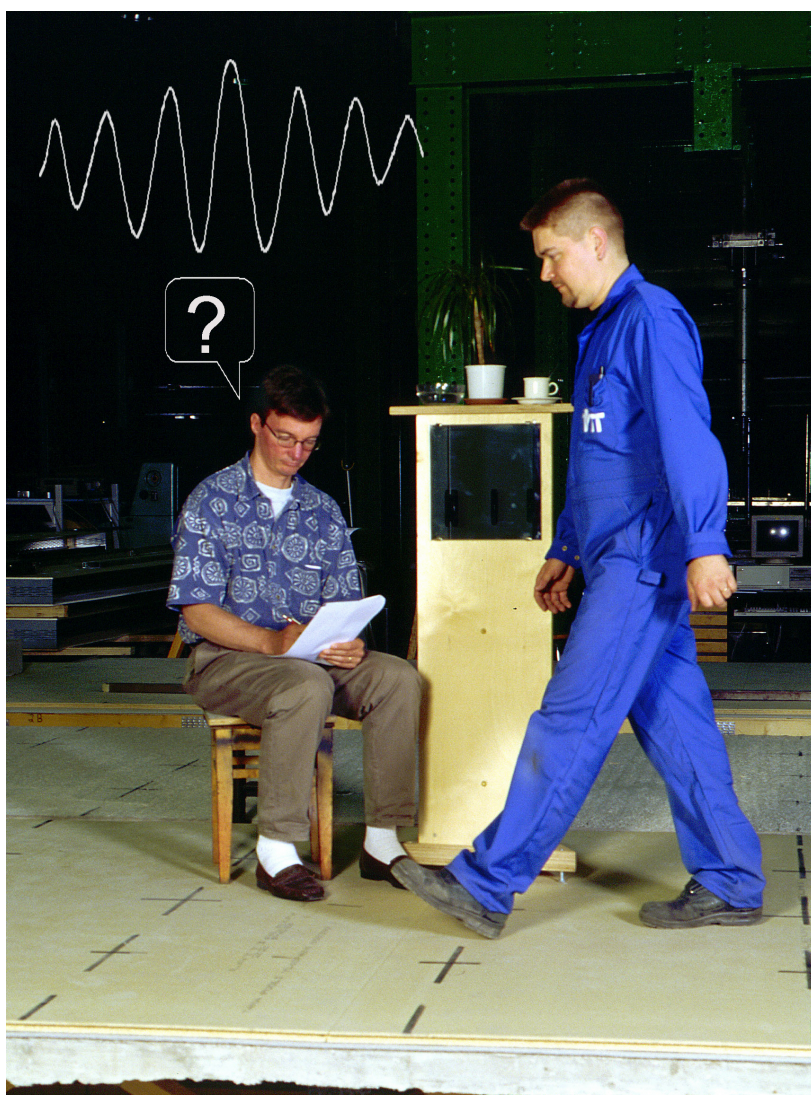


Asko Talja, Tomi Toratti, Erkki Järvinen

Lattioiden värähtelyt

Suunnittelu ja kokeellinen arviointi



Lattioiden värähtelyt

Suunnittelu ja kokeellinen arviointi

Asko Talja, Tomi Toratti & Erkki Järvinen

VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka



ISBN 951-38-5937-1 (nid.)
ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 951-38-5938-X (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)
ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 2002

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 4374

Statens tekniska forskningscentral (VTT), Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 4374

Technical Research Centre of Finland (VTT), Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 4374

VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Rakenne- ja talotekniikkajärjestelmät,
Kemistintie 3, PL 1805, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 7004

VTT Bygg och transport, Konstruktioner och husteknik, Kemistvägen 3, PB 1805, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 7004

VTT Building and Transport, Structures and Building Services,
Kemistintie 3, P.O.Box 1805, FIN-02044 VTT
Finlandphone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 7004

Toimitus Kerttu Tirronen

Otamedia Oy, Espoo 2002

Talja, Asko, Toratti, Tomi & Järvinen, Erkki. Lattioiden värähtelyt. Suunnittelu ja kokeellinen arviointi [Vibration of floors. Design and testing procedures]. Espoo 2002. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita – Research Notes 2124. 50 s. + liitt. 12 s.

Avainsanat floors, vibrations, residential buildings, office buildings, tests, disturbance, construction materials, design criteria, frequency

Tiivistelmä

Julkaisussa esitetään menetelmät, joilla voidaan arvioida asuin- ja toimistorakennusten välipohjiin kävelystä aiheutuvien värähtelyiden suuruutta ja haitallisuutta. Esitetyt laskennalliset ja kokeelliset menetelmät ovat materiaalista riippumattomia.

Laskennallisessa 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 käsinlaskentaa tai FEM-laskentaa käyttäen. Kriteereille asetettujen raja-arvojen perusteella välipohjat jaetaan viiteen eri värähtelyluokkaan. Suunnittelussa käytettävän värähtelyluokan valinta riippuu sallittavan häiriön suuruudesta.

Värähtelykäyttäytymisen kokeellisesta arvioimisesta esitetään suosituksia lattian värähtelyluokan määrittämiselle. Luokittelu tehdään vertaamalla mitattuja kävelystä aiheutuvia värähtelyjä, paikallisesta kuormituksesta aiheutuvia taipumia ja paikallisesta kuormituksesta aiheutuvia kallistumia ehdotettuihin raja-arvoihin. Lisäksi julkaisussa esitetään menetelmät aistinvaraisen arvioinnin suorittamiseksi ja tulkitsemiseksi.

Ehdotetut menetelmät ja raja-arvot perustuvat neljäntoista erityyppisen lattian testiin. Yhteensä testejä on noin sata. Testeissä lattioille on tehty värähtelyiden arviointi mitaamalla ja aistinvaraisesti. Julkaisun liitteessä esitetään yhteenveto mitattujen ja aistinvaraisten arviointien vastaavuudesta.

Talja, Asko, Toratti, Tomi & Järvinen, Erkki. Lattioiden värähtelyt. Suunnittelu ja kokeellinen arviointi [Vibration of floors. Design and testing procedures] Espoo 2002. Technical Research Centre of Finland, VTT Tiedotteita – Research Notes 2124. 50 p. + app. 12 p.

Keywords floors, vibrations, residential buildings, office buildings, tests, disturbance, construction materials, design criteria, frequency

Abstract

This report describes calculation and testing methods for the rating of walking induced vibrations on floors of residential and office buildings. The methods are independent of the building material used in the floor.

For the design of floors for vibrations, design criteria and limit values for these criteria are given. When the floor is evaluated for the body perception of vibrations, the criteria to be used are the local deflection of a 1 kN point load or the floor acceleration due to the walking of a person. The deflection criterion should be used if the floor fundamental frequency is over 10 Hz, otherwise the acceleration criterion is used. When the vibrations are rated based on their effects on objects, either visual movements or sounds, the inclination of the floor surface caused by a 1 kN point load is used as a basis. For the verification of these criteria, instructions for manual design methods and FEM-methods are given. Based on the limit values of the above criteria, floors are classified into five different vibration classes. The decision of the vibration class to be used in the design of the building is founded on the acceptability level of the vibration disturbance permitted.

Recommendations are given for the testing of floor vibrations and in choosing the vibration class for a particular floor. The floor classification can be done by comparing measured walking induced vibrations, local deflections and floor inclinations caused by a point load to the proposed limit values for the different vibration classes. Additionally, this report describes a testing method and a test result interpretation procedure to be used when rating the floor by subjective vibration experiments.

The recommended methods and limiting criteria values are based on experiments carried out on fourteen different types of floors from different materials. Altogether, about one hundred floors have been tested. Both vibration measurements and subjective floor ratings have been done in these floor tests. In the appendix of the report, a summary analysis of the correlation between the vibration measurements and the subjective ratings is given.

Alkusanat

Tämä julkaisu liittyy VÄRE – Värähtelyn ja äänenhallinta -teknologiaohjelman (1999–2002) tutkimushankkeeseen *Asuinrakennusten välipohjien matalien äänien ja värähtelyiden hallinta*. Julkaisussa on tehty yhteenveto hankkeen osasta *Asuinrakennusten välipohjien mekaanisten värähtelyjen hallinta*. Tutkimus toteutettiin VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikassa vuosina 2000–2002. Tutkimuksen ovat rahoittaneet Teknologian kehittämiskeskus (Tekes), Ympäristöministeriö, Rautaruukki Oyj, Suomen Betonitieto Oy, Sepa Oy, Finnforest Oyj, Sasmox Oy, Gyproc Oy, Nordtest ja International Iron and Steel Institute (IISI).

Tutkimuksen tavoitteena oli hankkia valmiudet arvioida laskennallisesti ja kokeellisesti eri materiaaleista valmistettujen asuin- ja toimistorakennusten välipohjien kävelystä aiheutuvia värähtelyitä ja niiden haitallisuutta.

Tutkimushankkeen johtoryhmän ovat muodostaneet

Markku Riihimäki, Sasmox Oy (puh. joht. 28.2.2001 asti),
Unto Suksi, Sasmox Oy (puh. joht. 1.3.2001 lähtien),
Matti Evola, Tekes,
Anja Leinonen, Ympäristöministeriö,
Tarmo Mononen, Rautaruukki Oyj,
Heikki Sarin, Parma Betonila Oy
Hannu Pellikka, Sepa Oy,
Jouni Hakkarainen, Finnforest Oyj,
Kai Renholm, Gyproc Oy,
Ilkka Eerola, KATMI Consulting Oy ja
Tuija Vihavainen, VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka.

Tutkimuksen vastuullisena johtajana on toiminut tutkimusprofessori Tuija Vihavainen ja projektipäällikkönä johtava tutkija Juhani Parmanen, molemmat VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikasta. Osaprojektin *Asuinrakennusten välipohjien mekaanisten värähtelyjen hallinta* projektiryhmään ovat osallistuneet erikoistutkija Asko Talja, erikoistutkija Tomi Toratti ja tutkija Erkki Järvinen, kaikki VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikasta. Asko Talja on vastannut tämän osaprojektin toteutuksesta, testauksista ja ohjekehityksestä, Tomi Toratti FEM-analyyseistä ja Erkki Järvinen mittausten suorituksesta ja tulosten analysoinnista.

Raportin osuus *Laskennallinen värähtelysuunnittelu* on käsitelty työryhmässä, jonka jäsenet olivat Jouni Hakkarainen, Heikki Sarin, Kai Renholm, Tomi Toratti ja Asko Talja.

Sisällysluettelo

Abstract.....	4
Alkusanat.....	5
1. Johdanto.....	9
1.1 Kävely häiriölähteenä.....	9
1.2 Kävelystä aiheutuvat häiriöt.....	9
1.3 Tutkimuksen osatehtävät.....	10
2. Laskennallinen värähtelysuunnittelu.....	12
2.1 Ohjeen taustaa.....	12
2.1.1 Ohjeen tarkoituksesta.....	12
2.1.2 Suunnittelun tarkkuudesta.....	13
2.1.3 Valmistusepätkämerkityksestä.....	14
2.1.4 Kokeellinen varmennus.....	14
2.2 Kriteerit ja raja-arvot.....	14
2.2.1 Värähtelyiden luonne erilaisilla lattioilla.....	14
2.2.2 Värähtelyiden haitallisuus.....	15
2.2.3 Kriteerit ja raja-arvot.....	15
2.3 Värähtelyominaisuuksien arviointi käsinlaskennalla.....	20
2.3.1 Käytetyt merkinnät.....	20
2.3.2 Lattian alin ominaistajuus.....	21
2.3.3 Taipumakriteeri korkeataajuuksilla lattioilla.....	22
2.3.4 Kiihtyvyydekriteeri matalataajuuksilla lattioilla.....	23
2.3.5 Kallistumaehto kaikilla lattioilla.....	24
2.3.6 Korotuslattian ja kelluvan lattian vaikutus peruslattian värähtelyominaisuuksiin.....	24
2.3.7 Väliseiniä merkityksestä.....	25
3. FEM-laskennan käyttö värähtelysuunnittelussa.....	26
3.1 Värähtelyominaisuuksien arviointi.....	26
3.2 Laskennan tarkkuudesta.....	27
4. Värähtelykäyttämisen kokeellinen arviointi.....	29
4.1 Johdanto.....	29
4.2 Aistinvarainen arviointi.....	29
4.2.1 Kokeiden suoritus.....	30
4.2.2 Havainnoijat ja havainnot.....	32
4.2.3 Värähtelyiden suuruuden ja hyväksyttävyyden arviointi.....	33

4.2.4	Arviointitulosten hyödyntäminen.....	35
4.3	Kävelyn aiheuttaman värähtelyn suora mittaaminen	35
4.3.1	Kokeiden suoritus.....	35
4.3.2	Värähtelyä kuvaavat tunnusluvut.....	36
4.3.3	Mittaustulosten hyödyntäminen	39
4.3.3.1	Matalataajuiset lattiat.....	39
4.3.3.2	Korkeataajuiset lattiat.....	40
4.3.3.3	Vaakasuuntaiset värähtelyt.....	41
4.4	Ominaistaajuuden ja vaimennuksen määrittäminen.....	42
4.4.1	Kokeiden suoritus.....	42
4.4.2	Mittaustulosten hyödyntäminen	44
4.5	Taipumanmittaukset	44
4.5.1	Kokeiden suoritus.....	44
4.5.2	Mittaustulosten hyödyntäminen	45
4.6	Kallistumamittaukset.....	45
4.6.1	Kokeiden suoritus.....	45
4.6.2	Mittaustulosten hyödyntäminen	45
5.	Yhteenveto	46
5.1	Lattioiden luokittelu	46
5.2	Laskentakriteerit	47
5.3	Värähtelykriteerit testauksessa	47
5.4	Ehdotukset jatkotoimiksi.....	48
	Lähdeluettelo	50

Liitteet

Liite A: Englanninkielinen artikkeli asuin- ja toimistorakennusten lattioiden luokittelusta ja asetettujen raja-arvojen vertailu kokeelliseen aineistoon

1. Johdanto

1.1 Kävely häiriölähteenä

Tutkimuksen 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 vuorokaudenaika, joilla myös on merkitystä värähtelyn häiritsevyydelle.

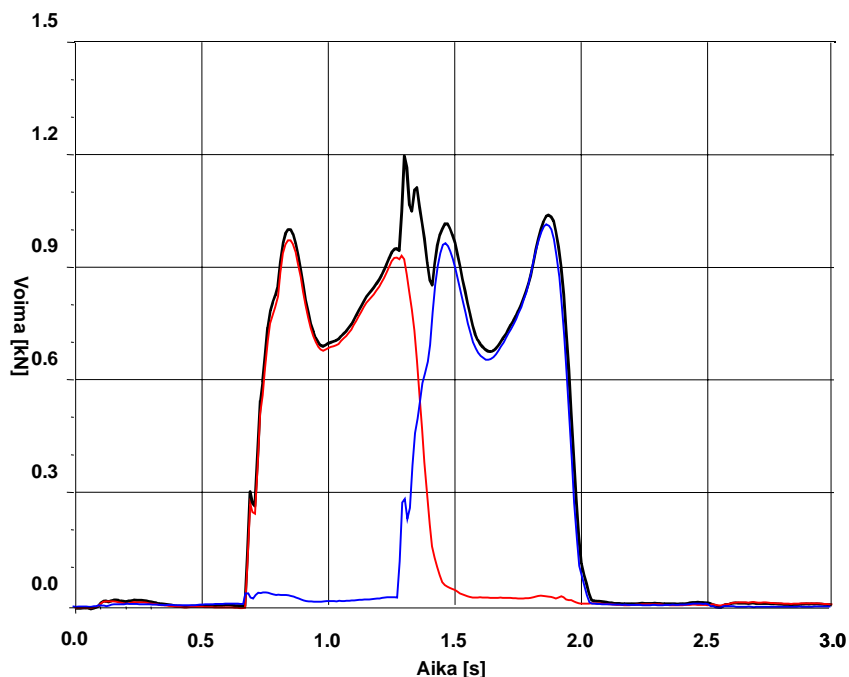
Ihminen voi kokea värähtelyt haitallisiksi joko suoraan kehon tai esineiden värähtelyiden kautta. Asuin- ja toimistorakennuksissa häiritsevät värähtelyt aistitaan yleensä joko kehon tuntemuksina, kasvien lehtien ja esineiden heilumisena tai astioiden ja esineiden aiheuttamina ääнинä.

