

Saimaan ammattikorkeakoulu
Tekniikka Lappeenranta
Rakennustekniikka
Infratekniikka ja maa- ja kalliorakentaminen

Ilkka Hurme

Asuinkerrostalojen välipohjien värähtelytarkastelut liikennetärinäalueella

Tiivistelmä

Ilkka Hurme

Asuinkerrostalojen välipohjien värähtelytarkastelut liikennetärinäalueella, 40 sivua, 1 liite

Saimaan ammattikorkeakoulu

Tekniikka Lappeenranta

Rakennustekniikka

Infratekniikka ja maa- ja kalliorakentaminen

Opinnäytetyö 2012

Ohjaajat: lehtori Timo Lehtoviita, Saimaan ammattikorkeakoulu, johtava asiantuntija Matti Hakulinen, FCG Suunnittelu ja tekniikka Oy

Opinnäytetyöni tarkoituksena oli tarkastella asuinkerrostalojen välipohjien värähtelyä liikennetärinäalueella mittausten ja laskentojen avulla. Välipohjien värähtelystä tarkasteltiin värähtelyn pystysuuntaista liikettä.

Opinnäytetyön alussa käytiin läpi VTT:n menettely liikennetärinän arvioinnista. Työssä mitattiin välipohjien alimpia ominaistajuuksia. Jokaisesta mitatusta välipohjasta tehtiin laskenta teoreettisen ominaistajuuden määrittämiseksi. Mitattuja alimpia ominaistajuuden arvoja verrattiin teoreettisiin arvoihin. Työssä käsiteltiin myös esimerkkitapausten avulla tärinän etenemistä maaperässä. Pehmeässä maaperässä tärinä kulkeutuu matalilla taajuusalueilla, kun taas tiiviissä kitkamaassa tärinä etenee korkeammilla taajuusalueilla.

Työn tuloksena selvisi se, että mittaamalla saadut alimpien ominaistajuuksien arvot olivat pääsääntöisesti laskennallisia arvoja suurempia. Maaperän vaikutus tärinän leviämiseen on huomattava. Haasteellisin maaperä tärinän etenemiselle on kitkamaa, sillä tärinän taajuusalue on laaja. Kuitenkaan kitkamailla tärinän vaikutus ei leviä yhtä suurelle alueelle tärinälähteestä kuin pehmeillä maaperillä. Tulevaisuudessa joudutaan rakentamaan kasvavissa määrin tärinäherkille alueille, joten rakennusten tärinään tulee kiinnittää huomiota.

Asiasanat: liikennetärinä, välipohja, alin ominaistajuus,

Abstract

Ilkka Hurme

Vibration review of apartment building floors on traffic vibration area, 40 pages, 1 appendix

Saimaa University of Applied Sciences, Lappeenranta

Technology, Degree Programme of civil and construction engineering

Civil engineering

Bachelor's Thesis 2012

Instructor(s): teacher Timo Lehtoviita, Saimaa University of Applied Sciences, senior adviser Matti Hakulinen FCG Design and Engineering Ltd

The objective of the study was to review vibrations in apartment buildings floors on traffic vibration area. Reviews were made by measuring device and by calculations. On review only vertical vibration was analyzed.

In the beginning of the study the VTT procedure of traffic vibration evaluation was discussed. In the study the lowest eigenfrequency of floors was measured and compared to the calculations of the floor. In the study vibration movement in soil was also discussed through examples. Vibrations move in different soil on different frequency area. In soft soil vibration moves on low frequency area and in hard soil it moves on high frequency area.

The outcome was that the frequencies on calculations were lower than the measured values. The spread of vibration depends on soil. The most challenging soil for vibrations is hard soil because vibration moves on large frequency area. On the other hand vibration in hard soil will not spread in large area. In the future we have to build on vibration sensitive areas so we have to pay attention to vibrations in buildings.

Keywords: traffic vibration, floor, lowest eigenfrequency

Sisältö

Tiivistelmä

Abstract

Symbolit	5
1 Johdanto	6
2 Liikennetärinä.....	7
2.1 Värähtelyluokitus	7
2.2 Liikennetärinän kulkeutuminen välipohjiin	10
3 Välipohjien ominaistajuusmittaukset ja vertailulaskennat.....	13
3.1 Mittalaite	13
3.2 Testimittaus välipohjasta	15
3.2.1 Mittaus	15
3.2.2 Laskenta	16
3.3 Mittaukset ja vertailulaskelmat.....	17
3.4 Tulosten tarkastelu	25
4 Liikennetärinän vaikutus välipohjiin.....	28
5 Päätelmät.....	35
Kuvat.....	37
Taulukot.....	39
Lähteet.....	40

Liitteet

 Liite 1 Yhteenvetotaulukko mittaustuloksista

Symbolit

Työn lausekkeissa on käytetty seuraavia merkintöjä:

f_o	[Hz]	alin ominaistajuus
k	[N/m]	jousivakio
l	[m]	kappaleen pidemmän sivun pituus
b	[m]	kappaleen lyhyemmän sivun pituus
h	[mm]	kappaleen korkeus
m	[kg/m ²]	massa pinta-alaa kohden
E	[N/m ²]	kimmokerroin
I	[mm ⁴]	jäyhyysmomentti
s	[m]	taipuma

1 Johdanto

Asuminen on keskittynyt kasvavissa määrin hyvien kulkuyhteyksien läheisyyteen ratojen varteen. Raskaan liikenteen ja akselipainojen kasvu ovat lisänneet teiden ja ratojen varsien tärinäongelmia (Leppänen, 2006, s.10). Tärinähaitta on lähinnä asuintiloissa ihmisten kokemaa häiriötä, joka vähentää asuinviihtyisyyttä. Rataliikennetärinä ei yleensä aiheuta rakennuksille rakenteellisia vaurioita. Viimeisten kymmenen vuoden aikana ovat viranomaiset kiinnittäneet huomiota asukkaiden kokemaan häiriöön ja häiriön rajoittamiseksi ja hallitsemiseksi on annettu uusia ohjeita ja suosituksia.

Yhdyskuntarakenteen tiivistymisen vuoksi nykyisin rakennetaan myös usein tärinäherkille alueille kuten esimerkiksi savimaalle. Näillä pehmeiköillä suurin tärinäongelma on usein pientalojen rungon vaakasuuntainen värähtely. Yli kaksi-kerroksisilla asuinkerrostaloilla ei ole yleensä rungon värähtelyriskiä. Välipohjissa tärinäherkimmät maapohjat ovat usein kuitenkin hiekka-, sora- ja moreenimaapohjia, koska näillä maapohjilla rataliikennetärinän hallitsevat taajuuDET ovat samalla taajuusalueella asuinrakennusten välipohjien kanssa.

Ratojen ympäristön asuinkerrostalojen häiriötä tuottava värähtely on usein välipohjien värähtelyä, koska rataliikenteen tärinä voi vahvistua välipohjien resonanssin vuoksi. Resonanssissa välipohjien ominaistajuudet ovat samalla taajuusalueella rautatieliikennetärinän kanssa. Rakennuksen värähtelysuunnittelussa käytetään maasta mitattuja tärinäarvoja. Liikennetärinä kulkeutuu maaperän kautta rakennuksen perustuksiin. Perustuksista pystysuuntainen tärinä kulkeutuu kantavien rakenteiden kautta välipohjiin.

Välipohjien rakenteilla, materiaaleilla ja mitoilla voidaan vaikuttaa välipohjien jäykkyyteen ja siten niiden ominaistajuuksiin. Näin voidaan hallita liikenteestä rakennuksiin siirtyvää tärinää, suunnittelemalla välipohjien ominaistajuudet liikennetärinän kanssa eri taajuusalueelle, jolloin vältetään resonanssitilanne.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on tarkastella välipohjien värähtelyä välipohjien ominaistajuusmittauksien avulla. Mittauksilla tutkitaan erilaisten välipohjien alimpia ominaistajuuksia ja verrataan mittaustuloksia laskennallisiin

arvoihin. Työssä tarkastellaan suuntaa-antavasti myös erilaisilla maapohjilla esiintyvien tyypillisten rataliikennetärinöiden vaikutusta rakennusten välipohjien värähtelyyn.

Työhön sisältyvät mittaukset tehdään kolmessa vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa varmennetaan mittausmenettely mittaamalla laboratorio-olosuhteissa. Toisessa vaiheessa mittausmenettely testataan mittaamalla rakennetun välipohjan ominaistaajuus. Kolmannessa vaiheessa tehdään mittaussarjoja useista välipohjista. Jokaiseen mittausvaiheeseen jälkeen verrataan mittaustuloksia laskennallisiin arvoihin.

2 Liikennetärinä

Tärinähaitta on yleensä vain viihtyvyyteen vaikuttava seikka. Joissakin erikoistapauksissa tärinä aiheuttaa haittaa tärinäherkille laitteille ja toiminnoille. Asukas voi tuntea rakennuksen tärinän suoraan kehossaan tai esineet voivat tärinän vuoksi helistä ja heilua. Tärinän haittoja ovat muun muassa:

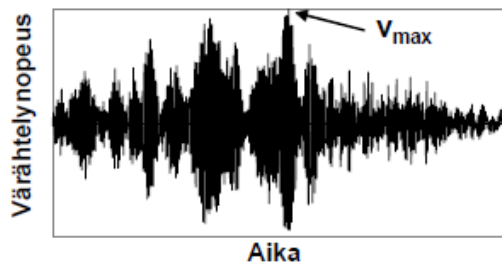
- asumismukavuuden väheneminen
- keskittymiskyvyn häiriintyminen
- nukkumisen häiriintyminen
- pelko rakenneaurioista tai
- pelko kiinteistön arvon alenemisesta (Talja, 2004, s. 11).

2.1 Värähtelyluokitus

Asuinrakennuksissa asuvien ihmisten kokemaa tärinähaittaa kuvataan värähtelyluokitusten avulla. Värähtelyluokitus perustuu Norjan standardiin (NS 8176, 1999) ja VTT:n mittaustuloksiin ja suosituksiin. Kun arvioidaan liikennetärinästä aiheutuvaa haittaa asuinmukavuudelle, värähtelykriteerinä käytetään värähtelyn tunnuslukua $v_{w,95}$ (mm/s) (Talja, ym. 2008, s. 15). Värähtelyluokitus tehdään värähtelyn tunnusluvun ($v_{w,95}$) arvon perusteella. Kuvien 2.1. – 2.6. avulla käydään läpi, miten maasta mitatuista tuloksista saadaan laskettua värähtelyn tunnuslu-

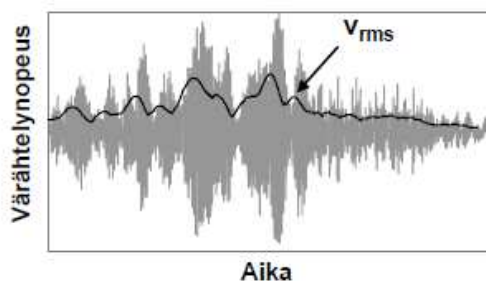
ku. Värähtelyn tunnuslukua verrataan värähtelyluokituksen arvoihin, jotka on esitetty taulukossa 2.1.

Maasta mitataan värähtelynopeus, josta saadaan selville maan värähtely sekä värähtelyn huippuarvo v_{\max} (mm/s). Huippuarvo on värähtelysignaalin itseisarvoltaan suurin arvo.



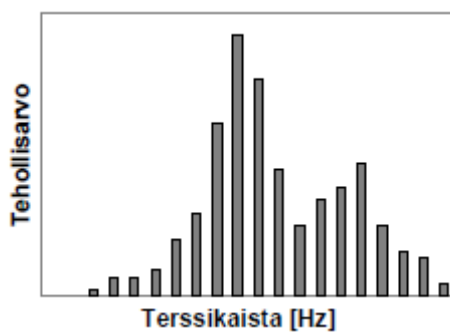
Kuva 2.1. Mitattu värähtelynopeus (Talja, 2008, s. 14).

Mitatuista arvoista lasketaan värähtelyn tehollisarvo v_{rms} (mm/s).



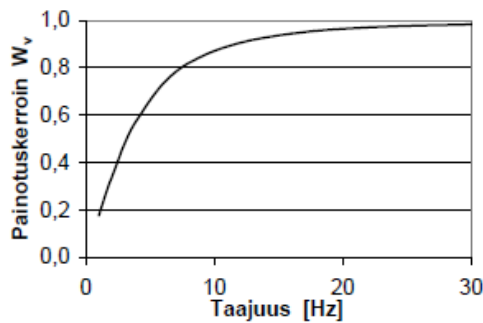
Kuva 2.2. Värähtelyn tehollisarvo (Talja, 2008, s. 14).

Tehollisarvot jaetaan terssikaistoihin.



