 0,3 = 0,036$ mm/s. Lausekkeen (7) perusteella perustuksen värähtelyn tunnusluku $v_{w2}^{runko} = 4,0 \cdot 0,036 = 0,14$ mm/s. Rungon värähtelyn tunnusluvuksi saadaan siis $v_{w,95}^{runko} = 0,25$ mm/s, joka on suurempi arvoista v_{w1}^{runko} ja v_{w2}^{runko} .

Lattian tarkastelussa oletetaan, että mitattu värähtely on rakennuksen kohdalta mitattu pystyvärähtely ja että rakennukseen on suunniteltu lattia, jonka ominaistaajuudeksi on liitteen B kohdan 2.4 mukaan arvioitu 10 Hz. Laskentaepätarkkuuden vuoksi on suunnittelussa varauduttava siihen, että ominaistaajuus voi sattua myös taajuuskaistalle 8 tai 12,5 Hz. Kuvan 8 alakuvan perusteella suurin tällä taajuusalueella oleva perustuksen värähtelykomponentti $v_{w,j}^{per,z} = 0,19 \cdot 0,3 = 0,057$ mm/s. Lausekkeen (8) perusteella $v_{w1}^{lattia} = 1,5 \cdot 0,17 = 0,25$ mm/s ja lausekkeen (9) perusteella $v_{w2}^{lattia} = 6,0 \cdot 0,057 = 0,34$ mm/s. Lattian värähtelyn tunnusluvuksi saadaan siis $v_{w,95}^{runko} = 0,34$ mm/s, joka on suurempi arvoista v_{w1}^{lattia} ja v_{w2}^{lattia} .

4.7.2 Herätetaajuus matala ja värähtely kapeakaistainen

Maaperästä mitatun värähtelyn tunnusluku $v_{w,95}^{maa} = 0,3$ mm/s ja sitä vastaava värähtelyn taajuussisältö on kuvan 9 yläkuvan mukainen. Kuvan 9 alakuvassa esitetään lausekkeen (4) avulla arvioitu perustukseen siirtyvän värähtelyn taajuussisältö. Lausekkeen (5) avulla saadaan perustuksen värähtelyn tunnusluvuksi $v_{w,95}^{per} = 0,3 \cdot 0,98 = 0,29$ mm/s.



Kuva 9. Esimerkki kapeakaistaisen värähtelyn taajuussisällöstä (yläkuva) ja sen perusteella arvioitu perustuksen värähtelyn taajuussisältö (alakuva).

Rungon tarkastelussa oletetaan, että mitattu värähtely on rakennuksen kohdalta mitattu vaakavärähtely. Lausekkeen (6) perusteella $v_{w1}^{runko} = 1,5 \cdot 0,29 = 0,44$ mm/s. Taulukon 4 perusteella rungon ominaistaajuus voi sattuua 1/3-oktaavikaistoille 5–10 Hz. Kuvan 9 alakuvan perusteella suurin tällä taajuusalueella oleva perustuksen värähtelykomponentti $v_{w,j}^{per,x/y} = 0,80 \cdot 0,3 = 0,24$ mm/s. Lausekkeen (7) perusteella perustuksen värähtelyn tunnusluku $v_{w2}^{runko} = 4,0 \cdot 0,24 = 0,96$ mm/s. Rungon värähtelyn tunnusluvuksi saadaan siis $v_{w,95}^{runko} = 0,96$ mm/s, joka on suurempi arvoista v_{w1}^{runko} ja v_{w2}^{runko} .

Lattian tarkastelussa oletetaan, että mitattu värähtely on rakennuksen kohdalta mitattu pystyvärähtely ja että rakennukseen on suunniteltu lattia, jonka ominaistaajuudeksi on liitteen B kohdan 2.4 mukaan arvioitu 10 Hz. Laskentaepätarkkuuden vuoksi on suunnittelussa varauduttava siihen, että ominaistaajuus voi sattuua myös taajuuskaistalle 8 tai 12,5 Hz. Kuvan 9 alakuvan perusteella suurin tällä taajuusalueella oleva perustuksen värähtelykomponentti $v_{w,j}^{per,z} = 0,25 \cdot 0,3 = 0,075$ mm/s. Lausekkeen (8) perusteella $v_{w1}^{lattia} = 1,5 \cdot 0,29 = 0,44$ mm/s ja lausekkeen (9) perusteella $v_{w2}^{lattia} = 6,0 \cdot 0,075 = 0,45$ mm/s. Lattian värähtelyn tunnusluvuksi saadaan siis $v_{w,95}^{runko} = 0,45$ mm/s, joka on suurempi arvoista v_{w1}^{lattia} ja v_{w2}^{lattia} .

5. Vertailu mittaustuloksiin

5.1 Mittauskohteet

Rakennuksen arviointiin vaikuttavien eri tekijöiden selvittämiseksi on tehty värähtelymittauksia kahdessa eri yhteydessä. Tässä tutkimushankkeessa mitattujen, ns. uusien kohteiden, perustiedot esitetään taulukossa 6. Niiden lisäksi on analysoitu aikaisemmissa hankkeissa tehdyt värähtelymittausten, ns. vanhojen kohteiden, tulokset (taulukko 7). Kohteista seitsemän (kohteet 17–23) on vähintään kolmikerroksisia kerrostaloja ja muut 29 ovat yksi- tai kaksikerroksisia omakoti- tai rivitalokohteita. Kaikki kerrostalokohteet ovat saviperäisiltä alueilta. Pientalokohteista seitsemän on hiekka- tai soramaa-alueella ja muut ovat saviperäisiltä alueilta. Tärinä aiheutuu junaliikenteestä 22 kohteessa. Muissa 14 kohteessa tärinä aiheutuu autoliikenteestä lukuun ottamatta yhtä kohdetta, jossa tärinä aiheutuu raitiotieliikenteestä.

Kohteille on annettu taulukon 5 mukaisesti muodostettu tunnus, josta ilmenevät maaperätiedot, maaperän dominoiva taajuusalue, perustamistapa ja rakennuksen kerrosten määrä. Kohdetiedot esitetään tarkemmin liitteessä C.

Taulukko 5. Kohteen tunnuksen muodostuminen. Esimerkiksi tunnus "=== OXX (27)" on mittauskohde nro 27, joka on kaksikerroksinen, savimaalle (dominoiva taajuus 10–15 Hz) paaluille rakennettu talo, jossa on kellarikerros.

Tunnuksen alkuosa Maaperä, sen dominoiva taajuus ja perustus		Tunnuksen loppuosa Rakennuksen kerrosmäärä	
=== savi <10 Hz, paalut - - - savi <10 Hz, ei paaluja		kitkamaa <20 Hz, ei paaluja	X 1-kerroksinen talo XX 2-kerroksinen talo
== savi 10–15 Hz, paalut - - savi 10–15 Hz, ei paaluja		kitkamaa 20–40 Hz, ei paaluja	OX kellarikrs + 1 krs OXXX kellarikrs + 3 krsta
= savi >15 Hz, paalut - savi >15 Hz, ei paaluja		kitkamaa >40 Hz	(27) mittauskohteen nro 27

Taulukoissa esitetty rungon ja välipohjan ominaistajuus on arvioitu vertaamalla rungon vaakavärähtelyn eri taajuuskomponentteja perustuksen värähtelyn vastaaviin taajuuskomponentteihin. Samoin lattian ominaistajuus on arvioitu vertaamalla lattian keski-alueen pystyvärähtelyn taajuuskomponentteja lattian reuna-alueen pystyvärähtelyn taajuuskomponentteihin. Ominaisajuuden on arvioitu olevan sillä taajuusalueella, missä värähtelyn taajuuskomponentit vahvistuvat voimakkaimmin. Mittauspisteiden välinen taajuuskomponenttien vertailu esitetään liitteessä D.

Taulukko 6. Uusien mittauskohteiden perustiedot.

Kohteen tunnus	Liikenneväylä ja etäisyys siihen	Kerros määrä/ materiaali, rungon ominaistajuus	Välipohjan materiaali ja ominaistajuus	Perustuksen leveys/pituus ja perustamistapa	Maaperä, sen värähtelyn dominoiva taajuus ja suurimman värähtelyn suunta
=== XX (1)	rata 80 m	2/puu 5 Hz	puu 13 Hz	8/11 teräspaalut	savi 3–5 m, 5–6 Hz (y)
=== XX (2)	rata 105 m	2/bet/puu 6–7 Hz	ont.laatta	10/33 bet.paalut	savi 5–9 m, 6–7 Hz (z)
--- OXX (3)	rata 135 m	2+k/puu 6–7 Hz	puu	11/11 maanvar.	siltti 6–8 m, 4–6 Hz (y)
--- XX (4)	rata 135 m	2/puu 5–6 Hz	puu	9/11 bet.paalut	savi 8–10 m, 4–6 Hz (y)
I XX (5)	rata 14 m	2/puu+tiili	puu	9/21 maanvar.	hiekkä 10–13 m, >50 Hz (x)
III XX (6)	rata 14 m	2/puu	puu	9/12 maanvar.	hiekkä 10–13 m, 2–10 Hz (z)
I X (7)	rata 18 m	1/puu+tiili	-	13/23 maanvar.	hiekkä 10–13 m, >40 Hz (y)
--- OXX (8)	katu 12 m	2+k/siporex 9–10 Hz	puu	12/14 maanvar.	savi 5 m, 8–11 Hz (z)
=== XX (9)	katu 12 m	2/puu+tiili 7–8 Hz	puu	8/12 bet.paalut	savi 4–5 m, 8–11 Hz (z)
--- OXX (10)	katu 8 m	2+k/puu 5–6 Hz	puu	7/8 maanvar.	savi <5 m, 8–11 Hz (z)
-- XX (11)	katu 20 m	1+p/puu+tiili 8–12 Hz	puu (parvi)	10/10 maanvar.	siltti <2 m, 10–20 Hz (y)
-- OXX (12)	katu 13 m	2+k/puu	puu	9/11 maanvar.	savi < 2 m, 10–13 Hz (x)
I OXX (13)	rata 63 m	2+k/puu	puu	12/11 maanvar.	hiekkä >6 m, >40 Hz (y)
I X (14)	rata 29 m	1/tiili	-	13/39 maanvar.	hiekkä >6 m, >40 Hz (x)
II X (15)	rata 31 m	1/puu+tiili	-	14/35 maanvar.	hiekkä >6 m, >30 Hz (y)
=== XXX (16)	rata 36 m	3/bet/3–5 Hz	ontelolaatta 11–13 Hz	10/80 bet.paalut	savi 5 m, 5–6 Hz (y)
=== XXXXX (17)	rata 118 m	5/bet/4–5 Hz	ontelol.	13/23 bet.paalut	savi 3–7 m, 5–6 Hz (y)
=== XXXXX (18)	rata 58 m	5/bet/5 Hz	ontelol.	17/31 bet.paalut	savi 3–5 m, 6–7 Hz (x)
=== XXX (19)	rata 36 m	3/bet/4–5 Hz	ontelol.	10/42 bet.paalut	savi 5 m, 6–7 Hz (y)
I XXX (20)	rata 36 m	3/bet/6 Hz	ontelol.	10/42 maanvar.	savi 1 m, 30–60 Hz (z)
== OXXXX (21)	raitiotie 5 m	4+k	puu 12–16 Hz	85/110 vahv.paal.	siHk 10 m, 10–20 Hz (y)
== OXXXX (22)	katu 15 m	4+k/8 Hz	betoni	14/35	savi 1–3 m, 10–20 Hz

Taulukko 7. Vanhojen mittauskohteiden perustiedot.

Kohteen tunnus	Liikenneväylä ja etäisyys siihen	Kerros määrä/ materiaali, rungon ominaistajuus	Välipohjan materiaali ja ominaistajuus	Perustuksen leveys/pituus ja perustamistapa	Maaperä, perustuksen värähtelyn dominoiva taajuus ja suurimman värähtelyn suunta
== OXXXXXX (23)	katu 6 m	6+k/betoni	puu 8–10 Hz	n. 30/30, vahv.paal.	savi, 10–14 Hz (z)
- - - OXX (24)	rata 31 m	2+k/puu 6–8 Hz	puu 10–12 Hz	9/12 maanvar.	savi, 7–9 Hz (z)
=== XX(25)	katu 4 m	2/puu 5–6 Hz	puu	12/20 puupaalut	savi, 5–11 Hz (z)
=== XX (26)	katu 39 m	2/puu+tiili 6–8 Hz	puu 8–9 Hz	6/10 betonipaalut	savi, 7–10 Hz (y)
- - - OXX (27)	katu 16 m	2+k/puu 8–10 Hz	puu 14–18 Hz	8/9 maanvar.	savi, 6–10 Hz (z)
- - - XX (28)	rata 45 m	2/puu 6–8 Hz	puu 15–20 Hz	9/11 maanvar.	savi, 7–12 Hz (y)
- - - XX (29)	rata 160 m	2/puu 6–7 Hz	puu 9–12 Hz	8/8 maanvar.	savi, 6–7 Hz (z)
- - - XX (30)	rata 23 m	2/puu rinnetalo 7–10 Hz	puubetoniliittolaatta 15–16 Hz	11/16 maanvar.	savi, 7–10 Hz (z)
- - - X (31)	katu 24 m	1/puu+tiili	maanvar.	10/20 maanvar.	savi, 9–11 Hz (z)
- - X (32)	katu 11 m	1/puu	maanvar.	8/15 maanvar.	savi, 10–14 Hz (z)
== XX (33)	katu 9 m	2/bet+puu 11–12 Hz	ont.laatta 15–25 Hz	12/13 bet.paalut	savi, 12–18 Hz (z)
- - XX (34)	rata 50 m	2/puu	puu	ei tiedossa	siltti, 10–14 Hz (x)
XX (35)	rata 18 m	2/betoni rinnetalo 9–11 Hz	ontelolaatta 28–34 Hz	9/13 maanvar.	sora, 20–30 Hz (z)
XX (36)	rata 45 m	2/puu 6–11 Hz	maanvar.	maanvar.	hiekkä, 10–40 Hz (x)

5.2 Mittaustuloksiin vaikuttavat epätarkkuudet

Lähtökohtana on ollut mitata maaperän ja perustuksen värähtely kaikissa kolmessa pääsuunnassa, rakennuksen ylimmästä kerroksesta molemmat vaakakomponentit ja lattiasta värähtelyn pystykomponentti. Koska mittaukset on tehty vain kahdeksalla anturilla, useissa kohteissa on tehty kompromissi ja jätetty joko rungon tai lattian värähtely mitaamatta.

Maaperän värähtely on pyritty mittaamaan 5–8 metrin etäisyydeltä rakennuksesta, jotta rakennuksen vaikutus maaperän värähtelyihin olisi pieni. Mittauspiste on aina pyritty asentamaan väylän puolelle rakennusta ja mahdollisuuksien mukaan samalle etäisyydelle väylästä kuin rakennuskin. Usein mittauspiste on kuitenkin jouduttu sijoittamaan rakennuksen ja väylän väliin, jolloin maan värähtely voi erota rakennuksen kohdalla esiintyvistä värähtelystä etenkin siinä tapauksessa, että rakennus sijaitsee hyvin lähellä väylää. Myös rakennuksen ja maan vuorovaikutus sekä värähtelyn heijastuminen rakennuksen perustuksista voivat vaikuttaa maan värähtelyyn.

Yhdestä pisteestä mitattu maanpinnan värähtely ei kuvaa keskimääräistä rakennusalueen värähtelyä, sillä maakerrosten paksuus ja maalajien ominaisuudet vaihtelevat usein rakennuksen alueella ja mittauspisteen läheisyydessä voi olla rakennuksia tai eri tavoin perustettuja ja päällystettyjä katuja. Vaikutus on sitä suurempi, mitä suurempi on rakennus ja mitä tiheimmin alue on rakennettu. Myös mitatun pisteen lähellä olevat paikalliset häiriöt, kuten puut, piha-aidat, suuret lohkariekat sekä anturien asennustapa voivat aiheuttaa vääristymää mittaustuloksiin. Myös väylän epätasaisuuden sijainti rakennukseen ja maaperän mittauspisteeseen nähden voi aiheuttaa erityisesti maantieliikenteellä epätarkkuutta.

Perustuksesta mitatut värähtelyt on pyritty mittaamaan aina rakennuksen väylän puoleiselta sivulta ja rakennuksen nurkan läheisyydestä. Yhdestä pisteestä mitattu perustuksen värähtely ei kuitenkaan kuvaa hyvin koko perustuksen värähtelyä. Vaikutus on sitä suurempi, mitä suurempi on rakennus. Lisäksi sandwich-rakenteisissa perustuksissa ja palkkielementtiperustuksissa voi esiintyä rakenteen paikallista värähtelyä, jolla voi olla vaikutusta tuloksiin.

Rakennuksen vaakavärähtelyt on aina pyritty mittaamaan ainakin rakennuksen ylimmästä kerroksesta. Yhdestä pisteestä mitattu vaakavärähtely ei kuitenkaan välttämättä kuvaa kerroksen suurinta värähtelyä, sillä värähtelyn suuruuteen vaikuttavat rakennuksen jäykistävien linjojen sijainti ja jäykkyyserot. Mahdollista on myös, että rakennuksessa herää sellaisia ominaismuotoja, joilla suurimmat siirtymät esiintyvät välikerroksissa.

Lattian pystyvärähtely on pyritty mittaamaan aina mahdollisimman läheltä välipohjaelementtien keskikohtaa. Lattian värähtelyyn vaikuttaa kuitenkin välipohjan jäykkyys ja jänneväli. Koska huoneistoissa on usein erilaisia lattioita, mittauspisteen valinta ei siten useinkaan ole pahin mahdollinen. Myös kelluva lattia tai parketti voi aiheuttaa vääristymää mittaustuloksiin.

Valvomattomissa mittauksissa ja joskus myös valvotuissa mittauksissa mitattu värähtely voi aiheutua myös muusta kuin liikenteestä. Maaperän värähtelyä voi aiheuttaa esimerkiksi paikallinen ihmisten tai eläinten liikkuminen mittauspisteen välittömässä lähei-

syydessä. Mittauspisteen lähellä kulkeva autoliikenne voi taas häiritä junaliikenteen tärinämittauksia. Lattioiden pystyvärähtelyn mittausta häiritsee useimmiten asukkaiden liikkeestä tai voimakkaasta ovien sulkemisesta aiheutuva lattian tai rungon värähtely. Vertaamalla samanaikaisesti eri pisteistä mitattua värähtelysignaalia ja liikenteestä saatua kuva-aineistoa voidaan häiriötekijä yleensä havaita. Mikäli kuitenkin häiriötekijä sattuu samanaikaisesti liikennetärinän kanssa tai sen vaikutus on suhteellisen pieni, häiriötekijä voi jäädä huomaamatta.

5.3 Värähtelyn siirtyminen perustuksiin

5.3.1 Pientalot

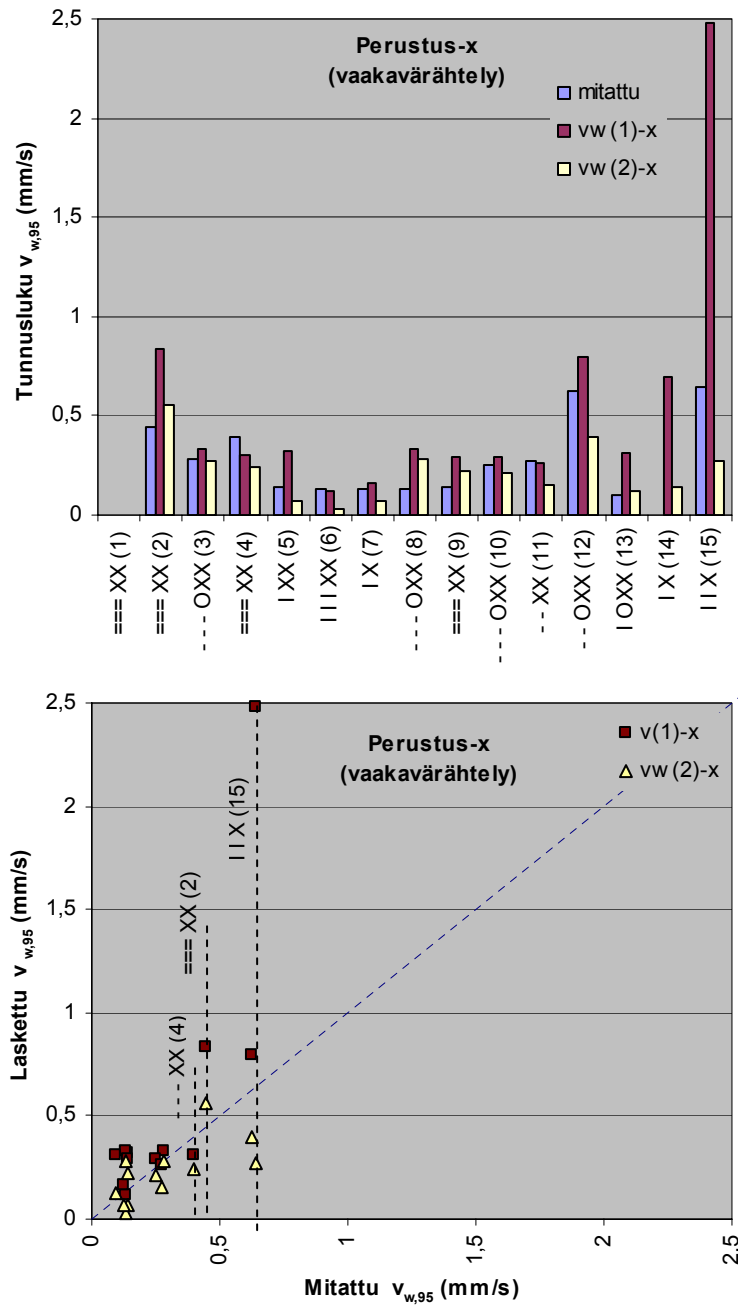
Kuvissa 10–13 verrataan mitatusta maaperän värähtelystä kohdan 4.4 mukaisesti arvioitua perustuksen värähtelyä $v_{w,95}^{per} = vw(1)$ mitattuun arvoon. Kuvissa 10–12 on uusien kohteiden tulokset ja kuvassa 13 vanhojen kohteiden tulokset. Vanhoilla kohteilla vertailu on voitu tehdä vain pystyvärähtelylle, koska maaperän vaakavärähtelyä ei ole mitattu. Kuvissa on esitetty myös arvo $vw(2)$, joka perustuu pelkästään pientalojen mahdollisella rungon ominaistajuusalueella (5–10 Hz, taulukko 4) esiintyvään suurimpaan värähtelykomponenttiin. Kuvista voi puuttua tuloksia, sillä kaikista kohteista ei ole mitattu kaikkia vertailussa tarvittavia suureita. Uusien kohteiden kuvissa 10–12 esitetystä $v_{w,95}^{per} = vw(1)$ -arvojen vertailuista voidaan tehdä seuraavat havainnot:

- Laskettu arvio $vw(1)$ vastaa keskimäärin mitattua arvoa, vaikka hajonta on suurta erityisesti pystyvärähtelyn tapauksessa.
- Vaakavärähtelyä koskeva arvio $vw(1)$ on selvästi epävarmalla puolella kohteilla 1, 4 ja 5. Kohteet 1 ja 4 ovat paaluille perustettuja rakennuksia, joissa esiintyy lisäksi voimakas rungon resonanssi-ilmiö. Tuloksen perusteella on paaluille perustetuille yksikerroksisillekin rakennuksille kohdassa 4.5 suositeltu lattian vaakavärähtelylle arvoa $k_1^{runko} = 1,5$ arvon 1,0 sijaan. Kahdessa muussa paaluille perustetussa kohteessa (kohteet 3 ja 9), joissa rungon resonanssia ei ollut havaittavissa, laskettu arvio on varmalla puolella. Kohde 5 on hiekkamaakohde, jonka maaperässä dominoivat yli 50 Hz:n taajuudet.
- Huomattavasti liian varmalla puolella vaakavärähtelyä koskeva arvio on kohteella 15. Tämä on hiekkamaalle perustettu rivitalokohde, jossa maaperän värähtelyt ovat poikkeuksellisen suuret ja jonka maaperän värähtelyssä dominoivat yli 30 Hz:n taajuudet. Lukuun ottamatta kohdetta 5 myös muilla hiekkamaakohteilla (kohteet 6, 7 ja 13) arvio on luotettavalla puolella.

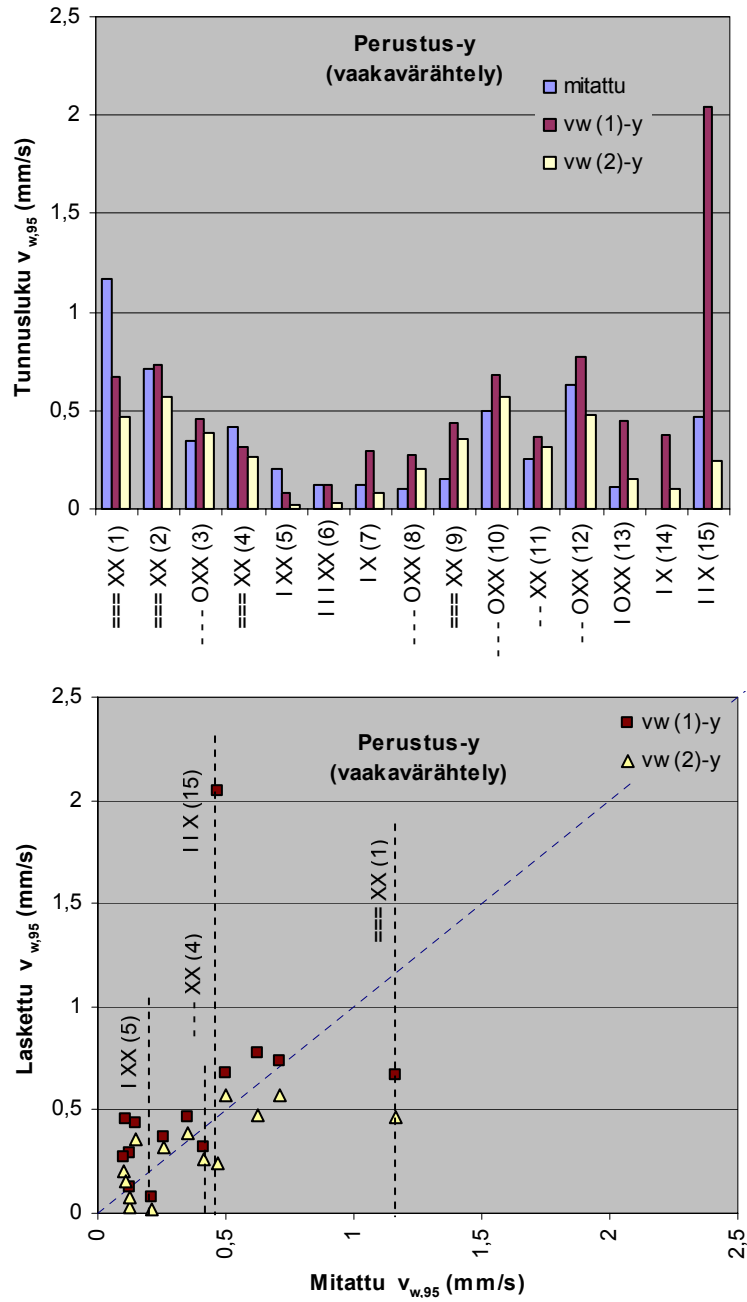
- Pystyvärähtelyä koskeva arvio $v_w(1)$ on erityisen paljon varmalla puolella kohteilla 2 ja 9. Molemmat kohteet ovat paaluille perustettuja kohteita ja erityisesti kohteesta 2 mitatut maaperän pystyvärähtelyt ovat vaakavärähtelyihin nähden poikkeavan suuret. Muissa paaluille perustetuissa kohteissa (kohteet 1 ja 4) erot ovat pienemmät ja tulokset ovat linjassa paaluttamattomien savimaakohteiden (kohteet 3, 8, 10, 11 ja 12) tulosten kanssa.
- Epävarmimmalla puolella pystyvärähtelyä koskeva arvio v_w^R on kohteilla 7, 12 ja 15. Kohteet 7 ja 15 ovat hiekkamaalle perustettuja kohteita, joiden maaperässä dominoivat yli 30 Hz:n taajuudet. Muissa hiekkamaan kohteissa (kohteet 5, 6 ja 13) tulokset vastaavat huomattavasti paremmin toisiaan. Kohteella 12 eroon vaikuttanee se, että maaperän värähtelyn mittauspiste on merkittävästi kauempana rakennuksesta kuin värähtely aiheuttaneesta hidastetöyssystä.
- Vertailemalla esitettyjä $wv-1$ ja $wv-2$ -arvoja nähdään, että rungon ominaistaajuusalueella esiintyvän suurimman värähtelykomponentin osuus värähtelystä on savi- maakohteilla suuri, mutta hiekkamaakohteilla hyvin pieni.

Vanhoille mittauskohteille tehdyssä, kuvassa 13 esitetyssä vertailussa perustuksen pystyvärähtelylle laskettu arvio vastaa paremmin mitattua arvoa ja hajonta on pienempi kuin uusilla kohteilla (kuva 12). Huomattavimmin laskettu arvio $v_w(1)-z$ on mitattua arvoa suurempi paaluille perustetussa kohteessa 26. Muissa paaluille perustetuissa kohteissa 25 ja 33 mitatun ja lasketun arvon ero on kuitenkin suhteellisen pieni.

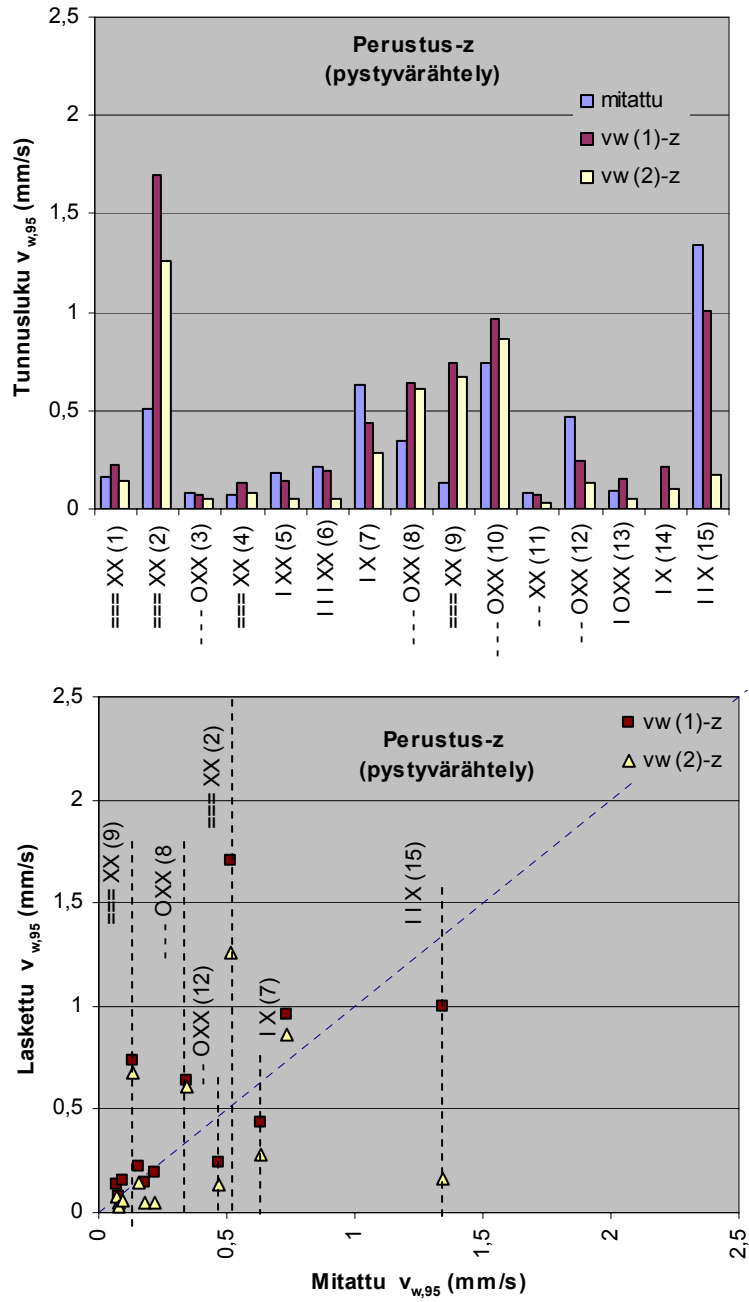
Liitteen D kuvissa 1–4 esitetään värähtelyn taajuussisältöön perustuva vertailu värähtelyn siirtymisestä maaperästä perustukseen. Pientalokohteiden kuvien keskiarvokuvaajien perusteella on selvästi havaittavissa, että suuritaajuuksinen värähtely siirtyy sekä pystyettä vaakasuunnassa matalataajuuksista värähtelyä huonommin perustukseen ja että kuvassa 7 esitetty muoto värähtelyn siirtymisen kuvaajaksi on perusteltu. Tuloksissa näkyy myös rakennuksen ja perustuksen vuorovaikutus. Mikäli rungossa esiintyy voimakas resonanssi (esim. kohteet 1 ja 4), ilmiö näkyy myös perustuksen värähtelyssä.



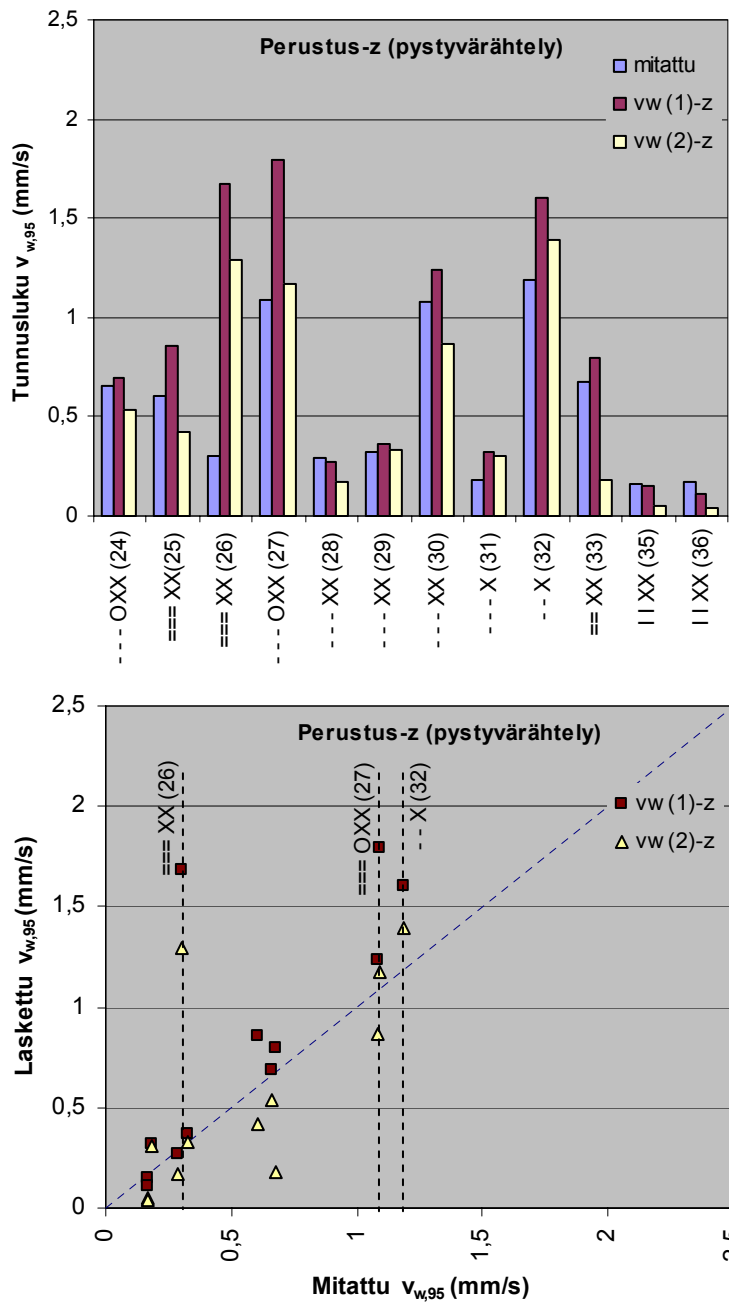
Kuva 10. Maaperän vaakasuuntaisen x -värähtelyn perusteella arvioitu perustuksen värähtely verrattuna mitattuun arvoon (uudet pientalot).



Kuva 11. Maaperän vaakasuuntaisen y -värähtelyn perusteella arvioitu perustuksen värähtely verrattuna mitattuun arvoon (uudet pientalot).



Kuva 12. Maaperän vaakasuuntaisen z-värähtelyn perusteella arvioitu perustuksen värähtely verrattuna mitattuun arvoon (uudet pientalot).



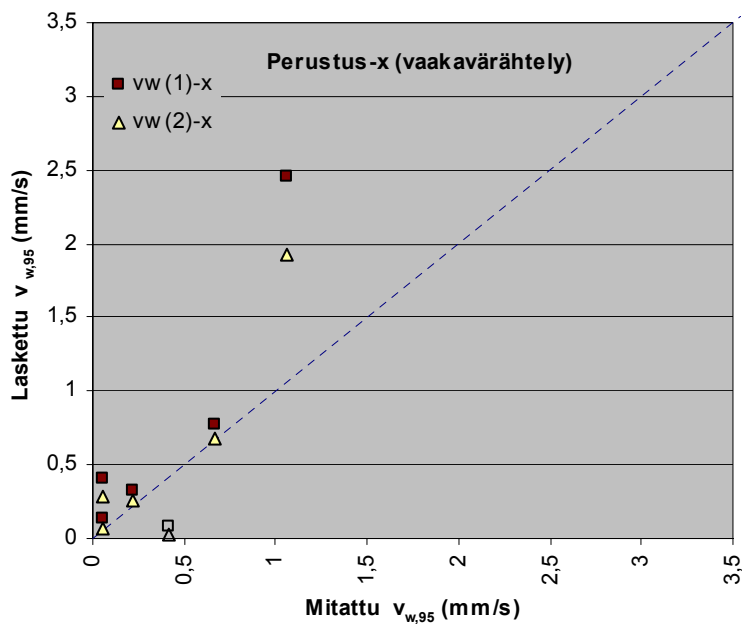
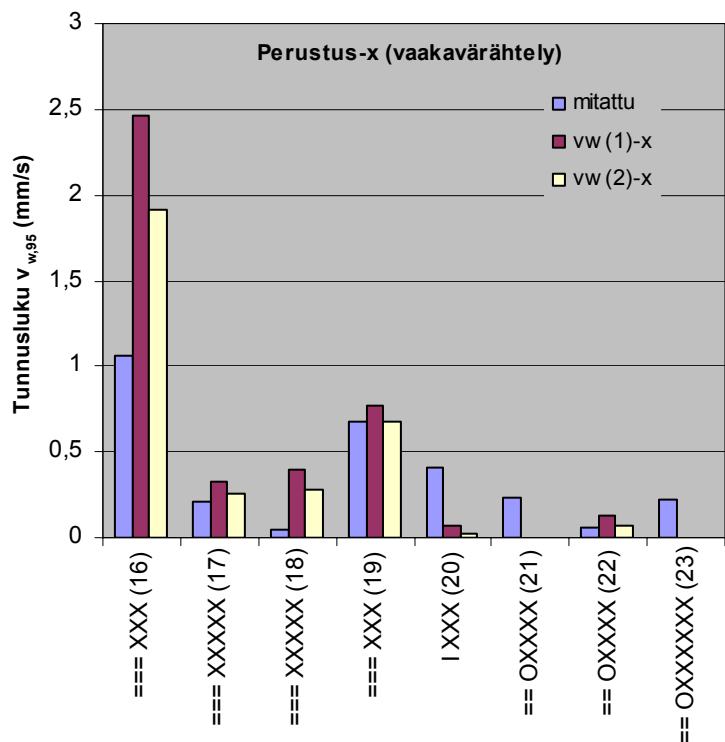
Kuva 13. Maaperän vaakasuuntaisen z -värähtelyn perusteella arvioitu perustuksen värähtely verrattuna mitattuun arvoon (vanhat pientalot).

5.3.2 Kerrostalot

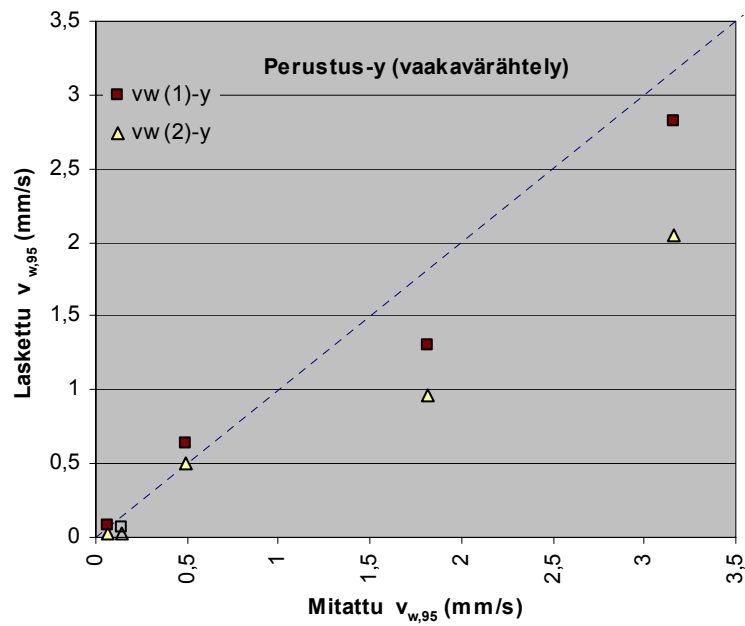
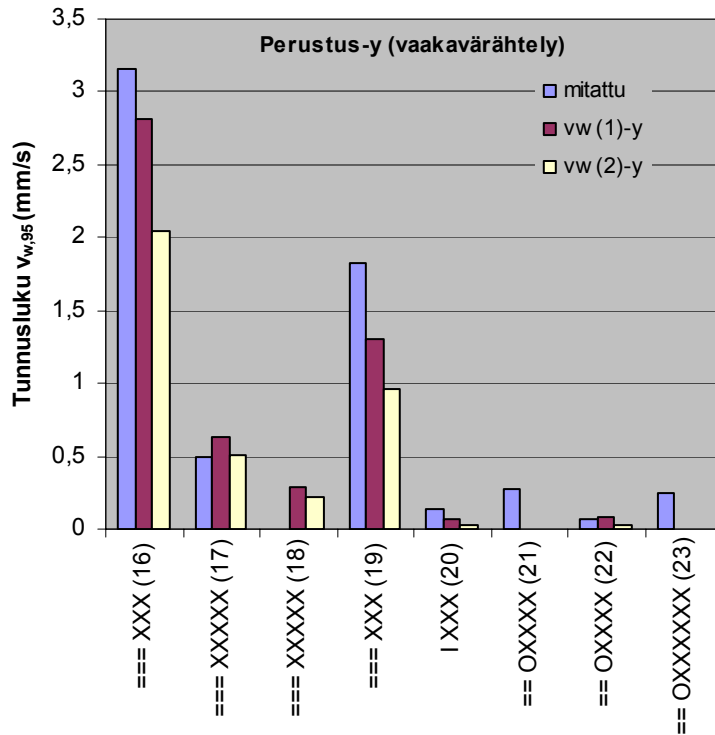
Kuvissa 14–16 verrataan mitatusta maaperän värähtelystä kohdan 4.4 mukaisesti arvioitua perustuksen värähtelyä $v_{w,95}^{per} = vw(1)$ mitattuun arvoon. Kuvissa esitetään myös tehollisarvo $vw(2)$, joka perustuu taajuusalueella 2–10 Hz esiintyvään suurimpaan värähtelykomponenttiin. Kuvista voi puuttua tuloksia, sillä kaikista kohteista ei ole mitattu kaikkia vertailussa tarvittavia suureita. Kuvissa esitetystä $v_{w,95}^{per} = vw(1)$ -arvojen vertailusta voidaan tehdä seuraavat havainnot:

- Laskettu arvio $vw(1)$ näyttää keskimääräisesti vastaavan mitattua arvoa sekä pystyettä vaakasuunnassa.
- Vaakavärähtelyä koskeva arvio on molemmissa vaakasuunnissa merkittävästi epävarmalla puolella kohteessa 20. Tulos on mitattu pitkän ja kapean rakennuksen kovalle maaperälle perustetusta itäpäästä. Ero johtunee siitä, että pehmeälle maaperälle perustetun rakennuksen länsipään suurempi värähtely siirtyy myös hyvin lyhyille paaluille perustettuun itäpäähän. Näiden muutaman tuloksen perusteella maaperän vaakavärähtely näyttää siirtyvän kerrostaloilla yhtä herkästi perustuksiin kuin pientaloillakin.
- Huomattavasti varmalla puolella vaakavärähtelyä koskeva arvio on kohteissa 16 (x-suunta) ja 18 (x-suunta). Tulokset ovat yli 30 m pitkien rakennusten pituussuunnassa mitattuja arvoja ja osoittavat, että pitkässä ja kapeassa rakennuksessa pituussuuntaiset maaperän värähtelyt siirtyvät huomommin perustukseen kuin poikittaissuuntaiset värähtelyt.
- Pystyvärähtelyä koskeva arvio $vw(1)$ -z vastaa hyvin mitattua arvoa lukuun ottamatta kohteita 18 ja 23. Kohteen 23 erityisen suuri ero johtuu siitä, että maan pystyvärähtely on mitattu aivan ajoradan vierestä ja rakennuksen seinä sijaitsee kuuden metrin etäisyydellä kadusta. Kohteen 18 ero voi johtua mittaukseen liittyvistä epätarkkuuksista. Näiden muutaman tuloksen perusteella paalutuksella ei näyttäisi olevan merkittävää vaikutusta edes perustuksen pystyvärähtelyyn.
- Kohteet 16, 19 ja 20 ovat saman alueen kohteita, joiden etäisyys rautatiehen on sama. Kohteet 19 ja 20 ovat 42 m pitkän rakennuksen eri päät. Kohteet ovat mittasuhteiltaan ja rakenteiltaan samanlaisia. Kohteilla 16 ja 19 myös pohjasuhteet vastaavat toisiaan, mutta kohteessa 20 rakennus tukeutuu lyhyiden paalujen välityksellä kitkamaahan. Kohteissa 19 ja 20 rakennuksen vaakavärähtelyä on pyritty vähentämään vinopaalujen avulla. Mitattujen y-suuntaisten vaakavärähtelyjen perusteella vinoaalutus saattaa pienentää jonkin verran perustukseen siirtyvää vaakavärähtelyä.
- Vertailemalla esitettyjä $vw(1)$ ja $vw(2)$ -arvoja nähdään, että rungon taajuusalueella 2–10 Hz esiintyvän suurimman värähtelykomponentin osuus värähtelystä on mitailla savimaakohteilla suuri.

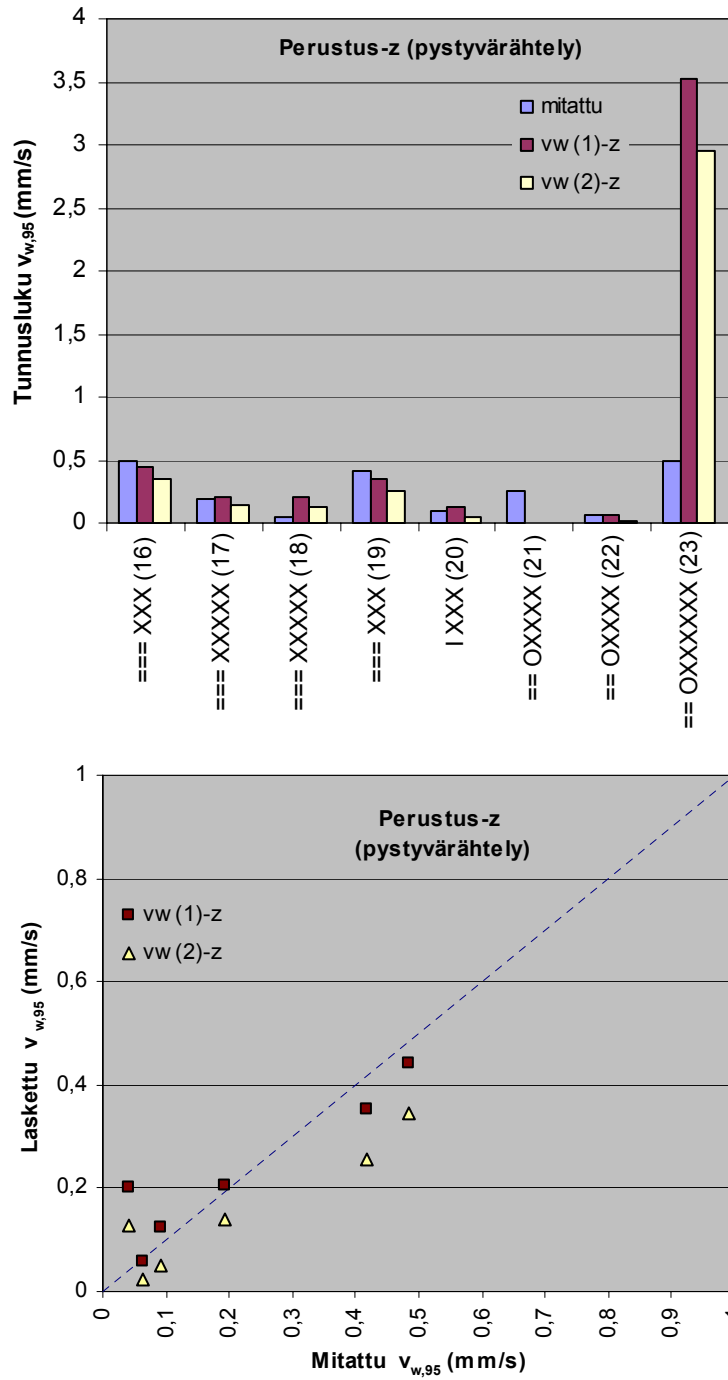
- Liitteen D kuvissa 1–4 esitetään värähtelyn taajuussisältöön perustuva vertailu värähtelyn siirtymisestä maaperästä perustukseen. Kerrostalokohteiden kuvissa esitettyjen keskiarvokuvaajien perusteella on selvästi havaittavissa, että samoin kuin pientalokohteillakin, suuritaajuuksinen värähtely siirtyy sekä pysty- että vaakasuunnassa matalataajuuksista värähtelyä huonommin perustukseen. Ainakaan näiden muutaman kohteen tulosten perusteella ei kerrostalokohteilla ole perusteltua käyttää pienempää kerrointa kuin kuvassa 7 on esitetty. Tuloksissa näkyy myös selvästi, että pitkissä ja kapeissa rakennuksissa pituussuuntaiset (kohteet 16, 17 ja 19) maaperän vaakavärähtelyt siirtyvät huonommin perustukseen kuin poikittaisuuntaiset värähtelyt.



Kuva 14. Maaperän vaakasuuntaisen x -värhtelyn perusteella arvioitu perustuksen värähtely verrattuna mitattuun arvoon (kerrostalot).



Kuva 15. Maaperän vaakasuuntaisen y-värhtelyn perusteella arvioitu perustuksen värähtely verrattuna mitattuun arvoon (kerrostalot).



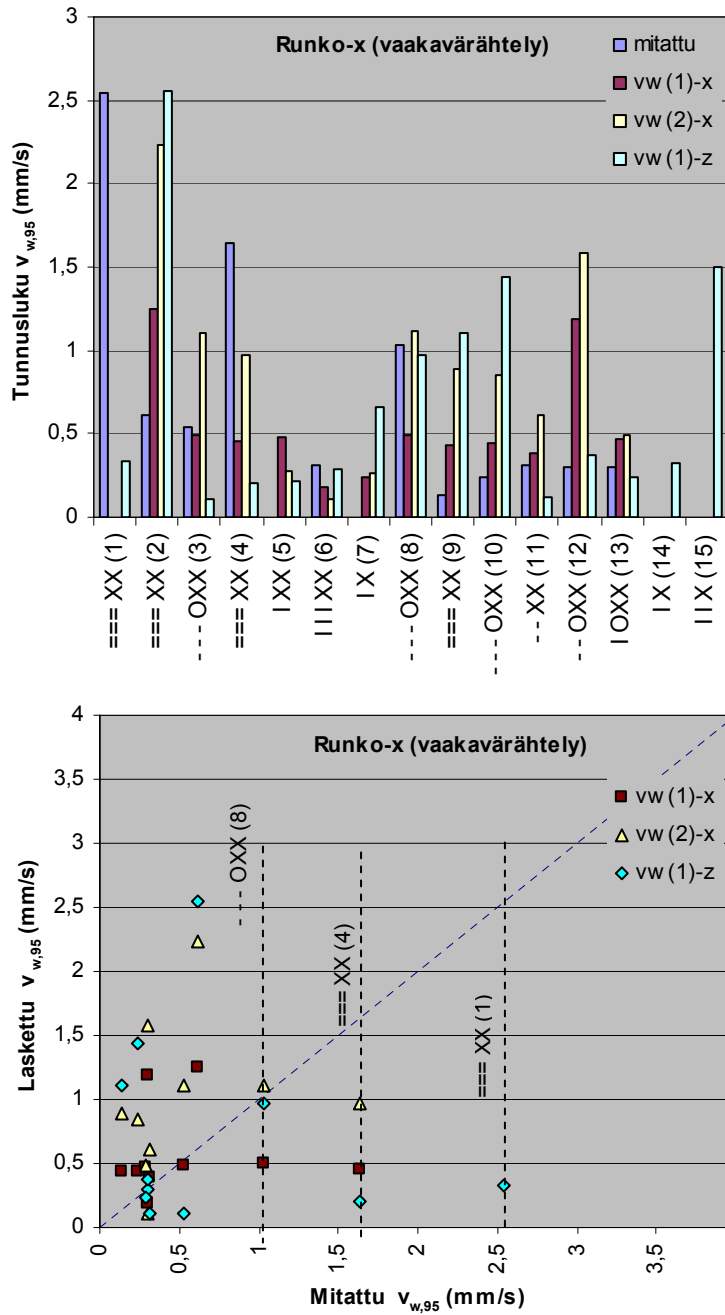
Kuva 16. Maaperän pystysuuntaisen z-värähtelyn perusteella arvioitu perustuksen värähtely verrattuna mitattuun arvoon (kerrostalot).

