



## 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](https://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](#)

# Lattioiden värähtelysuunnittelu

Asko Talja, diplomi-insinööri  
Tomi Toratti, tekniikan tohtori  
VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka  
asko.talja@vtt.fi  
tomi.toratti@vtt.fi

2

Artikkelissa esitetään menetelmät, joilla voidaan laskennallisesti ja kokeellisesti arvioida eri materiaaleista valmistettujen asuin- ja toimistorakennusten välipohjien kävelystä aiheutuvien värähtelyiden suuruutta ja haitallisuutta. Värähtelysuunnittelua varten esitetään värähtelykriteerit ja raja-arvot ehdotetuille kriteereille. Menetelmiä voidaan suoraan soveltaa sekä rakennesuunnittelussa että vaatimustenmukaisuuden osoittamisessa. Ehdotetut menetelmät ja raja-arvot perustuvat laajaan koearkeistoon, noin saataan testiin, joka sisältää sekä puu-, teräs- että betonilattioita.

Laskennallisissa värähtelysuunnittelussa esitetään mitoituskriteerit ja niiden raja-arvot. Kun tarkastellaan värähtelyiden aistittavuutta kehon tuntemuksen perusteella, kriteerinä käytetään 1 kN:n paikallisesta kuormituksesta aiheutuvaa taipumaa tai yhden henkilön kävelystä aiheutuvaa kiihtyvyyttä. Taipumakriteeriä käytetään, kun lattian alin ominaistaajuus on yli 10 Hz, muuten käytetään kiihtyvyydekriteeriä. Kun tarkastellaan värähtelyiden aistittavuutta esineisiin aiheutuvan värähtelyn perusteella, kriteerinä käytetään aina 1 kN:n paikallisesta kuormituksesta aiheutuvaa lattian pinnan kallistumaa. Värähtelykriteerien tarkastamiseksi annetaan ohjeet käsinlaskennan ja FEM-laskennan käytölle. Kriteereille asetettujen raja-arvojen perusteella välipohjat jaetaan viiteen eri värähtelyluokkaan. Suunnittelussa käytettävän värähtelyluokan valinta riippuu sallittavan häiriön suuruudesta.

## 1 Johdanto

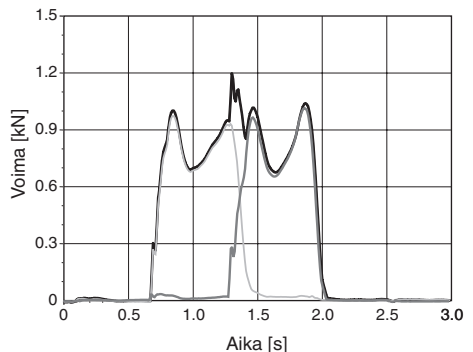
Tarkastelun lähtökohtana ovat kävelystä aiheutuvat värähtelyt, mikä on pitkään ollut yleinen käytäntö tarkasteltaessa asuin- ja toimistorakennuksia. Kävely on yleinen heräte, kun taas esimerkiksi lasten juoksu, hyppiminen tai huoneistoissa tapahtuva liikunta ovat voimakkaampia, mutta harvemmin toistuvia herätteitä. Niitä tarkasteltaessa pitäisi ottaa huomioon myös häiriön toistuvuus ja häiriön esiintymisen vuorokau-

denaika, joilla myös on merkitystä värähtelyn häiritsevyydelle.

Ihminen voi kokea värähtelyt haitallisiksi joko suoraan kehon tai esineiden värähtelyiden kautta. Asuin- ja toimistorakennuksissa häiritsevät värähtelyt aistitaan yleensä joko kehon tuntemuksina, kasvien lehtien ja esineiden heilumisena tai astioiden ja esineiden aiheuttamina ääniä.

Kävelyheräte sisältää sekä jaksottaisia että iskumaisia komponentteja (kuva 1). Matalin jaksottainen kuormitus tapahtuu kävelytaajuudella 1,6–2,2 Hz, mutta kuormituskomponentteja esiintyy myös tämän taajuuden toisella ja kolmannella monikerralla 3,2–8,8 Hz.

Yleensä kävelevä henkilö ei itse tunne aiheuttamia värähtelyjä eikä lattian notkumista, vaikka muut ympärillä olevat ihmiset voivat pitää häiriötä hyvinkin epämiellyttävänä. Paikallaan oleva ihminen voi kokea toisen ihmisen kävelystä aiheutuvan lattian värähtelyt haitalliseksi, jos kävelyn jaksolliset kuormituskomponentit vahvistuvat liiaksi resonanssi-ilmion vuoksi, jos kantapään isku lattiaan aiheuttaa liian suurta tärinää tai jos lattia notkuu liiaksi askelten alla. Kävely saattaa aiheuttaa myös välillisiä häiriöi-



Kuva 1. Kävelykuormituksen syntyminen vasemman ja oikean jalan kosketusvoimasta.

tä, esimerkiksi astiastojen kilinää ja huonekasvien lehtien heilumista.

Lattian värähtelyominaisuudet määräytyvät lähinnä jännevälistä, pitkittäisestä ja poikittaisesta jäykkyydestä, massasta sekä vaimennusominaisuuksista. Valmiin lattian värähtelyä on hankala parantaa jälkeenpäin. Värähtelyominaisuudet määräytyvät lattiarakenteen mukaan ja tämä tulisi ottaa jo rakennesuunnitteluvaiheessa huomioon.

## 2 Laskennallinen värähtelysuunnittelu

### 2.1 Ohjeen taustaa

Ohjeen perusteena ovat seuraavat VTT:n selvitykset:

- kirjallisuuskatsaus välipohjien värähtelyihin liittyvästä ohjeistuksesta (1996)
- testit kevyillä teräsrunkoisilla välipohjilla (1999)
- tilan vaikutuksen merkityksen selvittäminen kävelystä aiheutuvan herätteen suuruuteen (2001)
- kelluvien lattioiden värähtelytestit (2001)
- ontelolaattalattioiden värähtelytestit (2001)
- testaustulokset eri rakennuskohteiden lattioiden värähtelystä (2002).

Lisäksi käytössä on ollut joukko tuotekehitystoimeksiantoihin liittyviä testaustuloksia.

Toistaiseksi Suomessa on teräsrunkoisille välipohjille käytössä TRY:n normikortti nro 11/2000. Sitä on ehdotettu myös International Iron and Steel Institutin (IISI) julkaisemaksi teräsrakentealan kansainväliseksi käytännöksi. Normikortti perustuu pääasiassa Pohjois-Amerikassa julkaistuihin ohjeisiin, jotka koskevat kevyitä puurunkoisia (CCMC 1998) ja raskaita teräsrunkoisia välipohjia (AISC/CISC 1997). TRY:n ohjeen tausta-aineistona on käytetty VTT:ssä tehtyä kirjallisuuskatsausta (1996) ja kevyillä teräsrunkoisilla välipohjilla (1999) saatuja kokemuksia.

Kanadassa puurunkoisilla välipohjilla saadut uusimmat koetulokset (Hu 2000) sekä viimeaikaiset VTT:ssä saadut tulokset osoittavat, että CCMC:n ja TRY:n ohjeet voivat tietyissä tapauksissa johtaa epävarmaan mitoittukseen, mikä on otettu huomioon tätä ohjetta laadittaessa. Tarkoituksena on, että myös TRY:n normikortti ja IISI:n ohje-ehdotus päivitetään tämän ohjeen mukaiseksi.

#### Ohjeen tarkoitus

Ohjeen avulla voidaan arvioida laskennallisesti sekä kevyiden että raskaiden välipohjien kävelystä aiheutuvien värähtelyiden haitallisuutta. Ohje on materiaalista riippumaton.