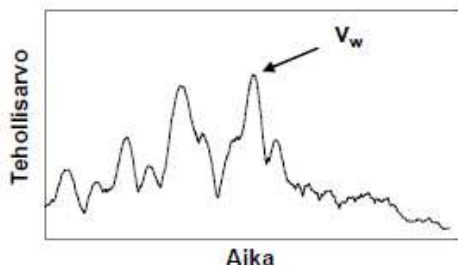
Kuva 2.3. Tehollisarvot terssikaistoittain (Talja, 2004, liite A s. A3).

Mitatun signaalin eri värähtelykomponentit tehdään ihmisen herkkyyden suhteen samanarvoiseksi painottamalla värähtelykomponentteja taajuudesta riippuvalla painotuskertoimella (Talja, 2011, s. 9).



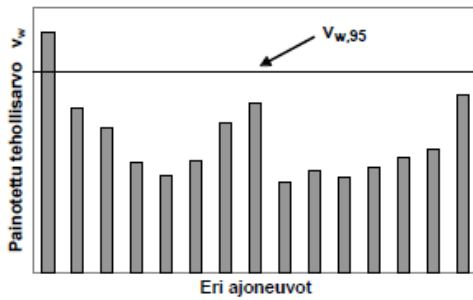
Kuva 2.4. Taajuuden painotuskerroin (Talja, 2008, s. 14).

Taajuuspainotetusta värähtelysignaalista määritetään suurin tehollisarvo.



Kuva 2.5. Suurin tehollisarvo (Talja, 2008, s. 14).

Mitatuista arvoista tarkastellaan taajuusaluetta 1 – 80 Hz. Mitatun värähtelyn suuruus ilmoitetaan taajuuspainotetun nopeussignaalin suurimman hetkittäisen tehollisarvon (v_w , mm/s) avulla (Talja, 2011, s.17 - 18). Mittauksista valitaan 15 tapahtumaa, joista määritetään värähtelyn tunnusluku $v_{w,95}$. Värähtelyn tunnusluku kuvaa viikon aikana esiintyvää värähtelyn tilastollista maksimiarvoa, jolloin tapahtumista 95 % alittaa tilastollisen tunnusluvun arvon. Värähtelyn tunnusluku saadaan laskettua, kun tehollisarvojen keskiarvoon lisätään tehollisarvojen keskihajonta 1,8 –kertaisesti.



Kuva 2.6. Painotettu tehollisarvo terssikaistoittain sekä värähtelyn tunnusluku $v_{w,95}$ (Talja, 2008, s. 14).

Taulukossa 2.1. on esitetty eri värähtelyolosuhteille värähtelyluokat. Uusien rakennusten suunnittelussa käytetään värähtelyluokkaa C ($\leq 0,30$ mm/s), kun taas vanhempien rakennusten värähtelyluokka on D ($\leq 0,60$ mm/s). Taulukkoa ei sovelleta rakennuksille, joissa ihmiset ovat paljon liikkeessä tai muut kuin liikenteestä aiheutuvat häiriöt voivat olla merkittävämpiä (esim. toimistot, kaupat, kahvilat, ostoskeskukset, tavaratalot, liikuntatilat) (Talja, ym. 2008 s. 16).

Luokka	Värähtelyolosuhteet	$v_{w,95}$ [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 valita häiriöstä.</i>	$\leq 0,30$
D	Olosuhteet, joihin pyritään vanhoilla asuinalueilla. <i>Keskimäärin 25 % asukkaista pitää tärinää häiritsevänä ja voi valita häiriöstä</i>	$\leq 0,60$

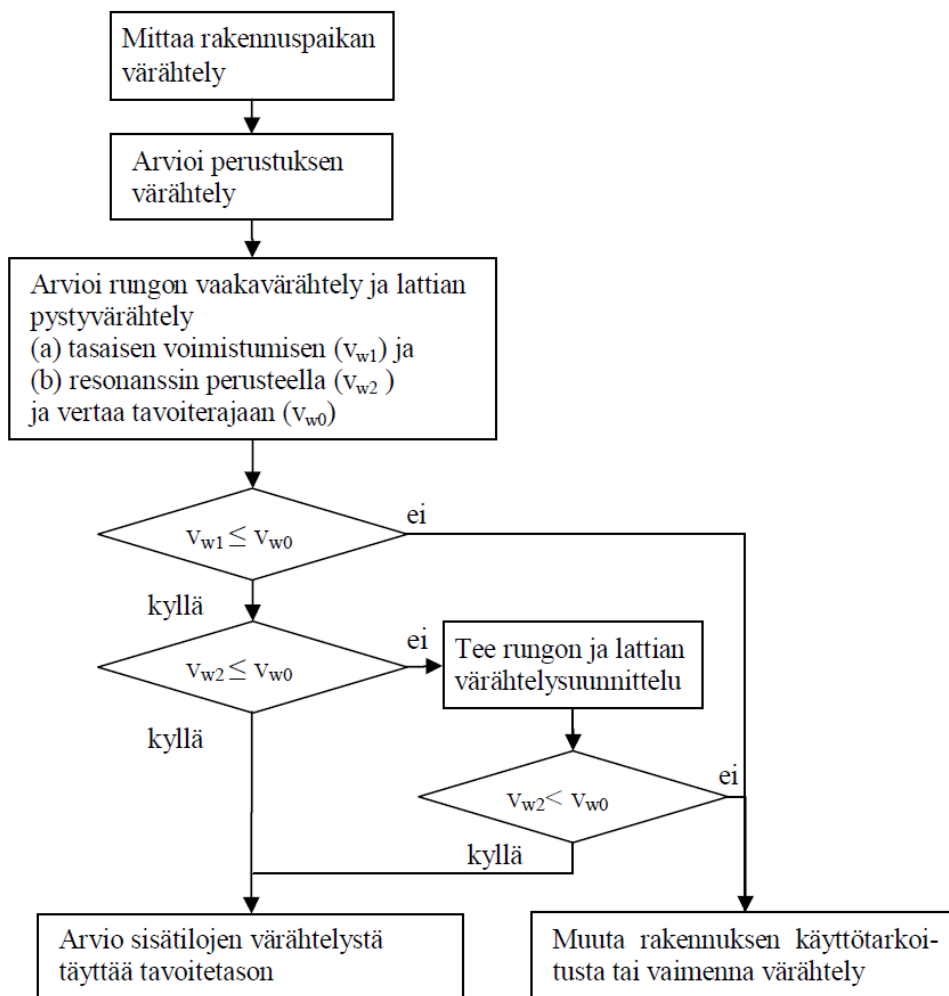
Taulukko 2.1. Suositus rakennusten värähtelyolosuhteista (Talja, A. 2008, s. 16).

2.2 Liikennetärinän kulkeutuminen välipohjiin

Arvio rakennuksen rungon ja lattian värähtelystä perustuu perustuksen värähtelyyn, joka taas perustuu mitattuun maan värähtelyyn (Talja, A. 2011, s.14). Lähtökohtaisesti rakennuspaikalta tehdään kolmikomponenttimittaus, joka mittaa kahta eri vaakasuuntaista värähtelyä ja pystysuuntaista värähtelyä. Jokainen värähtelyn suunta käsitellään erillisenä. Rungon resonanssitarkastelu perustuu

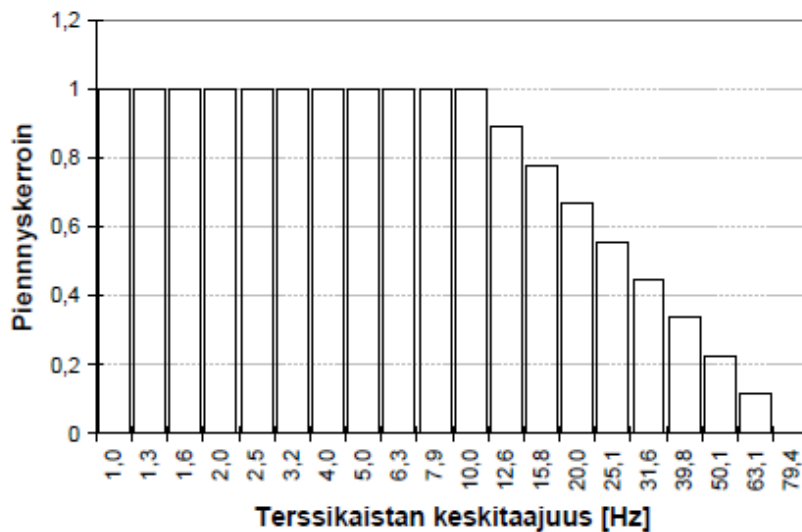
maan vaakavärähtelyyn ja lattian resonanssitarkastelu maan pystyvärähtelyyn (Talja, 2011, s.14).

Värähtely vaimenee yleensä maassa ja perustuksissa, mutta voi voimistua resonanssin vaikutuksesta välipohjissa. Sisätilojen värähtelyä tulee tarkastella ensin tasaisen voimistumisen perusteella. Tasaiseen voimistumiseen perustuva rakennuksen värähtely määritetään perustuksessa esiintyvän suurimman värähtelykomponentin perusteella (Talja, 2011, s. 22). Tasaisessa voimistumisessa värähtelykomponenttia suurennetaan suurennuskertoimella VTT:n ohjeen mukaisesti puolitoistakertaiseksi. Kuvan 2.7. avulla voi arvioida rakennukseen siirtyvää tärinää vaihe vaiheelta.



Kuva 2.7. Rakennukseen siirtyvän liikennetärinän arvioinnin vaiheet (Talja, 2011, s.15)

Matalataajuiset värähtelyt siirtyvät perustuksiin paremmin kuin korkeataajuiset. Näin ollen tärinän tunnuslukua pienennetään korkeilla taajuusalueilla pienennyskerroimen avulla. Pienennyskerroin määritetään jokaiselle taajuuden terssikaistalle (kuva 2.8) terssikaistoittain. Kun pienennyskerroin on 0,5, maan tärinästä siirtyy 50 % perustuksiin. Terssikaistalla tarkoitetaan taajuusaluetta, joka on jaettu 1/3-oktaavikaistoihin. Rakennuksen koko tai perustamistapa ei vaikuta pienennyskerroimen arvoon. Pienennyskerroimen arvot on esitetty alla olevassa kuvassa 2.8.



Kuva 2.8. Pienennyskerroin perustukseen siirtyvän värähtelyn arvioimiseksi. (Talja, 2011, s. 20)

Perustuksista tärinä siirtyy pystysuuntaisten kantavien rakenteiden välityksillä välipohjiin, joissa se voi vahvistua välipohjan jouduttua resonanssiin liikennetärinän kanssa.

Välipohjan resonanssitapauksessa värähtelyn suuruus tarkastellaan perustuksen pystysuunnan mittausten perusteella tilastollisesti määritetyn suurimman arvon mukaan. Resonanssin vaikutuksesta välipohjaan vaikuttavaa värähtelyarvo kasvatetaan VTT:n ohjeen suositusten mukaan kuusinkertaisesti. Jos värähtelyn arvot ylittyvät jollain taajuusalueella yli suosituksen, tulee kyseistä taajuusaluetta välttää välipohjaa suunniteltaessa.

3 Välipohjien ominaistajuusmittaukset ja vertailulaskennat

Työssä tehtiin rakenteiden pystysuuntaisten ominaistajuusmittauksia kolmessa eri vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa mitattiin laboratorio-olosuhteissa teräspalkin alin ominaistajuus. Tämän mittauksen avulla tutustuttiin mittalaitteeseen. Toisessa vaiheessa mitattiin yhtä välipohjaa ja kiinnitettiin huomiota mitaustarkkuuteen, toistettavuuteen ja mittaustulosten hajontaan. Kolmannessa vaiheessa suoritettiin mittaussarjat useasta välipohjasta. Mittaustilanteessa anturi sijoitettiin mahdollisimman keskeisesti mitattavan rakenteen, esimerkiksi yksittäisen ontelolaatan päälle.