5.4 Rungon värähtely

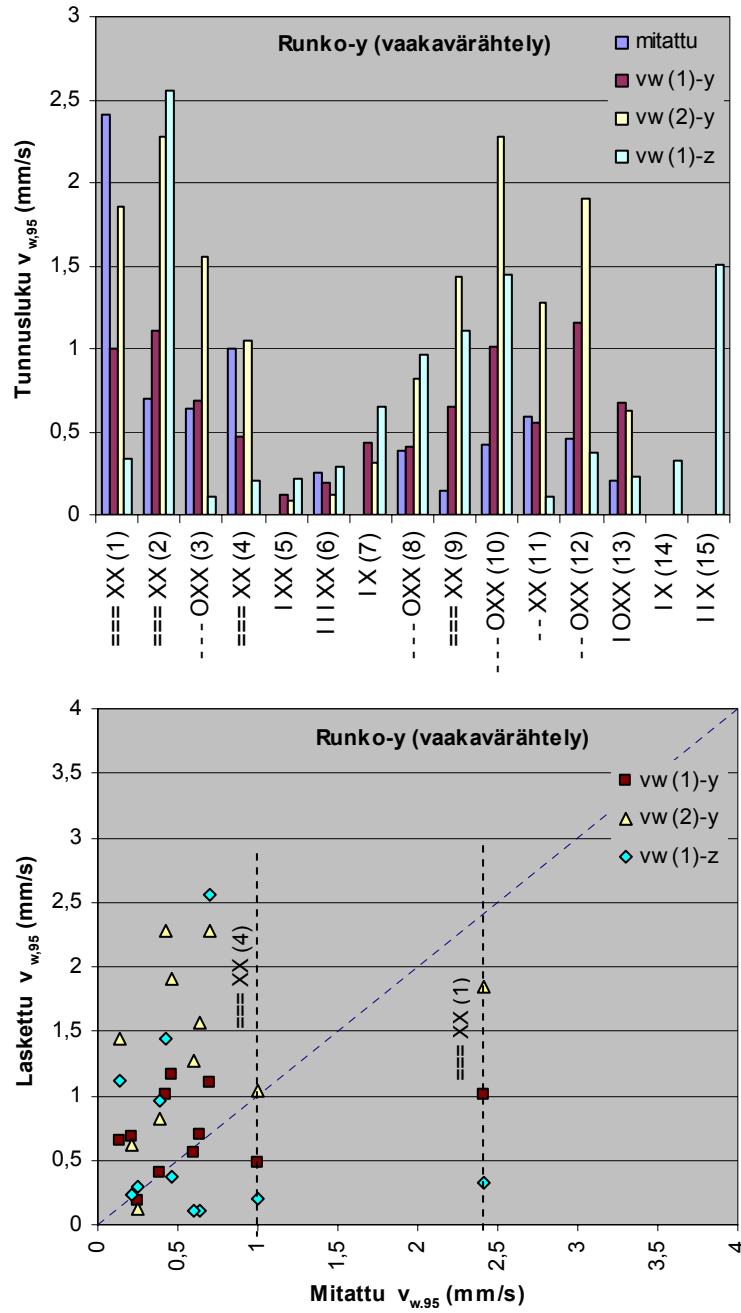
5.4.1 Pientalot

Kuvassa 17 esitetään kohdan 4.5 mukaisesti mitatusta maaperän x-suuntaisesta vaakavärähtelystä arvioidut rungon vaakavärähtelyt $v_{w1}^{runko,x} = vw(1)-x$ ja $v_{w2}^{runko,x} = vw(2)-x$ sekä mitatusta maaperän pystyvärähtelystä aiheutuva rungon vaakavärähtely $v_{w1}^{runko,z} = vw(1)-z$. Vastaava vertailu y-suuntaiselle vaakavärähtelylle esitetään kuvassa 18. Vertailussa on rungon alimman ominaistajuuden oletettu voivan olla millä tahansa taulukossa 4 esitetyllä 5–10 Hz:n taajuuskaistalla. Kuvissa esitetystä arvojen vertailusta voidaan tehdä seuraavat havainnot:

- Laskennallisista arvioista määrävin on useimmissa tapauksissa resonanssivärähtely $vw(2)$.
- Värähtelyn tasaiseen voimistumiseen perustuva arvio $vw(1)-x$ tai $vw(1)-y$ johtaa merkittävästi epäluotettavaan mitoitukseen vain kohteilla 1, 4 ja 8, kun kerroin $k_1^{runko} = 1,5$. Kohteet 1 ja 4 ovat paaluille perustettuja puutaloja, ja kohde 8 on Siporex-runkoinen kellarikerroksinen pientalo. Näissä tapauksissa resonanssivärähtelymitoitukseen $vw(2)$ saattaa johtaa epävarmaan mitoitukseen, kun kerroin $k_2^{runko} = 4,0$.
- Useissa savimaan kohteissa (esim. kohteet 3, 9 ja 10), joissa maaperän dominoivat värähtelyt ulottuvat alueelle 5–10 Hz, resonanssimitoitus johtaa merkittävään ylimitoitukseen. Myöskään kohteissa 11 ja 12, joissa maaperän dominoivat taajuudet alkavat 10 Hz:stä ja ovat siten mahdollisen ominaistajuusalueen ylärajalla, resonanssia ei ole esiintynyt. Tulos osoittaa, että resonanssin muodostuminen on erittäin herkkä sille, miten rungon ominaistajuus tunnetaan ja miten se sattuu herätteen taajuusalueelle.



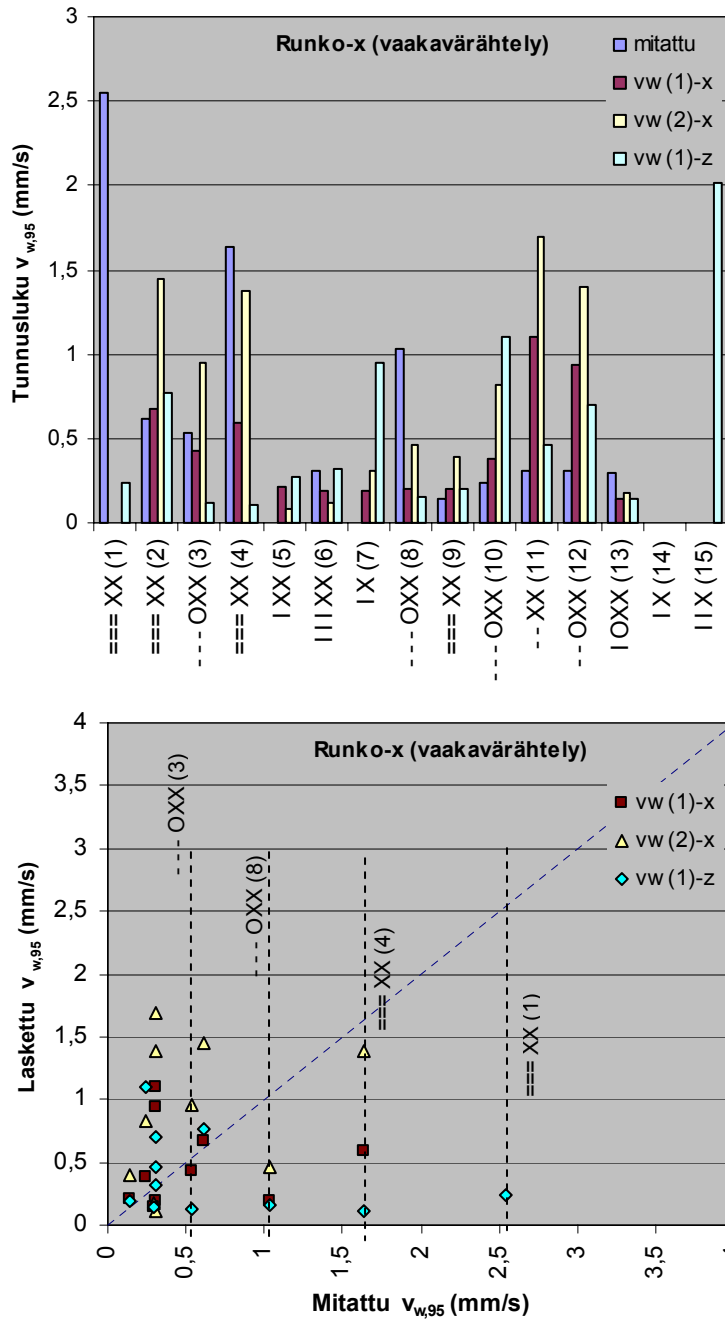
Kuva 17. Maaperän värähtelyn perusteella arvioitu rungon x-suuntainen vaakavärähtely verrattuna mitattuun arvoon (uudet pientalot).



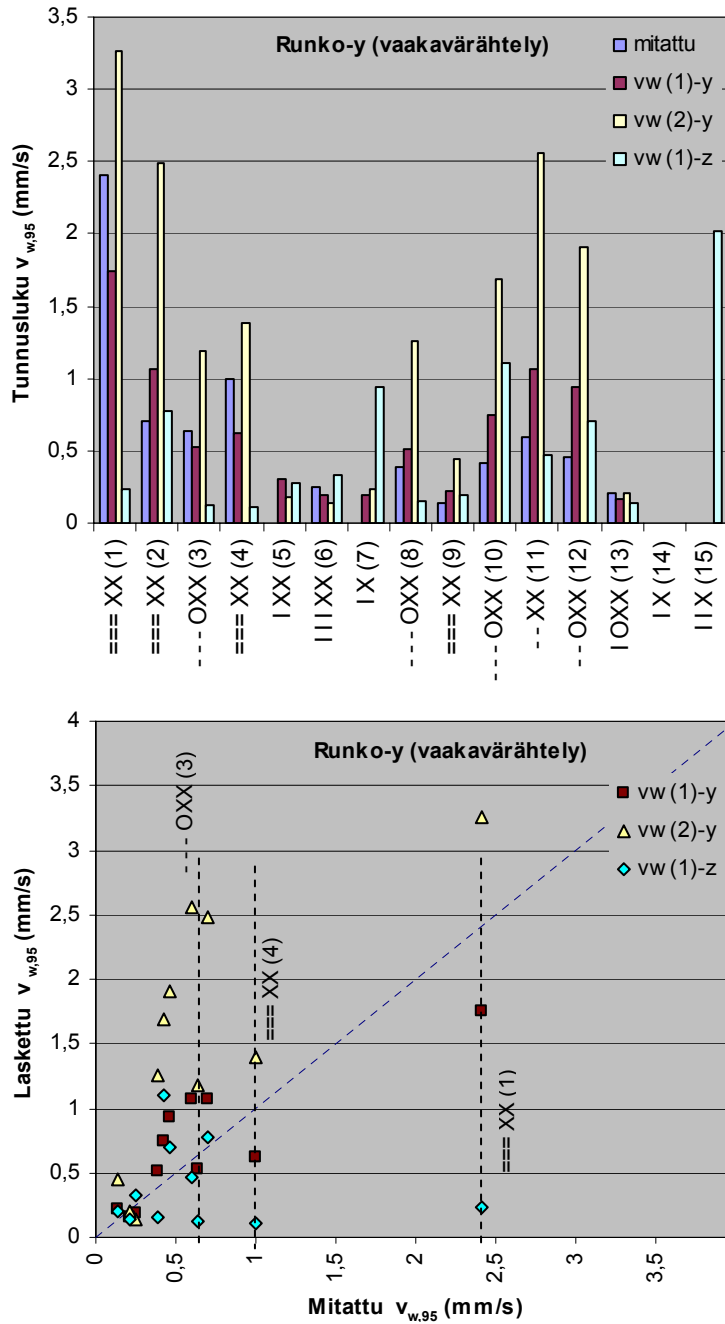
Kuva 18. Maaperän värähtelyn perusteella arvioitu rungon y-suuntainen vaakavärähtely verrattuna mitattuun arvoon (uudet pientalot).

Kuvissa 19–20 tehdään kuvia 17–18 vastaava vertailu, kun lähtökohtana on perustuksesta mitattu värähtely. Koska lähtökohtana on perustuksen värähtely, kuvassa 7 esitettyä perustuksen värähtelyyn liittyvää kerrointa ei ole käytetty, eli kertoimen arvo on 1,0 koko taajuusalueella. Kuvissa esitetystä arvojen vertailusta voidaan tehdä seuraavat havainnot:

- Laskennallisista arvioista on resonanssivärähtely $v_w(2)$ määräävin kaikissa tapauksissa lukuun ottamatta hiekkamaakohteita 5, 6 ja 7, joilla mitoituksen määrää $v_w(1)$ -z.
- Värähtelyn tasaiseen voimistumiseen perustuva arvio $v_w(1)$ -x tai $v_w(1)$ -y johtaa epäluotettavaan mitoitukseen vain kohteilla 1 (y-suunta) sekä kohteilla 3, 4 ja 8, (x-suunta). Kohteet 1 ja 4 ovat paaluille perustettuja puutaloja, ja kohde 3 on samalla alueella sijaitseva kellarikerroksellinen maanvaraisesti perustettu puutalo. Kohde 8 on Siporex-runkoinen kellarikerroksinen pientalo. Kohteilla 4 (x-suunta) ja 8 (x-suunta) resonanssimitoituskin saattaa johtaa epävarmaan mitoitukseen, kun kerroin $k_2^{runko} = 4,0$.
- Kuten edellisessäkin vertailussa (kuvat 17–18), resonanssimitoitus muodostuu vertailussa usein määrääväksi (mm. kohteet 2, 3, 10, 11 ja 12), vaikka mittaustulosten perusteella resonanssin merkitys on pieni.
- Arvoihin $v_w(1)$ -z perustuvassa vertailussa tulosten hajonta on suuri, mikä osoittaa, että perustuksen pystyvärähtely ei kuvaa hyvin rungon vaakavärähtelyä eikä siten ole yhtä merkittävä rungon resonanssia aiheuttava tekijä kuin perustuksen vaakavärähtely. Niissäkin tapauksissa, joissa mitatun perustuksen pystyvärähtelyn perusteella laskettu vaakavärähtely $v_w(1)$ -z on suhteellisen pieni (mm. kohteet 1, 3 ja 4), eli myös mitattu perustuksen pystyvärähtely on pieni, mitattu rungon vaakavärähtely on suuri.



Kuva 19. Perustuksen värähtelyn perusteella arvioitu rungon x-suuntainen vaakavärähtely verrattuna mitattuun arvoon (uudet pientalot).

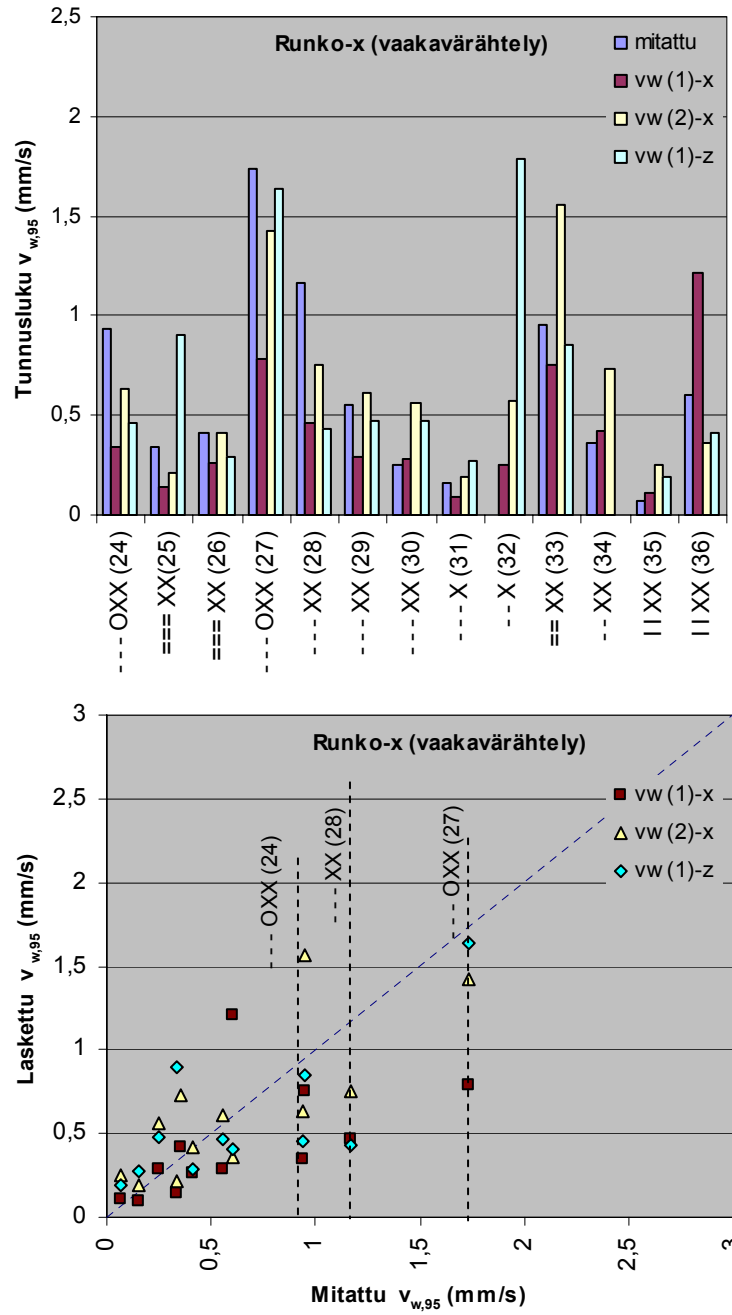


Kuva 20. Perustuksen värähtelyn perusteella arvioitu rungon y-suuntainen vaakavärähtely verrattuna mitattuun arvoon (uudet pientalot).

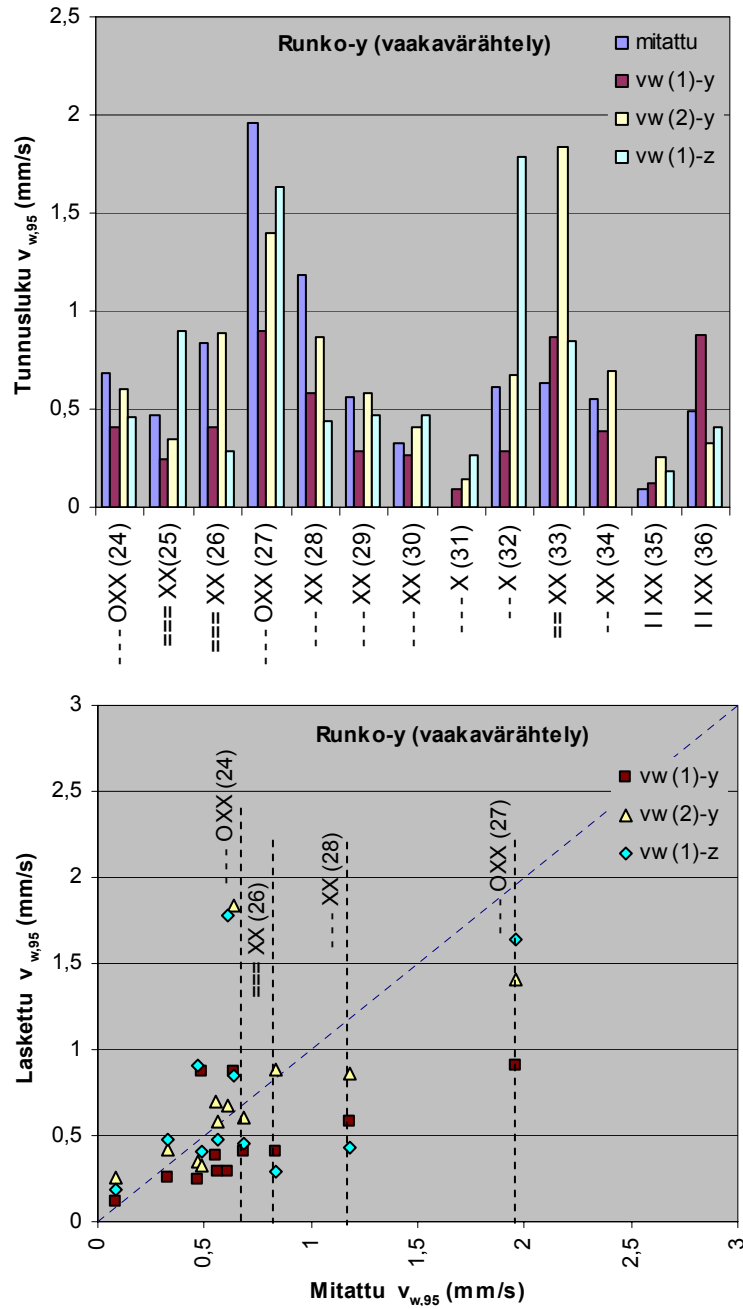
Kuvissa 21–22 tehdään kuvia 19–20 vastaava vertailu vanhoista mittauskohteista saaduille tuloksille. Koska maaperän värähtelyistä on mitattu vain pystyvärähtely, rungon värähtelyn arvioinnin lähtökohtana on voitu käyttää vain perustuksesta mitattua värähtelyä. Kuvissa esitetystä arvojen vertailusta voidaan tehdä seuraavat havainnot:

- Laskennallisista arvioista on resonanssivärähtely $v_w(2)$ määräävin kaikissa tapauksissa lukuun ottamatta kohteita 25, 31 ja 32 (määräävä $v_w(1)-z$) sekä kohdetta 36 (määräävä $v_w(1)-x$). Kohde 36 on hiekkamaakohde, muut kohteet ovat paaluttamattomia savimaakohteita.
- Arvoihin $v_w(1)$ perustuva arvio johtaa suurimmassa osassa kohteita epäluotettavaan mitoitukseen, kun kerroin $k_1^{runko} = 1,5$. Kohteilla 24, 27 ja 28 resonanssivärähtelymitoituskkin johtaa jonkin verran epävarmaan mitoitukseen, kun kerroin $k_2^{runko} = 4,0$.
- Koska näissä vanhoissa mittauskohteissa maaperän pystyvärähtelyt ovat olleet suhteessa vaakavärähtelyihin keskimäärin suurempia kuin uusissa mittauskohteissa ja vanhoista kohteista vain kohteet 25, 26 ja 33 on perustettu paaluille, perustuksen pystyvärähtelyn perusteella tehty arvio rungon vaakavärähtelystä on suhteellisesti suurempi kuin uusilla kohteilla (kuvat 19–20). Kuitenkin esimerkiksi paaluille perustetussa kohteessa 26, jossa perustuksen pystyvärähtelyn perusteella laskettu arvio $v_w(1)-z$ on suhteellisen pieni eli myös mitattu perustuksen pystyvärähtely on pieni, mitattu vaakavärähtely on suuri. Tulos viittaa siihen, että pelkästään perustuksen pystyvärähtely ei aiheuta rungon resonanssivärähtelyä.

Liitteen D kuvissa esitetään värähtelyn taajuussisältöön perustuva vertailu värähtelyn siirtymisestä maaperästä runkoon (kuvat 5–6) ja perustuksesta runkoon (kuvat 7–9). Kuvien perusteella 1/3-oktaavikaistan värähtely on maahan nähden maksimissaan noin 5-kertainen (kuvat 5 ja 6). Perustukseen nähden suurennuskerroin on suurimmillaan 6–10 (kuvat 7 ja 9). Kuvien perusteella suurennuskertoimen tilastollinen maksimiarvo on suuruusluokkaa 4–6 sekä maaperän että perustuksen vaakavärähtelyyn nähden.



Kuva 21. Perustuksen värähtelyn perusteella arvioitu rungon x-suuntainen vaakavärähtely verrattuna mitattuun arvoon (vanhat pientalot).

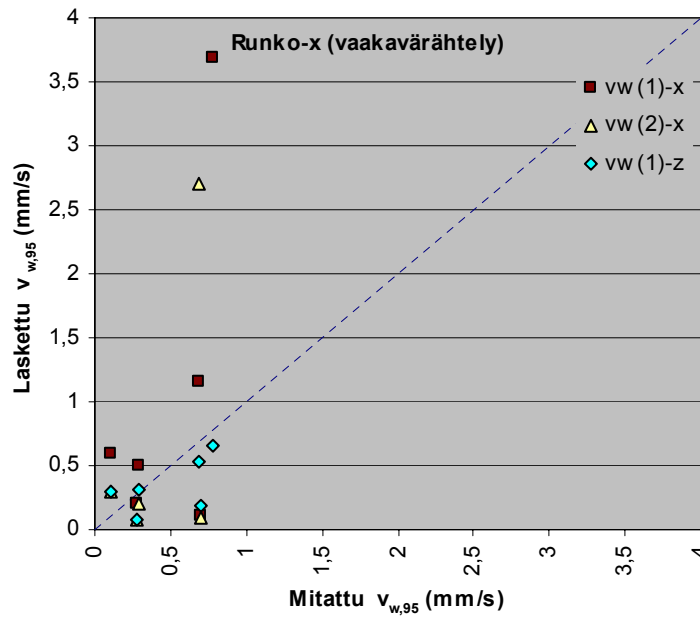
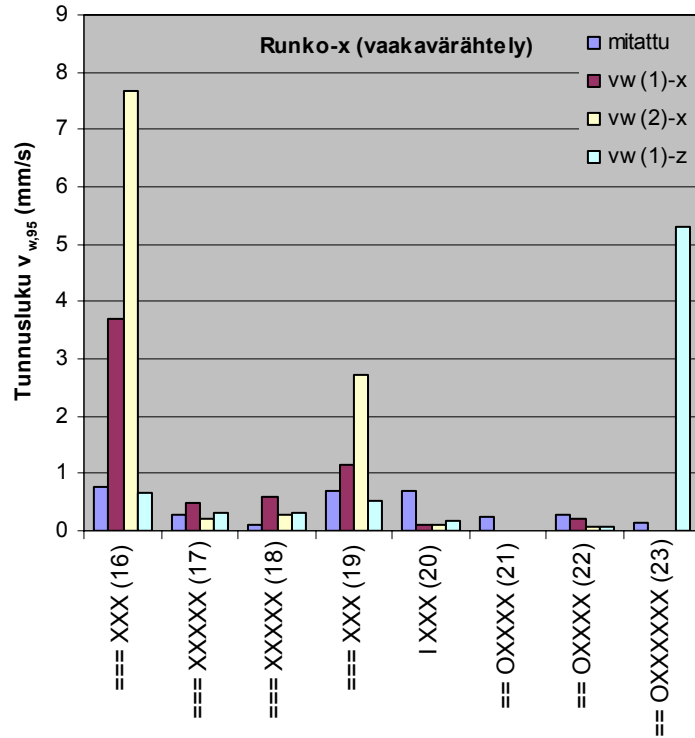


Kuva 22. Perustuksen värähtelyn perusteella arvioitu rungon y-suuntainen vaakavärähtely verrattuna mitattuun arvoon (vanhat pientalot).

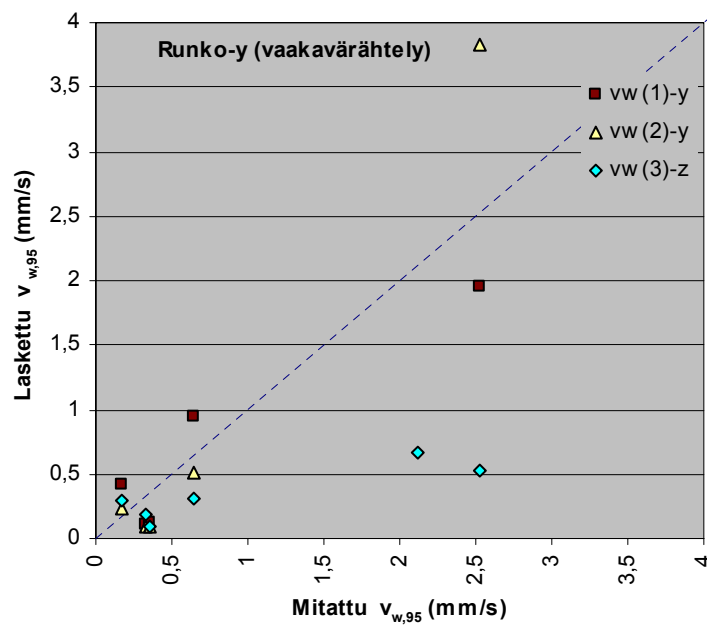
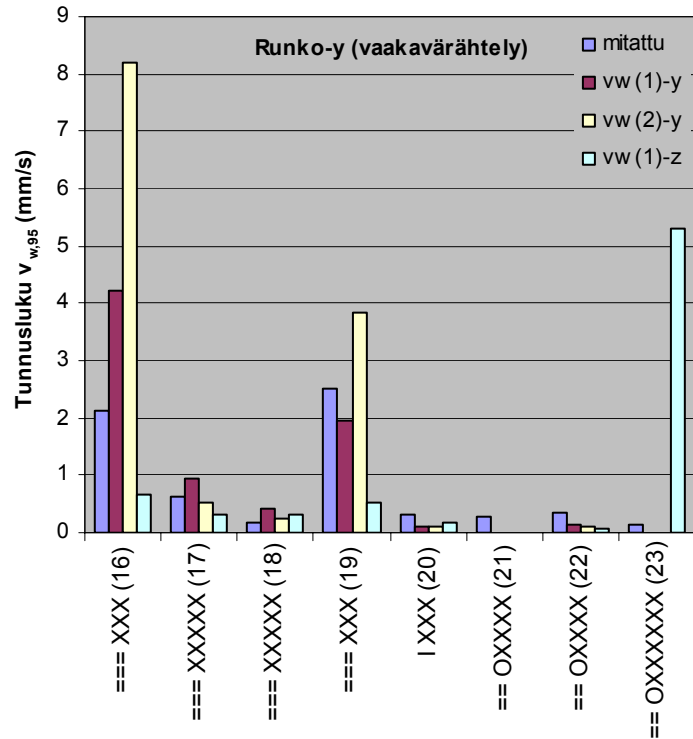
5.4.2 Kerrostalot

Kuvassa 23 esitetään kohdan 4.5 mukaisesti mitatusta maaperän x-suuntaisesta vaakavärähtelystä arvioidut rungon vaakavärähtelyt $v_{w1}^{runko,x} = vw(1)-x$ ja $v_{w2}^{runko,x} = vw(2)-x$ sekä mitatusta maaperän pystyvärähtelystä aiheutuva rungon vaakavärähtely $v_{w1}^{runko,z} = vw(1)-z$. Vastaava vertailu y-suuntaiselle vaakavärähtelylle on kuvassa 24. Vertailussa on rungon alimman ominaistajuuden oletettu voivan olla millä tahansa taulukossa 4 esitetyllä kerrosten lukumäärästä riippuvalla 1/3-oktaavikaistalla. Kuvissa esitetystä arvojen vertailusta voidaan tehdä seuraavat havainnot:

- Mitatuilla betonirunkoisilla, paaluille perustetuilla 3–6-kerroksisilla taloilla lasketut arvot ovat lähempänä tasaiseen värähtelyyn perustuvaa arvioita vw-1 kuin resonanssivärähtelyyn perustuvaa arviota vw-2. Resonanssimitoituksen merkitys mitoituksessa on erityisen suuri kolmikerroksisilla kohteilla 16 ja 19, mutta vertailun perusteella näissäkään kohteissa resonanssi-ilmiötä ei esiinny.
- Vaakavärähtelyä koskeva arvio vw-1 on molemmissa vaakasuunnissa epävarmalla puolella kohteissa 20 ja 22. Molemmissa tapauksissa ero johtuu siitä, että rungon värähtely siirtyy mittauskohtaan muualta rakennuksesta eikä rakennuksen mitatun pään maaperän värähtely ole hyvä arviointiperuste. Kohteet 19 ja 20 ovat 42 metriä pitkän rakennuksen eri päät. Kohde 20 on perustettu huomattavasti kovemmalle maaperälle kuin kohde 19. Kohteen 22 tapauksessa rakennuksen toinen pää on 15 metriä kadusta, kun mitattu pääty on 50 metrin päässä kadusta.
- Huomattavimmin varmalla puolella vaakavärähtelyä koskeva arvio vw-1 on kohteen 16 x-suunnassa ja myös y-suunnassa arvio on merkittävästi varmalla puolella. Varmemmalla puolella oleva pituussuunnan arvio johtunee siitä, että rakennus on huomattavan pitkä syvyyteensä nähden, jolloin rakennuksen pituus tasaa maan vaakasuuntaista värähtelyä. Myös kohteen 18 merkittävästi varmalla puolella olevat arvot johtuvat ainakin osittain samasta syystä.
- Kohteen 23 erityisen suuri ero johtuu siitä, että maan pystyvärähtely on mitattu aivan ajoradan vierestä ja rakennuksen seinä sijaitsee kuuden metrin etäisyydellä kadusta.



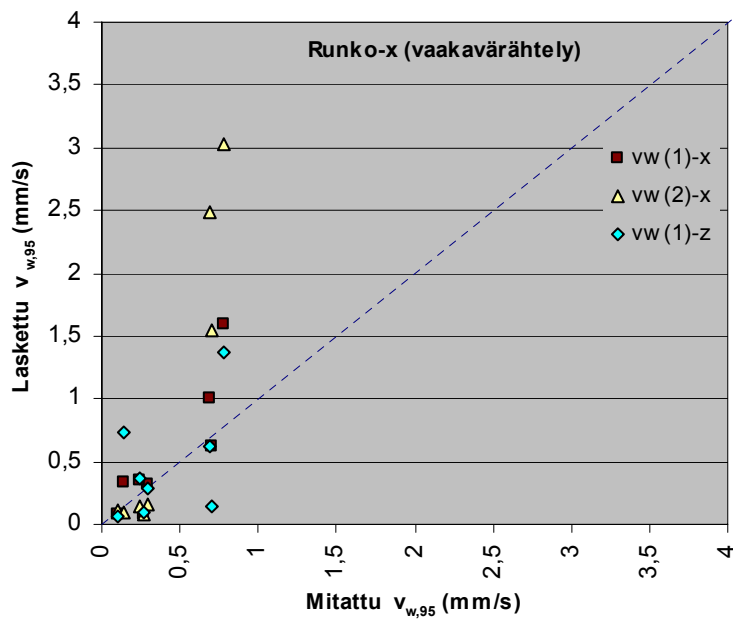
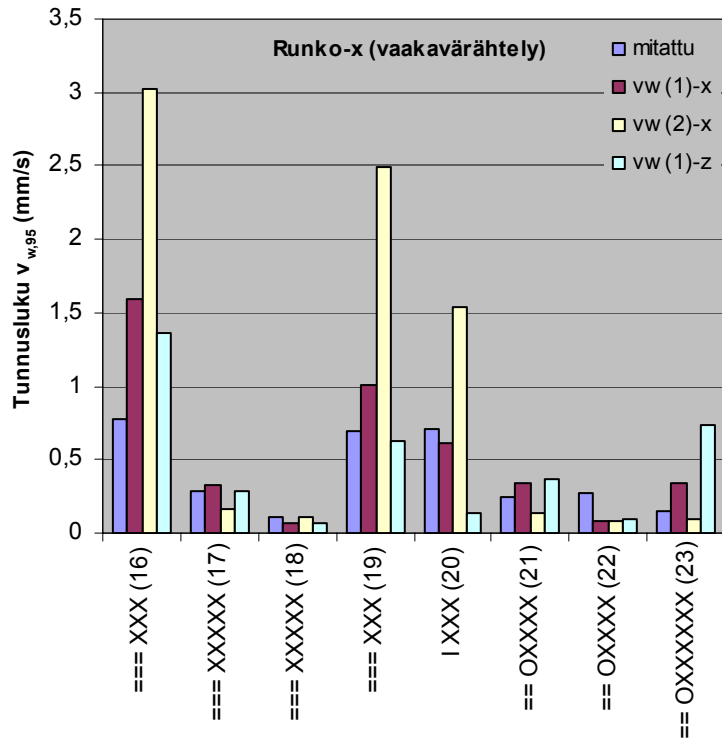
Kuva 23. Maaperän värähtelyn perusteella arvioitu rungon x-suuntainen vaakavärähtely verrattuna mitattuun arvoon (kerrostalot) (huomaa, että alakuvasta puuttuvat ne yläkuvan pisteet, joiden arvo on yli 4,0).



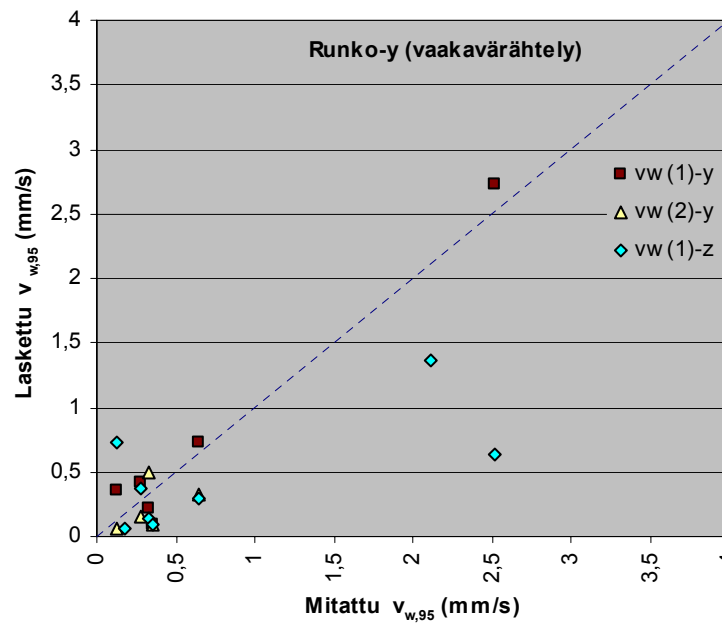
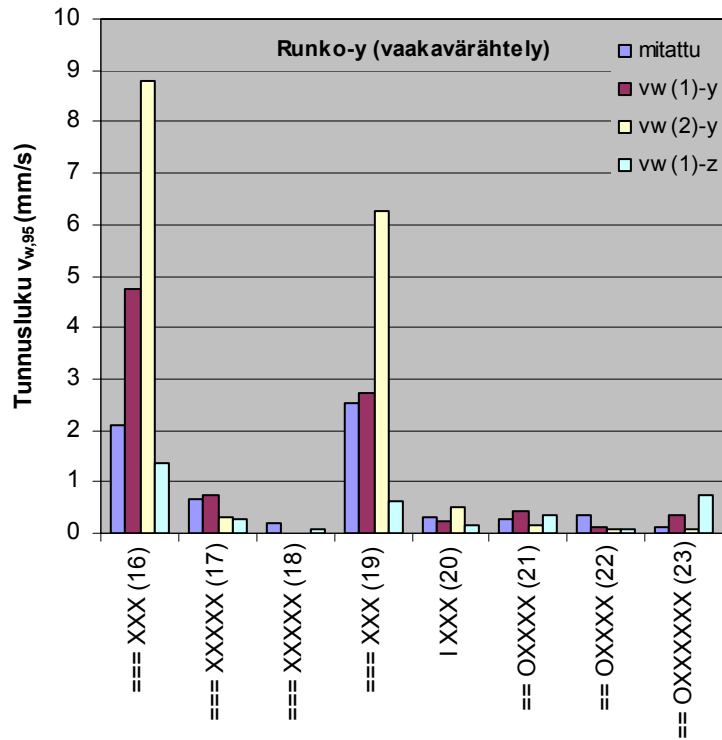
Kuva 24. Maaperän värähtelyn perusteella arvioitu rungon y-suuntainen vaakavärähtely verrattuna mitattuun arvoon (kerrostalot) (huomaa, että alakuvasta puuttuvat ne yläkuvan pisteet, joiden arvo on yli 4,0).

Kuvissa 25–26 tehdään kuvia 23–24 vastaava vertailu, kun lähtökohtana on perustuksesta mitattu värähtely. Koska lähtökohtana on perustuksen värähtely, kuvassa 7 esitettyä perustuksen värähtelyyn liittyvää kerrointa ei ole käytetty, eli kertoimen arvo on 1,0 koko taajuusalueella. Kuvissa 25–26 tulosten hajonta on pienempi kuin kuvissa 23–24, mutta muuten tulokset vastaavat toisiaan.

Liitteen D kuvissa on esitetty värähtelyn taajuussisältöön perustuva vertailu värähtelyn siirtymisestä maaperästä runkoon (kuvat 5–6) ja perustuksesta runkoon (kuvat 7–9). Kuvien 5–8 perusteella 1/3-oktaavikaistan värähtely on maksimissaan (kohteet 18 ja 21) vahvistunut lattian reunaan nähden 4–6-kertaiseksi. Tuloksen perusteella myös kerrostaloilla rungon resonanssi voisi epäedullisessa tilanteessa olla mahdollinen. Valitettavasti kerrostaloilla mittaukseen liittyvät epätarkkuudet korostuvat ja vähentävät tuloksen luotettavuutta.



Kuva 25. Perustuksen värähtelyn perusteella arvioitu rungon y-suuntainen vaakavärähtely verrattuna mitattuun arvoon (kerrostalot) (huomaa, että alakuvasta puuttuvat ne yläkuvan pisteet, joiden arvo on yli 4,0).



Kuva 26. Perustuksen värähtelyn perusteella arvioitu rungon y-suuntainen vaakavärähtely verrattuna mitattuun arvoon (kerrostalot) (huomaa, että alakuvasta puuttuvat ne yläkuvan pisteet, joiden arvo on yli 4,0).

5.5 Lattioiden värähtely

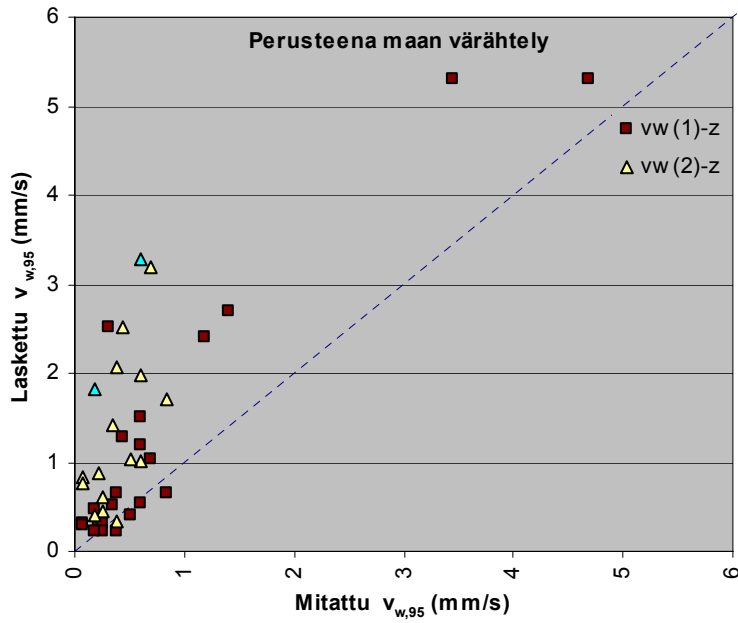
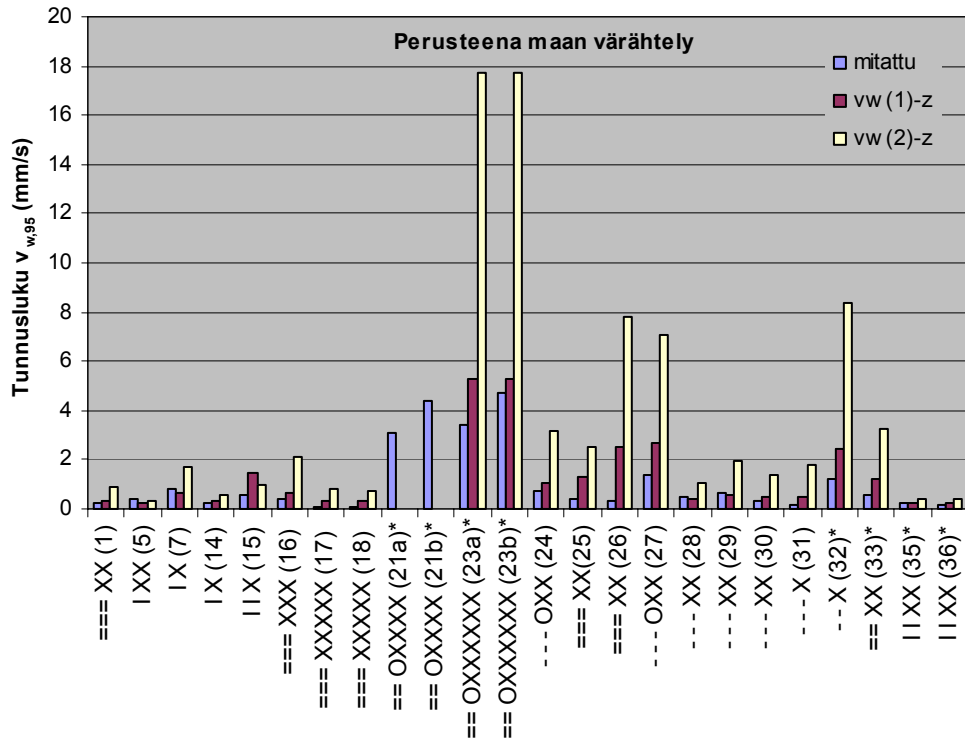
Kuvissa 27–28 esitetään kohdan 4.6 mukaisesti arvioitu lattian värähtely verrattuna mitattuun arvoon. Kuvassa 27 perusteena on maaperästä ja kuvassa 28 lattian reunalta mitattu pystyvärähtely. Kun perusteena on lattian reunan värähtely, kuvassa 7 esitettyä perustuksen värähtelyyn liittyvää kerrointa ei ole käytetty, eli kertoimen arvo on 1,0 koko taajuusalueella. Kuvissa $v_{w1}^{lattia} = vw(1)$ -z on tasaiseen vahvistumiseen perustuva arvo ja $v_{w2}^{lattia} = vw(2)$ -z on mahdolliseen lattian resonanssiin perustuva arvo. Koska lattian ominaistajuutta ei ole laskettu, vertailussa on alimman ominaistajuuden arvioitu sattuvan taajuusalueelle 6–32 Hz. Kuvissa on sekä uusien että vanhojen mittauskohteiden tulokset. Tuloksista voidaan tehdä seuraavat havainnot:

- Maan pystyvärähtelyn perusteella tehty arvio $vw(1)$ -z johtaa varmalla puolella mitoitukseen lukuun ottamatta kohteita 5 ja 7, joilla tulos on hieman epäluotettavalla puolella. Kohteet ovat hiekkamaakohteita. Tuloksia arvioitaessa on muistettava, että kerrostalokohteen 23 vertailu ei ole luotettava, koska maan pystyvärähtely on mitattu aivan ajoradan vierestä ja rakennuksen seinä sijaitsee kuuden metrin etäisyydellä kadusta.
- Maan pystyvärähtelyn perusteella tehty arvio $vw(1)$ -z johtaa ylimitoitukseen kohteissa 15, 25, 26, 27, 32 ja 33. Näistä kohteet 25, 26 ja 33 ovat paaluille rakennettuja savimaakohteita, kohteet 15 ja 32 ovat hiekkamaakohteiden maanvaraisia lattiaa, ja kohde 27 on kellarikerroksellisen savimaalle maanvaraisesti perustetun pientalon puurunkoinen lattia.
- Lattian reunan pystyvärähtelyn perusteella tehty arvio $vw(1)$ -z johtaa luotettavaan mitoitukseen lukuun ottamatta kerrostalokohteista 21 ja 23 mitattuja neljää puurunkoista lattiaa, joissa tulos on täysin muista poikkeava. Näissä tapauksissa resonansivärähtelymitoituksikin $vw(2)$ saattaa johtaa merkittävästi epävarmaan mitoitukseen, kun kerroin $k_2^{lattia} = 6,0$.
- Lattian reunan pystyvärähtelyn perusteella tehty arvio $vw(1)$ -z johtaa merkittävään ylimitoitukseen vain kohteilla 15, 16 ja 25. Kohde 15 on hiekkamaakohteen maanvarainen lattia, kohde 16 on paalutettu kerrostalo savimaalla ja kohde 25 on paalutettu pientalo savimaalla.

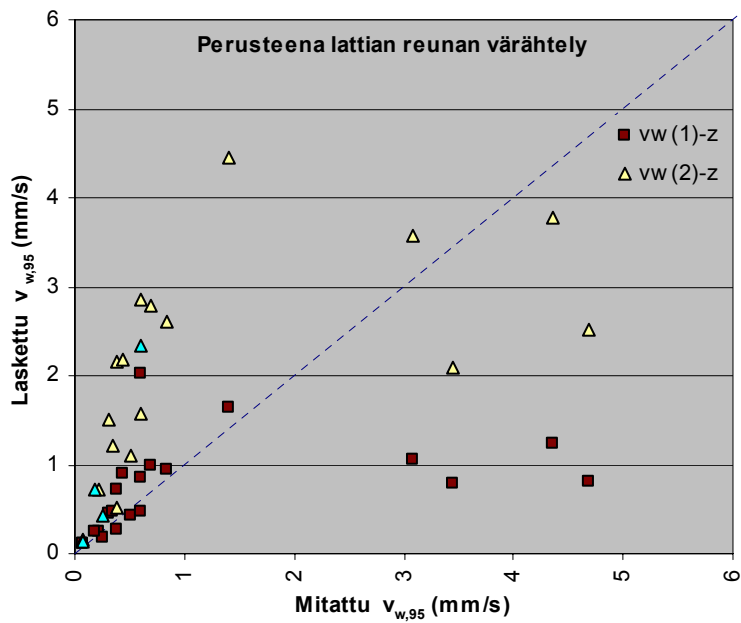
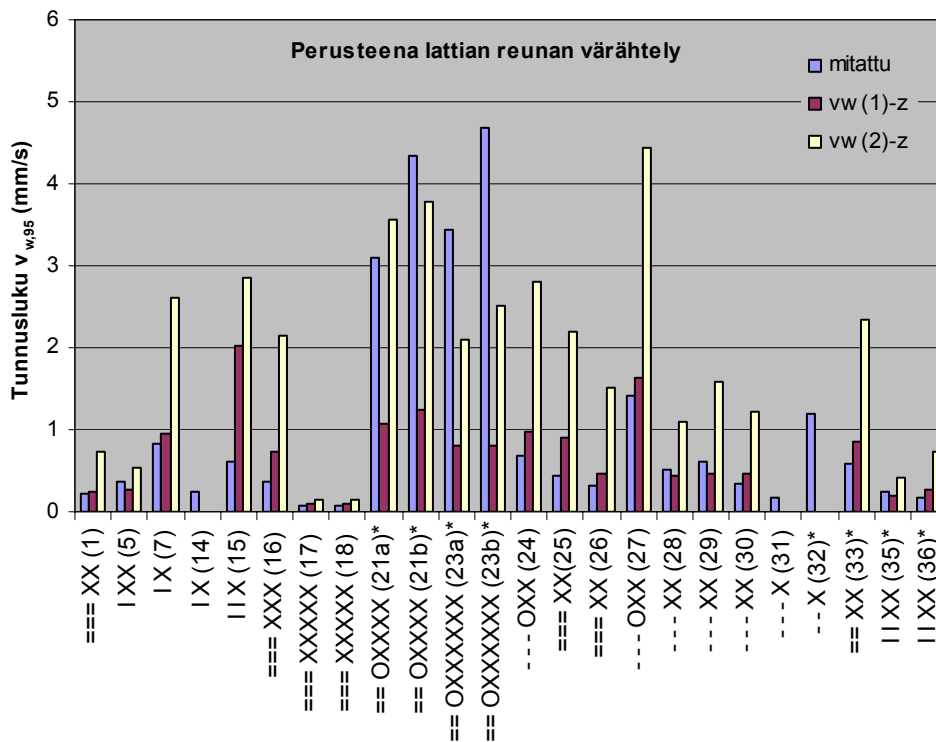
Resonanssimitointi $vw(2)$ -z näyttää johtavan kaikissa mitatuissa tapauksissa suureen ylimitoitukseen lukuun ottamatta kerrostalokohteista 21 ja 23 mitattuja neljää lattiaa. Tuloksia tarkasteltaessa on kuitenkin huomattava, että lattian värähtelyn alin ominaistajuus on yleensä 10–30 Hz ja vain kohteissa 21, 23, 32, 33, 35 ja 36 dominoiva värähtely sattuu tälle alueelle (kuvissa tunnuksien lisä *). Kuitenkin näistäkin vain kerrostalokohteissa 21 ja 23 on havaittavissa selvä resonanssi-ilmiö. Voimakkaan resonanssin syntyminen edellyttää kapeakaistaista värähtelyä ja tämän taajuuden sattumista hyvin

tarkalleen lattian ominaistajuuden kohdalle. Kohteissa 32 ja 36 on eristetty maanvarainen lattia, kohteissa 33 ja 35 lattia on ontelolaatoista ja kerrostalokohteissa 21 ja 23 lattia on puurunkoinen.

Liitteen D kuvissa esitetään värähtelyn taajuussisältöön perustuva vertailu värähtelyn siirtymisestä maaperästä lattian keskialueelle (kuva 10) ja lattian reunalta lattian keskialueelle (kuva 11). Liitteen kuvan 11 perusteella 1/3-oktaavikaistan värähtely on maksimissaan vahvistunut lattian reunaan nähden jopa 14-kertaiseksi. Kuvien 10 ja 11 perusteella suurennuskerroin 6 vastaa kuitenkin paremmin tilastollista maksimia sekä maaperän että lattian reunan pystyvärähtelyyn nähden.



Kuva 27. Maaperästä mitatun pystyvärähtelyn perusteella arvioitu lattian värähtely verrattuna mitattuun arvoon (huomaa, että alakuvasta puuttuvat ne yläkuvan pisteet, joiden arvo on yli 6,0).