1.2 Kävelystä aiheutuvat häiriöt

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 aiheuttamiaan värähtelyjä eikä lattian notkumista, vaikka muut ympärillä olevat ihmiset voivat pitää häiriötä hyvinkin epämiellyttävänä. Paikallaan oleva ihminen voi kokea toisen ihmisen kävelystä aiheutuvat lattian värähtelyt haitalliseksi, jos kävelyn jaksolliset kuormituskomponentit vahvistuvat liiaksi resonanssi-ilmiön vuoksi, jos kantapäähän isku lattiaan aiheuttaa liian suurta tärinää tai jos lattia notkuu liiaksi askelten alla.

Kävelystä aiheutuva välipohjan värähtely riippuu pääasiassa massasta ja lattian ominaisvärähtelyn taajuudesta. Raskailla lattioilla värähtelyn voimakkuuteen vaikuttaa myös vaimennus. Kun lattian massa on suuri ja ominaistaajuus pieni, värähtelyä hallitsee ominaisvärähtely. Kun taas lattian massa on pieni ja ominaistaajuus suuri, kävelykuormituksesta aiheutuvat taipumat hallitsevat värähtelyä. Ilmiöön perustuen lattiat jaetaan matalataajuuksisiin ja korkeataajuuksisiin lattioihin. Yleensä kevyet lattiat ovat korkeataajuuksisia ja raskaat lattiat matalataajuuksisia.



Kuva 1. Kävelykuormituksen syntyminen vasemman ja oikean jalan kosketusvoimasta.

Kävely saattaa aiheuttaa myös välillisiä häiriöitä, esimerkiksi astiastojen kilinää ja kasvien lehtien heilumista. Näiden värähtelyjen haitallisuuteen vaikuttaa pääasiassa lattian paikallinen painuminen yksittäisten askelten alla, mistä aiheutuu esimerkiksi kaapiston tai kukkatelineen kallistumista. Tällaiset häiriöt ovat tyypillisiä kelluvilla lattioilla, korotuslattioilla tai myös lattioilla, joiden pintalevytyks on joustava tai lattian poikittainen jäykkyys on pieni.

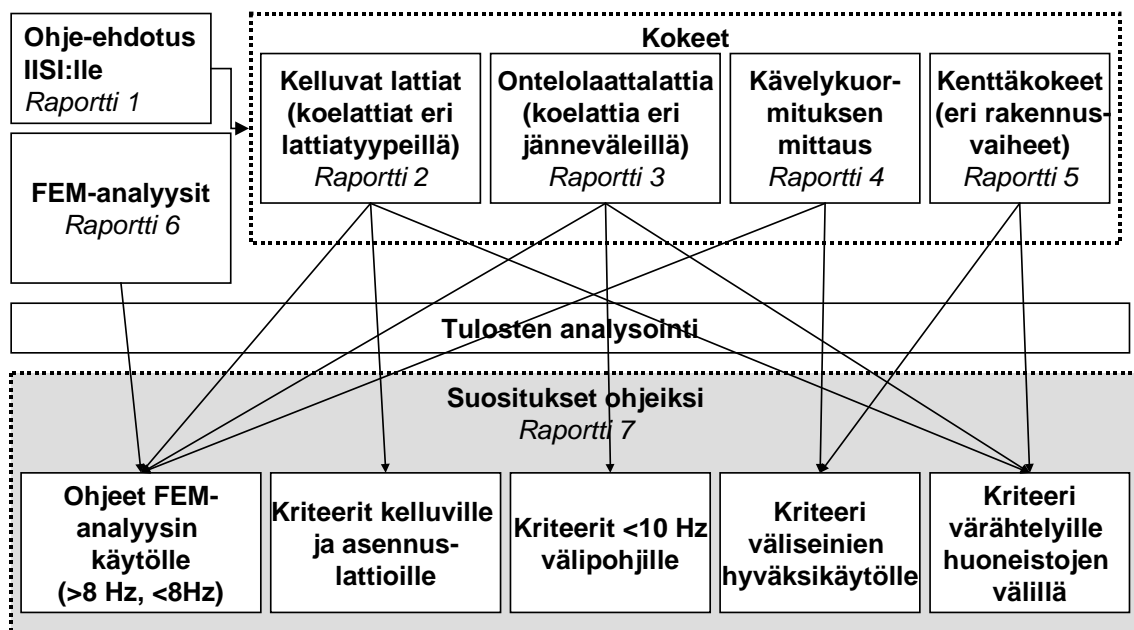
1.3 Tutkimuksen osatehtävät

Tutkimus jaetaan seuraaviin osatehtäviin (kuva 2):

1. Selvitetään aikaisempi tutkimus ja osaaminen. Tulokset julkaistaan IISI:lle (International Iron and Steel Institute) tehtävässä ohje-ehdotuksessa, joka koskee teräsrunkoisten välipohjien värähtelymitoitusta ja värähtelyjen haitallisuuden kokeellista arviointia.
2. Selvitetään erilaisten kelluvien lattioiden värähtelykäyttäytymistä aistinvaraisesti ja mittauksin.
3. Selvitetään raskaille lattioille soveltuvia suunnittelukriteereitä laboratorioolosuhteissa ontelolattialattioille tehdyillä mittauksilla ja aistinvaraisella arvioinnilla.

4. Selvitetään huonetilan koon vaikutusta kävelystä aiheutuvan dynaamisen kuormituksen suuruuteen mittaamalla kävelystä aiheutuvaa kuormitusta laboratorioolosuhteissa.
5. Selvitetään laskentakriteerien soveltuvuutta ja kevyiden väliseinien vaikutusta lattian värähtelyominaisuuksiin mittaamalla muutaman toteutettavan rakennuskohteen välipohjien värähtelyt eri rakennusvaiheissa.
6. Selvitetään FEM-analyysin soveltuvuutta kelluvien lattioiden ja raskaiden lattioiden analysointiin vertailemalla FEM-laskennalla saatuja tuloksia laboratorikokeissa saatuihin tuloksiin.
7. Ohjeistetaan saatu kokemus soveltuvista värähtelyn raja-arvoista, värähtelysuunnittelusta, FEM-analyysin käytöstä ja värähtelykäyttämisen kokeellisesta arvioinnista. Tulokset julkaistaan raporttina *Asuin- ja toimistorakennusten lattioiden värähtelysuunnittelu ja värähtelykäyttämisen kokeellinen arviointi* (tämä raportti).

Osatehtävien tulokset on esitetty yksityiskohtaisesti kuvan 2 mukaisissa projektin työraporteissa



Kuva 2. Tutkimuksen eri osatehtävät ja tavoitellut tulokset.

2. Laskennallinen värähtelysuunnittelu

2.1 Ohjeen taustaa

Ohjeen perusteena ovat seuraavat Finnsteel- ja VÄRE-teknologiaohjelmissa tehdyt 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) ja
- testaustulokset eri rakennuskohteiden lattioiden värähtelyistä (2002).

Lisäksi käytössä on ollut joukko muita tuotekehitystoimeksiantoihin liittyviä testaustuloksia.

Tällä hetkellä on Suomessa teräsrunkoisille välipohjille käytössä TRY:n normikortti nro 11/2000. Sitä on ehdotettu myös International Iron and Steel Instituten (IISI) julkaisemaksi teräsrakennearan kansainväliseksi käytännöksi (Burstarand & Talja 2000). 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 keveillä teräsrunkoisilla välipohjilla (1999) saatuja kokemuksia.

Kanadassa puurunkoisilla välipohjilla saadut uudemmat koetulokset (Hu 2000) ja VÄPRO-projektissa saadut tulokset osoittavat, että CCMC:n ja TRY:n ohjeet voivat tietyissä tapauksissa johtaa epävarmaan mitoitukseen, mikä on otettu huomioon tätä ohjetta laadittaessa. Tarkoituksena on, että myös TRY:n normikortti ja IISI:n ohje päivitetään tämän ohjeen mukaiseksi.

2.1.1 Ohjeen tarkoituksesta

Ohjeen on tarkoitus antaa perusteet lattioiden tuotekehitystyötä varten. 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 ilkeilyä aiheutettua värähtelyä ei katsota tässä asuin- ja toimistotilojen suunnitteluperusteeksi.

Tätä ohjetta voidaan käyttää seuraavin edellytyksin:

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

Siten menetelmää ei tule käyttää esim. 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 värähtelyn aiheuttamiseen, aistivat vähemmän herkästi värähtelyä kuin paikallaan olevat henkilöt.

2.1.2 Suunnittelun tarkkuudesta

Ohjeessa annetaan raja-arvot värähtelykriteereille ja laskentaohjeet värähtelykriteerien arvioimiseksi.

Lattioiden värähtelytarkastelu voidaan värähtelyiden hyväksyttävyyden suhteen rinnastaa ääneneristävyyksivaatimukseen. Havaittavuus, hyväksyttävyyden 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 voimakkaita. Toisaalta jos asukkaalta kysytään, mikä värähtely on hyväksyttävää, luokitellaan helposti heikotkin värähtelyt epämiellyttäviksi. Vaativin asukas ei saata hyväksyä 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 ominaistajuutta ja vaimennusta.

2.1.3 Valmistusepäätarkkuuksien merkityksestä

Värähtelyominaisuudet eivät riipu pelkästään lattiatyypistä, lattian mitoista ja lattiaa tukevista rakenteista. Värähtelyominaisuuksiin vaikuttavat myös eri rakennekerrosten ja niiden välisten liitosten jousto sekä valmistus- ja asennusepäätarkkuudet. Eri rakennekerrosten väliset kontaktipinnat ja liitokset lattiaa tukeviin rakenteisiin tulee suunnitella mahdollisimman jäykiksi. Erityisesti on kiinnitettävä huomiota siihen, 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 mitoituskäyttöä. Pitkäaikaistoimivuudessa tulee arvioida myös eri rakennekerrosten väliset kontaktiongelmat, jotka voivat aiheutua esimerkiksi eroista materiaalien virumis-, lämpölaajenemis- tai kosteuskäyttäytymisessä. Koska haitalliset värähtelyamplitudit ovat usein vain muutaman kymmenesosan millimetrin luokkaa, pienetkin materiaalien suoruus-, kontakti- tai asennusvirheet voivat merkittävästi huonontaa lattian värähtelyominaisuuksia.

2.1.4 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 muutaman vuoden kuluttua.

2.2 Kriteerit ja raja-arvot

2.2.1 Värähtelyiden luonne erilaisilla lattioilla

Tässä esityksessä lattiat on jaettu seuraaviin ryhmiin:

1. Matalataajuiset lattiat, joiden alin ominaistajuus on alle 10 Hz. Niiden paino on yleensä yli 300 kg/m², ja lattian jänneväli on usein yli 10 m. Tällaisilla lattioilla lattian värähtelyssä erottuu selvästi lattian ominaisvärähtely, josta eri askelten aiheuttama värähtely on vaikea erottaa. Ihmisen keho voi tuntea lattian ominaisvärähtelyn haitalliseksi.

2. Korkeataajuiset lattiat, joiden alin ominaistajuus on yli 10 Hz. Niiden paino on yleensä alle 300 kg/m², ja lattioiden jänneväli on yleensä 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 korkeataajuisien 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 korkea- että matalataajuisien lattioiden kanssa.

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

2.2.2 Värähtelyiden haitallisuus

Ihmisen keho ja monet esineet ovat herkkiä lattioiden värähtelyille. Kehon voi aistia pienetkin värähtelyt epämiellyttävinä. 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.

2.2.3 Kriteerit 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. Tausta-aineistoa ehdotetulle luokittelulle on esitetty liitteessä A.

Taulukko 1. Kuvaus mahdollisesta värähtelyn voimakkuudesta eri värähtelyluokissa.

Värähtelyiden aistittavuus kehon tunte- muksen perusteella		Värähtelyiden aistittavuus esineisiin synty- vän värähtelyn perusteella	
A	Värähtely ei ole yleensä havaitta- vissa.	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 ha- vaittavaa.
D	Värähtely on selvästi havaittavaa.	4	Astioiden kilinä ja kasvin lehtien heiluminen on selvästi havaittavaa.
E	Värähtely on voimakasta.	5	Astioiden kilinä ja kasvin lehtien heiluminen on voimakasta.

Taulukossa 2 on esitetty esimerkkejä asuin- ja toimistorakennusten vähimmäisluokituksesta. Luokituksesta 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 soveltuvuudesta esineiden värähtelyjen haitallisuuden arviointiin (Liite A). Täten esimerkiksi luokan C3 sijaan suositellaan toistaiseksi luokkaa C2 ja luokan B2 sijaan luokkaa B1.

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.

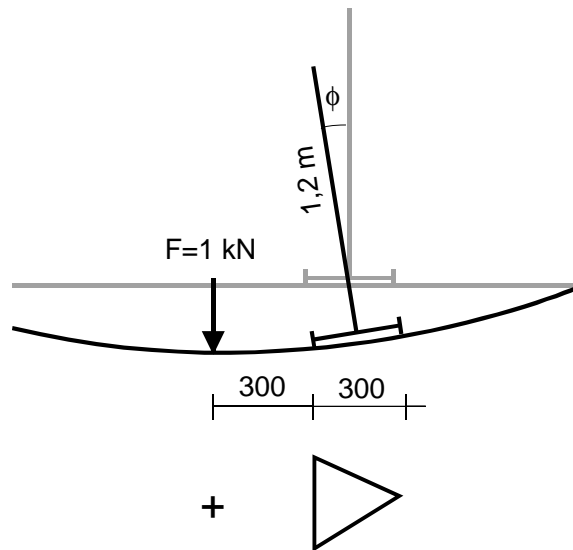
Taulukossa 3 on esitetty suositus laskennassa käytettäviksi raja-arvoiksi. Taustaineistoa ehdotetuille värähtelyn raja-arvoille on esitetty liitteessä A. Raja-arvot on annettu seuraaville lattian ominaisuuksille:

- Lattian alin ominaistaajuus f_0 [Hz]. Ominaistaajuuden arvo $f_0 = 10$ Hz jakaa lattiat matala- ja korkeataajuuksisiin lattioihin.
- Sallittu kiihtyvyyssamplitudi a [m/s^2]. Raja-arvo koskee matalataajuuksisten lattioiden puhtaasti ominaistaajuudella tapahtuvaa värähtelyä.
- Paikallisesta voimasta 1 kN aiheutuva sallittu siirtymä δ [mm]. Taipumaehtoä käytetään korkeataajuuksisilla lattioilla, korotuslattioilla ja kelluvilla lattioilla. Voiman etäisyys tarkasteltavaan pisteeseen on vähintään 600 mm. Siirtymä voi useampi-
aukkoisen rakenteen tapauksessa olla myös ylöspäin.
- Paikallisesta voimasta 1 kN aiheutuva kallistuma ϕ (kuva 3) Ehtoa käytetään matala- ja korkeataajuuksisille lattioille sekä myös kelluville lattioille ja korotuslattioille, kun esineiden värähtely on hyväksyttävyyssuhteena. Kallistus määritetään lattian pinnasta tasasivuisen kolmion muotoisen alueen kallistumana, 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 Eurocode-standardeissa asetetut lujuus- ja taipumaehdot.