3.1 Mittalaite

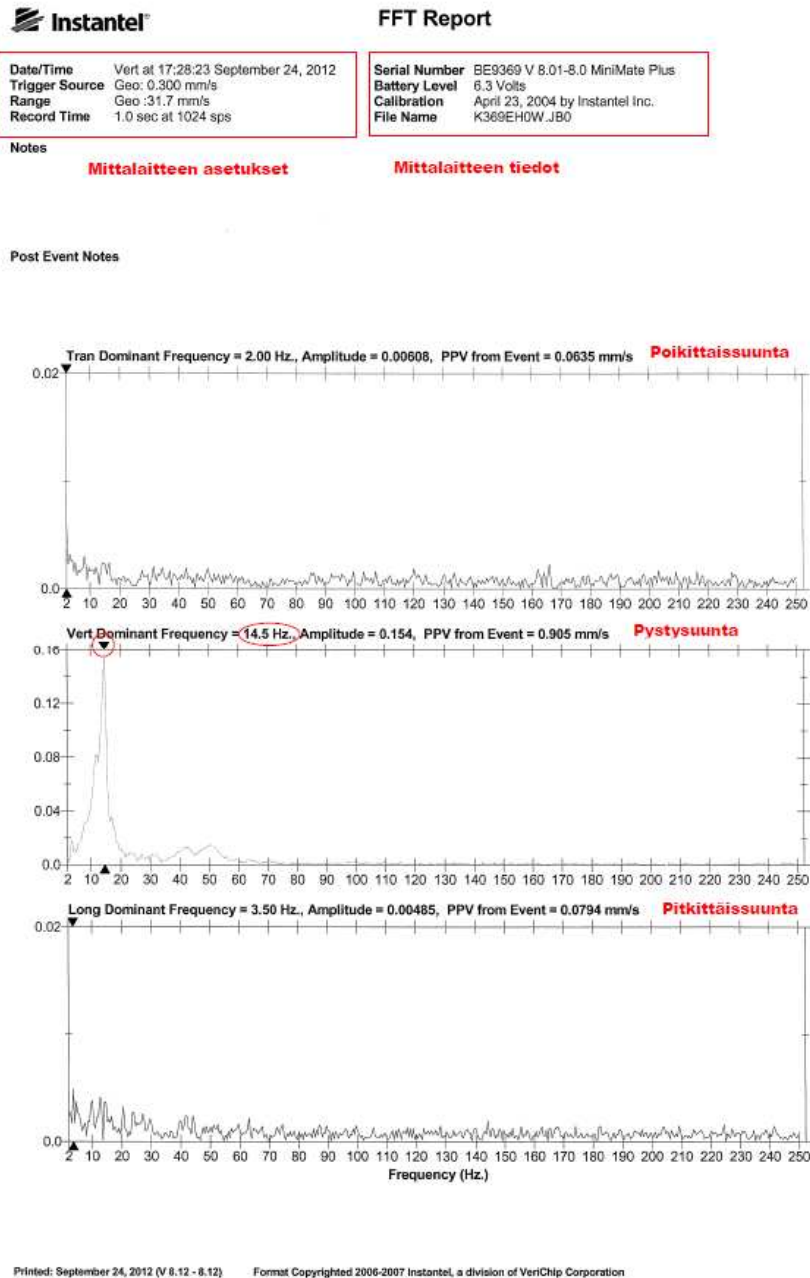
Ominaistajuusmittauksia laboratorio-olosuhteissa, välipohjamittauksessa ja sarjamittauksessa suoritettiin mittalaitteella nimeltä Instantel Minimate plus. Mittalaitetta voidaan käyttää muun muassa liikennetärinän tai räjäytystärinän mittauksiin. Kuvassa 3.1. on kuva mittalaitteesta.



Kuva 3.1. Instantel MiniMate plus (Minimate Plus 2012).

Mittalaite mittaa heilahdusnopeuden kolmessa toisiaan kohtisuorassa suunnassa: pysty-, vaaka- ja poikittaissuunnassa. Mittaustapahtuman jälkeen mittatulokset siirretään Blastware-ohjelman avulla tietokoneelle. Mittaustuloksista ana-

lysoidaan värähtelyn taajuudet FFT-analyysillä, tarvittaessa terssikaistoittain. Seuraavana olevassa esimerkkikuvassa on esitetty Blastware – ohjelman FFT-analyysin tulos. Esimerkki (kuva 3.2) on Saimaan ammattikorkeakoulun mittausarjan yksittäinen mittaustulos. FFT-analyysin keskimmaisessä taulukossa esitetään mitattavan kohteen pystysuuntaista ominaistaajuutta.

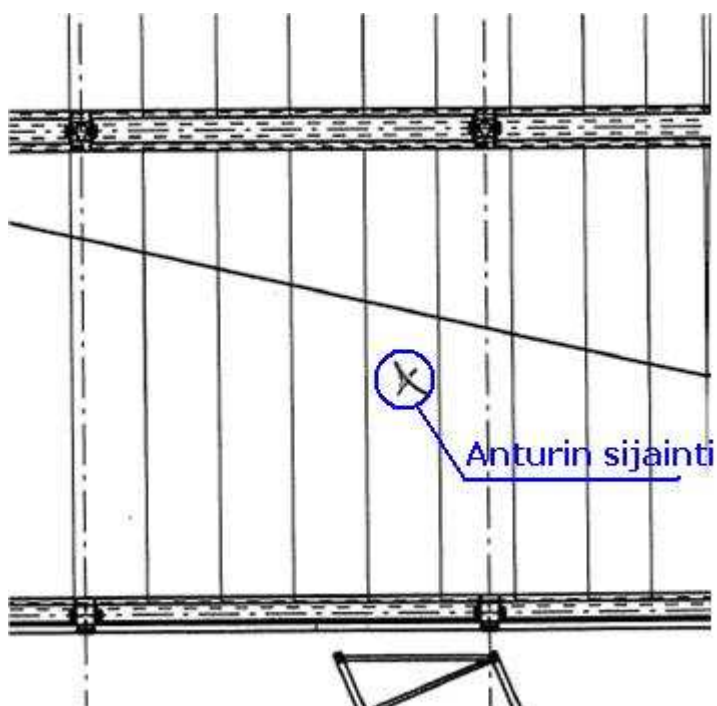


Kuva 3.2 Esimerkkikuva mittaustuloksista. Alin pystysuuntainen (vert) ominaistaajuus 14,5 Hz.

3.2 Testimittaus välipohjasta

Työn toisessa vaiheessa tutustuttiin välipohjien mittaustapaan. Mittauksen tarkoituksena oli myös testata anturin käyttöä tulevia työmaamittauksia varten.

Toisen vaiheen mittauksessa kokeiltiin muun muassa erilaisia anturin kiinnityksiä ja herätteen voimakkuuksia. Mittauksen toistettavuuteen kiinnitettiin huomiota. Tulosten hajontaa seurattiin ja etsittiin toimivaa tapaa mitata välipohjan ominaistaajuutta. Laitteen anturin pohjan pinta-ala ja anturin paino riittivät itsessään pitämään anturin tukevasti paikallaan. Mittalaite sijoitettiin ontelolaatan keskelle pitkittäis- ja poikittaissuunnassa. Seuraavana olevassa kuvassa (kuva 3.3.) on esitetty anturin paikka ontelolaatastolla.

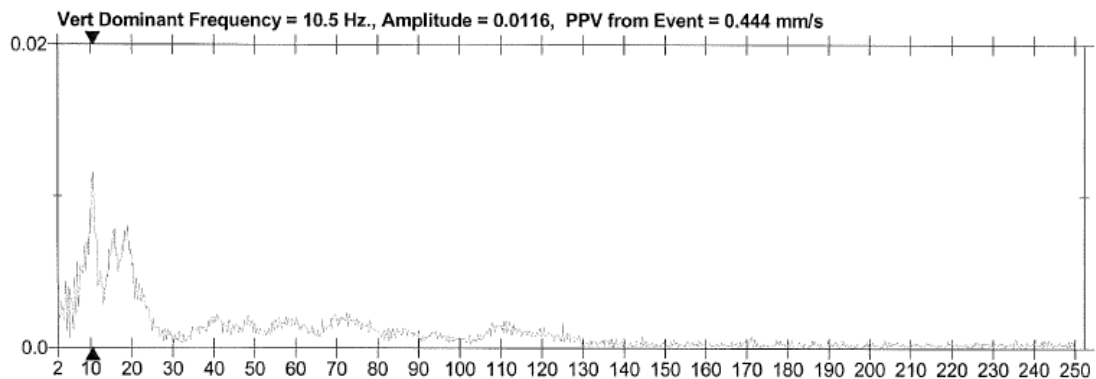


Kuva 3.3. Anturin sijainti ontelolaatastolla.

3.2.1 Mittaus

Mittaus suoritettiin Saimaan ammattikorkeakoulun toisen ja kolmannen kerroksen välisestä välipohjasta. Heräte laitteelle annettiin välipohjaan terävällä kantapään polkaisulla. Laite reagoi jo pieneenkin tärinään. Mittaussarjan keskihajonnan suhde keskiarvoon (variaatiokerroin) oli noin 6 %. Variaatiokerroin kertoo kokeen toistettavuudesta. Mitä suurempi variaatiokertoimen arvo on, sitä

huonommin koe on toistettavissa. Alla olevassa kuvassa (kuva 3.4.) on esitetty yksittäinen mittaustulos välipohjasta tehdystä mittaussarjasta.



Kuva 3.4. Saimaan ammattikorkeakoulun välipohjan mittaustulos (10,5 Hz).

3.2.2 Laskenta

Yleensä lattian ominaisvärähtely voidaan arvioida päistään niveltuettuna palkkina lausekkeella (VTT 2124).

$$f_o = \frac{\pi}{2 \cdot l^2} \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}} \quad (5)$$

Laskennassa käytetty massa (m) on ontelolaatan neliöpaino [kg/m^2].

Ennen mittausta tehtiin laskenta, jonka avulla määritettiin laskennallisesti ontelolaatan alin ominaistajuus. Välipohjan rakenteena oli alhaalta ylöspäin: pintamateriaali, ontelolaatta O27, pintabetoni 60 mm ja pintamateriaalina kumipohjainen matto. Ontelolaatan pituus on 7900 mm, leveys 1200 mm, paksuus 265 mm ja paino $360 \text{ kg}/\text{m}^2$. Ontelolaatan raudoituksista ei ollut tarkempaa tietoa.

Ontelolaatan taivutusjäykkyyttä on vaikea määrittää. Tarkka taivutusjäykkyyden arvo riippuu valmistajan käyttämästä poikkileikkausmuodosta, betonin lujuusluokasta, punosten koosta ja punosten määrästä (Talja, 2011, liite B s.B2). Taivutusjäykkyyden $(EI)_l$ [Nm^2/m] on oletettu riippuvan ontelolaatan korkeudesta (h) [mm] seuraavasti:

- $(EI)_l = 2,4 \cdot h^{3,0}$ (6), kun laatasto on ilman pintavalua

- $(EI)_l = 67 \cdot h^{2,5}$ (7), kun laataston päällä on pintavalu 50 mm.

Perusrakenteen painoon on lisätty varustelusta aiheutuvaa painoa 30 kg/m^2 (ilman pintavalua) tai 10 kg/m^2 (pintavalu 50 mm) sekä hyötykuormasta osuus 30 kg/m^2 (Talja, 2011, liite B, s. B2). Laskennoissa ei ole huomioitu raudoituksen vaikutusta ontelolaatan jäykkyyteen. Raudoituksen vaikutuksen voidaan arvioida olevan vähäinen.

Laskennallisesti ontelolaatoista tehdyn välipohjan alimmaksi ominaistajuudeksi saatiin 11,0 Hz. Mitattu tulos oli laskettua arvoa pienempi. Yleensä mittaustulos oli myöhemmissä mittauksissa laskennallista arvoa suurempi. Mittaustuloksen keskiarvoon vaikutti oikean mittaustavan etsiminen.

3.3 Mittaukset ja vertailulaskelmat

Mittaussarjoja tehtiin neljästä kohteesta: Saimaan ammattikorkeakoulu, As Oy Lappeenrannan Katariina, LOASin Seppo ja Kauppakeskus Capri. Mittaussarjoja tehtiin ontelolaatoista ja paikallavaletuista välipohjista. Mittauskohteissa rakenteiden valmiusasteet olivat erilaisia. Mittaussarjoja tehtiin rakenteille, joille oli tehty saumavalu, pintavalu tai jo valmis lattianpinta.

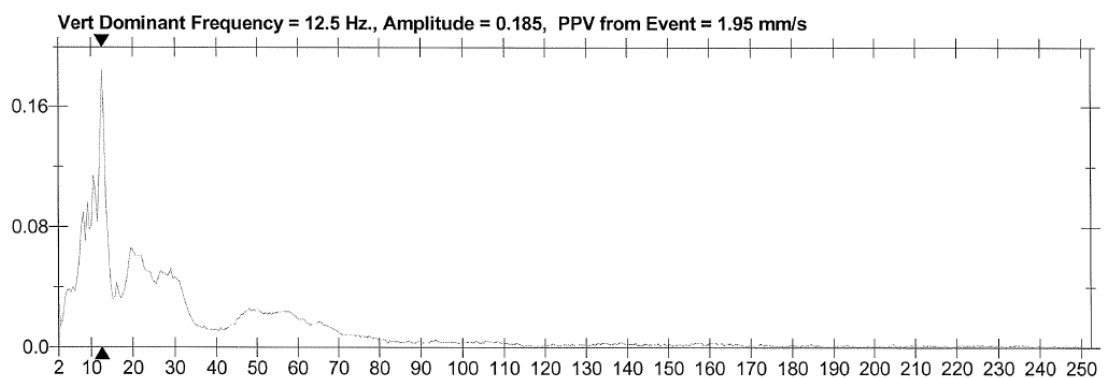
Saimaan ammattikorkeakoulu

Ensimmäinen mittaussarja tehtiin Saimaan ammattikorkeakoulun kolmannen kerroksen lattiana toimivasta välipohjasta. Ammattikorkeakoulun tiloissa mitattiin kahdesta luokkahuoneesta välipohjan ominaistajuutta. Välipohjat olivat ontelolaatoista koottuja ontelolaatastoja. Seuraavana on kuva (kuva 3.5.) Saimaan ammattikorkeakoulun tiloissa tehtävistä mittauksista.