Tässä ohjeessa perusteena on yhden ihmisen kävelystä aiheutuva värähtely ja sen seuraukset. Hyppimistä, voimistelua, tanssia tai ilkeittävästi aiheutettua värähtelyä ei tässä katsota asuin- ja toimistotilojen suunnitteluperusteeksi. Tätä ohjetta voidaan käyttää seuraavin edellytyksin:

- välipohja liittyy asuin- tai toimistotiloihin
- välipohjan alin ominaistaajuus on vähintään 3 Hz
- suunnitteluperusteeksi on hyväksytty ihmisen kävelystä aiheutuvat värähtelyt.

Menetelmää ei tule käyttää esimerkiksi liike- ja liikuntatiloihin tai tiloihin, joiden värähtely aiheutuu koneista. Ohjetta ei tule myöskään käyttää tiloihin, joissa värähtelyn suuruutta rajoittavat laitteistoille asetetut vaatimukset. Näissä kohteissa kuormitus- ja vaatimustaso poikkeavat ohjeesta annetusta. Esimerkiksi liikuntatiloissa värähtelyä aiheuttava heräte on suurempi kuin asuintiloissa, mutta toisaalta vaatimustaso on pienempi. Liikkuvat henkilöt, jotka itse osallistuvat värähtelyyn aiheuttamiseen, aistivat vähemmän herkästi värähtelyä kuin paikallaan olevat henkilöt.

#### Suunnittelun tarkkuus

Ohjeessa annetaan raja-arvot värähtelykriteereille ja laskentaohjeet värähtelykriteerien arvioimiseksi.

Lattioiden värähtelytarkastelu voidaan värähtelyiden hyväksyttävyyden suhteen rinnastaa ääneneristävyyksivaatimuksiin. Havaittavuus, hyväksyttävyyys ja koettavuus ovat eri asioita. Annetut kriteerit ja yksinkertaistetut laskentamenetelmät eivät välttämättä johda aina kaikkia tyydyttäviin ratkaisuihin. Jo pelkästään raja-arvojen tulkinta on epätarkkaa. Yleensä asukkaat eivät valita lattioiden värähtelyistä, vaikka värähtelyt voivat olla voimakkaitakin. Toisaalta jos asukkaalta kysytään, mikä värähtely on hyväksyttävää, luokitellaan helposti heikotkin värähtelyt epämiellyttäviksi. Vaativin asukas ei hyväksy minkäänlaisia lattian värähtelyitä – varsinkin jos sitä häneltä erikseen kysytään.

Lattiaan liittyy yleensä rakenteita, kuten väliseinät ja alaslasketut katot, joiden ominaisuudet muuttavat lattian värähtelykäyttäytymistä. Ne lisäävät lattian massaa ja muuttavat lattian ominaistaajuutta ja vaimennusta.

#### Valmistusepä-tarkkuuksien merkitys

Värähtelyominaisuudet eivät riipu pelkästään lattiatyypistä, lattian mitoista ja lattiaa tukevista rakenteista. Värähtelyominaisuuksiin vaikuttavat myös eri rakennekerrosten ja niiden välisten liitosten jousto sekä valmistus- ja asennusepä-tarkkuudet. Siksi eri rakennekerrosten väliset kontaktipinnat ja liitokset lattiaa tukevien rakenteisiin tulee suunnitella mahdollisimman jäykiksi. Erityisesti on kiinnitettävä huomiota sii-

hen, että jäykkyys on suuri kävelystä aiheutuvilla, suhteellisen pienillä ihmisen painon aiheuttamilla kuormituksilla.

Liitosten jäykkyyden tulee säilyä myös pitkäaikaiskäytössä, vaikka lattia olisi välillä kuormitettu useita kertoja sen mitoituskuormituksella. Pitkäaikaistoimivuudessa tulee arvioida myös eri rakennekerrosten väliset kontaktiongelmat, jotka voivat aiheutua esimerkiksi eroista materiaalien virumis-, lämpölaajenemis- tai kosteuskäyttätymisessä. Koska haitalliset värähtelyamplitudit ovat usein vain muutaman kymmenesosamillimetrin luokkaa, pienetkin materiaalien suuruus-, kontakti- tai asennusvirheet voivat merkittävästi huonontaa lattian värähtelyominaisuuksia.

### Kokeellinen varmennus

Lukuisten epätarkkuuksien vuoksi ehdotetun laskentamenetelmän toimivuus uudentyyppisissä ratkaisuissa olisi aina varmistettava rakennuskohteesta tehtävin mittauksin ja aistinvaraisin havainnoin. Saatuja kokemuksia voidaan myöhemmin hyödyntää ohjeiden täsmentämisessä. Ohje on suunniteltu päivitettäväksi saadun kokemuksen perusteella.

## 2.2 Kriteerit ja raja-arvot

### Värähtelyiden luonne erilaisilla latioilla

Tässä esityksessä lattiat on jaettu seuraaviin ryhmiin:

1. Matalataajuuksiset lattiat, joiden alin ominaistaajuus on alle 10 Hz. Niiden paino on yleensä yli 300 kg/m<sup>2</sup>, ja lattian jänneväli on usein yli 10 m. Tällaisilla lattioilla lattian värähtelyssä erottuu selvästi lattian ominaisvärähtely, josta eri askelten aiheuttamaa värähtelyä on vaikea erottaa. Ihmisen keho voi tuntea lattian ominaisvärähtelyn haitalliseksi.
2. Korkeataajuuksiset lattiat, joiden alin ominaistaajuus on yli 10 Hz. Niiden paino on yleensä alle 300 kg/m<sup>2</sup>, ja lattioiden jänneväli on yleensä selvästi alle 10 m. Tällaisilla lattioilla lattian värähtelystä voidaan yleensä erottaa selvästi erillisten askelten aiheuttamat iskut. Ihmisen keho voi tuntea lattian askelten aiheuttamat värähtelyt haitallisiksi.
3. Kelluvat lattiat ja korotuslattiat ovat oma korkeataajuuksisten lattioiden ryhmänsä. Niissä korostuu lattian paikallisen jouston merkitys. Ihmisen painon siirtyminen paikasta toiseen aiheuttaa paikallisen taipuman ja kallistuman lattian pintaan, mistä voi aiheutua haitallista kasvien lehtien heilumista tai esineiden kilinää. Kelluvia lattioita käytetään sekä korke- että matalataajuuksisten lattioiden kanssa.

Todellisuudessa lattian värähtely ei ole puhtaasti yhtä tyyppiä, vaan värähtelyssä sekoittuu eri tyyppien ominaisuudet.

### Värähtelyiden haitallisuus

Ihmisen keho ja monet esineet ovat herkkiä lattioiden värähtelyille. Keho voi aistia pienetkin värähtelyt epämiellyttävänä. Huonekaluihin, astioihin tai kasveihin siirtyvä värähtely voi aiheuttaa myös haitallista ääntä tai esineiden heilumista. Jatkuva värähtely koetaan usein haitallisempaan kuin lyhytaikaiset, harvoin toistuvat iskut.

Värähtelyn haitallisuuteen vaikuttaa myös värähtelyn lähteen sijainti. Naapuriasunnosta siirtyvää värähtelyä pidetään haitallisempaan kuin värähtelyä, jonka aiheuttaja asuu samassa huoneistossa.

Samassa asunnossakin aiheutetulle värähtelylle voidaan sallia erisuuruinen värähtely sen mukaan, mikä on rakennuksen käyttötarkoitus. Kesämökeissä ja omakotitaloissa hyväksytään usein voimakkaammat värähtelyt kuin kerrostalohuoneistoissa.

### Lattioiden luokittelu ja raja-arvot

Lattiat sijoitetaan värähtelyiden seurausten perusteella eri värähtelyluokkiin. Luokka muodostuu kirjaimesta, joka kuvaa värähtelyiden aistittavuutta istuvan henkilön kehon tuntemuksen perusteella ja numerosta, joka kuvaa esineisiin aiheutuvien värähtelyjen suuruutta (Taulukko 1). Luokituksen perusteena ovat ihmisen kävelystä aiheutuvat värähtelyt.

