



RAKENNUSTIETO >

Rakennusalan täyden palvelun tietotalo

Rakennustieto Oy edistää hyvää rakennustapaa ja tuottaa rakentamisesta luotettavaa tietoa. Puolueettoman ja asiakaslähtöisen Rakennustieto Oy:n tuotteet kattavat rakentamisen koko elinkaaren suunnittelusta ylläpitoon. Yhtiön omistaa Rakennustietosäätiö RTS.

Tutustu palveluihimme

> rakennustieto.fi/rk/palvelut

Rakentajain kalenterin artikkelit

Tämä artikkeli on julkaistu alun perin Rakentajain kalenterissa, jota ovat julkaisseet Rakennustietosäätiö RTS sr ja Rakennusmestarit ja -insinöörit AMK RKL ry.

Julkaisu oli rakennusalan ammattilaisten ja opiskelijoiden käsikirja, joka yhdisteli teoriaa ja käytäntöä sekä kannusti hyvään rakentamiseen. Artikkelin vasemmassa reunassa olevasta vesileimasta näkee ko. Rakentajain kalenterin vuosikerran.

> [Artikkeliarkisto, kokoelma vuosien 1997–2018 Rakentajain kalenterissa julkaistuista artikkeleista](#)

Rakennukseen siirtyvän liikennetärinän arviointi

Asko Talja, diplomi-insinööri
Erikoistutkija, VTT Materiaalit ja rakentaminen
asko.talja@vtt.fi

1 Tiivistelmä

Artikkelissa esitetään menetelmä, jonka avulla tärinäasiantuntija voi arvioida liikennetärinästä aiheutuvaa rakennuksen tärinää ja siitä asukkaalle aiheutuvaa haittaa. Tällä hetkellä rakennuksen värähtelysuunnittelu on usein puutteellista, sillä maaperän värähtelyn taajuussisältöä ja värähtelyn suuntaa ei oteta riittävästi huomioon. Esitetty menetelmä perustuu maaperän värähtelyn suuruuteen, suuntaan ja taajuussisältöön sekä tärinän raja-arvoehdotukseen. Menetelmässä ehdotetaan kahta eri lähestymistapaa, joista toinen tarkastelee värähtelyn tasaista voimistumista rakennuksessa ja toinen värähtelyn voimistumista rakennuksen rungon tai lattian resonanssi-ilmion vuoksi. Lisäksi artikkelissa esitetään ehdotetun menetelmän perustelut, jotka käsittelevät ehdotettujen raja-arvojen suhdetta asukasmielipiteisiin, resonanssi-ilmion merkityksen arviointia FEM-laskennalla ja menetelmän tarkkuutta mittaustuloksiin nähden.

2 Johdanto

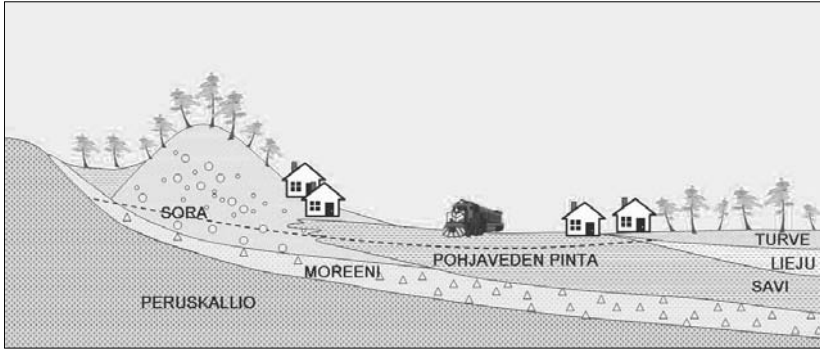
Liikennetärinän aiheuttaa kisko- tai maantieliikenteestä syntyvä maaperän värähtely, joka siirtyy maan kautta rakennuksiin ja jonka taajuus on 2–80 Hz. Asukas tuntee tärinän kehossaan, ja lisäksi asunnossa olevat esineet voivat heilistä tai heilua. Liikennetärinän lisäksi maan kautta siirtyvä värähtely voi aiheuttaa runkomelua, jonka asukas kuulee ukkosen tai lentokoneen aiheuttaman kumun kaltaisen äänenä ja jonka taajuus on 16–250 Hz. Tämä artikkeli keskittyy pelkästään rakennuksen tärinän arviointiin. Lähtökohdانا ovat VTT:n julkaisut (Talja ym. 2008) ja Talja (2004). Runkomelua käsitellään lähteessä Talja & Saarinen (2009).

VTT:n julkaisussa (Talja 2006) tärinän leviämislle on esitetty arvio turvaetäisyydestä, jota kauempana tarkempaa rakennuksen tärinäselvitystä ei katsota tarpeelliseksi. Pehmeillä maa-alueilla turvaetäisyys on tavarajunaliikenteellä jopa 500 m ja pikajunaliikenteelläkin 200 m. Metro- ja sähkömoottorijunilla, raitiovaunuilla,

raskaalla maantieliikenteellä ja taajamien hidastetöyryssillä varustetuilla kaduilla turvaetäisyys on 100 m. Kovilla maa-alueilla turvaetäisyys on huomattavasti pienempi ja voi olla alle 1/5 esitetyistä arvoista. Jos rakennus sijaitsee turvaetäisyyttä lähempänä, suunnittelun lähtökohdانا tulisi aina käyttää pääasiassa rakennuspaikalta mitattua maaperän värähtelyä, sillä luotettavia laskennallisia arviointimenetelmiä ei ole olemassa. Jos väylää ei ole olemassa, arviointi on epätarkempaa, koska arvioinnissa voidaan käyttää apuna vain vastaavista liikenne- ja pohjasuhteolosuhteista hankittua kokemusta. Värähtelyn suuruuteen ja sen leviämiseen vaikuttavia tekijöitä on kuvattu tarkemmin lähteen (Törnqvist & Talja 2006) liitteissä C ja D sekä lähteen (Talja ym. 2008) liitteessä B.

Tärinän asumishaittoja voidaan vähentää parhaiten oikealla maankäytön suunnittelulla, väylä- ja liikennesuunnittelulla sekä asiantuntevalle rakennuksen värähtelysuunnittelulla. Tehokain tapa haittojen minimoimiseksi on pitää väylät ja asunnot riittävän etäällä toisistaan. Jos näin ei voida menetellä, voidaan asiantuntevalla rakennusten värähtelysuunnittelulla ja liikenne-rajotuksilla pienentää haittoja. Tärinäongelmaan tulee suhtautua vakavasti, sillä tosiasia on, että Suomessa on paljon sellaisia alueita, joiden käyttö asuntorakentamiseen ei nykytietämyksen perusteella ole perusteltua. Tärinäalueille rakennusten korjaaminen jälkikäteen on kallista ja korjaavien toimenpiteiden vaikutuksista on hyvin vähän kokemusta. Tarkemmin eri menetelmien käytön mahdollisuuksia ja mahdollisia parannusvaikutuksia on tarkasteltu lähteessä Talja ym. (2008).