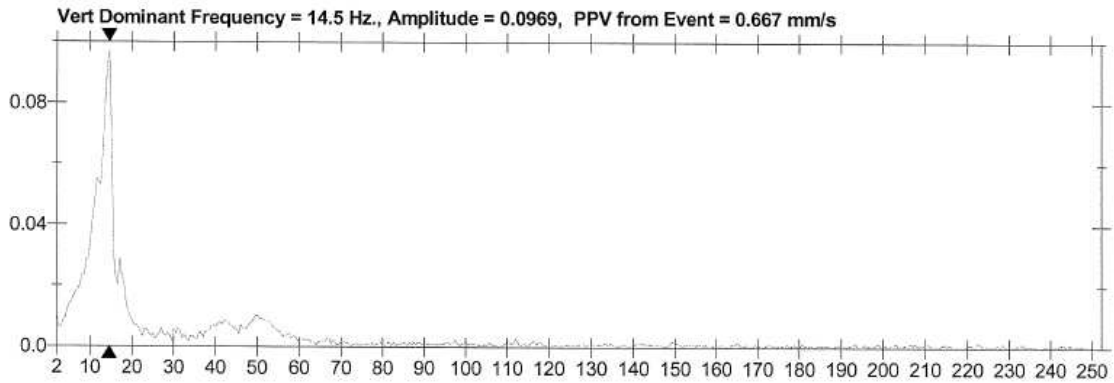


Kuva 3.5. Mittaus Saimaan ammattikorkeakoulun tiloissa.

Mittauksia tehtiin pidemmästä ontelolaatasta noin 30 kertaa ja lyhyemmästä noin 10 kertaa. Mittalaite antoi saman tuloksen jokaisella mittakerralla herätteen paikasta tai voimakkuudesta riippumatta. Heräte annettiin aluksi hyppäämällä välipohjan päällä. Se aiheutti kuitenkin liikaa häiriötä tuloksissa. Heräte annettiin tämän jälkeen napakalla kantapään iskulla. Pidemmän ontelolaatan mittaussarjan keskiarvotulos oli 12,5 Hz ja lyhyemmän ontelolaatan mittaussarjan keskiarvotulos oli 14,5 Hz. Pidemmän ontelolaatan variaatiokerroin oli noin 1 %. Lyhyemmän ontelolaatan variaatiokerroin oli 0 %. Alla on yksittäiset mittaustulokset Saimaan ammattikorkeakoulun tiloissa tehdyistä mittaussarjoista (kuvat 3.6. ja 3.7.).



Kuva 3.6. 11685 mm pitkän ontelolaatan yksittäinen mittaustulos (12,5 Hz).



Kuva 3.7. 9785 mm pitkän ontelolaatan yksittäinen mittaustulos (14,5 Hz).

Laskenta mittaussarjojen välipohjista toteutettiin samalla tavalla kuin yksittäisen välipohjan laskennassa luvussa 3.3.2.

Ontelolaattojen pituudet olivat 12100 mm ja 9785 mm. Ontelolaattojen päälle oli tehty pintavalu sekä asennettu kumipohjainen matto. Ontelolaatat olivat paksuudeltaan 400 mm. Luokkatilat olivat jo käytössä ja ne olivat kalustettuja. Laskennassa käytettiin hyötykuormana 15 kg/m^2 . Ontelolaattojen paino oli 460 kg/m^2 . Laskennallisesti pidemmän ontelolaatan alimmaksi ominaistaajuudeksi saatiin 7,1 Hz. Lyhyemmän ontelolaatan alimmaksi ominaistaajuudeksi laskennallisesti saatiin 10,9 Hz.

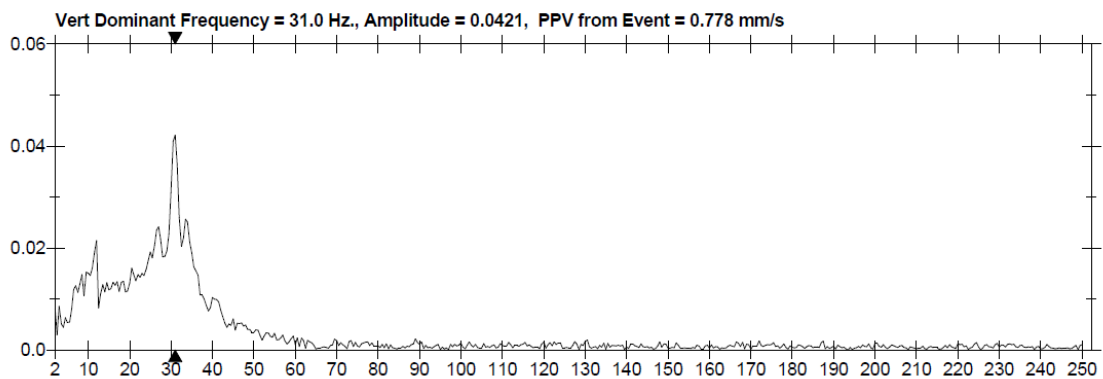
Mittaushetkellä rakenteet olivat jo valmiina. Laskennassa ei huomioitu raudoituksen tai pintamateriaalin vaikutusta välipohjan alimpaan ominaistaajuuteen. Laskenta tehtiin ontelolaatan kokonaispituuden mukaan. Mahdollisesti näistä syistä johtuen mittaustulos oli laskennallista tulosta suurempi.

As oy Lappeenrannan Katariina

Toinen mittaussarja tehtiin As Oy Lappeenrannan Katariinan rakennustyömaalla. Rakennus on viisikerroksinen, ja sen ensimmäisessä kerroksessa on liiketila. Toisesta kerroksesta ylöspäin rakennus on asuinkäytössä. Työmaan pääurakoitsijana toimi Lemminkäinen Talo Oy. Rakennuksen välipohjat ovat paikalla valettuja teräsbetonilaattoja. Asunnoissa oli mittausten aikana rakennusmateriaalia sekä keittiökalusteita. Rakennuksen ulkopuolella, katutasossa, on ontelolaatoista tehty pihakansi. Mittausajankohtana ontelolaatoille oli tehty saumavalu. Mitatun ontelolaatan päällä ei mittaushetkellä ollut mittaajan lisäksi lisäpainoa.

Työmaalla oli nosturi sekä normaalia rakennustyötä, jotka aiheuttivat pientä taustavärähtelyä.

Rakennuksessa tehtiin viidestä eri kohdasta mittaussarja. Kolmannesta ja neljännestä kerroksesta tehtiin mittaussarjat kahdesta kohdasta. Toisesta kerroksesta tehtiin yksi mittaussarja. Piha-alueelta tehtiin yksi mittaussarja ontelolaatan päältä. Jokaisessa mittaussarjassa oli vähintään kuusi mittausta. Heräte annettiin napakalla kantapään polkaisulla. Mittausaika oli yksi sekunti. Paikalla-valettujen välipohjien mittaussarjojen keskiarvotulokset olivat 25 – 39,3 Hz välillä. Pihakannen ontelolaatan mittaussarjan keskiarvotulos oli 14,9 Hz. Jokaisen mittaussarjan variaatiokerroin oli noin 1 %. Seuraavassa kuvassa (kuva 3.8.) on esitetty yksittäinen mittaustulos As Oy Lappeenrannan Katariinan mittauksista.



Kuva 3.8. 3. kerroksen yksittäinen mittaustulos (31,0 Hz).

Pihakannen ontelolaatan alin ominaistajuus laskettiin kohdan 3.3.2. mukaisesti.

Paikallavälipohjien laskenta erosi ontelolaattavälipohjien laskennasta. Ontelolaattoja laskettaessa ei huomioitu lattia reunojen tuentaa, joka täytyi huomioida paikallavälipohjien laskennassa. Kun lattioiden reunatuenta otetaan huomioon, laskettiin välipohjan alin ominaistajuus lausekkeella

$$f = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}} \cdot \sqrt{1 + \left[2\left(\frac{l}{b}\right)^2 + \left(\frac{l}{b}\right)^4 \right] \frac{(EI)_b}{(EI)_l}} \quad (8)$$

missä l oli välipohjan pidemmän sivun pituus, $(EI)_l$ pidemmän sivun jäykkyys, b lyhyemmän sivun pituus, $(EI)_l$ lyhyemmän sivun jäykkyys sekä m lattian massa pinta-alayksikköä kohden lisättynä hyötykuorma 30 kg/m^2 .

As Oy Lappeenrannan Katariinan välipohjat olivat toteutettu paikallavalettuina laattarakenteina. Laatan paksuus oli 250 mm ja paino 625 kg/m^2 . Välipohjien tuettujen reunojen pituudet vaihtelivat $5,4 - 10,3 \text{ m}$ välillä. Rakennuksen sisäpihalla, katutasossa, oli pihakansi, joka oli toteutettu ontelolaatoilla. Ontelolaatat olivat paksuudeltaan 370 mm , pituudeltaan 8 m ja painoltaan 420 kg/m^2 . Sekä asuinkerrostalon välipohjille että pihakannen ontelolaatoille annettiin laskentaa varten hyötykuormaa 15 kg/m^2 rakenteiden päällä olleiden rakennusmateriaalien takia. Laskennallisesti asuinkerrostalon välipohjien alimmat ominaistajuudet olivat $14,4 - 20,5 \text{ Hz}$ välillä. Pihakannen yksittäisen ontelolaatan alimmaksi ominaistajuudeksi laskennallisesti saatiin $12,8 \text{ Hz}$.

As Oy Lappeenrannan Katariinan alimman ominaistajuuden tutkimuksen tulokset olivat samanlaisia kuin Saimaan ammattikorkeakoulun tulokset, sillä laskennalliset arvot olivat pienempiä kuin mitatut arvot. Mittauksien arvoihin vaikutti välipohjien päällä olleet ei kantavat väliseinät. Ne luultavasti vaikuttivat välipohjan niin sanottuun vapaaseen värähtelyyn. Pihakannen ontelolaatan päällä ei ollut sekundäärirakenteita, joten mittaustulos oli hyvin lähellä laskennallista arvoa.

LOASin Seppo

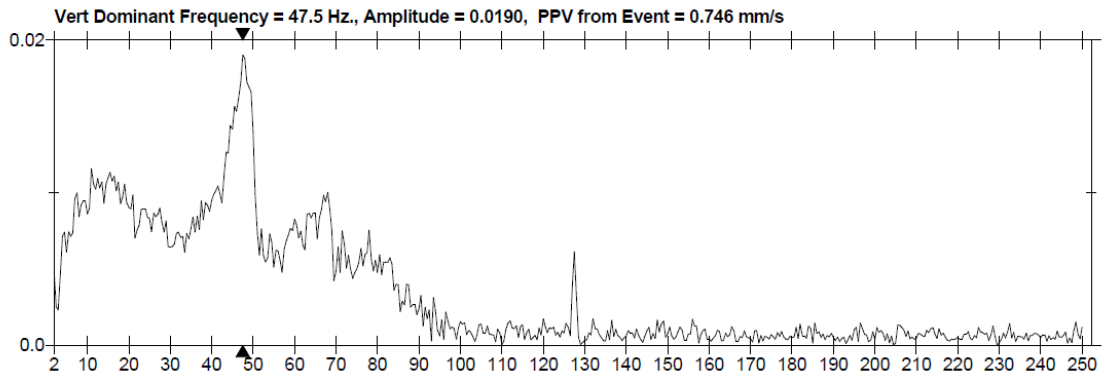
Kolmas mittaussarja tehtiin Lappeenrannan seudun opiskelija-asuntosäätiön (LOAS) Seppo-asuinkerrostalon työmaalla. Rakennustyömaan pääurakoitsijana toimi HL-Rakentajat Oy. Rakennus on kahdeksankerroksinen yksiportainen kerrostalo. Talon kaikki kerrokset olivat kantavilta rakenteiltaan sekä välipohjiltaan samanlaiset. Välipohjana rakennuksessa oli käytössä ontelolaatat. Ontelolaatoille oli tehty saumavalut, ja yhdelle mittauskohteelle oli tehty pintavalu. Mittausten aikana työmaalla oli käynnissä vesikaton asennus. Rakennuksen välitömmässä läheisyydessä oli toiminnassa oleva nosturi, joka aiheutti taustavärähtelyä mittaustuloksiin. Mittalaite pyrittiin asettamaan mahdollisimman keskelle ontelolaattaa. Huoneen keskeisin kohta oli ontelolaattojen sauman kohdalla. Mi-

tattujen ontelolaattojen päällä ei ollut mittaaajan lisäksi kuormaa. Seuraavassa kuvassa (kuva 3.9.) on esitetty mittausjärjestelyt LOASin Seppo-työmaalla.