Kuva 28. Lattian reunalta mitatun pystyvärähtelyn perusteella arvioitu lattian keski-alueen värähtely verrattuna mitattuun arvoon.

5.6 Yhteenveto vertailusta mittaustuloksiin

Kohdassa 4 esitettyä arviointimenetelmän tarkkuutta on arvioitu vertaamalla rungon vaakavärähtelyn ja lattian pystyvärähtelyn laskennallisia arvoja mittaustuloksiin. Kaikkiaan tarkasteltuja mittauskohteita on 36, joista 14 on aikaisemmin mitattuja kohteita. Näille vanhoille kohteille ei ollut käytössä mitattua maaperän vaakavärähtelyä. Kohteista seitsemän on vähintään kolmikerroksisia kerrostaloja ja muut 29 ovat yksi- tai kaksikerroksisia omakoti- tai rivitalokohteita. Kaikki kerrostalokohteet ovat savikkoalueilta. Pientalokohteista seitsemän on hiekka- tai soramaa-alueella ja muut ovat savikkoalueilta. Tärinä on aiheutunut junaliikenteestä 22 kohteessa. Muissa 14 kohteessa tärinä on aiheutunut katuliikenteestä.

Vertailuissa ei ole havaittu liikennetyypistä aiheutuvaa systemaattista eroa. Tulosten perusteella kohdassa 4 esitetty arviointimenetelmä, joka perustuu rakennuspaikalta mitattuun maaperän värähtelyyn, soveltuu käytettäväksi yhtä hyvin rautateiden, katujen ja teiden varrelle rakennettavien talojen tärinän arviointiin.

Perustuksen värähtelyn arviointimenetelmä (kohta 4.4) pätee tuloksien perusteella sekä paalutetuille että paaluttamattomille pientalokohteille. Paalutus on joissakin kohteissa pienentänyt perustukseen siirtyvää pystyvärähtelyä, mutta useimmissa kohteissa paalutettujen kohteiden tulokset eivät eroa merkittävästi paaluttamattomien kohteiden tuloksista. Yleinen havainto on, että matalat värähtelykomponentit siirtyvät keskimäärin samansuuruisina perustukseen, mutta korkeat taajuudet vaimenevat. Pientaloilla laskennallinen arvio vastaa mitattua keskimääräistä arvoa, joskin hajonta on suurta erityisesti pystyvärähtelyn tapauksessa. Joidenkin tulosten perusteella paaluille perustetussa pientalokohteessa myös perustus voi heilua vaakasuunnassa rakennuksen rungon osana, mikäli rungossa esiintyy voimakas resonanssi-ilmiö. Siksi paaluille perustetuille yksikerroksisille rakennuksille suositeltiin kohdassa 4.5 rungon värähtelyn arvioinnissa käytettäväksi vaakavärähtelyn yleiselle voimistumiselle suurennuskerrointa 1,5, kun se yksikerroksisilla paaluttamattomilla kohteilla on 1,0.

Kerrostalokohteiden vertailu osoittaa, että poiketen yleisestä ennakkokäsityksestä pehmeälle maalle rakennetuissa kerrostalokohteissa pysty- ja vaakavärähtely voi siirtyä maasta perustukseen samassa suhteessa kuin pientalokohteissakin. Kuitenkin pitkässä (alle 30 m) ja kapeassa (alle 10 m) rakennuksessa rakennuksen pituussuuntaisen maaperän vaakavärähtelyn on havaittu siirtyvän merkittävästi huonommin perustukseen kuin rakennuksen poikittaissuuntaisen värähtelyn. Yhdestä kokeilukohteesta mitattujen vaakavärähtelyjen perusteella vinopaalutus saattaa pienentää jonkin verran perustukseen siirtyvää vaakavärähtelyä.

Rakennuksen rungon vaakavärähtelyn arviointimenetelmä (kohta 4.5) soveltuu tuloksien perusteella käytettäväksi sekä paalutetuille että paaluttamattomille pientalokohteille. Vertailun perusteella kohdan 4.5 mukainen yleiseen voimistumiseen perustuva värähtelytarkastelu (suurennuskerroin 1,5) on riittävä rakennuksen rungon vaakavärähtelyn arvioinnissa, kun maaperän ominaistajuus on yli 10 Hz. Kuitenkin 15 mitatussa pientalokohteessa maaperän dominoiva taajuus 5–10 Hz sattuu pientalojen rungon ominaistajuuden vaihteluvälille. Näistä noin kymmenessä kohteessa rungon värähtelyn vaakavärähtely vahvistuu perustuksen vaakavärähtelyyn nähden 3–4-kertaiseksi ja yksittäinen suurin kerroin on kahdeksan. Kaikissa tapauksissa resonanssia ei kuitenkaan havaittu, sillä ilmiö edellyttää taajuudeltaan hyvin kapeakaistaista herätettä ja rungon ominaistajuuden sattumista tälle alueelle. Perustuksen vaakavärähtelyn suurennuskertoimenä on resonanssitarkastelussa (kohta 4.5) ehdotettu käytettäväksi arvoa 4,0, vaikka muutamassa yksittäistapauksessa lasketut arvot ovat hieman epävarmalla puolella. Maaperän pystyvärähtelyn perusteella lasketun ja mitatun värähtelyn vertailussa tulosten hajonta on suuri, mikä osoittaa, että perustuksen pystyvärähtely ei kuvaa hyvin rungon vaakavärähtelyä. Niissäkin tapauksissa, joissa mitattu perustuksen pystyvärähtely on ollut pieni, mitattu rungon vaakavärähtely on ollut suuri. Maaperän pystyvärähtely ei siten vaikuta yhtä merkittävältä rungon resonanssia aiheuttavalta tekijältä kuin perustuksen vaakavärähtely, ja siksi maaperän pystyvärähtelyyn perustuva arviointi tehdään kohdassa 4.5 vain yleiseen voimistumiseen (suurennuskerroin 1,5) perustuen.

Viiden betonirunkoisen, pehmeälle maaperälle paaluille rakennetun kerrostalokohteen (3–6 kerrosta) tulosten perusteella tasaiseen värähtelyn voimistumiseen (kerroin 1,5) perustuva arvio antaa parhaat tulokset ja kohdan 4.5 resonanssitarkasteluun perustuva mitoitus johtaa suureen ylimitoitukseen. Resonanssin mahdollisuutta ei voi kuitenkaan tulosten perusteella poissulkea. Värähtelyn taajuussisältöön perustuvan vertailun perusteella rungon resonanssin merkitys voi myös kerrostaloilla olla epäedullisessa tilanteessa suuri.

Kohdassa 4.6 esitetty rakennuksen lattian keskialueen pystyvärähtelyn arviointimenetelmä soveltuu tuloksien perusteella käytettäväksi sekä kerros- että pientaloille. Saatujen tulosten perusteella tasaiseen värähtelyn voimistumiseen (kerroin 1,5) perustuva mitoitus johtaa yleensä parhaaseen tulokseen, mutta resonanssitarkastelua ei silti voi unohtaa. Resonanssi-ilmiön löytäminen mittauksilla on hyvin sattumanvaraista, sillä lattioiden ominaistajuus voi vaihdella laajalla alueella ja ilmiö edellyttää taajuudeltaan hyvin kapeakaistaista herätettä. Yhteensä 24 tarkastellusta lattiasta vain 11 on kohteissa, joissa maaperän dominoiva taajuus sattuu lattian ominaistajuuden vaihteluvälille 10–30 Hz. Näistä neljässä lattiassa havaittiin voimakas resonanssi-ilmiö. Nämä neljä lattiaa ovat kahdesta eri kerrostalokohteesta. Näissä kohteissa lattian keskialueen pystyvärähtely on 4–9-kertainen lattian reunalta mitattuun pystyvärähtelyyn nähden. Tulos tukee kohdassa 4.6 esitetyn suurennuskertoimen 6,0 käyttöä resonanssimitoituksessa.

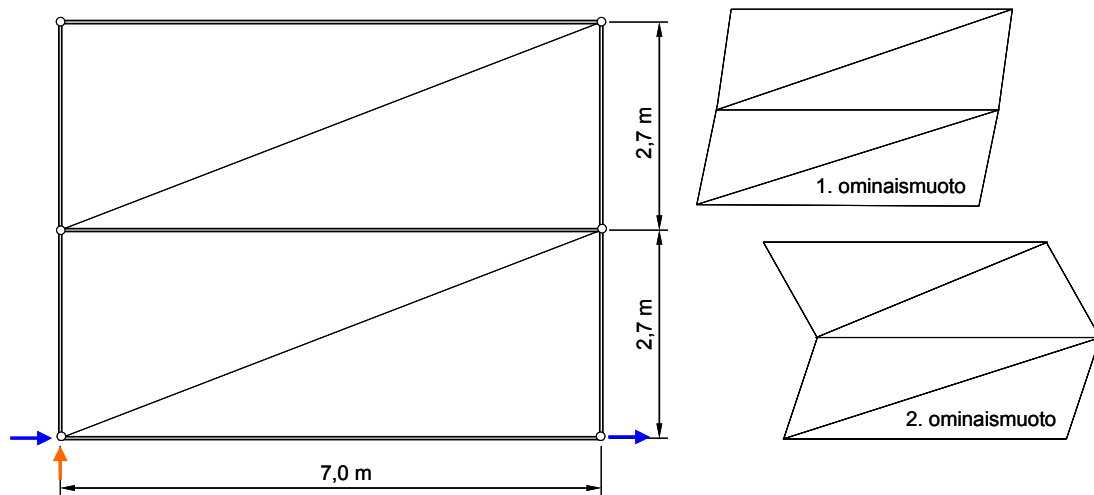
6. Vertailu FE-laskennan tuloksiin

6.1 Tilastomatemaattinen tarkastelu

Laskennassa on käytetty elementtimenetelmään (FEM, Finite Element Method) perustuvaa Abaqus-ohjelmistoa. Tämän yksinkertaiseen tasokehämalliin perustuvan FE-laskennan tarkoituksena on arvioida, miten rungon dynaamiset ominaisuudet vaikuttavat 2-kerroksisen pientalon rungon vaakavärähtelyyn. Lisäksi tilastomatemaattisella tarkastelulla on arvioitu, millaista vahvistumiskerrointa suunnittelussa tulisi käyttää.

6.1.1 Laskentamalli

Tarkastelukohteena on kaksikerroksinen tasokehä, jossa alaosa kuvaa pientalon ensimmäistä kerrosta ja yläosa toista kerrosta (kuva 29). Vaakapalkit kuvaavat toisen asuin-kerroksen välipohjaa ja kattotasoa. Vinot sauvat kuvaavat seinien levyjäykistyksestä tai vinositeistä aiheutuvaa rungon vaakajäykkyyttä. Vaakapalkit on kuvattu palkkielementeillä, muut rakenneosat on kuvattu sauvaelementeillä. Kaikki erisuuntaiset osat ovat keskenään samanlaisia. Kaikki liitokset on kuvattu nivelellisinä. Mallissa rakenteen massa on jakautunut likimain tasan molemmille vaakapalkeille.



Kuva 29. Esimerkkitapauksen laskennassa käytetty kaksikerroksista pientaloa kuvaava kehämalli ja sen kaksi alinta värähtelymuotoa.

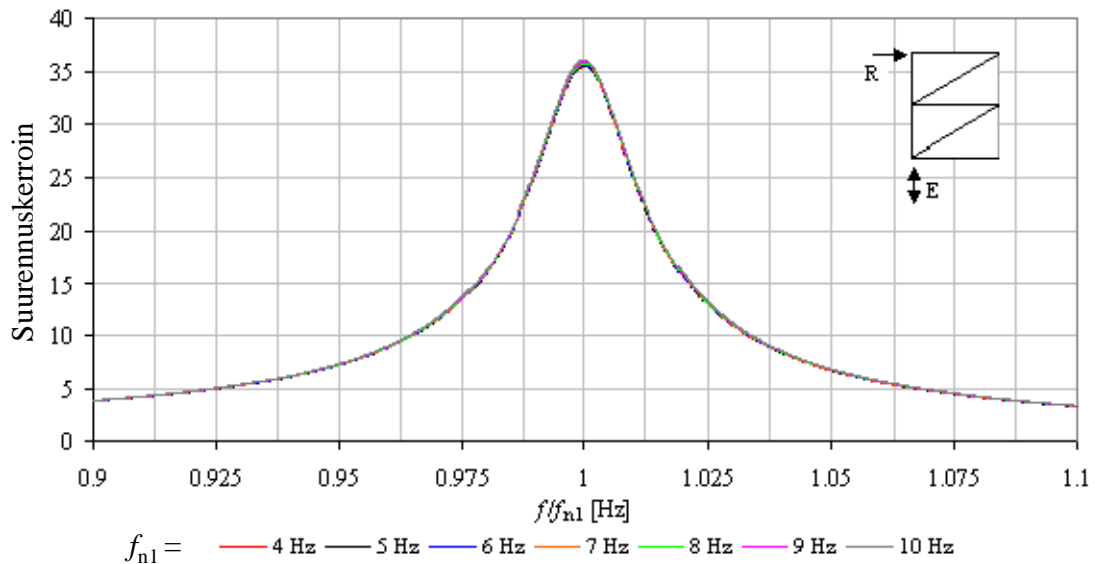
Esitetyllä mallilla voidaan kuvata kehän vaakavärähtelyn kaksi ominaismuotoa (kuva 29), joilla molemmilla on oma ominaistaajuutensa. Ensimmäisessä muodossa vaakatasot värähtelevät samaan suuntaan ja toisessa eri suuntiin. Rakennuksen vaakavärähtelyn voi aiheuttaa joko perustuksen pysty- tai vaakavärähtely. Mallissa vaakavärähtelyn on oletettu vaikuttavan samanlaisena kehän molempien pilareiden alapäähän. Pystyvärähtelyn

on oletettu vaikuttavan vain toiseen pilariin. Vinositeiden jäykkyyttä muuttamalla on voitu muuttaa ensimmäistä ja toista ominaisuutta vastaavia rungon ominaisuuksia. Ominaisuuksien lisäksi mallilla on arvioitu myös rakenteen vaimennuksen suuruuden merkitystä.

6.1.2 Rakenteen dynaamisten ominaisuuksien vaikutus

Mallilla on laskettu ns. sinipyyhkäisyanalyysiä käyttäen, miten eritaajuuksinen värähtely vahvistuu kehän alemmassa ja ylemmässä vaakatasossa. Sinipyyhkäisyanalyysissä lasketaan vastevärähtely (R) mallin eri pisteissä, kun herätevärähtelyn (E) taajuutta muutetaan portaattomasti. Laskentatuloksena saatavaa mallin dynaamisten ominaisuuksien vaikutusta rakenteen värähtelyyn kuvataan suurennuskertoimella, joka on vaste- ja herätevärähtelyn suuruuksien suhde.

Kuvassa 30 on esimerkkinä suurennuskertoimen kehän ylemmän tason vaakavärähtelylle, kun herätteenä on toisen pilarin alapään pystyvärähtely. Kuva osoittaa, että suurennuskertoimen kasvaa resonanssi-ilmiön vuoksi voimakkaasti, kun herätevärähtelyn taajuus f on lähellä kehän alemmaa ominaistajuutta f_{n1} . Suurennuskertoimen suuruus riippuu voimakkaasti vaimennuksesta (kuvassa 1 %) ja myös kehän mittasuhteista, mutta on kuvan 30 esitystavalla riippumaton mallin ominaistajuudesta f_{n1} .







Kuva 30. Esimerkki perustuksen pystyvärähtelystä aiheutuvasta vaakavärähtelyn suurennuskertoimesta, kun herätetaajuus f on lähellä kehän alemmaa ominaistajuutta f_{n1} ja vaimennus on 1 %.

Taulukkoon 8 on koottu yhteenveto laskennan tuloksista. Esimerkkitaapauksessa suurennuskertoimen arvoa koskevat päätulokset ovat seuraavat:

- Kun vaimennus on 4 % ja kyse on 1. ominaisuuden mukaisesta värähtelystä, perustuksen vaakavärähtelystä aiheutuva rungon vaakavärähtelyn suurennuskerroin on enimmillään suuruusluokkaa 15 ylempällä vaakatasolla ja 10 alemmalla vaakatasolla.
- Kun vaimennus on 4 % ja kyse on 1. ominaisuuden mukaisesta värähtelystä, perustuksen pystyvärähtelystä aiheutuva rungon vaakavärähtelyn suurennuskerroin on enimmillään 9 ylempällä vaakatasolla ja 6 alemmalla vaakatasolla.
- Kun vaimennus on 4 %, suurennuskerroin on 2. ominaisuuden mukaisessa värähtelyssä suurimmillaankin vain 2,5. Arvo on pieni ensimmäisen ominaisuuden suurimpaan arvoon 15 nähden. Tuloksen perusteella ensimmäisen ominaisuuden mukainen vaakavärähtely on resonanssissa erittäin paljon merkittävämpi kuin toisen ominaisuuden mukainen värähtely.
- Suurennuskerroin voi edellä tarkasteltuun keskimääräiseen 4 %:n vaimennustapaukseen nähden olla huomattavasti suurempi tai myös pienempi, sillä suurennuskertoimen suuruus on kääntäen verrannollinen vaimennukseen (taulukko 8).

Taulukko 8. Suurennuskertoimen suurin arvo alemmalla ja ylempällä tasolla eri vaimennuksen arvoilla, kun vaak- tai pystysuuntainen heräte (taajuus f) sattuu 1. tai 2. ominaisuuttoa vastaavalle ominaistajuudelle (f_n).

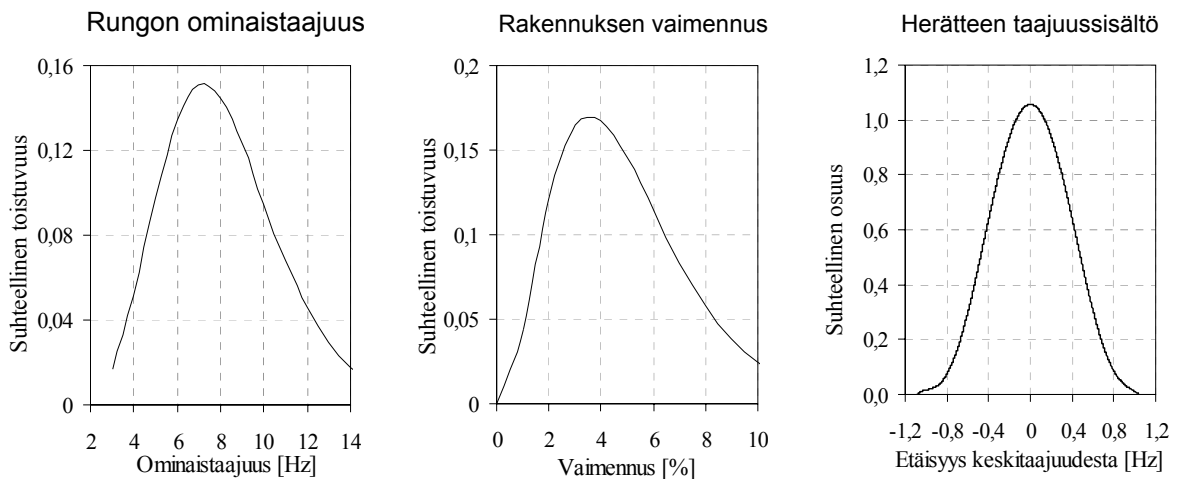
Heräte (E) ja vaste (R)	1. ominaisuuto ($f = f_{n1}$)				2. ominaisuuto ($f = f_{n2}$)			
	1 %	2 %	4 %	8 %	1 %	2 %	4 %	8 %
	40	20	10	5	11	5,5	2,2	1,1
	60	30	15	7,5	10	5,0	2,5	1,2
	24	12	6	3	3,6	1,8	0,9	0,45
	36	18	9	4,5	3,2	1,6	0,8	0,4

6.1.3 Tilastomatemattinen tarkastelu

Yleensä rakennuksen rungon ominaistajuutta ja vaimennusta ei tunneta tai pystytäkään varmuudella määrittämään. Vaikka heräte olisi lisäksi mitattu ja se olisi näennäisesti vakiotajuuksista, heräte ei lyhyelläkään aikavälillä koostu pelkästään yhdestä taajuuskomponentista. Siksi tarvitaan tilastomatemattisesti määritettyä värähtelyn suurennus-

kerrointa. Suunnittelussa pyritään yleensä siihen, että annettu ehto on voimassa noin 95 %:n todennäköisyydellä.

Koska edellisen kohdan tarkastelu on osoittanut, että ensimmäisen ominaisuuden mukainen vaakavärähtely on paljon merkittävämpi kuin toisen ominaisuuden mukainen vaakavärähtely, tässä tarkastelussa on rajoitettu ensimmäisen ominaisuuden mukaiseen värähtelyyn. Tarkastellun kaksikerroksisen rakennemallin lähtökohtana on ollut, että rungon alimman ominaistajuuden ja vaimennuksen tilastolliset jakaumat sekä herätteen koostuminen eri taajuuskomponenteista ovat kuvan 31 mukaiset. Ominaisuuden jakauma perustuu liitteen B kuvaan 14 ja vaimennuksen jakauma liitteen B kuvaan 15. Herätetaajuuden taajuussisältö perustuu VTT:n mittauksiin savimaalosuhteissa, jolloin suurimman värähtelyn ajanhetkellä (aikaikkuna 1 s) maaperän värähtelyn keskitajuus on usein 4–10 Hz:n taajuusalueella ja värähtely on hyvin kapeakaistaista.

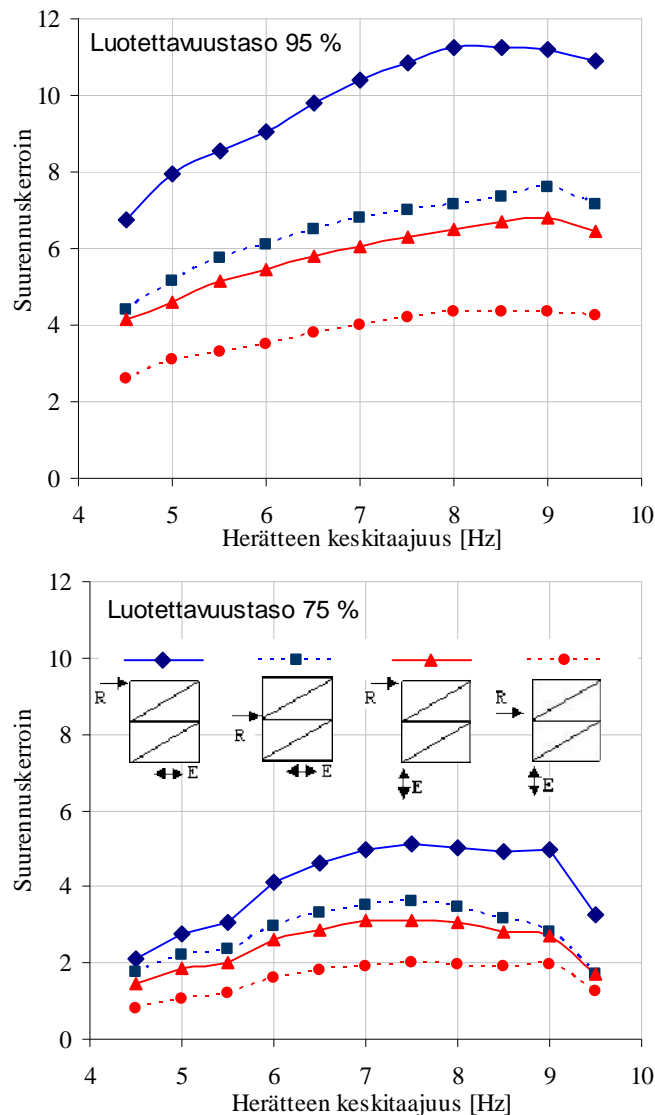


Kuva 31. Laskennassa käytetty rungon ominaistajuuden ja vaimennuksen tilastollinen jakauma sekä herätteen taajuussisältö.

Kuvaan 32 on koottu tilastomatemattiseen tarkasteluun perustuvat suurennuskertoimet maaperän värähtelyn keskitajuuden funktiona. Esimerkkilaskennan tulokset soveltuvat pääasiassa kaksikerroksiselle pientalolle, joka on perustettu savimaalle ja jonka rungon alinta ominaistajuutta ja vaimennusta ei tunneta. Pätulokset ovat seuraavat:

- Perustuksen vaakavärähtelystä aiheutuvalla rungon vaakavärähtelylle suurennuskertoimen suunnitteluarvo (95 %:n luotettavuustaso) on enimmillään 7–11 ylemmällä vaakatasolla (kattotaso) ja 4–8 alemmalla vaakatasolla (toinen asuinkerros). Maksimiarvot esiintyvät, kun perustuksen vaakavärähtely on 7–10 Hz.
- Perustuksen pystyvärähtelystä aiheutuvalla rungon vaakavärähtelylle suurennuskertoimen suunnitteluarvo (95 %:n luotettavuustaso) on enimmillään 4–7 ylemmällä vaakatasolla (kattotaso) ja 3–4 alemmalla vaakatasolla. Maksimiarvot esiintyvät, kun herätteen keskitajuus on 7–10 Hz.

- Jos luotettavuustaso laskettaisiin arvoon 75 %, suurennuskertoimet pienenisivät noin puoleen edellä esitetyistä arvoista.



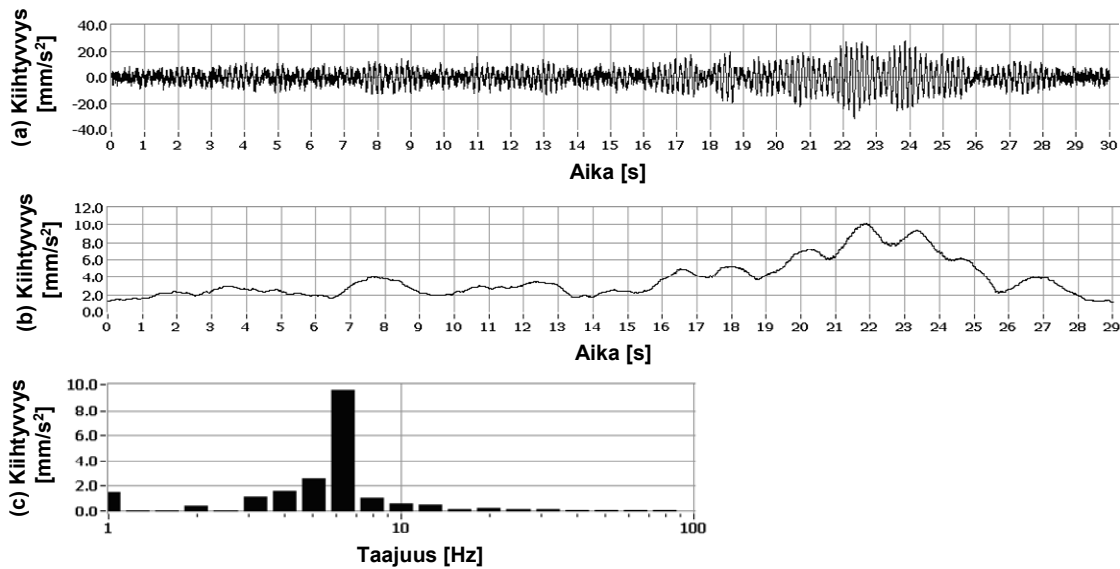
Kuva 32. Suurennuskertoimen arvo alemmalla ja ylemmällä tasolla (R), kun vaaka- tai pystysuuntaisen herätteen (E) keskitaajuus tunnetaan. Perusteena on yläkuvassa luotettavuustaso 95 % ja alakuvassa 75 %.

6.2 Mitattuun herätteeseen perustuva tarkastelu

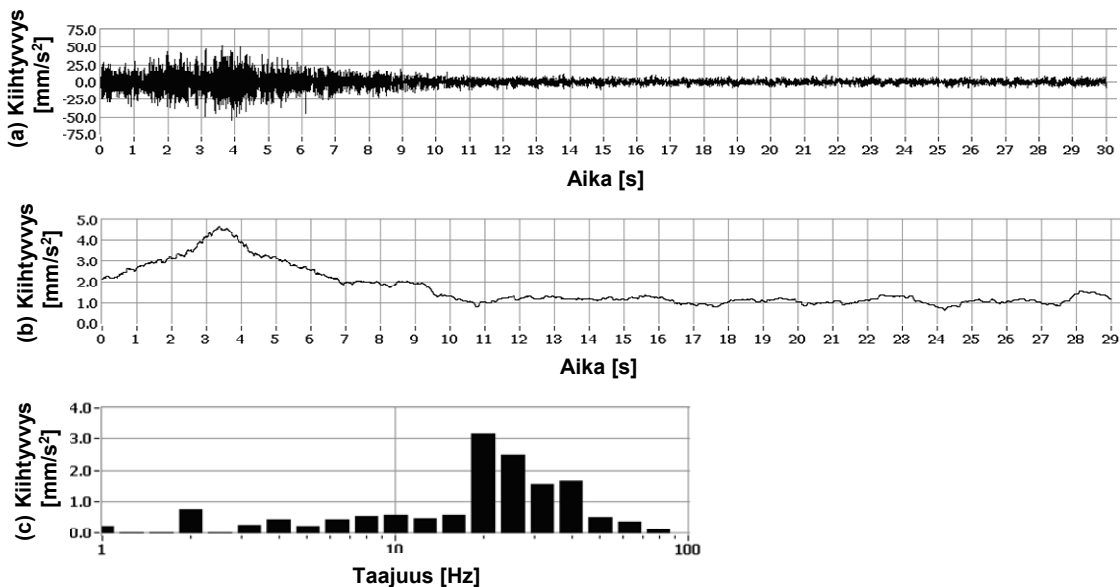
Tämän esimerkitapauksen laskennan tarkoituksena on simuloida kahden todellisen mitatun herätteen vaikutusta yksinkertaisen kehämallin vaakavärähtelyyn. Toinen herätteisistä on savimaasta ja toinen soramaasta mitattu värähtelynäyte.

6.2.1 Mitatut herätteet

Kuvissa 33 ja 34 esitetään mitatut värähtelynäytteet. Näyte A on matalataajuuksinen ja kapeakaistainen. Kapeakaistaisessa värähtelyssä dominoi kapea taajuusalue. Näyte B on laajakaistainen, ja siinä dominoivat edellistä korkeammat värähtelytaajuudet. Näyte A on tyypillinen savimailla ja näyte B on tyypillinen hiekka- ja soramailla.



Kuva 33. Laskennassa käytetty heräte A: (a) mitattu värähtely, (b) värähtelyn taajuuspainotettu tehollisarvo ja (c) värähtelyn taajuussisältö 1/3-oktaavikaistoittain suurimman värähtelyn ajanhetkellä ($t = 21,9$ s, aikaikkuna on 1 s).



Kuva 34. Laskennassa käytetty heräte B: (a) mitattu värähtely, (b) värähtelyn taajuuspainotettu tehollisarvo ja (c) värähtelyn taajuussisältö 1/3-oktaavikaistoittain suurimman värähtelyn ajanhetkellä ($t = 3,3$ s, aikaikkuna on 1 s).

6.2.2 Pientalon runko jäykällä perustuksella

Kaksikerroksista pientaloa kuvaava laskentamalli on sama kuin kuvassa 29. Mallissa vaakavärähtelyn on oletettu vaikuttavan samanlaisena kehän molempien pilareiden alapäähän. Pystyvärähtelyn on oletettu vaikuttavan vain toiseen pilariin. Vaimennuksena on tässä esimerkissä käytetty arvoa 3 %.

Tarkasteltavissa tapauksissa vinosauvojen jäykkyydet on valittu siten, että mallissa 1 kehän alin ominaistajuus 6,7 Hz sattuu kapeakaistaisen herätteen A dominoivalle taajuusalueelle (kuva 33) ja mallissa 2 toinen ominaistajuus 21 Hz sattuu laajakaistaisen herätteen B dominoivalle taajuusalueelle 20–40 Hz (kuva 34). Ominaisaajuudet esitetään taulukossa 9.

Taulukko 9. Kehämallien kuvassa 29 esitettyjä ominaismuotoja vastaavat ominaistajuudet.

	Malli 1	Malli 2
1. ominaistajuus	6,7 Hz	8,4 Hz
2. ominaistajuus	17 Hz	21 Hz

Molemmilla malleilla on laskettu, käyttäen herätettä A ja B sekä pysty- että vaakasuunnassa, mikä on suurimman vastevärähtelyn painotetun tehollisarvon suhde herätevärähtelyn painotettuun tehollisarvoon. Taulukossa 10 esitetään värähtelyn suurennuskerroin eri tapauksissa.

Taulukko 10. Värähtelyn suurennuskertoimen arvot mallien 1 ja 2 eri tasoilla, kun heräte A tai B (kuva 29) vaikuttaa vaaka- tai pystysuunnassa.

	Malli 1				Malli 2			
	Vaakaeräte		Pystyheräte		Vaakaeräte		Pystyheräte	
	A	B	A	B	A	B	A	B
1. vaakataso (alin)	6,6	1,4	3,8	0,8	2,1	1,7	1,0	0,7
2. vaakataso	9,7	2,0	5,9	1,2	2,6	1,9	1,8	1,0

Tulokset osoittavat, että kapeakaistaisella herätteellä A suurin vahvistuskerroin saadaan mallilla 1, jonka alin ominaistajuus 6,7 Hz sattuu herätteen A dominoivalle taajuusalueelle. Ylemmällä vaakatasolla suurennuskerroin on vaakaherätteellä 9,7 ja pystyherätteellä

5,9. Myös mallilla 2 (ominaistaajuus on 8,4 Hz) tapahtuu värähtelyn voimistumista, mutta voimistuminen on vähäisempää (suurennuskerroin enintään 2,6).

Laajakaistaisella herätteellä B, jolla dominoivat 20–40 Hz:n taajuudet, värähtelyn voimistuminen on huomattavasti vähäisempää kuin herätteellä A. Suurin vaakasuuntaisen herätteen vahvistuskerroin on molemmilla malleilla suuruusluokkaa 2 ja esiintyy ylempällä vaakatasolla.

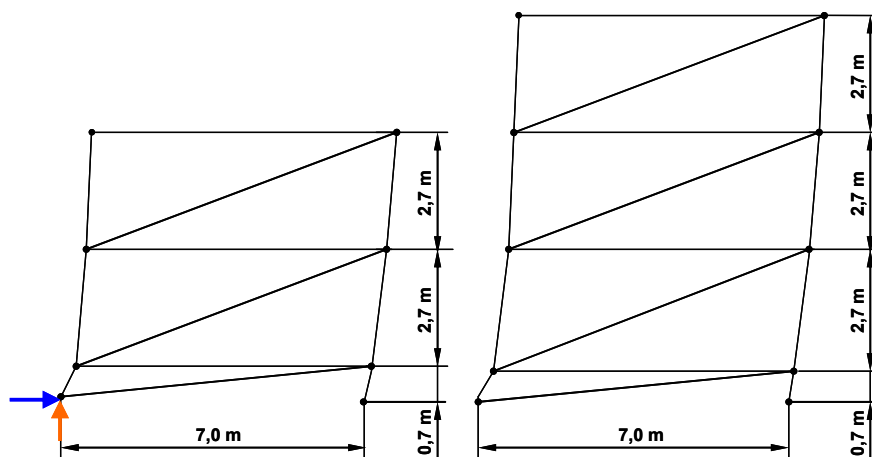
Tuloksia arvioitaessa on muistettava, että esitetyt suurennuskertoimet perustuvat 3 %:n vaimennukseen ja että suurennuskertoimen suuruus on kääntäen verrannollinen vaimennukseen. Lisäksi suhteellisen laajakaistaisellakin herätteellä vahvistuskertoimen suuruus vaihtelee jossain määrin ja riippuu tapauskohtaisesti taajuusjakauman leveydestä ja muodosta.

6.2.3 Pientalon runko joustavalla perustuksella

Rakennusta ja vaakasuunnassa joustavaa perustusta kuvaava yksinkertaistettu laskentamalli esitetään kuvassa 35. Mallin alataso kuvaa talon alapohjaa, välitasot välipohjia ja ylätasoa kattoa. Vinot sauvat kuvaavat seinien levyjäykistyksestä tai vinositeistä aiheutuva rungon vaakajäykkyyttä. Myös perustuksen jousto on otettu huomioon vinositeellä. Vaakapalkit on kuvattu palkkielementeillä, muut rakenneosat on kuvattu sauvaelementeillä. Kaikki erisuuntaiset osat ovat keskenään samanlaisia. Myös perustuksen joustoa kuvaavan vinositeen aksiaalinen jäykkyys on sama kuin muilla vinositeillä. Kaikki liitokset on kuvattu nivelellisinä.

Rakennuksen vaakavärähtelyn voi aiheuttaa joko perustuksen pysty- tai vaakavärähtely. Mallissa on sekä vaaka- että pystysuuntaisen herätteen oletettu vaikuttavan vain vasemman pilariin (kuva 35).

Esitetyllä mallilla voidaan kuvata kehän vaakavärähtelyn muutamaa alinta ominaismuotoa. Kuvassa 35 on mallien alin ominaismuoto. Vinositeiden jäykkyyttä muuttamalla voidaan vaikuttaa kehän vaakavärähtelyn ominaistaajuuksiin. Tarkasteltavissa tapauksissa vinosauvojen jäykkyydet on valittu siten, että kaksikerroksisen kehän alin ominaistaajuus 6,7 Hz sattuu herätteen A dominoivalle taajuusalueelle. Muut ominaistaajuudet esitetään taulukossa 11. Vaimennuksena on tässä esimerkissä käytetty arvoa 3 %. Mallilla on laskettu käyttäen herätettä A ja B sekä pysty- että vaakasuunnassa, mikä on suurimman vastevärähtelyn painotetun tehollisarvon suhde herätevärähtelyn painotettuun tehollisarvoon. Taulukossa 12 esitetään värähtelyn suurennuskerroin eri tapauksissa.



Kuva 35. Vaakasuunnassa joustavalla perustuksella olevan kaksi- ja kolmikerroksisen pientalon kehämallit ja alinta ominaistajuutta vastaavat ominaisuodot.

Taulukko 11. Yksi- ja kaksikerroksisen kehämallin vaakavärähtelyn alimmat ominaistajuudet.

	2-krs-kehämalli	3-krs-kehämalli
1. ominaistajuus	6,7 Hz	5,1 Hz
2. ominaistajuus	17 Hz	13 Hz
3. ominaistajuus	21 Hz	21 Hz

Taulukko 12. Värähtelyn suurennuskertoimen arvot 1-krs ja 2-krs -kehämallien eri tasoilla, kun heräte A tai B (kuvat 33 ja 34) vaikuttaa vaaka- tai pystysuunnassa.

	2-krs-kehämalli				3-krs-kehämalli			
	Vaakaeräte		Pystyheräte		Vaakaeräte		Pystyheräte	
	A	B	A	B	A	B	A	B
1. vaakataso (alin)	2,3	2,7	1,2	0,3	1,4	1,8	1,1	0,7
2. vaakataso	8,2	2,4	4,5	0,8	2,8	1,9	1,9	1,2
3. vaakataso	11	2,0	5,8	1,2	3,7	2,3	2,4	1,5
4. vaakataso (ylin)	-	-	-	-	4,0	2,8	2,5	1,7

Tulokset osoittavat, että suurin kerroin aiheutuu herätteestä A ja esiintyy 2-kerrosmallilla kehän ylemmällä tasolla. Syynä on se, että alin ominaistajuus 6,7 Hz sattuu herätteen A dominoivalle taajuusalueelle (kuva 33). Kerroin on 11, kun herätteenä on vaakavärähtely, ja 5,8, kun herätteenä on pystyvärähtely. Koska 3-kerrosmallilla ominaistajuuden 5,1 Hz alueella herätevärähtelyn suuruus on noin neljäsosa dominoivan taajuusalueen värähtelystä, myös ylimmän tason suurennuskertoimet ovat vain noin kolmasosa 2-kerrosmalliin nähden.

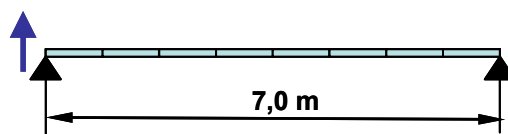
Herätteen B tapauksessa suurin kerroin 2,8 aiheutuu vaakaherätteestä ja esiintyy 3-kerrosmallin ylimmällä tasolla. Arvo on vain noin neljäsosa vastaavasta herätteellä B lasketusta 2-kerrosmallin arvosta. Pienempi arvo johtuu siitä, että ensimmäisen 5,1 Hz:n ja toisen 13 Hz:n ominaistajuuden kohdalla herätevärähtelyn suuruus on vain murto-osa dominoivan taajuusalueen värähtelystä (kuva 34). Kerroin on kuitenkin yllättävän korkea ottaen huomioon, että 1. ja 2. ominaistajuus eivät satu dominoivalle taajuusalueelle. Kerrointa kasvattaa se, että herätevärähtelyn dominoiva taajuusalue sattuu lähelle kolmatta 21 Hz:n ominaistajuutta.

Esimerkkilaskelma osoittaa lisäksi sen, että perustuksen jouston vuoksi värähtelyn suuruus voi voimistua myös rakennuksen alapohjan tasolla. Esimerkin tapauksessa suurin kerroin 2,7 on saatu herätteestä B 2-kerrosmallilla. Huomattava on myös, että kyseisessä tapauksessa alimman tason kerroin on muiden kerrosten arvoa suurempi. Syynä lienee se, että herätevärähtelyn dominoiva taajuusalue (kuva 34) sattuu lähelle 2-kerroskehän kolmatta 21 Hz:n ominaistajuutta.

Edellä esitettyjä tuloksia arvioitaessa on muistettava, että esitetyt suurennuskertoimet voisivat edellä tarkasteltuun 3 %:n vaimennustapaukseen nähden olla huomattavasti suurempia tai myös pienempiä, sillä suurennuskertoimen suuruus on kääntäen verrannollinen vaimennukseen.

6.2.4 Lattian värähtely

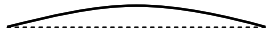
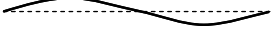

Lattian värähtelyä on kuvattu palkkielementeistä muodostetulla kuvan 36 mukaisella yksinkertaisella laskentamallilla. Malli koostuu kahdeksasta elementistä. Mallissa pystysuuntaisen herätteen on oletettu vaikuttavan vain palkin toiseen päähän. Vaimennuksena on käytetty arvoa 3 %.



Kuva 36. Lattian laskentamalli.

Tarkasteltavissa tapauksissa palkin jäykkyydet on valittu siten, että mallissa 1 palkin alin ominaistajuus 6,7 Hz sattuu herätteen A dominoivalle taajuusalueelle (kuva 33), mallissa 2 toinen ominaistajuus 21 Hz sattuu herätteen B dominoivalle taajuusalueelle (kuva 34) ja mallissa 3 ensimmäinen ominaistajuus sattuu herätteen B dominoivalle taajuusalueelle. Muita ominaistajuuksia on taulukossa 13.

Taulukko 13. Lattiamallien alimmat ominaistajuudet.

	Oinaismuoto	Malli 1	Malli 2	Malli 3
1. ominaistajuus		6,7 Hz	5,4 Hz	21 Hz
2. ominaistajuus		26 Hz	21 Hz	82 Hz
3. ominaistajuus		56 Hz	45 Hz	177 Hz

Mallilla on laskettu käyttäen pystysuuntaista herätettä A ja B, mikä on suurimman vastevärähtelyn painotetun tehollisarvon suhde herätevärähtelyn painotettuun tehollisarvoon. Taulukossa 14 esitetään värähtelyn suurennuskerroin eri tapauksissa.

Taulukko 14. Värähtelyn suurennuskertoimen arvot palkin keskellä ja 1/4-pisteissä, kun heräte A tai B (kuvat 33 ja 34) vaikuttaa pystysuunnassa palkin toiseen päähän.

	Malli 1		Malli 2		Malli 3	
	A	B	A	B	A	B
Keskipiste	5,2	1,1	2,2	1,3	0,5	3,9
Vasen 1/4-piste	3,9	2,1	1,3	2,0	0,7	2,6
Oikea 1/4-piste	3,6	2,1	1,6	2,0	0,3	2,8

Tulokset osoittavat, että kapeakaistaisella herätteellä A suurin vahvistuskerroin 5,2 saadaan mallilla 1, jonka alin ominaistajuus 6,7 Hz sattuu herätteen A dominoivalle taajuusalueelle. Myös mallilla 2 (ominaistajuus 5,4 Hz) tapahtuu vähäisempää värähtelyn voimistumista, mutta mallilla 3 palkin keskialueen värähtelyt vaimenevat.

Laajakaistaisella herätteellä B, jolla dominoivat 20–40 Hz:n taajuudet, suurin vahvistuskerroin 3,9 saadaan odotetusti mallilla 3, jonka alin ominaistajuus on 21 Hz. Myös malleilla 1 ja 2 värähtelyt voimistuvat 1/4-pisteissä jonkin verran (suurennuskerroin 2,0–2,1), sillä mallin 2. ominaistajuus (21–26 Hz) sattuu herätteen dominoivalle taajuusalueelle.

Tuloksia arvioitaessa on muistettava, että esitetyt suurennuskertoimet perustuvat 3 %:n vaimennukseen ja että suurennuskertoimen suuruus on kääntäen verrannollinen vaimennukseen.

6.3 Yhteenveto FEM-laskennan tuloksista

Rungon värähtelyn tilastomatemaattisen tarkastelun lähtökohtana on kaksikerroksisen pientalon tasokehämalli ja sen resonanssi matalataajuuksisen herätteen kanssa. Kehän alempi vaakataso kuvaa välipohjaa ja ylempi taso kattorakennetta. Rungon ominaistajuudelle ja vaimennukselle on oletettu kirjallisuudesta löydetty tilastomatemaattinen jakauma, jonka keskiarvot sattuvat 6–8 Hz:n ja 3–4 %:n alueelle. Herätteen on oletettu olevan hyvin kapeakaistaista (vaihteluväli noin $\pm 0,5$ Hz). Vaaka- tai pystysuunnassa vaikuttavan herätteen on oletettu kohdistuvan rakennuksen toiselle sivulle.

Tilastomatemaattisen tarkastelun perusteella perustuksen vaakaherätteestä aiheutuvalle rungokvärähtelylle suurennuskertoimen suunnitteluarvon (95 %:n luotettavuustaso) tulisi olla kattotasolla (ylempi taso) 7–11 ja välipohjatasolla 4–8 (alempi vaakataso). Pystyherätteestä aiheutuvalle rungokvärähtelylle suurennuskertoimen suunnitteluarvon (95 %:n luotettavuustaso) tulisi olla kattotasolla 4–7 ja välipohjatasolla 3–4. Maksimi-arvot esiintyvät, kun perustuksen vaakavärähtely on 7–10 Hz.

Vertailulaskelmia on tehty myös mitatulla herätteellä. Aluksi kehämalli kalibroitiin siten, että sen ominaistajuus 6,7 Hz sattuu mitatun kapeakaistaisen herätteen dominoivalle taajuusalueelle. Käytetty vaimennus on 3 %. Ominaistaajuus ja vaimennus vastaavat tilastomatemaattisen tarkastelun keskimääräisiä arvoja. Perustuksen vaakaherätteestä aiheutuvalle rungokvärähtelylle suurennuskerroin on kattotasolla 9,7 ja välipohjatasolla 6,6. Pystyherätteestä aiheutuvalle rungokvärähtelylle suurennuskerroin on 5,9 ja välipohjatasolla 3,8. Tulokset tukevat tilastomatemaattisen tarkastelun tuloksia. Kun mallin ominaistajuus kasvatettiin 8,4 Hz:iin, vaaka- ja pystyherätteen suurennuskertoimet kattotasolla pienenevät arvoihin 2,6 ja 1,8.

Kapeakaistaisen herätteen lisäksi molemmissa malleissa käytettiin myös laajakaistaista herätettä, jonka dominoiva taajuusalue on 20–40 Hz. Tällöin herätetaajuus on lähempänä mallin toista ominaistajuutta (malli 1: 17 Hz, malli 2: 21 Hz). Lasketut pysty- ja vaakaherätteen suurimmat suurennuskertoimet esiintyvät kattotasolla ja ovat 2,0 ja 1,7.

Laskenta toistettiin samoilla kapea- ja laajakaistaisilla herätteillä myös vaakasuunnassa joustavalla perustuksella olevalle 2- ja 3-kerroksiselle mallille. Kapeakaistaisella herätteellä vaaka- ja pystyherätteen suurimmat suurennuskertoimet ovat kattotasolla 11 ja 5,8. Laajakaistaisella herätteellä vastaavat arvot ovat 2,8 ja 1,7. Arvot ovat samaa suu-

ruusluokkaa kuin jäykästi tuetulla 2-kerroksisella mallilla. Laskenta osoittaa lisäksi sen, että perustuksen jouston vuoksi värähtelyn suuruus voi voimistua myös rakennuksen alapohjan tasolla.

Myös lattian käyttäytymistä tutkittiin FE-mallilla. Mallina on yksinkertainen palkki, jonka toiseen päähän vaikuttaa mitattu pystysuuntainen heräte. Käytetty vaimennus on 3 %. Kolmen eri mallin jäykkyydet on valittu siten, että palkin alin ominaistajuus 6,7 Hz sattuu kapeakaistaisen herätteen dominoivalle taajuusalueelle, toinen ominaistajuus 21 Hz sattuu laajakaistaisen värähtelyn taajuusalueelle tai ensimmäinen ominaistajuus 21 Hz sattuu laajakaistaisen värähtelyn taajuusalueelle. Tulokset osoittavat, että matalataajuuksisella herätteellä suurin vahvistuskerroin 5,2 esiintyy, kun alin ominaistajuus 6,7 Hz sattuu kapeakaistaisen herätteen dominoivalle taajuusalueelle. Laajakais-
taisella herätteellä, jolla dominoivat 20–40 Hz:n taajuudet, suurin vahvistuskerroin 3,9 saadaan mallilla, jonka alin ominaistajuus on 21 Hz.

Loppupäätelmä FE-laskennasta on, että jos kapeakaistaisen värähtelyn taajuussisältö sattuu rungon alimman ominaistajuuden alueelle, tulee suunnittelussa tehdä rungon resonanssitarkastelu, jossa rungon yläosan vaakavärähtely arvioidaan kertomalla perustuksen vaakavärähtelyn tehollisarvo suurennuskertoimella 7–11 ja perustuksen pystyvärähtelyn tehollisarvo kertoimella 4–7. Kertoimet ovat hieman suurempia kuin mittaustulosten perusteella on kohdassa 5.4.1 arvioitu. Jos perustus tehdään sivusuunnassa joustaville pilareille, pilarien jousto tulee ottaa huomioon suunnittelussa. Tulos tukee mittauksissa tehtyä havaintoa (kohta 5.3.1). Lattioille ei ole tehty tilastomatemattista tarkastelua, mutta mitatulla herätteellä tehdyt FE-laskelmat tukevat käsitystä, että myös lattioiden pystyvärähtelyn arvioinnissa käytettävän suurennuskertoimen arvon tulisi olla suuruusluokkaa 4–7. Arvio on hieman pienempi kuin mittaustulosten perusteella on arvioitu (kohta 5.5). Mitatulla herätteellä tehdyt FE-laskelmat osoittavat myös, että resonanssi ylempien ominaismuotojen kanssa on mahdollinen, mutta sen merkitys on huomattavasti vähäisempi kuin resonanssi ensimmäisen ominaismuodon kanssa.

7. Vertailu kirjallisuuslähteiden tuloksiin

Lähteessä Nordtest (1991) annetaan suuntaa antavia suurennuskertoimia rakennuksen lattian pystysuuntaisen ja rungon vaakasuuntaisen tärinän arvioimiseksi, kun lähtökohdiana on maaperän pystysuuntainen värähtely. Maaperän vaakasuuntaisen värähtelyn siirtymistä rakennuksen ei käsitellä. Tulokset perustuvat pieneen määrään Tanskassa mitattuja asuintaloja, joissa tärinä on aiheutunut junista.

Kerroin pystysuuntaisen värähtelyn siirtymiselle maaperästä perustuksiin on

- 0,79 (vaikutus –2 dB), kun kyseessä on pilariperustus
- 0,40 (–8 dB), kun kyseessä on anturoille valettu betonisokkeli (syvyys 1,5–3 m).

Kerroin pystysuuntaisen värähtelyn siirtymiselle perustuksista lattiaan on

- 4,0 (+12 dB), kun kyseessä on puisen pientalon ensimmäisen kerroksen puulattia
- 10 (+20 dB), kun kyseessä on puisen pientalon toisen kerroksen puulattia
- 2,8 (+9 dB), kun kyseessä on betonisen kerrostalon betonilattia.

Kerroin perustuksen pystysuuntaisen värähtelyn aiheuttamalle rungon vaakavärähtelylle on

- 1,8 (+5 dB), kun kyseessä on puisen pientalon ensimmäinen kerros
- 10 (+20 dB), kun kyseessä on puisen pientalon toinen kerros
- 1,1 (+1 dB), kun kyseessä on betonirunkoinen kerrostalo.

Esimerkiksi sokkeliperustukselle rakennetun kaksikerroksisen puutalon toisessa kerroksessa tulisi varautua lattian pysty- ja vaakasuuntaiseen tärinään, jonka suuruus $0,4 \cdot 10 = 4,0$ kertaa maaperän tärinä. Vastaava kerroin betonitalolla olisi $0,4 \cdot 2,8 = 1,1$.

Taulukossa 15 esitetään värähtelyn voimistuminen rakennuksessa lähteen Madshus et al. (1996) mukaan. Myös tässä tarkastelussa lähtökohdiana on maaperän pystysuuntainen värähtely. Jos maaperästä mitataan vain pystysuuntaiset värähtelyt, tulisi tulosten perusteella puolitoista- ja kaksikerroksisten pientalojen suunnittelussa varautua värähtelyyn, jonka suuruus on 4–5-kertainen maaperän pystyvärähtelyyn nähden. Tässä arvioissa suunnitteluarvon perusteena on ollut keskiarvo lisättynä kaksinkertaisella hajonnalla. Taulukossa esitetyt yksikerroksisen puutalon arvot edustavat lähinnä lattian värähtelyä. Sen perusteella maaperän värähtelyn suurennuskertoimen suunnitteluarvona tulisi latioilla käyttää arvoa 3–4.