Suomessa liikennetärinän suhteen erityisen ongelmalliseksi on koettu harjujen tai kallioiden välissä olevat pehmeät savikkopainanteet (kuva 1), joissa saven paksuus on tavallisimmin 5–20 metriä. Tällaisilla pehmeikköalueilla tärinä leviää tehokkaasti, mutta sen suuruuden arviointi on vaikeaa. Näillä alueilla värähtely on usein vaakasunnassa suurempaa kuin pystysunnassa, värähtelyssä dominoivat 4–10 Hz:n taajuudet ja värähtely on taajuudeltaan hyvin kapeakaistaista. Koska pientalon rungon omi-



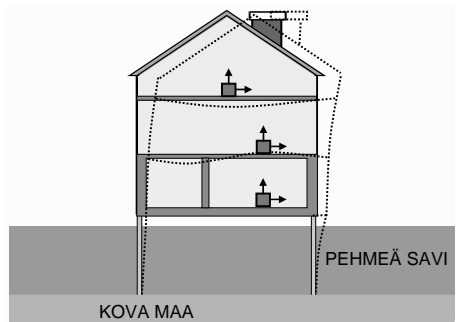
Kuva 1. Suomessa liikennetärinän suhteen erityisen ongelmallisia ovat savikkolaaksopainanteet.

naistaajuus on tavallisesti samalla taajuusalueella 4–10 Hz, värähtely voi resonanssi-ilmiön vuoksi kasvaa moninkertaiseksi. Pehmeikköalueilla lattioiden värähtelyn voimakas kasvamisen on kuitenkin harvinaista, sillä asuinrakennusten lyhytjäteisillä lattioilla ominaistaajuus on yleensä yli 10 Hz. Kovemmillä pohjasuhdealueilla, joilla maan dominoiva värähtelytaajuus on yli 10 Hz, lattioiden värähtelyn voimistumisen todennäköisyys kasvaa. Voimakkaan resonanssin ilmeneminen rungossa tai lattioissa on suhteellisen harvinaista, mutta ilmeissään se voi olla erittäin ongelmallinen.

Resonanssin satunnaisuuden ja sen arvioinnin vaikeuden vuoksi kirjallisuudessa esitetyissä värähtelyn suurennuskertoimissa on suurta vaihtelua. Lähteessä Nordtest (1991) esitetään suurennuskertoimeksi sekä kaksikerroksisten puutalojen rungolle että lattialle arvoa 4,0, betonikerrostalojen rungolle arvoa 0,5 ja betonikerrostalojen lattioille arvoa 1,1. Lähteessä Mads-hus ym. (1996) suurennuskerroin ilmoitetaan keskiarvon ja hajonnan avulla. Puutalojen lattioille esitetään arvot 1,3 (keskiarvo) ja 1,0 (hajonta) ja rungolle arvot 1,9 ja 1,2. Koska suunnitteluarvon tulisi yleensä olla keskiarvo lisätynä kaksinkertaisella hajonnalla, suunnittelussa tulisi edellä esitettyjen arvojen perusteella varautua suurennuskertoimeen, joka on lattioilla 3–4 ja rungolla 4–5. Lähteessä Hunaidi & Tremblay (1997) esitettyjen mittaustulosten perusteella lattioiden värähtelyn suurennuskertoimen suunnitteluarvon tulisi olla noin 3,0. Lähteen Nelson & Saurenman (1987) mukaan tyypillinen lattian värähtelyn suurennuskerroin on 1,8–5,6. Kaikissa edellä esitetyissä lähteissä on sekä rakennuksen rungon vaakavärähtelylle että lattian pystyvärähtelylle arviointiperusteena maan pystyvärähtely.

3 Värähtelyrajat

Suomessa Maankäyttö- ja rakennusasetus (895/1999) edellyttää kaavaa laadittaessa selvittäväksi 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. Tärinän suuruudelle ei kuitenkaan ole esitetty ohjearvoja. Ohjearvojen puuttuessa suosituksena on käyttää VTT:n ehdottamaa värähtelyluokitusta (Talja 2004), joka perustuu norjalaiseen standardiin NS 8176 (1999). Rakennuksen värähtelyluokka määräytyy asuintiloissa esiintyvän suurimman värähtelyn perusteella. Suurin värähtely voi olla rungon vaakavärähtelyä rakennuksen pituus- tai poikittaissuunnassa tai lattian pystysuuntaista värähtelyä (kuva 2).



Kuva 2. Rungossa ja lattiasa esiintyvä värähtely voi resonanssi-ilmiön vuoksi olla huomattavasti suurempi kuin maaperästä mitattu arvo.

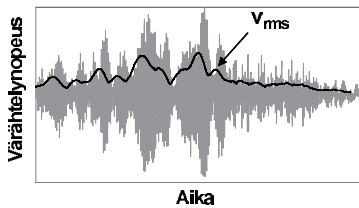
Värähtelysuunnitteluun liittyviä peruskäsitteitä on kuvattu taulukossa 1. Värähtelyn suuruutta kuvataan standardin ISO 2631-2 (2003) mukaan määritetyllä taajuuspainotetun värähtelyn suurimmalla hetkittäisellä tehollisarvolla v_w . Jos rakennuksen värähtelyluokitus perustuu mittaukseen, eri tapahtumista mitatuista suurimmista tehollisarvoista määritetään värähtelyn tunnusluku $v_{w,95}$, joka kuvaa yhden viikon aikana esiintyvää värähtelyn tilastollista maksimiarvoa. Käytännössä arvo määritetään viiden-toista suurimmat värähtelyt sisältävän tapahtuman avulla lausekkeesta

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

jossa \bar{v}_w on mitattujen tehollisarvojen v_w keskiarvo ja σ on keskihajonta.

Suositus värähtelyrajaksi on $v_{w,95} = 0,6$ mm/s vanhoille asuinalueille ja $v_{w,95} = 0,3$ mm/s uudisrakentamisaalueille. Arvot ovat sopusoinnussa muiden ehdotusten kanssa: vanhoille alueille on ehdotettu arvoja 0,6 mm/s (DIN 4150-2, 1999) ja 1,0 mm/s (Banverket 1997) sekä uusille alueille arvoja 0,3 mm/s (DIN 4150-2), 0,4 mm/s (Banverket 1997) ja 0,36 mm/s (FTA 2006).

Taulukko 1. Värähtelysuunnitteluun liittyvät peruskäsitteet.