Kuva 3.9. Mittaus LOASin Seppo –rakennuksessa.

Rakennuksessa tehtiin kahdeksasta kohdasta mittaussarja. Jokaisessa sarjassa tehtiin vähintään kuusi mittausta. Mittaukset tehtiin toisessa, kolmannessa, neljännessä ja viidennessä kerroksessa. Jokaisessa kerroksessa tehtiin kaksi mittaussarjaa kahdesta eri kohdasta. Ylemmissä kerroksissa oli mittausajankohdaksi rakennustyöt käynnissä, joten siellä ei mitattu. Rakennustyöt olisivat aiheuttaneet enemmän häiriötä mittaustuloksiin kuin mitä ne jo tekivät. Rakennustyöstä ja nosturista aiheutuvien häiriöiden takia mittaustuloksiin tuli enemmän keskihajontaa. Ontelolaattojen, joille pintavalua ei ollut vielä tehty, mittaussarjojen keskiarvotulokset olivat 46 – 55,4 Hz. Pintavalullisen ontelolaatan mittaussarjan keskiarvotulos oli 37,9 Hz. Mittaussarjojen variaatiokerroin oli alle 1 %:sta yli 50 %:iin. Seuraavassa kuvassa (kuva 3.10.) on yksittäinen mittaustulos LOASin Seppo-asuinkerrostalon mittauksista.



Kuva 3.10. 2. kerroksen yksittäinen mittaustulos (47,5 Hz).

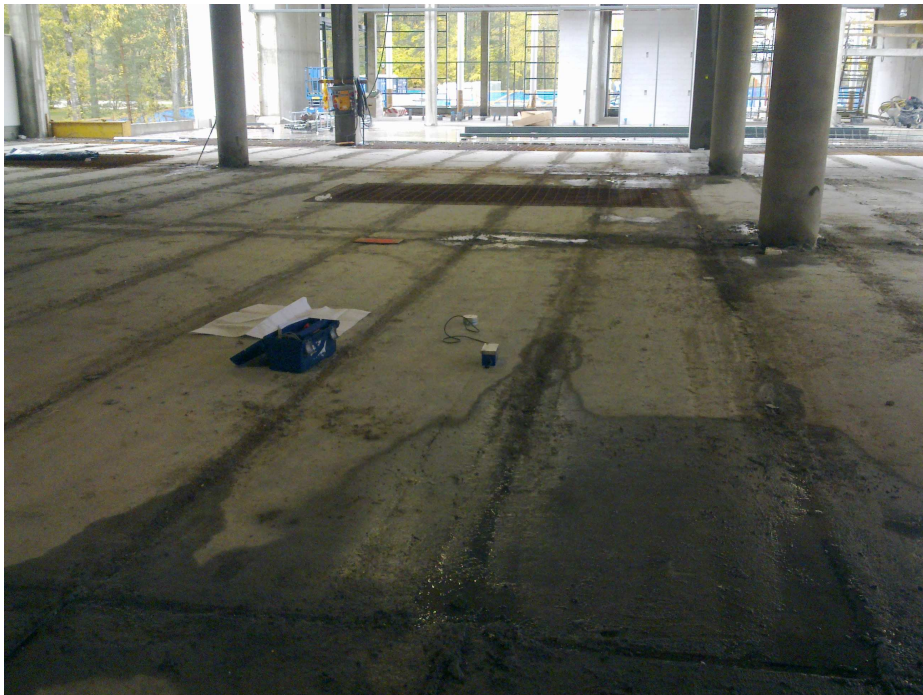
LOASin Seppo-asuinkerrostalon huoneet olivat välipohjiltaan samanlaiset. Yhdessä huoneessa oli tehty pintavalu, mutta muissa huoneissa oli pelkästään saumavalu. Ontelolaatat olivat paksuudeltaan 370 mm, pituudeltaan 4,7 m ja laatan omapaino oli 487 kg/m^2 . Laskennassa ei annettu ontelolaatoille hyötykuormaa, sillä mittaushetkellä ontelolaattojen päällä ei ollut hyötykuormaa. Laskennallisesti ontelolaataston alimmaksi ominaistajuudeksi saatiin 35,6 Hz, kun ontelolaatoilla ei ole pintavalua. Pintavalullisen ontelolaataston alin ominaistajuus laskennallisesti oli 42,9 Hz.

Vaikka rakennuksen jokainen kerros oli pohjaltaan samanlainen, tuli mittaustuloksiin eroa. Rakennustyöt sekä rakennuksen vieressä ollut nosturi häiritsivät mittaustarkkuutta. Kuitenkin tulokset olivat aiempien mittausten tapaiset, sillä laskennalliset tulokset olivat mittaustuloksia pienempiä. Poikkeuksen kuitenkin teki huone, jossa ontelolaatoille oli tehty pintavalu. Laskennallinen tulos oli suurempi kuin mitattu arvo. Tämä saattoi johtua siitä, että pintavalu ei ollut vielä lujuuttunut täysin.

Kauppakeskus Capri

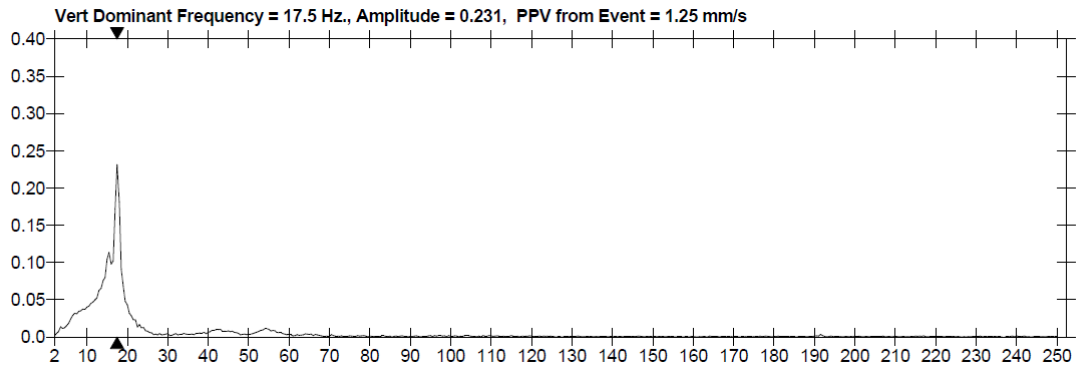
Neljäs mittaussarja tehtiin Lappeenrannan Rauhassa sijaitsevan Kauppakeskus Caprin työmaalla. Työmaalla pääurakoitsijana toimi Evälahti Oy. Rakennuksessa on kokonaishuonealaa noin 7000 m^2 . Välipohjat olivat toteutettu ontelolaatoilla. Ontelolaatoille oli tehty saumavalu. Mittausajankohtana työmaalla pientä mittaushäiriötä aiheutti käynnissä oleva nostokurki, vesikaton valutyöt sekä normaali rakennustyö. Mitattujen ontelolaattojen päällä ei ollut lisäpainoa mit-

taajaa lukuun ottamatta. Alla on kuva (kuva 3.11.) mittausjärjestelyistä Kauppakeskus Caprissa.



Kuva 3.11. Mittaus Kauppakeskus Caprin työmaalla.

Rakennuksessa tehtiin yhdestä kerroksesta kuusi mittausarjaa. Jokaisessa mittausarjassa oli vähintään kuusi mittausta. Mittausarjojen keskiarvotulokset olivat 16 – 18,5 Hz. Mittausarjojen variaatiokerroin oli alle 3 %. Neljännessä mittausarjassa, joka tehtiin kantavan seinän vierestä, variaatiokerroin oli 20 %. Mittausarjan keskiarvotulos oli 33,3 Hz. Hajontaa mittausarjaan aiheutti ylemissä kerroksissa tehdyt rakennustyöt, joiden värinä kulkeutui kantavaa seinää pitkin mitatun kerroksen välipohjaan. Seuraavassa kuvassa (kuva 3.12.) on yksittäinen mittaustulos Kauppakeskus Caprin mittauksissa.



Kuva 3.12. 6. mittaussarjan yksittäinen mittaustulos (17,5 Hz).

Kauppa-keskus Caprin välipohjat olivat ontelolaattoja, jotka olivat paksuudeltaan 400 mm. Mitattujen ontelolaattojen pituudet vaihtelevat 7,06 – 7,42 m välillä. Ontelolaattojen neliöpaino on 490 kg/m². Laskennassa ei käytetty hyötykuormaa, koska välipohjien päällä ei ollut painoa. Laskennallisesti ontelolaattojen alimmat ominaistajuuudet olivat 16 – 16,7 Hz välillä. Taajuudet oli laskettu ontelolaatoille, joille ei ole tehty pintavalua. Jos ontelolaatoille olisi tehty pintavalu, taajuudet olisivat laskennallisesti 18,9 – 20,8 Hz.

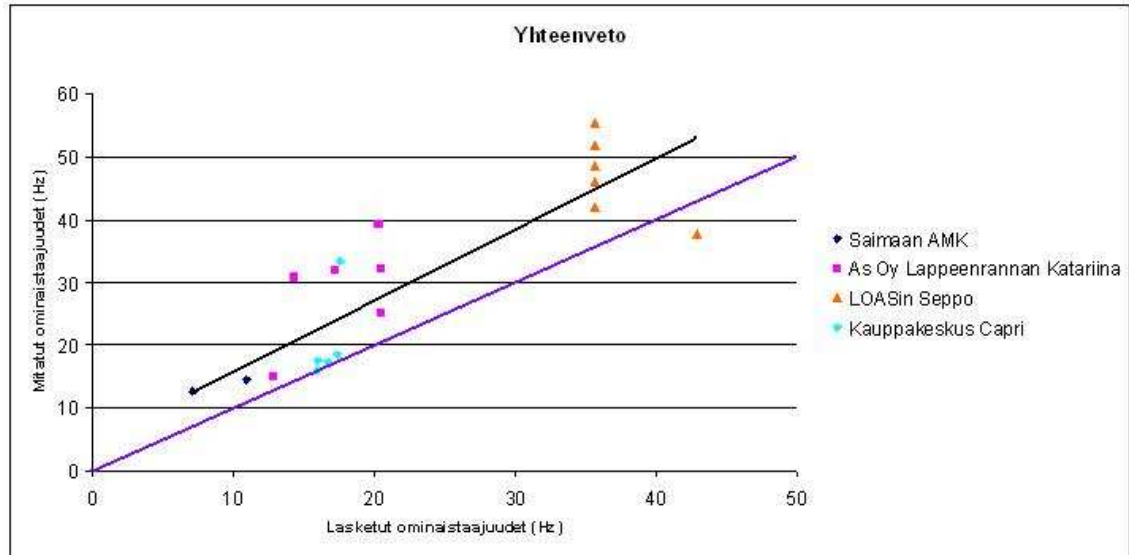
Mittaustulokset sekä laskennalliset arvot olivat hyvin lähellä toisiaan. Mittaus- hetkellä ontelolaattojen päällä ei ollut sekundäärirakenteita, joten ontelolaatat pääsivät värähtelemään vapaasti. Yksi poikkeus mittauksissa kuitenkin oli, kun mittaussarja tehtiin kantavan seinän vierestä. Ylemmän kerroksen valutöistä aiheutunut tärinä, johtui kantavaa seinää pitkin ontelolaattaan. Ontelolaatan tuki on kantavassa seinässä kiinni. Tästä syystä kyseisen ontelolaatan mittaustulokset erosivat huomattavasti muista tuloksista.

3.4 Tulosten tarkastelu

Mitatut ja lasketut mittaustulokset on esitetty kuvassa 3.13. sekä taulukkomuodossa liitteessä 1. Jokaisesta mittaussarjasta otettiin sarjan keskiarvotulos. Välipohjamittaustuloksia on kuvassa yhteensä 22.