Taulukossa 16 esitetään lähteen Hunaidi ja Tremblay (1997) mittaustuloksiin perustuva värähtelyjen vahvistuminen, kun värähtelyt siirtyvät maaperästä rakennuksen sisätiloihin.

Kyseessä on maantieliikenne, ja tulokset koskevat vain rakennuksen pystysuuntaisia värähtelyjä.

Taulukko 15. Maaperästä taloon siirtyvän värähtelyn suurennuskertoimet (Madshus et al. 1996).

	Tyypillinen norjalainen puutalo, yksikerroksinen		Tyypillinen norjalainen puutalo, kaksikerroksinen	
	Kertoimet (Madshus et al. 1996)	Keskiarvo	1,3	Keskiarvo
	Hajonta	1,0	Hajonta	1,2

Taulukko 16. Yhdeksästä pien- ja pienkerrostalosta mitattu maantielikenteen aiheuttaman värähtelyn suurennuskertoimet, kun siirrytään maaperästä perustukseen (per/maa), ensimmäiseen kerrokseen (1. krs/maa) ja toiseen kerrokseen (2. krs/maa).

	per/maa	1. krs/maa	2. krs/maa	1. krs/per	2. krs/per	Merkinnät
Keskiarvo	0,73	1,01	1,35	1,39	2,03	maa – maaperä
Hajonta	0,19	0,51	0,82	0,59	1,21	per – perustus
Minimiarvo	0,42	0,40	0,66	0,95	0,86	1. krs – 1. kerros
Maksimiarvo	1,02	2,54	3,13	3,14	4,33	2. krs – 2. kerros

Lähteen Nelson ja Saurenman (1987) mukaan lattioilla vahvistumiskertoimen on todettu yleensä olevan 1,8–5,6 (vahvistuminen 5–15 dB).

Huolimatta siitä, että kaikissa kirjallisuuslähteissä rungon värähtelyn arviointi perustuu pelkästään maaperän pystysuuntaiseen värähtelyyn, kirjallisuuden perusteella määritetyt rungon värähtelyn suurennuskertoimen suunnitteluarvot ovat samaa suuruusluokkaa kuin kohdassa 4.5 esitetty kerroin 4,0 rungon resonanssivärähtelylle. Myös lattian värähtelylle ehdotetut arvot ovat samaa suuruusluokkaa kuin kohdassa 4.6 esitetty kerroin 6,0 lattian resonanssivärähtelylle.

8. Keinot tärinähaittojen vähentämiseksi

Tärinähaittoja voidaan vähentää maankäyttöön, väyliin ja liikenteeseen sekä rakennuksiin kohdistuvilla toimenpiteillä. Suomessa riskialueita ovat pääasiassa savimaa-alueet. Tehokkain tapa on, että uusia alueita tai väyliä suunniteltaessa väylät ja asunnot pidetään riittävän etäällä toisistaan. Jos näin ei voida menetellä, voidaan rakennusten värähtelysuunnittelulla ja liikennerajoituksilla pienentää tärinästä aiheutuvia haittoja. Suomessa on kuitenkin paljon sellaisia alueita, joiden käyttö asuntorakentamiseen ei ole järkevää.

8.1 Maankäytön suunnittelu

Uusia alueita suunniteltaessa tehokkain tapa vähentää haittoja on välttää asuntorakentamista liikennetärinäalueelle. Mahdollinen tärinäalue kannattaa suunnitella pysäköintitai viheralueeksi tai rakentaa alueelle liikerakennuksia, joissa haitta on pienempi kuin häiriöttömyyttä edellyttävissä asuin-, majoitus- tai auditorio-tiloissa.

Seuraavat rakennustyyppikohtaiset havainnot perustuvat pääasiassa tärinämittauksista saatuun kokemukseen. Tarkastelun perusteena on yhteensä 36 mittauskohteesta saadut tulokset. Kohteista seitsemän on vähintään kolmikerroksisia kerrostaloja ja muut 29 ovat yksi- tai kaksikerroksisia omakoti- tai rivitalokohteita. Kaikki kerrostalokohteet ovat savikkoalueilta. Pientalokohteista seitsemän on hiekka- tai soramaa-alueella ja muut ovat savikkoalueilta. Tärinä on aiheutunut junaliikenteestä 22 kohteessa ja muissa kohteissa katuliikenteestä. Tuloksista voidaan tehdä seuraavat yleiset havainnot:

- Tuloksissa ei ole liikennetyypistä aiheutuvaa eroa. Jos eri liikennetyypistä mitattu maaperän värähtelyn hetkellinen maksimiarvo ja sen taajuussisältö ovat samat, myös rakennukseen siirtyvät värähtelyt ovat samat.
- Savimaille rakennetut kaksikerroksiset pientalot ovat mahdollisen rungon resonanssivärähtelyn vuoksi liikennetärinän suhteen riskialtimpia. Savimailla maaperän värähtely on kapeakaistaista ja sen taajuussisältö sattuu usein rungon ominaistaajuusalueelle. Yksikerroksisissakin taloissa voi rungon resonanssi aiheuttaa voimakasta tärinää seiniin ja kattoon kiinnitettyihin esineisiin, mutta sitä ei kuitenkaan yleensä pidetä värähtelysuunnittelun perusteena, koska tärinän ilmenemisestä aiheutuvat haitat ovat yleensä helposti estettävissä. Rungon resonanssivärähtely voi kuitenkin tuntua yksikerroksisenkin talon lattiassa, mikäli rakennus on rakennettu paaluille eikä siinä ole kellarikerrosta. Pientaloista turvallisimpia ovat yksikerroksiset rakennukset, joiden perustus ja lattia ovat maanvaraisia tai lattia on muuten suunniteltu niin jäykäksi, ettei resonanssivärähtelyä pääse syntymään. Kahden rakennuksen mittaus tulosten perusteella kaksikerroksisen rakennuksen rungon resonanssi voidaan estää, kun ainakin ensimmäisen kerroksen runko tehdään riittävän jäykäksi.

- Betonirunkoisilla kerrostaloilla ei mittauksissa pehmeillä savimaillakaan havaittu rungon resonanssi-ilmiötä, joten yli 5-kerroksisia kerrostaloja voidaan pitää tärinän suhteen lähes yhtä turvallisina kuin yksikerroksisia pientaloja. Vaikka rungon resonanssia ei 3–6-kerroksisten betonitalojen mittauksissa havaittu, matalissa kerrostaloissa rungon resonanssin mahdollisuus on kuitenkin olemassa ja siihen on syytä varautua. Kerrostaloissa mahdollisen tärinähaitan ilmeneminen on ongelmallista, koska se koskee suurta asukasmäärää. Kerrostaloista on mittauksissa havaittu, että mikäli rakennuksen vaakamitta on vähintään 30 m, maaperän vaakavärähtelyt siirtyvät merkittävästi huonommin rakennukseen. Yhden kerrostalokohteen mittaustulosten perusteella vinopaalutuksen käyttö ei poista, mutta saattaa kuitenkin huolellisesti suunniteltuna pienentää vaakavärähtelyn siirtymistä rakennukseen.
- Rakennuksen paalutuksella ei mittaustulosten perusteella voida pienentää maaperän vaakavärähtelyn siirtymistä rakennukseen, mutta paaluperustus voi kuitenkin pienentää pystyvärähtelyn siirtymistä rakennukseen, jos sokkeli on irrotettu hyvin maakontaktista. Mittauskohteissa ei kuitenkaan ollut rakennuksia, joissa sokkeli olisi nostettu irti maasta. Myöskään kellarikerroksen parantavaa vaikutusta ei tuloksista voi päätellä.
- Lattioiden resonanssivärähtely on rungon resonanssivärähtelyä harvinaisempi, mutta esiintyessään se voi olla yhtä merkittävä kuin rungon resonanssivärähtelykin. Savimailla maaperän dominoivat värähtelytaajuudet ovat yleensä niin alhaiset, että resonanssia ei pääse syntymään. Kovemmilla maaperillä resonanssivaara on olemassa, mutta koska lattioiden dynaamiset ominaisuudet vaihtelevat paljon ja maaperän värähtely on usein laajakaistaista, sen esiintyminen on satunnaista.

8.2 Väylä- ja liikennesuunnittelu

Uusien väylien suunnittelussa tehokkain tapa pienentää liikennetärinän haittoja on välttää rakentamista riskialueelle. Rakennusten läheisyydessä tulee myös välttää väylän rakenteen jäykkyyseroja, tieliikenteessä hidastetöyssyjä, siltoja, rumpuja yms. epäjatkuvuuskohtia, rautatieliikenteessä lisäksi mekaanisia kisko jatkoksia, vaihteita, tasoylikäytäviä jne. Hyvä teiden kunnossapito (kuopat, siltojen liikuntasumat, sadevesiviemärien kannet) vähentää epätasaisuuksista aiheutuvaa tärinää.

Pehmeillä maaperillä tehokkain rakenteellinen ratkaisu tärinän vaimentamiseksi on perustaa väylä paalulaatalle, joka pienentää tehokkaasti väylän pystyvärähtelyä. On oletettavaa, että paalulaatta pienentää hyvin myös vaakavärähtelyä, vaikka julkaistua varmistusta asialle ei ole tiedossa. Rautateillä maaperään siirtyvää värähtelyä voidaan vaimentaa myös kiskojen tai radan alle sijoitetuilla joustavilla vaimennusosilla tai vaimennusmatoilla. On kuitenkin huomattava, että kiskon alle asennettavat joustavat elementit toimivat vain yli 30–40 Hz:n taajuusalueella ja ratapölkkyjen tai radan alle asennettavat

vaimennusmatot vain yli 20–30 Hz:n taajuusalueella (FTA 2006). Kelluvalla laatalla tai kelluvalla sepelitäytteisellä kaukalolla vaimennusalue voi alkaa jo 10 Hz:stä. Kaikki nämä ratkaisut toimivat siis vain kovilla maaperillä, ja siksi niitä käytetään yleensä liikenteestä aiheutuvan runkomelun katkaisemiseen. Pehmeillä savimailla ne eivät kuitenkaan toimi, vaan voivat jopa kasvattaa tärinää.

Tärinän leviämisen estämiseksi on Suomessakin kokeiltu väylän ja rakennuksen väliin rakennettuja tärinänvaimennusseiniä. Vaimennusseiniä toiminta perustuu siihen, että niissä käytetyn materiaalin jäykkyys poikkeaa oleellisesti maaperän jäykkyydestä, seinä ulottuu riittävän syväälle ja värähtelyn heijastuminen vaimennusseinän alitse pintamaata kovemmassa kerroksesta on estetty. Tärinänvaimennusseiniä on kokeiltu ilmatäytteisinä, kumirouhetäytteisinä ja betonisina. Suomessa on lisäksi kokeiltu teräsponteista ja syvästabiloimalla rakennettuja vaimennusseiniä. Suomen kokeilut on tehty savimaa-alueilla, mutta muualla vaimennusseiniä on tutkittu yleensä kovemmillä maaperillä ja usein kiskoliikenteestä aiheutuvan runkomelun leviämisen estämiseksi. Nykykäsityksen mukaan tärinänvaimennusseinillä voidaan enimmillään puolittaa tärinän suuruus, ja siksi niitä on toistaiseksi kokeiltu lähinnä korjaavana toimenpiteenä rakennuksissa esiintyvän tärinähaitan pienentämiseksi. Vaimennusvaikutus on suurin välittömästi tärinäseinän takana.

Korjaavana, mutta usein vain tilapäisenä ratkaisuna voi olla mahdollista rajoittaa eniten tärinää aiheuttavien liikennevälineiden ajonopeutta tai liikennöintiä erityisesti yöaikaan. Nyrkkisääntönä pidetään, että nopeuden tai painon puolittaminen pienentää tärinän puoleen. Usein nyrkkisääntö ei kuitenkaan päde, ja siksi ajonopeuden tai painorajoituksen valinta tulee aina tehdä koeajoihin perustuviin tärinämittauksiin.

8.3 Rakennesuunnittelu

Jos tärinän suhteen riskialueelle halutaan rakentaa, rakentamisen tulisi aina perustua esimerkiksi kohdassa 4.3 kuvattuun rakennuspaikan tärinämittaukseen ja kohtien 4.5 ja 4.6 perusteella arvioituun rungon ja lattian värähtelyyn. Värähtelysuunnittelun lähtökohdaksi on, että suunnitellaan rakennuksen runko ja lattiat siten, että resonanssi ainakin rungon ja lattian alimman ominaistajuuden kanssa vältetään. Lattian ominaistajuuden määrittäminen riittävällä tarkkuudella on laskennallisesti suhteellisen helppoa, mutta rakennuksen rungon ominaistajuuden määrittäminen on laskennallisesti vaikeaa.

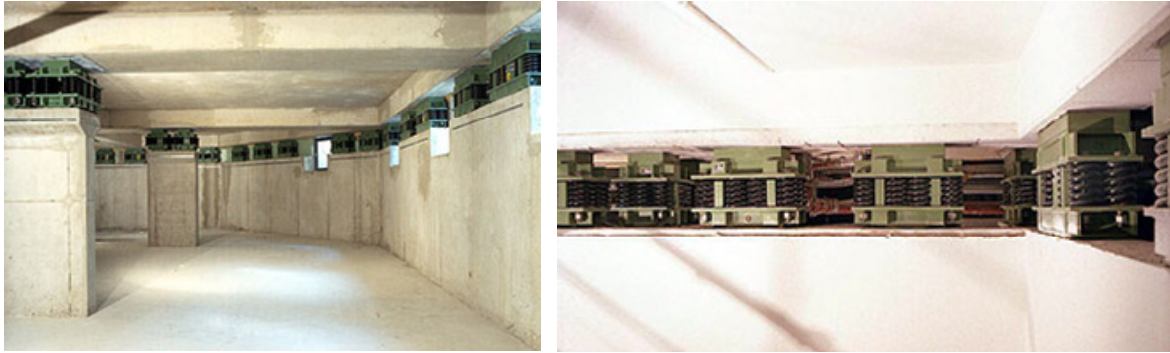
Lattian värähtelymitoitus perustuu maaperän pystyvärähtelyyn. Koska värähtelyn dominoiva taajuus sisältö on pehmeillä savimailla yleensä alle 10 Hz, lattian resonanssimitointi (suurennuskerroin 6,0) ei yleensä tule määrääväksi kevytrakenteisilla lattioilla ja raskailta lyhytjänteisillä lattioilla, koska niiden ominaistajuus on yleensä yli 10 Hz. Silloin värähtely määräytyy värähtelyn yleiseen voimistumiseen perustuen (kerroin 1,5).

Kovemmilla maaperillä tai pitkillä jänneväleillä resonanssin todennäköisyys kasvaa, ja silloin lattian jäykkyys ja jänneväli tulee suunnittelussa optimoida siten, että ominaistaajuus ei satu maaperän värähtelyn dominoivalle taajuusalueelle.

Rungon resonanssimitoitus tehdään maaperän vaakavärähtelyyn perustuen. Pehmeillä savimailla ongelmaksi muodostuvat yleensä pientalot, joiden rungon ominaistaajuus sattuu usein maaperän dominoivan värähtelyn taajuusalueelle 5–10 Hz. Käyttämällä normaalin rungon sijaan poikkeuksellisen vahvaa rungon jäykistystä voidaan resonanssimitoitus (suurennuskerroin 4,0) välttää ja mitoitus perustuu vain värähtelyn yleiseen voimistumiseen (kerroin 1,5). Rungon vaakajäykkyyttä kasvattaa jäykistävien seinien määrän lisääminen, seinätasojen leikkausjäykkyyden lisääminen tai pohjapinta-alan kasvattaminen. Yleisenä periaatteena on, että rungon ominaistaajuus kasvaa kaksinkertaiseksi, kun rungon jäykkyys kasvaa nelinkertaiseksi. Rungon ominaistaajuutta arvioitaessa tulee ottaa huomioon myös paalujen vaakajousto, ellei sitä ole estetty kellarikerroksella tai riittävän syvällä sokkelilla. Kovilla maaperillä rungon resonanssimitoitus ei yleensä tule määrääväksi, koska rakennuksen rungon ominaistaajuus on yleensä alle 10 Hz, joka on pienempi kuin maaperässä esiintyvän värähtelyn dominoiva taajuusalue.

Rakennuksen runko ja lattia voidaan suunnitella myös siten, että niiden alin ominaistaajuus on pienempi kuin maaperässä esiintyvät alimmat värähtelytaajuudet. Esimerkiksi pientaloissa kovilla maaperillä ja kerrostaloissa pehmeilläkin maaperillä resonanssin merkitys on yleensä pieni, koska rungon ominaistaajuus on herätetaajuutta pienempi. Kovilla maaperillä voidaan lattian jänneväliä kasvattamalla tai jäykkyyttä pienentämällä välttää muuten suunnittelussa määrääväksi tuleva resonanssimitoitus. Ominaistaajuuden alentamisessa on vaarana, että asukkaan omista liikkeistä aiheutuvat värähtelyt tulevat haitallisiksi. Esimerkiksi kevyillä välipohjilla ominaistaajuuden ei pitäisi olla alle 10 Hz (Talja & Toratti 2002).

Ainakin periaatteessa on myös mahdollista rakentaa rakennus jousille. Tehokas vaimennus edellyttää kuitenkin, että jousille rakennetun rakennuksen ominaistaajuus on alle puolet maaperän merkitsevästä värähtelytaajuudesta. Tämä johtaa yleensä niin joustavaan perustukseen, että jousto on otettava huomioon rakennesuunnittelussa ja rakennuksen pystytyksessä. Pehmeälle savimaalle perustetun ”kelluvan talon” toiminta edellyttää, että rakennuksen omasta painosta aiheutuvan painuman tulee olla useita senttimetrejä. Usein jousituksen tulee toimia myös maaperän vaakasuuntaiselle värähtelylle. Kokemuksia savimaalle rakennetuista kelluvista taloista ei ole, ja siksi rakentaminen voi sisältää yllättäviä riskejä. Kelluvia rakenteita on kuitenkin käytetty liikenteestä aiheutuvan runkomelun siirtymisen katkaisuun, jolloin rakennuksen oman painon aiheuttama jousien painuma on yleensä 10–15 mm (kuva 37).



Kuva 37. Esimerkki runkomelun katkaisemisesta perustuksiin asennetulla jousituksella (<http://www.gerb.com>).

9. Yhteenveto ja jatkotutkimustarpeet

Kiskon ja junan pyörien tai tienpinnan ja renkaiden kosketuksesta aiheutuu maaperään värähtely, joka voi siirtyä läheisten rakennusten rakenteisiin joko ilman tai maaperän kautta. Rakennuksessa värähtely voi ilmetä rakenteiden vaurioitumisena, epämukavuutta aiheuttavana tärinänä, liikennemeluna tai runkomeluna. Tässä julkaisussa on keskitytty epämukavuutta aiheuttavan tärinän arvioimiseen.

9.1 Yhteenveto

Tähän asti rakennuksen tärinää on arvioitu pääasiassa maaperän pystyvärsähtelyn perusteella (Talja 2004). Menetelmä on ollut suuntaa antava eikä ole ottanut huomioon maaperän värähtelyn suuntaa, taajuussisältöä eikä rakennusten dynaamisten ominaisuuksien vaikutusta. Myöhemmissä tutkimuksissa (Törnqvist & Talja 2006) on todettu, että maaperän vaakavärähtely voi olla pystyvärsähtelyä merkittävämpi ja että rakennusten dynaamisilla ominaisuuksilla on suuri vaikutus rakennuksen värähtelyyn. Tässä julkaisussa on paneuduttu erityisesti maaperästä rakennukseen siirtyvän värähtelyn arviointiin. Esitetyt värähtelyn suurennuskertoimet rakennuksen rungon ja lattian värähtelylle ovat suunnitteluarvoja. Keskimäärin rakennuksen rungosta ja lattiasta mitatut värähtelyt ovat pienempiä ja usein samansuuruisia maaperästä mitatun värähtelyn kanssa. Julkaisussa on esitetty myös arviointimenetelmän käytön kannalta oleelliset kohdat liikennetärinän mittaamisesta, luokituksista ja erilaisista arviointitasoista, joita käsitellään yksityiskohdaisemmin aikaisemmissa VTT:n julkaisuissa.

Käytetyt tutkimusmenetelmät

Asuintiloissa esiintyvän tärinän arvioimiseksi esitetty menetelmä perustuu rakennuksista tehtyihin mittauksiin, FE-laskentaan ja kirjallisuuslähteisiin.

Kaikkiaan mittaushohteita on 36, joista 14 on aikaisemmin mitattuja hohteita. Näistä vanhoista hohteista ei ollut käytössä mitattua maaperän vaakavärähtelyä, mutta perustuksesta mitattu vaakavärähtely oli käytettävissä. Hohteista seitsemän on vähintään kolmikerroksisia kerrostaloja ja muut 29 ovat yksi- tai kaksikerroksisia omakoti- tai rivitalokohteita. Kaikki kerrostalo-kohteet ovat savikkoalueilta. Pientalo-kohteista seitsemän on hiekka- tai sormaa-alueella ja muut ovat savikkoalueilta. Tärinä on aiheutunut junaliikenteestä 22 hohteessa. Muissa 14 hohteessa tärinä on aiheutunut katuliikenteestä.

FE-laskenta perustuu pääasiassa kaksikerroksiseen, osittain myös kolmikerroksiseen kehämalliin. Laskenta on tehty sekä tilastomatemattiseen resonanssitarkesteluun että

mitattuun herätteeseen perustuen. Tilastomatematisessa tarkastelussa rungon ominais-
taajuudelle ja vaimennukselle on oletettu tilastomatemattinen jakauma, jonka keskiar-
vot sattuvat 6–8 Hz:n ja 3–4 %:n alueelle. Herätteen on oletettu olevan hyvin kapeakaista.
Mitattuun herätteeseen perustuvan laskennan tarkoituksena on simuloida kahden
todellisen mitatun herätteen vaikutusta kehän vaakavärähtelyyn ja lattian pystyvärähte-
lyyn. Toinen herätteistä on savimaalta mitattu kapeakaistainen värähtely ja toinen sora-
alueelta mitattu laajakaistainen värähtely. Laskentamalleissa on jäykkyyksiä muuttamalla
tutkittu tapauksia, joissa kehän alin ominaistajuus sattuu kapeakaistaisen herätteen do-
minoivalle taajuusalueelle tai toinen ominaistajuus sattuu laajakaistaisen herätteen do-
minoivalle taajuusalueelle. Lisäksi on tutkittu lattiaa mitatun herätteen ja palkkimallin
avulla. Palkin jäykkyydet on mallissa valittu siten, että alin ominaistajuus sattuu kapea-
tai laajakaistaisen herätteen dominoivalle taajuusalueelle tai toinen ominaistajuus sat-
tuu laajakaistaisen herätteen dominoivalle taajuusalueelle.

Mitattuun tärinään perustuva värähtelyluokitus

Värähtelyn häiritsevyyttä arvioidaan kohdassa 2.1 esitetyn värähtelyn tunnusluvun avulla.
Tunnusluku kuvaa asuintiloissa esiintyvää tilastollisesti suurinta värähtelyn tehollisar-
voa. Tavoite uusien rakennusten ja väylien suunnittelussa on värähtelyluokka C (tun-
nusluku alle 0,3 mm/s). Vanhoilla asuinalueilla tulee pyrkiä värähtelyluokkaan D (tun-
nusluku alle 0,6 mm/s). Luokituskriteerin on toteuduttava pystyvärähtelyn osalta raken-
nuksen kaikissa lattioissa ja vaakavärähtelyn osalta rakennuksen kaikissa kerroksissa.

Kohdassa 2.2 esitetty värähtelyluokitus perustuu Norjan standardiin (NS 8176, 1999).
Suomessa yhteensä 40 kohteesta saadut tulokset (kohta 2.3) tukevat esitettyä suositusta.
Kaikissa niissä kohteissa, joissa tärinä on koettu hyvin epämiellyttäväksi, värähtelyn
tunnusluku on vähintään 0,6 mm/s. Toisaalta niissä kohteissa, joissa tärinä on koettu
enintään hieman epämiellyttäväksi, ainoastaan yhdessä kohteessa värähtelyn tunnusluku
on suurempi kuin alle 0,6 mm/s.

Rakennuspaikan tärinän arviointi

Tärinän arviointi voidaan tehdä kolmella eri tasolla (kohta 3). Arviointitaso 1 perustuu
kokemusperäiseen turvaetäisyyteen, jota kauempana tarkempaa värähtelytarkastelua ei
pidetä tarpeellisenä. Arviointitaso 2 perustuu yleensä laskennalliseen arviointiin, ja siinä
liikenne ja maaperän ominaisuudet voidaan ottaa tarkemmin huomioon. Arviointitaso 3
edellyttää rakennuspaikalta tehtäviä värähtelymittauksia.

Valittava arviointitaso riippuu tilanteesta ja halutusta tarkkuudesta. Arviointitaso 3 perustuu maaperän värinämittaukseen ja tässä julkaisussa esitettyyn rakennuksen värähtelysuunnitteluun. Rakennuksen rungon ja lattian värähtelysuunnittelussa tarvitaan rakennuspaikalta mitattu maaperän värähtelyn tunnusluku ja sitä vastaava värähtelyn taajuussisältö sekä vaaka- että pystysuunnassa. Laskennallisiin menetelmiin sisältyy usein niin suuria epävarmuuksia ja puutteita, että asemakaavaa laadittaessa arviointitason 3 käyttö on usein perusteltua.

Rakennukseen siirtyvän värähtelyn arviointi

Rakennuksen värähtelyn tunnusluvun arviointi perustuu maaperästä eri pääsuunnissa mitattuihin värähtelyn tunnuslukuihin ja niiden perusteena olevaan värähtelyn taajuussisältöön. Rakennuksessa esiintyvän värähtelyn arviointi perustuu kahteen eri lähestymistapaan. Toisessa otetaan huomioon rungon ja lattian alimmalla ominaistaajuudella esiintyvän maaperän värähtelyn voimistuminen resonanssin vuoksi ja toisessa otetaan huomioon maaperän värähtelyn koko taajuusalueen kattava yleinen voimistuminen. Tasaiselle voimistumiselle esitetty värähtelyn suurennuskerroin on huomattavasti pienempi kuin resonanssin vuoksi tapahtuvalle värähtelyn voimistumiselle esitetty kerroin. Rungon resonanssitarkastelu perustuu maaperän vaakavärähtelyyn ja lattian resonanssitarkastelu maaperän pystyvärähtelyyn. Resonanssimitoitus voi tulla määrääväksi, mikäli maaperästä mitattu värähtely on taajuudeltaan hyvin kapeakaistaista ja ominaistaajuus sattuu tälle alueelle. Resonanssin ilmeneminen on satunnaista, mutta esiintyessään sillä on suuri merkitys.

Perustukseen siirtyvän värähtelyn taajuussisältö kussakin suunnassa arvioidaan kertomalla maaperän värähtelyn taajuuskomponentit kohdassa 4.4 esitetyllä taajuudesta riippuvalla kertoimella. Mittaustuloksiin (kohta 5.3.1) ja kirjallisuuteen perustuva yleinen havainto on, että pientaloilla matalat värähtelykomponentit (alle 10 Hz) siirtyvät keskimäärin samansuuruisina perustukseen, mutta korkeat taajuudet vaimenevat. Kerrostalokohteiden vertailu osoittaa lisäksi, että poiketen yleisestä ennakkokäsityksestä ainakin pehmeälle maalle rakennetussa kerrostalokohteessa pysty- ja vaakavärähtely voi siirtyä maasta perustukseen samassa suhteessa kuin pientalokohteissakin (kohta 5.4.2).

Rakennuksen rungon värähtely lasketaan perustuksen vaakavärähtelyn suuruuden ja taajuussisällön avulla (kohta 4.5). Yleisen voimistumisen arvioinnissa perustuksen vaakavärähtelyn tunnusluvut kerrotaan kertoimella 1,5 lukuun ottamatta maanvaraisesti ilman paaluja perustettuja yksikerroksisia rakennuksia, joille kerroin on 1,0. Kaksi tai useampi-kerroksisille rakennuksille tehdään lisäksi rungon resonanssitarkastelu, joka perustuu siihen perustuksen vaakavärähtelyn 1/3-oktaavikaistaan, jolle rungon ominaistaajuus sattuu. Resonanssitarkastelussa tämä perustuksen värähtelykomponentti kerrotaan kertoimella 4,0.

Mittaustulosten perusteella yleiseen voimistumiseen perustuva värähtelytarkastelu on riittävä rakennuksen rungon vaakavärähtelyn arvioinnissa, kun maaperän ominaistajuus on yli 10 Hz. Kun maaperän vaakavärähtely sattuu pientalojen rungon tyypilliselle ominaistajuusalueelle 5–10 Hz, useat mittaustulokset osoittavat, että rungon vaakavärähtely vahvistuu perustuksen vaakavärähtelyyn nähden 3–4-kertaiseksi ja yksittäinen suurin kerroin on jopa kahdeksan (5.4.1). Lisäksi kahdessa pientalokohteessa havaittiin selvästi, että paaluille perustetussa kohteessa sokkeli voi resonanssitapauksessa värähdellä vaakasuunnassa osana runkoa. Tulokset osoittavat, että rungon resonanssiin vaikuttaa erityisesti maaperän vaakavärähtely ja siksi maaperän pystyvärähtelyyn perustuva rungon resonanssitarkastelua ei tehdä.

Kerrostaloissa rungon resonanssin ilmeneminen on harvinaista, sillä rungon värähtelyn ominaistajuus on yleensä alle 5 Hz ja maaperässä alle 5 Hz:n taajuudet ovat harvoin dominoivia. Mitatussa viidessä betonirunkoisessa, pehmeälle maaperälle paaluille rakennetussa kerrostalokohteessa (3–6 kerrosta) rungon resonanssia ei havaittu (kohta 5.4.2). Siksi tasaiseen värähtelyn voimistumiseen perustuva arvio antaa parhaat tulokset, ja resonanssitarkasteluun perustuva mitoitus johtaa merkittävään ylimitoitukseen. Resonanssin mahdollisuutta ei voi kuitenkaan tulosten perusteella poissulkea.

FE-laskennan perusteella rungon resonanssitarkastelussa tulisi käyttää pientaloilla suurenuskerrointa 4–8 perustuksen vaakavärähtelylle ja kerrointa 3–4 perustuksen pystyvärähtelylle (kohta 6.1.3). Arvot perustuvat 95 %:n luotettavuustasoon. Jos luotettavuustaso lasketaan arvoon 75 %, suurennuskerroin pienenee noin puoleen. Kertoimet ovat hieman suurempia kuin mittaustulosten perusteella on arvioitu. Lisäksi myös FE-laskenta osoittaa, että mahdollinen perustuksen vaakajousto tulee ottaa huomioon rungon värähtelysuunnittelussa.

Lattian värähtely lasketaan arvioidun perustuksen pystyvärähtelyn suuruuden ja taajuussisällön avulla (kohta 4.6). Yleisen voimistumisen arvioinnissa perustuksen pystyvärähtelyn tunnusluku kerrotaan kertoimella 1,5. Lattian resonanssitarkastelu perustuu siihen perustuksen pystyvärähtelyn 1/3-oktaavikaistaan, jolle lattian ominaistajuus sattuu. Resonanssitarkastelussa tämä perustuksen värähtelykomponentti kerrotaan kertoimella 6,0.

Saatujen tulosten perusteella tasaiseen värähtelyn voimistumiseen perustuva mitoitus johtaa yleensä parhaaseen tulokseen, sillä lattian resonanssi on vielä harvinaisempaa kuin rungon resonanssi (ks. kohta 5.5). Resonanssi edellyttää taajuudeltaan hyvin kaapeakaistaista herätettä ja lattian ominaistajuuden sattumista tälle taajuusalueelle. Kevyillä välipohjilla ja lyhytjänteisillä betonilattioilla ominaistajuuden suuruus on tavallisesti yli 10 Hz ja vaihtelee paljon jännevälän mukaan. Pehmeissä maaperissä resonanssi ei yleensä pääse syntymään, koska dominoiva taajuusalue on yleensä alle 10 Hz. Kovemmissa maaperissä värähtely on taas laajakaistaista, jolloin mahdollinen reso-

nanssi on esiintyessään lievempi. Voimakas resonanssi-ilmiö havaittiin kuitenkin kahdesta eri kerrostalokohteesta mitatussa neljässä eri lattiassa. Näissä kohteissa lattian keskialueen pystyvärähtely on 4–9-kertainen lattian reunalta mitattuun pystyvärähtelyyn nähden.

FE-laskelmien mukaan lattioiden pystyvärähtelyn suurennuskertoimen tulisi resonanssitapauksessa olla suuruusluokkaa 4–7 (kohta 6.2.4). Arvio on samaa suuruusluokkaa kuin mittaustulosten perusteella on arvioitu. Mitatulla herätteellä tehdyt FE-laskelmat osoittavat myös, että resonanssi ylempien ominaismuotojen kanssa on mahdollinen, mutta sen merkitys on vähäisempi kuin resonanssi ensimmäisen ominaismuodon kanssa.

Kirjallisuudessa esitetyt värähtelyn suurennuskertoimet perustuvat yleisesti vain maaperän pystyvärähtelyyn, eikä niissä oteta huomioon värähtelyn taajuussisältöä. Kirjallisuuden perusteella tulisi sekä rakennuksen rungon että lattian suunnittelussa varautua yleensä värähtelyyn, joka on pientaloilla 4–5-kertainen ja kerrostaloilla noin 1-kertainen maaperän pystyvärähtelyyn nähden.

9.2 Jatkotutkimustarpeet

Tärkeimmät liikennetärinäin liittyvät jatkotutkimustarpeet koskevat mittaustiedon kartuttamista, rakennuksen rungon ominaistajuuden määrittämistä, koulutusta ja rakennuksen tuotekehitystä sekä juna–rata–vuorovaikutuksen selvittämistä. Tärinänvaimennusseiniin ja liikenteen aiheuttamaan runkomeluun liittyviä kehityshankkeita on Suomessa jo käynnissä.

Mittaustiedon kartuttaminen

Tässä tutkimuksessa mitatussa muutamassa kerrostalokohteessa ei havaittu voimakasta rungon resonanssia, mutta sen esiintymisen mahdollisuus on kuitenkin olemassa. Lisäksi kerrostalokohteissa havaittiin aikaisemmin julkaistuihin tuloksiin nähden yllättävä tulos, että kerrostaloissa värähtely voi siirtyä lähes yhtä hyvin rakennuksen perustukseen kuin pientaloissa. Koska erityisesti resonanssimitoituksen vaikutus suunnittelussa on suuri, resonanssin esiintymismahdollisuutta tulee kerrostaloissa tutkia tarkemmin sekä mittauksin että FE-laskelmin. Myöskään betoni- tai harkkorunkoisista kaksikerroksisista pientaloista ei ole julkaistu mittauksiin perustuvaa kokemusta. Siksi mittauksia tulisi tehdä lisää erityisesti matalista pienkerrostaloista ja kiviainesrunkoisista pientaloista sellaiselta savikkoalueelta, jossa maaperässä dominoi vaakavärähtely. Kohteiden tulisi olla sellaiselta alueelta, jossa maaperän vapaa värähtely voidaan mitata luotettavasti riittävän kaukaa talosta ja jossa asukkaat ovat havainneet tärinän.

Myöhempiä hyödyntämistä varten kannattaa kaikista kohteista aina, olipa värähtelyt mitattu mitä tahansa tarkoitusta varten, määrittää maaperän, perustuksen, rungon ja lattian värähtelyt sekä kysyä asukkaiden mielipide tärinän haitallisuudesta. Tulosten vertailukelpoisuuden vuoksi mittaukset kannattaa tehdä ja tulokset esittää tässä julkaisussa kuvattujen menettelytapojen mukaisesti.

Rakennuksen rungon ominaistajuuden määrittäminen

Rakennuksen rungon ominaistajuus on tärkeä parametri rungon värähtelymitoituksessa, ja siksi se tulisi pystyä määrittämään hyvin sekä laskennallisesti että kokeellisesti. Vasta kun rungon ominaistajuus pystytään määrittämään kokeellisesti riittävän luotettavasti, voidaan arvioida laskennallisilla menetelmillä saatavien tulosten tarkkuutta.

Kevyillä pientaloilla rakennuksen runko saadaan värähtelemään ominaistajuuden määrittämiseksi suhteellisen pienellä vaakasuuntaan kohdistetulla iskumaisella herätteellä. Raskailla kerrostaloilla koko rungon saattaminen liikkeeseen vaatii kuitenkin yleensä suuremman ja usein myös toisenlaisen herätteen. Värähtely voidaan saada aikaan esimerkiksi vetämällä runkoa vaakasuunnassa ja vapauttamalla se tai aiheuttamalla maaperään suuri iskumainen heräte. Myös tuulen aiheuttamaa värähtelyä on käytetty ominaistajuuden määrittämiseen. Kerrostaloilla rungon dynaamisessa käyttäytymisessä korostuu usein perustuksen ja maan vuorovaikutus.

Tiedon käyttöönotto, ohjekehitys ja tuotekehitys

Olemassa olevan tiedon hyödyntämiseksi tulee järjestää seminaareja rakennesuunnitteluun, kaavasuunnitteluun, rakentamiseen ja alan opetustyöhön osallistuville. Seminaareista saadun palautteen ja ideoiden perusteella tulee yhdessä tärinän mittaajien kanssa kehittää mittausohjeistusta ja mittauslaitteistoja siten, että ne tukevat tässä julkaisussa kuvattua rakennukseen siirtyvän tärinän arviointimenetelmää.

Rakennusten tuotekehitystä voidaan tehdä periaatteessa kahdella eri tavalla. Ensimmäinen tapa on suunnitella rakennuksen runko ja lattiat siten, että resonanssi-ilmiö ei vahvista maaperästä tulevaa värähtelyä. Toinen, edellistä tehokkaampi tapa on pienentää maaperästä rakennukseen siirtyvää värähtelyä esimerkiksi rakentamalla rakennus ”kelluvalle perustukselle”. Pehmeille savimaille rakennettuja kelluvia perustuksia ei ole toistaiseksi kokeiltu, joten tuotekehitys edellyttää koerakentamista.

Maaperästä perustukseen siirtyvää värähtelyä voi ajatella pienennettäväksi myös rakennuksen lähelle rakennettavilla tärinänvaimennusseinillä, sillä vaimennusseinien vaikutus

on yleensä suurin välittömästi vaimennusseinän takana. Erilaiset erikoisratkaisut, joilla rakennuksen perustus irrotetaan värähtelevästä maaperästä, voivat myös olla mahdollisia.

Juna–rata-vuorovaikutus

Pehmeillä maaperillä tehokkain rakenteellinen ratkaisu tärinän vaimentamiseksi on perustaa väylä paalulaatalle, joka pienentää tehokkaasti väylän pystyvärähtelyä. On oletettavaa, että paalulaatta pienentää hyvin myös vaakavärähtelyä. Ratkaisun toimivuus tulisi kuitenkin osoittaa kokeellisesti ja kirjoittaa aiheesta oma julkaisunsa.

Oman kokonaisuutensa muodostavat radan perustamiseen liittyvät ratkaisut värähtelyn syntymisen estämiseksi. Syntyvän värähtelyn aiheuttajaa tulisi selvittää esimerkiksi mittaamalla pyörästä aiheutuvaa voimaa väylän eri perustamistavoilla, eri kalustoilla ja erilaisilla maaperillä. Mittaus voi tapahtua joko pyörästä tai radasta. Tietoa herätteen suuruudesta ja taajuussisällöstä tarvitaan mm. maaperän värähtelyn arviointimenetelmien kehittämisessä tai tärinäseinien toimivuuden laskennallisessa arvioinnissa.

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. 2005. High-speed ground transportation noise and vibration impact assessment. HMMH Report No. 293630-4. Washington: Federal Railroad Administration. 178 s. + liitt. 57 s.

FTA. 2006. Transit noise and vibration impact assessment. Report FTA-VA-90-1003-06. Washington DC: Federal Transit Administration. U.S. Department of Transportation, Office of Planning and Environment. 260 s.

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

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

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

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

Madshus, C., Bessason, B. & Hårvik, L. 1996. Prediction model for low frequency vibration from high speed railways on soft ground. Journal of Sound and Vibration, Vol. 193, No. 1, s. 195–203.

Nelson, J. T. & Saurenman, H. J. 1987. A prediction procedure for rail transportation ground borne noise and vibration. Transportation Research Record, No. 1143, s. 26–35.

Nordtest. 1991. Nordtest Method NT ACOU 082: Buildings: Vibration and shock, evaluation of annoyance. Oslo: Nordisk Innovations Center. 9 s.

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

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

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

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

Törnqvist, J. & Talja, A. 2006. Suositus liikennetärinän arvioimiseksi maankäytön suunnittelussa. VTT Working Papers 50. Espoo: VTT. 46 s. + liitt. 33 s. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2006/W50.pdf>.

Liite A:
**Assessment of traffic-induced vibrations
in buildings**

Contents

1. Abstract.....	2
2. Introduction.....	2
3. Vibration classification in Finland.....	3
4. Vibration design.....	6
5. Design examples	9
6. FE analyses	11
7. Test results	12
8. Conclusions.....	15
9. Acknowledgements.....	16
References	16

1. Abstract

A method for the vibration design of the frame and floor of a building is presented for traffic-induced vibrations. The method takes into consideration the direction and frequency content of the ground. The evaluation is based on two approaches: One considers the uniform magnification of vibration and the other the magnification in resonance. The advantage of the method is that a high vibration magnification factor need only be used if resonance vibration of the floor or frame occurs; otherwise a lower magnification factor may be used. The design method is based on a large number of field measurements, on FE calculations and on literature studies. In addition, measurements are used together with occupant surveys for giving recommendations for disturbance-based vibration classification of dwellings.

2. Introduction

In regard to traffic-induced vibrations, clay fields with surrounding rocky or gravelly hill areas are especially problematic in Finland (Fig. 1). The thickness of the soft layer is often 5–20 metres. Vibrations spread effectively in such layers and they are difficult to evaluate. Often, horizontal vibrations of the ground can be higher than the vertical component, and frequencies under 10 Hz with a very narrow band dominate. Such areas are especially problematic for detached houses, because natural frequencies below 10 Hz are typical of building frames and resonance vibration may occur. Because lightweight floors and short-span concrete floors usually have natural frequencies above 10 Hz, resonance of floors does not generally occur in soft clay areas. It can occur, however, in harder soils where higher frequencies dominate. The resonance phenomenon is not very common, but when it does occur it poses a real problem.

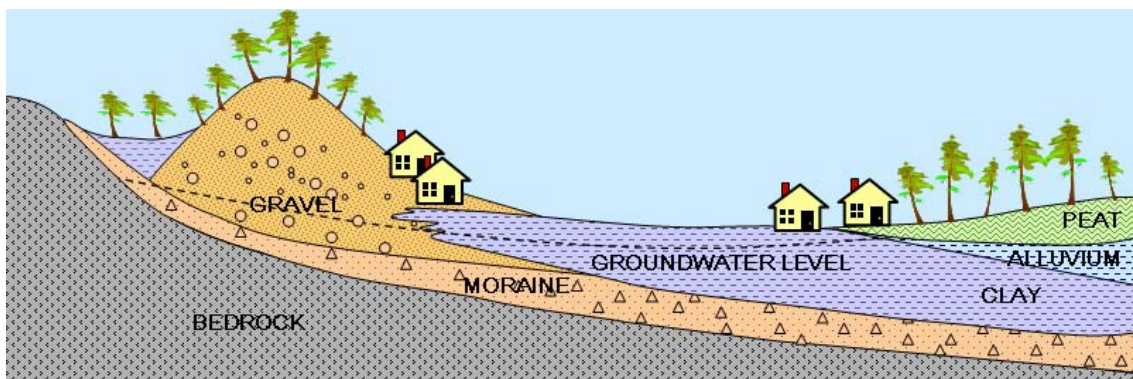


Figure 1. Typical soil conditions of Finnish coastal areas.

Because of the resonance phenomenon, magnification factors for the design of building frames and floors vary widely in the literature. Assigning an order of magnitude to the transfer from the ground into buildings, Nordtest (1991) gives a factor of 4.0 for the frame and floors of a two-storey house with a timber beam deck. For the floors of a multi-storey concrete building with concrete floors the factor is 1.1; for the frame the factor is 0.5. Madshus et al. (1996) give for the floors of a timber-framed house an average magnification factor of 1.3 with a standard deviation of 1.0; for the frames they give an average factor of 1.9 with a deviation of 1.2. When the design value is taken as the average added to twice the deviation, the design factor should be about 3–4 for the floor and 4–5 for the frame. Based on the vibration measurements of Hunaidi and Tremblay (1997), the design value for floor amplification should be about 3.0. According to Nelson and Saurenman (1987), the typical floor amplification is in the range of 1.8–5.6. All the magnification factors given above are based on the vertical ground vibration; different magnification factors for horizontal ground vibrations are not given.

3. Vibration classification in Finland

Finland's Land Use and Building Act (132/1999) and National Building Code (RaMK B3/2002) stipulate that the environmental impacts of traffic-induced vibrations shall be taken into account. Vibration must not cause damage to a building or excessive disturbance to its occupants. However, no approved limit values of vibration are given. It has therefore been proposed that the vibration classification of Norwegian Standard NS 8176 (1999) be used in Finland (Talja 2004). The vibration classification is determined by the maximum vibration component measured in the three orthogonal directions. The vibration may be caused from horizontal movements of the frame or from vertical movements of the floor (Fig. 2).

The basic vibration concepts are shown in Table 1. The vibration measure v_w is the maximum frequency weighted rms velocity of the signal, which may be measured according to ISO 2631-2 (2003). The vibration class is based on the statistical maximum rms velocity measured over 1 week. In practice the vibration level $v_{w,95}$ is determined from 15 vehicle pass-bys that generate the maximum vibrations. The value is determined by

$$v_{w,95} = \bar{v}_w + 1.8 \cdot \sigma \quad (1)$$

where \bar{v}_w is the mean value and σ is the standard deviation of the measuring results.

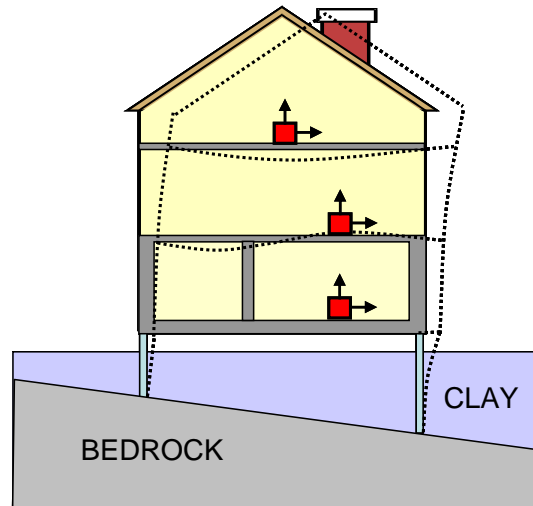


Figure 2. Example of vibration modes and vibration measurement points.

The vibration limit $v_{w,95} = 0.6$ mm/s (class D) is proposed for existing residential areas and $v_{w,95} = 0.3$ mm/s (class C) for new residential areas. These values are in line with many other guidelines. For example, values of 0.6 mm/s (DIN4150-2, 1999), 0.4 mm/s (Banverket 1997) and 0.36 mm/s (FTA 2006) have been presented for new areas, and values of 0.6 mm/s (DIN 4150-2) and 1.0 mm/s (Banverket 1997) for existing areas.

The limit values of 0.3 mm/s and 0.6 mm/s may also be given by weighted acceleration (ISO 2631-2). The transformations between velocity $v_{w,95}$ and acceleration $a_{w,95}$ can be done by

$$a_{w,95} = 35.7 \cdot v_{w,95} \quad (2)$$

The classification in NS 8176 is based on people's reactions to vibrations reported in a large socio-vibrational study by Klæboe et al. (2003). Class C ($v_{w,95} < 0.3$ mm/s) is the limit at which some 7–8% of persons are highly annoyed and about 50% perceive the vibrations. Class D ($v_{w,95} < 0.6$ mm/s) is the limit at which more than 10% of persons are highly annoyed. Classes A ($v_{w,95} < 0.15$ mm/s) and B ($v_{w,95} < 0.1$ mm/s) are special classes for dwellings with relatively good and very good vibration conditions.

Table 1. Basic vibration concepts.

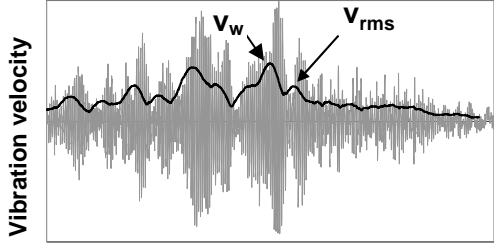
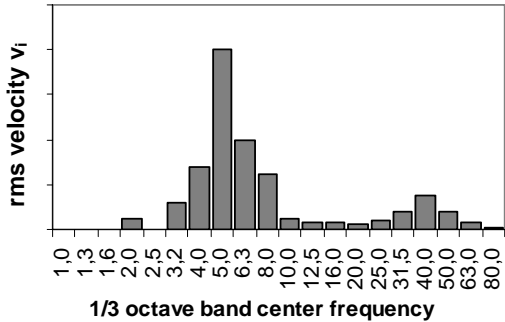
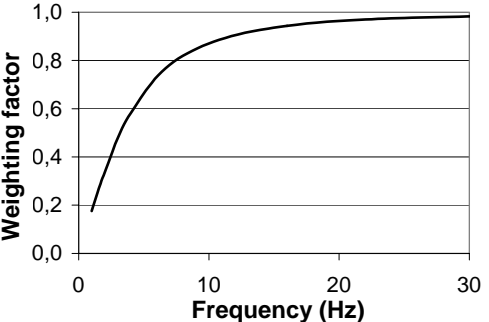
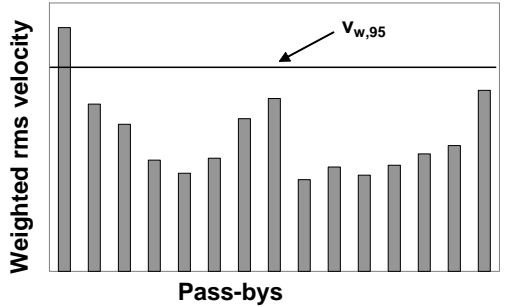
	<p>Rms velocity of vibration v_{rms} [mm/s]</p> <p>Rms velocity of the signal $v(t)$ at the moment t_0 is</p> $v_{rms}(t_0) = \left\{ \frac{1}{\tau} \int_{t_0-\tau}^{t_0} [v(t)]^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}},$ <p>where the time window τ is 1 second.</p>
	<p>Vibration spectrum</p> <p>The vibration spectrum shows the vibration components of the signal in 1/3 octave bands. When the spectrum is based on time window $\tau = 1$ s, the rms velocity may also be presented in the frequency domain by</p> $v_{rms}(t_0) = \sqrt{v_i^2}$
	<p>Weighting factor for vibration spectrum</p> <p>The weighting factor makes different frequency components of the vibration spectrum equivalent to human sensitivity.</p>
	<p>Vibration level $v_{w,95}$ [mm/s]</p> <p>The vibration level $v_{w,95}$ is the statistical maximum of vibration measures v_w, based on the 15 vehicle pass-bys which generate the maximum vibrations.</p>

Figure 3 shows the results of 40 dwellings in Finland for which measured vibration data and the inhabitants' opinion of the annoyance of the vibration are available. In all cases the inhabitants noticed the vibrations. In all of the dwellings where the annoyance rating was at least 7.5 (highly annoying), the vibration level was $v_{w,95} > 0.6$ mm/s. On the other hand, in the cases where the annoyance rating has been less than 2.5 (slightly annoying),

only in one case was the vibration level $v_{w,95} > 0.6$ mm/s. The results support the proposed vibration classification. The figure also confirms the opinion that the annoyance level of vibrations is highly subjective and that people may get used to or sensitized to them.

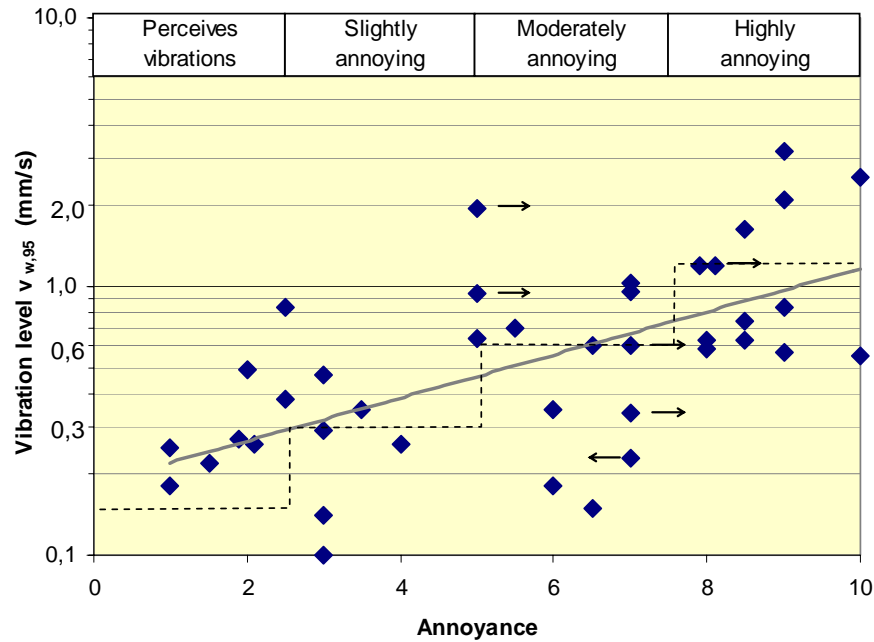


Figure 3. Correlation of measured vibration level $v_{w,95}$ to vibration annoyance. On the annoyance scale, 0 means that vibrations are not noticed and 10 that they are extremely annoying. Arrows pointing right are cases where inhabitants said they got used to the vibrations; arrows pointing left are cases where inhabitants became sensitized to them.