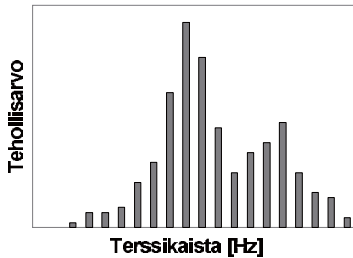


Värähtelyn tehollisarvo v_{rms} [mm/s]

Värähtelysignaalin $v(t)$ tehollisarvo ajanhetkellä t_0 on

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

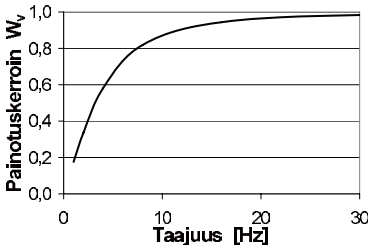
jossa aikaikkunan pituus τ on 1 sekunti.



Värähtelyn taajuussisältö

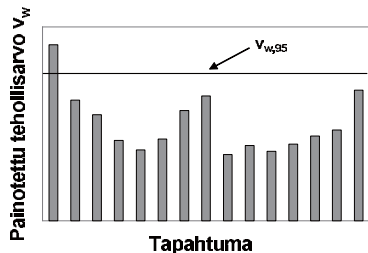
Värähtelyn taajuussisältö (värähtelyspektri) kuvaa värähtelyn taajuussisällön ja esittää signaalin värähtelykomponentit (v_i) 1/3 oktaavikaistoittain (terssikaistoittain). Kun spektri esittää aikaikkunaa $\tau = 1$ s, värähtelyn tehollisarvo voidaan laskea taajuustasossa lausekkeella.

$$v_{rms}(t_0) = \sqrt{\sum v_i^2}$$



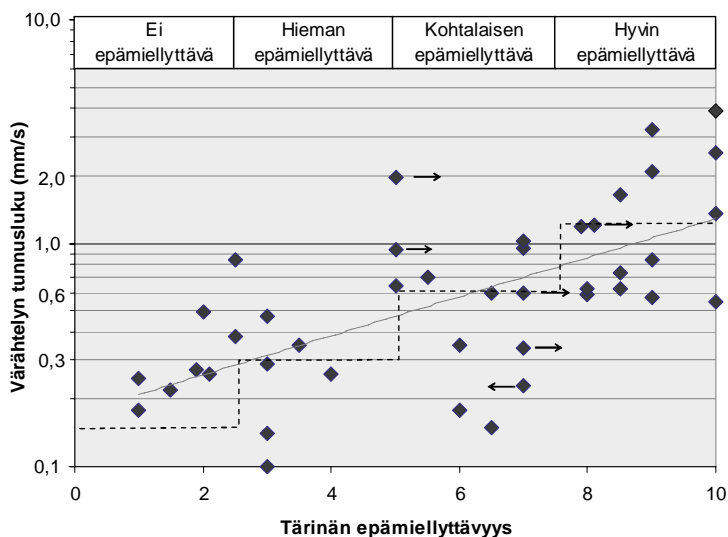
Värähtelyn taajuuspainotus

Mitatus signaalin eri värähtelykomponentit tehdään ihmisen herkkyyden suhteen samanarvoisiksi painottamalla värähtelykomponentteja taajuudesta riippuvalla painotuskertoimella. Kuvassa on esitetty taajuuspainotus värähtelynopeudelle.



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

Painotetun värähtelyn v_w tilastollinen maksimi. Arvo perustuu viiteentoista painotetun värähtelyn tehollisarvoon, jotka on määritetty niistä yhden viikon aikana mitatuista tapahtumista, joissa värähtelyt ovat suurimmat.



Kuva 3. Asukasmielipiteet tärinän epämiellyttävytydestä verrattuna mitattuun värähtelyn tunnusluvuun $v_{w,95}$. Nuolet esittävät tapauksia, joissa asukas sanoo tottuneensa tärinään (\rightarrow) tai herkistyneensä tärinälle (\leftarrow).

Värähtelynopeuden avulla esitetyt värähtelyrajat $w_{w,95} = 0,3$ mm/s ja $0,6$ mm/s voidaan esittää myös standardin ISO 2631-2 mukaisesti määritetyn painotetun kiihtyvyyden tehollisarvon $\alpha_{w,95}$ (mm/s²) avulla lausekkeesta

$$\alpha_{w,95} = 35,7 \times v_{w,95}. \quad (2)$$

Taajuuspainotetun värähtelyn tehollisarvon käytössä on huomattava, että taajuuspainotus on erilainen nopeus- ja kiihtyvyyssignaaleille (Talja 2004).

Värähtelyrajat perustuvat standardin NS 8176 (1999) pohjana olevaan tutkimukseen (Klæboe ym. 2003), jossa yli 1400 asukasmielipidettä on verrattu värähtelyn tunnusluvuun. Kun värähtelyraja $v_{w,95}$ on $0,3$ mm/s, noin 7–8 % asukkaista pitää tärinää erittäin häiritsevänä ja noin 15 %:n voidaan katsoa valittavan häiriöstä. Kun $v_{w,95}$ kasvaa arvoon $0,6$ mm/s, tärinästä valittavien osuus kasvaa noin kaksinkertaiseksi.

Kuvassa 3 esitetään VTT:llä tehty vertailu, joka käsittää yhteensä 40 mittauskohdetta. Kaikissa mittauskohteissa asukkaat ovat havainneet tärinän. Kuvan vertailu tukee esitettyä suositusta, sillä kaikissa niissä kohteissa, joissa tärinä on koettu hyvin epämiellyttäväksi, värähtelyn tunnusluku on yli $0,6$ 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 myös 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 arvioituna.

4 Värähtelysuunnittelu

Rakennukseen siirtyvän liikennetärinän arviointi perustuu kolmikomponenttisesti mitattuun maaperän värähtelyyn. Rakennuksen värähtely arvioidaan kahdella eri lähestymistavalla, joista toisessa otetaan huomioon rungon ja lattian alimmalla ominaistaajuudella esiintyvän maaperän värähtelyn voimistuminen resonanssin vuoksi ja toisessa otetaan huomioon värähtelyn koko taajuusalueen kattava tasainen voimistuminen. Rungon resonanssitarkastelu perustuu maan vaakavärähtelyyn ja lattian resonanssitarkastelu maan pystyvärähtelyyn. Resonanssitarkastelussa käsitellään vain sitä taajuusaluetta, jolle rungon tai lattian alimman ominaistaajuuden arvioidaan sattuvan.

Värähtelyä tarkastellaan koordinaatiossa, jossa x ja y ovat rakennuksen pituus- ja poikittaissuunnat ja z on pystysuunta. Kustakin kolmesta maan pinnan värähtelykomponentista oletetaan tunnetuksi värähtelyn tunnusluku $v_{w,95}$ ja suhteellinen taajuussisältö, joka vastaa niitä 15 ajanhetkeä (aikaikkuna $\tau = 1$ s), jotka ovat värähtelyn tunnusluvun $v_{w,95}$ perusteena.