Taulukossa 1 on arvioitu värähtelyiden voimakkuutta eri luokissa. Koska voimakkuuden aistittavuus on henkilökohtainen ominaisuus, esitetyt kuvaukset pitää tulkita suuntaa-antavina. Astioiden kilinät ja esineiden värähtelyt ovat usein myös tuotekohtaisia ominaisuuksia. Taus- ta-aineistoa ehdotetulle luokittelulle on esitetty lähteessä Talja et al. (2002).

Taulukossa 2 on esitetty esimerkkejä asuin- ja toimistorakennusten vähimmäisluokituksista. Luokituksista sovitaan aina rakennuttajan kanssa. Korkeammasta tai alemmasta luokasta voidaan sopia tapauskohtaisesti tietyille tuotteille ja jänneväleille, mikäli se on perusteltua rakennuskohteista saatujen kokemusten perusteella.

Kelluvilla lattioilla ja korotuslattioilla on toistaiseksi perusteltua käyttää yhtä luokkaa parempaa luokitusta kuin taulukossa 2 on esitetty, kun luokitus tehdään esineisiin syntyvän värähtelyn perusteella ja kun luokituksen toimivuutta ei ole kokeellisesti varmistettu. Syynä poikkeamaan on toistaiseksi vähäinen kokemus värähtelykriteerien raja-arvojen soveltavuudesta esineiden värähtelyjen haitallisuuden arviointiin. Täten esimerkiksi luokan C3 sijaan suositellaan toistaiseksi luokkaa C2 ja luokan B2 sijaan luokkaa B1.

Taulukko 1. Kuvaus mahdollisesta värähtelyn voimakkuudesta eri värähtelyluokissa.

Värähtelyiden aistittavuus kehon tuntemuksen perusteella	Värähtelyiden aistittavuus esineisiin syntyvän värähtelyn perusteella
A Värähtely ei ole yleensä havaittavissa.	1 Astioiden kilinää ja kasvin lehtien heilumista ei yleensä esiinny.
B Värähtely on juuri havaittavaa.	2 Astioiden kilinää ei yleensä esiinny ja kasvin lehtien heiluminen on juuri havaittavaa.
C Värähtely on havaittavaa.	3 Astioiden kilinä on juuri havaittavaa. Kasvin lehtien heiluminen on havaittavaa.
D Värähtely on selvästi havaittavaa.	4 Astioiden kilinä ja kasvin lehtien heiluminen on selvästi havaittavaa.

Taulukko 2. Esimerkkejä värähtelyluokkien soveltamisesta.

Lattian värähtelyluokka	Sovelluskohde
A1	Normaaliluokka huoneistosta toiseen siirtyville värähtelyille. Erikoisluokka, kun värähtelyn aiheuttaja on samassa huoneistossa.
B2	Alempi luokka huoneistosta toiseen siirtyville värähtelyille. Ylempi luokka asuin- ja toimistorakennuksille, kun värähtelyn aiheuttaja on samassa huoneistossa.
C3	Normaaliluokka asuin- ja toimistorakennuksille, kun värähtelyn aiheuttaja on samassa huoneistossa.
D4	Alempi luokka asuinrakennuksille, kun värähtelyn aiheuttaja on samassa huoneistossa. Esim. omakotitalojen ullakot tai vapaa-ajan asunnot.
E5	Luokka, jolle ei aseteta rajoituksia.

Taulukossa 3 on esitetty suositus laskennassa käytettäväksi raja-arvoiksi. Tausta-aineistoa ehdotetuille värähtelyn raja-arvoille on esitetty lähteessä Talja et al. (2002). Raja-arvot on annettu seuraaville lattian ominaisuuksille:

- Lattian alin ominaistaajuus  $f_0$  [Hz]. Ominaistaajuuden arvo  $f_0 = 10$  Hz jakaa lattiat matala- ja korkeataajuuksisiin lattioihin.
- Sallittu kiihtyvyyssamplitudi  $a$  [ $\text{m/s}^2$ ]. Raja-arvo koskee matalataajuuksisten lattioiden puhtaasti ominaistaajuudella tapahtuvaa värähtelyä.
- Paikallisesta voimasta 1 kN aiheutuva sallittu siirtymä  $\delta$  [mm]. Taipumaehdot käytetään korkeataajuuksisilla lattioilla, korotuslattioilla ja kelluvilla lattioilla. Voiman etäisyys tarkasteltavaan pisteeseen on vähintään 600 mm. Siirtymä voi useampiaukkoisen rakenteen tapauksessa olla myös ylöspäin.
- Paikallisesta voimasta 1 kN aiheutuva kallistuma  $\phi$  (kuva 2) Ehto käytetään matala- ja korkeataajuuksisille lattioille sekä myös kelluville lattioille ja korotuslattioille, kun esiinneiden värähtely on hyväksyttävyysskriteerinä. Kallistus määritetään lattian pinnasta tasasivuisen kolmion muotoisen alueen kallis-

tumana, kun paikallisen voiman etäisyys kolmion sivusta on kohtisuoraan mitattuna vähintään 300 mm. Tasasivuisen kolmion korkeus on 300 mm.

- Edellisten lisäksi rakenteiden taipumien on täytettävä eri materiaaleja koskevissa suunnitteluoheissa asetetut lujuus- ja taipumaehdot.

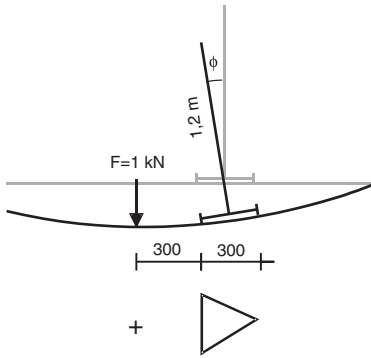
Mikäli huoneen suurin leveys tai pituus  $L$  on enintään 6 m, taulukossa sallittuja kiihtyvyyss- ja taipumarajoja voidaan kasvattaa kertoimella:

$$k_L = \frac{1}{0,318 + 0,114L} \quad (1)$$

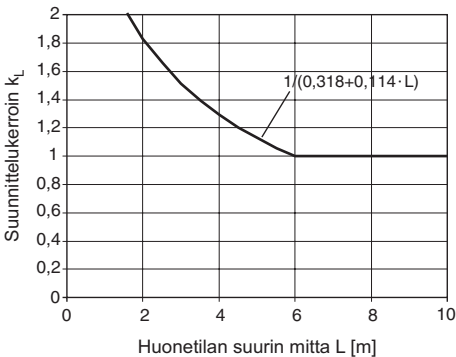
Pienennystä ei käytetä kallistumaehdossa eikä huoneistosta toiseen siirtyvien värähtelyiden yhteydessä. Kertoimella otetaan huomioon se, että pienissä tiloissa asukkaiden kävelynopeus on keskimäärin pienempi kuin suurissa tiloissa. Tällöin myös kävelystä aiheutuva dynaaminen kuormitus on pienempi. Kuvassa 4 on esitetty graafisesti kertoimen riippuvuus huoneen suurimmasta mitasta.

Taulukko 3. Laskennassa käytettävät raja-arvot.