4. Vibration design

The method for vibration design takes into account the direction and frequency content of the soil. The evaluation is based on two approaches: One considers the uniform magnification of the vibration and the other the magnification in the resonance. The resonance design of the frame is based on the horizontal, and the resonance design of the floor on the vertical vibration of the ground. In resonance design only the 1/3 octave band that coincides with the fundamental frequency is studied. The vibration classification is based on the maximum of the calculated values.

The design is based on the vibration level $v_{w,95}$ and normalized vibration spectrum of the ground, which are determined by measurements from the building site. The normalized vibration spectrum is determined from the 1-second spectra used in the determination of vibration level $v_{w,95}$. First each spectrum is normalized by dividing the frequency components by rms vibration v_w ; then the normalized vibration spectrum is determined by averaging them. The vibration of the ground is determined in three orthogonal

directions. Directions x and y are the longitudinal and transverse directions of the building, and z is the vertical component.

The normalized vibration spectrum of the building foundation is determined by multiplying the normalized vibration spectrum of the ground by factor

$$k_i^{found} = -\frac{A}{\lg 8} \cdot \lg\left(\frac{f_i}{80}\right), \text{ but } 0 \leq k_i^{found} \leq A \quad (3)$$

where f_i is the centre frequency of each 1/3 octave band. The value of $A=1.0$ for all cases. Equation (3) is shown graphically in Figure 4. In practice, high-frequency components may sometimes transmit more effectively to the basement, but then they usually appear more as traffic-induced structure-borne noise than as vibration of floors. In the literature (e.g. FTA 2006), values of $A < 1.0$ are given specially for multi-storey buildings, but this study does not support common use of smaller values than $A=1.0$.

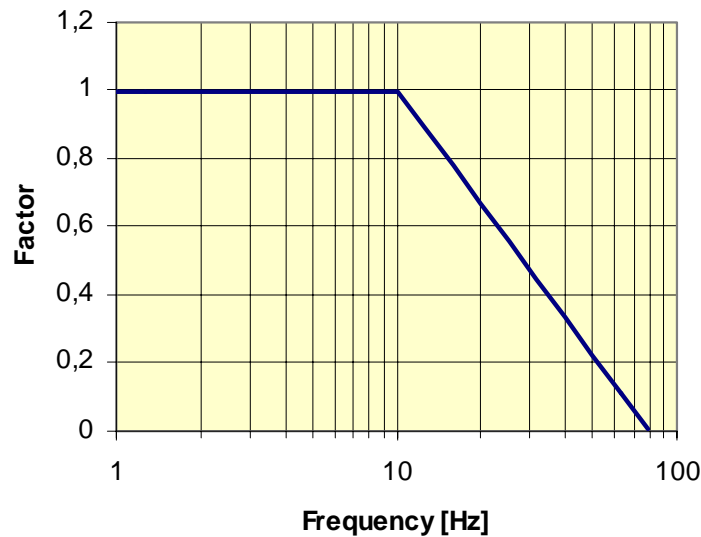


Figure 4. Graphical presentation of Equation (3).

The vibration level of the foundation is determined from

$$v_{w,95}^{found} = k_{w,0} \cdot v_{w,95}^{ground}, \text{ where } k_0 = \sqrt{\sum_i (k_i^{found} \cdot \bar{v}_{w,i}^{ground})^2} \quad (4)$$

where $v_{w,95}^{ground}$ is the ground vibration level and $\bar{v}_{w,i}^{ground}$ is the normalized vibration component of the ground.

In the case of uniform magnification the vibration level of the frame and floors is determined from

$$v_{w1} = k_1 \cdot \max(v_{w,95}^{found,x}, v_{w,95}^{found,y}, v_{w,95}^{found,z}) \quad (5)$$

where $v_{w,95}^{found}$ is the vibration level of the foundation in directions x, y and z. Coefficient

- $k_1 = 1.5$ for all two-storey houses and over, and for one-storey houses with pile foundation
- $k_1 = 1.0$ for one-storey houses with ground-supported foundation and ground-supported floor.

In the resonance case the vibration of frame and floors is determined from

$$v_{w2} = k_2 \cdot v_{w,j}^{found} \quad (6)$$

where

- for frame resonance $k_2 = 4.0$ and $v_{w,j}^{found}$ is the greater of the x and y vibration components of the foundation at the frequency band j , to which the fundamental frequency of the frame falls
- for intermediate floors $k_2 = 6.0$ and $v_{w,j}^{found}$ is the z vibration component of the foundation at the frequency band j , to which the fundamental frequency of the floor falls.

The resonance design of the frame is made for all two-storey houses and over. If the fundamental frequency of the frame is not known, the frequency is assumed to fall to any of the 1/3 octave bands shown in Table 2. The table is based on the data given in ISO 4866 (1994).

The fundamental frequency f_0 for a floor with all edges simply supported may be approximated by the equation

$$f_0 = \frac{\pi}{2 \cdot l^2} \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}} \cdot \sqrt{1 + \left[2 \left(\frac{l}{b} \right)^2 + \left(\frac{l}{b} \right)^4 \right] \frac{(EI)_b}{(EI)_l}} \quad (7)$$

where l is the span of joists, $(EI)_l$ is the stiffness of floor joists and slab per unit width, $(EI)_b$ is the stiffness of the floor slab per unit width, b is the floor width, and m is the mass density by area of floor increased by a service load of 30 kg/m² (Talja et al. 2002).

In many cases the edge condition parallel to the floor joist may be neglected and the frequency may be approximated by

$$f_0 = \frac{\pi}{2 \cdot l^2} \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}} \quad (8)$$

The underestimation in frequency is less than 5% when $b/l > 1.0$ and $(EI)_l / (EI)_b > 30$, but if $b/l = 0.5$ the same accuracy is achieved only when $(EI)_l / (EI)_b > 200$.

Because of the inaccuracy in determination of the natural frequency of the floor, it should be assumed in vibration design that the fundamental frequency may also fall to the adjacent 1/3 octave frequency bands.

Table 2. Estimate of frequency bands to which the fundamental frequency of the building frame may fall.

Number of storeys	1/3 octave band centre frequency									
	1.6	2	2.5	3.15	4	5	6.3	8	10	12.5
1½–2						X	X	X	X	
3				X	X	X	X			
4			X	X	X	X				
5		X	X	X	X					
6–7	X	X	X	X						
8	X	X	X							
9–10	X	X								

5. Design examples

The examples below show the influence of the vibration spectrum on the vibration design. In the first case the vibration spectrum (Fig. 5) is wide and the dominating vibration frequencies are high. In the second case the spectrum is narrow and the dominating frequencies are low. The first case is typical of hard sand and gravel soils and the second case is typical of soft clays. In these examples it is assumed that the ground vibration level $v_{w,95}^{ground} = 0.30$ mm/s and the vibration spectra are identical in all directions. The building is a two-storey single-family house. The fundamental frequency of the frame is not known and therefore the frequency is assumed to fall to any of the 1/3 octave bands of 5–10 Hz (Table 2). A fundamental frequency of 10 Hz is determined for the floor by Equations (7)–(8). Because of inaccuracies in vibration design, it is assumed that the fundamental frequency of the floor may fall to any of the 1/3 octave bands 8, 10 or 12.5 Hz.

Figure 5 shows the vibration spectrum of the building foundation, determined by Equation (3) from the normalized spectrum of the ground.

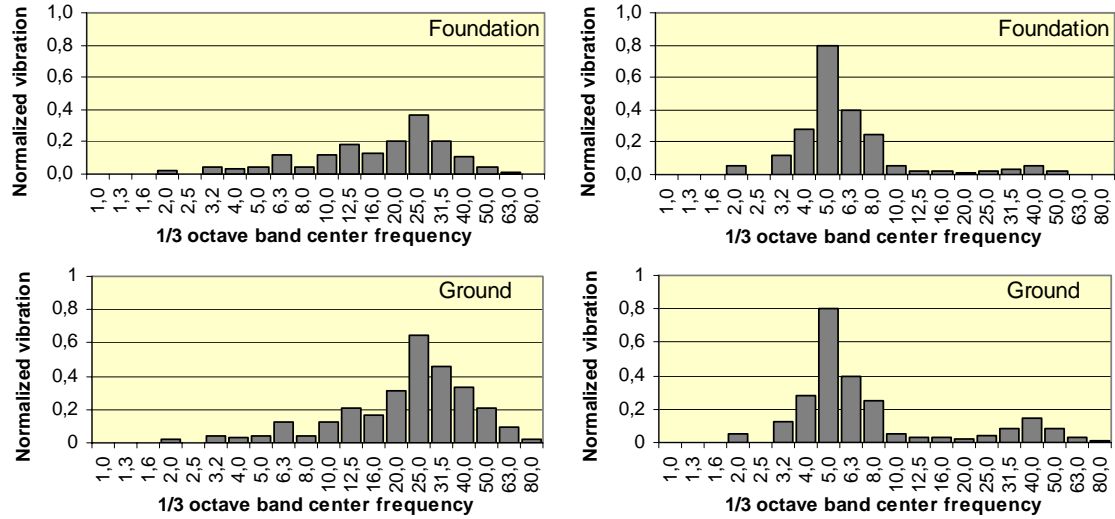


Figure 5. Vibration spectrum of ground and foundation. Left: Wideband spectrum with high vibration frequencies dominating. Right: Narrowband spectrum with low frequencies dominating.

Table 3 shows the calculated vibration levels of the frame and floor. The calculated vibration level v_{w1} (mm/s) is based on a uniform magnification and vibration level v_{w2} on the magnification in the resonance (Equations (5)–(6)). The results show that in the case of frame vibration $v_{w,95}^{frame} = v_{w1} = 0.25$ mm/s for a wideband spectrum with high vibration frequencies dominating, and $v_{w,95}^{frame} = v_{w2} = 0.96$ mm/s for a narrowband spectrum with low frequencies dominating. In the case of floor vibrations $v_{w,95}^{floor} = v_{w2} = 0.34$ mm/s for a wideband spectrum with high vibration frequencies dominating, and $v_{w,95}^{floor} = v_{w2} = 0.45$ mm/s for a narrowband spectrum with low frequencies dominating.

Table 3. Results of the design examples. Calculated vibration level v_{w1} (mm/s) is based on uniform magnification and v_{w2} (mm/s) is based on the magnification in the resonance.

	Frame design		Floor design	
	Foundation vibration	Frame vibration	Foundation vibration	Floor vibration
Case 1: Wideband spectrum with high vibration frequencies dominating				
Uniform magnification, v_{w1}	$0.56 \cdot 0.3 = 0.17$	$1.5 \cdot 0.17 = 0.25$	$0.56 \cdot 0.3 = 0.17$	$1.5 \cdot 0.17 = 0.25$
Resonance design, v_{w2}	$f_j = 6.3$ Hz $0.12 \cdot 0.3 = 0.036$	$4.0 \cdot 0.036 = 0.14$	$f_j = 12.5$ Hz $0.19 \cdot 0.3 = 0.057$	$6.0 \cdot 0.057 = 0.34$
Case 2: Narrowband spectrum with low frequencies dominating				
Uniform magnification, v_{w1}	$0.98 \cdot 0.3 = 0.29$	$1.5 \cdot 0.29 = 0.44$	$0.98 \cdot 0.3 = 0.29$	$1.5 \cdot 0.29 = 0.44$
Resonance design, v_{w2}	$f_j = 5.0$ Hz $0.80 \cdot 0.3 = 0.24$	$4.0 \cdot 0.24 = 0.96$	$f_j = 8.0$ Hz $0.25 \cdot 0.3 = 0.075$	$6.0 \cdot 0.075 = 0.45$

6. FE analyses

Vibration magnification was studied by FE calculation, which is based on a simple two-storey plane frame model. The FE study was based both on the statistical resonance study and on the measured vibration signals. Figure 6 shows the input data for statistical analysis, and Figure 7 shows the model and the results of analysis. The height of the frame is 1.3 times the width of the frame. The horizontal excitation points towards both legs, but the vertical excitation points to only one. Input data for natural frequency and damping are based on the data given in ISO 4866 (1994). The data for excitation is based on empirical knowledge of traffic-induced vibrations in soft soils.

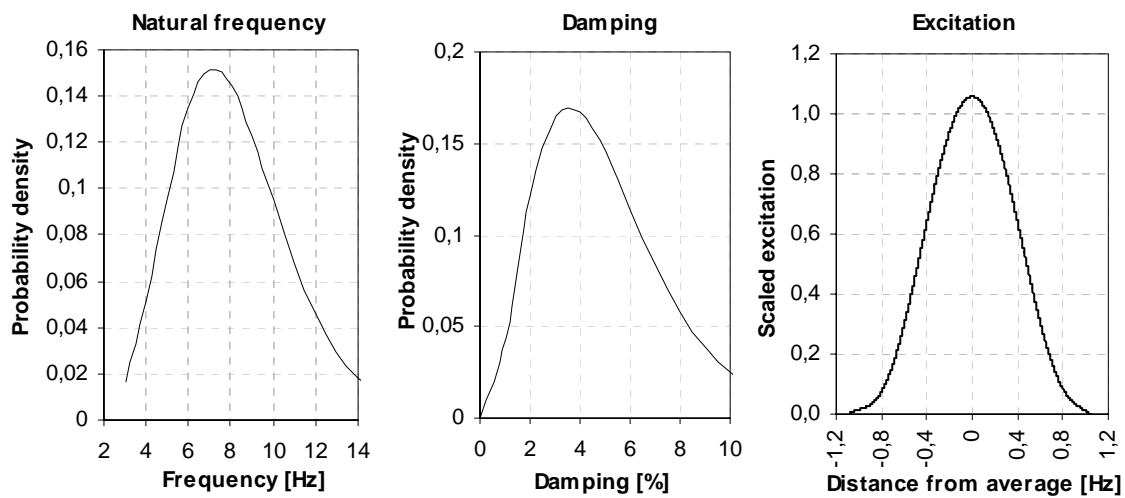


Figure 6. Input data for statistical analysis.

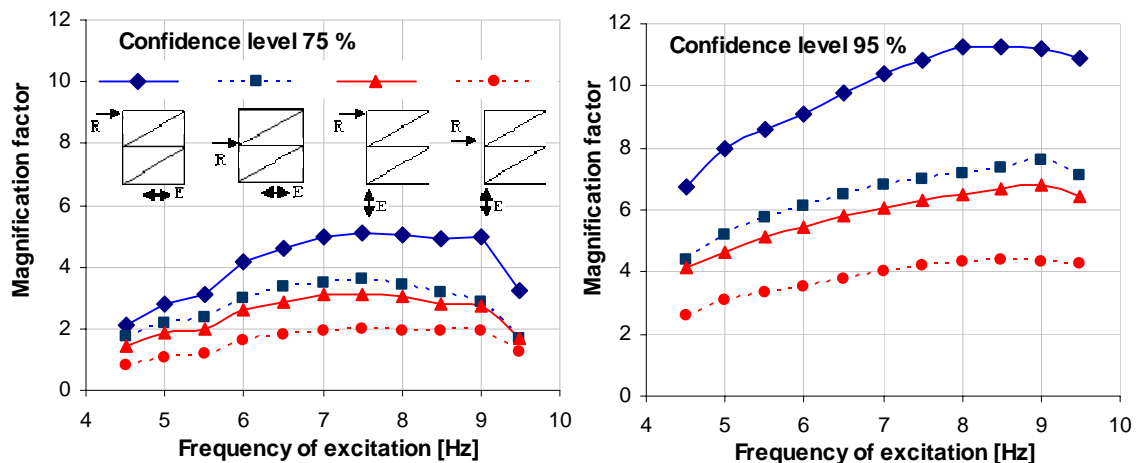


Figure 7. Magnification factor based on statistical analysis. Confidence levels are 75% and 95%. Symbol E shows the place and direction of excitation and R the resulting vibration.

In the case of horizontal ground vibration, the magnification factor at confidence level 95% is about 7–11 on the second level of the frame and about 4–6 on the first level. For the vertical excitation the corresponding values are 4–7 and 2–4. If the confidence level is decreased to 75%, the the magnification factors are nearly halved.

The same model has also been analysed in the time domain using two different signals, measured from the ground, as the input signal. The first is a signal with a wideband spectrum and high vibration frequencies dominating, and the second has a narrowband spectrum with low frequencies dominating, corresponding to the spectra shown in Fig. 5. The analysis is based on a damping of 3%.

In the case of horizontal ground vibration with a narrowband spectrum, and when the frame fundamental frequency coincides with the dominating frequency of excitation, the magnification factors are 9.7 on the second level of the frame and 6.6 on the first level. For vertical excitation the corresponding values are 5.9 and 3.8.

In the case of horizontal ground vibration with a wideband spectrum, and when the frame second natural frequency coincides with the dominating frequency of excitation, the magnification factors are 1.9 on the second level of the frame and 1.7 on the first level. For vertical excitation the corresponding values are 1.0 and 0.7.

7. Test results

Altogether 36 buildings have been measured. Seven of them are at least three-storey houses and the other 29 are one- or two-storey houses. None of the two-storey houses, but all multi-storey houses, are masonry or precast concrete buildings. All the high-rise buildings are in clay areas and they are on concrete piling. Seven of the low-rise buildings are in sand or gravel areas and others are in clay areas. Vibration is induced by railway traffic in 22 houses and by street traffic in 14 houses. The necessary data for comparisons was not available in all cases; therefore the comparisons below may have different amounts of results. For example, the group of one- or two-storey houses includes old data, where the horizontal vibration of the ground was not measured.

Figure 8 shows the comparison between the measured and calculated vibration levels in the foundation. The calculated values are based on the ground vibrations and on Equations (3)–(4). On average the calculated values of one- or two-storey houses agree relatively well with measured ones. It can also be seen that the houses on pilings do not essentially differ from the other results. In some cases the piling may decrease the vertical vibrations but increase the horizontal ones. The two coloured points with

calculated values of 2.1 and 2.5 mm/s are both from a house on sand, where very high vibrations with dominating frequencies of 30–50 Hz were measured from the ground.

The few results for multi-storey houses do not indicate that they could be treated differently from 1–2 -storey houses. The blue dot with a relatively high calculated value of 0.40 mm/s is from a building with large foundation dimensions of 17x31 m². The blue dot with a relatively low calculated value of 0.07 mm/s is from a building where the vibration is very possibly transmitted from the other end of the long building. At the measured end of the house the pile length of 1–2 m is very short compared with the pile length of 6–9 m at the other end of the house.

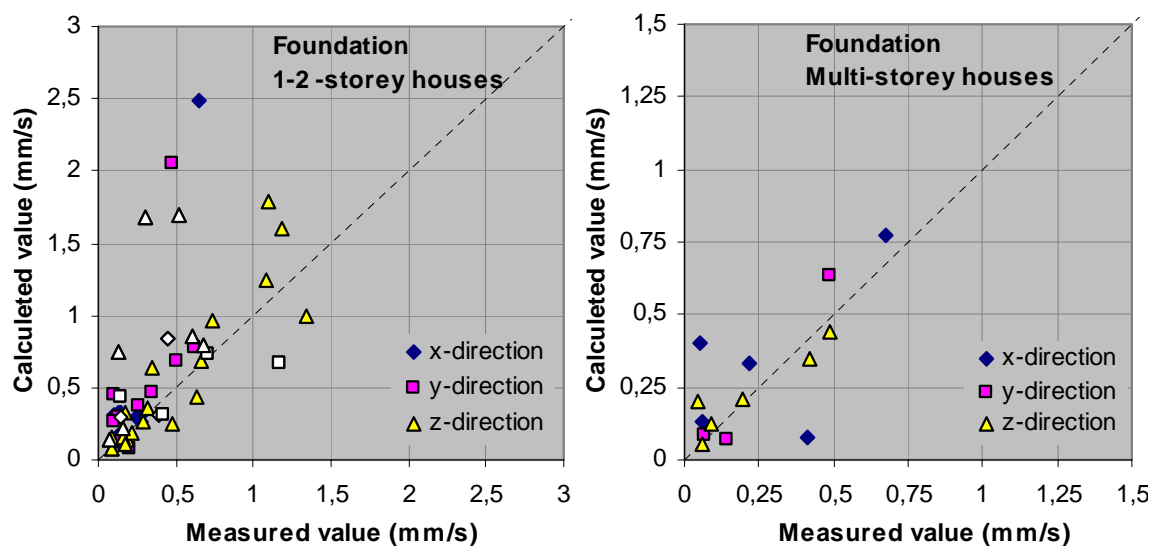


Figure 8. Comparison between measured and calculated vibrations of the foundation. The uncoloured dots are buildings on piling.

Figure 9 shows the comparison between the measured and calculated vibration levels of frames. The calculated values are based on the measured foundation vibrations and Equations (5)–(6). Because the comparison is based on the foundation, here Equations (3)–(4) are not applied. The fundamental frequency of the frame is assumed to fall to any of the 1/3 octave bands given in Table 2. The 1/3 octave bands used in the comparison depend on the number of storeys, and they are 5–10 Hz for two-storey houses and less for multi-storey buildings.

For two-storey houses the scatter of the results is quite large. On average the resonance design agrees quite well with the measured values, but in many cases it results in too safe a design. In many cases even the design based on uniform magnification results in too safe a design. In the case of the few multi-storey houses, no resonance was observed. The design based on the uniform magnification gives moderate accuracy.

Figure 10 shows the comparison between the measured and calculated vibration levels of floors. The calculated values are based on the measured vibrations from the floor edge and on Equations (5)–(6). Because the comparisons are not based on ground vibrations, here Equations (3)–(4) are not used. Because the natural frequency of the floors was not calculated, the fundamental frequency of the floors is assumed to fall to any of the 1/3 octave bands of 8–32 Hz.

Except for four floors, the design based on uniform magnification gives good accuracy. These four floors are from old multi-storey masonry houses with timber-framed floors, and strong resonance was observed. In these cases, magnification factors even higher than the design value of 6.0 were observed. Resonance arose only in some cases, because only in 11 of the 24 floors were the dominating ground vibrations in the possible resonance range of 8–32 Hz; in addition, the resonance phenomenon requires that the natural frequency of the floor coincides closely with the excitation frequency.

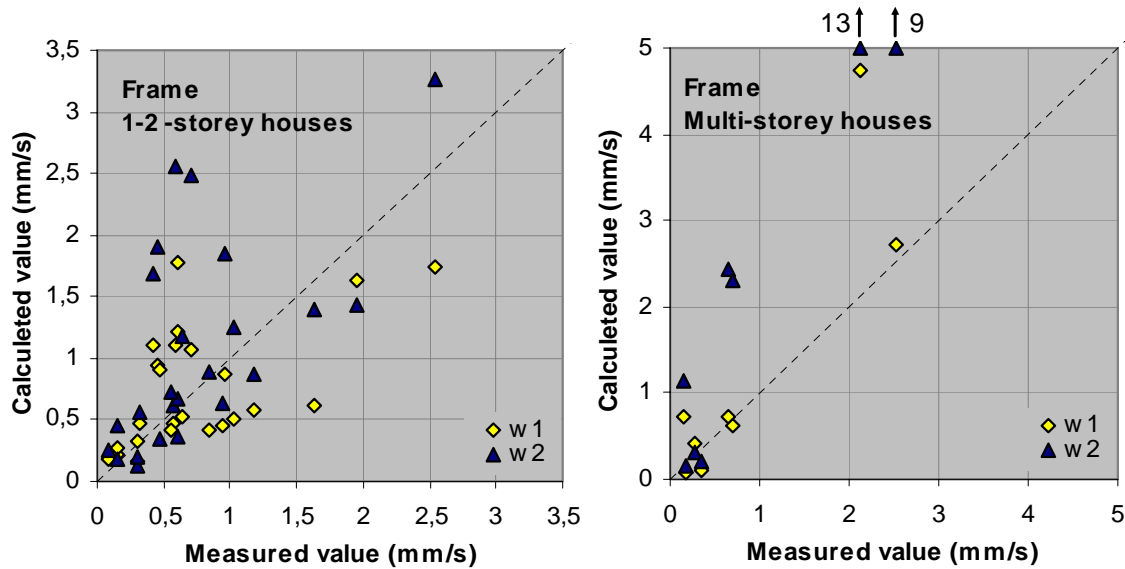


Figure 9. Comparison between measured and calculated horizontal vibrations of frames. The calculated value is based on uniform magnification (w1) and on resonance design (w2).

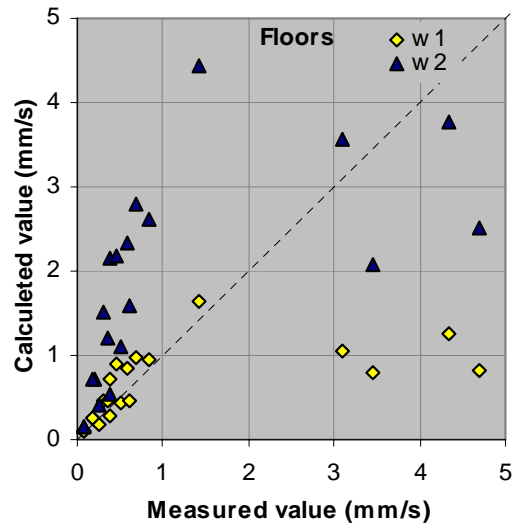


Figure 10. Comparison between measured and calculated vertical vibrations of floors. The calculated value is based on uniform magnification (w1) and on resonance design (w2).

8. Conclusions

Based on FE calculations and field measurements, a method for vibration design of frames and floors is presented. Because of the high magnification factors in resonance design, it is advisable to avoid the fundamental frequencies of the frame and the floor, which coincide with the dominating frequencies of ground vibrations.

Vibration level $v_{w,95}$, which is a statistical maximum of frequency weighted rms velocity over a period of 1 week, is used as the vibration measure. Based on the measured data and on the opinion survey of annoyance, $v_{w,95} < 0.6$ mm/s is proposed for existing building areas and $v_{w,95} < 0.3$ mm/s for new building plan areas or new traffic routes.

The design is based on the vibration level $v_{w,95}$ and normalized vibration spectrum, which are determined by measurements from the building site. The vibration of the ground is determined in three orthogonal directions. The design of a building is based on two different approaches: one considers the uniform magnification of the vibration, and the other the magnification in the resonance. In the case of uniform magnification, the vibrations are assumed to be magnified equally by a factor of 1.5 in all three orthogonal directions. In resonance design the vibrations of the building frame and floors are studied separately. The resonance design of the frame is based only on the horizontal, and the resonance design of the floor only on the vertical, vibrations of the ground. The magnification factor in resonance design is given for the 1/3 octave band that coincides with the fundamental frequency of the frame or floor. For the frame the magnification factor is 4.0 and for floors 6.0.

Based on the field measurements, resonance of the building frame of two-storey houses is very possible if the soil is soft and low frequencies of 4–10 Hz are dominating. In the case of multi-storey houses no resonance was observed, but theoretically it may be possible at least in three- or four-storey buildings. In the field measurements, even higher magnification factors than the design value of 4.0 were found. Based on the FE analyses, even magnification factors of 10 in resonance are possible in the resonance.

Also floor resonance is possible, but it is more rare than resonance of the building frame and usually arises only in harder soils when vibrations over 10 Hz are dominating. In the case of soft soils, floor resonance can arise only if very long-span floors with low frequencies are used. In the field measurements even higher magnification factors than the design value of 6.0 were obtained.

For better understanding of the dynamic behaviour of high-rise buildings, more experience-based vibration measurements are needed. Especially two-storey masonry houses or precast concrete houses, and all kinds of three- to four-storey houses on piles in soft soil should be studied more carefully. There is a lack of knowledge both about the possibility of frame resonance and about vibration transfer from ground to foundation.

9. Acknowledgements

The study is based on the results of the LIIKEVÄ project, which was carried out in three phases by VTT Technical Research Centre of Finland. The project was financed by the Finnish Rail Administration, Finnish Road Administration, Tekes – the Finnish Funding Agency for Technology and Innovation, Ministry of Transport and Communication, Ministry of Environment, the cities of Helsinki, Espoo, Vantaa, Tampere, Turku and Kerava, the Finnish Forest Industries Federation, Rautaruukki Ltd, YIT Construction Ltd, YH-Suomi Ltd, NCC Construction Ltd and VTT Technical Research Centre of Finland. Their support is gratefully acknowledged.

References

- Banverket. 1997. Buller och vibrationer från spårbunden linjetrafik – Riktlinjer och tillämpning. Stockholm: Banverket och Naturvårdsverket (Dnr. S02-4235/SA60). 82 p.
- DIN 4150-2. 1999. Erschütterungen im Bauwesen – Teil 2: Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V. 21 p.

FTA. 2006. Transit noise and vibration impact assessment. Report FTA-VA-90-1003-06. Washington DC: Federal Transit Administration, U.S. Department of Transportation, Office of Planning and Environment. 260 p.

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

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). Genève: International Organization for Standardization. 11 p.

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. Genève: International Organization for Standardization. 7 p.

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*, Vol. 64, pp. 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*, Vol. 193, No. 1, pp. 195–203.

Nelson, J. T. & Saurenman, H. J. 1987. A prediction procedure for rail transportation ground borne noise and vibration. *Transportation Research Record*, No. 1143, pp. 26–35.

Nordtest. 1991. Nordtest Method NT ACOU 082: Buildings: Vibration and shock, evaluation of annoyance. Oslo: Nordisk Innovations Center. 9 p.

NS 8176. 1999. Vibration and shock. Measurement of vibration in buildings from land based transport guidance to evaluation of its effects on human beings. Oslo: Standards Norway. 27 p.

Talja, A. 2004. Recommendation for measurement and classification of traffic-induced vibrations. VTT Research Notes 2278. Espoo: VTT Technical Research Centre of Finland. 50 p. + app. 15 p.

Talja, A., Toratti, T. & Järvinen, E. 2002. Design of floors for human-induced vibrations. Design and testing procedures. VTT Research Notes 2124. Espoo: VTT Technical Research Centre of Finland. 50 p. + app. 12 p.

Liite B:

Rakennuksen värinään vaikuttavat tekijät

Sisällysluettelo

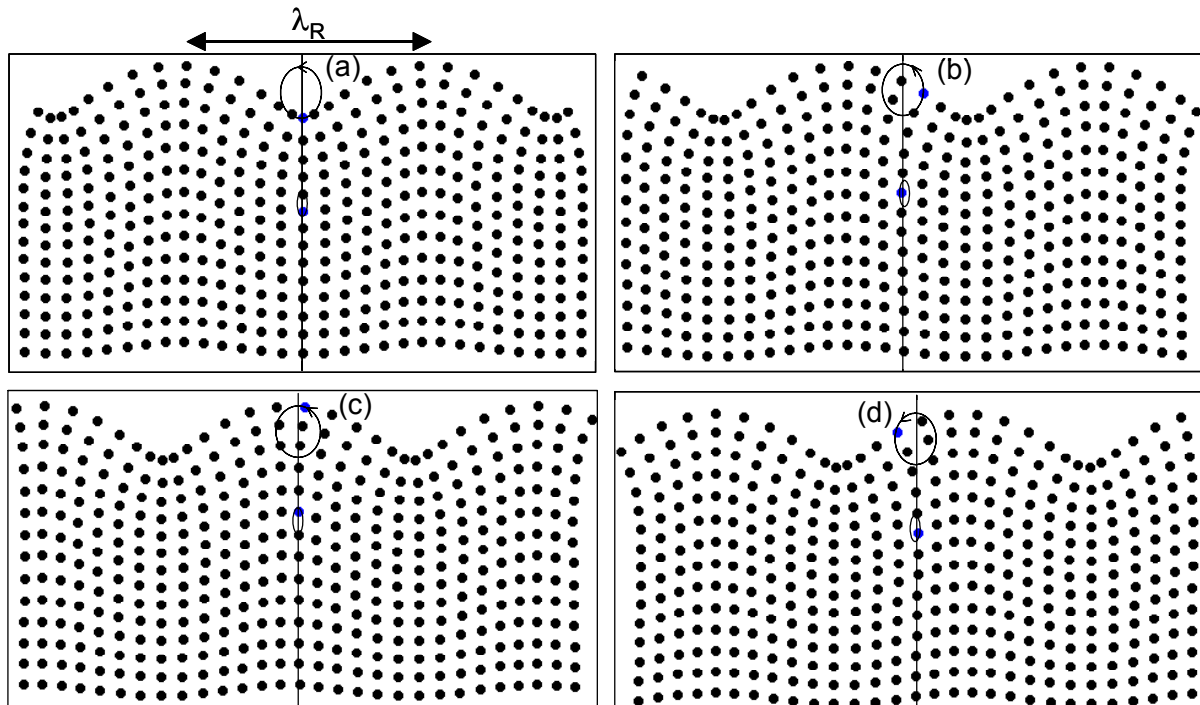
1. Perustusten värähtelyihin vaikuttavia tekijöitä	2
1.1 Maaperän värähtelyn suuruus ja suunta	2
1.2 Maaperän värähtelyn taajuussisältö.....	6
1.3 Rakennuksen vaakadimensioiden vaikutus	7
1.4 Rakennuksen massa.....	9
1.5 Perustamistapa.....	9
1.6 Kirjallisuuslähteiden tuloksia	10
2. Rakennuksen värähtelyyn vaikuttavia tekijöitä	11
2.1 Värähtelyn vahvistuminen resonanssi-ilmiön vaikutuksesta.....	11
2.2 Värähtelyn vahvistuminen todellisella herätteellä.....	12
2.3 Rakennuksen rungon ominaisvärähtely.....	14
2.4 Rakennuksen lattioiden ominaisvärähtely	17
2.5 Rakenteiden värähtelyn herkkyys herätevärähtelyn taajuussisällölle	18
Liitteen B lähdeluettelo	19

1. Perustusten värähtelyihin vaikuttavia tekijöitä

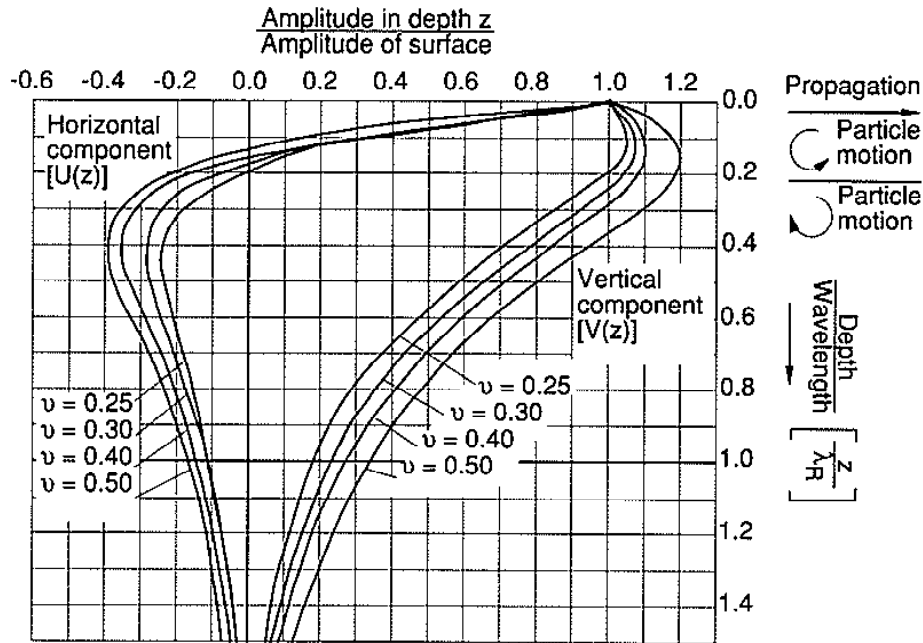
1.1 Maaperän värähtelyn suuruus ja suunta

Maaperän värähtelyä tarkastellaan yleensä kiinteän kappaleen värähtelynä kimmoteorian avulla ja maaperä oletetaan homogeeniseksi. Värähtelyn leviämistä kuvataan P-, S- ja R-aaltojen avulla. Esimerkiksi räjäytystyön yhteydessä havaitaan ensin P-, sitten S- ja viimeisenä R-aallot. P-aalloissa (primary wave, pressure wave, paineaalto) maaperän liike on paine-eroista aiheutuvaa laajenemista ja puristumista. P-aaltojen eteneminen maaperässä vastaa ilmassa tapahtuvaa ääniaaltojen etenemistä. S-aalloissa (secondary wave, shear wave, leikkausaalto) ainehiukkaset liikkuvat leikkausmuodonmuutosten johdosta ilman kokoonpuristumista. S-aalto jaetaan usein vaaka- ja pystysuorassa tapahtuvaan ainehiukkasten liikkeeseen.

R-aalto (rayleigh wave, pinta-aalto) syntyy, kun P- ja S-aallot kohtaavat maanpinnan. Muodostuva R-aalto muistuttaa vedenpinnan aaltoilua (kuva 1). Homogeenisessa maaperässä R-aaltojen suuruus vaimenee siirryttäessä syvemmälle maahan (kuva 2). Pinta-aallon aallonpituutta λ_R vastaavalla syvyydellä pystysuoran värähtelyn amplitudi on enää noin 30 % ja vaakasuoran värähtelyn amplitudi noin 15 % maanpinnan värähtelyn arvosta.



Kuva 1. Ainehiukkasten liike R-aallossa aallon eri vaiheissa (a), (b), (c) ja (d) (<http://www.advalytix.de/pics/SAWRAiGH.gif>).

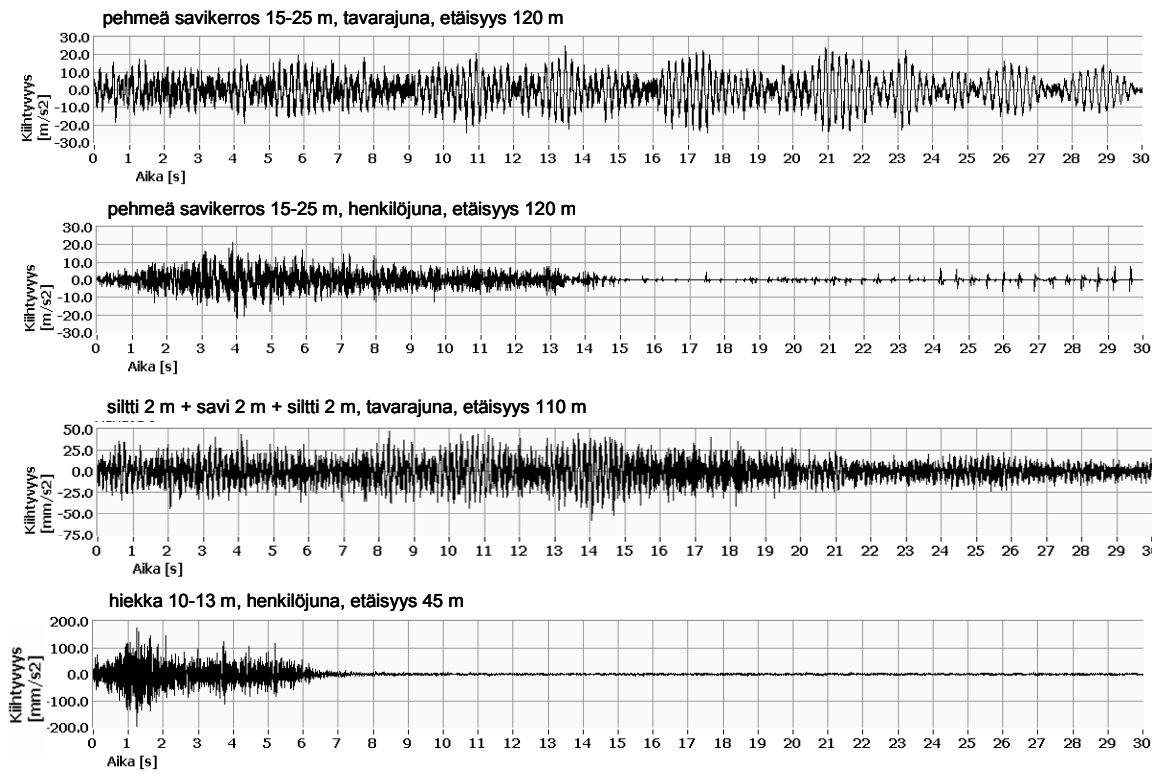


Kuva 2. R-aallon pystysuuntaisen $V(z)$ ja vaakasuuntaisen $U(z)$ värähtelykomponentin suuruus eri syvyyksillä (ν on maaperän suppeumaluku) (Bachmann et al. 1997).

Todellisissa olosuhteissa, joissa maaperä sisältää paksuudeltaan vaihtelevia kerroksia ja peruskallion topografia vaihtelee, värähtelytarkastelu muuttuu monimutkaiseksi. Kun erityyppiset aallot kohtaavat maanpinnan, peruskallion tai toisen maakerroksen, aalto-tyypeissä tapahtuu heijastumista ja taittumista, jolloin värähtelyssä tapahtuu P-aaltojen muuntumista S-aalloiksi ja päinvastoin. Aaltojen heijastuminen ja taittuminen sekä mahdollinen eri herätepisteistä lähtevien tai heijastuvien aaltojen interferenssi voivat aiheuttaa odottamattoman suuria värähtelyarvoja pehmeissä maaperissä etenkin silloin, kun herätteestä lähtevä värähtely on pitkäkestoinen (kuva 3). Nämä ilmiöt ovat herkkiä pienillekin muutoksille herätteessä, joten mitatut värähtelyarvojen erot eri kalustoilla ja eri ajonepeuksilla voivat olla yllättäviä.

Maanpinnan pystysuuntainen värähtely vaimenee yleensä tasaisesti värähtelyn edetessä kauemmaksi väylästä. Usein etäämpänä väylästä värähtelyn suuruuden voidaan karkeasti arvioida puolittuvan, kun etäisyys kasvaa kaksinkertaiseksi (taulukko 1). Hitaampaankin vaimenemiseen on kuitenkin varauduttava erityisesti pehmeillä maalajeilla.

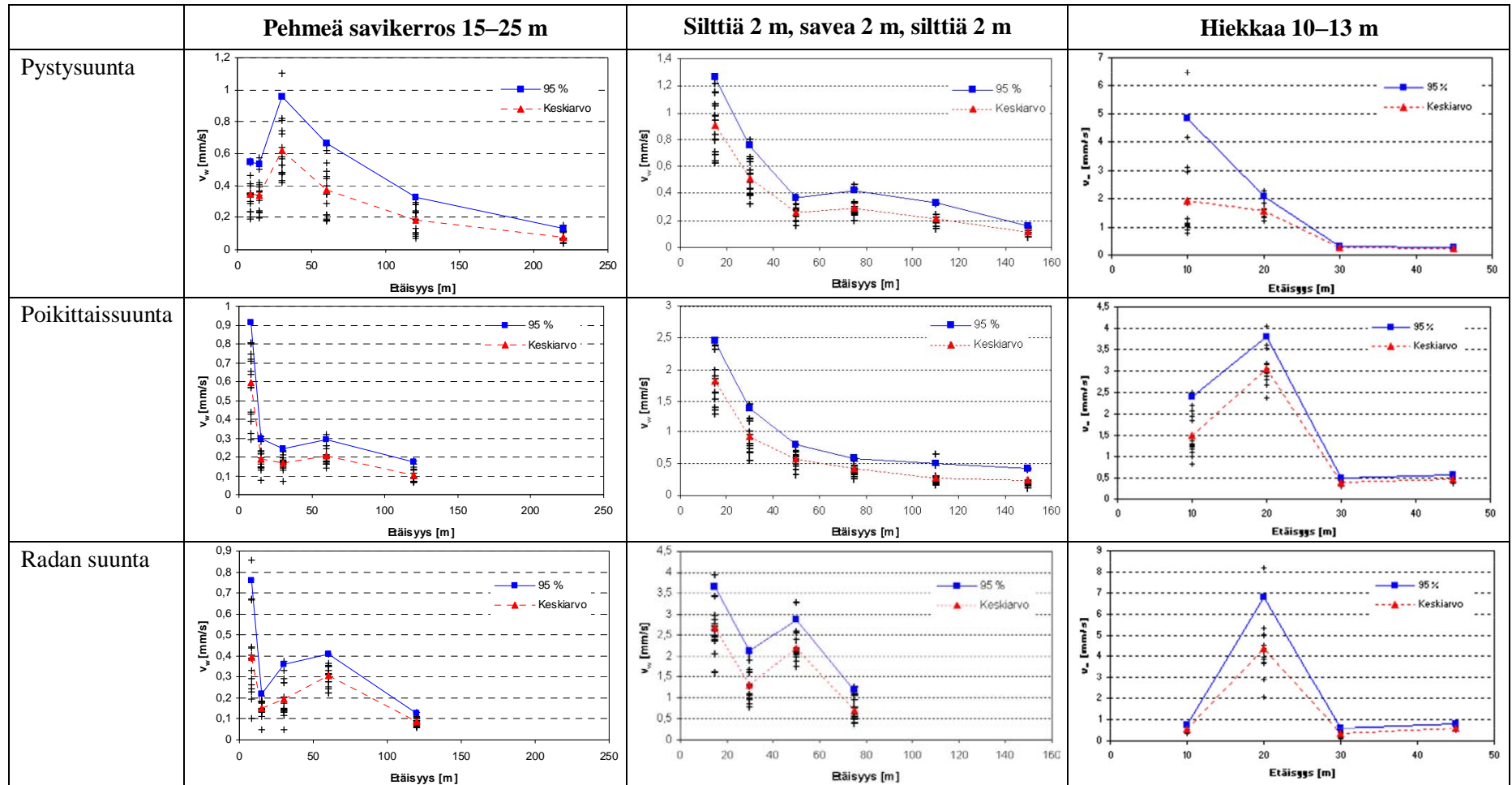
Kokemusperäiset havainnot osoittavat, että usein tehdystä teoreettisesta oletuksesta poiketen vaakavärähtely voi olla pystyvärähtelyä suurempi. Ilmiö on yleinen kovilla maaperillä, mutta myös pehmeillä maaperillä vaakavärähtely voi dominoida vielä kaukanakin radasta.



Kuva 3. Esimerkkejä junien aiheuttamasta värähtelystä eri maaperissä.

Taulukko 1. Esimerkkejä mitatuista maaperän värähtelyn pysty- ja vaakakomponenteista. Viidentoista junan aiheuttamat suurimmat värähtelyt, niiden keskiarvot ja tilastolliset maksimit eri etäisyydellä radasta. Värähtelyn suuruus v_w on määritetty taajuuspainotetun värähtelynäytteen suurimpana rms-arvona (Talja 2004).

BS



1.2 Maaperän värähtelyn taajuussisältö

Maaperän värähtelyn taajuussisältö riippuu liikennevälineen tyypin, painon, jousituksen, väylän kunnan ja ajonopeuden lisäksi maaperästä, sen kerrosten paksuudesta, peruskallion topografiasta ja etäisyydestä väylään.

Kuten rakenteillakin, myös maaperällä on sille ominaiset värähtelymuodot ja taajuudet. Esimerkiksi pehmeillä maalajeilla karkea arvio maapohjan alimmasta ominaistaajuudesta f_0 voidaan laskea lausekkeella (Bachmann et al. 1997)

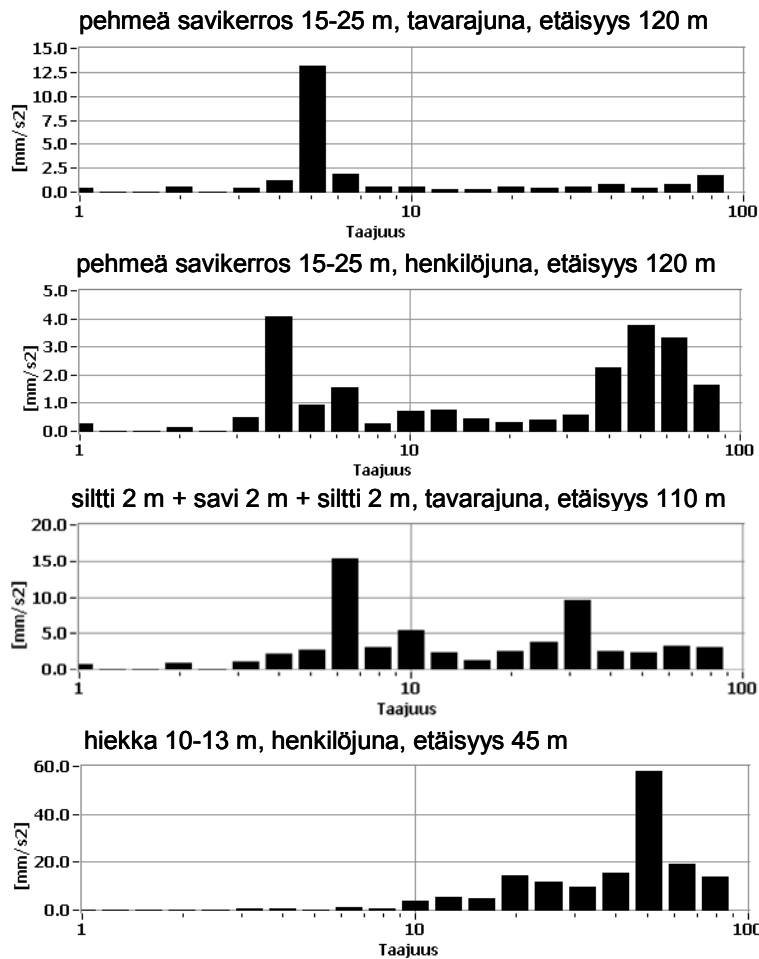
$$f_0 = \frac{c_s}{4H}, \quad (1)$$

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

Lauseke antaa homogeenisen vakiopaksuisen maapohjan alimman ominaistaajuuden pystysuoralle värähtelylle. Esimerkiksi pehmeällä savella, kun vesipitoisuus on alle 50 %, tyypillisesti $c_s = 80\text{--}120$ m/s (Törnqvist & Talja 2006, liite A) ja f_0 [Hz] = $(20\text{--}30)/H$ [m]. Lausekkeen (1) kuvaama värähtely voidaan mieltää toisesta päästään kiinnitetyn homogeenisen sauvan aksiaalivärähtelynä, jolloin sauvan aksiaalijäykkyys ja massa vastaavat maaperästä pystysuunnassa irrotetun kappaleen aksiaalijäykkyyttä. Myös maaperän värähtelyn ylemmillä ominaistaajuuksilla voi olla merkitystä. Koska lauseke (1) on voimakkaasti yksinkertaistettu, se ei ole riittävän tarkka suunnittelutarkoitukseen. Tarkka taajuussisällön määrittäminen on mahdollista ainoastaan mittauksin.

Kokemusperäiset havainnot osoittavat, että pehmeillä savimailla merkittävimmät värähtelyt esiintyvät yleensä 4–10 Hz:n taajuusalueella. Kovilla savimailla merkittävimmät taajuudet ovat yleensä aina yli 10 Hz ja hiekkamailla usein yli 30 Hz. Kuvassa 4 on esimerkkinä kuvassa 3 esitettyjen värähtelynäytteiden taajuussisältö.

Liikenteestä aiheutuu herätevärähtelyä eri taajuuksilla. Pakkovärähtelyn aiheuttama ns. kvasistaattinen värähtely vaikuttaa väylän lähietäisyydellä. Kauemmaksi siirtyessään värähtelyt suodattuvat ja vaimenevat. Vaimeneminen tapahtuu sitä nopeammin, mitä korkeampi on värähtelyn taajuussisältö. Kauimmaksi väylästä siirtyvät yleensä ne värähtelyt, jotka ovat lähellä maaperän alinta ominaistaajuutta. Siksi lähellä väylää esiintyvä värähtely on yleensä aina laajakaistaisempaa kuin kauempana väylästä esiintyvä värähtely. Pehmeillä maaperillä värähtelyillä värähtelytaajuudet saattavat keskittyä hyvinkin kapealle taajuusalueelle.



Kuva 4. Kuvassa 3 esitettyjen värähtelynäytteiden taajuussisältö 1/3-oktaaveittain. Taajuussisältö on suurimman värähtelyn ajanhetkeltä, kun aikaikkuna on 1 s.

1.3 Rakennuksen vaakadimensioiden vaikutus

Koska maaperän ainehiukkasten vaakaliike tapahtuu aaltomaisesti (kuva 1), suuret rakennuksen dimensiot voivat pienentää vaakavärähtelyä. Kun rakennuksen perustus on vaakasuunnassa jatkuva ja äärettömän jäykkä, teoreettisesti katsoen värähtelyn suuruus puolittuu, jos rakennuksen pituus on suurempi kuin $\lambda/2$. Jos rakennuksen pituus on λ , teoreettisesti värähtely häviää täysin.

Värähtelyn aallonpituus voidaan laskea lausekkeesta

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2)$$

missä c on värähtelyaallon etenemisnopeus ja f on värähtelyn taajuus.

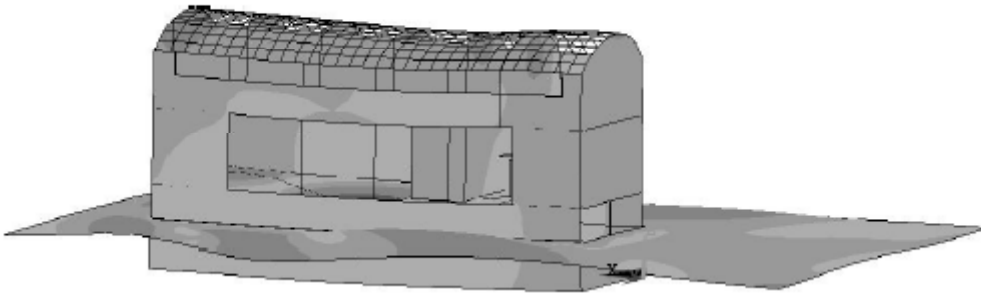
Jos esimerkiksi $c = c_s$ ja $f = f_0$, käyttäen apuna lauseketta (1) karkea arvio leikkausaallon pituudesta on

$$\lambda_s = 4H \quad (3)$$

missä H on maakerroksen paksuus. R-aallon aallonpituus on lähes sama kuin S-aallon pituus, mutta P-aallon pituus on noin kaksinkertainen ($c_R \approx 0,9 c_s$, $c_p \approx 2 c_s$).