Suhteellinen taajuussisältö on keskiarvo värähtelyspektristä, joissa spektrin eri terssikaistojen arvot on jaettu koko spektrin tehollisarvolla.

Aluksi arvioidaan perustuksen vaaka- ja pystysuuntaisen värähtelyn suhteellinen taajuussisältö x-, y- ja z-suunnissa kertomalla maan värähtelyspektri taajuuskaistoittain kertoimella

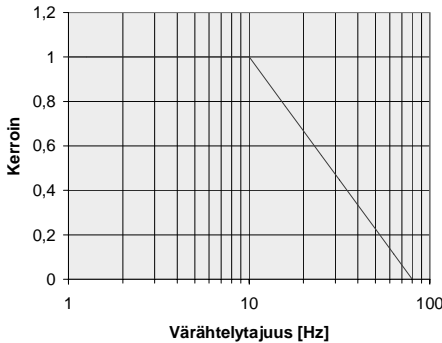
$$k_i^{per} = -\frac{A}{\lg 8} \times \lg \left(\frac{f_i}{80} \right), \text{ mutta } 0 \leq k_i^{per} \leq A, \quad (3)$$

jossa f_i on spektrin terssikaistan keskitaajuus. Toistaiseksi saadun kokemuksen perusteella suositellaan käytettäväksi kerrointa $A = 1,0$ kaikille rakennustyypeille ja perustamistavoille, vaikka joillekin tapauksille on kirjallisuudessa esitetty pienempiäkin arvoja. Lauseke esitetään graafisesti kuvassa 4. Käytännössä suuret taajuudet voivat siirtyä esitettyä voimakkaampina rakennukseen, mutta silloin ne ilmenevät yleensä runkoääninä, jonka arviointiin on olemassa omat menetelmänsä (Talja & Saarinen 2009).

Värähtelyn tasaiseen voimistumiseen perustuva perustuksen värähtely x-, y- ja z-suunnissa lasketaan lausekkeella

$$v_{w,95}^{per} = k_0 \times v_{w,95}^{maa}, \text{ jossa } k_0 = \sqrt{\sum_i \left(k_i^{per} \times v_{w,i}^{-maa} \right)^2}, \quad (4)$$

jossa $v_{w,95}^{maa}$ on maan värähtelyn tunnusluku ja $v_{w,i}^{-maa}$ on maan värähtelyspektrin terssikaistaa i vastaava suhteellinen arvo.



Kuva 4. Lausekkeen (3) graafinen esitys.

Värähtelyn tasaiseen voimistumiseen perustuva rakennuksen värähtely määritetään perustuksen värähtelyn avulla lausekkeesta

$$v_{w1} = k_l \times \max \left(v_{w,95}^{per,x}, v_{w,95}^{per,y}, v_{w,95}^{per,z} \right), \quad (5)$$

jossa $v_{w,95}^{per}$ on tasaisen voimistumisen perusteella laskettu perustuksen värähtely x-, y- ja z-suunnissa. Suurenuskerroin $k_l = 1,5$ kaikille kaksi- tai useampikerroksisille rakennuksille ja yksikerroksisille paaluille perustetuille rakennuksille. Yksikerroksisille rakennuksille, kun perustus ei ole paaluilla ja lattia on maanvarainen, $k_l = 1,0$.

Resonanssitarjeluun perustuva lattian värähtely z-suunnassa ja resonanssitarjeluun perustuva rungon värähtely x- ja y-suunnissa lasketaan perustuksen värähtelyn avulla lausekkeesta

$$v_{w2} = k_2 \times v_{w,j}^{per}, \text{ jossa } v_{w,j}^{per} = k_j^{per} \times v_{w,j}^{maa}. \quad (6)$$

Lattian värähtelylle $k_2 = 6,0$ ja $v_{w,j}^{maa}$ on maan z-suuntaisen värähtelyn spektrin arvo terssikaistalla j. Terssikaista j on taajuusalue, jolle lattian alimman ominaistajuuden arvioidaan sattuvan.

Rungon värähtelylle $k_2 = 4,0$ ja $v_{w,j}^{maa}$ on suurempi x- ja y-suuntaista maan värähtelykomponenteista terssikaistalla j. Terssikaista j on taajuusalue, jolle rungon alimman ominaistajuuden arvioidaan sattuvan. Rungon resonanssitarjelu on tehtävä kaksikerroksisille tai sitä korkeammille taloille.

Suunnittelussa käytettävä värähtelyn tunnusluku $v_{w,95}$ on suurin lausekkeiden 5 ja 6 avulla lasketuista arvoista v_{w1} ja v_{w2} .

Kaikilta reunoiltaan tuetun suorakaiteen muotoisen lattia-alueen alin ominaistajuus voidaan arvioida lausekkeella (Talja ym. 2002)

$$f_0 = \frac{\pi}{2 \times l^2} \sqrt{\frac{(EI)_1}{m}} \times \sqrt{1 + \left[2 \left(\frac{l}{b} \right)^2 + \left(\frac{l}{b} \right)^4 \right] \frac{(EI)_b}{(EI)_1}}, \quad (7)$$

jossa l [m] on lattiapalkkien pituus, b [m] on lattian leveys, $(EI)_1$ [Nm²/m] on lattian suurempi jäykkyyksi EI_1 leveysyksikköä kohden, $(EI)_b$ on lattian pienempi jäykkyyksi $E_b \times I_b$ leveysyksikköä kohden ja m [kg/m²] on lattian massa pinta-alayksikköä kohden lisätynä hyötykuormalle 30 kg/m².

Usein lattiapalkkien suuntaisten reunojen tuennalla ei ole merkitystä ominaistajuuteen ja reunat voidaan käsitellä vapaina. Silloin ominaistajuus voidaan laskea lausekkeesta

$$f_0 = \frac{\pi}{2 \times l^2} \sqrt{\frac{(EI)_1}{m}}. \quad (8)$$

Taulukko 2. Arvio siitä taajuusalueesta, jolle rakennuksen rungon ominaistajuuden arvioidaan sattuvan.