Laskennalliset tulokset ovat yhtä poikkeusta lukuun ottamatta mitattuja tuloksia pienempiä. Suurin ero laskennallisten ja mitattujen välillä syntyi paikallaan valet- tujen välipohjien välillä. Kuvassa on esitetty violetilla viivalla selitysaste $R^2 = 1,0$. Tällöin lasketut arvot ovat yhtä suuria kuin mitatut arvot. Selitysaste kertoo sen,

kuinka paljon malli selittää kokonaisvaihtelusta. Musta viiva kuvaa tulosten selitystasetta. Yhteenvedon selitystasote oli 75 % ($R^2 = 0,7537$). As Oy Lappeenrannan Katariinan välipohjat olivat paikallaan valettuja. Muissa kohteissa välipohjat olivat toteutettu ontelolaatoilla.



Kuva 3.13. Yhteenvedo kaikista mittaussarjoista.

Laskennallisesti välipohjien alimmat ominaistaajuudet olivat matalampia kuin mitattujen tulosten arvot. Mitattujen ja laskennallisten arvojen eroihin voi vaikuttaa usea eri asia. Mahdollisesti suurin yksittäinen tekijä eroihin on rakenteiden liitokset. Valmiiden rakenteiden liitokset ovat yleensä jäykempiä kuin laskennassa käytettyjen rakenteiden liitokset. Laskennassa oletetaan liitoksen olevan niveltuettu. Ontelolaataston sivusuuntainen jäykkyys vaikuttaa osittain rakenteen alimpaan ominaistaajuuteen. Ontelolaatat tukeutuvat toisiinsa saumavalujen vaikutuksesta jäykistäen laatastoa. Eroa mittaustuloksen ja laskennallisen tuloksen välille tulee myös laskennan epätarkkuudesta. Laskentakaavoissa oletetaan betonin lujuusluokan olevan K60, kun todellisuudessa lujuusluokka voi olla toinen. Laskenta ei myöskään huomioi raudituksen vaikutusta rakenteeseen. Joissain tapauksissa rauditus saattaa jäykistää ontelolaattaa ja näin ollen mitattu ominaistaajuus eroaa laskennallisesta. Sekundaarirakenteet, kuten väliseinät, vaikuttavat myös mittaustuloksiin. Välipohja ei pääse tällöin värähtelemään vapaasti mittaustilanteessa, sillä sekundäärirakenteet tuovat välipohjalle lisätuenta. Välipohjan massa vaikuttaa omalta osaltaan välipohjan alimpaan

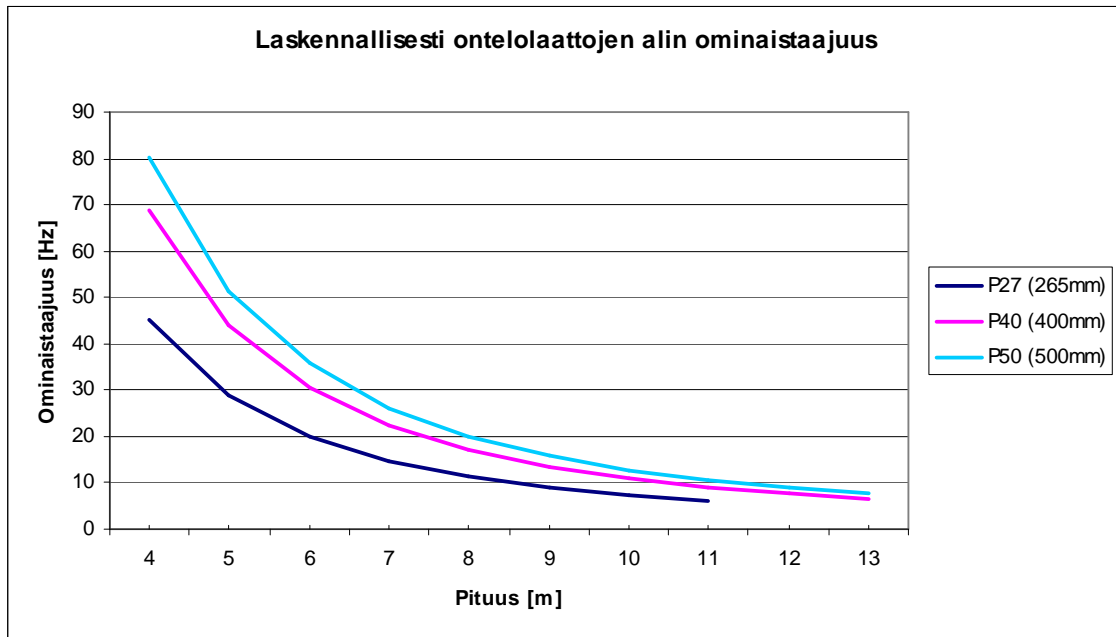
ominaistaajuuteen. Myös hyötykuorman lisääntyessä massa kasvaa ja välipohjan alimman ominaistaajuuden arvo pienenee. Esimerkiksi 6 m pitkän ontelolaatan (P40) alin ominaistaajuus ilman hyötykuormaa on 25,6 Hz. Alla olevassa taulukossa (taulukko 3.1.) on esitetty alimman ominaistaajuuden muutokset hyötykuorman lisääntyessä.

Hyötykuorma kg/m ²	Ominaistaajuus (Hz)
0	25,6
15	25,2
30	24,8
100	23,2
200	21,3

Taulukko 3.1. Alimman ominaistaajuuden muutos hyötykuorman lisääntyessä.

Ontelolaatan alin ominaistaajuus pienenee 25,6 Hz:stä 23,2 Hz:iin, kun hyötykuormaa ontelolaatalla tulee 100 kg/m². Tämä tarkoittaa noin 10 %:n muutosta alimmassa ominaistaajuudessa.

Ontelolaatan alin ominaistaajuus laskee pituuden kasvaessa, tällöin dynaamisessa tarkastelussa laatan jäykkyys alenee. Seuraavassa kuvassa (kuva 3.14.) on esitetty kolmen eri ontelolaatan taajuuden muutos pituuden suhteen; P27 on korkeudeltaan 265 mm ja painoltaan 360 kg/m², P40 on korkeudeltaan 400 mm ja painoltaan 435 kg/m² sekä P50 on korkeudeltaan 500 mm ja painoltaan 560 kg/m². Taajuudet on laskettu pintavalulliselle ontelolaatastolle ilman hyötykuormaa.



Kuva 3.14. Ontelolaattojen alin ominaistajuus laskennallisesti.

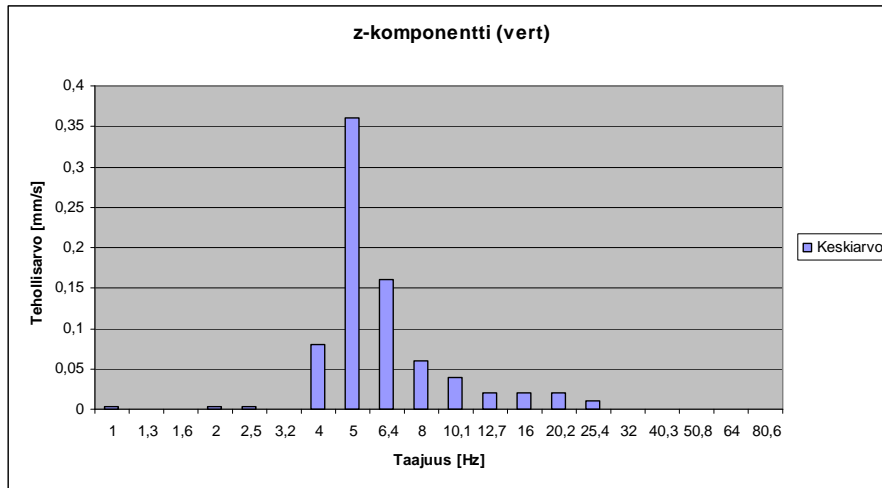
4 Liikennetärinän vaikutus välipohjiin

Välipohjaa suunniteltaessa tulee tarvittaessa huomioida rataliikennetärinän lisäksi asuinkerrostalojen välipohjien alimmat ominaistajuudet.

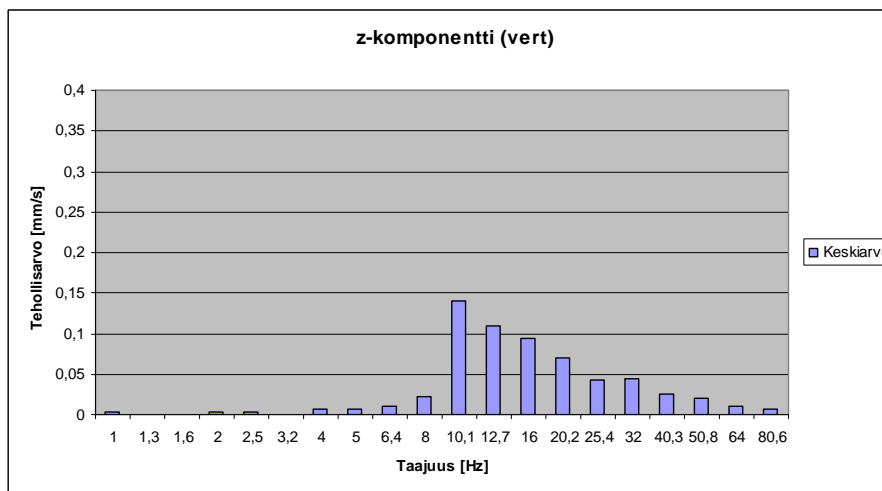
Tärinä kulkeutuu ja vahvistuu erilaisissa maaolosuhteissa eri taajuusalueilla. Pehmeillä maalajeilla tärinä kulkeutuu matalimmilla taajuusalueilla kuin tiiviillä kitkamailla. Seuraavassa on esitetty suuntaa-antavia laskelmia erilaisten maapohjien varaan rakennettujen rakennusten välipohjien värähtelystä.

Esimerkkilaskelmat

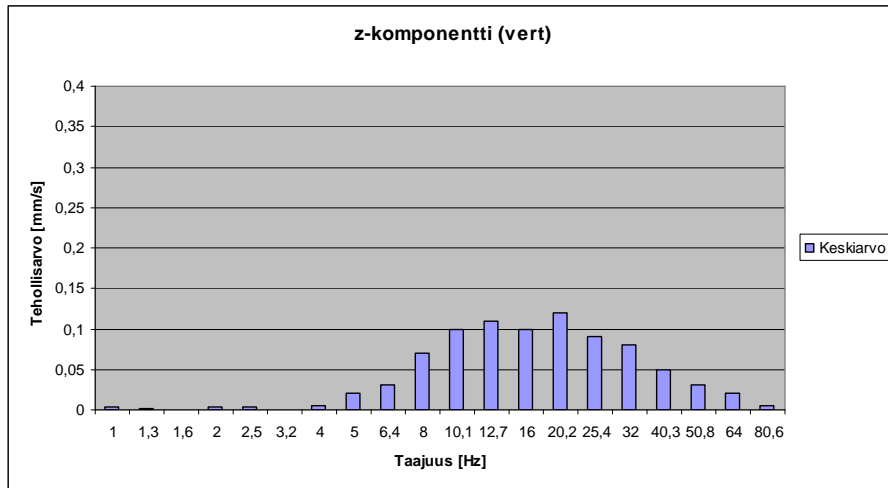
Esimerkkilaskelmissa käsiteltiin kolmea erilaista maaperää (kuvat 4.1. – 4.2.), joista laskettiin taajuuspainotettu tunnusluku, kokonaisvärähtelyn tunnusluku sekä välipohjan värähtelyn tunnusluvun arvojen avulla tutkittiin välipohjien ominaistajuusalueita. Suositusluokituksien ylittäviä taajuusalueita verrattiin kuvan 3.14. ontelolaattoihin.



Kuva 4.1. Maasta mitatun värinän terssikaistoittain jaetut tilastollisesti määritetyt taajuuspainotetut tehollisarvot pehmeiköllä. Kokonaisvärähtelyn tunnusluku $v_{w,95} = 0,41$ mm/s.