Matalataajuusiset lattiat		Korkeataajuusiset lattiat, korotuslattiat ja kelluvat lattiat		Kaikki lattiat	
Kiihtyvyysehto		Taipumaehto		Kallistumaehto	
Luokka	$3 \text{ Hz} \leq f_0 \leq 10 \text{ Hz}$	Luokka	$f_0 > 10 \text{ Hz}$	Luokka	
A	$a \leq 0,03 \text{ m/s}^2$	A	$\delta \leq 0,12 \text{ mm}$	1	$\phi \leq 0,2 \text{ mm}/1,2 \text{ m}$
B	$a \leq 0,05 \text{ m/s}^2$	B	$\delta \leq 0,25 \text{ mm}$	2	$\phi \leq 0,4 \text{ mm}/1,2 \text{ m}$
C	$a \leq 0,075 \text{ m/s}^2$	C	$\delta \leq 0,5 \text{ mm}$	3	$\phi \leq 0,8 \text{ mm}/1,2 \text{ m}$
D	$a \leq 0,12 \text{ m/s}^2$	D	$\delta \leq 1,0 \text{ mm}$	4	$\phi \leq 1,6 \text{ mm}/1,2 \text{ m}$
E	$a > 0,12 \text{ m/s}^2$	E	$\delta > 1,0 \text{ mm}$	5	$\phi > 1,6 \text{ mm}/1,2 \text{ m}$



Kuva 2. Paikallisesta kuormituksesta aiheutuva lattian pinnan kallistuma.

Kuva 3. Kertoimen  $k_L$  riippuvuus lattian suurimmasta mitasta  $L$ .

## 2.3 Värähtelyominaisuuksien arviointi käsinlaskennalla

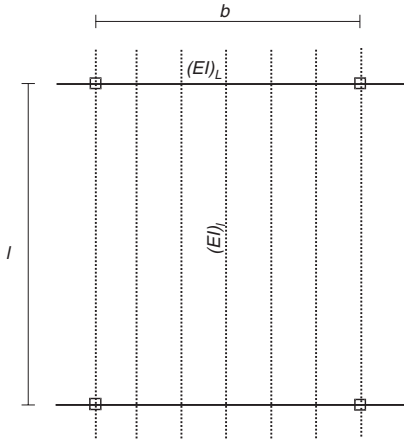
### Käytetyt merkinnät

Ohjeen lausekkeissa on käytetty seuraavia merkintöjä ja laatuja:

$a_{\max}$	[m/s <sup>2</sup> ]	kävelystä aiheutuva laskettu kiihtyvyys
$a_{\text{sall}}$	[m/s <sup>2</sup> ]	sallittu kiihtyvyys
$b$	[m]	lattian leveys
$b_{\text{eff}}$	[m]	lattian värähtelevän osan tehollinen leveys
$e=2,718$	[-]	Neperin luku
$s$	[m]	lattiapalkkien välinen etäisyys
$f_0$	[Hz]	lattian alin ominaistajuus
$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	painovoiman kiihtyvyys
$l$	[m]	lattiapalkkien jänneväli
$m$	[kg/m <sup>2</sup> ]	koko välipohjan massa lattian pinta-alayksikköä kohden + hyötykuormasta osuus 30 kg/m <sup>2</sup>
$L$	[m]	pääkannattimien jänneväli
$E_l$	[N/m <sup>2</sup> ]	lattian pituussuuntaa $l$ vastaa-va redusoitu kimmokerroin
$I_l$	[m <sup>4</sup> /m]	lattian pituussuuntaa $l$ vastaa-va, leveysyksikköä kohden laskettu taiputusjäyhyys
$(EI)_b$	[Nm <sup>2</sup> /m]	lattian pienempi, leveyssuuntaa $b$ vastaava jäykkyys $E_b I_b$
$(EI)_l$	[Nm <sup>2</sup> /m]	lattian suurempi, pituussuuntaa $l$ vastaava jäykkyys $E_l I_l$
$(EI)_L$	[Nm <sup>2</sup> /m]	lattian pääkannattimien jäykkyys $E_L I_L$
$P$	[N]	värähtelyn aiheuttavan henkilön paino (= 800 N)
$R$	[-]	kiihtyvyyden pienennyskerroin (= 0,7)

$W$	[kg]	värähtelevän lattian tehollinen massa
$\delta_{\max}$	[m]	pistevoimasta 1 kN aiheutuva suurin staattinen taipuma
$\zeta$	[-]	vaimennussuhde

Esitetty menetelmä antaa yksinkertaiset lausekkeet suorakaiteen muotoisen lattian alueen värähtelytarkastelua varten. Alue voi liittyä osana suurempaa lattia-aluetta (kuva 4).



Kuva 4. Tyypillinen lattian osa-alue, joka käsittää pintalaatan, lattiapalkit  $(EI)_l$  ja pääkannattimet  $(EI)_b$ .

### Lattian alin ominaistaajuus

Yksinkertaisen neljältä sivulta tuetun suorakaiteen muotoisen lattian alin ominaistaajuus lasketaan lausekkeesta

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

jossa

$l$  = lattian pituus

$(EI)_l$  = lattian suurempi pituussuuntaa  $l$  vastaava jäykkyys

$(EI)_b$  = lattian pienempi leveysuuntaa  $b$  vastaava jäykkyys

$m$  = välipohjan massa lattian pinta-alayksikköä kohden.

Lattian massaan sisällytetään hyötykuormaa 30 kg/m<sup>2</sup>.

Usein lattiapalkkien suuntaisella reunan tuennalla ei ole merkitystä ominaistaajuuteen.

Tällöin ominaistaajuus voidaan laskea lausekkeesta

$$f_0 = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}} \quad (3)$$

Lauseke (3) aliarvioi ominaistaajuutta enintään 5 %, kun  $b/l > 1,0$  ja  $(EI)_l / (EI)_b > 30$ , mutta jos  $b/l = 0,5$ , samaan laskentatarkkuuteen päästään vasta, kun  $(EI)_l / (EI)_b > 200$ .

Jos lattiapalkit (pituus  $l$ ) tukeutuvat pääkannattimiin (pituus  $L=b$ ), systeemin alin ominaistaajuus voidaan arvioida lattiapalkin ja pääkannattimen ominaistaajuuksien avulla lausekkeesta

$$f_0 = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{f_{0,l}^2} + \frac{1}{f_{0,L}^2}}} \quad (4)$$

jossa

$f_{0,l}$  lasketaan lausekkeesta (1) ja pääkannattimen ominaistaajuus lausekkeesta

$$f_0 = \frac{\pi}{2L^2} \sqrt{\frac{(EI)_L}{m}} \quad (5)$$

Tekijä  $(EI)_L$  on pääkannattimien ja pintalaatan yhteinen taiputusjäykkyys pituusyksikköä kohden.

### Taipumakriteeri korkeataajuuksisilla lattioilla

Jos lattia on korkeataajuuksinen, lasketaan pistekuormasta 1 kN aiheutuva staattinen taipuma. Taipuma voidaan arvioida neljältä sivulta tuetun suorakaiteen muotoisen ortotrooppisen laatan taipumana. Voimasta  $F = 1$  kN aiheutuva laatan keskipisteen taipuma on

$$\delta_{\max} = \gamma \cdot \frac{Fl^2}{(EI)_l} \quad (6)$$

jossa

$$\gamma = \frac{4}{\alpha \pi^4} \sum_i \sum_j \frac{1}{(2i-1)^4 + \beta \left( \frac{2j-1}{\alpha} \right)^4}; \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{b}{l} \quad \text{ja} \quad \beta = \frac{(EI)_b}{(EI)_l}$$

Useissa tapauksissa lattiapalkkien suuntaisella reunan tuennalla ei ole merkitystä taipumaan. Tällöin lausekkeen (7) sijaan voidaan käyttää lauseketta

$$\gamma = \frac{1}{42 \cdot \left[ \frac{(EI)_b}{(EI)_l} \right]^{1/4}} \quad (8)$$



Lausekkeiden (7) ja (8) tuloksien ero on enintään 2,5 %, kun  $b/l > 1,0$  ja  $(EI)_l / (EI)_b > 20$ , mutta jos  $b/l = 0,5$ , samaan laskentatarkkuuteen päästään vasta, kun  $(EI)_l / (EI)_b > 300$ .

Jos lausekkeen (6) avulla laskettu taipuma on suurempi kuin lattiasta erotetun korvauspalkin taipuma pistekuormalla 1 kN, vertailutaipumana käytetään korvauspalkin avulla laskettua taipumaa

$$\delta_{\max} = \frac{Fl^3}{48 \cdot s \cdot (EI)_l}, \quad (9)$$

jossa  $s$  = lattiapalkkien etäisyys.