Kerrosten lukumäärä	Terssikaistan 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								

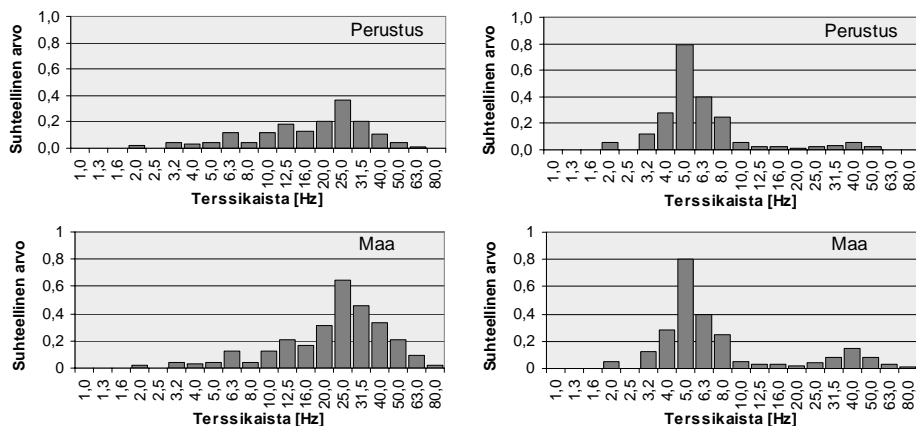
Lauseke aliarvioi reunoiltaan tuetun lattian ominaistajuutta enintään 5 %, kun $b/l > 1,0$ ja $(EI)_i / (EI)_b > 30$, mutta jos $b/l = 0,5$, samaan tarkkuuteen päästään vasta, kun $(EI)_i / (EI)_b > 200$.

Ominaistajuuteen liittyvän laskentaepätarkkuuden vuoksi suunnittelussa tulee olettaa, että ominaistajuus voi sattuua myös arvioidun terssikaistan viereisille terssikaistoille.

Rungon resonanssitarkastelu tulee tehdä yli kaksikerroksisille taloille. Ellei tarkemmin ole tiedossa, rungon alimman ominaistajuuden arvioidaan sattuvan taulukossa 2 esitetyille terssikaistoille. Taulukko perustuu standardissa ISO 4866 (1994) esitettyyn aineistoon (Talja ym. 2008).

5 Suunnitteluesimerkki

Seuraavat esimerkit havainnollistavat, miten maaperän värähtelyn dominoiva taajuus ja värähtelyspektrin muoto vaikuttavat kaksikerroksisen pientalon rungon ja lattian värähtelyyn, vaikka maan värähtelyn suuruus on molemmissa tapauksissa sama. Kuvan 5 vasemmassa tapauksessa maaperän värähtelyn spektri on leveä ja värähtelyssä dominoivat korkeat taajuudet. Kuvan oikeassa tapauksessa spektri on kapeahko ja värähtelyssä dominoivat matalat taajuudet. Vasen spektri on tyypillinen kovilla hiekkapitoisilla alueilla ja oikea pehmeillä savimailla. Kuvan 5 yläkuivissa on lausekkeen 3 pienennyskertoimen avulla korjattu perustuksen värähtelyä kuvaava värähtelyspektri.



Kuva 5. Suunnitteluesimerkin korkeataajuisuinen ja leveä värähtelyspektri (vasen alakuva) ja matalataajuisuinen ja kapea värähtelyspektri (oikea alakuva). Yläkuivissa lausekkeen avulla arvioidut perustuksen värähtelyspektrit.

Taulukko 3. Laskentaesimerkin tulokset. Rungon ja lattian laskettu värähtely tasaisen voimistumisen (lauseke (5)) ja resonanssitarcastelun (lauseke (6)) perusteella.

	Rungon värähtelysuunnittelu		Lattian värähtelysuunnittelu	
	Vaakavärähtely perustuksessa	Vaakavärähtely rungossa	Vaakavärähtely perustuksessa	Pystyvärähtely lattiassa
Tapaus 1: Korkeataajuuksinen ja leveä värähtelyspektri				
Tasainen voimistuminen, (v_{w1} , mm/s)	$0,56 \times 0,3 = 0,17$	$1,5 \times 0,17 = 0,25$	$0,56 \times 0,3 = 0,17$	$1,5 \times 0,17 = 0,25$
Resonanssitarcastelu (v_{w2} , mm/s)	$f_j = 6,3$ Hz $0,12 \times 0,3 = 0,036$	$4,0 \times 0,036 = 0,14$	$f_j = 12,5$ Hz $0,19 \times 0,3 = 0,057$	$6,0 \times 0,057 = 0,34$
Tapaus 2: Matalataajuuksinen ja kapea värähtelyspektri				
Tasainen voimistuminen, (v_{w1} , mm/s)	$0,98 \times 0,3 = 0,29$	$1,5 \times 0,29 = 0,44$	$0,98 \times 0,3 = 0,29$	$1,5 \times 0,29 = 0,44$
Resonanssitarcastelu (v_{w2} , mm/s)	$f_j = 5,0$ Hz $0,80 \times 0,3 = 0,24$	$4,0 \times 0,24 = 0,96$	$f_j = 8,0$ Hz $0,25 \times 0,3 = 0,075$	$6,0 \times 0,075 = 0,45$

Esimerkissä oletetaan, että rakennuspaikalta mitattu maan värähtelyn tunnusluku $v_{w,95}^{maa} = 0,30$ mm/s ja sen taajuusisältö ovat samoja kaikissa kolmessa pääsuunnassa x, y ja z. Rakennuksen rungon alinta ominaistaajuutta ei ole tiedossa ja siksi alimman ominaistaajuuden oletetaan voivan sattuuta taulukon 2 mukaisesti jollekin terssikaistoista 5, 6,3, 8 tai 10 Hz. Lattian ominaistaajuudeksi on lausekkeiden avulla laskettu 10 Hz. Ominaistaajuuden laskennan epätarkkuuden vuoksi taajuuden arvioidaan voivan sattuuta tahansa terssikaistoista 8, 10 tai 12,5 Hz.

Taulukossa 3 esitetään lasketut rungon ja lattian värähtelyt. Rungon värähtelyn tunnusluvuksi saadaan korkeataajuuksisen ja leveän spektrin tapauksessa $v_{w,95} = 0,25$ mm/s ja matalataajuuksisen ja kapean spektrin tapauksessa $v_{w,95} = 0,96$ mm/s. Lattian värähtelyn tunnusluvuksi saadaan korkeataajuuksisen ja leveän spektrin tapauksessa $v_{w,95} = 0,34$ mm/s ja matalataajuuksisen ja kapean spektrin tapauksessa $v_{w,95} = 0,45$ mm/s. Esimerkki osoittaa, että värähtelysuunnittelulla, joka ottaa huomioon liikenteestä aiheutuvan maan värähtelyn dominoivan taajuusalueen ja värähtelyspektrin muodon, voidaan vaikuttaa merkittävästi rakennuksen rungon ja lattian värähtelyyn.