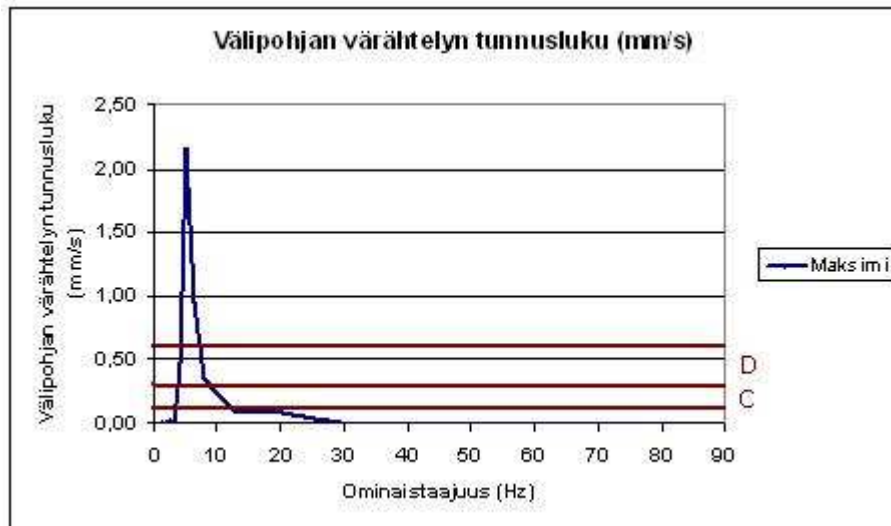
Kuva 4.2. Maasta mitatun värinän terssikaistoittain jaetut tilastollisesti määritetyt taajuuspainotetut tehollisarvot hiekkaisella maaperällä. Kokonaisvärähtelyn tunnusluku $v_{w,95} = 0,23$ mm/s.



Kuva 4.3. Maasta mitatun tärinän terssikaistoittain jaetut tilastollisesti määritetyt taajuuspainotetut tehollisarvot tiiviillä maaperällä. Kokonaisvärähtelyn tunnusluku $v_{w,95} = 0,27$ mm/s.

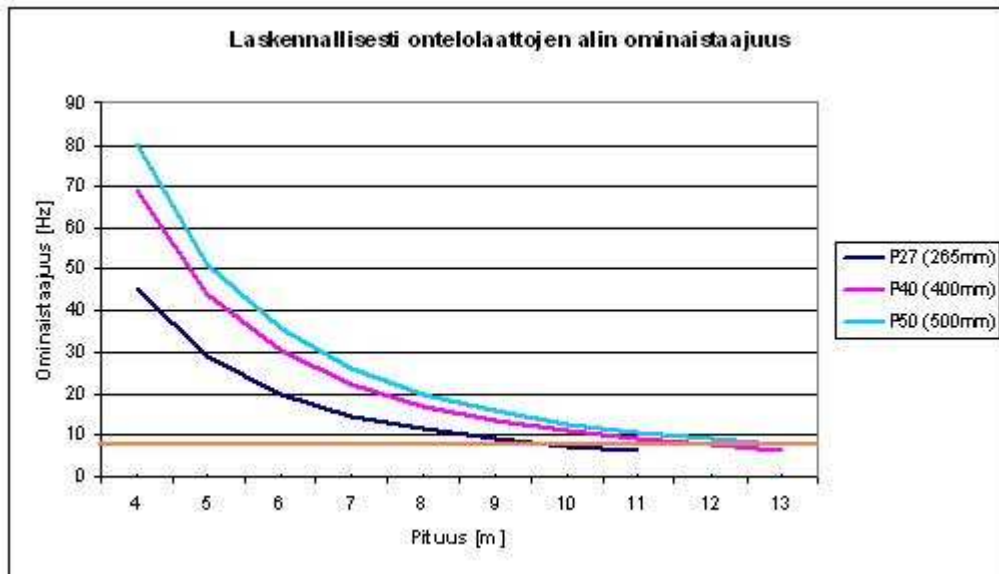
Taajuuspainotetuista tehollisarvoista lasketaan tärinä perustuksissa. Maasta siirtyvä tärinä pienennetään pienennyskertoimella (kuva 2.8.). Pienennyskertoimen antama tulos kuvaa tilannetta perustuksissa ennen kuin tärinä kulkeutuu kantavia rakenteita ylös välipohjaan. Välipohjan ollessa resonanssissa tärinän kanssa kasvaa VTT:n ohjeen mukaan tärinä kuusinkertaiseksi. Seuraavissa kuvissa on esitetty välipohjan värähtelyn tunnusluku edellisten arvojen pohjalta, tärinän värähtelyluokkien rajat sekä verrattu tuloksia kuvan 3.15. ontelolaattojen pituuksiin.

Ensimmäiseksi tutkittiin pehmeiköllä (kuva 4.1.) olevan rakennuksen välipohjan värähtelyn tunnuslukua. Laskettaessa tasaisen voimistumisen mukaan välipohjaan värähtelyn tunnusluvuksi tulisi 1,08 mm/s. Arvo on värähtelyluokan D yläpuolella, joten resonanssitarkastelua ei tarvitsisi kuvan 2.6. mukaisesti tehdä. Esimerkkilaskelmissa resonanssitarkastelu tehtiin. Kuvassa 4.4. on esitetty välipohjan värähtelyn tunnusluku välipohjan ominaistaajuuden suhteen.



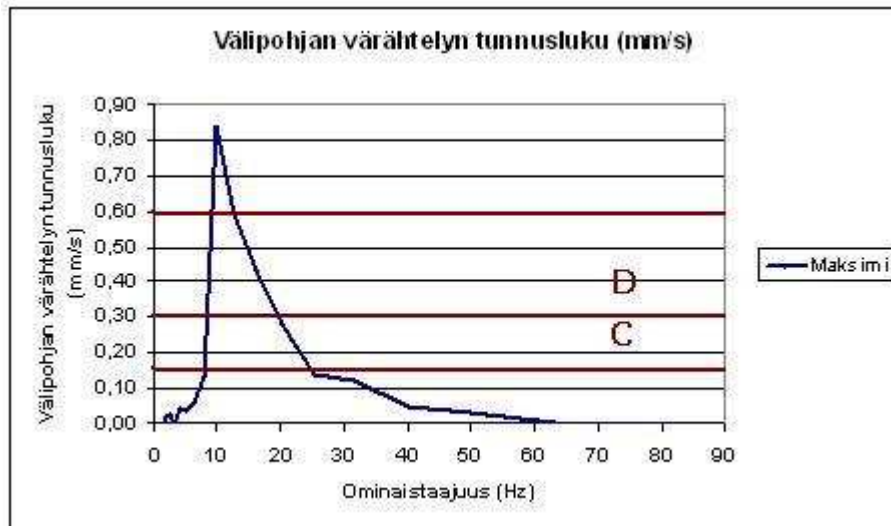
Kuva 4.4. Pehmeikölle rakennetun rakennuksen välipohjan värähtelyn tunnusluku välipohjan ominaistaajuuden suhteen. Kuvassa on esitetty värähtelyluokat C ja D.

Välipohjassa värähtely voimistuu voimakkaasti matalilla taajuuksilla. Välipohjan värähtelyn tunnusluku on hyvin korkea, mutta rajoittuu pienelle alueelle. Jos uusi asuinrakennus rakennetaan tällaiselle maapohjalle, tulisi välttää tämän esi-merkin olosuhteissa välipohjia, joiden alin ominaistaajuus on alle 8 Hz. Alla olevassa kuvassa (kuva 4.5.) on esitetty kuvan 3.14. ontelolaattojen pituudet, jotka soveltuvat pehmeikölle. Oranssin viivan alapuolella olevia taajuuksia tulisi välttää.



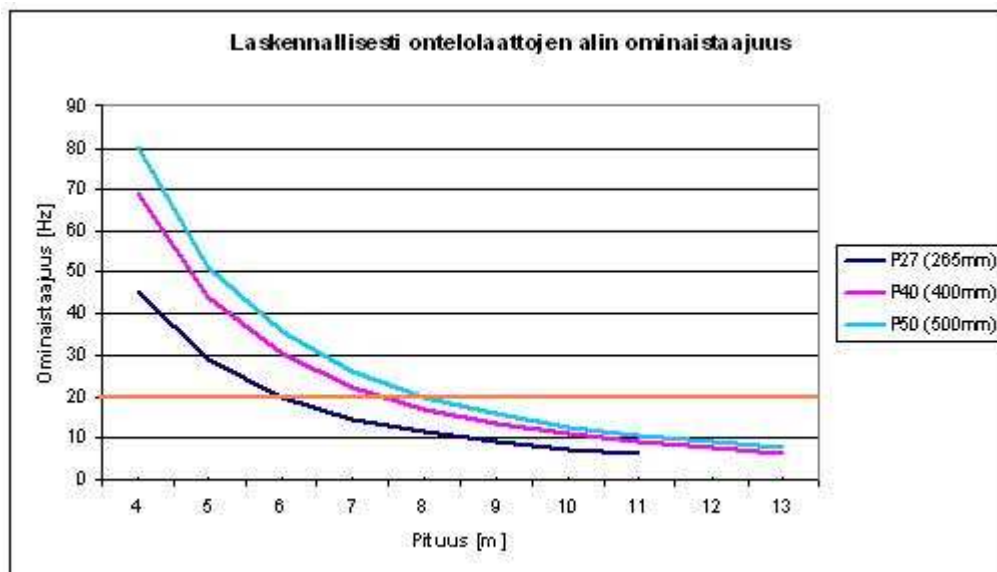
Kuva 4.5. Pehmeikölle sopivien ontelolaattojen pituudet.

Toisessa tilanteessa tutkittiin hiekkaisella maapohjalla olevan rakennuksen välipohjan värähtelyn tunnuslukua kuvan 4.2. värähtelyn perusteella. Laskettaessa tasaisen voimistumisen mukaan välipohjaan värähtelyn tunnusluvuksi tulisi 0,71 mm/s. Arvo on värähtelyluokan D yläpuolella, joten resonanssi tarkastelua ei tarvitsisi kuvan 2.6. mukaisesti tehdä. Esimerkkilaskelmissa resonanssitarkastelu tehtiin. Alla olevassa kuvassa (kuva 4.6.) on esitetty välipohjan värähtelyn tunnusluku välipohjan ominaistaajuuden suhteen.



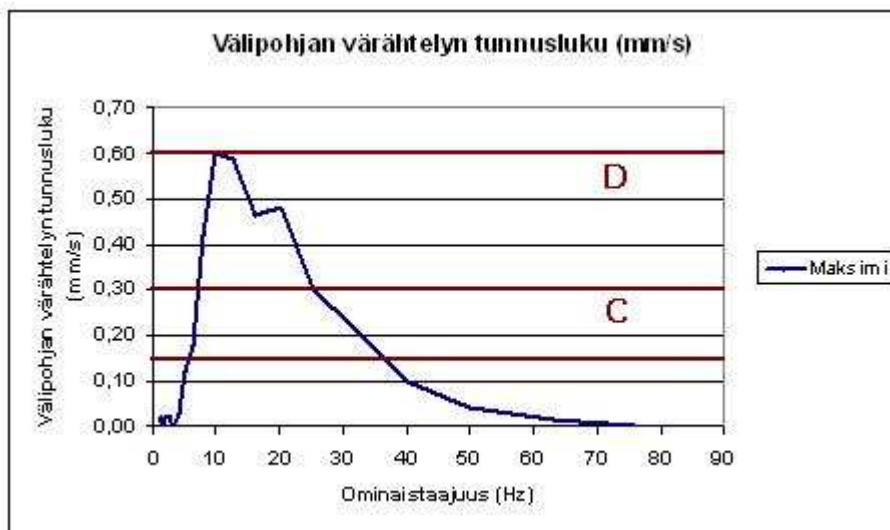
Kuva 4.6. Hiekkaiselle maapohjalle rakennetun rakennuksen välipohjan värähtelyn tunnusluku välipohjan ominaisaajuuden suhteen. Kuvassa on esitetty värähtelyluokat C ja D.

Välipohjan värähtelyn tunnusluku ei ole yhtä korkea hiekkaisessa maastossa kuin savisessa maastossa. Välipohjissa vältettävä taajuusalue on kuitenkin laajempi. Kyseisessä tapauksessa tulisi välttää välipohjia, joiden alin ominaisaajuus on 10 – 20 Hz taajuusalueella. Seuraavassa kuvassa (kuva 4.7.) on esitetty kuvan 3.14. ontelolaattojen pituudet, jotka soveltuvat hiekkaiselle maapohjalle. Oranssin viivan alapuolella olevia taajuusalueita tulisi välttää.