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

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

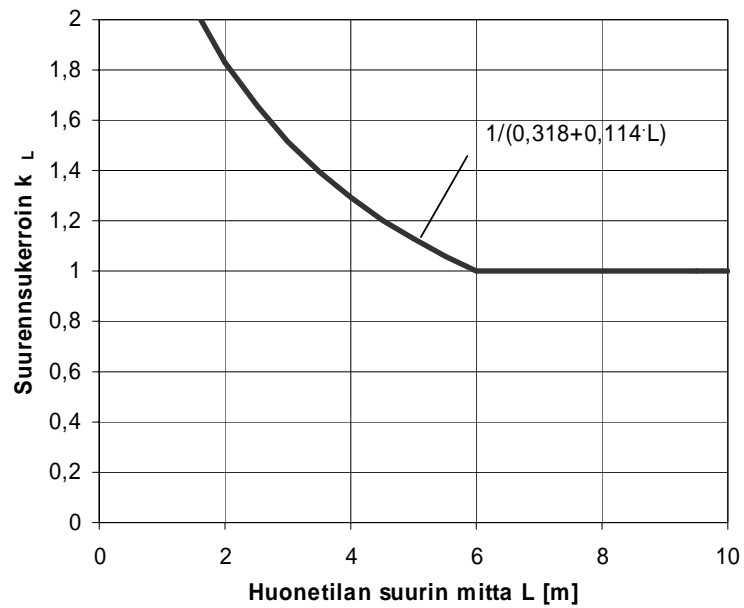
Pienennystä ei käytetä kallistumaehdossa eikä huoneistosta toiseen siirtyvien värähtelyiden yhteydessä. Kertoimella otetaan huomioon, että pienissä tiloissa asukkaiden kävelynopeus on keskimäärin pienempi kuin suurissa tiloissa. Tällöin myös kävelystä aiheutuva dynaaminen kuormitus on pienempi. Kuvassa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



Kuva 3. Paikallisesta kuormituksesta aiheutuva lattian pinnan kallistuma.

Taulukko 3. Laskennassa käytettävät raja-arvot.

Matalataajuiset lattiat		Korkeataajuiset 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	$\phi \leq 0,2 \text{ mm/1,2 m}$
B	$a \leq 0,05 \text{ m/s}^2$	B	$\delta \leq 0,25 \text{ mm}$	2	$\phi \leq 0,4 \text{ mm/1,2 m}$
C	$a \leq 0,075 \text{ m/s}^2$	C	$\delta \leq 0,5 \text{ mm}$	3	$\phi \leq 0,8 \text{ mm/1,2 m}$
D	$a \leq 0,12 \text{ m/s}^2$	D	$\delta \leq 1,0 \text{ mm}$	4	$\phi \leq 1,6 \text{ mm/1,2 m}$
E	$a > 0,12 \text{ m/s}^2$	E	$\delta > 1,0 \text{ mm}$	5	$\phi > 1,6 \text{ mm/1,2 m}$



Kuva 4. Kertoimen k_L riippuvuus lattian suurimmasta mitasta L .

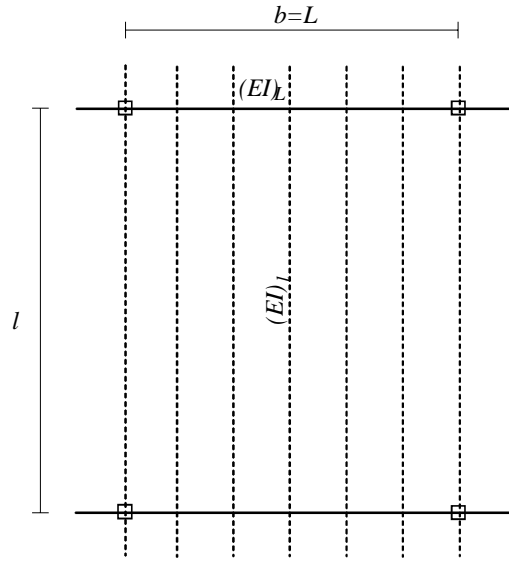
2.3 Värähtelyominaisuuksien arviointi käsinlaskennalla

2.3.1 Käytetyt merkinnät

Ohjeen lausekkeissa on käytetty seuraavia merkintöjä ja laatuja:

a_{\max}	[m/s ²]	kävelystä aiheutuva laskettu kiihtyvyys
a_{sall}	[m/s ²]	sallittu kiihtyvyys
b	[m]	lattian leveys
b_{eff}	[m]	lattian värähtelevän osan tehollinen leveys
$e=2,718$	[-]	Neperin luku
s	[m]	lattiapalkkien välinen etäisyys
f_o	[Hz]	lattian alin ominaistajuuus
g	[m/s ²]	painovoiman kiihtyvyys
l	[m]	lattiapalkkien jänneväli
m	[kg/m ²]	koko välipohjan massa lattian pinta-alayksikköä kohden + hyötykuormasta osuus 30 kg/m ²
L	[m]	pääkannattimien jänneväli
E_l	[N/m ²]	lattian pituussuuntaa l vastaava redusoitu kimmokerroin
I_l	[m ⁴ /m]	lattian pituussuuntaa l vastaava, leveysyksikköä kohden laskettu taivutusjäyhyys
$(EI)_b$	[Nm ² /m]	lattian pienempi, leveyssuuntaa b vastaava jäykkyys $E_b I_b$
$(EI)_l$	[Nm ² /m]	lattian suurempi, pituussuuntaa l vastaava jäykkyys $E_l I_l$
$(EI)_L$	[Nm ² /m]	lattian pääkannattamien jäykkyys $E_L I_L$
P	[N]	värähtelyn aiheuttavan henkilön paino
R	[-]	kiihtyvyyden pienennyskerroin
W	[N]	värähtelyssä mukana olevan lattian osan tehollinen paino
δ_{\max}	[m]	pistevoimasta 1 kN aiheutuva suurin staattinen taipuma
δ_{sall}	[m]	suurin sallittu staattinen taipuma
ζ	[-]	vaimennussuhde

Esitetty menetelmä antaa yksinkertaiset lausekkeet suorakaiteen muotoisen lattian alueen värähtelytarkastelua varten. Alue voi liittyä osana suurempaa lattia-aluetta (kuva 5).



Kuva 5. Tyypillinen lattian osa-alue, joka käsittää pintalaatan, lattiapalkit $(EI)_l$ ja pääkannattimet $(EI)_L$.

2.3.2 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 on lattian pituus, $(EI)_l$ on lattian suurempi pituussuuntaa l vastaava jäykkyys, $(EI)_b$ on lattian pienempi leveysuuntaa b vastaava jäykkyys ja m on välipohjan massa lattian pinta-alayksikköä kohden. Lattian massaan sisällytetään hyötykuormaa 30 kg/m^2 .

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 ominaistajuuks lausekkeesta

$$f_{0,L} = \frac{\pi}{2L^2} \sqrt{\frac{(EI)_L}{m}} \quad (5)$$

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

2.3.3 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

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

$$\gamma = \frac{4}{\alpha\pi^4} \sum_m \sum_n \frac{1}{(2m-1)^4 + \beta \left(\frac{2n-1}{\alpha}\right)^4}; \quad \alpha = \frac{b}{l} \quad \text{ja} \quad \beta = \frac{(EI)_b}{(EI)_l} \quad (7)$$

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

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

jossa s on lattiapalkkien etäisyys.

Tässä on taipuman laskemisessa oletettu, että taipuma 600 mm:n etäisyydellä on sama kuin voiman alla. Mikäli lattian pinta joustaa, paikallisen taipuman merkitys otetaan huomioon kohdan 2.3.6 mukaan. Jos lattiapalkit tukeutuvat pääkannattimiin, taipumaan on lisättävä pääkannattimien taipuma.

2.3.4 Kiihtyvyysskriteeri matalataajuuksisilla lattioilla

Jos lattia on matalataajuuksinen, kiihtyvyyssamplitudin suuruus arvioidaan lausekkeesta

$$a_{\max} = \frac{R \cdot P}{W \cdot \zeta} \cdot 0,83 \cdot e^{-0,35 f_0} \quad (10)$$

jossa $P=800$ N (kävelijän paino) ja $e=2,718$. 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 W arvioidaan lausekkeella

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

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

mutta b_{eff} saa kuitenkin enintään arvon 2/3 lattiapalkkeihin nähden poikittaissuuntaisesta lattian kokonaisleveydestä.

Jos suorakaiteen muotoinen lattia on toiselta lattiapalkin suuntaiselta reunaltaan tuke-
maton, 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).

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

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

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

2.3.5 Kallistumaehto kaikilla lattioilla

Kallistumaehto pistekuormasta 1 kN tulee tarkastaa lattiapalkin päässä, lattian reunoilla palkin ja mahdollisesti tuetun reunan välissä sekä lattian keskellä lattiapalkkien välissä. Korotuslattioilla tarkka laskenta on usein tehtävä FEM-laskentaa tai kokeellista tutkimusta käyttäen. Kelluvilla lattioilla 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 merkityksettömäksi.

2.3.6 Korotuslattian ja kelluvan lattian vaikutus peruslattian värähtelyominaisuuksiin

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

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

2.3.7 Väliseinien merkityksestä

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 rakenneosan paikallinen jousto liittimen välittömässä läheisyydessä.

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

3. FEM-laskennan käyttö värähtelysuunnittelussa

Usein yksinkertaistettu värähtelytarkastelu ei ole mahdollista esim. 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 matalataajuisille lattioille. Tämän ohjeen perusteena on VÄRE-teknologiaohjelmassa tehty työraportti (2002) FEM-laskennan soveltuvuudesta lattioiden värähtelysuunnitteluun.

3.1 Värähtelyominaisuuksien arviointi

Ominaisarvoanalyysiä käytetään ominaistajuuksien laskemiseen. Alin ominaisarvo määrää, onko kyseessä matala- vai korkeataajuuksinen lattia. Korkeataajuuksisella lattialla tarkastetaan taipumaehto lattian kriittisimmässä pisteessä. Matalataajuuksisella lattialla tarkastetaan kiihtyvyyssamplitudi ominaistajuudella tapahtuvalle värähtelylle. Lisäksi FEM-laskentaa voidaan käyttää kallistumakriteerin laskemiseen ja kelluvan lattian taipumakriteerin tarkastamiseen.

Kun lasketaan matalataajuuksisten lattioiden kiihtyvyyssamplitudia, suositellaan käytettäväksi seuraavia menetelmiä:

1. FEM-laskennan avulla lasketaan ensin ominaistajuudet f_n ja niitä vastaavat ominaismassat (modal mass) M_n . Sen jälkeen lasketaan kävelyherätteen kutakin taajuuskomponenttia vastaava herätteen suuruus F_n lausekkeesta

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

Sitten arvioidaan kutakin ominaistajuutta vastaava kiihtyvyyssamplitudi lausekkeesta

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

Tekijä Φ_n on herätteen suuntainen ominaismuodon komponentti tarkasteltavassa pisteessä. Muut merkinnät ovat samat kuin kohdassa 2.3. Yleensä tarkastellaan ominaismuodon maksimiarvon kohtaa, jossa oleva heräte johtaa suurimpiin kiihtyvyyksiin. Lauseke (17) pätee vain tapaukselle, kun heräte F_n sijaitsee tarkasteltavassa ominaismuodon pisteessä Φ_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. sinipyhkäisyanalyysi halutulla vaimennussuhteella ζ . Silloin dynaaminen analyysi voidaan suorittaa suoraan yksikköherätteellä taajuusvälillä 0–10 Hz. Tuloksena saadaan rakenteen ominaistajuuudet 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 ominaistajuuksia vastaavat kiihtyvyyssamplitudit. Lopuksi laskettuja kiihtyvyyssamplitudeja verrataan taulukossa 3 asetettuun värähtelyn raja-arvoon. Sinipyhkäisyanalyysi on usein käytöltään havainnollisempi kuin ominaismuotoanalyysi.

FEM-laskennassa voidaan mallittaa myös todellinen heräte. Askelmallituksessa kävelyä mallitetaan voimana ajan funktiona askel askeleelta 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 ajanhetkillä. Askelmallitus sopii erityisesti kelluvien lattioiden tarkasteluun sekä korkea-
taajuisille lattioille. Matalataajuuksisilla lattioilla värähtelyn suuruus riippuu voimakkaasti ominaistajuuden ja askeltaajuuden suhteesta, joten mallinnettava heräte olisi tunnettava eri askeltaajuuksilla. Koska askelmallitukselle ei ole olemassa standardoitua kuormitusmallia, askelmallinnuksen käyttö soveltuu toistaiseksi vain tutkimuskäyttöön.

3.2 Laskennan tarkkuudesta

Yleisesti vastaavuus laskenta- ja koetulosten välillä on hyvä staattisten ja dynaamisten siirtymien vertailussa ja vastaavuus jossain määrin heikkenee tarkasteltaessa välipohjien nopeuksia ja kiihtyvyyksiä. Seuraavat kokemukset koskevat NISA-elementtimenetelmäohjelmiston dynamiikkalaskentaohjelmalla saatuja kokemuksia.

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

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. Värähtelykäyttötymisen kokeellinen arviointi

4.1 Johdanto

Lukuisten epätarkkuuksien vuoksi on suositeltavaa varmistaa laskentamenetelmän toimivuus aina uudentyypisille ratkaisuille rakennuskohteesta tehtävin mittauksin ja aistinvaraisin havainnoin.

Tässä menettelyohjeessa annetaan käytännön ohjeita lattioiden värähtelyjen arviointiin. Värähtelyä voidaan arvioida mittauksin ja aistinvaraisin havainnoin. Ohjeen tarkoitus on yksinkertaistaa ja yhtenäistää kokeiden suoritusta, raportointia ja tulosten vertailua. Ehdotetut menetelmät on pyritty pitämään mahdollisimman yksinkertaisina, jotta niiden soveltaminen olisi yksikäsitteistä. Tausta-aineistoa ehdotetuille värähtelyn raja-arvoille on esitetty liitteessä A.

Ohje perustuu testauskäytäntöön, jota on myös ehdotettu International Iron and Steel Institutun (IISI) julkaisemaksi teräsrakennusalan kansainväliseksi käytännöksi (Burstrand & Talja 2000). VÄPRO-projektissa saadut tulokset osoittavat kuitenkin, että ehdotetussa ohjeessa on joitakin puutteita, mikä on otettu huomioon tätä ohjetta laadittaessa.

Menetelmä on kehitetty ihmisen kävelystä aiheutuvaan lattian värähtelyn arviointiin, kun havainnoija on samassa huoneistossa, mutta sitä voidaan soveltaa myös muihin tapauksiin pienin muutoksin.

Suosituksia voidaan soveltaa sekä tuotekehityksessä että valmiin huoneiston lattian toimintavaatimusten tarkastuksessa. Mikäli ohjetta sovelletaan toimintavaatimusten täyttymisen tarkastuksessa, tulee hyväksymiskriteerit varmistaa asiakkaan kanssa ennen testausta.