6 Menetelmän taustaselvitykset

Esitetty menetelmä rakennukseen siirtyvän liikennetärinän arvioinnista perustuu rakennuksesta tehtyihin mittauksiin, FEM-laskentaan ja kirjallisuuslähteisiin. Kirjallisuusviitteitä on käsitelty jo johdantokappaleessa. Seuraavassa kuvataan lyhyesti FEM-laskennan tuloksia, jotka

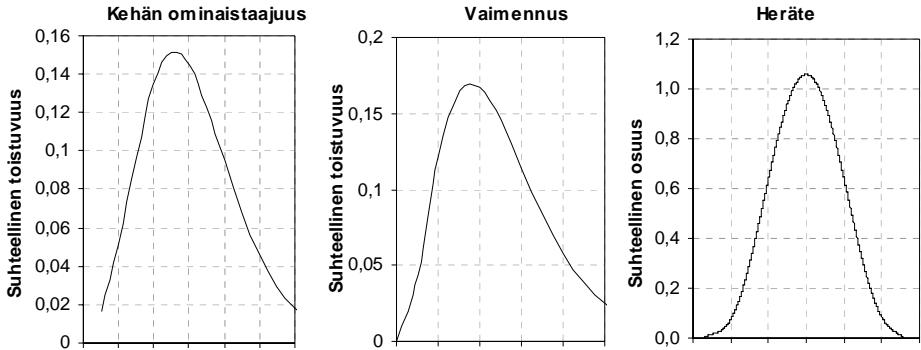
liittyvät resonanssi-ilmiön merkityksen arvioimiseen, sekä mittaustuloksia, joiden avulla on arvioitu ehdotetun menetelmän tarkkuutta.

6.1 FEM-laskenta

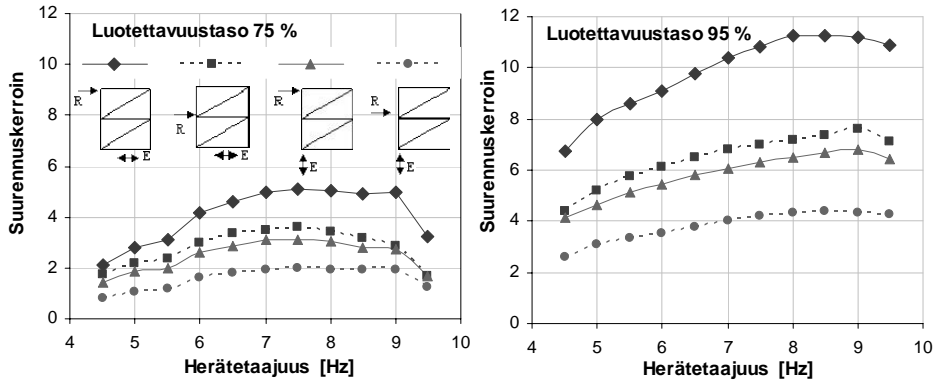
Resonanssi-ilmiön merkitystä rungon värähtelyssä on arvioitu FEM-laskennan avulla (Talja ym. 2008). Lähtökohtana oli kaksikerroksinen tasokehämalli. Kehän korkeus on 1,3 kertaa kehän leveys. Laskennassa vaakasuora heräte kohdistuu kehän molempien pilarien juureen, mutta pystyheräte kohdistuu vain toisen pilarin alapäähän. Tarcastelu on tehty perustuen sekä tilastomatemaattiseen resonanssitarcasteluun että todellisella värähtelysignaalilla aikatasossa tehtyyn laskentaan. Kuvassa 6 esitetään tilastomatemaattisen resonanssitarcastelun lähtötiedot ja kuvassa 7 analyysin tulokset. Kehän ominaistaajuus ja vaimennus perustuvat standardissa ISO 4866 (1994) esitettyihin tietoihin. Heräte perustuu liikennetärinän mittaustuloksista tehtyyn arvioon.

Kuvassa 7 esitetetään tilastomatemaattisen tarcastelun tulokset. Kun tarkastellaan perustuksen vaakavärähtelyä, resonanssitarcastelussa luotettavuustasoa 95 % vastaava suurennuskerroin on 7–11 kehän ylätasolla ja 4–6 kehän alatasolla. Kun tarkastellaan perustuksen pystyvärähtelyä, suurennuskerroin on ylätasolla 4–7 ja alatasolla 2–4. Jos luotettavuustaso lasketaan 75 %:iin, suurennuskertoimet pienenevät noin puoleen.

Samaa kehää tarkasteltiin myös kahdella maaperästä mitatulla herätteellä. Toisessa signaaleista dominoi korkeataajuuksinen värähtely ja sillä on leveä värähtelyspektri ja toisessa dominoi matalataajuuksinen värähtely ja sillä on kapea spektri. Käytettyjen signaalien taajuus-



Kuva 6. Tilastomatemattisen resonanssitarkastelun lähtötiedot.



Kuva 7. Luotettavuustasoja 75 % ja 95 % vastaavat värähtelyn suurennuskertoimet resonanssitarkastelussa. Symboli E esittää herätteen ja R tarkasteltavan värähtelyn suunnan ja sijainnin.

sisältö muistuttaa kuvan 5 mukaisia spektrejä. Laskennassa käytettiin 3 %:n vaimennusta.

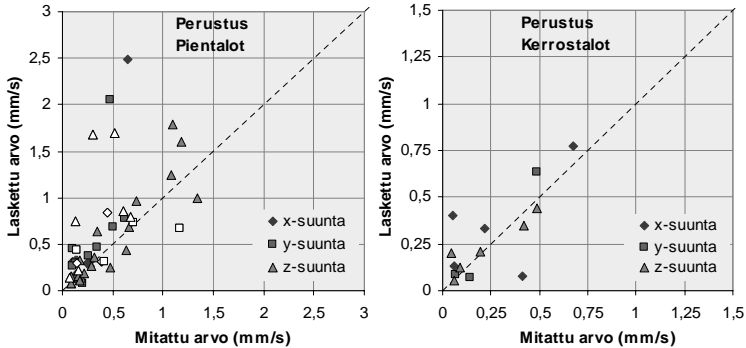
Kun tarkasteltiin kapeakaistaista ja matalataajuuksista signaalia, kehän alin ominaistajuus viritettiin värähtelyn dominoivalle taajuuksialueelle ($f_0 = 7$ Hz). Vaakasuuntaisella herätteellä suurennuskertoimeksi saatiin 9,7 kehän ylätasolla ja 6,6 kehän alatasolla. Pystysuuntaisella herätteellä suurennuskertoimet ylä- ja välitasolla olivat 5,9 ja 3,8.

Kun tarkasteltiin laajakaistaista korkeataajuuksista signaalia, kehän toinen ominaistajuus viritettiin värähtelyn dominoivalle taajuuksialueelle ($f_0 = 21$ Hz). Vaakasuuntaisella herätteellä suurennuskertoimeksi saatiin 1,9 kehän ylätasolla ja 1,7 kehän alatasolla. Pystysuuntaisella herätteellä suurennuskertoimet ylä- ja välitasolla olivat 1,0 ja 0,7.