Tarkka hallitsevan aallonpituuden määrittäminen ei yleisessä tapauksessa ole laskennallisesti mahdollista. Mitatun dominoivan värähtelytaajuuden ja leikkausaallon etenemisnopeuden c_s avulla voidaan kuitenkin tehdä karkea arvio aallonpituudesta. Jos esimerkiksi mittaukset osoittavat hallitsevaksi taajuudeksi 6 Hz ja maaperä on pehmeää savea (vesipitoisuus alle 50 %), jolle $c_s = 80\text{--}120$ m/s (Törnqvist & Talja 2006, liite A), dominoivan leikkausaallon pituus olisi lausekkeen (2) perusteella 13–20 m.

Suuret rakennuksen dimensiot voivat pienentää myös maanpinnan pystyvärähtelyn vaikutusta. Jos rakennus on vaakasuunnassa jatkuva ja riittävän jäykkä pystytasossa tapahtuville leikkausmuodonmuutoksille, se pystyy tasaamaan tehokkaasti pystyvärähtelyä, jos rakennuksen pituus on suurempi kuin λ (kuva 1). Rakennuksen eri tasojen leikkausjäykkyyden tulee olla tällöin kuitenkin hyvin suuri, jotta se toimii amplitudiltaan alle 0,01 mm:n värähtelyille (kuva 5). Siksi perustamistavoilla (vrt. pilari- ja anturaperustus) ja käytettyjen rakennusmateriaalien jäykkyydellä voi olla merkitystä ilmiöön.



Kuva 5. Rakennuksen pituuden värähtelyä pienentävä vaikutus (Pyl et al. 2002).

Toisaalta jos rakennuksen pituus on pienempi kuin $\lambda/2$, jäykän rakennuksen voisi kuvitella keinuvan pinta-aaltojen päällä, jolloin myös pystyvärähtely aiheuttaisi rakennuksen yläosaan vaakavärähtelyä.

1.4 Rakennuksen massa

Rakennus ja maaperä eivät toimi erillisinä, kuten yleensä yksinkertaistetuissa malleissa joudutaan olettamaan. Pääsääntö on, että mitä massiivisempi rakennus on, sitä enemmän rakennus vaimentaa allaan olevan maaperän värähtelyä. Siksi kevyemmät rakennukset voivat olla herkempiä maaperän värähtelylle, vaikka rakennuksen dynaamiset ominaisuudet (mm. alin ominaistajuus ja vaimennus) olisivat samat.

Rakennuksen ja maaperän vuorovaikutus selittää kuitenkin vain osan siitä, että ne ovat epäherkempiä värähtelyille. Yleensä massiiviset rakennukset ovat pientaloja korkeampia, ja silloin rungon ominaistajuus on yleensä pientaloja alhaisempi eikä rungon resonanssivärähtely pääse syntymään. Lisäksi massiivisten rakennusten vaakadimensiot ovat yleensä suurempia kuin pientaloilla ja vaimentavat siksi pinta-aaltojen vaikutusta.

1.5 Perustamistapa

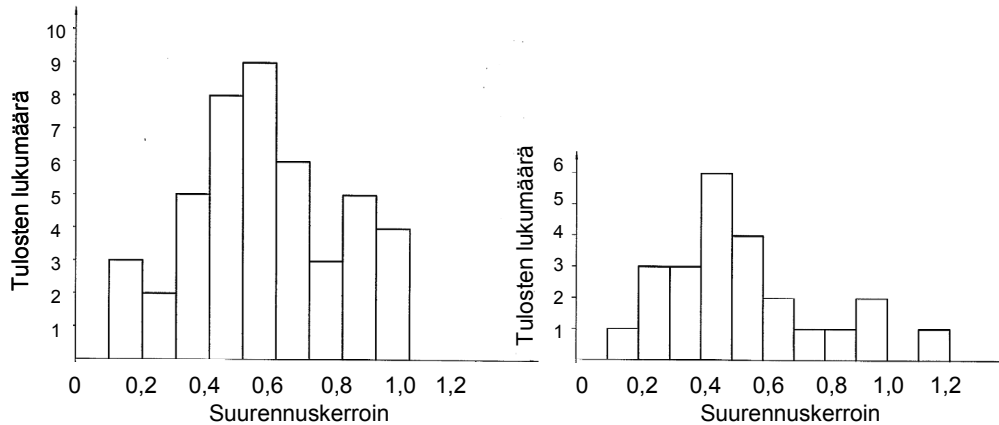
Voisi olettaa, että massiivisen rakennuksen perustaminen pystypaalujen päälle vaimentaa perustukseen siirtyvää pystyvärähtelyä, etenkin jos rakennus on muuten riittävästi eristetty maakontaktista. Pystypaalutus ei kuitenkaan vaimentane perustukseen tulevaa vaakavärähtelyä varsinkaan, jos rakennuksen sokkeli jää maan alle. Se, miten vaakavärähtely siirtyy pelkästään pystypaalutuksen kautta perustuksiin, riippuu voimakkaasti rakennuksen ja maaperän vuorovaikutuksesta ja lienee siksi hyvin tapauskohtaista.

Rakennuksen vaakavärähtelyä voisi kuvitella vaimennettavan vinopaaluilla. Tällöin paalujen on pystyttävä muodostamaan vaakasunnassa jäykkä pukkimainen tukirakenne ja rakennuksen tulisi olla muuten eristetty maakontaktista. Vinopaalutus ei kuitenkaan estä maan ja paalujen kontaktin kautta välittyvää värähtelyä. Vinopaalutuksen voisi olettaa toimivan parhaiten massiivisilla rakennuksilla, jolloin rakennus seisoo suuren painonsa vuoksi hyvin tukevasti pelkästään vinopaaluilla tehdyllä perustuksellaan.

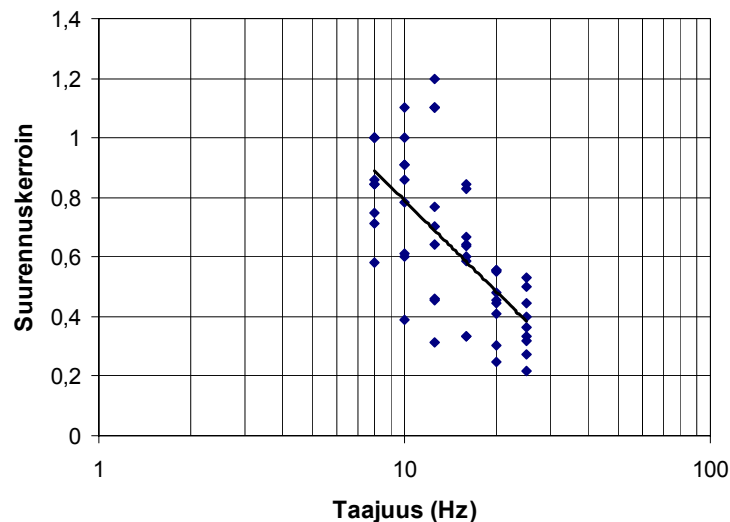
Vaakavärähtelyn merkitys pinta-aalloissa pienenee murto-osaan jo syvyydellä $0,1\lambda$, joskin kasvaa taas hieman, kun siirrytään syvemmälle maaperään (kuva 2, syvyys $0,4\lambda$). Siksi voisi olettaa, että vaakavärähtelyn siirtymistä perustuksiin voitaisiin vaimentaa estämällä perustuksen maakontakti maanpinnan läheisyydessä. Myös pelkästään kellarikerroksen rakentamisen voisi olettaa jossain määrin vaimentavan maan vaakavärähtelyn siirtymistä perustukseen. Maaperän pystyvärähtelyt pienenevät kuitenkin merkittävästi vasta syvyydellä $0,5\lambda$ (kuva 2).

1.6 Kirjallisuuslähteiden tuloksia

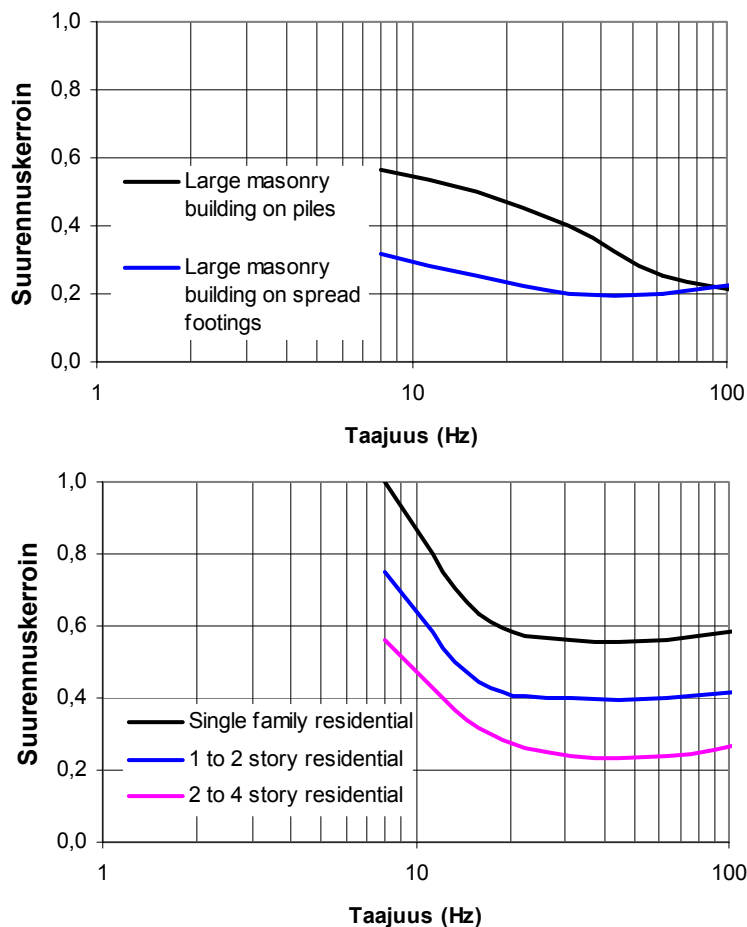
Kuvissa 6–8 on muutama kirjallisuudesta löytynyt tulos sille, miten värähtely siirtyy maaperästä rakennuksen perustuksiin. Yhteinen piirre tuloksille on, että matalat taajudet vaimenevat huonosti. Erityisesti pientaloilla, kun maaperän värähtelytaajuus on alle 15 Hz, perustusten värähtelyt voivat olla samansuuruisia tai jopa suurempia kuin maaperän värähtelyt.



Kuva 6. Perustuksen värähtelyä pienentävän vaikutuksen jakauma eräässä mittaustulosjoukossa (ISO 4866, 1996). Vasemmassa kuvassa on pystysuora värähtely ja oikeassa kuvassa vaakasuora värähtely.



Kuva 7. Yhdeksästä pien- ja pienkerrostalosta mitattu maantieliikenteen aiheuttaman värähtelyn muuttuminen siirryttäessä maaperästä perustukseen. Tulokset on laskettu lähteessä Hunaidi ja Tremblay (1997) esitetyistä mittaustuloksista.



Kuva 8. Arvio erityyppisten rakennusten vaikutuksesta junaliikenteen aiheuttamaan maaperän värähtelyyn (FTA 2006).

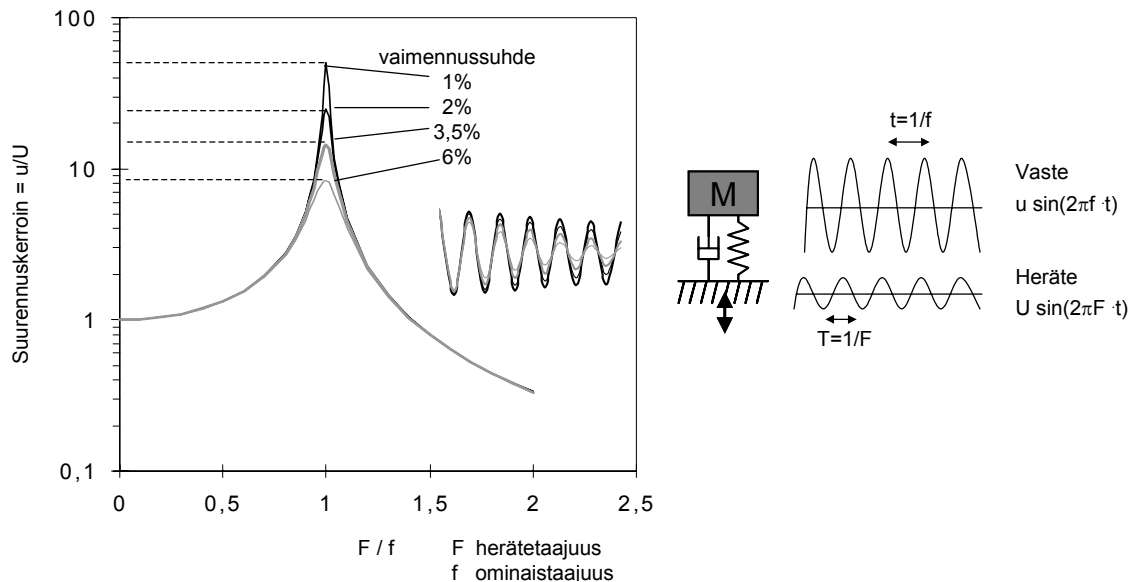
2. Rakennuksen värähtelyyn vaikuttavia tekijöitä

2.1 Värähtelyn vahvistuminen resonanssi-ilmiön vaikutuksesta

Rakennuksen eri osien värähtelykäyttäytymisessä merkittävin tekijä on resonanssi-ilmiö. Jokaisella rakenteella on sille ominainen värähtelymuoto ja ominaistaajuus, jolla rakenne jää värähtelemään, kun se poikkeutetaan tasapainoasemastaan (vapaa värähtely). Kun paikallaan olevaan rakenteeseen kohdistetaan jatkuva harmoninen, siniaallon muotoinen heräte, myös rakenne lähtee värähtelemään harmonisesti. Syntyvän värähtelyn voimakkuuden suhdetta herätevärähtelyyn havainnollistetaan kuvassa 9 esitetyn jousi-massa-systeemin avulla. Kun herätetaajuus sattuu systeemin ominaistaajuudelle, syntyy resonanssi. Tällöin värähtely voi vahvistua jopa monikymmenkertaiseksi. Jos rakentee-

seen kohdistuvan värähtelyn taajuus on huomattavasti pienempi kuin ominaistajuus, värähtelyt siirtyvät samansuuruisina rakenteeseen. Jos taas rakenteeseen kohdistuva taajuus on huomattavasti ominaistajuutta suurempi, värähtelyt vaimenevat. Kuvasta 9 nähdään, että hyvin pienikin muutos herätetaajuudessa saattaa aiheuttaa erittäin suuren muutoksen värähtelyn suurennuskertoimessa.

Värähtelyn vahvistumiseen resonanssissa vaikuttaa voimakkaasti vaimennussuhde. Kuitenkin heti kun poiketaan hiemankin resonanssikohdasta, vaimennuksen vaikutus suurennuskertoimeen pienenee (kuva 9). Yleensä rakennuksista mitatut vaimennukset ovat 1–6 %. Rakennuksissa vaimennus syntyy enimmäkseen rakenneosien ja materiaalien välisissä liitoksissa, ja siksi vaimennus on suurempi kuin esimerkiksi yhdestä materiaalista koostuvalla päistään niveltuetulla palkilla, jolla vaimennus voi olla jopa alle 1 %.

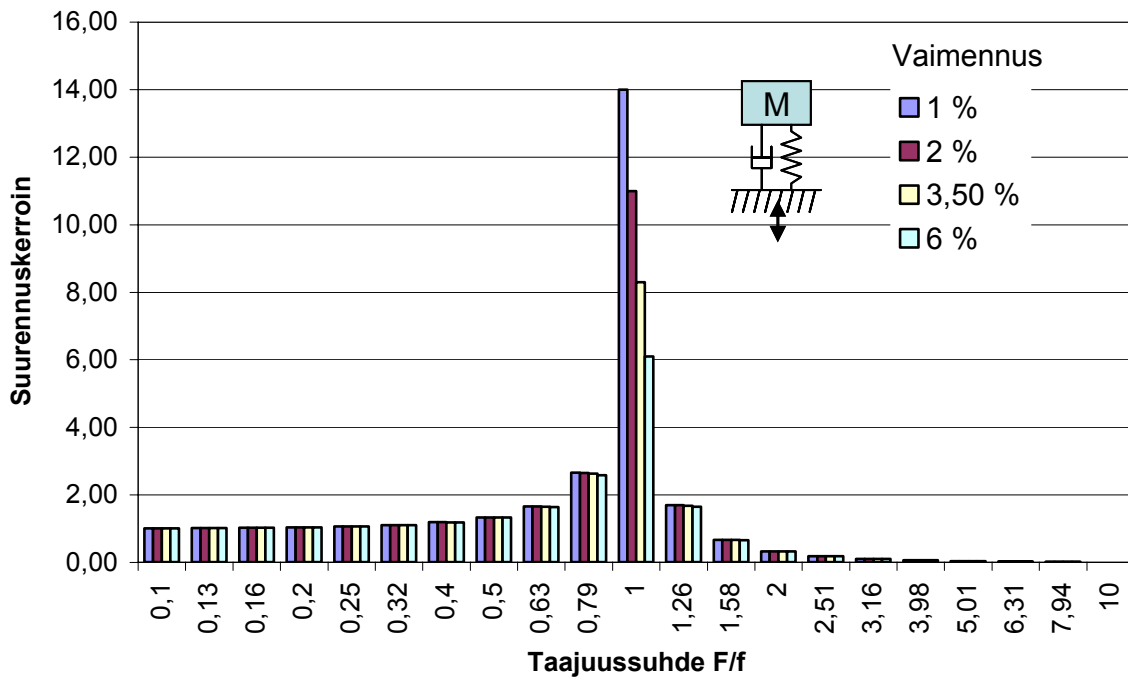


Kuva 9. Värähtelyn suurennuskertoimen herätetaajuuden F ja jousi–massa–systemin ominaistajuuden f suhteen funktiona, kun vaimennussuhteet ovat 1 %, 2 %, 3,5 % ja 6 %. Kuvan osakuvassa esitetään eri vaimennussuhteilla tapahtuvan värähtelyn vaimenemisnopeus (Talja 2004).

2.2 Värähtelyn vahvistuminen todellisella herätteellä

Kun tarkastellaan liikenteestä aiheutuvaa todellista maaperän värähtelyä, värähtely sisältää yleensä useita taajuuskomponentteja. Värähtelyn taajuussisällön laajuudesta riippuen puhutaan kapeakaistaisesta tai laajakaistaisesta herätteestä. Kuvan 9 mukaisesti riippuen herätetaajuuksien ja ominaistajuuden suhteesta eri värähtelykomponentit vahvistuvat, vaimenevat tai siirtyvät samansuuruisina rakenteeseen.

Usein värähtelyn taajuussisältö esitetään 1/3-oktaavikaistoittain. Sitä varten kuvassa 10 esitetään yhden vapausasteen jousi–massa-systeemin värähtelyn keskimääräinen suurenuskerroin 1/3-oktaavikaistoittain. Kuvasta nähdään, että sillä taajuuskaistalla, jolle rakenteen ominaistaajuus sattuu, keskimääräinen värähtelyn suurenuskerroin saa vaimennuksesta riippuen arvon 6–14, joka on huomattavasti pienempi kuin kuvassa 9 esiintyvä maksimiarvo. Muilla 1/3-oktaavikaistoilla suurenuskerroin on merkittävästi pienempi eikä juuri riipu vaimennuksesta.



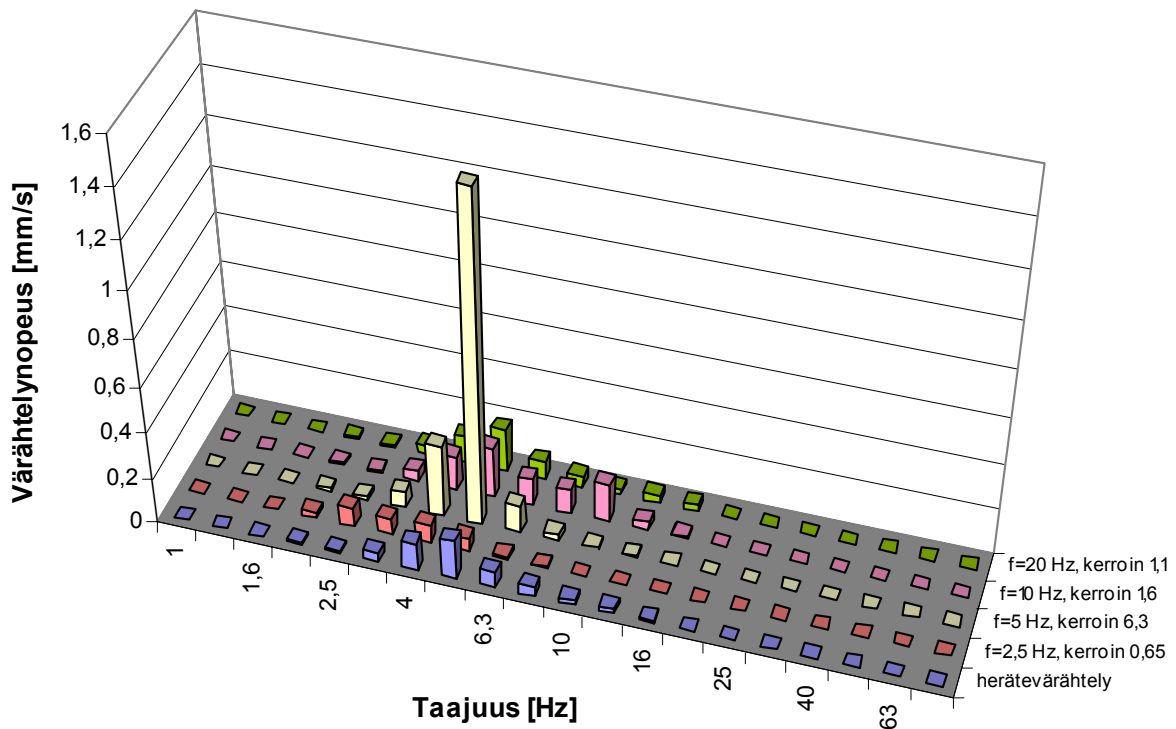
Kuva 10. Keskimääräinen värähtelyn suurenuskerroin herätetaajuuden F ja jousi–massa-systeemin ominaistaajuuden f suhteen funktiona, kun vaimennussuhteet ovat 1 %, 2 %, 3,5 % ja 6 %.

Tarkastellaan esimerkkinä tapausta, jossa herätteen taajuussisältö käsittää useita taajuuskomponentteja $v_{w,i}$ ja jousi–massa-systeemin ominaistaajuus f vaihtelee. Tarkasteltavassa esimerkissä systeemin vaimennuksena käytetään arvoa 3,5 %, joka on tyypillinen rakennuksissa esiintyvä arvo.

Kuvan 11 ensimmäisellä rivillä esitetään herätteen värähtelykomponentit 1/3-oktaaveittain. Muilla riveillä esitetään eri värähtelykomponenttien suuruudet, kun ominaistaajuus f on 2,5 Hz, 5 Hz, 10 Hz tai 20 Hz. Arvot on saatu kertomalla herätteen värähtelykomponentit kuvan 10 keskimääräisellä värähtelyn suurenuskertoimella. Kuvassa ominaistaajuuden f perässä esitetty kerroin on suurenuskerroin, joka on jousen päällä liikkuvan massan värähtelyn tehollisarvon suhde herätevärähtelyn tehollisarvoon. Koko värähtelyn tehollisarvo v_w lasketaan eri taajuuskomponenttien tehollisarvoista $v_{w,i}$ lausekkeella

$$v_w = \sqrt{\sum v_{w,i}^2} \quad (4)$$

Kuvasta 11 nähdään, että jos systeemin ominaistajuus on herätteessä esiintyvien värähtelytaajuuksien ylärajalla ($f = 20$ Hz), esimerkkitapauksessa perustuksen värähtelyt siirtyvät likimain samansuuruisina massaun. Kun systeemin ominaistajuus sattuu herätevärähtelyn hallitsevien taajuuksien kanssa samalle alueelle ($f = 5$ Hz), värähtelyn tehollisarvo voimistuu noin 6-kertaiseksi. Jos taas systeemin ominaistajuus on herätteessä esiintyvien värähtelytaajuuksien alarajalla ($f = 2,5$ Hz), värähtely vaimenee.



Kuva 11. Värähtelyn tehollisarvon muuttuminen jousi–massa-systeemissä, kun sen ominaistajuus vaihtelee (vaimennus 3,5 %). Vaaka-akselilla värähtelyn taajuus 1/3-oktaaveittain, pystyakselilla värähtelynopeuden tehollisarvo eri 1/3-oktaavikaistoilla. Oikeassa reunassa esitetty kerroin on värähtelyn tehollisarvon suurennuskerroin eri jousi–massa-systeemin ominaistajuuksilla (Törnqvist & Talja 2006, liite E).

2.3 Rakennuksen rungon ominaisvärähtely

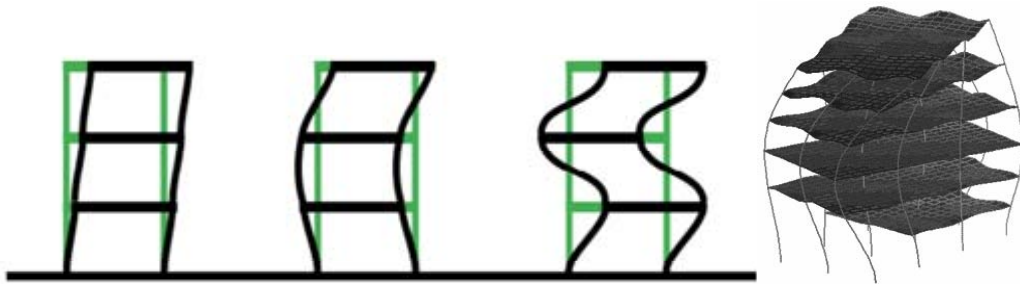
Vaakavärähtelyä voi aiheuttaa sekä perustuksen pysty- että vaakavärähtely. Perustuksen värähtelyyn vaikuttavat maaperän värähtelyn lisäksi rakennuksen vaakadimensiot ja rakennuksen perustamistapa.

Rakennuksen rungon ominaismuodoissa eri tasot liikkuvat vaakasuunnassa. Kun yksikerroksista rakennusta kuvataan tasomallilla, värähtely yksinkertaistuu jousi–massa–systeemiin, jossa massa M muodostuu pääasiassa katon massasta ja jäykkyys k muodostuu seinien tai muiden jäykistävien osien leikkausjäykkyydestä. Ominaistaajuus on tällöin

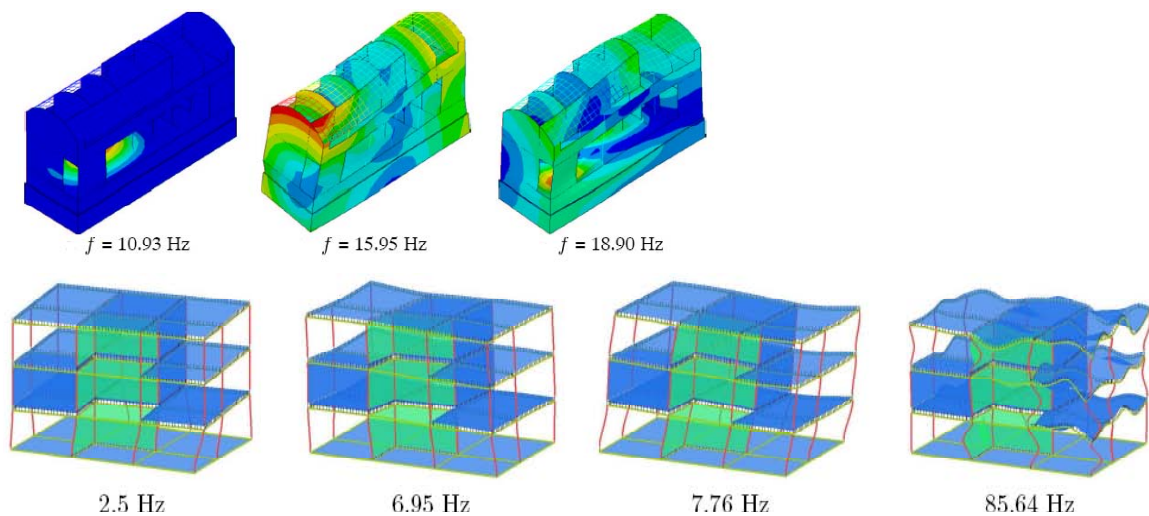
$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{M}} \quad (5)$$

eli ominaistaajuus on sitä alhaisempi, mitä pienempi on jäykkyys tai mitä suurempi on massa.

Monikerroksisilla rakennuksilla massa keskittyy useisiin tasoihin. Tällöin rungolla on useita ominaismuotoja, joissa tasot voivat liikkua eri suuntiin (kuva 12). Alin ominaistaajuus on sillä muodolla, jossa massat liikkuvat samaan suuntaan. Rakennuksen rungolla voi esiintyä myös vääntövärähtelyä, jossa tasot kiertyvät pysty akselinsa ympäri. Värähtelymuodot voivat olla myös monimutkaisempia muotoja, joissa yhtyvät rakennuksen eri osien värähtelymuodot ja joissa voi näkyä myös rakennuksen ja maaperän vuorovaikutus (kuva 13).



Kuva 12. Kolmikerroksisen rakennuksen rungon värähtelyn ominaismuotoja (oikea kuva: <http://www.buildingvibration.com/>).

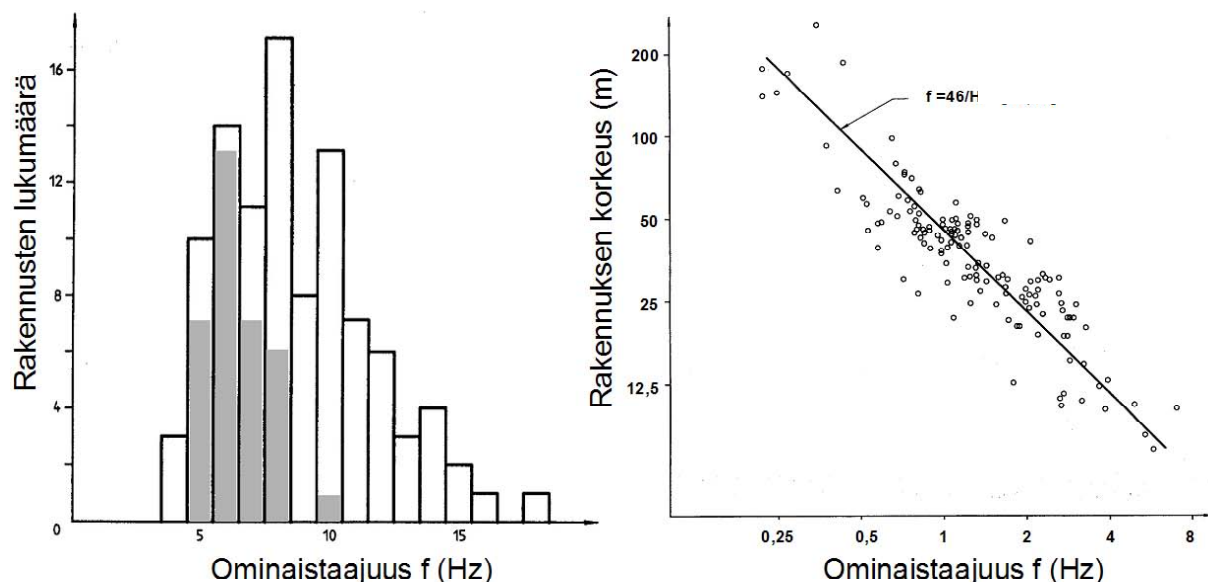


Kuva 13. Erilaisia pientalon ja kerrostalon värähtelyn ominaismuotoja (Pyl et al. 2004).

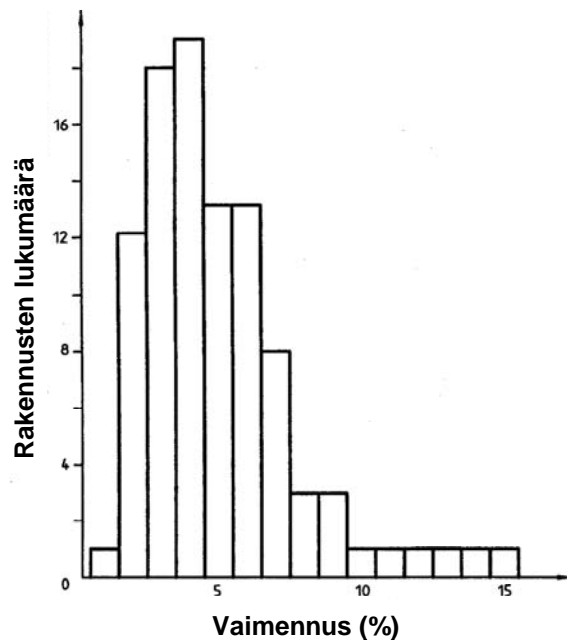
Jos rakennus on perustettu pystypaaluille, yksikerroksinenkin rakennus voi dynaamisessa mallissa toimia kaksikerroksisen rakennuksen tapaan. Ensimmäisen kerroksen massa muodostuu tällöin alapohjan massasta ja jäykkyys paalujen päiden vaakajoustosta. Paalutuksen voi siten olettaa pienentävän rungon ominaistajuutta ainakin, mikäli sokkelin ja maan kontakti puuttuu.

Standardin ISO 4866 lisäyksessä (ISO 4866, 1994) esitetään 96 pientalon rungon alimmat mitatut ominaistajuudet ja vaimennukset. Mittaukset on tehty USA:ssa 1-, 1^{1/2}- ja 2-kerroksisista pientaloista. Mittaukset käsittävät sekä kellarikerroksellisia että ryömintätilallisia rakennuksia. Lisäksi VTT on mitannut 34 pientalon rungon ominaistajuuden. Mitatut talot ovat 1–2-kerroksisia. Kuvan 14 mukaan pientalojen rungon alimmat ominaistajuudet ovat 5–14 Hz, Suomessa yleensä 5–8 Hz. Talon iällä, sijainnilla ja mittasuhteilla ei mitatuissa kohteissa havaittu olevan oleellista merkitystä ominaistajuuteen. Korkeammissa taloissa havaittiin kuitenkin yleensä hieman alhaisemmat ominaistajuudet kuin matalissa taloissa. Vaimennukset ovat mitatuissa kohteissa 2–7 %, keskimäärin 3–5 % (kuva 15).

Standardin ISO 4866 lisäyksessä (ISO 4866, 1994) esitetään myös 163 kerrostalon rungon alimmat mitatut ominaistajuudet sekä joidenkin tyypillisten kerrostalojen vaimennuksia. Esimerkiksi tyypillisen 3–4-kerroksisen talon ominaistajuus on noin 4–5 Hz ja 7–8-kerroksisen talon ominaistajuus on noin 2 Hz. Kerrostaloilla suhteelliset vaimennukset ovat 0,5–2,1 %. Arvot ovat huomattavasti pienempiä kuin pientaloista mitatut vaimennukset.



Kuva 14. Rakennusten ominaistajuuksia. Vasemmassa kuvassa pientaloista mitattuja ominaistajuuksia ja oikeassa kuvassa kerrostaloista mitattuja ominaistajuuksia (ISO 4866, 1994). Vasempaan kuvaan lisätyt harmaat pylväät esittävät VTT:n mittaus tuloksia.



Kuva 15. Pientaloista mitattuja vaimennuksia (ISO 4866, 1994).

Rakennuksen rungon värähtely muodostunee yleensä pahimmaksi pehmeillä savimailla, jolloin herätevärähtely on usein hyvin kapeakaistaista: sen merkittävimmät taajuudet esiintyvät yleensä 4–10 Hz:n alueella. Tällöin ainakin pientaloilla ja pienkerrostaloilla rungon resonanssi-ilmiö on mahdollinen ja suurimmat värähtelyt esiintyvät rakennuksen yläkerrassa. Korkeilla kerrostaloilla rakennuksen alin ominaistaajuus on yleensä alempi kuin maaperästä tulevat herätetaajuudet. Tällöin ylemmissä kerroksissa rungon värähtely voi olla jopa pienempää kuin alemmissä kerroksissa.

2.4 Rakennuksen lattioiden ominaisvärähtely

Koska rakennuksen kantavat seinät ovat pystysuunnassa hyvin jäykkiä, perustuksen pystyvärähtely voi siirtyä lähes samansuuruisena eri kerroksiin, myös kerrostalon ylimpiin kerroksiin. Kantavien seinien pystyvärähtely toimii herätteenä lattioiden värähtelylle. Yleensä lattian ominaisvärähtely voidaan arvioida päistään niveltueettuna palkkina lausekkeella (Talja et al. 2002)

$$f = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}}, \quad (6)$$

missä l on lattiapalkkien tai -elementtien pituus
 $(EI)_l$ on lattian suurempi, pääsuuntaa l vastaava jäykkyys $E_l I_l$ ja
 m on lattian massa pinta-alayksikköä kohden lisättynä hyötykuorman osuudella 30 kg/m^2 .

Lauseke (6) aliarvioi ominaistaajuutta enintään 5 %, kun $b/l > 1,0$ ja $(EI)_l / (EI)_b > 30$, mutta jos $b/l = 0,5$, samaan tarkkuuteen päästään vasta, kun $(EI)_l / (EI)_b > 200$. Tekijä b on lattian leveys ja $(EI)_b$ on lattian pienempi, leveyssuuntaa b vastaava jäykkyys. Jos esitetyt ehdot eivät täyty, lattian reunojen tuenta on otettava huomioon. Tällöin ominaistaajuus voidaan arvioida lausekkeella

$$f = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}} \cdot \sqrt{1 + \left[2 \left(\frac{l}{b} \right)^2 + \left(\frac{l}{b} \right)^4 \right] \frac{(EI)_b}{(EI)_l}} \quad (7)$$

Laattamaisilla rakenteilla on alemman ominaistaajuuden omaavan ominaisuuden lisäksi myös korkeamman ominaistaajuuden omaavia, ns. ylempiä ominaisuustoja. Värähtelymuotoja on sitä enemmän, mitä suurempi on lattian pituus- ja poikittaissuuntaisen jäykkyyden ero.

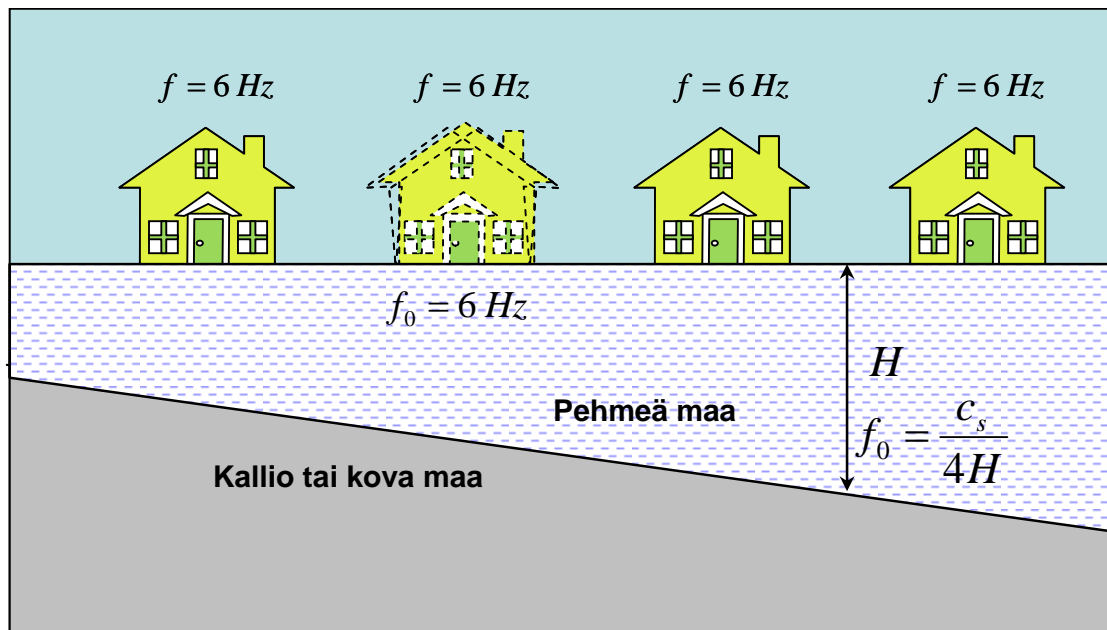
Lattian ominaistaajuus vaihtelee erittäin paljon, sillä lattian tyyppin ja jännevälin merkitys on suuri. Kevyiden puu- tai teräsrunkoisten lattioiden jänneväli on yleensä 3–8 m, ominaistaajuus f on 8–30 Hz ja vaimennus 3–7 %. Mitä lyhyempi on jänneväli, sitä suuremmat ovat ominaistaajuudet. Raskaammilla ja pitempijänteisillä ontelolaattalattioilla ominaistaajuus on yleensä alempi, 6–20 Hz. Pitkäjänteisillä teräsbetoniliittorakenteilla, jotka eivät kuitenkaan ole yleisiä asuinrakennuksissa, ominaistaajuudet ovat vielä alempia ja yleensä 3–8 Hz. Ontelolaattalattioilla ja muilla raskailla lattioilla vaimennus vaihtelee väliseinien yms. varusteiden määrästä riippuen ja on yleensä 2–4 %.

Lattioiden värähtely muodostuneen yleensä pahimmaksi kovilla savimailla ja paksuilla hiekkamailla, jolloin merkittävimmät herätetaajuudet ovat yleensä yli 10 Hz ja resonanssi-ilmiö on mahdollinen. Pehmeillä savimailla resonanssi voi ilmetä yleensä vain pitkäjänteisillä massiivilaatoilla tai niissä yleensä vanhojen rakennuksien kevyissä lattioissa, joissa ei ole otettu huomioon kävelyn aiheuttaman lattian värähtelyn estämiseksi esitettyä suositusta $f > 10$ Hz.

2.5 Rakenteiden värähtelyn herkkyys herätevärähtelyn taajuuksisällölle

Resonanssi-ilmiön syntyminen on joskus hyvin sattumanvaraista, sillä pienikin muutos heräte- tai ominaistaajuudessa saattaa aiheuttaa erittäin suuren muutoksen värähtelyn suurennuskertoimessa. Ilmiö korostuu erityisesti kapeakaistaisella herätevärähtelyllä (kuva 4). Samasta liikenteestä aiheutuva värähtely voi hyvinkin pienten rakenne-erojen vuoksi voimistua eri tavalla näennäisesti samanlaisissa rakennuksissa. Toisaalta myös täsmälleen samanlaisissa rakennuksissa voi näennäisesti sama liikenne aiheuttaa erilaista

tärinän voimistumista, koska pienetkin erot pohjasuhteissa rakennuksen tai väylän alla voivat muuttaa tärinän taajuussisältöä (kuva 16). Myös aaltojen heijastuminen ja taittuminen muuttavat tärinän taajuussisältöä. Joissakin tapauksissa voi myös liikenteen tyyppi johtaa näennäisesti epäloogiseen tulokseen, sillä värähtelyn taajuussisältö riippuu myös kalustotyypistä ja liikenteen nopeudesta.



Kuva 16. Pienet erot pohjasuhteissa tai rakennuksessa voivat aiheuttaa odottamattomia eroja rakennusten käyttäytymisessä.

Liitteen B lähdeluettelo

Bachmann, H. et al. 1997. Vibration problems in structures. Practical guidelines. Basel: Birkhäuser Verlag. 234 s. ISBN 0-8176-5148-9.

FTA. 2006. Transit noise and vibration impact assessment. Washington DC: Federal Transit Administration. 261 s. http://www.fta.dot.gov/documents/FTA_Noise_and_Vibration_Manual.pdf.

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

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. Geneve: International Organization for Standardization. 7 s.

ISO 4866. 1996. Mechanical vibration and shock – Vibration of buildings – Guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on buildings. Amendment 2: Annex E – Vibrational interaction between the foundation of a structure and the soil. Geneve: International Organization for Standardization. 8 s.

Pyl, L., Degrande, G. & Lombaert, G. 2002. Numerical modelling of traffic induced vibrations in buildings based on a dynamic soil-structure interaction formulation. 15th ASCE Engineering Mechanics Conference. New York, June 2–6, 2002. 8 s. <http://www.kuleuven.ac.be/bwm/papers/pylip02b.pdf>.

Pyl, L., Degrande, G. & Clouteau, D. 2004. Vibration of a source-receiver model for road traffic-induced vibrations in buildings. II: Receiver model. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 130, No. 12, s. 1394–1406.

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

Talja, A., Toratti, T. & Järvinen, E. 2002. Lattioiden värähtelyt. Suunnittelu ja kokeellinen arviointi. VTT Tiedotteita 2124. Espoo: VTT. 50 s. + liitt. 12 s. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2002/T2124.pdf>.

Törnqvist, J. & Talja, A. 2006. Suositus liikennetärinän arvioimiseksi maankäytön suunnittelussa. VTT Working Papers 50. VTT: Espoo. 46 s. + liitt. 33 s. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2006/W50.pdf>.

Liite C:

Yhteenveto mittauskohteista

Seuraavilla sivuilla on lyhyt yhteenveto VTT:n värinämittauksen kohteina olleista rakennuksista ja mitatuista värähtelyistä. Mittaukset esitellään tarkemmin kohdekohtaisissa tutkimusselostuksissa. Tärinät on mitattu aina maaperästä ja perustuksesta, lisäksi tapauskohtaisesti on mitattu rakennuksen rungon vaaka- tai lattioiden pystyvärähtelyä.

Mittaukset on tehty julkaisun VTT Tiedotteita 2278

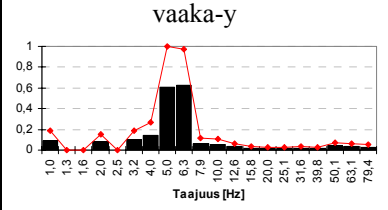
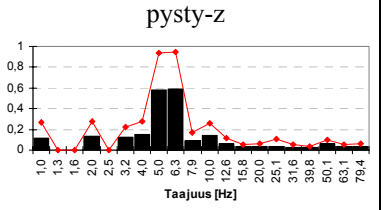
(<http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2004/T2278.pdf>) mukaisesti ja mittaustulokset on käsitelty julkaisun VTT Working Papers 50

(<http://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2006/W50.pdf>) mukaisesti.

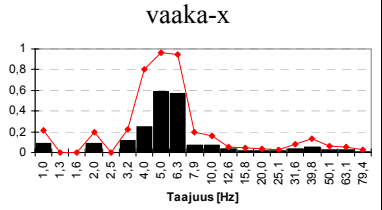
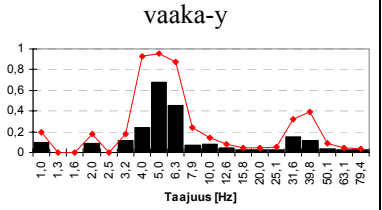
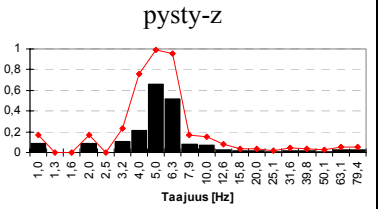
Värähtelyn suuruutta kuvataan värähtelyn tunnusluvulla $v_{w,95}$ (mm/s), joka kuvaa värähtelyn maksimiarvon odotusarvoa. Tunnusluku perustuu viikon tarkastelujaksoon ja sen aikana viiteentoista suurimmat värähtelyt aiheuttavaan liikennevälineeseen. Kustakin valitusta värähtelysignaalista on määritetty suurin painotettu värähtelyn tehollisarvo v_w (mm/s) käyttäen aikaikkunan pituutena arvoa $\tau = 1$ s. Tunnusluku $v_{w,95}$ on määritetty rakennuksen pituussuunnassa (yleensä harjan suunta), poikittaissuunnassa ja pystysuunnassa.

Maaperän värähtelyn taajuussisältö perustuu tunnusluvun $v_{w,95}$ määrittämisessä käytettyihin värähtelynäytteisiin. Kustakin 15 värähtelysignaalista on maksimivärähtelyä v_w vastaavalla ajanhetkellä (aikaikkuna $\tau = 1$ s) laskettu erikseen värähtelykomponenttien suuruus 1/3-oktaaveittain. Niistä on määritetty eri taajuuskomponenttien suhde tehollisarvoon v_w ja tuloksena on esitetty näiden suhteiden keskiarvo ja maksimi.