Kaikissa laboratorio-olosuhteissa tehdyissä kokeissa tulee etukäteen varmistaa, että kokeissa käytettävät tukirakenteet ja tuentatapa eivät vaikuta testattavan lattian värähtelyyn. Jo muutaman sadasosamillimetrin suuruiset siirtymät voivat vaikuttaa tulokseen. Myös mahdolliset vaakasuuntaiset siirtymät on otettava huomioon tuennan toteutuksessa.

4.2 Aistinvarainen arviointi

Aistinvaraisen arvioinnin suorittamiseen tarvitaan vähintään kaksi henkilöä. Kävelevä henkilö ei itse pysty arvioimaan lattiaa, mutta vieressä istuva tai seisova henkilö tuntee värähtelyt jo paljon herkemmin. Istuva henkilö voi havaita kävelystä aiheutuvan värähtelyn joko suoraan kehon tuntemuksena tai välillisesti esineisiin aiheutuvana äänenä tai

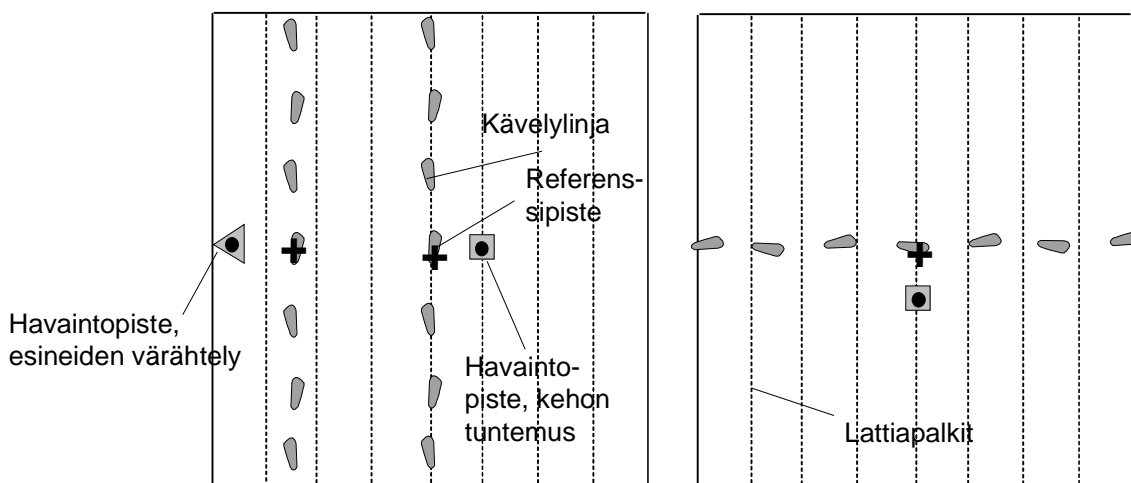
liikkeenä. Se, minkä suuruisen värähtelyn ihminen hyväksyy, on henkilökohtainen ominaisuus.

Useimmiten lattian värähtelyt aiheutuvat ihmisen liikkeistä. Kävelystä aiheutuva värähtely, jota käytetään perusteena myös kehitetyssä laskentaohjeessa, on laajasti hyväksytty lattian värähtelytarkastelun perusteeksi. Mikäli tarvitaan raskaampaa herätettä, voidaan käyttää myös kantapäälle pudottautumisesta (heel-drop) aiheutuvaa herätettä. Tällöin henkilö nousee varpailleseisontaan, josta hän pudottautuu kantapäilleen.

4.2.1 Kokeiden suoritus

Ainakin ne lattian kohdat, joissa pistekuorman aiheuttama taipuma on arvioitu suurimmaksi, määritellään referenssipisteiksi. Lisäksi kriittisimpiä esineiden värähtelyn suhteen ovat yleensä lattian reunat tai lattian pintalevyn paikalliset taipumat. Referenssipisteiden lukumäärä voi vaihdella lattian rakenteen ja tuennan mukaan. Yksinkertaisella lattialla riittää usein keskipisteen ja reuna-alueen tarkastelu (kuva 6), mutta jos lattia on jatkuva tai monimuotoinen, tarvitaan referenssipisteitä enemmän. Huoneistojen eikantavien väliseinien vaikutus tulee myös arvioida referenssipisteitä valittaessa.

Referenssipisteen yli kulkeva kävelylinja valitaan niin, että havaintopisteeseen aiheutuu mahdollisimman suuri värähtely. Havaintopisteen etäisyys kävelylinjasta ei kuitenkaan saa olla alle 600 mm, kun havainnot tehdään kehon tuntemuksen perusteella, tai alle 450 mm, kun havainnot tehdään esineisiin aiheutuvan värähtelyn perusteella. Käytännössä kävelevä henkilö ei ohita muita ihmisiä tai värähtelyherkkiä esineitä tätä lähempää. Asetettu etäisyys on yleensä riittävä, mutta tietyissä tapauksissa, kuten usean jännevälin yli jatkuvissa lattioissa tai korotuslattioissa, värähtelyt viereisessä jänneväliässä saattavat olla suurempia kuin asetetulla etäisyydellä. Erityisesti kelluvissa ja asennuslattioissa oikea kävelyetäisyyden valinta on tärkeä. Usein on vaikea määrittää etukäteen määräävää kävelylinjaa, sen suuntaa ja kriittisintä havaintopistettä. Tällöin on parasta tehdä esikokeita, joiden perusteella määräävät yhdistelmät valitaan.



Kuva 6. Mahdollisia kävelylinjoja sekä vastaavia referenssipisteitä yksinkertaiselle lattialle.

Kokeet voidaan tehdä ilman kalustusta. Mikäli halutaan, lattialle voidaan asettaa suunnittelussa käytettävää käyttötilan kuormitusta (30 kN/m^2) vastaava määrä painoja. Painot on asetettava siten, että ne eivät estä vapaata kävelyä.

Koesuorituksessa havainnoijat kirjaavat mielipiteet lattian värähtelystä, kun noin 80 kg:n painoinen henkilö kävelee valittua kävelylinjaa pitkin. Kävelystä aiheutuva dynaaminen heräte on riippuvainen myös kävelynopeudesta, joten kävelyn tulisi tapahtua 2 Hz:n askeltaajuudella. Tämä vastaa kävelynopeutta 1,5 m/s, kun askelpituus on 75 cm. Kalustetuissa huoneissa suuri kävelynopeus ei aina ole mahdollista. Tällöin kävely suoritetaan suurimmalla mahdollisella askeltaajuudella, mahdollisesti myös askelpituutta pienentämällä.

Mikäli mitattu lattian ominaistajuus on alle 10 Hz, testaus tulee tehdä myös kävelynopeuteen suhteutetulla askeltaajuudella. Askeltaajuus määritetään jakamalla ominaistajuus sellaisella kokonaisluvulla, joka johtaa taajuuteen, joka on mahdollisimman lähellä 2 Hz:iä, mutta ei kuitenkaan sitä suurempi. Jos esimerkiksi alin mitattu ominaistajuus on 7 Hz, kävelynopeutena tulee kokeilla myös arvoa 1,75 Hz.

Kävelijän tulee säätää askellusta niin, että yksi askel osuu suoraan referenssipisteeseen. Mikäli suoritetaan kantapäille pudottautumistesti (heel-drop -testi), kantapäiden tulee iskeytyä suoraan referenssipisteeseen. Kantapäiden pudottautumiskorkeus on noin 60 mm.

Havainnoijat voivat arvioida lattian värähtelyjä myös, kun itse kävelevät lattialla. Tämä tulisi tehdä erityisesti, jos epäillään että lattian pinta on liian joustava, kuten esimerkiksi kelluvilla lattioilla voi olla laita.

4.2.2 Havainnoijat ja havainnot

Vähintään viideltä havainnoijalta pyydetään asiantuntijamielipide värähtelyn suuruudesta ja hyväksyttävyydestä. Värähtelyn suuruuden ja hyväksyttävyyden arviointi on varsin subjektiivista. Vaikka useimmat havainnoijat arvioivat värähtelyn selvästi todettavaksi, saattaa joku havainnoija arvioida tämän juuri todettavaksi tai voimakkaasti todettavaksi. Myös kun enemmistö havainnoijoista hyväksyy lattian, joku saattaa pitää sitä täysin epähyväksyttävänä. Siksi havainnoijia tarvitaan useita: mitä enemmän sen parempi. Havainnoijat voivat olla naisia tai miehiä ja iältään 30–60 vuotta.

Havainnot voivat olla (kuva 7) seuraavanlaisia:

- istuvan henkilön kehon tuntemus,
- kahvikupin kilinä, kun kupissa ja aluslautasella on lusikka,
- kasvin lehtien liike (esim. 30–40 cm korkea traakkipuu)
- veden liike lasisessa jälkiruokakulhossa ja
- värähtelyherkästi kiinnitetyn lasiruudun helinä (lasi kävelylinjan suuntainen).

Esineet sijoitetaan tukevasti seisovan lipaston päälle tai koetta varten tehtyyn telineeseen 1,2 metrin korkeudelle (kuva 7). Vertailukelpoisten tulosten saamiseksi telineen käyttö on suositeltavaa. Tällöin telineen painon tulisi olla noin 20 kg. Telineen ja lattian kontaktipisteiden tulisi olla tasasivuisen kolmion kärjissä. Tuentapisteiden muodostaman tasasivuisen kolmion korkeudeksi suositellaan 300 mm.

Kehon tuntemuksen arvioinnissa havainnoija istuu päällystämättömällä ja selkänojattomalla jakkaralla havainnointipisteessä (kuva 7). Esineiden värähtelyn arvioinnissa havainnoija seisoo havainnointipisteen läheisyydessä. Laboratorio-oloissa usea havainnoija voi suorittaa arvioita samanaikaisesti, jos lattian mitat ovat niin pienet, että havainnot voidaan tehdä lattian ulkopuolelta, tai on muuten varmistuttu, että havainnoijien painolla ei ole vaikutusta tuloksiin. Vain yksi havaintoarvio tehdään kerrallaan. Ympäristön tulee olla niin hiljainen, että kahvikupin kilinä ja esineiden värähtely voidaan helposti havaita.



Kuva 7. Lattian arviointi aistinvaraisesti.

4.2.3 Värähtelyiden suuruuden ja hyväksyttävyyden arviointi

Havainnoija muodostaa asiantuntijamielipiteensä saamastaan kokemuksesta, kun kävelijä ohittaa havaintopisteen vähintään kolme kertaa. Mikäli sovelletaan kantapäille pudotusta, myös se tehdään vähintään kolmesti. Havainnoijille ei anneta kuvauksia värähtelyiden voimakkuuden luokittelusta tai hyväksyttävistä värähtelyistä. Havainnoijat eivät saa kokeen aikana keskustella kokemuksistaan. Kysymykset annetaan aina samassa järjestyksessä, sillä kysymysjärjestys saattaa vaikuttaa tulokseen.

Ensiksi havainnoijia pyydetään luokittelemaan värähtelyn voimakkuus seuraavasti:

- ei havaintoa,
- havainto juuri todettavissa,
- havainto selvästi todettavissa tai
- havainto voimakkaasti todettavissa.

Seuraavaksi havainnoijia pyydetään muodostamaan kanta siitä, olisiko lattia hyväksyttävä värähtelyiden suhteen, jos se olisi uuden huoneiston olohuoneen lattia. Lisäksi heiltä kysytään, onko lattia epäilyksettä hyvä tai huono. Esimerkki lattian arviointilomakkeesta on esitetty kuvassa 8.

Kävelystä aiheutuva lattian värähtelyn arviointi

Värähtelyn voimakkuus

Värähtely on

- ei todettavissa (**Ei**)
- juuri todettavissa (**J**)
- selvästi todettavissa (**S**)
- voimakkaasti todettavissa (**V**)

Värähtelyn hyväksyttävyys

Soveltuuko lattia tehdyn havainnon suhteen uuden asunnon olohuoneen lattiaksi ?

- + kyllä ++ epäilyksettä hyvä
- ei -- epäilyksettä huono

Koe 1	Voimakkuus				Hyväksyttävyys			
	Ei	J	S	V	++	+	-	--
Kehon tuntemus								
Kahvikupin kilinä								
Kasvin lehtien heiluminen								
Vedenpinnan väreily								
Lasin helinä								
Koe 2	Voimakkuus				Hyväksyttävyys			
	Ei	J	S	V	++	+	-	--
Kehon tuntemus								
Kahvikupin kilinä								
Kasvin lehtien heiluminen								
Vedenpinnan väreily								
Lasin helinä								

Arviointi havainnoitsijan omasta kävelystä

Koe 1	Voimakkuus				Hyväksyttävyys			
	Ei	J	S	V	++	+	-	--
Kehon tuntemus								
Koe 2	Voimakkuus				Hyväksyttävyys			
	Ei	J	S	V	++	+	-	--
Kehon tuntemus								

Kuva 8. Arviointilomake värähtelyjen aistinvaraisessa arvioinnissa.

Mikäli testataan havainnoijan omasta kävelystä aiheutuvaa värähtelyä, arviointi värähtelyn voimakkuudesta ja hyväksyttävyydestä tehdään kuvassa 8 esitetyn arviointilomakkeen mukaisesti. Jos tutkitaan useita lattioita, koejärjestyksellä saattaa olla vaikutusta lopputulokseen. Jos huonoin lattia arvioidaan ensiksi, paremmat lattiat saatetaan yliarvioida myöhemmin. Jos paremmat lattiat arvioidaan ensiksi, huonoimmat lattiat saatetaan aliarvioida myöhemmin.

Värähtelyominaisuuksien havainnollistamisen parantamiseksi on havainnoijilta usein hyödyllistä kysyä lisämielipiteitä. Esimerkiksi, kun lattian värähtely on hyväksyttävissä olohuoneelle, havainnoijalta voidaan kysyä edelleen, olisiko värähtely hyväksyttävissä, jos se tulisivin naapurihuoneistosta (päivä- tai yöaikaan). Mikäli lattian värähtely ei ole olohuoneelle hyväksyttävä, voidaan kysyä, olisiko värähtely mahdollisesti hyväksyttävissä esim. myymälöissä tai kävelysilloissa.

4.2.4 Arviointitulosten hyödyntäminen

Lattian hyväksyttävyyys tulee arvioida ainakin kehon tuntemuksen perusteella. Suositus on, että jos havainnoijien enemmistö hyväksyy aiheutuvat värähtelyt, niin lattia on hyväksyttävä. Vaikka kriteeri tuntuu turhan löysältä, on otettava huomioon, että koetilanteessa tarkastellaan pahinta lattian kohtaa ja reipasta kävelyä. Havainnoijat ovat yleensä myös kriittisempiä koetilanteessa kuin arkielämässä ja todellisessa huoneistossa.

Eri esineiden aiheuttama ääni ja ruukkukasvien lehtien liike ovat tyypillisiä kevyille lattioille, kelluville lattioille ja asennuslattioille. Vaikka havainnoijan arvio värähtelyn voimakkuudesta on selvä, hyväksyttävyyuskriteeriä on vaikea asettaa. Ellei muusta ole erikseen sovittu, myös esineiden värähtelyille suositetaan käytettäväksi samaa enemmistöperiaatetta kuin kehon tuntemuksen perustuvassa arvioinnissa.

Tässä ei anneta hyväksyttävyyuskriteeriä kantapäille pudottautumistestiin. Jos tätä käytetään hyväksyttävyyden arvioinnissa, kriteeri tulisi sopia asiakkaan kanssa. Hyväksyttävyyuskriteeriä asetettaessa tulisi myös arvioida tämäntyyppisten herätteiden esiintymistodennäköisyyttä.