6.2 Vertailu mittaustuloksiin

Värähtelyt mitattiin yhteensä 36 talosta. Lähteessä (Talja ym. 2008) kuvatuista kohteista seitsemän on vähintään kolmikerroksisia kiviainesrunkoisia taloja ja loput 29 yksi- tai kaksikerroksisia pien- tai rivitaloja. Yksikään pientaloista ei ole kiviainesrunkoisen. Kaikki kerrostalot sijaitsevat savimaa-alueilla ja ne on perustettu paaluille. Pientaloista seitsemän on hiekkatai sora-alueelta ja muut savimaa-alueelta. Tärinän aiheuttajaa on 22 tapauksessa kiskoliikenne ja muissa 14 tapauksessa katuliikenne. Tarvittavaa mittaustietoa puuttuu osalta kohteita, esimerkiksi kaikille pientaloille ei ole olemassa maasta mitatun vaakasuuntaisen värähtelyn tuloksia, joten seuraavan vertailun kuvissa tarkastelupisteiden määrä vaihtelee.

Kuvassa 8 esitetään lausekkeilla (3)–(4) lasketun perustuksen värähtelyn suhde mitattuun



Kuva 8. Lasketun perustuksen värähtelyn vertailu mitattuihin arvoihin. Vasemman kuvan valkoiset pisteet esittävät pientaloja, jotka on perustettu paaluille.

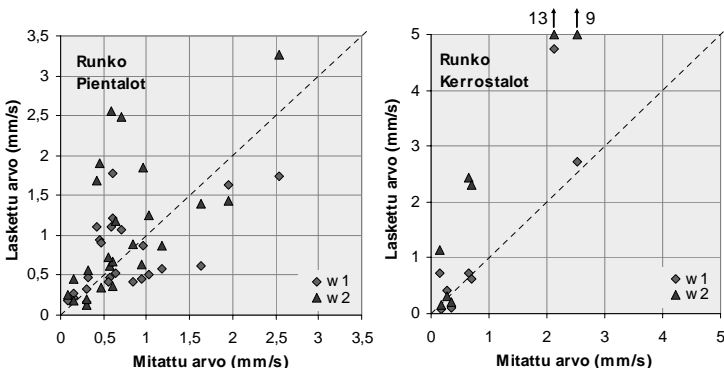
arvoon. Pientaloilla arvot vastaavat suhteellisen hyvin toisiaan. Vertailu osoittaa, että paaluille perustettujen talojen tulokset eivät juurikaan eroa muista. Joissakin tapauksissa paalutus voi hieman pienentää pystysuuntaista värähtelyä, mutta toisaalta paalutus voi myös kasvattaa vaakasuuntaista värähtelyä. Kaksi poikkeuksellisen korkealla sijaitsevaa laskettua arvoa (2,1 ja 2,5 mm/s) ovat hiekkamaalle rakennetusta pientalosta, jonka maaperän värähtelyssä dominoivat suhteellisen korkeat, 30–50 Hz:n taajuudet.

Muutamista paaluille perustetuista kerrostalokohteista mitatut tulokset eivät tue aikaisempaa käsitystä siitä, että kerrostaloilla värähtely siirtyisi yleisesti huononmin perustukseen kuin pientaloilla. Yksi suhteellisen korkea laskettu arvo (0,40 mm/s) on rakennuksesta, jonka perustuksen mittasuhteet ovat muihin mitauskohteisiin nähden suuret (17 x 31 m²). Yksi suhteellisen matala laskettu arvo (0,07 mm/s) on koh-

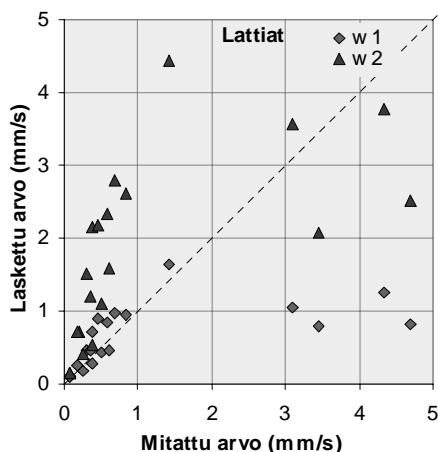
teesta, jossa perustuksen värähtely on siirtynyt pitkänomaisen rakennuksen vastakkaisesta päästä, jossa paalut ovat pitkät (pituus 6–9 m) verrattuna tarkasteltavan pään paaluihin (1–2 m).

Kuvassa 9 esitetään lausekkeilla (5)–(6) lasketun rakennuksen rungon värähtelyn suhde mitattuun arvoon. Tässä vertailussa rungon värähtelyn laskennan lähtökohdanna on mitattu perustuksen värähtely, joten lausekkeita (3)–(4) ei ole käytetty. Resonanssitarkasteluun perustuvassa laskennallisessa arvioissa on oletettu, että rungon ominaistaajuus riippuu kerrosmäärästä ja voi sattua taulukossa 2 esitetyille terssikaistoille.

Rungon värähtelyn laskennallisen arvion ja mittaustuloksen ero on usein melko suuri. Pientaloilla saadaan resonanssitarkastelulla (kuvassa w2) keskimäärin hyvä tulos, mutta useissa tapauksissa se johtaa liian varmaan mitoitukseen. Joissakin tapauksissa myös tasaiseen voimistumiseen perustava (w1) mitoitus voi johtaa liian



Kuva 9. Rakennuksen rungon lasketun värähtelyn vertailu mitattuihin arvoihin. Lasketut arvot perustuvat tasaiseen voimistumiseen (w1) ja resonanssitarkasteluun (w2).



Kuva 10. Lasketun lattian värähtelyn vertailu mitattuihin arvoihin. Lasketut arvot perustuvat tasaiseen voimistumiseen ($w1$) ja resonanssitarasteluun ($w2$).

varmaan mitoitukseseen. Muutamissa mitatuissa kerrostalo-kohteissa rungon resonanssi-ilmiötä ei havaittu, ja siksi resonanssimitointi johtaa merkittävään ylimitoitukseen ja tasaiseen voimistumiseen perustuvalla mitoituksella saadaan paras lopputulos.

Kuvassa 10 esitetään lausekkeilla (5)–(6) lasketun lattian värähtelyn vertailu lattiasta mitattuun arvoon. Tässä vertailussa rungon värähtelyn laskennan lähtökohdaksi on mitattu perustuksen värähtely, joten lausekkeita (3)–(4) ei ole käytetty. Koska lattioiden ominaistajuutta ei ole laskettu, resonanssitarasteluun perustuvassa laskennallisessa arviossa on oletettu, että lattian ominaistajuus voi sattuuta mille tahansa välillä 8–32 Hz olevalle taajuuskaistalle.