Tässä on taipuman laskemisessa oletettu, että lattiapalkin taipuma 600 mm:n etäisyydellä on sama kuin voiman alla. Mikäli lattian pinta joustaa, paikallisen taipuman merkitys otetaan huomioon kuten korotuslattioiden tapauksessa. Jos lattiapalkit tukeutuvat pääkannattimiin, taipumaan on lisättävä pääkannattimien taipuma.

### Kiihtyvyyksiteeri matalataajuuksilla latioilla

Jos lattia on matalataajuuksinen, kiihtyvyyssamplitudin suuruus arvioidaan lausekkeesta

$$a_{\max} = \frac{R \cdot P}{W \cdot \zeta} \cdot 0,83 \cdot e^{-0,35 \cdot \zeta} \quad (10)$$

jossa  $P=800$  N (kävelijän paino) ja pienennyskerroin  $R=0,7$  ottaa huomioon, että resonanssi-ilmiö ei ehdi kehittyä täyteen arvoonsa herätteen aikana. Lausekkeessa (10) voidaan yleensä käyttää vaimennussuhteena arvoa  $\zeta=0,03$ . Mikäli välipohja sisältää vähän ei-kantavia rakenteita (väliseinät, alaslasketut katot, kanavat, huonekalut jne.), suositellaan vaimennussuhteeksi pienempää arvoa  $\zeta=0,02$ .

Neljältä sivulta tuetun lattian värähtelyssä mukana oleva tehollisen lattian osan paino  $\bar{W}$  arvioidaan lausekkeella

$$W = m \cdot b_{\text{eff}} \cdot l, \quad \text{jossa} \quad (11)$$

$$b_{\text{eff}} = 2,0 \left[ \frac{(EI)_b}{(EI)_l} \right]^{1/4} \cdot l, \quad (12)$$

mutta  $b_{\text{eff}}$  saa kuitenkin enintään arvon 2/3 lattiapalkkeihin nähden poikittaissuuntaisesta lattian kokonaislevydestä.

Jos suorakaiteen muotoinen lattia on toiselta lattiapalkin suuntaiselta reunaltaan tukematon, lausekkeessa (12) käytetään kertoimen 2,0 sijasta kerrointa 1,0.

Jos lattiapalkit (pituus  $l$ ) tukeutuvat pääkannattimiin (pituus  $L$ ), Välipohjan värähtelyssä

mukana oleva tehollinen lattian paino lasketaan lausekkeesta

$$W = \frac{W_l}{1 + f_{0,l}^2 / f_{0,L}^2} + \frac{W_L}{1 + f_{0,L}^2 / f_{0,l}^2} \quad (13)$$

jossa  $W_l$  saadaan suoraan lausekkeista (11) ja (12).

$$W_L = m \cdot l_{\text{eff}} \cdot L, \quad (14)$$

jossa

$$l_{\text{eff}} = 1,6 \left[ \frac{(EI)_l}{(EI)_L} \right]^{1/4} \cdot L, \quad (15)$$

mutta  $l_{\text{eff}}$  saa kuitenkin enintään arvon 2/3 pääkannattimiin nähden poikittaissuuntaisesta lattian kokonaislevydestä. Jos pääkannatin sijaitsee lattian vapaassa reunassa, lattian jäykkyyttä  $(EI)_L$  pienennetään 50 prosentilla.

### Kallistumaehto kaikilla latioilla

Kallistumaehto pistekuormasta 1 kN tulee tarkastaa lattiapalkin päässä, lattian reunoilla palkin ja mahdollisesti tuetun reunan välissä sekä lattian keskellä lattiapalkkien välissä. Korotuslatioilla tarkka laskenta on usein tehtävä FEM-laskentaa tai kokeellista tutkimusta käyttäen. Kelluvilla latioilla kannattaa käyttää apuna mittauksia.

Varmalla puolella oleva arvio palkin pään kulmanmuutoksesta voidaan tehdä tarkastelemalla lattiasta erotettua korvauspalkkia. Tällöin lattian poikittaisjäykkyyden merkitys oletetaan hyvin pieneksi. Kun pistekuorma on palkkien välissä, pintarakenteen kallistuma on helpoimmin arvioitavissa lattian keskellä FEM-laskelmin ja pienimuotoisin kokein.

Lattian reunalla tuetun reunan ja lattiapalkin välissä kallistuman tarkistuksessa tulee pintarakenteen jouston lisäksi ottaa huomioon lattian reunaa lähinnä olevan palkin taipuma. Varmalla puolella oleva arvio lattian kallistumasta tuetun reunan ja lähimmän reunapalkin välissä saadaan arvioimalla kallistuman johtuvan vain reunapalkin taipumasta (lauseke 9). Tällöin lattian poikittaisjäykkyyden vaikutus oletetaan merkityksättömäksi.

### Korotuslattian ja kelluvan lattian yhteisvaikutus

Matalataajuuksisilla latioilla ei tarvitse ottaa huomioon yhteisvaikutusta, vaan mitoituskriteerit tarkistetaan erikseen peruslattialle ja korotuslattialle (tai kelluvalle lattialle).

Korkeataajuuksisilla latioilla tulee taipuma- ja kallistumisehdossa arvioida lattiapalkkien, lattialevyn ja pintarakenteen eri materiaalikerrosten yhteisvaikutus.



### Väliseinien merkitys

Kevyiden väliseinien on joissakin tapauksissa todettu parantavan korkeataajuuksisten lattioiden värähtelyominaisuuksia jopa yhden värähtelyluokan verran. Parantava vaikutus on suurin, kun väliseinä on poikittain lattiapalkistoon nähden ja kun myös lattian pituussuuntaiset reunat on tuettu.

Väliseinien merkitykseen vaikuttaa väliseinätason leikkausjäykkyyden lisäksi väliseinän ja lattian välisen liitoksen jäykkyys. Väliseinän leikkausjäykkyyteen vaikuttavat mm. rakennusmateriaalit, käytetyt kiinnittimet ja väliseinässä olevat aukot. Väliseinän ja lattian välisen liitoksen jäykkyyteen vaikuttaa erityisesti rakennososan paikallinen jousto liittimen välittömässä läheisyydessä.

Koska väliseinien merkityksen laskennallinen arviointi on epävarmaa, väliseinien merkitys voidaan toistaiseksi ottaa huomioon suunnittelussa vain kokemusperäisen tiedon kautta. Suunnittelussa on huomioitava, että värähtelyamplitudit, joihin väliseinän tulisi vaikuttaa, ovat suuruudeltaan vain millimetrin kymmenesosia ja että väliseinän jäykistävän vaikutuksen tulee säilyä myös jatkuvan käytön aikana.

## 3 FEM-laskennan käyttö värähtelysuunnittelussa

Usein yksinkertaistettu värähtelytarkastelu ei ole mahdollista esimerkiksi lattia-alan poikkeavan muodon tai poikkeavien tuentojen takia. Tällöin kävelystä aiheutuvaa välipohjien värähtelyä kannattaa arvioida laskennallisesti käyttämällä elementtimenetelmää. Laskentaa voidaan soveltaa kaikille rakennusmateriaaleille, sekä korkea- että matalataajuuksisille lattioille.

### 3.1 Värähtelyominaisuuksien arviointi

Elementtimenetelmäohjelmistoihin kuuluvaa ominaisraoanalyyysiä käytetään rakenteiden ominaisraajuuksien laskemiseen. Lattian alin ominaisarvo määrää, onko kyseessä matala- vai korkeataajuuksinen lattia. Korkeataajuuksisella lattialla tarkastetaan taipumaehto lattian kriittisimmässä pisteessä. Matalataajuuksisella lattialla tarkastetaan kiihtyvyyssamplitudi ominaisraajuudella tapahtuvalle värähtelylle. Lisäksi FEM-laskentaa voidaan käyttää kallistumakriiteerin laskemiseen ja kelluvan lattian taipumakriiteerin tarkastamiseen.