Vaikka kuvausta värähtelyiden voimakkuudesta ei käytetä hyväksyttävyysehtona, niin esitetyt mielipiteet selventävät käsitystä hyväksytyjen värähtelyiden koettavuudesta.

4.3 Kävelyn aiheuttaman värähtelyn suora mittaaminen

4.3.1 Kokeiden suoritus

Värähtelyjen mittaamisessa on suositeltavaa käyttää samoja kävelylinjoja, kantapäille pudottautumiskohtia sekä havaintopisteitä kuin yllä esitetyssä aistinvaraisten havaintojen kokeessa. Tämä takaa, että aistinvaraiset havainnot ja mittaustulokset ovat vertailukelpoisia.

Lattian pystysuuntaiset värähtelyt mitataan lattian pinnalta. Mikäli halutaan selvittää esineisiin kohdistuvaa värähtelyä, mitataan vaakasuuntaiset värähtelyt piirongista tai käytetystä telineestä 1,2 metrin korkeudella. Tuloksia arvioitaessa on huomattava, että myös piirongin tai telineen rakenne ja paino vaikuttavat värähtelyiden suuruuteen.

Täysi kontakti lattian eri kerrosten välillä tulee varmistaa esikuormittamalla lattia mitauspaikassa. Kuormitus voisi olla esimerkiksi jakkaralla istuva henkilö mitauspisteen yläpuolella. Mitattava värähtelysuure, siirtymä, nopeus tai kiihtyvyys mitataan havainnointipisteeseen asetetulla mittausanturilla. Mikäli mitataan siirtymiä, nopeus ja kiihty-

vyys voidaan määrittää tästä numeerisesti. Mikäli kiihtyvyyttä mitataan, voidaan soveltaa numeerista integrointia. On tärkeää, että näytteenottoaajuus on riittävän suuri ja että näyte on oikein suodatettu. Mittauskaluston tulee olla kalibroitu.

4.3.2 Värähtelyä kuvaavat tunnusluvut

Mittausnäytteistä voidaan määrittää useita värähtelyn suuruutta kuvaavia tunnuslukuja. Joillekin niistä on olemassa myös kokemukseen perustuvia ehdotuksia hyväksyttäväiksi raja-arvoiksi.

Mittauksista analysoidaan kolme kahden sekunnin mittausnäytettä, joilla esiintyy voimakkainta kävelystä aiheutuvaa värähtelyä (kuva 9). Kantapäille pudottautumiskokeessa (heel-drop -testi) analysoidaan kolme voimakkainta yhden sekunnin näytettä (kuva 10). Näyte suodatetaan kolmannesoktaaveittain, minkä jälkeen tulos painotetaan taajuuden mukaan standardin ISO 2631-1 (1997) mukaisella painotusfunktiolla W_k . Painotus tasaa värähtelyn eri taajuudet samaan ihmisen tuntemaan herkkyyteen.

Painottamattomasta näytteestä suositellaan määritettäväksi seuraavat tunnusluvut:

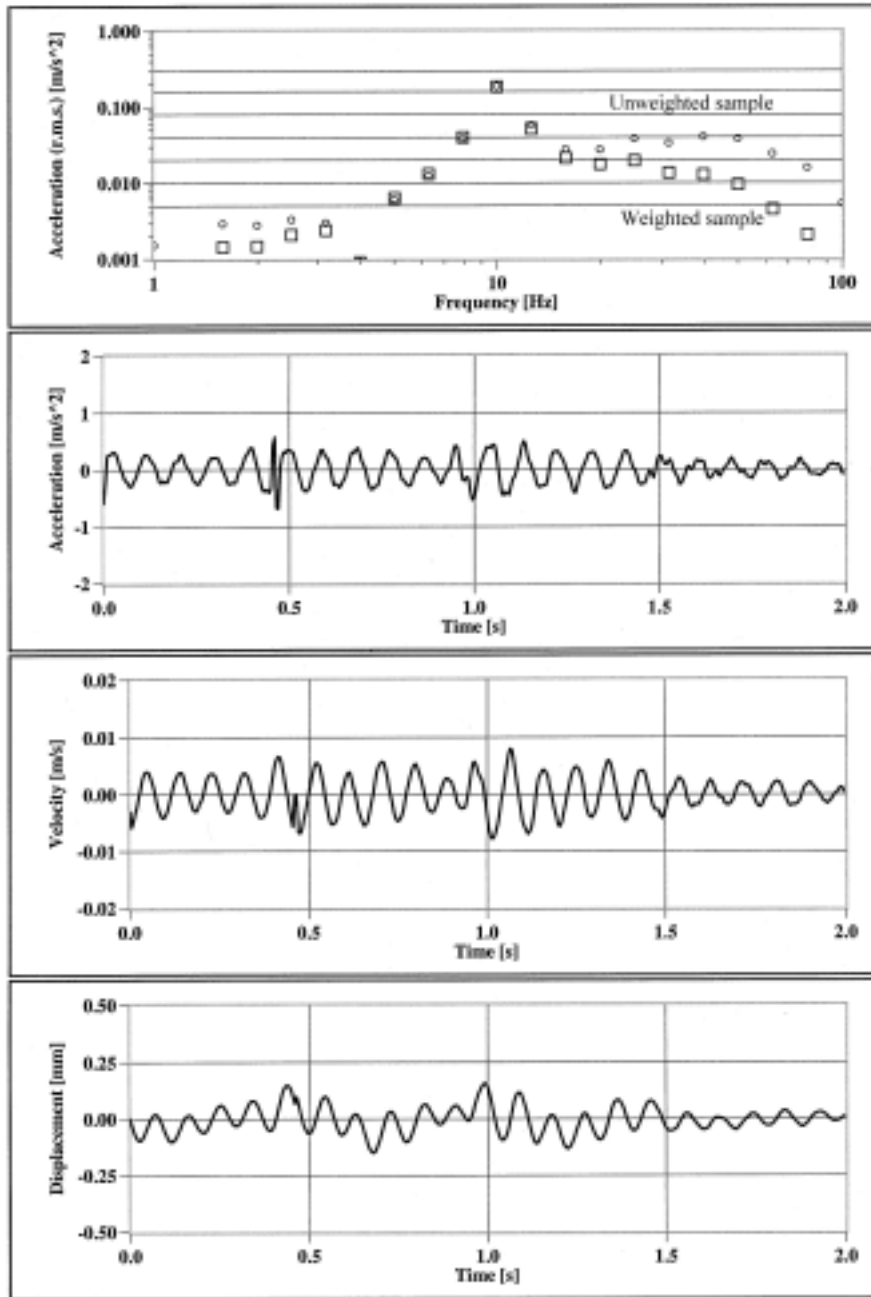
- kiihtyvyyden huippuarvo $|a_{\max}|$,
- nopeuden huippuarvo $|v_{\max}|$,
- siirtymän huippuarvo $|u_{\max}|$ ja
- kiihtyvyyden tehollisarvo a_{rms}

Värähtelyn huippuarvot määritellään suurimpana poikkeamana keskiarvosta.

W_k -painotetusta näytteestä suositellaan määritettäväksi seuraavat tunnusluvut:

- määräävä kiihtyvyyssamplitudin tehollisarvo $a_{w,\max}$ taajuuskaistalla i ,
- kiihtyvyyssamplitudin tehollisarvoa $a_{w,\max}$ vastaava 1/3-oktaavi taajuuskaista i ja sen keskitaajuus on f_w ja
- painotettu kiihtyvyys koko taajuusalueella.

$$a_w = \sqrt{\sum_i (a_{w,i})^2}$$



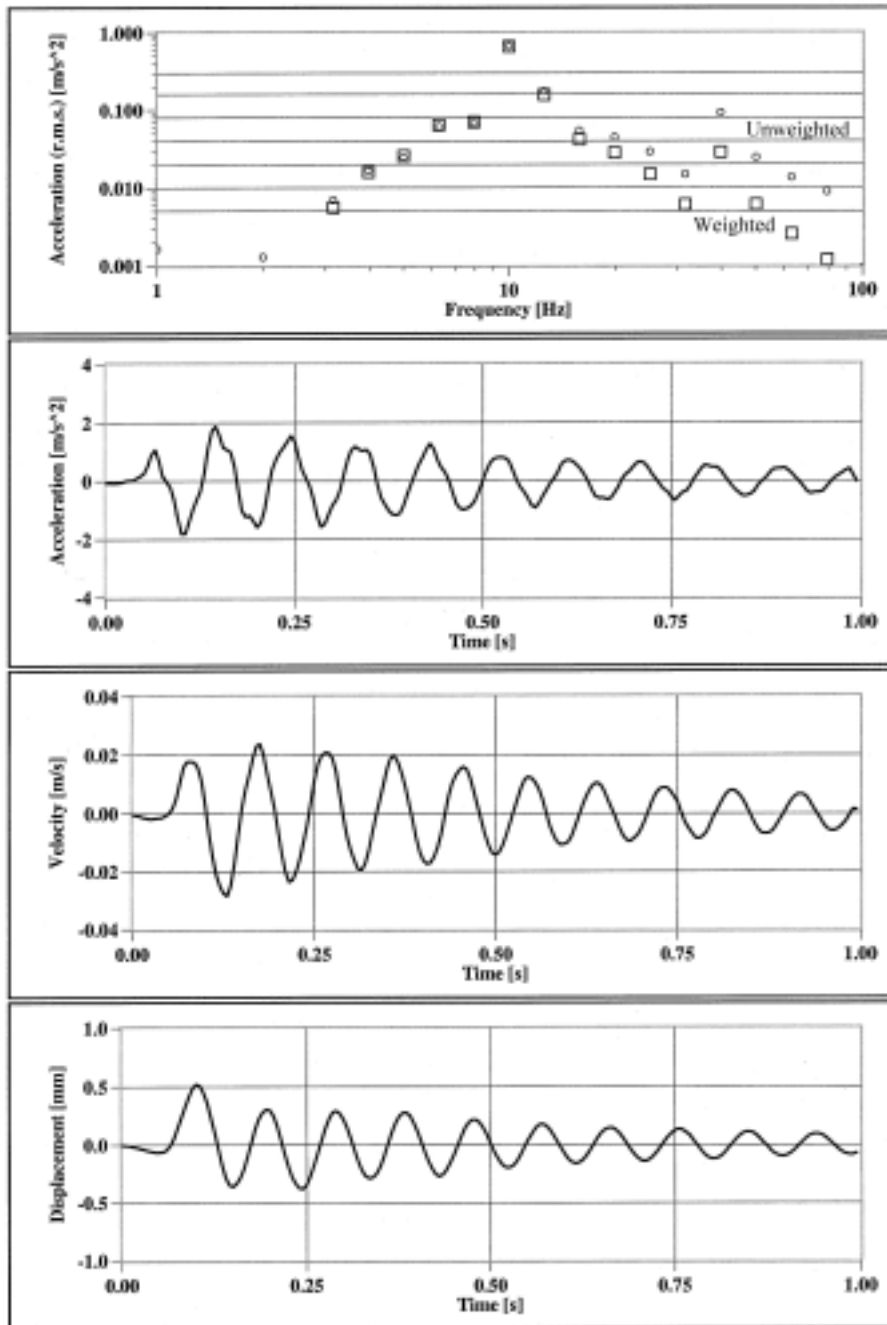
Painottamaton näyte:

- kiihtyvyyden huippuarvo $|a_{\max}| = 0,68 \text{ m/s}^2$
- nopeuden huippuarvo $|v_{\max}| = 0,008 \text{ m/s}$
- siirtymän huippuarvo $|u_{\max}| = 0,16 \text{ mm}$
- kiihtyvyyden tehollisarvo $a_{\text{rms}} = 0,22 \text{ m/s}^2$

W_k – painotettu näyte:

- määräävä 1/3-oktaavi -taajuuskaista $f_w = 10 \text{ Hz}$
- kiihtyvyyssamplitudin tehollisarvo $a_{w,\max} = 0,19 \text{ m/s}^2$
- koko taajuusalueen painotettu kiihtyvyys $a_w = 0,20 \text{ m/s}^2$

Kuva 9. Esimerkki kävelystä aiheutuvasta värähtelystä. Ylin kuva: Painottamattoman (unweighted) ja painotetun (weighted) kiihtyvyyssäilyksen kiihtyvyyssamplitudien tehollisarvot kolmannesosaoktaaveittain. Alemmat kuvat: Mitattu näyte kuvattuna kiihtyvyyden, nopeuden ja siirtymän avulla.



Ei painotettu näyte:

- kiihtyvyyden huippuarvo $|a_{\max}| = 1,87 \text{ m/s}^2$
- nopeuden huippuarvo $|v_{\max}| = 0,028 \text{ m/s}$
- siirtymän huippuarvo $|u_{\max}| = 0,52 \text{ mm}$
- kiihtyvyyden tehollisarvo $a_{\text{rms}} = 0,72 \text{ m/s}^2$

W_k – painotettu näyte:

- määräävä 1/3-oktaavi -taajuuskaista $f_w = 10 \text{ Hz}$
- kiihtyvyyden tehollisarvo $a_{w,\max} = 0,67 \text{ m/s}^2$
- koko taajuusalueen painotettu kiihtyvyys $a_w = 0,70 \text{ m/s}^2$

Kuva 10. Esimerkki heel-drop -herätteestä aiheutuvasta värähtelystä. Ylin kuva: Painottoman (unweighted) ja painotetun (weighted) kiihtyvyyden amplitudien tehollisarvot kolmannesosaoktaaveittain. Alemmat kuvat: Mitattu näyte kuvattuna kiihtyvyyden, nopeuden ja siirtymän avulla.

4.3.3 Mittaustulosten hyödyntäminen

4.3.3.1 Matalataajuuksiset lattiat

Matalataajuuksisilla lattioilla, joilla mitattu alin ominaistajuus on alle 10 Hz, hyödynnetään tuloksista vain ISO-kerroin. ISO-kertoimen avulla voidaan määrittää, mihin taulukossa 1 esitettyyn värähtelyluokkaan lattia kuuluu. VÄPRO-projektissa saatujen kokemusten perusteella suositellaan, että värähtelyluokille käytetään taulukossa 4 esitetyjä ISO-kertoimen raja-arvoja. Mikäli huoneen suurin leveys tai pituus L on enintään 6 m, taulukossa sallittuja ISO-kertoimia voidaan kasvattaa kuvassa 4 esitetyllä kertoimella. Korotusta ei saa kuitenkaan tehdä, mikäli on kysymys huoneistosta toiseen siirtävistä värähtelyistä.

ISO-kerroin määritellään seuraavasti. Painotetun näytteen kiihtyvyyssamplitudin tehollisarvoa $a_{w,max}$, verrataan standardissa ISO 2631-2 (1989) esitettyyn perusarvoon $0,005 \text{ m/s}^2$. ISO 2631-2:n mukaan vertailu suoritetaan niin, että määräävää taajuuskais-taa vastaava $a_{w,max}$ -arvo jaetaan perusarvolla $0,005 \text{ m/s}^2$:

$$\text{ISO-kerroin} = \frac{a_{w,max}}{0,005 \text{ m/s}^2} \quad (18)$$

Taulukko 4. Matalataajuuksisten lattioiden ISO-kertoimien raja-arvot eri värähtelyluokissa.