Lukuun ottamatta neljää lattiaa, tasaiseen voimistumiseen perustuva mitointi johtaa parhaaseen lopputulokseen. Nämä lattiat ovat vanhojen kerrostalojen puurunkoisia lattioita. Näissä tapauksissa resonanssimitointuksessa käytetty suurennuskerroin 6,0 on jopa liian pieni. Resonanssi-ilmiö havaittiin vain muutamassa lattiasa, mutta toisaalta ainoastaan yhdellätoista mitatuista 24 lattiasta maaperän hallitseva taajuusalue sattuu lattian todennäköiselle ominaistajuusalueelle 8–32 Hz. Voimakkaan resonanssin syntyminen edellyttää, että herätevärähtely on hyvin kapeakaistaista ja että se sattuu tarkasti lattian ominaistajuusalueelle.

7 Yhteenveto

Artikkelissa esitetään menetelmä, jolla voidaan arvioida liikennetärinästä aiheutuvaa rakennuksen tärinää ja siitä asukkaille aiheutuvaa haittaa. Haitallisuuden arviointi perustuu maaperän värähtelyn suuruuteen, suuntaan ja taajuussisältöön sekä tärinälle esitettyyn raja-arvoehdotukseen.

Tärinän suuruutta mitataan värähtelyn tunnusluvulla $v_{w,95}$, joka on tilastollinen maksimi normaaliliikenteen aiheuttamasta asuintilojen värähtelystä yhden viikon aikana. Eri lähteissä oleviin suosituksiin sekä tehtyyn asukasmielipiteiden ja mittaustulosten väliseen vertailuun perustuen ehdotetaan uusien asuntoalueiden ja väylien suunnittelussa tavoitteeksi, että raja $v_{w,95} = 0,3$ mm/s ei ylitä. Rajaa $v_{w,95} = 0,6$ mm/s ehdotetaan toimenpiderajaksi vanhoilla asuinalueilla.

Rakennuksen värähtelysuunnittelussa ehdotetaan käytettäväksi kahta eri lähestymistapaa: toinen ottaa huomioon värähtelyn tasaisen voimistumisen ja toinen värähtelyn voimistumisen resonanssi-ilmiön vuoksi. Nykyisin yleinen käytäntö on, että rakennuksessa värähtely oletetaan samansuuruiseksi kuin maassa tai maan värähtely kerrotaan tekijällä, jonka suuruutta suunnittelijan on hyvin vaikea valita. Rakennuksen dynaamisia ominaisuuksia ja maaperän värähtelyn taajuussisältöä ei suunnittelussa oteta huomioon. Artikkelissa ehdotetulla menetelmällä tärinäasiantuntija voi suunnitella rakenteet siten, että resonanssin vaikutus tärinä on mahdollisimman pieni. Rakennuksen suunnittelussa tulee aina välttää niitä lattian ja rungon ominaistajuuksia, jotka sattuvat maaperän värähtelyn dominoivalle taajuusalueelle. Resonanssin merkitys suunnittelussa korostuu, kun maaperän värähtely on hyvin kapeakaistaista.

Rakennuksen perustuksen värähtelyn arviointi perustuu rakennuspaikalta mitattuun värähtelyn tunnuslukuun $v_{w,95}$ ja värähtelyn taajuussisältöön. Tunnusluku ja värähtelyspektri määritetään kolmessa pääsuunnassa: rakennuksen pystysuunnassa sekä pituus- ja poikittaissuunnissa. Rakennuksen perustuksen värähtelyspektrin oletetaan olevan alle 10 Hz:n taajuuksilla sama kuin maassa. Yli 10 Hz:n värähtelyt pienenevät kuvan 4 mukaisesti ja yli 80 Hz:n värähtelyä ei liikennetärinä tarkasteluissa ole tarpeen ottaa huomioon. Suosituksena on, että kuvan pienennyskerrointa käytetään kaikille rakennustyypeille ja perustamistavoille.

Tasaiseen voimistumiseen perustuvassa tarkasteluissa rungon ja lattian värähtelyn oletetaan olevan kaikissa kolmessa tarkastelusuunnassa 1,5-kertainen perustuksen värähtelyyn nähden. Poikkeuksena on yksikerroksinen rakennus, jolla on maanvarainen lattia, jolloin kerroin on 1,0. Resonanssisuunnittelussa tarkastellaan lattiaa

ja runkoa erikseen. Lattian resonanssitarkastelu tehdään perustuksen pystyvärähtelystä aiheutuvalle värähtelylle ja rungon resonanssitarkastelu perustuksen pituus- ja poikittaissuuntaisesta vaakavärähtelystä aiheutuvalle värähtelylle. Arvioinnin lähtökohdista, jolle rungon tai lattian ominaistajuuden arvioidaan sattuvan. Kyseisen terssi-kaistan värähtelykomponentti kerrotaan lattian resonanssitarkastelussa suurennuskertoimella 6,0 ja rungon resonanssitarkastelussa suurennuskertoimella 4,0. Suunnittelussa käytettävä värähtelyn tunnusluku $v_{w,95}$ on suurin tasaisen voimistumisen ja resonanssitarkastelun perusteella lasketuista arvoista.

Mittauskohteista ja FEM-laskennasta saadun kokemuksen perusteella pientalojen rungon resonanssi on todennäköisin pehmeillä savimaa-alueilla, jolloin rungon ominaistajuus (taulukko 2) sattuu usein maaperän dominoivalle taajuusalueelle 4–10 Hz. Muutamassa mitatussa kerrostalokohteessa resonanssia ei ilmennyt, mutta matalilla kerrostaloilla rungon resonanssin riski on kuitenkin olemassa. Koska asuinrakennuksissa käytetyt lattioiden jänneväliä ovat yleensä pieniä, jolloin ominaistajuus on tavallisesti yli 10 Hz, lattian resonanssivärähtelyä ei yleensä esiinny pehmeikköalueilla. Resonanssi on kuitenkin mahdollinen kovemilla pohjajäsuhteilla, joilla maaperän värähtelyssä dominoi korkeampi taajuusalue. Voimakkaan resonanssin ilmeneminen on sattumanvaraista, mutta esiintyessään resonanssi on erittäin ongelmallinen.

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.

FTA. 2006. Transport 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). Genève: International Organization for Standardization. 11 s.

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

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: Standards Norway. 27 s.

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

Talja, A. 2004. Suositus liikennetärinän mittaamisesta ja luokituksesta. VTT Tiedotteita 2278. Espoo: VTT. 50 s. + liitti. 15 s.

Talja, A., Vepsä, A., Kerkela, J. & Halonen, M. 2008. Rakennukseen siirtyvän liikennetärinän arviointi. VTT Tiedotteita 2425. Espoo: VTT. 95 s. + liitti. 69 s.

Talja, A. & Saarinen, A. 2009. Maaliikenteen aiheuttaman runkomelun arviointi – Esiselvitys. VTT Tiedotteita 2468. Espoo: VTT. 56 s. + liitti. 11 s.

Törnqvist, J. & Talja, A. 2006. Suositus liikennetärinän arvioimiseksi maankäytön suunnittelussa. VTT Working Papers 50. Espoo: VTT. 46 s. + liitti. 33 s.