Kun lasketaan matalataajuuksisten lattioiden kiihtyvyyssamplitudia, suositellaan käytettävissä seuraavia menetelmiä:

1. FEM-laskennan avulla lasketaan ensin ominaisraajuudet  $f_n$  ja niitä vastaavat ominaismassat (modal mass)  $M_n$ . Sen jälkeen laske-

taan kävelyherätteen kutakin taajuuskomponenttia vastaava herätteen suuruus  $F_n$  lausekkeesta

$$F_n = P \cdot 0,83 \cdot e^{-0,35f_n} \quad (16)$$

Sitten arvioidaan kutakin ominaistaajuutta vastaava kiihtyvyyssamplitudi lausekkeesta

$$a_n = \frac{R \cdot F_n}{2M_n \cdot \zeta} \cdot \Phi_n^2 \quad (17)$$

Tekijä  $\Phi_n$  on herätteen suuntainen ominaismuodon komponentti tarkasteltavassa pisteessä. Muut merkinnät ovat samat kuin kohdassa 2.3. Yleensä tarkastellaan ominaismuodon maksimirvon kohtaa, jossa oleva heräte johtaa suurimpiin kiihtyvyyksiin. Lauseke (17) pätee vain tapaukselle, kun heräte  $F_n$  sijaitsee tarkasteltavassa ominaismuodon pisteessä  $\Phi_n$ . Poiketen lausekkeesta (10), lausekkeen (17) nimittäjässä tulee olla tekijä 2. Lopuksi laskettuja kiihtyvyyksiä verrataan taulukossa 3 asetettuun värähtelyn raja-arvoon.

2. Useissa FEM-ohjelmistoissa on mahdollista suorittaa ns. dynaaminen sinipyyhkäysanalyysi halutulla vaimennusasteella  $\zeta$ . Silloin dynaaminen analyysi voidaan suorittaa suoraan yksikköherätteellä taajuusvälillä 0–10 Hz. Tuloksena saadaan rakenteen ominaisraajuudet sekä yksikköherätettä vastaavat kiihtyvyyssamplitudit rakenteen halutuissa pisteissä. Laskemalla kutakin kiihtyvyyssamplitudin huippuarvoa vastaava heräte  $F_n$  lausekkeesta (16) ja kertomalla yksikköherätteen aiheuttamat kiihtyvyyssamplitudit tekijällä  $F_n \cdot R$  saadaan suoraan eri ominaistaajuuksia vastaavat kiihtyvyyssamplitudit. Lopuksi laskettuja kiihtyvyyssamplitudeja verrataan taulukossa 3 asetettuun värähtelyn raja-arvoon. Sinipyyhkäysanalyysi on usein käytöltään havainnollisempi kuin ominaismuotoanalyysi.

Dynaamisessa FEM-laskennassa heräte voidaan mallittaa myös todellisenä. Askelmallituksessa kävelyä mallitetaan voimana ajan funktiona askel askelelta joko samassa paikassa eli paikallaan kävelyä tai liikkuvana tietyllä kävelynopeudella. Askelmallitus on jossain määrin työläs, mutta antaa realistisen kuvan rakenteen siirtymistä ja muista värähtelysuureista eri ajankohdilla. Askelmallitus sopii erityisesti kelluvien lattioiden tarkasteluun sekä korkeataajuuksisille lattioille. Matalataajuuksisilla lattioilla värähtelyn suuruus riippuu voimakkaasti ominaisraajuuden ja askeltaajuuden suhteesta, joten mallinnettava heräte olisi tunnettava eri askeltaajuuksilla. Koska askelmallitukselle ei ole olemassa standardoitua kuormitusmallia, askelmallituksen käyttöä soveltuu toistaiseksi vain tutkimuskäyttöön.

### 3.2 Laskennan tarkkuus

Yleisesti vastaavuus laskenta- ja koetulosten välillä on hyvä staattisten (pistekuorman aiheuttama) ja dynaamisten (kävelyn aiheuttama) siirtymien vertailussa ja vastaavuus jossain määrin heikkenee tarkasteltaessa kävelyn aiheuttamia välipohjien nopeuksia ja kiihtyvyyksiä.

Hyvän laskentatuloksen saamiseksi on oleellista, että välipohjan reunaehdot ja aineominaisuudet on mallinnettu riittävän hyvin. Laskennan alussa tehdään aina ensin ominaistajuusanalyysi, jolloin saadaan tulokseksi lasketut ominaistajuudet. Jos rakenteesta on olemassa myös mitatut ominaistajuudet, voidaan päätellä vertaamalla mitattuja ja laskettuja arvoja, miten hyvin välipohjan eri rakennekerrosten aineominaisuudet on mallissa kuvattu. Aineominaisuksista lähinnä kimmo- ja tiheysominaisuudet ovat oleellimmat.

Erityinen ongelmakohta on eri rakennekerrosten liitosalueet, joiden liitosjäykkyyttä on yleensä vaikea arvioida. Useimmiten äärettömän suuri liitosjäykkyys on riittävän hyvä otaksuma. Toinen ongelmakohta on, kun rakennekerros on ladottu irtonaisena toisen kerroksen päälle, kuten esimerkiksi kelluvissa lattioissa. Tällöin liitosalue ottaa vastaan puristusta, mutta ei vetoa. Näissä tapauksissa joudutaan tekemään epälineaarinen analyysi tarkan tuloksen saamiseksi. Laskenta-aika on tällöin monikymmenkertainen.

## 4 Yhteenvedo

Ehdotetut menetelmät ja esitetyt raja-arvot perustuvat laajaan koeaineistoon, joka sisältää 14 erityyppistä lattiaa. Lattioita testattiin eri jänneväleillä ja värähtelyitä arvioitiin lattian eri kohdista. Testeissä lattioille tehtiin värähtelyiden arviointia sekä mittaamalla että aistinvaraisesti. Esitetyt menetelmät ovat materiaalista riippumattomia.

Ehdotettu lattioiden luokittelu luo uuden, yhtenäisen perustan lattioiden värähtelysuunnittelulle. Tilaa voi asettaa vaatimukset välipohjan värähtelyluokalle ja tuotteen toimittaja voi luokitella oman tuotteensa jännevälin ja rakenneratkaisun mukaan eri värähtelyluokkiin.

Aiheutuvien värähtelyiden voimakkuuden perusteella lattiat jaetaan viiteen värähtelyluokkaan (taulukko 1). Perusteena käytetään värähtelyiden aistittavuutta kehon tuntemuksen perusteella ja värähtelyiden aistittavuutta esineisiin syntyvän värähtelyn perusteella. Asuin- ja toimistorakennuksille on annettu suositus välipohjien vähimmäisluokasta eri käyttötarkoituksissa (taulukko 2). Suunnittelua varten on annettu kriteerit, joiden perusteella voidaan arvioida, mihin värähtelyluokkaan tutkittava lattia kuuluu

(taulukko 3). Luokittelussa on otettu huomioon myös naapurista siirtyvät värähtelyt ja huonetilan koon vaikutus kriteereille asetettuihin raja-arvoihin.

Laskentaa varten esitetään mitoituskriteerit ja raja-arvot ehdotetuille kriteereille (taulukko 3). Raja-arvot perustuvat tutkituista lattioista mittaamalla ja aistinvaraisesti saatuun kokemukseen. Kun tarkastellaan värähtelyiden aistittavuutta kehon tuntemuksen perusteella, kriteerinä käytetään korkeataajuuksisilla lattioilla 1 kN:n paikallisesta kuormituksesta aiheutuvaa taipumaa ja matalataajuuksisilla lattioilla yhden henkilön kävelystä aiheutuvaa kiihtyvyyttä (taulukko 3). Kun tarkastellaan värähtelyiden aistittavuutta esineisiin syntyvän värähtelyn perusteella, kriteerinä käytetään aina 1 kN:n paikallisesta kuormituksesta aiheutuvaa lattian pinnan kallistumaa.