(1) Pientalo savimaalla

Valmistunut	Kerroksia	Runko	Paalutus	Maaperä	Etäisyys
2005	2	puu	teräs, 6–10 m	savi, 3–5 m	rata, 80 m
Runko: Seinät puurunkoiset ja puupintaiset, alapohja ontelolaatoista, välipohja puurunkoinen, alapohja tuulettuva.					
Perustus: RR-paaluja (φ75 ja 90 mm, jako 3–4 m) on rakennuksen ulkokehällä ja osittain rakennuksen keskilinjalla. Niiden päihin on valettu anturapalkki 400x400, jonka alapinta on noin metrin syvyydellä. Anturapalkkien päälle on tehty sokkeli Leca-harkoista.					
Mitatut suurimmat värähtelyn tunnusluvut ($v_{w,95}$, mm/s)			vaaka-x	vaaka-y	pysty-z
			Maaperä	-	0,67
			Perustus	-	1,17
			Muu rakennus (2. krs)	2,55	2,41
Maaperän värähtelyn taajuussisältö					
vaaka-x (ei mitattu)		vaaka-y 		pysty-z 	

(2) Rivitalo savimaalla

Valmistunut	Kerroksia	Runko	Paalutus	Maaperä	Etäisyys
2005	2	betoni ja puu	betoni, 8–12 m	savi, 5–9 m	rata, 105 m
Runko: väliseinät betonia (1. krs) ja puuta (2. krs), julkisivut puurunkoiset ja puupintaiset, alaja välipohja ontelolaatoista, alapohja tuulettuva.					
Perustus: 4 kpl teräbetonipaaluja (250x250) huoneistojen välisten kantavien seinien kohdalla. Väliseiniä risteää 4 m pitkä pituussuuntaa jäykistävä poikittainen väliseinä, jonka päiden kohdalla paalut. Paalujen päihin valettu antura 400x700, jonka päälle on asennettu noin 1,0 m korkea sokkeliementti.					
Mitatut suurimmat värähtelyn tunnusluvut ($v_{w,95}$, mm/s)			vaaka-x	vaaka-y	pysty-z
			Maaperä	0,84	0,75
			Perustus	0,45	0,51
			Muu rakennus (2. krs)	0,61	0,70
Maaperän värähtelyn taajuussisältö					
vaaka-x 		vaaka-y 		pysty-z 	

(3) Pientalo savimaalla

Valmistunut	Kerroksia	Runko	Paalutus	Maaperä	Etäisyys	
2004	2 + kellari	puu	ei käytetty	siltti 6–8 m	rata, 135 m	
<p>Runko: Seinät puurunkoiset ja puupintaiset, alapohja ontelolaatoista, välipohja puurunkoinen, kellari maanvarainen.</p> <p>Perustus: Kantavat linjat ovat rakennuksen sivuseinillä ja rakennuksen keskilinjalla. Kellarin ulkoseinät ovat 700 mm leveän anturan päälle muurattuja harkkoseiniä. Keskilinjalla on 600 mm leveä antura.</p>						
Mitatut suurimmat värähtelyn tunnusluvut ($v_{w,95}$, mm/s)			vaaka-x	vaaka-y	pysty-z	
			Maaperä	0,33	0,46	0,08
			Perustus	0,28	0,35	0,08
			Muu rakennus (2. krs)	0,53	0,63	-
Maaperän värähtelyn taajuussisältö						

(4) Pientalo savimaalla

Valmistunut	Kerroksia	Runko	Paalutus	Maaperä	Etäisyys	
2004	2	puu	betoni, 10–12 m	savi 8–10 m	rata, 135 m	
<p>Runko: Seinät puurunkoiset ja puupintaiset, alapohja ontelolaatoista, välipohja puurunkoinen, alapohja tuulettuva.</p> <p>Perustus: 3 kpl teräbetonipaaluja 250x250mm (jako 3,5–5 m) rakennuksen sivuseinillä ja rakennuksen keskilinjalla. Paalujen päihin valettu antura 500...700x700, h=500. Anturoiden päälle on asennettu noin 800 mm korkeat sokkelielementit.</p>						
Mitatut suurimmat värähtelyn tunnusluvut ($v_{w,95}$, mm/s)			vaaka-x	vaaka-y	pysty-z	
			Maaperä	0,31	0,32	0,14
			Perustus	0,40	0,41	0,07
			Muu rakennus (2. krs)	1,64	1,00	-
Maaperän värähtelyn taajuussisältö						

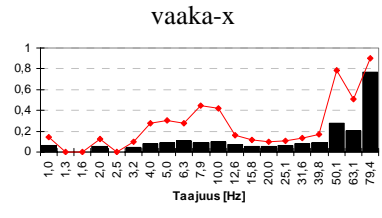
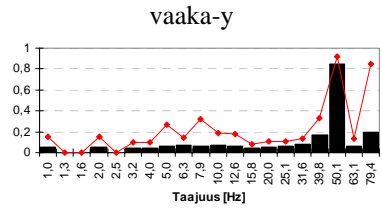
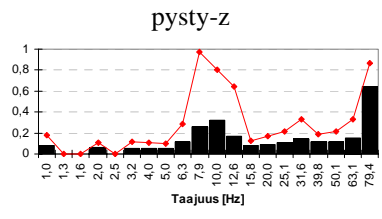
(5) Pientalo hiekkamaalla

Valmistunut	Kerroksia	Runko	Paalutus	Maaperä	Etäisyys
1987	2	puu	ei käytetty	hiekkä 10–13 m	rata, 14 m
Runko: Seinät puurunkoiset, ulkoverhous tiili 85 mm, alapohja ja välipohja puurunkoiset, alapohja tuulettuva.					
Perustus: Anturapalkki ja harkoista muurattu sokkeli.					
Mitatut suurimmat värähtelyn tunnusluvut ($v_{w,95}$, mm/s)			vaaka-x	vaaka-y	pysty-z
Maaperä			2,07	0,24	0,61
Perustus			0,14	0,21	0,18
Muu rakennus (lattia 1. krs)			-	-	0,38
Maaperän värähtelyn taajuussisältö					

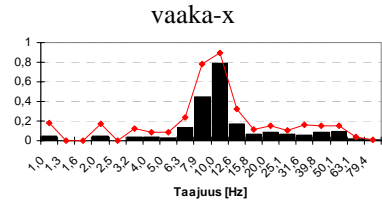
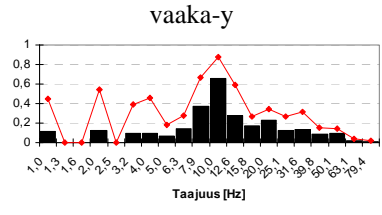
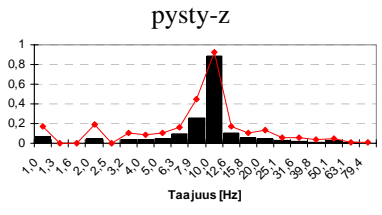
(6) Pientalo hiekkamaalla

Valmistunut	Kerroksia	Runko	Paalutus	Maaperä	Etäisyys
1990-luvulla	1,5	puu	ei käytetty	hiekkä 10–13 m	rata, 14 m
Runko: Seinät puurunkoiset ja puupintaiset, alapohja maanvarainen betonilaatta, välipohja puurunkoinen.					
Perustus: Anturapalkki ja harkoista muurattu sokkeli.					
Mitatut suurimmat värähtelyn tunnusluvut ($v_{w,95}$, mm/s)			vaaka-x	vaaka-y	pysty-z
Maaperä			0,13	0,13	0,20
Perustus			0,13	0,13	0,22
Muu rakennus (runko 2. krs)			0,31	0,25	-
Maaperän värähtelyn taajuussisältö					

(7) Pientalo hiekkamaalla

Valmistunut	Kerroksia	Runko	Paalutus	Maaperä	Etäisyys	
1986	1	puu	ei käytetty	hiekkä 10–13 m	rata, 18 m	
Runko: Seinät puurunkoiset, ulkoverhous tiili 85 mm, alapohja maanvarainen betonilaatta.						
Perustus: Anturapalkki ja harkoista muurattu sokkeli.						
Mitatut suurimmat värähtelyn tunnusluvut ($v_{w,95}$, mm/s)				vaaka-x	vaaka-y	pysty-z
Maaperä				0,57	0,97	0,76
Perustus				0,13	0,13	0,63
Muu rakennus				-	-	0,84
Maaperän värähtelyn taajuussisältö						
vaaka-x		vaaka-y		pysty-z		
						

(8) Pientalo savimaalla

Valmistunut	Kerroksia	Runko	Paalutus	Maaperä	Etäisyys	
1960	1½ + kellari	siporex	ei paaluja	savi, 5 m	katu, 12 m	
Runko: Siporex-runko, alapohja maanvarainen laatta, välipohjat puurunkoisia.						
Perustus: Rakennus on perustettu betonisokkelin ja anturoiden varaan. Perustamissyvyys on 2,0–2,5 m.						
Mitatut suurimmat värähtelyn tunnusluvut ($v_{w,95}$, mm/s)				vaaka-x	vaaka-y	pysty-z
Maaperä				0,34	0,29	0,65
Perustus				0,13	0,10	0,34
Muu rakennus				1,03	0,38	
Maaperän värähtelyn taajuussisältö						
vaaka-x		vaaka-y		pysty-z		
						

(9) Pientalo savimaalla

Valmistunut	Kerroksia	Runko	Paalutus	Maaperä	Etäisyys	
1988	1½	puu	betoni, 4–8 m	savi, 4–5 m	katu, 12 m	
Runko: Puurunko ja tiiliverhoilu, tuulettuva alapohja ontelolaaatoista, välipohja puurunkoinen.						
Perustus: Betonipaalut (250x250, jako 4,0–6,0 m) ovat ulko- ja kantavien seinien linjoilla, lisäksi kuisteilla on omia paaluja. Paalujen päälle on valettu anturapalkki 600x400, jonka alapinta on noin 700 mm syvyydellä. Anturapalkkien päällä on 800 mm korkea sokkelielementti.						
Mitatut suurimmat värähtelyn tunnusluvut ($v_{w,95}$, mm/s)			vaaka-x	vaaka-y	pysty-z	
			Maaperä	0,31	0,50	0,75
			Perustus	0,14	0,15	0,13
			Muu rakennus	0,14	0,14	
Maaperän värähtelyn taajuussisältö						
vaaka-x		vaaka-y		pysty-z		

(10) Pientalo savimaalla

Valmistunut	Kerroksia	Runko	Paalutus	Maaperä	Etäisyys	
1946	1½ +kellari	puu	ei	savi, yli 5 m	katu, 8 m	
Runko: Seinät puurunkoiset ja puupintaiset, maanvarainen alapohja, välipohjat puurunkoiset.						
Perustus: Anturoille valettu betonisokkeli. Rakennus on peruskorjattu 1990-luvulla ja siinä yhteydessä talon perustuksia on oikaistu ja tuettu.						
Mitatut suurimmat värähtelyn tunnusluvut ($v_{w,95}$, mm/s)			vaaka-x	vaaka-y	pysty-z	
			Maaperä	0,43	0,72	0,97
			Perustus	0,25	0,50	0,74
			Muu rakennus	0,24	0,42	
Maaperän värähtelyn taajuussisältö						
vaaka-x		vaaka-y		pysty-z		

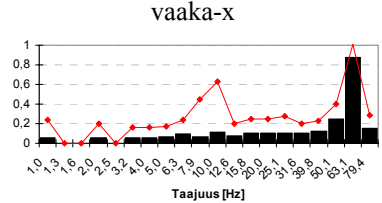
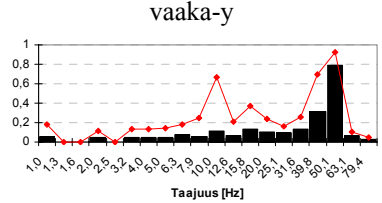
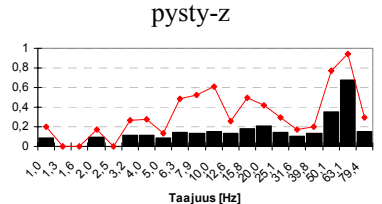
(11) Pientalo ohuen silttikerroksen päällä

Valmistunut	Kerroksia	Runko	Paalutus	Maaperä	Etäisyys
1983	1+parvi	puu	ei	siltti, 1–2 m	katu, 20 m
Runko: Seinät puurunkoiset, tiiliverhous 85 mm, maanvarainen alapohja, välipohja puurunkoinen.					
Perustus: Rakennus on maanvarainen ja perustussyvyys on 700 mm. Rakennuksen kohdalla maaperä on hiekansekaista silttiä 1–2 m syvyyteen, sen alla tiivistä hiekkaa tai moreenia 5–8 m.					
Mitatut suurimmat värähtelyn tunnusluvut ($v_{w,95}$, mm/s)			vaaka-x	vaaka-y	pysty-z
Maaperä			0,30	0,39	0,09
Perustus			0,27	0,26	0,08
Muu rakennus			0,31	0,59	
Maaperän värähtelyn taajuussisältö					
vaaka-x		vaaka-y		pysty-z	

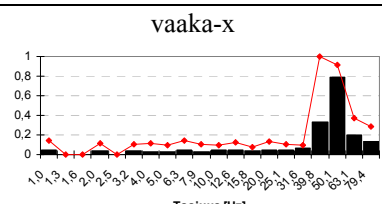
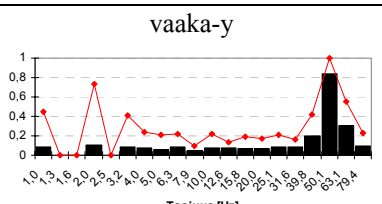
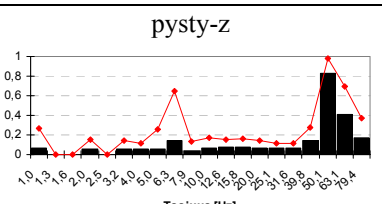
(12) Pientalo ohuen savikerroksen päällä

Valmistunut	Kerroksia	Runko	Paalutus	Maaperä	Etäisyys
40/50-luku	2+kellari	puu	ei	savi, 1–2 m	katu, 13 m
Runko: Seinät puurunkoiset ja puupintaiset, maanvarainen alapohja, välipohjat puurunkoiset.					
Perustus: Anturoille valettu betonisokkeli. Rakennus sijaitsee savialueella, jossa saven paksuus on 1–3 m.					
Mitatut suurimmat värähtelyn tunnusluvut ($v_{w,95}$, mm/s)			vaaka-x	vaaka-y	pysty-z
Maaperä			0,87	0,85	0,28
Perustus			0,62	0,63	0,47
Muu rakennus			0,30	0,46	
Maaperän värähtelyn taajuussisältö					
vaaka-x		vaaka-y		pysty-z	

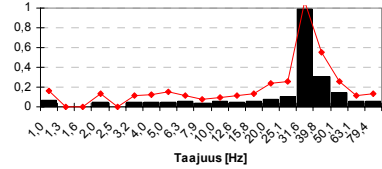
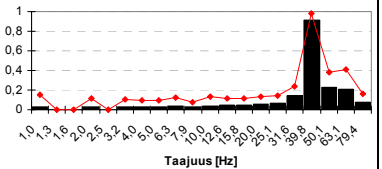
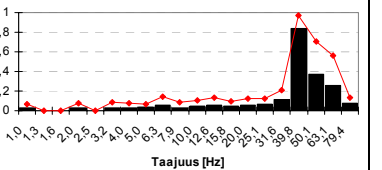
(13) Pientalo hiekkamaalla

Valmistunut	Kerroksia	Runko	Paalutus	Maaperä	Etäisyys
1950	2 + kellari	puu	ei	hiekkä >6 m	rata, 63 m
Runko: Puurunko, ulkopinta rapattu, alempi välipohja betonirunkoinen, ylempi välipohja puurunkoinen.					
Perustus: Anturoille valettu betonisokkeli.					
Mitatut suurimmat värähtelyn tunnusluvut ($v_{w,95}$, mm/s)			vaaka-x	vaaka-y	pysty-z
Maaperä			1,09	1,28	0,33
Perustus			0,10	0,11	0,09
Muu rakennus (2. krs)			0,29	0,21	
Maaperän värähtelyn taajuussisältö					
vaaka-x		vaaka-y		pysty-z	
					

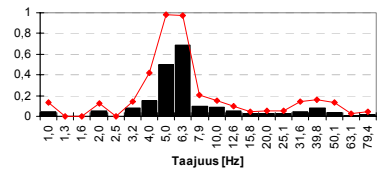
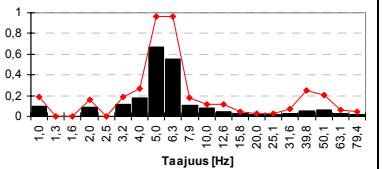
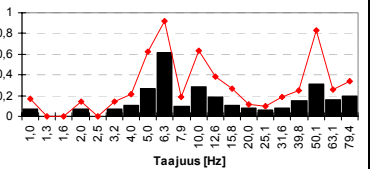
(14) Pientalo hiekkamaalla

Valmistunut	Kerroksia	Runko	Paalutus	Maaperä	Etäisyys
1970	1	tiili	ei	hiekkä >6 m	rata, 29 m
Runko: Täystiilitalo, lattia maanvarainen betonilaatta.					
Perustus: Anturoille valettu betonisokkeli.					
Mitatut suurimmat värähtelyn tunnusluvut ($v_{w,95}$, mm/s)			vaaka-x	vaaka-y	pysty-z
Maaperä			2,54	1,13	0,69
Perustus			-	-	-
Muu rakennus (lattia oh)			0,10	0,11	0,25
Maaperän värähtelyn taajuussisältö					
vaaka-x		vaaka-y		pysty-z	
					

(15) Rivitalo hiekkamaalla

Valmistunut	Kerroksia	Runko	Paalutus	Maaperä	Etäisyys
1985	1	puu	ei	hiekkä >6m	rata, 31 m
Runko: Seinät puurunkoiset, ulkoverhous tiili 85 mm, alapohja maanvarainen betonilaatta.					
Perustus: Anturoille valettu betonisokkeli					
Mitatut suurimmat värähtelyn tunnusluvut ($v_{w,95}$, mm/s)			vaaka-x	vaaka-y	pysty-z
Maaperä			5,45	5,99	2,98
Perustus			0,64	0,47	1,35
Muu rakennus (lattia)				0,32	0,60
Maaperän värähtelyn taajuussisältö					
vaaka-x		vaaka-y		pysty-z	
					

(16) Kerrostalo savimaalla

Valmistunut	Kerroksia	Runko	Paalutus	Maaperä	Etäisyys
2006	3	betoni	betoni, 7–8 m	savi, n. 5 m	rata, 36 m
Runko: Seinät sandwich-elementeistä, ala- ja välipohjat ontelolaatoista, alapohja tuulettuva.					
Perustus: Betonipaalut (300x300mm, jako 1,3–2,4 m) ovat huoneistojen välisten kantavien seinien (väli 6,2–9,3 m) linjoilla. Noin joka toisen väliseinän reunimmaisat paalut on lyöty hieman vinoon. Paalujen päälle on valettu anturapalkki 500x600, jonka alapinta on noin metrin syvyydellä. Anturapalkkien päälle on valettu 0,7–1,2 m korkea sokkeli-elementti. Perustusrakenteet on erotettu maasta pehmeällä eristeellä.					
Mitatut suurimmat värähtelyn tunnusluvut ($v_{w,95}$, mm/s)			vaaka-x	vaaka-y	pysty-z
Maaperä			2,48	2,84	0,51
Perustus			1,06	3,16	0,48
Muu rakennus (3. krs ja lattia)			0,78	2,12	0,38
Maaperän värähtelyn taajuussisältö					
vaaka-x		vaaka-y		pysty-z	
					

(17) Kerrostalo savimaalla

Valmistunut	Kerroksia	Runko	Paalutus	Maaperä	Etäisyys		
2004	5	betoni	betoni, 7–9 m	savi, 3–7 m	rata, 118 m		
<p>Runko: Seinät sandwich-elementeistä, ala- ja välipohjat ontelolaatoista, alapohja tuulettuva.</p> <p>Perustus: Betonipaalut (300x300mm, jako 1,2–2,4 m) ovat huoneistojen välisten kantavien seinien (väli 7–8 m) linjoilla. Paalujen päälle on valettu anturapalkki 750x600, jonka alapinta on noin 1,4 m syvyydellä. Anturapalkkien päälle on 1,4 m korkea sokkelielementti.</p>							
Mitatut suurimmat värähtelyn tunnusluvut ($v_{w,95}$, mm/s)				vaaka-x	vaaka-y	pysty-z	
				Maaperä	0,33	0,64	0,21
				Perustus	0,21	0,49	0,19
Muu rakennus (4.krs)				0,29	0,64	0,15	
Maaperän värähtelyn taajuussisältö							

(18) Kerrostalo savimaalla

Valmistunut	Kerroksia	Runko	Paalutus	Maaperä	Etäisyys		
2007	5	betoni	betoni, 4–6 m	savi, 3–5 m	rata, 58 m		
<p>Runko: Seinät sandwich-elementeistä, ala- ja välipohjat ontelolaatoista, alapohja tuulettuva.</p> <p>Perustus: Betonipaalut (300x300mm, jako 1,6–2,6 m) ovat ulkoseinien ja huoneistojen välisten kantavien seinien (väli 7...8 m) linjoilla. Paalujen päälle on valettu anturapalkki 750x450, jonka alapinta on 1,35 m syvyydellä. Anturapalkkien päälle on 1,15 m korkea sokkelielementti.</p>							
Mitatut suurimmat värähtelyn tunnusluvut ($v_{w,95}$, mm/s)				vaaka-x	vaaka-y	pysty-z	
				Maaperä	0,42	0,29	0,21
				Perustus	0,05	-	0,04
Muu rakennus (runko 4. krs, lattia 4. krs)				0,10	0,18	0,07	
Maaperän värähtelyn taajuussisältö							

(19) Kerrostalo savi/kitkamaalla – länsipääty

Valmistunut rakenteilla	Kerroksia	Runko	Paalutus	Maaperä	Etäisyys
	3	betoni	betoni, 6–9 m	savi, 1–5 m	rata, 36 m
<p>Runko: Seinät sandwich-elementeistä, ala- ja välipohjat ontelolaatoista, alapohja tuulettuva.</p> <p>Perustus: Betonipaalut (300x300mm, jako 1,6–2,6 m) ovat ulkoseinien ja huoneistojen välisten kantavien seinien (väli 6–9 m) linjoilla. Osa paaluista on vinopaaluja 4:1. Rakennuksen itäpääty on maanvarainen. Paalujen päällä on sokkelielementti 700x500, jonka alapinta on noin 1,3 m syvyydellä. Anturapalkkien päälle on 1,1 m korkea sokkelielementti. Anturapalkit ja sokkelielementit on erotettu maasta 50–100 mm paksulla pehmeällä eristeellä.</p>					
Mitatut suurimmat värähtelyn tunnusluvut ($v_{w,95}$, mm/s)		vaaka-x	vaaka-y	pysty-z	
		Maaperä	0,79	1,33	0,37
		Perustus	0,67	1,82	0,42
		Muu rakennus (runko 3. krs)	0,69	2,52	
Maaperän värähtelyn taajuussisältö					

(20) Kerrostalo savi/kitkamaalla – itäpääty

Valmistunut rakenteilla	Kerroksia	Runko	Paalutus	Maaperä	Etäisyys
	3	betoni	betoni, 6–9 m	savi, 1–5 m	rata, 36 m
<p>Runko: Seinät sandwich-elementeistä, ala- ja välipohjat ontelolaatoista, alapohja tuulettuva.</p> <p>Perustus: Betonipaalut (300x300mm, jako 1,6–2,6 m) ovat ulkoseinien ja huoneistojen välisten kantavien seinien (väli 6–9 m) linjoilla. Osa paaluista on vinopaaluja 4:1. Rakennuksen itäpääty on maanvarainen. Paalujen päällä on sokkelielementti 700x500, jonka alapinta on noin 1,3 m syvyydellä. Anturapalkkien päälle on 1,1 m korkea sokkelielementti. Anturapalkit ja sokkelielementit on erotettu maasta 50–100 mm paksulla pehmeällä eristeellä.</p>					
Mitatut suurimmat värähtelyn tunnusluvut ($v_{w,95}$, mm/s)		vaaka-x	vaaka-y	pysty-z	
		Maaperä	0,15	0,13	0,33
		Perustus	0,41	0,14	0,09
		Muu rakennus (runko 3. krs)	0,70	0,33	
Maaperän värähtelyn taajuussisältö					

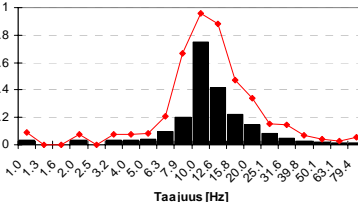
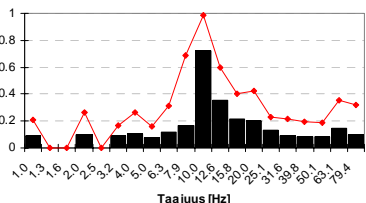
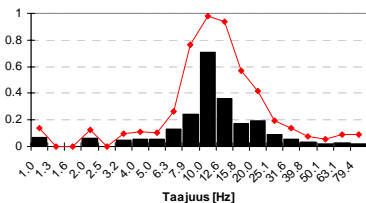
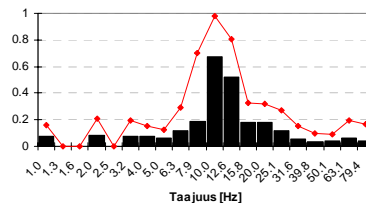
(21) Toimistotalo siltti/hiekkamaalla

Valmistunut	Kerroksia	Runko	Paalutus	Maaperä	Etäisyys
ennen sotia	4 + kellari	betoni + kivi	osin paalutettu	siHk, 10 m	raitiotie, 5 m
Runko: Seinät tiilimuuratut, alin välipohja betonilaatta, muut välipohjat puurunkoiset.					
Perustus: Rakennus on perustettu betoni/kiviperustusten varaan, jotka ulottuvat 1,5–2,0 m syvyyteen maanpinnasta. Perustusta on myöhemmin vahvistettu Mega-paaluilla. Kohdalla on täytemaata 2 m, sen alla siltistä hiekkaa 10 m ja pohjalla ohut kerros kivistä hiekkaa tai soraa.					
Mitatut suurimmat värähtelyn tunnusluvut ($v_{w,95}$, mm/s)			vaaka-x	vaaka-y	pysty-z
Maaperä			-	-	-
Perustus			0,23	0,28	0,25
Muu rakennus (lattia/3. krs)			0,24	0,28	4,35
3. kerroksen seinän värähtelyn taajuussisältö					
vaaka-x		vaaka-y		pysty-z	

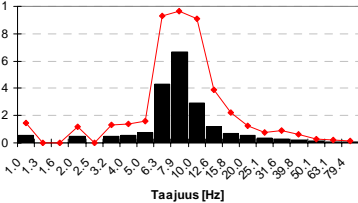
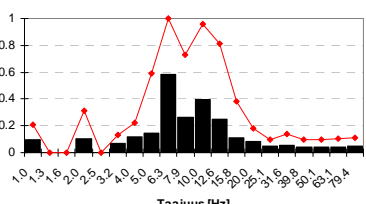
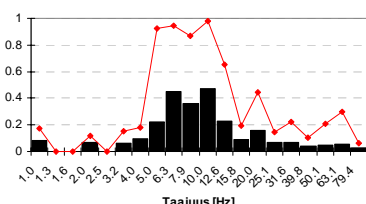
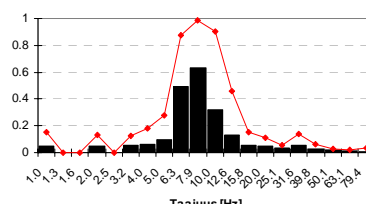
(22) Kerrostalo savimaalla

Valmistunut	Kerroksia	Runko	Paalutus	Maaperä	Etäisyys
1960-luku	4+kellari	betoni/tiili	ei	savi, 1–3 m	katu, 15 m
Runko: Seinät paikallavaletut tai muuratut. Välipohjat betoniset.					
Perustus: Anturoille valettu betonisokkeli. Rakennuksen kohdalla on savea pääosin 1–3 m. Kadun kohdalla on savea yli 3 m.					
Mitatut suurimmat värähtelyn tunnusluvut ($v_{w,95}$, mm/s)			vaaka-x	vaaka-y	pysty-z
Maaperä			0,15	0,10	0,06
Perustus			0,06	0,06	0,06
Muu rakennus (4. krs)			0,27	0,35	
Maaperän värähtelyn taajuussisältö					
vaaka-x		vaaka-y		pysty-z	

(23) Kerrostalo savimaalla

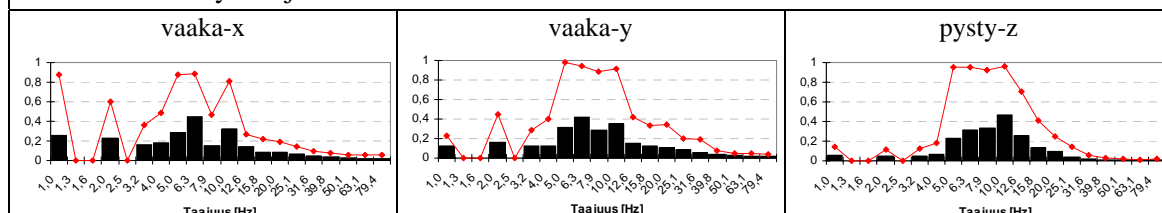
Valmistunut	Kerroksia	Runko	Paalutus	Maaperä	Etäisyys
1900	6	betoni	ei tied.	savi 5–8 m	katu, 6,0 m
Perustus on yli 3 m:n täytemaakerroksen päällä. Perustusta on myöhemmin vahvistettu paaluilla. Välipohjat puurunkoiset.					
Mitatut suurimmat värähtelyn tunnusluvut ($v_{w,95}$, mm/s)	vaaka-x	vaaka-y	pysty-z	maa/pysty-z	
Maaperä			3,69		
Perustus	0,22	0,24	0,49		
1. krs (lattia)	0,17	0,35	3,44		
6. krs (lattia)	0,14	0,13	4,69		
perustuksen värähtelyn taajuussisältö					
					

(24) Pientalo savimaalla

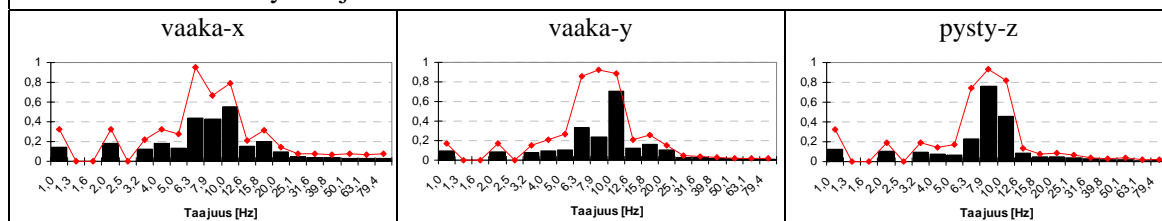
Valmistunut	Kerroksia	Runko	Paalutus	Maaperä	Etäisyys
1954	1½ + k	puu	ei paalutusta	savi	rata, 31 m
Runko: Puurunko, alapohja maanvarainen, välipohja 1. krs betonivalvi + puu, 2. krs puu					
Perustus: antura					
Mitatut suurimmat värähtelyn tunnusluvut ($v_{w,95}$, mm/s)	vaaka-x	vaaka-y	pysty-z	maa/pysty-z	
Maaperä			0,70		
Perustus (1. krs)	0,23	0,27	0,66		
Muu rakennus (2. krs)	0,94	0,68	0,69		
1. kerroksen seinän värähtelyn taajuussisältö					
					

(25) Pientalo savimaalla

Valmistunut	Kerroksia	Runko	Paalutus	Maaperä	Etäisyys
1902	2/1	puu	puu	savi	tie, 4 m
Runko: Seinät puurunkoiset, lautajulkisivut, alapohja maanvarainen laatta, välipohja puurunkoinen					
Perustus: luonnonkiviantura					
Mitatut suurimmat värähtelyn tunnusluvut ($v_{w,95}$, mm/s)	vaaka-x	vaaka-y	pysty-z	maa/pysty-z	
Maaperä			0,86		
Perustus (kellari)	0,09	0,16	0,60		
Muu rakennus (2. krs)	0,34	0,47	0,45		

kellarin värähtelyn taajuussisältö**(26) Pientalo savimaalla**

Valmistunut	Kerroksia	Runko	Paalutus	Maaperä	Etäisyys
1995	1½	puu	betoni, 8–11 m	savi 3–5 m	tie, 39 m
Runko: Seinät puurunkoiset, tiilijulkisivut, alapohja maanvarainen laatta, välipohja puurunkoinen					
Perustus: 12 kpl teräsbetonipaaluja. Päällä valettu sokkeli.					
Mitatut suurimmat värähtelyn tunnusluvut ($v_{w,95}$, mm/s)	vaaka-x	vaaka-y	pysty-z	maa/pysty-z	
Maaperä			1,68		
Perustus (nurkka 1. krs)	0,18	0,27	0,19		
Muu rakennus (2. krs)	0,41	0,84	0,32		

1. kerroksen värähtelyn taajuussisältö

(27) Pientalo savimaalla

Valmistunut	Kerroksia	Runko	Paalutus	Maaperä	Etäisyys
1946	1½ + kellari	puu	ei paalutusta	savi	tie, 15,6 m
Runko: Seinät puurunkoiset, lautajulkisivut, alapohja valettu laatta, välipohja betonivalvi ja puupalkit					
Perustus: valettu sokkeli					
Mitatut suurimmat värähtelyn tunnusluvut (v _{w,95} , mm/s)	vaaka-x	vaaka-y	pysty-z	maa/pysty-z	
Maaperä			1,80		
Perustus (1. krs)	0,52	0,60	1,09		
Muu rakennus (2. krs runko, 1. krs lattia)	1,74	1,96	1,41		
1. kerroksen nurkan värähtelyn taajuussisältö					
vaaka-x		vaaka-y		pysty-z	

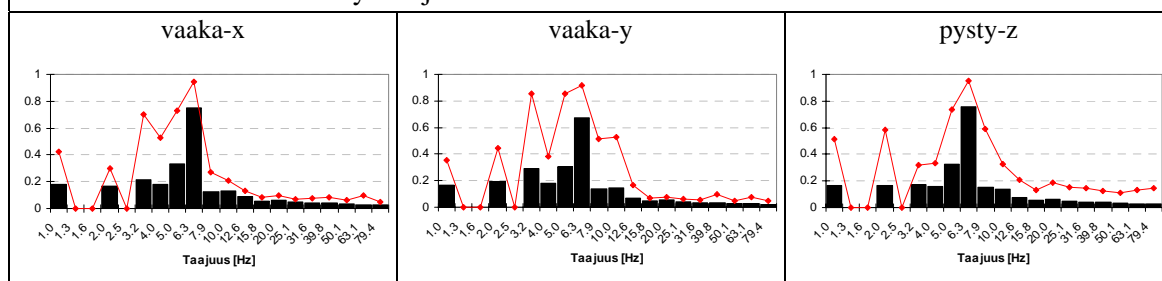
(28) Pientalo savimaalla

Valmistunut	Kerroksia	Runko	Paalutus	Maaperä	Etäisyys
1800-luku	1½	hirsi	ei paalutusta	savi	rata, 45 m
Runko: Seinät hirsirunkoiset, lautajulkisivut, ala- ja välipohja puuta					
Perustus: luonnonkivi					
Mitatut suurimmat värähtelyn tunnusluvut (v _{w,95} , mm/s)	vaaka-x	vaaka-y	pysty-z	maa/pysty-z	
Maaperä			0,30		
Perustus (1. krs, seinä)	0,31	0,39	0,29		
Muu rakennus (2. krs, lattia 1. krs)	1,17	1,18	0,52		
1. kerroksen nurkan värähtelyn taajuussisältö					
vaaka-x		vaaka-y		pysty-z	

(29) Pientalo savimaalla

Valmistunut	Kerroksia	Runko	Paalutus	Maaperä	Etäisyys
1955	1½	puu	ei paalutusta	savi	rata, 160 m
Runko: Puurunko, lautajulkisivut, alapohja puuta, välipohja puu					
Perustus: betoniantura					
Mitatut suurimmat värähtelyn tunnusluvut (v _{w,95} , mm/s)	vaaka-x	vaaka-y	pysty-z	maa/pysty-z	
Maaperä			0,37		
Perustus (1. krs)	0,20	0,20	0,32		
Muu rakennus (2. krs)	0,57	0,57	0,61		

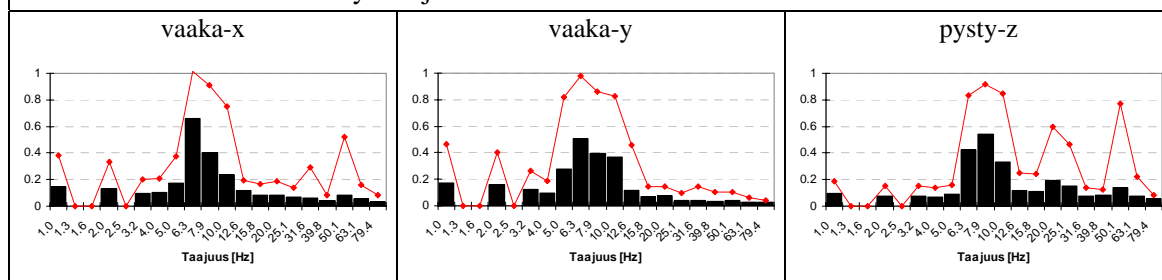
1. kerroksen seinän värähtelyn taajuussisältö



(30) Pientalo savimaalla

Valmistunut	Kerroksia	Runko	Paalutus	Maaperä	Etäisyys
1990	2	puu	ei paalutusta	savi	rata, 22,5 m
Runko: Puurunko, tiilijulkisivut, alapohja maanvarainen laatta, välipohja puu + betoni-liittolaatta					
Perustus: antura					
Mitatut suurimmat värähtelyn tunnusluvut (v _{w,95} , mm/s)	vaaka-x	vaaka-y	pysty-z	maa/pysty-z	
Maaperä			0,32		
Perustus (1. krs)	0,19	0,17	0,29		
Muu rakennus (2. krs)	0,25	0,32	0,34		

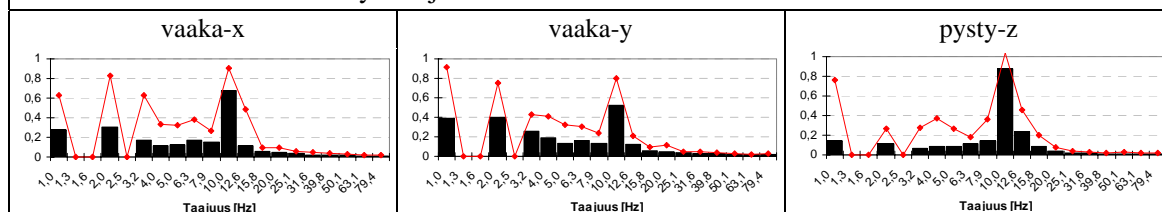
1. kerroksen seinän värähtelyn taajuussisältö



(31) Pientalo savimaalla

Valmistunut	Kerroksia	Runko	Paalutus	Maaperä	Etäisyys
1974	1	puu	ei paalutusta	savi	tie, 24 m
Runko: Seinät puurunkoiset, tiilijulkisivut, alapohja valettu laatta					
Perustus: reunavahvistettu laattaperustus					
Mitatut suurimmat väräh- telyn tunnusluvut ($v_{w,95}$, mm/s)	vaaka-x	vaaka-y	pysty-z		
Maaperä			0,32		
Perustus (1. krs, nurkka)	0,06	0,06	0,18		
Muu rakennus (seinätaso, h=2,0)	0,16	-	-		

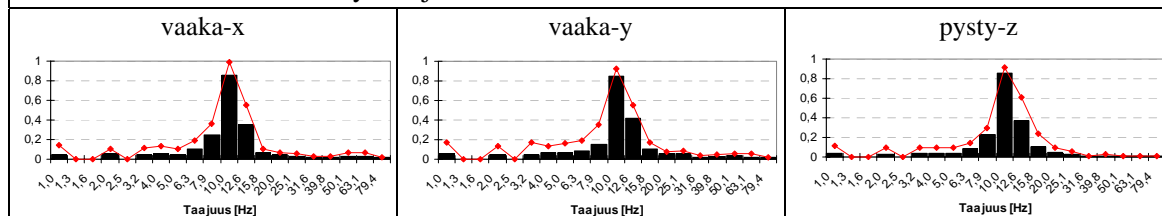
1. kerroksen nurkan värähtelyn taajuussisältö



(32) Pientalo savimaalla

Valmistunut	Kerroksia	Runko	Paalutus	Maaperä	Etäisyys
1965	1	puu	ei paalutusta	savi, n. 5 m	tie, 11 m
Runko: Seinät puurunkoiset, lautajulkisivut, alapohja valettu laatta					
Perustus: reunavahvistettu laattaperustus					
Mitatut suurimmat väräh- telyn tunnusluvut ($v_{w,95}$, mm/s)	vaaka-x	vaaka-y	pysty-z		
Maaperä			1,66		
Perustus (1. krs, seinä)	0,16	0,19	1,19		
Muu rakennus (seinätaso, h = 1,4 m)	-	0,61	-		

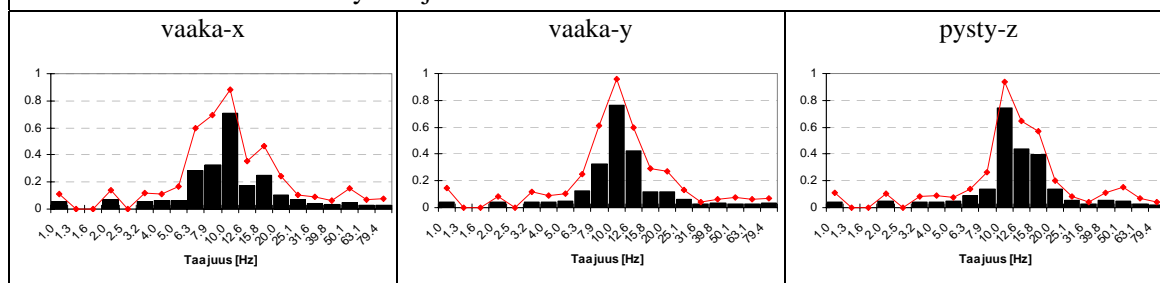
1. kerroksen seinän värähtelyn taajuussisältö



(33) Pientalo savimaalla

Valmistunut	Kerroksia	Runko	Paalutus	Maaperä	Etäisyys
1989	2	puu	betonipaalut	savi, 5–10 m	tie, 8,5 m
Runko: Väliseinät betonista, sivuseinät puuta, alapohja ontelolaatta					
Perustus: väliseinät anturoilla					
Mitatut suurimmat väräh- telyn tunnusluvut ($v_{w,95}$, mm/s)	vaaka-x	vaaka-y	pysty-z	maa/pysty-z	
Maaperä			0,96		
Perustus (1. krs, seinä)	0,50	0,58	0,68		
Muu rakennus (2. krs, lattia)	0,95	0,64	0,60		

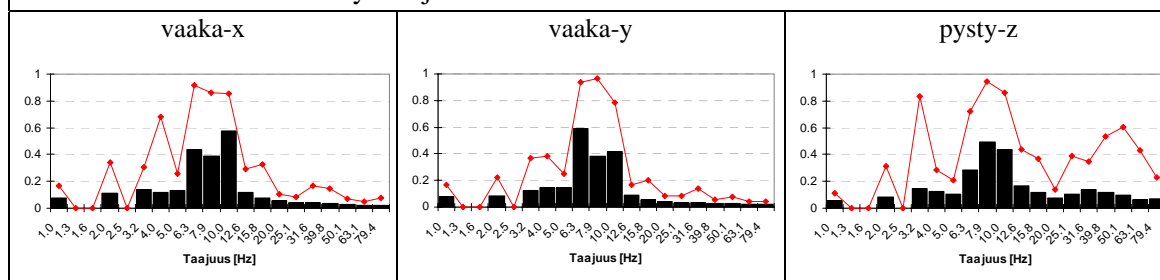
1. kerroksen seinän värähtelyn taajuussisältö



(34) Pientalo savimaalla

Valmistunut	Kerroksia	Runko	Paalutus	Maaperä	Etäisyys
1950	2	puu	ei tied.	savi	rata, 50 m
Perustus: betoniantura					
Mitatut suurimmat väräh- telyn tunnusluvut ($v_{w,95}$, mm/s)	vaaka-x	vaaka-y	pysty-z	maa/pysty-z	
Maaperä			0,24		
Perustus (1. krs, lattia)	0,28	0,26	0,18		
Muu rakennus (2. krs)	0,36	0,55	-		

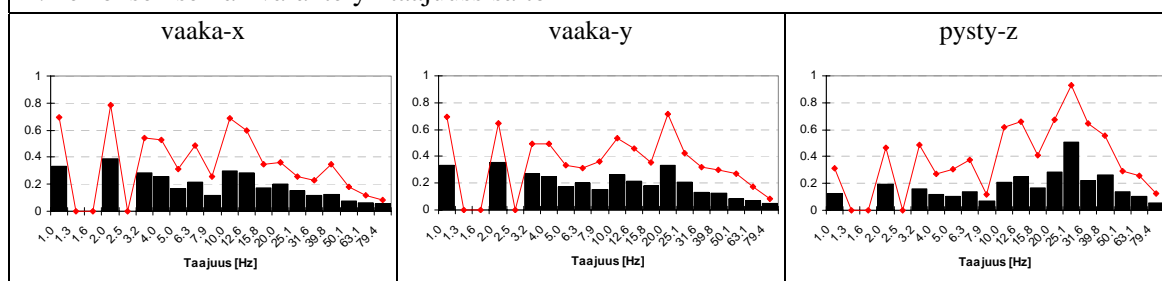
1. kerroksen seinän värähtelyn taajuussisältö



(35) Pientalo kitkamaalla

Valmistunut	Kerroksia	Runko	Paalutus	Maaperä	Etäisyys
1981	2	betoni	ei paalutusta	kitkamaa	rata, 18 m
Runko: Betonielementtirunko ja -julkisivut, alapohja maanvarainen betonilaatta, välipohja ontelolaatta					
Perustus: antura					
Mitatut suurimmat värähtelyn tunnusluvut ($v_{w,95}$, mm/s)	vaaka-x	vaaka-y	pysty-z	maa/pysty-z	
Maaperä			0,22		
Perustus (1. krs)	0,07	0,08	0,16		
Muu rakennus (2. krs)	0,07	0,09	0,25		

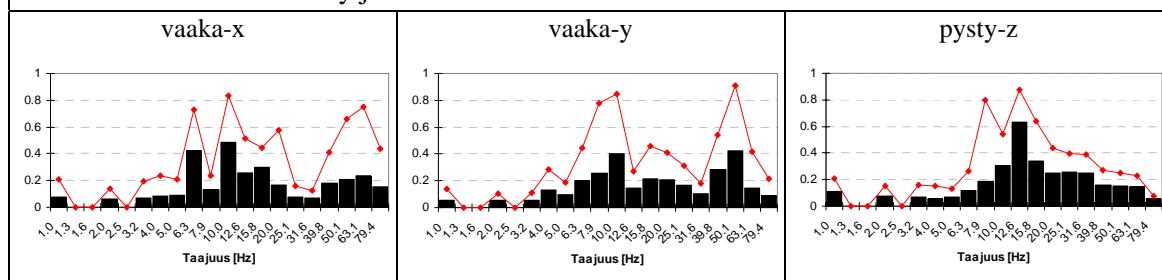
1. kerroksen seinän värähtelyn taajuussisältö



(36) Pientalo hiekkamaalla

Valmistunut	Kerroksia	Runko	Paalutus	Maaperä	Etäisyys
	1½	puu	ei paal.	hiekkamaa	rata, 45 m
Runko: Puurunko, tiilijulkisivut, alapohja maanvarainen laatta					
Perustus: antura					
Mitatut suurimmat värähtelyn tunnusluvut ($v_{w,95}$, mm/s)	vaaka-x	vaaka-y	pysty-z	maa/pysty-z	
Maaperä	0,81	0,58	0,27		
Perustus	-	-	0,17		
Muu rakennus (2. krs, lattia 1. krs)	0,60	0,49	0,18		

2. kerroksen vaakavärähtely ja 1. kerroksen lattian z-suunta



Liite D:

Värähtelyn taajuussisältöön perustuva vertailu

Seuraavilla sivuilla olevissa kuvissa 1–11 esitetty värähtelyn eritaajuuksisten komponenttien vertailu perustuu niihin mittaussignaaleihin, joita on käytetty eri kohteista määritetyn värähtelyn tunnusluvun $v_{w,95}$ määrittämisessä. Kustakin signaalista on määritetty sen yhden sekunnin ajanjakson taajuussisältö, jota on käytetty värähtelyn tunnusluvun määrittämisessä käytetyn suurimman v_w tehollisarvon laskennassa. Kuvaajien ensimmäinen pylväs v - w esittää tarkasteltujen yhden sekunnin näytteiden tehollisarvojen v_w suhdetta. Mittaustulokset on käsitelty julkaisun VTT Working Papers 50 (<http://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2006/W50.pdf>) mukaisesti.

Mittaustuloksista lasketut suurennuskertoimet esittävät eri 1/3-oktaavikaistoilla tapahtuvan värähtelyn vahvistumisen tai heikentymisen. Mittaustuloksista on määritetty keskiarvo ja tilastollinen maksimi. Tilastollinen maksimi on laskettu lisäämällä keskiarvoon tulosten hajonta 1,8-kertaisena. Taustakohinan vaikutuksen vähentämiseksi suhteen laskennassa on käytetty vain niitä oktaavikaistoja, joilla jakajana oleva värähtelyn suuruus on vähintään 0,025 mm/s. Siksi keskiarvo ja tilastollinen maksimi voivat perustua eri määrään näytteitä.

Tuloksien esittämisessä käytetty koordinaatisto on valittu siten, että x on rakennuksen pituussuunta (harjan suunta), y on rakennuksen poikittaissuunta ja z on pystysuunta.

Kuvien tarkastelussa huomioitavia seikkoja

Kaikki kuvat:

- Kohteen merkinnässä alkuosa kuvaa maaperän, perustamistavan ja rakennuksen ominaisuuksia ja suluissa oleva numero mitatun kohteen numeroa.
- Tässä hankkeessa mitattuja kohteita (numerot 1–22) kutsutaan kuvateksteissä uusiksi kohteiksi ja aikaisemmissa hankkeissa mitattuja kohteita (23–36) vanhoiksi kohteiksi.
- Pientalot on joissakin kuvissa jaettu ryhmiin ”resonoivat pientalot” ja ”muut pientalot”. Resonoivilla pientaloilla tarkoitetaan kohteita, joilla mittauksiin perustuvan rungon ominaistaajuuden on arvioitu voivan sattua maaperän dominoivalle taajuusalueelle.
- Kuvista voi puuttua mittaushkohteita, sillä kaikista kohteista ei ole mitattu kaikkia vertailussa tarvittavia suureita. Vanhoilla kohteilla on maaperästä mitattu vain pystyvärähtely.

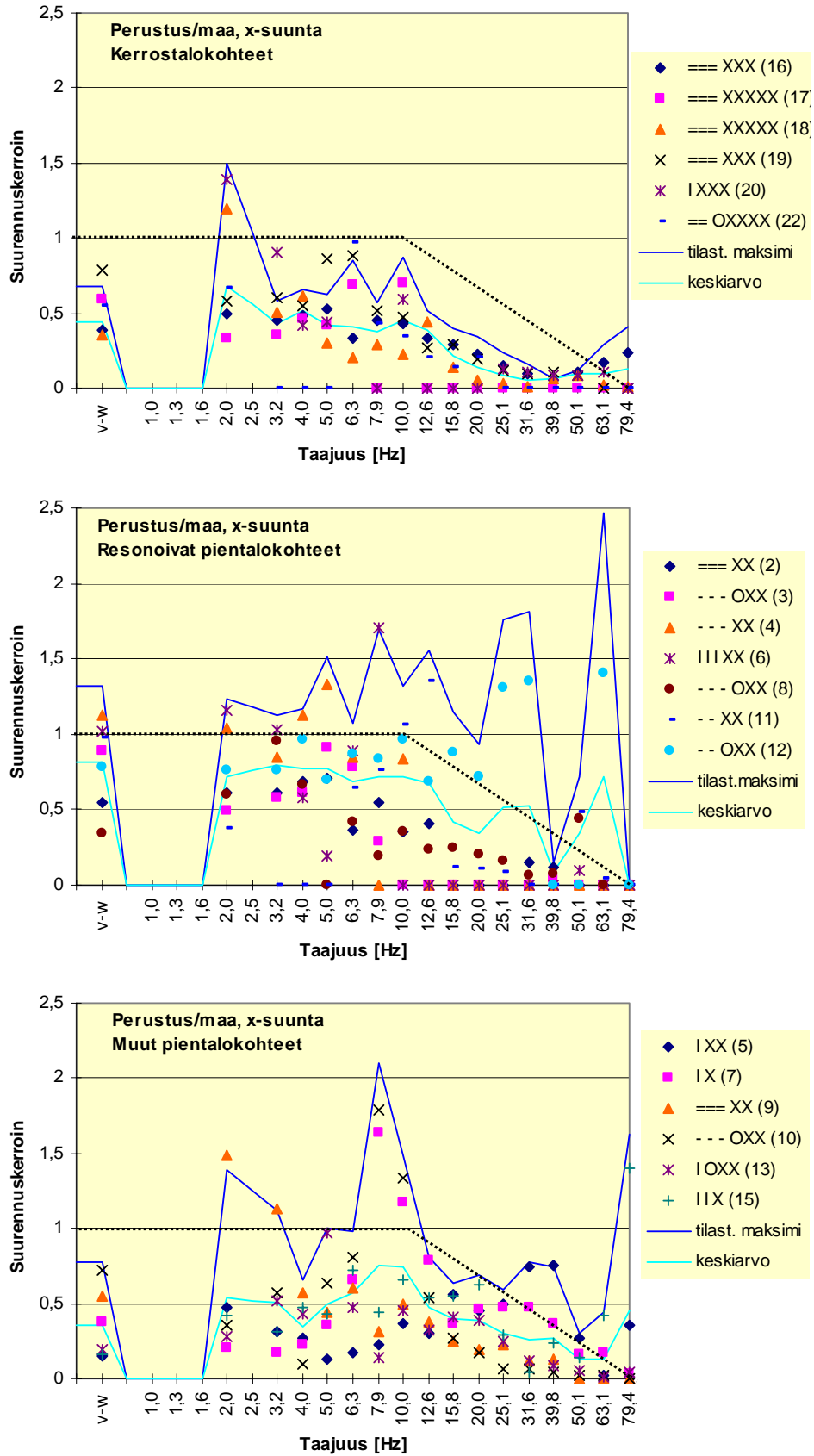
- Koska värähtelyn tunnusluvun määrittämisessä käytetty suurin tehollisarvo v_w voi esiintyä eri signaaleissa eri ajanhetkellä, vertailu ei ole yksiselitteinen.

Kuvat, joissa vertailu tehdään maaperän värähtelyyn:

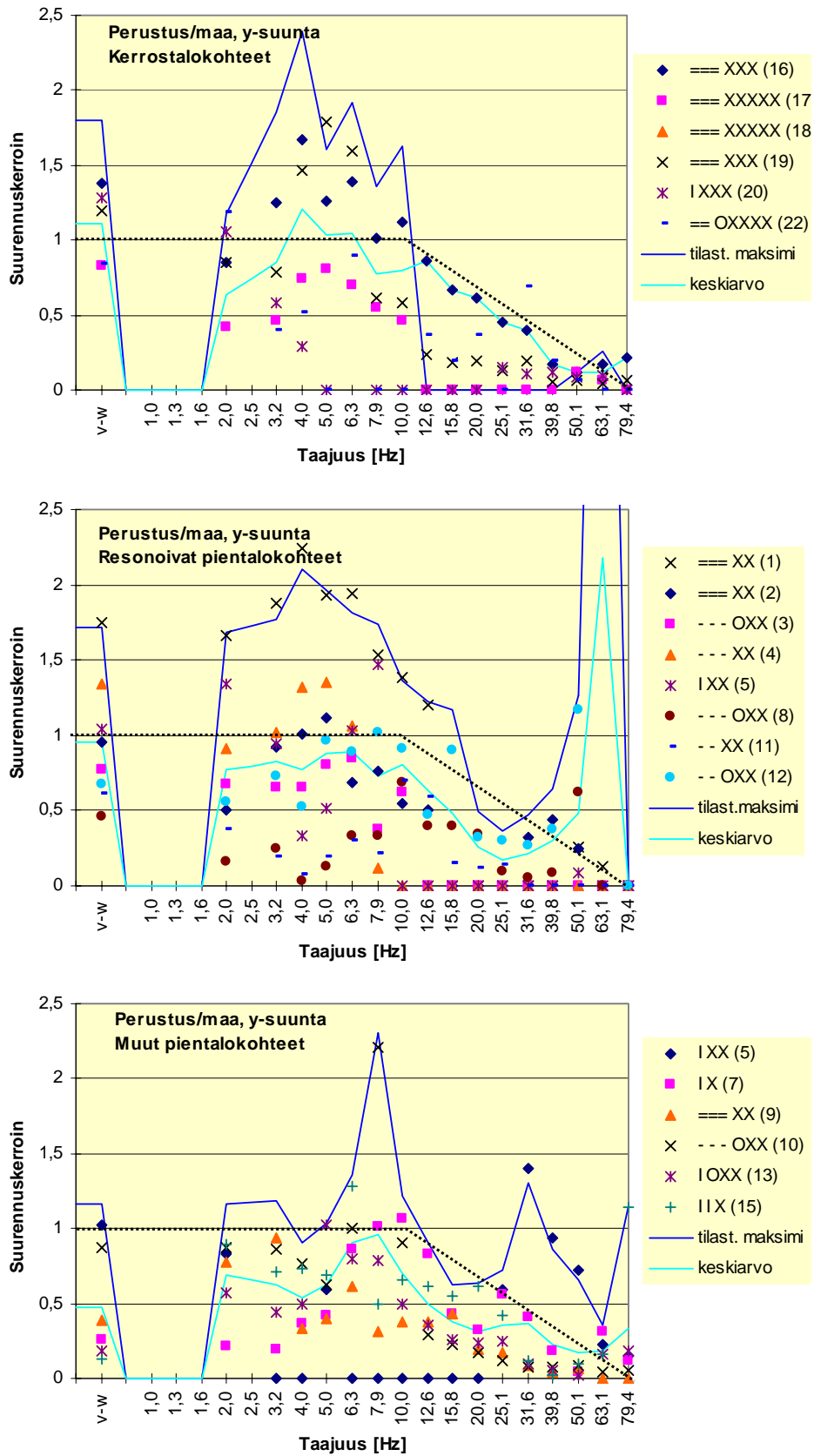
- Mitattujen kerrostalokohteiden 19, 20 ja 22 vertailut eivät ole luotettavia, koska rakennuksen värähtelyyn voi vaikuttaa koko rakennuksen alueella esiintyvä maaperän värähtely. Kohteissa 19 ja 20 rakennuksen ja maaperän värähtely on mitattu radan suunnassa olevan pitkän rakennuksen molemmista päistä, joista toinen pää on kovalla ja toinen pehmeällä maaperällä. Kohde 22 on lähellä katua, ja rakennuksen ja maan värähtelyt on mitattu kohtisuoraan katua vastaan olevan rakennuksen kauimmaisesta päästä.
- Kerrostalokohteessa 23 maan pystyvärähtely on mitattu aivan ajoradan vierestä ja rakennuksen seinä sijaitsee 6 metrin etäisyydellä kadusta.
- Pientalokohteessa 12 tuloksiin vaikuttaa se, että maaperän värähtelyn mittauspiste on merkittävästi kauempana rakennuksesta kuin värähtelyt aiheuttaneesta hidaste-tyyssystä.
- Kuvissa 1–4 esitetty katkoviiva kuvaa ajateltua mallia, jolla eritaajuuksisten värähtelykomponenttien siirtyminen perustukseen arvioidaan.