Värähtelyluokka	ISO-kerroin
A	≤ 4
B	≤ 7
C	≤ 11
D	≤ 17
E	> 17

Kiihtyvyyden raja-arvoiksi on olemassa myös muita, edellä ehdotetusta ja myös toisistaan poikkeavia suosituksia. Seuraavassa on esitetty niistä lyhyt yhteenveto:

- Standardi ISO 2631-1 (1997) toteaa: ”Asuinhuoneistojen ja yleisten tilojen värähtelyn aiheuttaman häiriön arviointiin tulee soveltaa standardia ISO 2632-2 (1989). Käytäntö on osoittanut, että asukkaat valittavat usein värähtelystä mikä on suuruudeltaan vain vähän yli havaitsemiskynnyksen. Havaitsemiskynnystä vastaavan W_k -

painotetun kiihtyvyyden huippuarvo on keskimäärin $0,015 \text{ m/s}^2$, mutta kvartiiliväli huippuarvolle voi ulottua välille $0,01 \text{ m/s}^2 - 0,02 \text{ m/s}^2$.”

- Standardissa ISO 2631-2 on ISO-kertoimelle annettu joitakin informatiivisia arvoja, joiden tulkinta ei kuitenkaan ole yksikäsitteistä. Asuinrakennuksille on annettu kertoimeksi on 2–4 päiväsaikaan ja 1,4 yöaikaan, kun värähtely on jatkuvaa tai ajoittaista, esimerkiksi liikenteestä aiheutuvaa. Toimistorakennuksilla kertoimen arvoksi on annettu 4. Hetkelliselle usean kerran päivässä toistuvalla värähtelyllä arvot ovat huomattavasti suurempia. Kävelysilloille standardi ISO 10137 (1992) esittää kertoimelle raja-arvoa 60.
- W_k -painotetun näytteen tehollisarvojen rms-arvo a_w koko taajuusalueella antaa yhteen arvoon perustuvan kuvauksen värähtelystä, kun värähtelyspektri koostuu useista värähtelykomponenteista. Lähteen ISO 2631-1 (1997) liite B suosittaa, että a_w -arvon ollessa alle $0,315 \text{ m/s}^2$, ajoneuvoissa matkustajat kokevat tämän vielä hyväksyttäväksi. Tätä arvoa ei kuitenkaan pidä missään tapauksessa pitää referenssiarvona asuinrakennusten lattioiden värähtelyille.
- Suunnitteluohjeessa AISC (1997) suositellaan itseaiheutetulle asuinhuoneistossa tapahtuvalle värähtelylle käytettäväksi W_k -painotetun kiihtyvyyden huippuarvoa $0,05 \text{ m/s}^2$ lattioille, joiden rakenteen alin ominaistaajuus on alle 8 Hz. Huippuarvo $0,05 \text{ m/s}^2$ vastaa ISO-kerrointa 7,1.

VÄPRO-projektissa tehdyissä kokeissa hyväksyttiin AISC:n ohjeessa esitetyjä arvoja suurempia värähtelyjä. Kehon tuntemuksen perusteella keskimäärin puolet hyväksyi omassa huoneistossa aiheutetut värähtelyt, kun mitatusta kiihtyvyyden näytteestä määritetty ISO-kerroin oli alle 11, mikä vastaa likimain kiihtyvyyden huippuarvoa $0,075 \text{ m/s}^2$, jota on edellä kappaleessa 2 esitetty suunnitteluperusteeksi luokan C matalataajuuksisille lattioille. Kokeissa havaittiin lisäksi, että ISO-kerrointa 11 vastaa painotettujen kiihtyvyyksien tehollisarvojen neliöllinen keskiarvo $a_w=0,063 \text{ m/s}^2$. Kokeet osoittivat myös, että ISO-kertoimen avulla lausuttu kiihtyvyysehto pätee vain ns. matalataajuuksisilla lattioilla, joiden ominaistaajuus on alle 10 Hz.

4.3.3.2 Korkeataajuuksiset lattiat

Korkeataajuuksisilla lattioilla, joilla mitattu alin ominaistaajuus on yli 10 Hz, hyödynnetään tuloksista vain painottamattomasta värähtelynäytteestä määritetty siirtymän huippuarvo $|u_{\max}|$ mitattuna 600 mm:n etäisyydellä kävelijästä. VÄPRO-projektissa saatujen kokemusten perusteella suositellaan, että värähtelyluokille käytetään taulukossa 5 esitetyjä värähtelyn raja-arvoja, kun kävelijän paino on 80 kg. Mikäli huoneen suurin

leveys tai pituus L on enintään 6 m, taulukossa sallittuja värähtelyarvoja voidaan kasvattaa kuvassa 4 esitetyllä kertoimella. Korotusta ei saa kuitenkaan tehdä, mikäli on kysymys huoneistosta toiseen siirtyvistä värähtelyistä.

Taulukko 5. Korkeataajuuksisten lattioiden värähtelyn raja-arvot eri värähtelyluokissa.

Värähtelyluokka	Siirtymän huippuarvo 600 mm etäisyydellä $ u_{\max} $ [mm]
A	$\leq 0,05$
B	$\leq 0,1$
C	$\leq 0,2$
D	$\leq 0,4$
E	$> 0,4$

4.3.3.3 Vaakasuuntaiset värähtelyt

Vaakasuuntaisista värähtelyiden mittaustuloksista hyödynnetään vain painottamattomasta värähtelynäytteestä määritetty siirtymän huippuarvo $|w_{\max}|$. VÄPRO-projektissa saatujen kokemusten perusteella suositellaan, että värähtelyluokille käytetään taulukossa 6 esitettyjä värähtelyn raja-arvoja.

Taulukko 6. Vaakasuuntaisten värähtelyn raja-arvot eri värähtelyluokissa.

Värähtelyluokka	Vaakasuuntaisen siirtymän huippuarvo $ w_{\max} $ [mm]
A	$\leq 0,1$
B	$\leq 0,2$
C	$\leq 0,4$
D	$\leq 0,8$
E	$> 0,8$

4.4 Ominaisuuksien ja vaimennuksen määrittäminen

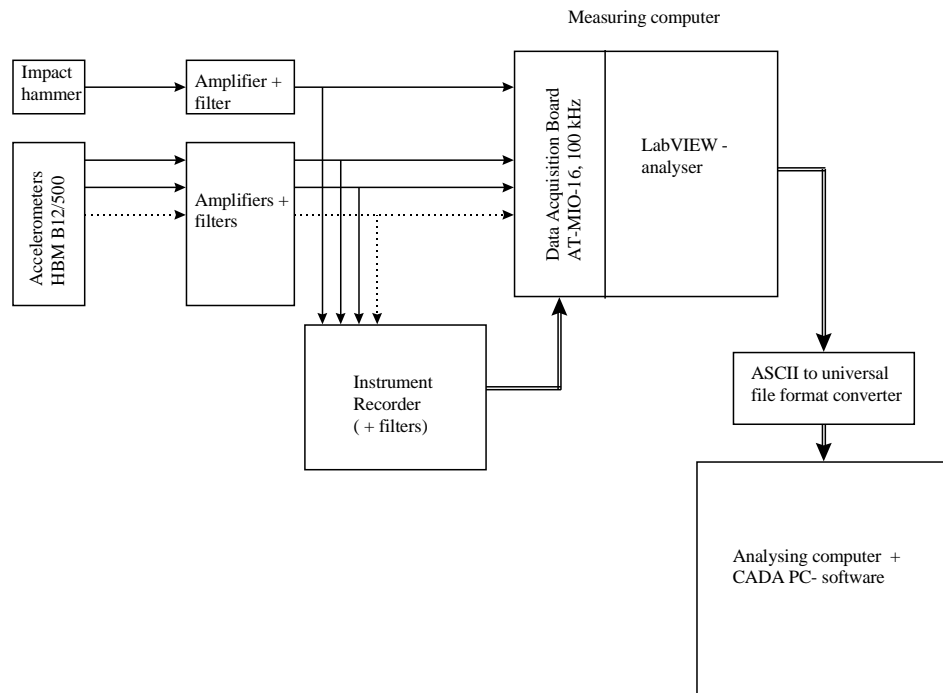
4.4.1 Kokeiden suoritus

Moodianalyysillä voidaan määrittää välipohjan dynaamiset ominaisuudet: ominaisuuksien, värähtelymuodot ja värähtelyn vaimeneminen. Moodianalyysin suoritus ja mitaustulosten analysointi vaatii erityisosaamista ja luotettavaa mittauskalustoa, joten sitä suositellaan vain alan asiantuntijoiden käyttöön. Tässä annetaan vain joitakin käytännön suosituksia mitausten suoritukseen. Mittausmenetelmä on kuvattu tarkemmin standardeissa ISO 7626-1 (1986), ISO 7626-2 (1990) ja ISO 7626-5 (1994).

Mittauskalusto koostuu kolmesta pääosasta: herätteen aiheuttajasta, heräte- ja värähtelysignaalien tallennuslaitteistosta sekä signaalien analysointilaitteesta tai analysointiohjelmasta, jolla määritetään signaaleista halutut värähtelysuureet.

Herätteenä voi olla lattiaan kiinnitettävä värähtelevä heräte, joilla saadaan harmonista voiman värähtelyä tai iskuvasara, jolla saadaan iskumainen heräte. Värähtelijän sekä iskuvasaran paino ja iskupinnan kovuus valitaan lattian oman painon ja pintamateriaalin mukaan. Herätepisteen tulee sijaita siten, että se pystyy herättämään kaikki tärkeät värähtelymuodot. Mittauspisteet sijoitetaan niin, että värähtelymuodot voidaan määrittää näiden pisteiden siirtymillä. Mitattava vaste voi olla mittauspisteen siirtymää, nopeutta tai kiihtyvyyttä ja se mitataan kiihtyvyyssantureilla tutkittavista pisteistä. Mikäli käytetään iskuvasaraa, iskua tekevän henkilön oma paino saattaa vaikuttaa rakenteen värähtelyominaisuuksiin erityisesti kevyillä lattioilla ja asennuslattioilla.

Mittausnäyte herätevoimasta sekä lattian vastesignaalista tallennetaan tietokoneeseen tai erityiseen analysaattoriin. Analysaattorin avulla mitaustuloksista prosessoidaan haluttu tieto lattian dynaamisista ominaisuuksista kuten ominaisuuksien, ominaismuodot, vaimennussuhteet jne. Siten signaalien jatkokäsittely voidaan suorittaa analysaattorin sisäänrakennetuilla prosessointifunktioilla tai moodianalyysi-ohjelmistoilla (kuva 11).



Kuva 11. Esimerkki moodianalyysin mittauskalustusta, mikä koostuu iskuvasarasta, tiedonkeruuta suorittavasta tietokoneesta sekä moodianalyysiohjelmistosta.

Usein lattian ominaistajuus ja vaimennussuhde voidaan määrittää riittävän tarkasti pudottautumiskokeesta kantapäille (ks. kuva 10). Koska vaimenevaan värähtelyyn vaikuttaa samanaikaisesti useita ominaismuotoja, vaimennus määritetään suodatetusta näytteestä, joka koostuu vain alimman ominaistajuuden lähellä olevista taajuuksista. Kevyiden lattioiden tapauksessa henkilön oma paino ja vaimennus saattavat vaikuttaa mitaustuloksiin. Toisaalta koetta suorittavan henkilön läsnäolo lattialla on perusteltavissa, koska värähtelyä kokeakseen myös havainnoijan on oltava lattialla.

Vaimennussuhde kuvaa aina tietyn ominaismuodon vaimennusta. Rakenteen mukaan eri ominaismuodoilla saattaa olla hyvinkin erilaiset vaimennussuhteet. Vaimennussuhteen arvo on varsin herkkä koejärjestelyjen virheille koejärjestelyissä ja vaimennuksen määrittämistavoille. Koska suuremmilla värähtelyamplitudeilla rakenneseosien väliset pinnat ovat eri tavoin kosketuksissa toisiinsa nähden, vaimennus riippuu hyvin usein myös värähtelyamplitudista. Eri osatekijät, kuten lattian eri rakennekerrosten väliset liitokset, väliseinät, rakenteisiin kiinnitetyt laitteet, huonekalut jne., voivat vaikuttaa merkittävästi mitatun vaimennuksen arvoon.

4.4.2 Mittaustulosten hyödyntäminen

Lattian alin ominaistajuus ja vaimennus ovat päätekijät, joita tarvitaan värähtelysuunnittelussa. Muut tiedot, kuten ylemmät ominaistajuudet ja niitä vastaavat värähtelymuodot, voivat antaa tärkeätä lisätietoa värähtelystä, mikäli lattia on muodoltaan monimutkainen tai lattian poikkileikkaus käsittää useita rakennekerroksia.

Mitattu alin ominaistajuus määrittää, kuuluuko lattia matalataajuuksiin vai korkeataajuuksiin lattioihin. Mikäli koe on suoritettu ilman lisäpainoja, mitattu alin ominaistajuus voidaan yleensä korjata laskennallisesti vastaamaan värähtelysuunnittelussa käytettävää suunnittelukuormaa. Mikäli lattian alin ominaistajuus on alle 10 Hz, lattia on matalataajuuksinen. Jos taas alin ominaistajuus on yli 10 Hz, lattia on korkeataajuuksinen.

4.5 Taipumanmittaukset

4.5.1 Kokeiden suoritus

Paikallisen kuorman aiheuttama taipuma mitataan samoista referenssipisteistä kuin arvioitaessa lattiaa aistinvaraisesti. Referenssipiste kuormitetaan koehenkilön omalla painolla. Koehenkilön painon tulee olla noin 80 kg. Koehenkilö seisoo yhdellä jalalla referenssipisteessä. Siirtymät mitataan 600 mm:n etäisyydeltä referenssipisteestä. 600 mm:n etäisyydellä oleva piste on sama kuin havainnointipiste aistinvaraisissa kokeissa. Joissakin tapauksissa, kuten monijänteisissä lattioissa tai korotuslattioissa, tulee käyttää muitakin kuormitusetäisyyksiä. Tällöin kriittinen taipuma voi olla myös ylöspäin. Taipumat mitataan aina lattian yläpinnasta.

Ennen kokeen suoritusta tulisi määrittää sellainen kohta testausalueelta, jossa koehenkilön oma paino ei vaikuta referenssipisteen taipumaan. Seuraavaksi koehenkilö määrittää siirtymätien tästä nollakohdasta referenssipisteeseen. Samaa siirtymätietä käytetään aina, kun siirrytään kuormituspisteeseen. Koska lattian eri rakennekerrosten kontakti toisiinsa voi olla huono, kuten esimerkiksi kelluvien lattioiden tapauksessa, on usein suositeltavaa suorittaa muutama esikoe ennen lopullista taipumamittausta. Lattian eri kerroksien välinen kontakti mittauspisteessä tulee varmistaa esimerkiksi toisen henkilön painon avulla. Ainakin kolme mittausta tulee tehdä, ja näistä kirjataan keskiarvo.

Mittausten referenssitaso tulee määrittää paikallaan olevasta rakenteesta, joka ei painu lattialla liikuttaessa. Huoneistoissa tämä on usein kantava väliseinä tai sisäkatto. Mikäli referenssitason painumista epäillään, mittaus tulee suorittaa suhteessa useaan vaihtoehtoiseen referenssitasoon.