Kriteereissä on myös otettu huomioon lattian pinnan kallistuma, joten kriteereitä voidaan käyttää myös lattian pintalevyn ja alusmateriaalin jäykkyyden merkityksen arviointiin esimerkiksi kelluvilla lattioilla ja asennuslattioilla. Aikaisemmin julkaistut ohjeet eivät sovellu näiden tapausten arviointiin.

Yksinkertaisilla suorakaiteenmuotoisilla lattioilla kriteerit voidaan tarkistaa esitettyä käsinlaskentaa käyttäen, mutta perustapauksesta poikkeavissa tapauksissa tarvitaan esitettyjä FEM-laskentaohjeita. Tarkasteltaessa lattian pinnan kallistumaa voidaan tarvita myös koekellista tutkimusta.

Koska suunnitteluun liittyy monia epätarkkuuksia, laskentamenetelmän toimivuus uudentyyppisille ratkaisuille suositellaan varmistettavaksi rakennuskohteesta tehtävän mittauksin ja aistinvaraisin havainnoin. Testauksessa voidaan käyttää myös tarkempia kriteereitä, joita on laskennallisesti vaikea arvioida. Lähteessä Talja et al. (2002) on esitetty kävelystä aiheutuvien värähtelyjen testausohjelma, joka käsittää kokeiden suorituksen, tulosten analysoinnin ja raportoinnin sekä tulosten tulkintaohjeet.

### LÄHDELUETTELO

- AISC/CISC. 1997. Steel design guide series 11. Floor vibrations due to human activity. American Institute of Steel Construction. 70 s.
- CCMC. 1998. Development of design procedures for vibration controlled spans using engineered wood members. Draft of Concluding report. Canadian Construction Materials Centre. 39 s.
- Hu, L. J. 2000. Serviceability design criteria for commercial and multi-family floors. Canadian Forest Service Report No. 4. Forintek Canada Corp. 126 s. + liitti. 40 s.

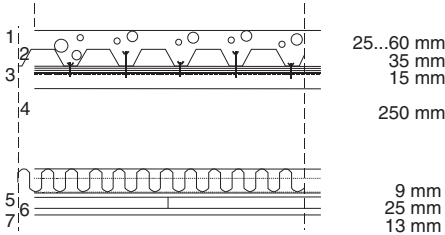
TRY. 2000. Kävelystä aiheutuvat välipohjien värähtelyt. Normikortti nro 11/2000. Helsinki: Teräsrakenneyhdistys. 7 s. + liitt. 4 s.

Talja A., Toratti T., Järvinen E. 2002. Lattioiden värähtelyt, Suunnittelu ja kokeellinen arviointi. Espoo. VTT Tiedotteita 2124. 50 s. + liitt. 12 s.

## LASKENTAESIMERKTI

## Esimerkki 1

Kuvassa olevaa rakennetta on käytetty pientalon välipohjassa. Lattian kaikki reunat tukeutuvat kantaviin seiniin. Arvioidaan laskennallisesti lattian värähtelyluokkaa.



- 1 Pintabetoni K30-2 + verkko #4 - 150
- 2 Teräspoimulevy RAN 35A/0,7 Zn, 2 lisäruuvia joka toiseen poimuun/orsi, kannat jätetään koholle 15 mm
- 3 Vaneri, liimatut ponttisaumatt
- 4 Kantava rakenne, C-profiili C-250, 2 kpl seläkkäin, k400, alaosassa ääneneriste, mineraalivilla 50 mm
- 5 Tuulensuojajaksipsilevy GTS 9
- 6 Joustoranka Z25 k 400
- 7 Kipsilevy

## Suunnittelutiedot

- Välipohjan jännemitta  $l = 7,5$  m  
 Välipohjan leveys  $b = 7,5$  m  
 Lattiapalkkien etäisyys  $s = 400$  m  
 Välipohjan massa + kuorma  $30 \text{ kg/m}^2$   $m_i = 200 \text{ kg/m}^2$   
 Lattian pituussuuntaa vastaava jäykkyys (täysi liittovaikutus)  $(EI)_l = 25 \cdot 10^6 \text{ Nm}^2/\text{m}$   
 Lattian poikittaissuuntaa vastaava jäykkyys  $(EI)_b = 0,3 \cdot 10^6 \text{ Nm}^2/\text{m}$   
 Neperin luku  $e = 2,718$   
 Painovoiman kiihtyvyyys  $g = 9,807$

## Ominaistaajuuden tarkistus

Alin ominaistaajuus lausekkeen (2) mukaan:

$$f_0 = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{(EI)_l}{m_i}} \cdot \sqrt{1 + \left[ 2\left(\frac{l}{b}\right)^2 + \left(\frac{l}{b}\right)^4 \right] \frac{(EI)_b}{(EI)_l}} = 10,1 \text{ Hz}$$

Vertailu lausekkeen (3) yksinkertaistukseen:

$$f_0 = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{(EI)_l}{m_i}} = 9,9 \text{ Hz}$$

Kun lattian alin ominaistaajuus on yli 10 Hz, sitä on tarkasteltava korkeataajuuksisena lattiana.

## Värähtelyluokka taipumaehdon mukaan

Koska palkkijako on alle 600 mm, joka on lähin etäisyys voimasta taipuman laskentapisteeseen, pintalaatan taipumaa ei taipumatarkastelussa tarvitse ottaa huomioon. Arviointi ortotrooppisen laatan taipuma pistevoiman 1 kN kohdalla on lausekkeiden (6) ja (7) mukaan:

$$\delta_{\max} = \gamma \cdot \frac{Fl^2}{(EI)_l} = 0,163 \text{ mm, kun } F = 1000 \text{ kN ja}$$

$$\gamma = \frac{4}{\alpha\pi^4} \sum_{i=1}^{100} \sum_{j=1}^{100} \frac{1}{(2i-1)^4 + \beta \left(\frac{2j-1}{\alpha}\right)^4},$$

$$\text{jossa } \alpha = \frac{b}{l} \text{ ja } \beta = \frac{(EI)_b}{(EI)_l}$$

Vertailu lausekkeen (8) yksinkertaistukseen:

$$\delta_{\max} = \gamma \cdot \frac{Fl^2}{(EI)_l} = 0,162 \text{ mm, kun } \gamma = \frac{1}{42\beta^{1/4}}$$

Lausekkeen (6) avulla laskettu korvauspalkin taipuma

$$\delta = \frac{Fl^3}{48 \cdot s \cdot (EI)_l} = 0,879 \text{ mm}$$

Koska ortotrooppisen laatan taipuma on pienempi kuin korvauspalkin taipuma, vartailutaipumana käytetään ortotrooppisen laatan taipumaa.

Kun oletetaan, että huoneen suurin leveys on sama kuin lattian jänneväli, taulukossa 3 esitettyjä taipumarajoja ei voida korottaa.

Koska laskettu vertailutaipuma on pienempi kuin 0,25 mm, mutta suurempi kuin 0,12 mm, lattia kuuluu taulukon 3 mukaan värähtelyluokkaan B. Tällöin kävelystä aiheutuva lattian värähtely voi kehon tuntemuksen perusteella olla juuri havaittavaa (taulukko 1). Lattian soveltuvuutta erilaisiin käyttötarkoituksiin voidaan arvioida taulukon 2 avulla.

**Värähtelyluokka kallistumaehdon mukaan**  
Yksinkertaistettu kallistumataarkastus (kuva 2) tehdään tässä palkin päässä sekä lattian reunalla. Kallistuma palkin päässä johtuu lattiapalkkien taipumisesta. Lattian reunalla kallistuma johtuu siitä, että lattian reuna ei pääse taipumaan, jolloin lähellä lattian reunaa oleva pistekuorma aiheuttaa lattian pinnan kallistumisen. Kulmanmuutoksen suuruutta arvioidaan tässä vain periaatteellisesti. Tarkempi laskenta tulee tehdä FEM-laskennan avulla.