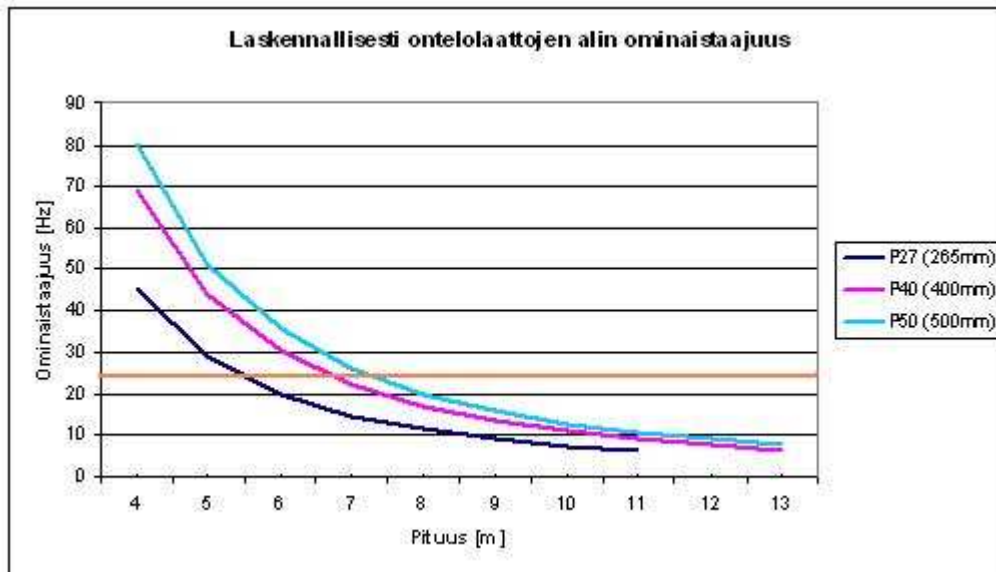
Kuva 4.7. Hiekkaiselle maapohjalle sopivien ontelolaattojen pituudet.

Kolmannessa tilanteessa tutkittiin rakennuksen välipohjan värähtelyn tunnuslu-
 kua, kun rakennus on tiiviillä kitkamaalla. Laskettaessa tasaisen voimistumisen
 mukaan välipohjaan värähtelyn tunnusluvuksi tulisi 0,91 mm/s. Arvo on värähte-
 lyluokan D yläpuolella, joten resonanssi tarkastelua ei tarvitsisi kuvan 2.6. mu-
 kaisesti tehdä. Esimerkkilaskelmissa resonanssitarkastelu tehtiin. Seuraavana
 olevassa kuvassa (kuva 4.8.) on esitetty välipohjan värähtelyn tunnusluku väli-
 pohjan ominaistaajuuden suhteen.



Kuva 4.8. Tiiviille maapohjalle rakennetun rakennuksen välipohjan värähtelyn
 tunnusluku välipohjan ominaistaajuuden suhteen. Kuvassa on esitetty värähte-
 lyluokat C ja D.

Tiiviillä kitkamaalla välipohjille haitallinen taajuusalue on noin 8 – 25 Hz. Taa-
 juusalue on laajempi verrattuna pehmeikköihin tai hiekkamaihin. Seuraavassa
 kuvassa (kuva 4.9.) on esitetty kuvan 3.14. ontelolaattojen pituudet, jotka sovel-
 tuvat tiiviille maapohjalle. Oranssin viivan alapuolella olevia taajuusalueita tulisi
 välttää.



Kuva 4.9. Tiiviille kitkamaalle sopivien ontelolaattojen pituudet.

Suositusarvojen ylittävä värähtely rakennuksen välipohjissa sijoittuu yleensä matalille taajuusalueille, sillä korkeammat taajuudet vaimenevat perustuksissa. Vaikka välipohjien värähtelyn vahvistuminen tapahtuu tiiveillä maapohjilla laajalla taajuusalueella, värähtelyongelmaa vähentää se, että tärinätaso maassa on yleensä selvästi pienempi kuin pehmeiköillä. Tiivis kitkamaa on välipohjille haastava maapohja silloin, kun ollaan radan välittömässä läheisyydessä. Huomioon otettavan tärinäalueen etäisyys radasta on yleensä alle 50 m.

5 Päätelmät

Lasketut välipohjien ominaistaajuudet olivat lähes alhaisempia kuin vastaavat mitatut arvot. Tämä on yleensä hyvä asia, sillä tämä varmistaa ominaistaajuu- den olevan valmiissa rakenteessa vielä korkeammalla taajuusalueella kuin suunnitellussa välipohjassa. Todennäköisesti välipohjien kiinnitykset runkoon vaikuttavat eniten rakenteen ominaistaajuuteen.

Rakennuksien välipohjille haitallisin taajuusalue sijoittuu noin 10 Hz taajuusalueelle. Tärinän siirtyessä matalilla taajuusalueilla rakennuksen välipohjaan tärinä voimistuu huomattavasti alkuperäisestä resonanssin vaikutuksesta. Ohjeissa tärinän arvoa suurennetaan jopa kuusinkertaisesti alkuperäisestä. Tiiviissä kitkamaassa tärinä kulkeutuu korkeilla taajuuksilla, mutta välipohjissa tärinä on

haitallista myös matalilla taajuusalueilla. Kitkamailla haitallisen värähtelyn taajuusalue on huomattavasti laajempi kuin pehmeiköillä, mutta värähtelyn vaikutusalue on selvästi suppeampi.

Tulevaisuudessa mittauksia tulisi tehdä enemmän. Niiden avulla voidaan tarkentaa laskentakaavoja ja täten tarkentaa suunnitelmien tarkkuutta. Ontelolaattojen kanssa laskenta on suhteellisen yksinkertaista verrattuna paikallavalettujen välipohjien laskentaan.

Tulevaisuudessa joudutaan rakentamaan vielä enemmän tärinäherkille alueille. Myös ihmisten tietoisuus ja valituserkkyys on kasvamassa, joten tärinän kaltaiseen ympäristöhaittaan tulisi kiinnittää nykyistä enemmän huomiota.

Kuvat

Kuva 2.1. Mitattu värähtelynopeus. (Talja, 2008, s.14) s.8

Kuva 2.2. Värähtelyn tehollisarvo. (Talja, 2008, s.14) s. 8

Kuva 2.3. Tehollisarvot terssikaistoittain. (Talja, 2004, liite A s.A3) s.8

Kuva 2.4. Taajuuden painotuskerroin. (talja, 2008, s.14) s.9

Kuva 2.5. Suurin tehollisarvo. (Talja, 2008, s.14) s.9

Kuva 2.6. Painotettu tehollisarvo terssikaistoittain sekä värähtelyn tunnusluku $v_{w,95}$. (Talja, 2008, s.14) s. 10

Kuva 2.7. Rakennukseen siirtyvän liikennetärinän arvioinnin vaiheet (Talja, 2011, s.15) s. 11

Kuva 2.8. Pienennyskerroin perustukseen siirtyvän värähtelyn arvioimiseksi. (Talja, 2011, s.20) s.12

Kuva 3.1. InstanTEL MiniMate plus (Minimate Plus 2012). s.13

Kuva 3.2. Esimerkkikuva mittaustuloksista. Alin pystysuuntainen (vert) ominaistajuus 14,5 Hz. s.14

Kuva 3.3 Anturin sijainti ontelolaatastolla. s.12

Kuva 3.4. Saimaan ammattikorkeakoulun välipohjan mittaustulos (10,5 Hz). s.16

Kuva 3.5. Mittaus Saimaan ammattikorkeakoulun tiloissa. s.18

Kuva 3.6. 11685 mm pitkän ontelolaatan yksittäinen mittaustulos (12,5 Hz). s.18

Kuva 3.7. 9785 mm pitkän ontelolaatan yksittäinen mittaustulos (14,5 Hz). s.19

Kuva 3.8. 3. kerroksen yksittäinen mittaustulos (31,0 Hz). s.20

Kuva 3.9. Mittaus LOASin Seppo –rakennuksessa. s.22

Kuva 3.10. 2. kerroksen yksittäinen mittaustulos (47,5 Hz). s.23

Kuva 3.11. Mittaus Kauppakeskus Caprin työmaalla. s.24

Kuva 3.12. 6. mittaussarjan yksittäinen mittaustulos (17,5 Hz). s.25

Kuva 3.13. Yhteenveto kaikista mittaussarjoista. s.26

Kuva 3.14. Ontelolaattojen alin ominaistajuus laskennallisesti. s.28

Kuva 4.1. Maasta mitatun tärinän terssikaistoittain jaetut tilastollisesti määritetyt taajuuspainotetut tehollisarvot pehmeiköllä. Kokonaisvärähtelyn tunnusluku $v_{w,95} = 0,41$ mm/s. s.29

Kuva 4.2. Maasta mitatun tärinän terssikaistoittain jaetut tilastollisesti määritetyt taajuuspainotetut tehollisarvot pehmeiköllä. Kokonaisvärähtelyn tunnusluku $v_{w,95} = 0,23$ mm/s. s.29

Kuva 4.3. Maasta mitatun tärinän terssikaistoittain jaetut tilastollisesti määritetyt taajuuspainotetut tehollisarvot pehmeiköllä. Kokonaisvärähtelyn tunnusluku $v_{w,95} = 0,27$ mm/s. s.30

Kuva 4.4. Pehmeikölle rakennetun rakennuksen välipohjan värähtelyn tunnusluku välipohjan ominaistaajuuden suhteen. Kuvassa on esitetty värähtelyluokat C ja D. s.31

Kuva 4.5. Pehmeikölle sopivien ontelolaattojen pituudet. s.32

Kuva 4.6. Hiekkaiselle maapohjalle rakennetun rakennuksen välipohjan värähtelyn tunnusluku välipohjan ominaistaajuuden suhteen. Kuvassa on esitetty värähtelyluokat C ja D. s.33

Kuva 4.7. Hiekkaiselle maapohjalle sopivien ontelolaattojen pituudet. s.33

Kuva 4.8. Tiiviille maapohjalle rakennetun rakennuksen välipohjan värähtelyn tunnusluku välipohjan ominaistaajuuden suhteen. Kuvassa on esitetty värähtelyluokat C ja D. s.34

Kuva 4.9. Tiiviille kitkamaalle sopivien ontelolaattojen pituudet. s.35

Taulukot

Taulukko 2.1. Suositus rakennusten värähtelyolosuhteista. s. 10

Taulukko 3.1. Alimman ominaistaajuuden muutos hyötykuorman lisääntyessä.
s.27

Lähteet

Leppänen, J. 2006. Selvitys liikenteen aiheuttamasta tärinästä ja tärinähaitan korvaamisesta. Helsinki: Sisäisiä julkaisuja 31/2006.

Minimate Plus 2012. <http://www.instantel.com/products/MinimatePlus.aspx> luetu 23.10.2012

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

Talja, A. Vepsä, A. Kurkela, J. & Halonen, M. 2008. Rakennukseen siirtyvän liikennetärinän arviointi. Espoo: VTT tiedotteita 2425.

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

Liite 1. Yhteenvetotaulukko mittaustuloksista

	Kohde	Välipohja	Pituus (m)	Paksuus (mm)	Massa (kg/m ²)	Mitattu KA (Hz)	Laskettu (Hz)	HUOM!
1	AMK	Ontelolaatta	12,1	400	460	12,5	7,1	valmis rakenne
2	AMK	Ontelolaatta	9,8	400	460	14,5	10,9	valmis rakenne
3	Katariina	Paikallavalu	5,4	250	655	32	20,5	Molemmat sivut tuettu (pidempi sivu 7,2m)
4	Katariina	Paikallavalu	5,95	250	655	30,8	14,4	Molemmat sivut tuettu (pidempi sivu 10,3m)
5	Katariina	Paikallavalu	5,4	250	655	39,3	20,3	Molemmat sivut tuettu (pidempi sivu 6,4m)
6	Katariina	Paikallavalu	5,4	250	655	25	20,5	Molemmat sivut tuettu (pidempi sivu 7,2m)
7	Katariina	Paikallavalu	5,95	250	655	31,8	17,3	Molemmat sivut tuettu (pidempi sivu 7,7m)
8	Katariina	Ontelolaatta	8	370	420	14,9	12,8	
9	SEPPO	Ontelolaatta	4,7	370	484	37,9	42,9	Pintavalu
10	SEPPO	Ontelolaatta	4,7	370	484	48,4	35,6	Saumavalu
11	SEPPO	Ontelolaatta	4,7	370	484	51,9	35,6	Saumavalu
12	SEPPO	Ontelolaatta	4,7	370	484	46,1	35,6	Saumavalu
13	SEPPO	Ontelolaatta	4,7	370	484	46,2	35,6	Saumavalu
14	SEPPO	Ontelolaatta	4,7	370	484	46	35,6	Saumavalu
15	SEPPO	Ontelolaatta	4,7	370	484	42,1	35,6	Saumavalu
16	SEPPO	Ontelolaatta	4,7	370	484	55,4	35,6	Saumavalu
17	Capri	Ontelolaatta	7,26	400	490	17,4	16,7	
18	Capri	Ontelolaatta	7,1	400	490	18,5	17,4	
19	Capri	Ontelolaatta	7,42	400	490	16	16	
20	Capri	Ontelolaatta	4,06	400	490	33,3	17,6	Mitattu kantavan seinän läheisyydestä
21	Capri	Ontelolaatta	7,42	400	490	16	16	
22	Capri	Ontelolaatta	7,42	400	490	17,5	16	