Kuvat, joissa tarkastellaan lattian värähtelyä:

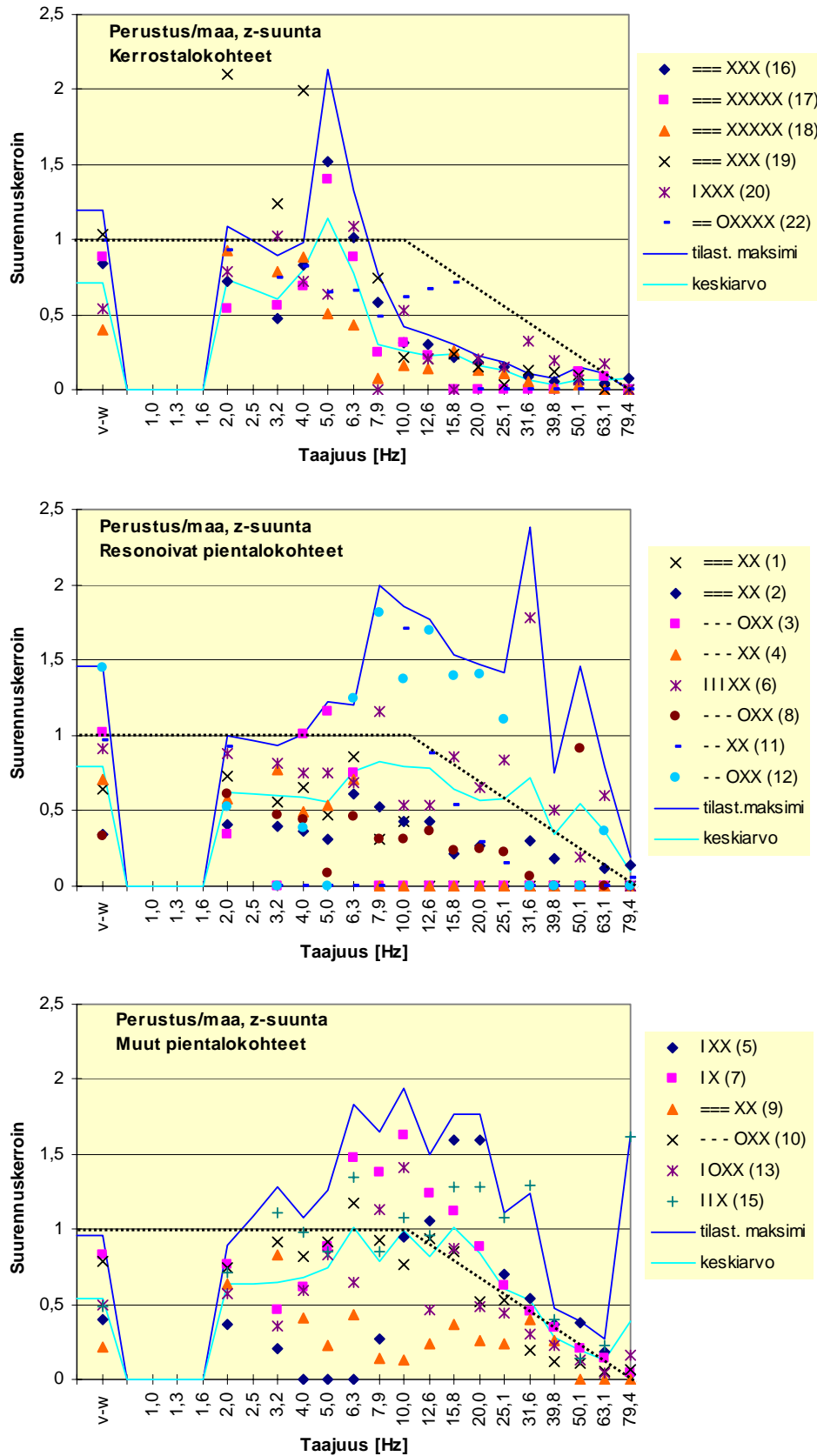
- Tunnukset 21a ja 21b sekä 23a ja 23b ovat kohteista mitattuja eri lattioita. Lattiat 21a ja 21b ovat molemmat kolmannesta kerroksesta. Lattia 23a on toisen kerroksen lattia ja 23b kuudennen kerroksen lattia.



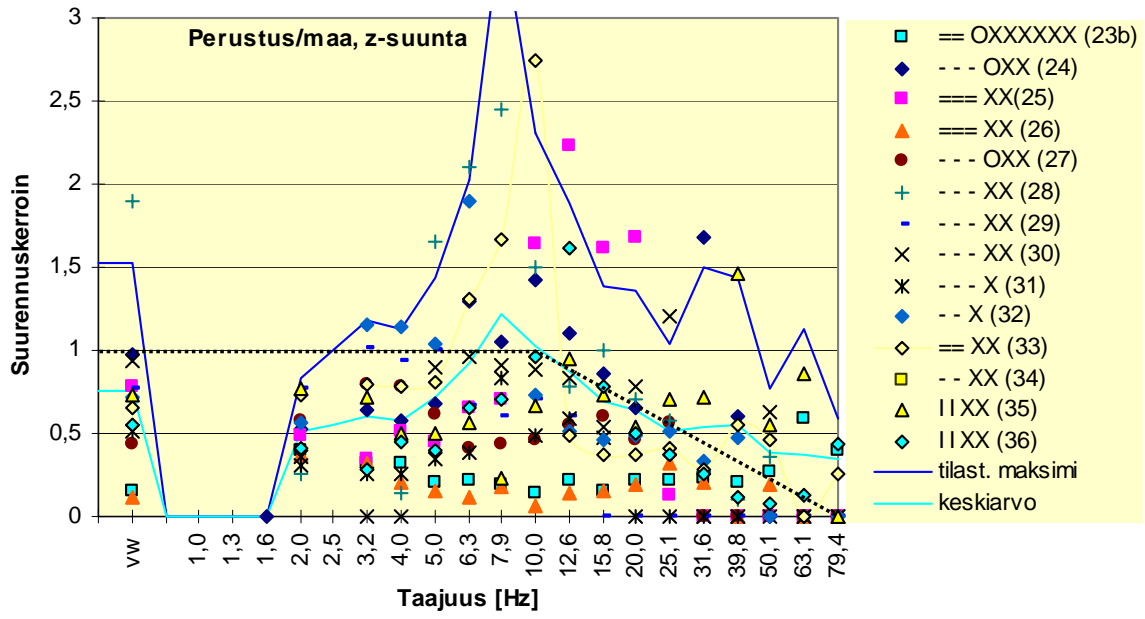
Kuva 1. Perustuksen ja maan taajuuskomponenttien suhde x-suunnassa. Uudet mittauskohteet.



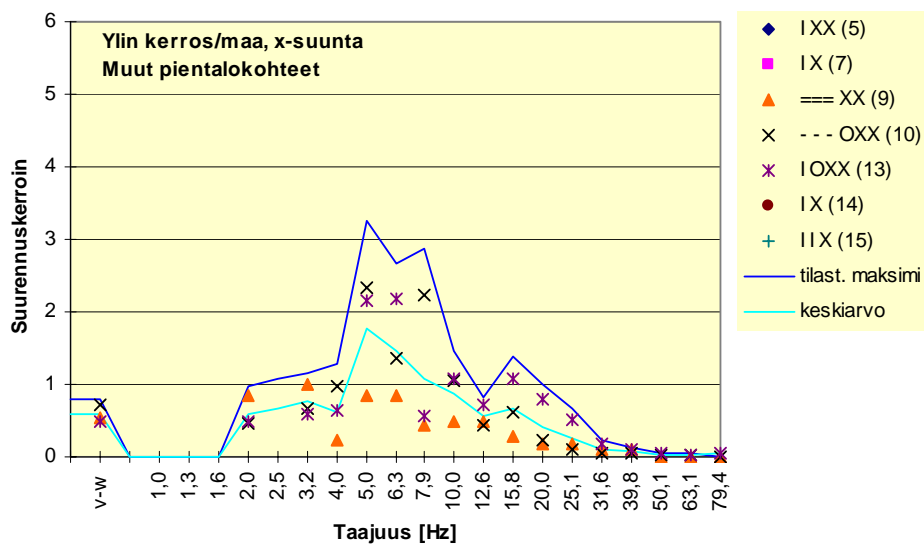
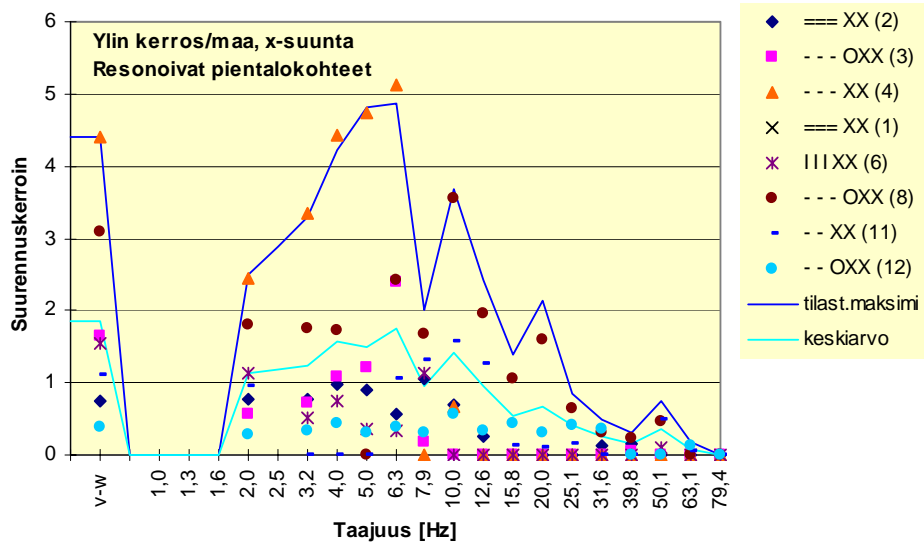
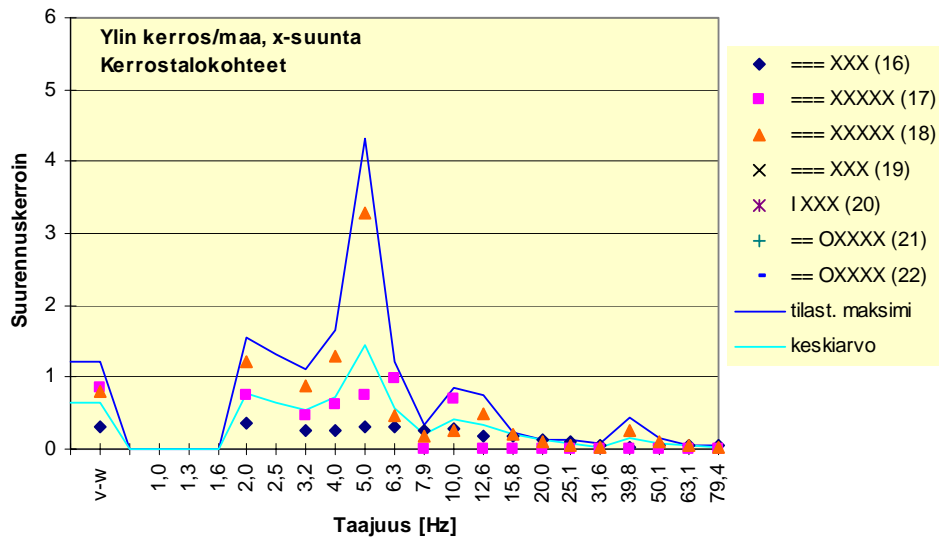
Kuva 2. Perustuksen ja maan taajuuskomponenttien suhde y-suunnassa. Uudet mittauskohteet.



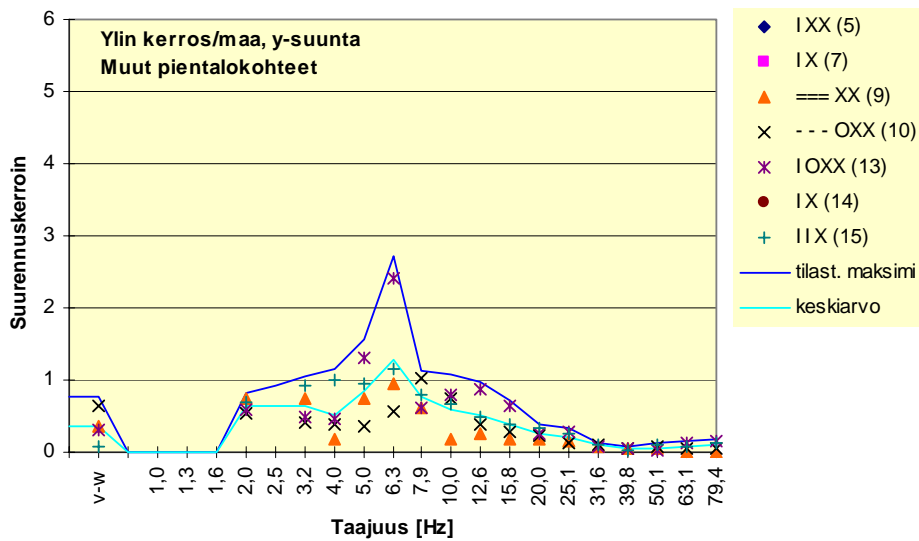
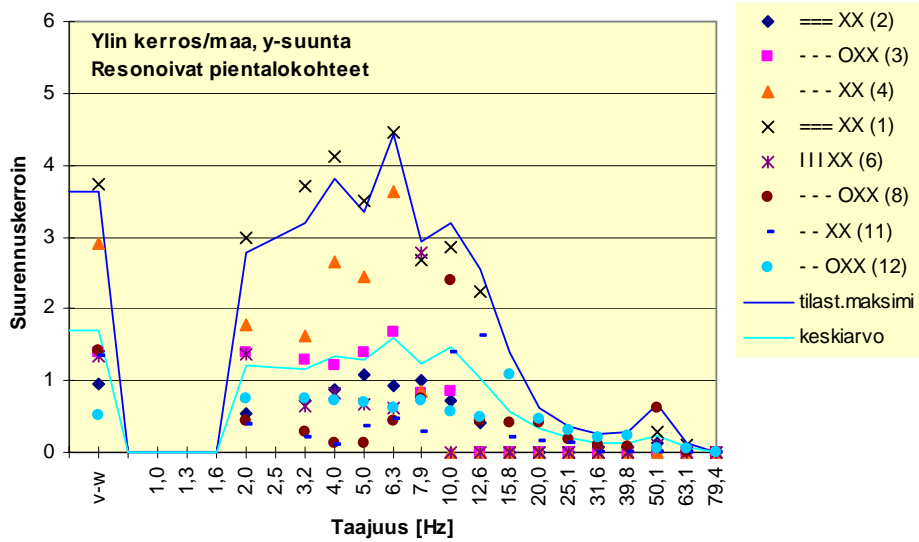
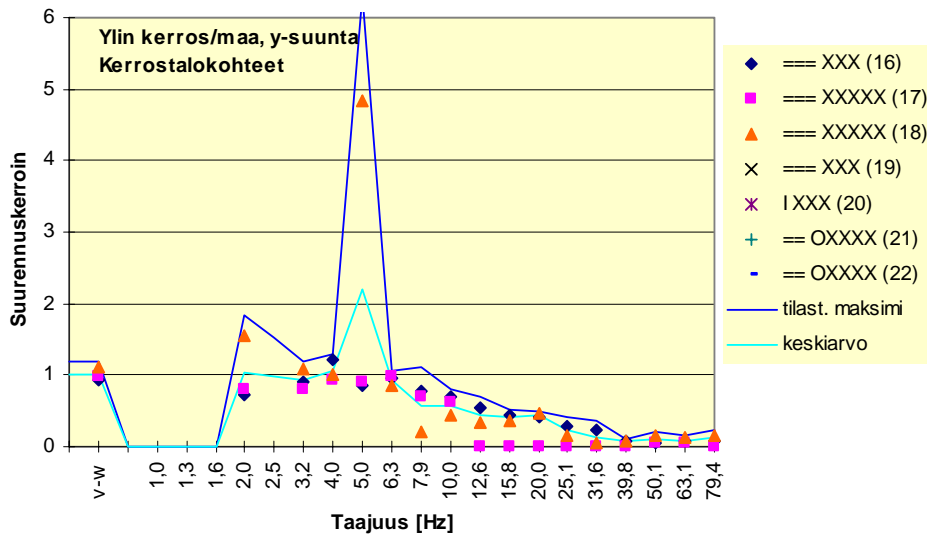
Kuva 3. Perustuksen ja maan taajuuskomponenttien suhde z-suunnassa. Uudet mittauskohteet.



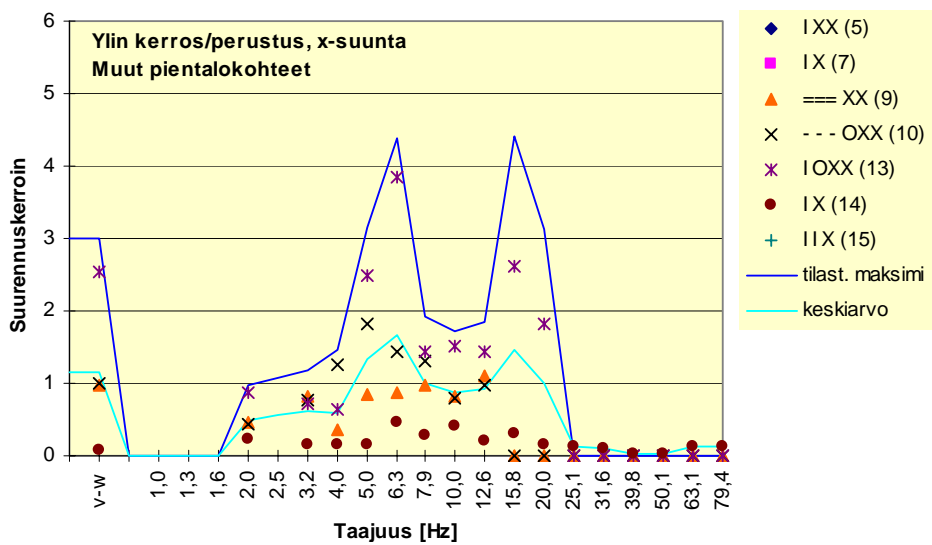
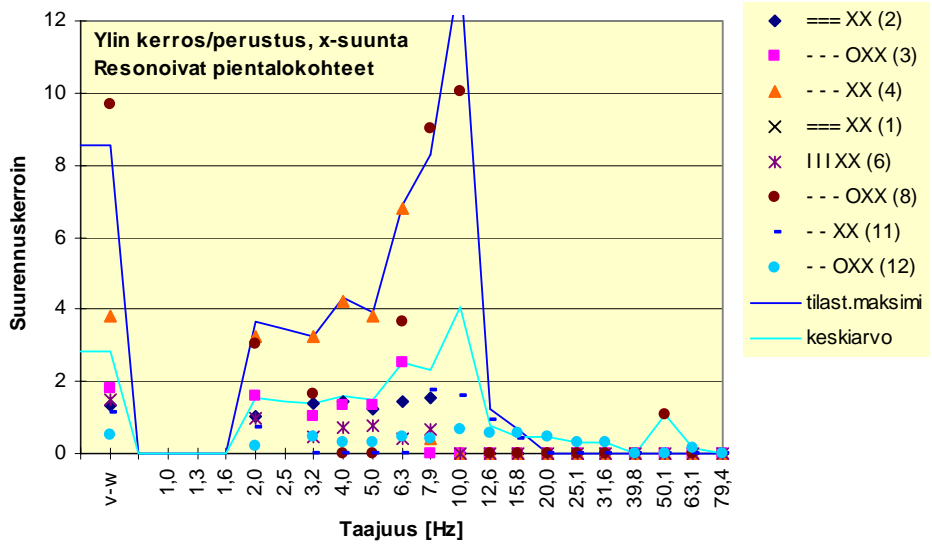
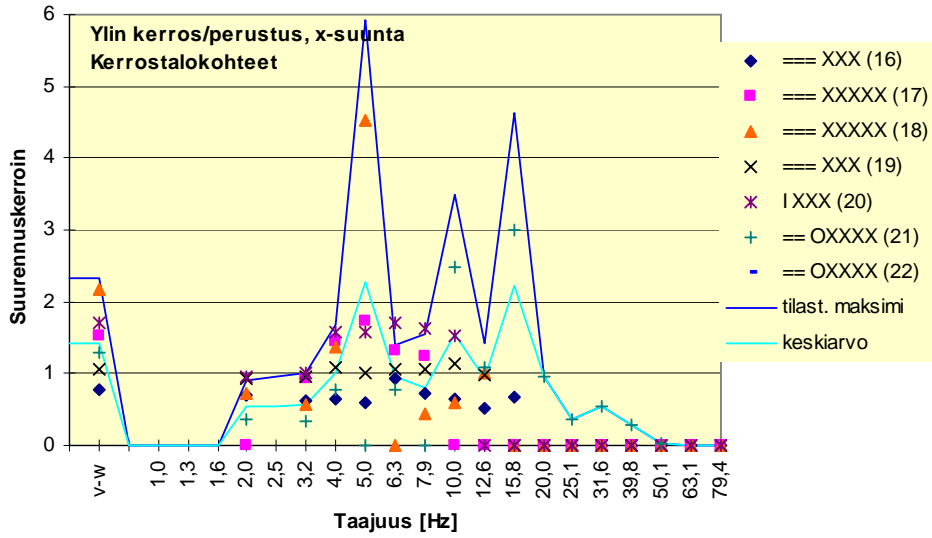
Kuva 4. Perustuksen ja maan taajuuskomponenttien suhde z-suunnassa. Vanhat mittauskohteet.



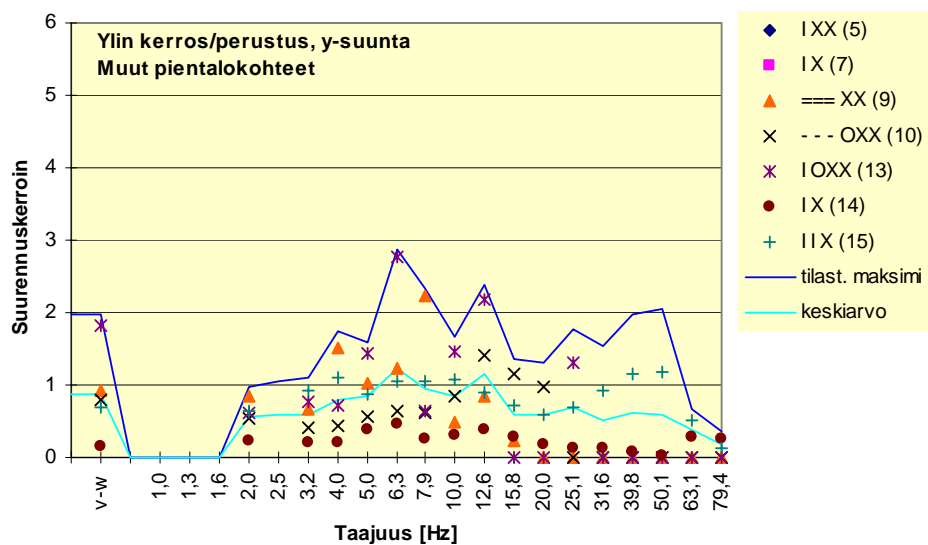
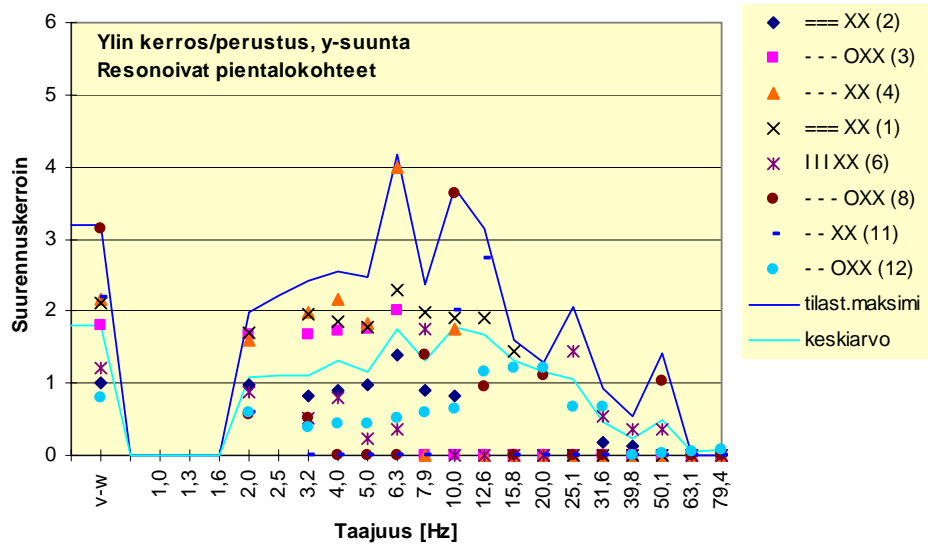
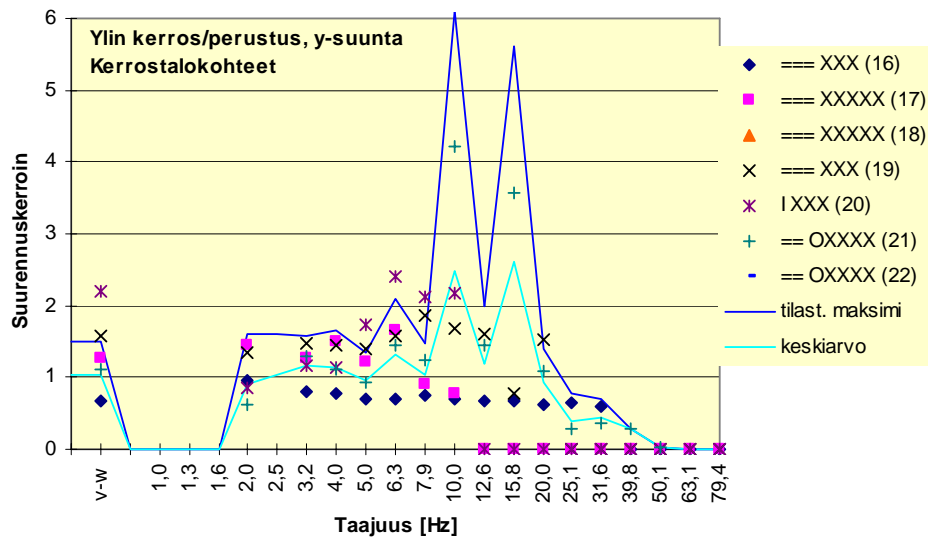
Kuva 5. Ylimmän kerroksen ja maan taajuuskomponenttien suhde x-suunnassa. Uudet mittauskohteet.



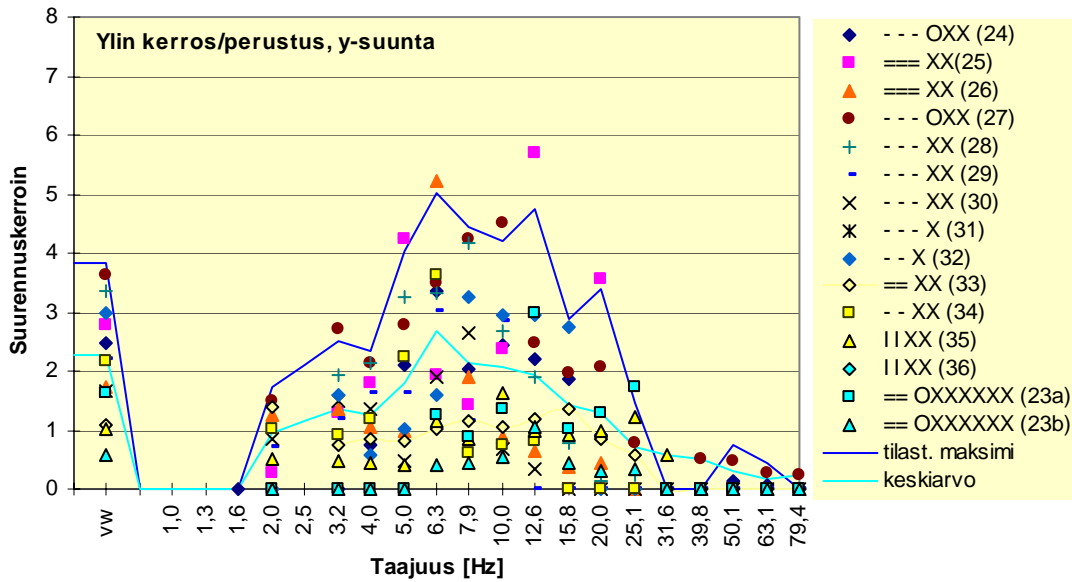
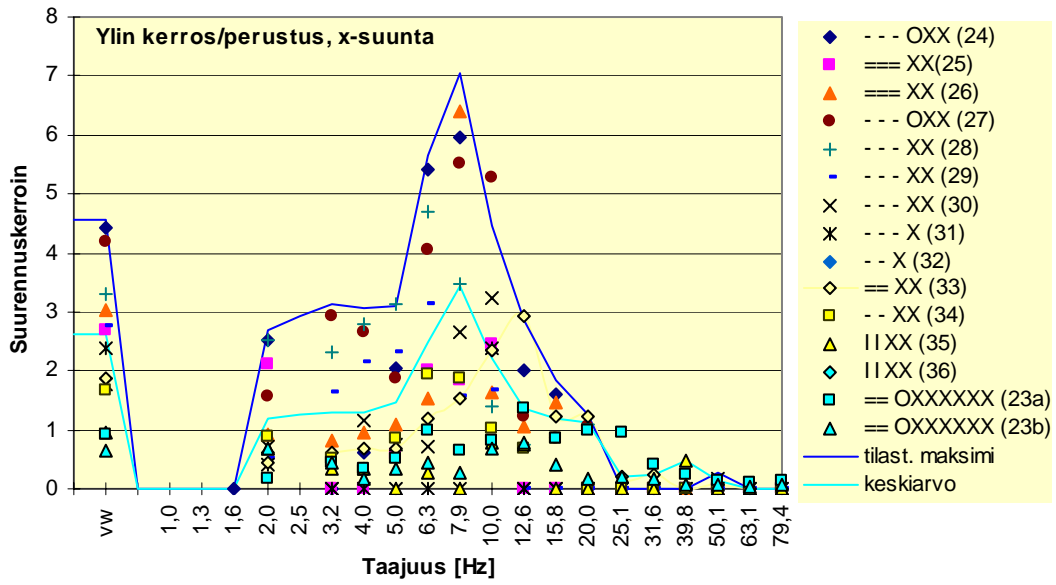
Kuva 6. Ylimmän kerroksen ja maan taajuuskomponenttien suhde y-suunnassa. Uudet mittauskohteet.



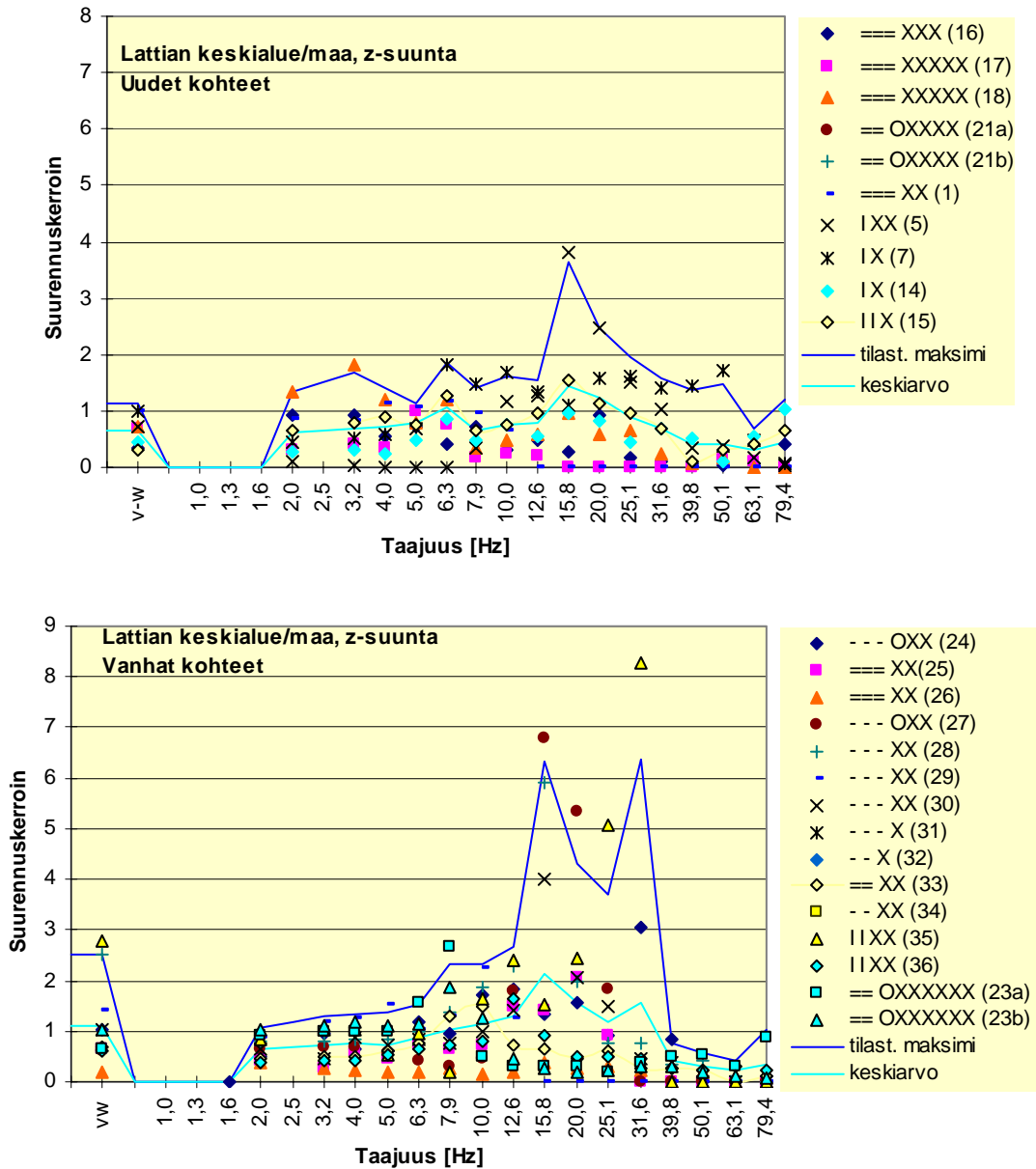
Kuva 7. Ylimmän kerroksen ja perustuksen taajuuskomponenttien suhde x-suunnassa. Uudet mittauskohteet.



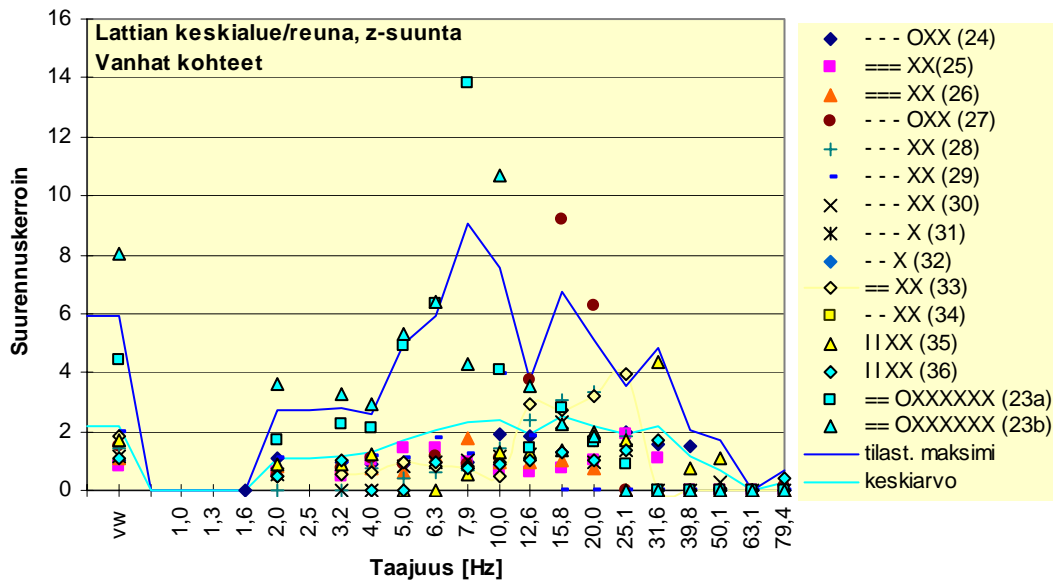
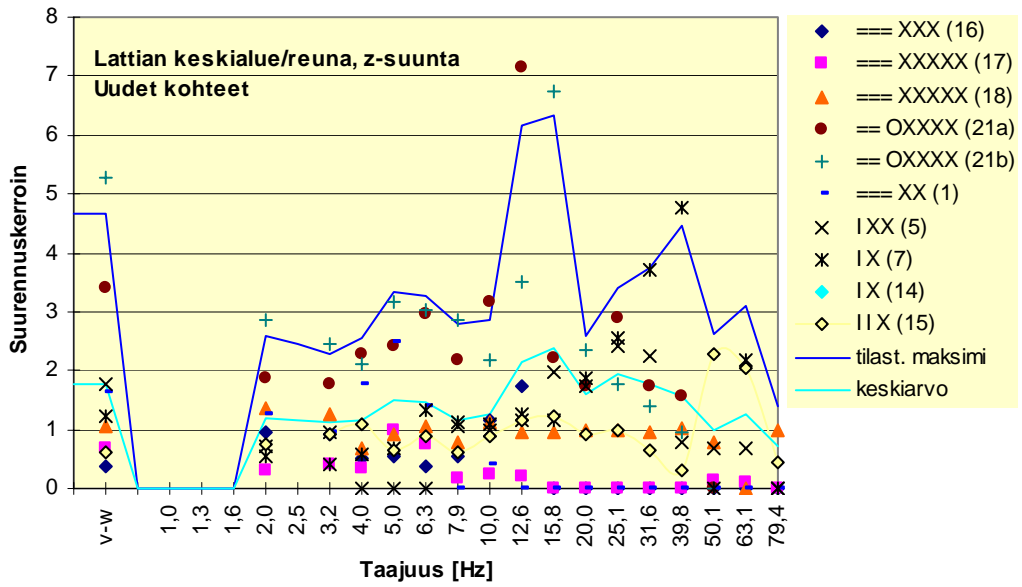
Kuva 8. Ylimmän kerroksen ja perustuksen taajuuskomponenttien suhde y-suunnassa. Uudet mittaushkohteet.



Kuva 9. Ylimmän kerroksen ja perustuksen taajuuskomponenttien suhde vaakasuunnissa (x ja y -suunnat). Vanhat mittauskohteet.



Kuva 10. Lattian keskialueen ja maan taajuuskomponenttien suhde z-suunnassa. Yläku-
vassa uudet mittaushkohteet, alakuvassa vanhat mittaushkohteet.



Kuva 11. Lattian keskialueen ja lattian reunan taajuuskomponenttien suhde z-suunnassa. Yläkuvassa uudet mittauskohteet, alakuvassa vanhat mittauskohteet.

Tekijä(t) Talja, Asko, Vepsä, Ari, Kurkela, Juha & Halonen, Matti		
Nimeke Rakennukseen siirtyvän liikennetärinän arviointi		
Tiivistelmä <p>Suomessa liikennetärinän suhteen erityisen ongelmallisia ovat savikkolaaksopainanteet, joita reu- nustavat kallioiset tai soraiset mäki-alueet. Tällaisilla, usein alle 10 metrin paksuisilla savikkoalu- eilla värähtely leviää tehokkaasti ja leviämisen arviointi on vaikeaa. Vaakavärähtely voi olla pys- tyvärähtelyä suurempi, ja värähtelyssä dominoi hyvin kapea, alle 10 Hz:n taajuusalue. Tällaisilla alueilla ongelmalliseksi muodostuu erityisesti pientaloilla rakennuksen rungon resonanssivärähte- ly, koska normaalisti myös rakennuksen rungon ominaistajuus on alle 10 Hz. Koska kevyiden välipohjien ja lyhytjanteisten betonivälipohjien ominaistajuus on yli 10 Hz, lattian resonanssivä- rähähtelyä ei yleensä esiinny hyvin pehmeillä alueilla, mutta se on mahdollinen kovemmilla alueilla, joilla maaperän värähtelyssä dominoivat korkeammat taajuudet. Resonanssin ilmeneminen on sattumanvaraista, mutta esiintyessään resonanssi on erittäin ongelmallinen.</p> <p>Julkaisussa esitetään rakennuksen rungon ja lattian värähtelysuunnittelua varten menetelmä, joka ottaa huomioon maaperästä mitatun värähtelyn suunnan ja taajuussisällön. Rakennuksessa esiin- tyvän värähtelyn arviointi perustuu kahteen eri lähestymistapaan. Toisessa otetaan huomioon run- gon ja lattian alimmalla ominaistajuudella esiintyvän maaperän värähtelyn voimistuminen reso- nanssin vuoksi ja toisessa otetaan huomioon maaperän värähtelyn koko taajuusalueen kattava yleinen voimistuminen. Yleiselle voimistumiselle esitetty värähtelyn suurennuskerroin on hu- omattavasti pienempi kuin resonanssin vuoksi tapahtuvalle värähtelyn voimistumiselle esitetty kerroin. Rungon resonanssitarkastelu perustuu maaperän vaakavärähtelyyn ja lattian resonanssi- tarkastelu maaperän pystyvärähtelyyn.</p> <p>Asuintiloissa esiintyvän tärinän arvioimiseksi esitetty menetelmä perustuu rakennuksista tehtyihin mittauksiin, FE-laskentaan ja kirjallisuuslähteisiin. Kaikkiaan mittaushetkellä on 36. Kohteista seitsemän on vähintään kolmikerroksisia kerrostaloja ja muut 29 ovat yksi- tai kaksikerroksisia omakoti- tai rivitaloja. Kaikki kerrostalokohteet ovat savikkoalueilta. Pientalokohteista seitsemän on hiekka- tai sora-alueella ja muut ovat savikkoalueilta. Tärinä on aiheutunut junaliikenteestä 22 kohteessa ja muissa 14 kohteessa tärinä on aiheutunut katuliikenteestä. Rungon FE-tarkastelu perustuu 2–3-kerroksiseen tasokehämalliin ja lattian tarkastelu yksinkertaisesti tuettuun palkki- malliin. FE-tarkastelu on tehty sekä tilastomatemattiseen resonanssitarkasteluun että mitattuun herätteeseen perustuen.</p>		
ISBN 978-951-38-7197-0 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		
Avainnimeke ja ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1455-0865 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		Projektinumero 4154
Julkaisuaika Maaliskuu 2008	Kieli Suomi, engl. tiiv.	Sivuja 95 s. + liitt. 69 s.
Projektin nimi LIIKEVÄ 3		
Toimeksiantaja(t) Tekes, Ratahallintokeskus, Tiehallinto, Helsingin, Espoon, Vantaan, Turun ja Keravan kaupungit, Metsäteollisuus ry, Rautaruukki Oyj, YIT Rakennus Oy, YH-Suomi Oy, NCC Rakennus Oy, VTT		
Avainsanat traffic, traffic-induced vibration, vibration classification, vibration nuisance, vibration measurements, limit values, residential buildings, vibration design, vibration analysis, vibration magnification, resonance vibration, frame, floors, instructions		Julkaisija VTT PL 1000, 02044 VTT Puh. 020 722 4520 Faksi 020 722 4374

<p>Author(s) Talja, Asko, Vepsä, Ari, Kurkela, Juha & Halonen, Matti</p>		
<p>Title Assessment of traffic-induced vibrations in buildings</p>		
<p>Abstract In regard to traffic-induced vibrations, clay areas with surrounding rocky or gravelly hills are especially problematic in Finland. The thickness of the soft layer is often less than 10 metres. The vibrations spread effectively in such layers and they are difficult to evaluate. Often the horizontal vibrations of the ground can be higher than the vertical component and frequencies under 10 Hz with a very narrow band dominate. The areas are problematic especially for detached houses, because natural frequencies below 10 Hz are typical for the building frame, and resonance vibration may occur. Because lightweight floors and short-span concrete floors usually have natural frequencies above 10 Hz, resonance of floors does not usually appear in soft clay areas but is possible in harder soils where higher frequencies dominate. The resonance phenomenon is not very common, but when it does appear it poses a real problem.</p> <p>A method for the vibration design of the frame and floor of the building is presented, which takes the direction and frequency content of the soil into consideration. The design is based on measured ground vibrations. The evaluation is based on two approaches: one considers the uniform magnification of the vibration and the other the magnification in the resonance. The resonance design of the frame is based on the horizontal, and the resonance design of the floor on the vertical, vibration of the ground. In resonance design only the 1/3 octave band that coincides with the fundamental frequency is studied.</p> <p>The design method is based on the vibration measurements of buildings, on FE calculations and on a literature study. Altogether 36 buildings were measured. Seven of them are at least three-storey houses and other 29 are one- or two-storey low-rise houses. All the high-rise buildings are from clay areas. Seven of the low-rise buildings are from sand or gravel and others are from clay areas. The vibration is induced by railway traffic in 22 houses and by street traffic in 14 houses. FE analysis of the frame is based on a simple two- to three-storey plane model and the examination of the floor on a simply supported beam model. The FE study was based both on the statistical resonance study and on the measured vibration signals.</p> <p>Appendix A of the publication presents an English summary of the study.</p>		
<p>ISBN 978-951-38-7197-0 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)</p>		
<p>Series title and ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1455-0865 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)</p>		<p>Project number 4154</p>
<p>Date March 2008</p>	<p>Language Finnish, engl. abstr.</p>	<p>Pages 95 p. + app. 69 p.</p>
<p>Name of project LIIKEVÄ 3</p>		
<p>Commissioned by the Finnish Rail Administration, Finnish Road Administration, Tekes – the Finnish Funding Agency for Technology and Innovation, Ministry of Transport and Communication, Ministry of Environment, the cities of Helsinki, Espoo, Vantaa, Tampere, Turku and Kerava, the Finnish Forest Industries Federation, Rautaruukki Ltd, YIT Construction Ltd, YH-Suomi Ltd, NCC Construction Ltd, VTT Technical Research Centre of Finland</p>		
<p>Keywords traffic, traffic-induced vibration, vibration classification, vibration nuisance, vibration measurements, limit values, residential buildings, vibration design, vibration analysis, vibration magnification, resonance vibration, frame, floors, instructions</p>		<p>Publisher VTT Technical Research Center of Finland P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 20 722 4520 Fax +358 20 722 4374</p>

VTT Tiedotteita – Research Notes

- 2404 Vares, Sirje & Lehtinen, Jarkko. Lasipakkausten keräysjärjestelmän tehostaminen ja lasin hyötykäytön ympäristövaikutukset. 2007. 122 s.
- 2405 Olin, Markus, Lahti, Seppo, Valli, Asko, Hasari, Heikki, Koistinen, Ari & Leppänen, Seppo. SISU. Simuloinnin ja suunnittelun uudet sovellustavat ja liiketoiminta. Projektin tavoitteet ja simulointiesimerkkien yhteenveto. 2007. 58 s.
- 2406 Häkkinen, Kai, Hemilä, Jukka, Uoti, Mikko, Salmela, Erno, Happonen, Ari, Hämäläinen, Harri, Siniluhta, Eero, Nousiainen, Jukka & Kärkkäinen, Mikko. VMI teollisuudessa. Teoriaa, teknologiaa ja sovelluksia. 2007. 142 s.
- 2407 Koskela, Mika & Haajanen, Jyrki. Business Process Modeling and Execution. Tools and technologies report for SOAMeS project. 2007. 63 p. + app. 2 p.
- 2408 Kemppi, Paul. Next generation satellite navigation systems. 2007. 61 p. + app. 2 p.
- 2409 Pulakka, Sakari, Heimonen, Ismo, Junnonen, Juha-Matti & Vuolle, Mika. Talotekniikan elinkaari-kustannukset. 2007. 58 s. + liitt. 3 s.
- 2410 Mikkola, Markku & Ryynänen, Tapani. Liiketoimintamallit talotekniikan elinkaari palveluissa. 2007. 40 s.
- 2411 Kaartinen, Tommi, Laine-Ylijoki, Jutta & Wahlström, Margareta. Jätteen termisen käsittelyn tuhkien ja kuonien käsittely- ja sijoitusmahdollisuudet. 2007. 44 s. + liitt. 20 s.
- 2412 Bioetanoliala maatalouden selluloosavirroista. von Weymarn, Niklas (toim.). 2007. 44 s.
- 2413 Pietiläinen, Jorma, Kauppinen, Timo, Kovanen, Keijo, Nykänen, Veijo, Nyman, Mikko, Paiho, Satu, Peltonen, Janne, Pihala, Hannu, Kalema, Timo & Keränen, Hannu. ToVa-käsikirja. Rakennuksen toimivuuden varmistaminen energiategokkuuden ja sisäilmaston kannalta. 2007. 173 s. + liitt. 56 s.
- 2415 Hietaniemi, Jukka. Tiiviin ja matalan pientaloalueen paloturvallisuus. 2007. 227 s. + liitt. 144 s.
- 2416 Vesanto, Petri, Hiltunen, Matti, Moilanen, Antero, Kaartinen, Tommi, Laine-Ylijoki, Jutta, Sipilä, Kai & Wilén, Carl. Kierrätyspolttoaineiden ominaisuudet ja käyttö. Selvitys kierrätyspolttoaineiden laatuominaisuuksista ja soveltuvuudesta leijupolttoon. 2007. 55 s. + liitt. 4 s.
- 2417 Leinonen, Arvo. Wood chip production technology and costs for fuel in Namibia. 2007. 66 p. + app. 21 p.
- 2418 Kirkinen, Johanna, Soimakallio, Sampo, Mäkinen, Tuula, McKeough, Paterson & Savolainen, Ilkka. Turvepohjaisen F-T-dieselin tuotannon ja käytön kasvihuonevaikutukset. 2007. 45 s.
- 2419 Martikainen, Antti, Pykälä, Marja-Leena & Farin, Juho. Recognizing climate change in electricity network design and construction. 2007. 106 p. + app. 29 p.
- 2420 Leviäkangas, Pekka, Hautala, Raine, Räsänen, Jukka, Öörni, Risto, Sonninen, Sanna, Hekkanen, Martti, Ohlström, Mikael, Venäläinen, Ari & Saku, Seppo. Benefits of meteorological services in Croatia. 2007. 71 p. + app. 2 p.
- 2421 Hostikka, Simo, Korhonen, Timo, Paloposki, Tuomas, Rinne, Tuomo, Matikainen, Katri & Heiliövaara, Simo. Development and validation of FDS+Evac for evacuation simulations. Project summary report. 2007. 64 p.
- 2422 Vestola, Elina & Mroueh, Ulla-Maija. Sulfaatinpelkistyksen hyödyntäminen happamien kaivosvesien käsittelyssä. Opas louhoskäsittelyn hallintaan. 2008. 58 s. + liitt. 13 s.
- 2424 Ilomäki, Sanna-Kaisa, Simons, Magnus & Liukko Timo. Kohti yritysten vuorovaikutteista kehitystoimintaa. 2008. 45 s.
- 2425 Talja, Asko, Vepsä, Ari, Kurkela, Juha & Halonen, Matti. Rakennukseen siirtyvän liikennetärinän arviointi. 2008. 95 s. + liitt. 69 s.
- 2426 Nylund, Nils-Olof, Aakko-Saksa, Päivi & Sipilä, Kai. Status and outlook for biofuels, other alternative fuels and new vehicles. 2008. 161 p. + app. 6 p.

Liikenteen tärinästä aiheutuvat haitat tulee Suomessa lakien ja asetusten perusteella ottaa huomioon alueiden kaavoituksessa ja rakentamisessa. Liikennetärinä ei saa aiheuttaa vaurioita rakennukselle eikä kohtuutonta häiriötä rakennuksessa asuville ihmisille.

Julkaisu keskittyy rakennuksen värähtelysuunnitteluun. Maan värähtelyt siirtyvät usein vähintään samansuuruisena asuintiloihin. Ilman erityistä rakennuksen rungon ja lattian värähtelysuunnittelua on olemassa riski, että rakennuksessa rungon tai lattian värähtely kasvaa moninkertaiseksi maaperän värähtelyyn nähden. Julkaisu sisältää myös liikennetärinän haitallisuuteen ja sen arviointiin liittyvää yleistä tietoa, jota voidaan käyttää arvioitaessa tärinähaitan suuruutta ja vaikutusta maankäyttöön.

VTT
PL 1000
02044 VTT
Puh. 020 722 4520
<http://www.vtt.fi>

VTT
PB 1000
02044 VTT
Tel. 020 722 4520
<http://www.vtt.fi>

VTT
P.O. Box 1000
FI-02044 VTT, Finland
Phone internat. + 358 20 722 4520
<http://www.vtt.fi>