4.5.2 Mittaustulosten hyödyntäminen

Matalataajuuksisilla lattioilla taipumamittausten tuloksia ei käytetä värähtelyominaisuuksien arvioinnissa. Mikäli kyseessä on korkeataajuuksinen lattia, mitatut taipumat muunnetaan 1 kN:n pistevoimaa vastaaviksi taipumiksi. Muunnettujen taipuma-arvojen avulla ja taulukon 3 avulla voidaan määrittää, mihin värähtelyluokkaan lattia kuuluu. Mikäli huoneen suurin leveys tai pituus L on enintään 6 m, taulukossa sallittuja taipuma-arvoja voidaan kasvattaa kuvassa 4 esitetyllä kertoimella. Korotusta ei saa kuitenkaan tehdä, jos on kysymys huoneistosta toiseen siirtyvistä värähtelyistä.

4.6 Kallistumamittaukset

4.6.1 Kokeiden suoritus

Paikallisesta kuormasta aiheutuvaa lattian pinnan kallistumista mitataan samoista referenssipisteistä kuin arvioitaessa aistinvaraisesti esineisiin aiheutuvaa värähtelyä. Kallistuma mitataan käyttäen apuna koehenkilön painoa. Muutenkin kokeiden suoritus noudattaa pääpiirteittäin taipumamittausten suoritustapaa.

Kallistuma määritetään lattian pinnasta tasasivuisen kolmion muotoisen alueen kallistumana, kun paikallisen voiman etäisyys kolmion sivusta on kohtisuoraan mitattuna vähintään 300 mm (kuva 3). Tasasivuisen kolmionmuotoisen alueen korkeus on 300 mm. Helpointa on mitata kallistuma siirtymänä käyttäen apuna aistinvaraisessa arvioinnissa käytettävää telinettä (kuva 7). Kallistuma mitataan telineeseen kiinnitettyä kulmanmuutosanturia käyttäen. Ellei sellaista ole käytettävissä, kallistuma voidaan mitata telineen yläreunan vaakasuuntaisena siirtymänä 1,2 metrin korkeudelta. Tällöin mittausten referenssitaso tulee määrittää kiinteästä rakenteesta. Yleensä riittävän liikumattomana referenssipisteenä voidaan käyttää seinä- tai ikkunapintaa.

4.6.2 Mittaustulosten hyödyntäminen

Mitattuja kallistumia käytetään matala- ja korkeataajuuksisille lattioille sekä myös kelloille lattioille ja korotuslattioille, kun esineiden värähtely on hyväksyttävyysskriteerinä. Mittaustulosten tarkastelussa koehenkilön painon avulla mitatut kallistumat muunnetaan 1 kN:n pistevoimaa vastaaviksi kallistumiksi. Muunnettujen kallistuma-arvojen ja taulukon 3 avulla voidaan määrittää, mihin värähtelyluokkaan lattia kuuluu.

5. Yhteenveto

Tehdyn tutkimuksen tavoitteena oli hankkia valmiudet arvioida laskennallisesti ja kokeellisesti eri materiaaleista valmistettujen asuin- ja toimistorakennusten välipohjien kävelystä aiheutuvia välipohjien värähtelyitä ja niiden haitallisuutta. Tutkimuksen tuloksena on esitetty menetelmät, joilla voidaan laskennallisesti ja kokeellisesti arvioida välipohjien värähtelyiden suuruutta ja haitallisuutta. Esitetyt menetelmät ovat materiaalista riippumattomia. Ehdotetut menetelmät ja esitetyt raja-arvot perustuvat neljäntoista erityyppisen lattian testeihin. Lattioita testattiin eri jänneväleillä ja värähtelyitä arvioitiin lattian eri kohdista. Yhteensä testejä oli noin sata. Testeissä lattioille tehtiin värähtelyiden arviointia sekä mittaamalla että aistinvaraisesti.

5.1 Lattioiden luokittelu

Ehdotettu lattioiden luokittelu luo uuden, yhtenäisen perustan lattioiden värähtelysuunnittelulle. Tilaaja voi asettaa vaatimukset välipohjan värähtelyluokalle ja tuotteen toimittaja voi luokitella oman tuotteensa jännevälin rakenneratkaisun mukaan eri värähtelyluokkiin. Käytettyjä luokitusvaatimuksia voidaan helposti muuttaa, mikäli tuotteesta saatu käytännön kokemus sitä edellyttää. Täten luokitus luo uusia mahdollisuuksia tuotekehitykselle ja kaupankäynnille.

Aiheutuvien värähtelyiden voimakkuuden perusteella lattiat jaetaan viiteen värähtelyluokkaan (taulukko 1). Perusteena käytetään värähtelyiden aistittavuutta kehon tunteuksen perusteella ja värähtelyiden aistittavuutta esineisiin syntyvän värähtelyn perusteella. Asuin- ja toimistorakennuksille on annettu suositus välipohjien vähimmäisluokasta eri käyttötarkoituksissa (taulukko 2). Suunnittelua ja testausta varten on annettu kriteerit, joiden perusteella voidaan arvioida, mihin värähtelyluokkaan tutkittava lattia kuuluu (taulukko 3). Luokittelussa on ensimmäistä kertaa otettu huomioon myös naapurista siirtyvät värähtelyt ja huonetilan koon vaikutus kriteereille asetettuihin raja-arvoihin.

Tarkastelussa on perusteena yhden ihmisen kävelystä aiheutuva värähtely ja siitä aiheutuva häiriö. Lattiat jaetaan matalataajuuksiin lattioihin, korkeataajuuksiin lattioihin sekä kelluviin lattioihin ja korotuslattioihin. Matala- ja korkeataajuuksisten lattioiden rajana on lattian alin ominaistaajuus. Kun alin ominaistaajuus on alle 10 Hz, lattia on matalataajuuksinen. Muussa tapauksessa lattia on korkeataajuuksinen. Matalataajuuksisilla lattioilla paikallaan oleva henkilö erottaa kävelystä aiheutuvan ominaistaajuudella tapahtuvan värähtelyn. Korkeataajuuksisilla lattioilla lattian värähtelyssä korostuvat erillisten askelten aiheuttamat iskut. Kelluville lattioille ja korotuslattioille on tyypillistä aistia esineisiin aiheutuva värähtely.

5.2 Laskentakriteerit

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 ensimmäistä kertaa 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 usein tarkistaa kohdassa 2.3 esitettyä käsinlaskentaa käyttäen, mutta perustapauksesta poikkeavissa tapauksissa tarvitaan kohdassa 2.3 esitettyjä FEM-laskentaohjeita. Tarkasteltaessa lattian pinnan kallistumaa voidaan tarvita myös kokeellista tutkimusta.

5.3 Värähtelykriteerit testauksessa

Koska suunnitteluun liittyy monia epätarkkuuksia, laskentamenetelmän toimivuus uudentyypisille ratkaisuille suositellaan varmistettavaksi rakennuskohteesta tehtävin mittauksin ja aistinvaraisin havainnoin. Testauksessa voidaan käyttää myös tarkempia kriteereitä, joita on laskennallisesti vaikea arvioida. Kehitetyllä testausohjelmalla pyritään yksinkertaistamaan ja yhtenäistämään kokeiden suoritusta, raportointia ja tulosten vertailua.

Testausohjelma perustuu yhden ihmisen kävelyn aiheuttamaan värähtelyyn. Testauksessa käytettyyn kävelytaajuuteen vaikuttaa esimerkiksi heel-drop -testillä (kantapäiltä pudottautuminen) mitattu välipohjan alin ominaistajuus. Matalataajuuksisilla lattioilla lattian luokitus perustuu lattiasta mitattuun kiihtyvyyšnäytteeseen ja korkeataajuuksisilla lattioilla lattiasta mitattuun pystysuuntaiseen siirtymänäytteeseen. Esineiden värähtelyyn perustuva luokitus perustuu 1,2 metrin korkeudelta mitattuun vaakasuuntaiseen siirtymänäytteeseen, joka aiheutuu lattian kallistumasta. Lattian kiihtyvyyšnäytteestä määritetään ns. ISO-kerroin, jolle on annettu raja-arvot eri värähtelyluokissa (taulukko 4). Pystysuuntaisesta siirtymänäytteestä määritetään suurin siirtymäamplitudi, jota verrataan eri värähtelyluokille ehdotettuihin raja-arvoihin (taulukko 5). 1,2 metrin

korkeudelta mitatusta vaakasuuntaisesta värähtelynäytteestä määritetään suurin siirtymäamplitudi, jota verrataan eri luokille annettuihin raja-arvoihin (taulukko 6). Ehdotetut raja-arvot perustuvat tutkituista lattioista mittaamalla ja aistinvaraisesti saatuun kokemukseen (liite A).

Myös laskennallisessa suunnittelussa käytettävien paikallisesta kuormituksesta aiheutuvien taipuma- ja kallistuma-arvojen kokeellisesta määrittämisestä annetaan ohjeita. Lattian luokittelu näiden arvojen perusteella tehdään laskennassa käytettyihin raja-arvoihin perustuen (taulukko 3).

Lisäksi julkaisussa esitetään menetelmät aistinvaraisen arvioinnin suorittamiseksi ja sen tulosten käyttämiseksi (kohta 4.2). Ihmiskeho on erittäin herkkä tuntemaan värähtelyä. Myös monet esineet ovat herkkiä lattian värähtelyille. Aistinvarainen havainnointi on usein tarkempi värähtelyn arviointikriteeri kuin monet laskelmat tai mittaukset. Aistinvaraisessa arvioinnissa kartoitetaan sekä värähtelyn voimakkuutta että hyväksyttävyyttä. Havainnointi perustuu sekä kehon tuntemukseen että esineisiin syntyvään värähtelyyn. Hyväksymiskriteerinä on, että kun kysytään vähintään viiden riippumattoman henkilön asiantuntijamielipidettä kävelystä aiheutuvista värähtelyistä, niin vähintään puolen heistä tulee hyväksyä värähtelyt.

5.4 Ehdotukset jatkotoimiksi

Tutkimuksessa on esitetty laskennalliset ja kokeelliset menetelmät, joilla voidaan arvioida kävelystä aiheutuvien välipohjien värähtelyiden suuruutta ja haitallisuutta. Esitetyt ehdotukset ovat monin osin uusia ja perustuvat suhteellisen suppeaan käytännön kokemukseen. Siksi mm. seuraavat toimet edistäisivät ehdotettujen menetelmien käyttöä ja jatkokehittämistä:

- Selvitetään erityyppisten kelluvien lattioiden pintarakenteen taipumista ja laskennan mallittamista erilaisilla eristemateriaaleilla. Tuloksia tarvitaan ehdotetun laskenta-menetelmän soveltamisessa. Samassa yhteydessä kehitetään edelleen värähtelyluokituksen rajoja esineiden värähtelyyn liittyen.
- Selvitetään matalataajuuksisten lattioiden luokituksen ja laskentaohjeen pätevyyttä hyvin pitkällä jänneväleillä (12–18 m).
- Selvitetään ehdotetun käsinlaskentamenetelmän todellinen tarkkuus suorittamalla jo testattujen välipohjien laskenta ja vertaamalla tuloksia kokeista saatuihin.
- Hankitaan parin vuoden ajan kokemusta ehdotetusta lattioiden värähtelyluokituksesta ja päivitetään ohje saatua kokemusta vastaavaksi. Erityisesti naapuriin siirtävien värähtelyiden raja-arvot, esineiden värähtelyt ja väliseinien merkityksen ottaminen huomioon tarvitsevat tueksi kentältä saatua kokemusta.

- Laaditaan ehdotettuun laskentamenetelmään perustuva mitoitusohjelma, jota voidaan käyttää välipohjien suunnittelussa. Mitoitusohjelma voidaan sovittaa erikseen eri valmistajien tarpeisiin (mm. materiaaliparametrit ja rakennetyypit).
- Päivitetään TRY:n normikortti (TRY 2000) ja IISI:lle laadittu ohje-ehdotus (Talja & Burstrand 2001) nykytietämystä vastaaviksi.

Ehdotetun menetelmän käyttöalue on rajattu tarkoin vain normaaleihin asuin- ja toimistorakennuksiin, joissa värähtely aiheutuu kävelystä. Siksi myös seuraavat tutkimusaiheet ovat ajankohtaisia:

- Ohjeet liikuntatilojen värähtelysuunnitteluun.
- Ohjeet värähtelysuunnitteluun, jossa värähtely aiheutuu koneista ja laitteista tai joissa koneiden tai laitteiden herkkyys on perusteena värähtelysuunnittelulle.

Lähdeluettelo

AISC/CISC. 1997. Steel design guide series 11. Floor vibrations due to human activity. American Institute of Steel Construction. 70 s.

Burstrand, H. & Talja, A. 2001. Design guide for light weight steel floors due to human induced vibrations. Stockholm: Swedish Institute of Steel Construction. 63 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. + liitt. 40 s.

ISO 2631-1. 1997. Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1: General requirements. 31 s.

ISO 2631-2. 1989. Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 2: Continuous and shock-induced vibrations in buildings (1 to 80 Hz). International Standards Organisation. 18 s.

ISO 10137. 1992. Basis for the design of structures. Serviceability of buildings against vibration. International Standards Organisation. 32 s.

ISO 7626-1.1986. Vibration and shock. Experimental determination of mechanical mobility. Part 1: Basic definitions and transducers. International Standards Organisation. 23 s.

ISO 7626-2.1990 Vibration and shock. Experimental determination of mechanical mobility - Part 2: Measurements using single-point translation excitation with an attached vibration exciter. International Standards Organisation. 21 s.

ISO 7626-5.1994 Vibration and shock. Experimental determination of mechanical mobility -- Part 5: Measurements using impact excitation with an exciter which is not attached to the structure. International Standards Organisation. 22 s.

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

Liite A: Englanninkielinen artikkeli asuin- ja toimistorakennusten lattioiden luokittelusta ja asetettujen raja-arvojen vertailu kokeelliseen aineistoon

CLASSIFICATION AND ACCEPTANCE LIMITS OF HUMAN-INDUCED FLOOR VIBRATIONS IN RESIDENTIAL BUILDINGS

ASKO TALJA
TOMI TORATTI
ERKKI JÄRVINEN

VTT Building and Transport, P.O. Box 1805, FIN-02044 VTT

ABSTRACT

This presentation proposes a five-class vibration classification of floors, which are used in residential and office buildings. The classification is material independent and it presumes that walking-induced vibrations are accepted as the basis of the design. The classification of the floors to vibrations classes will assist designers and clients in making decisions regarding floor vibrations. For floors with fundamental frequency over 10 Hz, for floating floors and for raised floors, the classification proposes a deflection limit due to 1 kN concentrated load. For floors with lower fundamental frequency, limit values for acceleration are proposed. Also a limit for the sloping of surface structure due to 1 kN concentrated load is proposed for all kind of floors. The given limits are based on test data of about 100 full size experiments including 14 different floor types from a wide span range. The measurement of design quantities and the subjective rating of intensity and acceptability were made using a standardised testing procedure. In rating by sense perceptions the observations were made based on body feeling and on vibrations of different objects.

KEY WORDS

floors, vibration, classification, acceptance limits, dynamic loads, testing, dimensioning

1. INTRODUCTION

The use of light-weight framing in housing is rapidly increasing. A complete building system needs also a floor system with good acoustic and vibration properties. Special design problems for light-weight floors, including steel, timber and light-weight concrete floors, are the sound insulation at low frequencies (under 100 Hz) and the floor vibrations due to walking.

The floors are usually grouped to low-frequency floors and high-frequency floors. Low-frequency floors are usually quite heavy floors and a person staying still may sense the resonance vibration due to another person walking. The high-frequency floors are usually quite light floors and a person staying still may sense the impacts due to separate steps. Third important group includes floating floors and raised floors. These types of superstructures are increasingly used because of impact sound isolation and because of the flexibility of mounting the installations. There is not much experience of vibration behaviour for these kinds of floors. The vibration of objects, as clinking of glassware or leaf movement of plants, are typical for these kind of floors. In practise the vibration types of the three main groups appear more or less mixed.