Edellä on laskettu pistekuormasta 1 kN aiheutuva lattian taipuma ortotrooppisen laatan ja yhden lattiapalkin taipuman avulla. Ortotrooppisen laatan taipuma (0,163 mm) on vain 1/6 yhden lattiapalkin taipumasta (0,879 mm). Tässä vertailussa kulmanmuutoksen yläliikiarvo arvioidaan siten, että korvauspalkin jäykkyydeksi otetaan kahden lattiapalkin käsittävän lattiakaistan jäykkyys.

Yksijänteisen palkin pään kulmanmuutos on suurin, kun pistekuorma 1 kN sijaitsee etäisyydellä 0,42 l palkin päästä. Tällöin kulmanmuutos on

$$\phi = \frac{Fl^2}{15,6 \cdot 2s \cdot (EI)_l} = 1/5555$$

joka vastaa korkeudella 1,2 m vaakasiirtymää 0,216 mm.

Lattian reunaa tarkasteltaessa pistekuorman oletetaan sijaitsevan etäisyydellä 600 mm lattian reunasta. Tässä etäisyys sattuu tarkasteltavan korvauspalkin keskilinjalle, koska palkkiväli on 400 mm. Lausekkeen (6) avulla laskettu korvauspalkin taipuma on

$$\delta = \frac{Fl^3}{48 \cdot 2s \cdot (EI)_l} = 0,439 \text{ mm}$$

Koska tuettu lattian reuna ei pääse siirtymään, korvauspalkin taipumasta aiheutuvan lattian pinnan kallistuman likimääräisarvio on

$$\phi = \frac{\delta}{600 \text{ mm}} = 1/1365$$

joka vastaa korkeudella 1,2 m vaakasiirtymää 0,879 mm.

Selvästi kriittisimmäksi muodostuu lattian pinnan kallistuma lattian reunalla. Koska laskettu vaakasiirtymä korkeudella 1,2 m on pienempi kuin 1,6 mm, mutta suurempi kuin 0,8 mm, lattia kuuluu esineisiin syntyvän värähtelyn perusteella värähtelyluokkaan 4 (taulukko 3). Tällöin kävelystä voisi taulukon 1 mukaan aiheutua selvästi havaittavaa astioiden kilinää ja kasvin lehtien heilumista. On kuitenkin todennäköistä, että tarkemmalla FEM-laskennalla lattian värähtelyluokka olisi vähintään 3. Lattian soveltuvuutta erilaisiin käyttötarkoituksiin voidaan arvioida taulukon 2 avulla.

## Esimerkki 2

Esimerkin 1 rakennetta on käytetty jatkuvana rakenteena toimistorakennuksen välipohjassa (kuva 1). Lattiapalkit tukeutuvat IPE 400 pääkannattamiin. Välipohjan uloimmat reunat tukeutuvat kantaviin seiniin. Lattiapalkit on kiinnitetty pääkannattajien uumaan, joten betoninen pintalaatta ja lattiapalkit on voitu tehdä liittorakenteeksi. Arvioidaan laskennallisesti lattian värähtelyluokka.

### Suunnittelutiedot

Lisätietoja esimerkkiin 1:  
Lattian pääkannattamien jäykkyys leveysyksikköä kohden. Sisältää pintalaatan tehollisen osan (max 0,4l).

$$(EI)_L = 15,9 \cdot 10^6 \text{ Nm}^2/\text{m}$$

Lattian kokonaisuudessa:

$$m_L = m_i + \frac{66,3 \text{ kg/m}}{l} = 209 \text{ kg/m}^2$$

Pääkannattimien jänneväli:

$$L = b$$

Välipohjan kokonaisleveys on lattiapalkkien suunnassa 3l ja pääkannattimien suunnassa 3L.

### Ominaistaajuuden tarkistus

Esimerkistä 1

$$f_{0,l} = 9,9 \text{ Hz}$$

Lausekkeiden (4) ja (5) mukaan:

$$f_{0,L} = \frac{\pi}{2L^2} \sqrt{\frac{(EI)_L}{m_L}} = 7,7 \text{ Hz}$$

$$f_0 = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{f_{0,l}^2} + \frac{1}{f_{0,L}^2}}} = 6,1 \text{ Hz}$$

Koska alin ominaistaajuus on alle 10 Hz, väli-pohjaa on tarkasteltava matalataajuuksisena lattiana.

### Värähtelyluokka kiihtyvyysehdon mukaan

Tehollinen lattian leveys lausekkeen (12) mukaan:

$$b_{ef} = 2,0 \cdot \left[ \frac{(EI)_b}{(EI)_l} \right]^{1/4} \cdot l = 4,96 \text{ m}$$

$$\text{Koska } \frac{b_{ef}}{3L} = 0,22 < \frac{2}{3}, b_{eff} = b_{ef} = 4,96 \text{ m}$$

Tehollinen lattian leveys lausekkeen (15) mukaan:

$$l_{ef} = 1,6 \cdot \left[ \frac{(EI)_l}{(EI)_L} \right]^{1/4} \cdot L = 13,4 \text{ m}$$

$$\text{Koska } \frac{l_{ef}}{3l} = 0,60 < \frac{2}{3}, l_{eff} = l_{ef} = 13,4 \text{ m.}$$

Koko lattian tehollinen massa lausekkeiden (11), (13) ja (14) mukaan:

$$W_l = m_l \cdot b_{eff} \cdot l = 7,4 \cdot 10^3 \text{ kg}$$

$$W_L = m_L \cdot l_{eff} \cdot b = 21,0 \cdot 10^3 \text{ kg}$$

$$W = \frac{W_l}{1 + f_{0,l}^2 / f_{0,L}^2} + \frac{W_L}{1 + f_{0,L}^2 / f_{0,l}^2} = 15,9 \cdot 10^3 \text{ kg}$$

Kiihtyvyydsamplitudin suuruus lausekkeen (10) mukaan:

$$R = 0,7 \quad P = 800 \text{ N} \quad \zeta = 0,03$$

$$a_{\max} = \frac{R \cdot P}{W \cdot \zeta} \cdot 0,83 \cdot e^{-0,35 t_0} = 0,116 \text{ m/s}^2$$

Kun oletetaan, että huoneen suurin leveys on sama kuin lattian jänneväli, taulukossa 3 esitettyjä kiihtyvyydsrajoja ei voida korottaa.

Koska laskettu kiihtyvyydsamplitudi on pienempi kuin  $0,12 \text{ m/s}^2$ , lattia kuuluu taulukon 3 mukaan värähtelyluokkaan D, mutta on hyvin lähellä luokkaa E. Tällöin kävelystä aiheutuva lattian värähtely on kehon tuntemuksen perusteella vähintään selvästi havaittavaa (taulukko 1). Lattia ei tarkastelun perusteella sovellu asuin- ja toimistorakennuksiin (taulukko 2). Lattian värähtelyominaisuuksia voidaan parantaa parhaiten lisäämällä lattian pääkannattimien ja lattiapalkkien jäykkyyttä sekä lattian massaa. Vaihtoehtoisesti voidaan yrittää tehdä lattiasta korkeataajuuksinen lattia, jolloin lisätään lattian jäykkyyttä, mutta lattian massaa pienennetään.

### Värähtelyluokka kallistumaehdon mukaan

Värähtelyluokan tarkistus tehdään kuten esimerkiksi 1. Koska lattiapalkit ovat jatkuvia, palkin taipuma reunakentässä on noin 27% pienempi kuin yksijänteisellä palkilla. Täten myös lattian reunan kallistuminen pienenee arvoon  $0,64 \text{ mm}/1,2 \text{ m}$  ja lattian värähtelyluokaksi saadaan luokka 3 (taulukko 3).