The human body is a very sensitive vibration meter. Even tiny vibrations can be annoying. Continuous vibration is felt more annoying than short-term, infrequent vibrations. If the vibrations are transferred from the neighbouring apartment, the disturbance is more irritating than if the vibrations have been caused in the same apartment. Also the type of room may have effect on the disturbance, floor vibration in a summerhouse or in a detached house is not so irritating than in a block of flats.

Many different design criteria have been proposed for floors in residential buildings. For light weight floors they are usually based on the deflection due to a 1 kN point load. Some of the deflection limits are span dependent (CCMC 1998) and some of them are frequency dependent (Hu 2000). The deflection criterion is given for the floor beams so that the deflection of sub-flooring is ignored. However, also the flooring board or an acoustic floating floor laid on the main floor may have a significant effect on the vibrations properties of the floor, especially in the vibrations of different objects. Often, when e.g. the floor is divided with partitions or floating floor or raised floors are used, it is difficult to conclude what does the span in the given design criterion actually mean. The proposal in this paper is, that the deflection limit of high frequency floors is independent of the span, but depends on the size of the room.

For heavy floors the design criterion is based on the acceleration limit. Often the walking excitation is given by frequency-dependent harmonic force components (AISC/CISC 1997). The acceleration in resonance vibration is determined by the force

component, which corresponds to the fundamental frequency of the floor. Also the standards for measuring the vibrations in buildings (ISO 2631-1, 1997 and ISO 26312, 1989) give recommendations for the maximum accelerations in buildings. Also in this paper the design criterion for low frequency floors is based on the acceleration criterion.

The design codes give usually only one limit value for floors in residential buildings. Therefore it is often unclear for the designers, what does the limit value actually mean. How much better the floor actually is if we half the given limit value? Often the criterion for vibrations transferred from the neighbouring apartment is also needed. This presentation proposes a five-class classification of floors in residential and office buildings. The classification forms an uniform basis for vibration design. The producer can give different vibration classes for the product depending on the span or structural details of the construction. If the vibration classification of a certain product is not functioning, it is possible to move the product to a lower vibration class. Although the vibration design of floors is often quite inaccurate, the fact is that the better the target vibration class is, the better are the vibration properties of the floor. Therefore the vibration classification assist both designers and clients in making decisions regarding floor vibrations. Because the limits of the classes are in some cases based on a limited experience, it is quite obvious that there will be a need to check the limits after some years of experience.

2. VIBRATION CLASSES

This presentation proposes a five-class classification of floors in residential and office buildings (Table 1). The class is composed of a capital letter and a number. The letter represents the sense perception of a sitting person and the number represents the sense perception from vibrations of objects. The classification is material independent and it presumes that walking-induced vibrations are accepted as the basis of the design. Because the sensibility of vibrations is an individual feature, the descriptions given in Table 1 are very suggestive. Also the vibration of different objects depend much on the properties and on the position of the object.

Table 1. The vibration classification of floors based on the intensity of the vibration.

Body perception	Vibration of articles
A The vibrations are usually imperceptible.	1 The clinking of glassware and the leaf movements of a plant (planted in a pot) are usually imperceptible.
B The vibrations are barely perceptible.	2 The clinking of glassware is usually imperceptible and the leaf movements are barely perceptible.
C The vibrations are perceptible.	3 The clinking of glassware is barely perceptible. The leaf movements perceptible
D The vibrations are clearly perceptible.	4 The clinking of glassware the leaf movements are clearly perceptible.
E The vibrations are strongly perceptible.	5 The clinking of glassware and the leaf movements of a plant are strongly perceptible

Table 2 gives a proposal for the lowest permissible vibration classes. The vibration class shall always be agreed with the customer. Lower or higher class may be agreed for special products and special dimensions, if that is justified by practical experience from other buildings.

Because there is little experience about the disturbance effects of vibrating articles, it is suggested to choose one class better vibration class in the design than given in table 2. That is if the performance is not experimentally verified, it is good practice to use class C2 instead of C3 and class B1 instead of B2.

Table 2. Proposal for vibration classes in office and residential buildings.

A1	Normal class for vibrations transferred from another apartment. Special class for vibrations inside one apartment.
B2	Lower class for vibrations transferred from another apartment. Higher class for vibrations inside one apartment
C3	Normal class for vibrations inside one apartment.
D4	Lower class for vibrations inside one apartment. For example attics and holiday cottages.
E5	Class without restrictions.

3. ACCEPTANCE LIMITS

Table 3 gives limit values for vibrations. The limit values are given for the following design quantities:

- The fundamental frequency f_0 . The frequency $f_0 = 10$ Hz divides the floors into low-frequency and high-frequency floors.
- The amplitude for acceleration a [m/s^2] is used for low-frequency floors in resonance vibration.
- The local displacement δ [mm] due to 1 kN point load is used for high-frequency floors. The distance from the force to the reference point, from where the displacement is measured, is not less than 600 mm. The distance and the local displacement is measured from the top surface of the floor.
- The slope ϕ due to 1 kN point load (Figure 1) is used for both low- and high-frequency floors with and without a floating or a raised floor. The space from the force to the reference point is the distance, which gives the maximum slope, but the distance shall not be less than 450 mm. The distance and the slope is measured from the top surface of the floor.
- In addition, the normal deflection limits given in other design codes shall be fulfilled.

If walking-induced vibrations are measured, the limit values for the following quantities are proposed:

- The peak vertical displacement $|u_{\max}|$ for high-frequency floors.
- ISO factor for low-frequency floors (ISO 2631-2, 1989). The value is determined by filtering the measured sample to 1/3 octave bands, weighting the rms-accelerations by curve W_k (ISO 2631-1, 1997) and dividing the maximum rms-acceleration by value 0.005 m/s^2 .
- The peak horizontal displacement $|w_{\max}|$ at a height of 1.2 m from the floor surface. The vibrations are measured from the top of a firm tripod support (s. Figure 1).

The quantities given above are the mean values measured from three separate test samples and these include the strongest vibrations of each sample. The peak value is the maximum deviation from the mean value of the measured sample.

The weight of the walking person shall be about 80 kg and the step velocity is 2 Hz. If the floor is low-frequency floor, also the step frequency proportional to the fundamental frequency of the floor shall be used. In this case the step frequency is determined from the fundamental frequency by dividing it by an integer, which results to step frequency less than 2 Hz, but is as close as possible 2 Hz. The distance from the nearest footstep to the reference point shall be not less than 600 mm in the measurement of vertical displacement and not less than 450 mm in measurement of horizontal vibrations.

If the length or the width of the room is less than $L=6$ m and the vibrations take place inside one apartment, the limit values of a , ISO-factor, δ and $|u_{\max}|$ may be multiplied by a factor

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

This factor takes into consideration the fact, that the walking excitation is lower in small rooms than in large ones (Figure 2).

Table 3. Acceptance limits for vibration classes.

Low-frequency floors			High-frequency floors, floating floors and raised floors			All floors		
Class	$a^{1)}$ [m/s ²]	ISO ²⁾ factor	Class	$\delta^{1)}$ [mm]	$ u_{\max} ^{2)}$ [mm]	Class	$\phi^{1)}$ (Fig. 1)	$ w_{\max} ^{2)}$ [mm]
A	≤ 0.03	≤ 4	A	≤ 0.12	≤ 0.05	1	$\leq 1/6000$	≤ 0.1
B	≤ 0.05	≤ 7	B	≤ 0.25	≤ 0.1	2	$\leq 1/3000$	≤ 0.2
C	≤ 0.075	≤ 11	C	≤ 0.5	≤ 0.2	3	$\leq 1/1500$	≤ 0.4
D	≤ 0.12	≤ 17	D	≤ 1.0	≤ 0.4	4	$\leq 1/750$	≤ 0.8
E	> 0.12	> 17	E	> 1.0	> 0.4	5	$> 1/750$	> 0.8

¹⁾ Static design criteria (load: 1 kN for u and w)

²⁾ Dynamic test criteria (load: walking person)

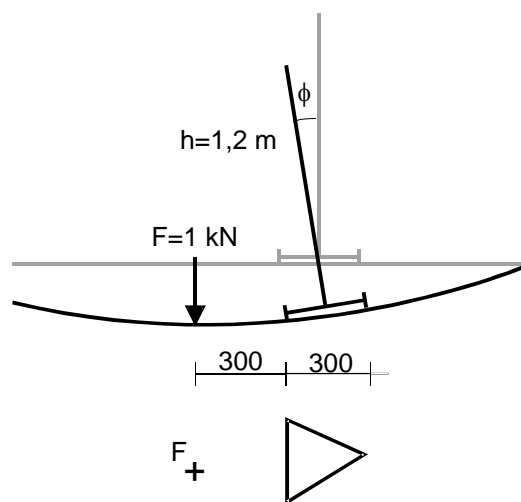


Figure 1. Determination of the slope of the top surface of the floor due to 1 kN point load.

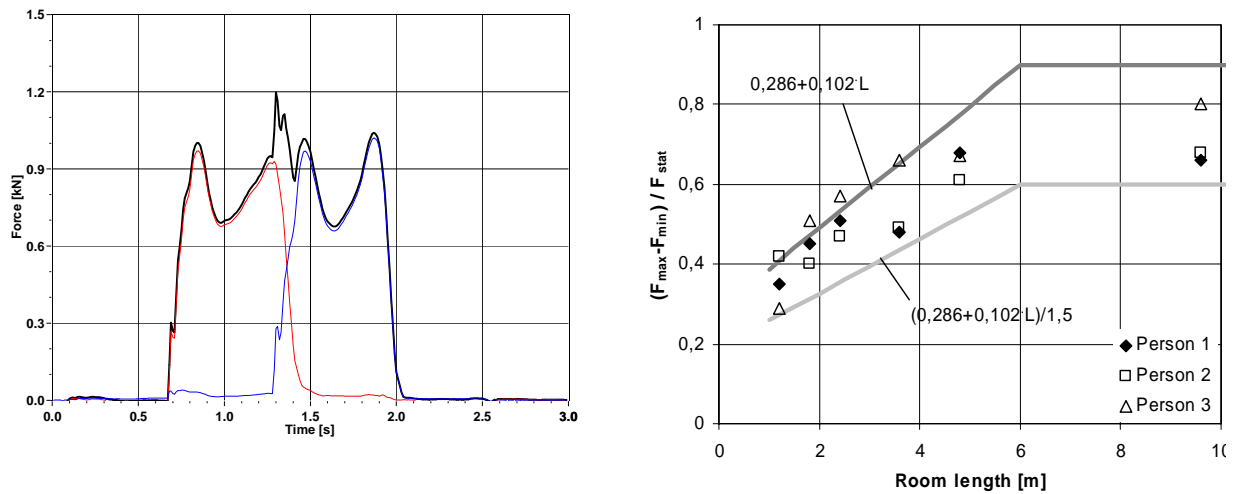


Figure 2. Left: Measured excitation force load induced by left and right footstep. Right: Force range of the continuous walking load measured from three different persons normal walking. Both forces are given proportional to the weight of the walker.

4. EXPERIMENTAL VERIFICATION OF THE ACCEPTANCE LIMITS

The test series include steel- and wood-framed floors with building boards or concrete slab top-flooring, hollow-core concrete slab floors, laminated veneer lumber (LVL) floors, floating floors and raised floors. More than half of the tests have been performed in laboratory circumstances and the rest in buildings under construction. In figure 3, information on the spans and fundamental frequencies of the floors are given. The figure shows that test data for floors with fundamental frequency less than 5 Hz is still not available.

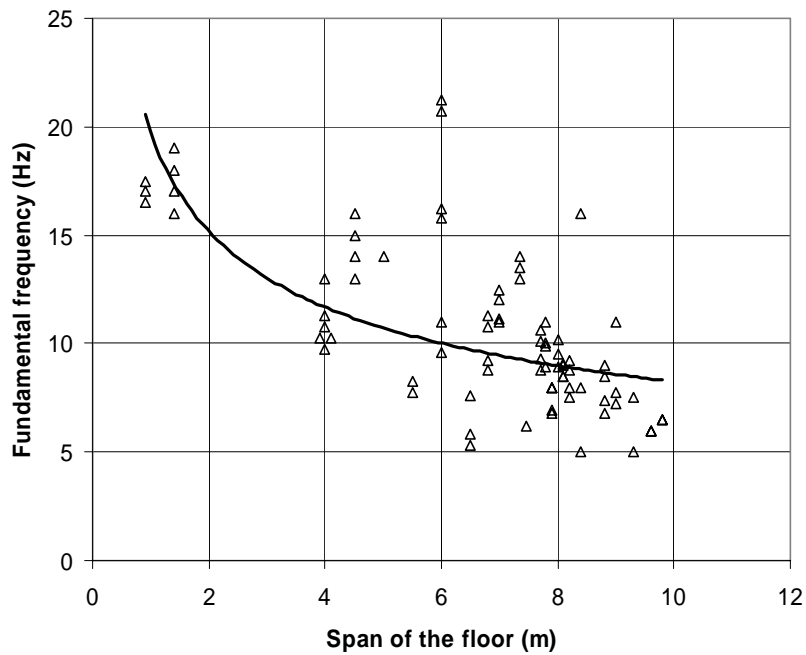


Figure 3. Fundamental frequency vs. span of the tested floors.

The measurement of design quantities and the rating of intensity and acceptability were made using a standardised VTT's testing procedure. In rating by sense perceptions the observations were made both from body feeling and from vibrations of different objects. The observations were (figure 3):

- body perception from a sitting position,
- clinking of a coffee cup with a spoon in the cup and on a saucer,
- leaf movements of a 30-40 cm high plant (planted inside a pot),
- rippling of water in a glass bowl, and
- chinking of a glass pane.

The objects were set on a firm tripod support. The weight of the support was 20 kg. The glass pane was hung vertically to the portrait face by mirror hooks.



Figure 4. Determination of floor properties by sense perception.

Figure 5 compares the intensities given in Table 1 with the subjective rating. The rating is based on a sitting observer's body feeling due to other person's walking. Each point in the figure is the average rating of all observers. The rating of vibration intensity is: imperceptible (0), barely perceptible (1), clearly perceptible (2) or strongly perceptible (3). The rating of acceptability on x- axis indicates the percentage of observers, which have accepted the vibrations.

Figure 6 compares the classification limits given in Table 3 with the acceptability of vibrations. Also here the rating of acceptability is based on a sitting observer's body feeling due to other person's walking. Here the acceptance criterion is that, if the majority of observers accept the vibrations, the floor is acceptable. The amplitude of acceleration for resonance vibration is not compared in the figure, because for sinusoidal vibration the ISO-factor relation is $a = (\text{ISO - factor}) \cdot 0,005 \text{ m/s}^2 \cdot \sqrt{2}$.

Figure 7 compares the classification limits with the acceptability limits, when the acceptability is based on the vibration of objects due to a person walking. Only very few test data is available at the moment. One test series is made for five types of floating floors. The floor slope due to 1 kN point load was measured. The first three floors were rated as borderline cases if the vibrations are transferred from another apartment, but the two last floors were not acceptable even if induced in the same apartment. The other test series were for different locations of three types of light-weight floors. The horizontal dynamic displacement amplitudes were measured from the top of a firm tripod support. In this test series, only the rating of acceptability inside one apartment was made.

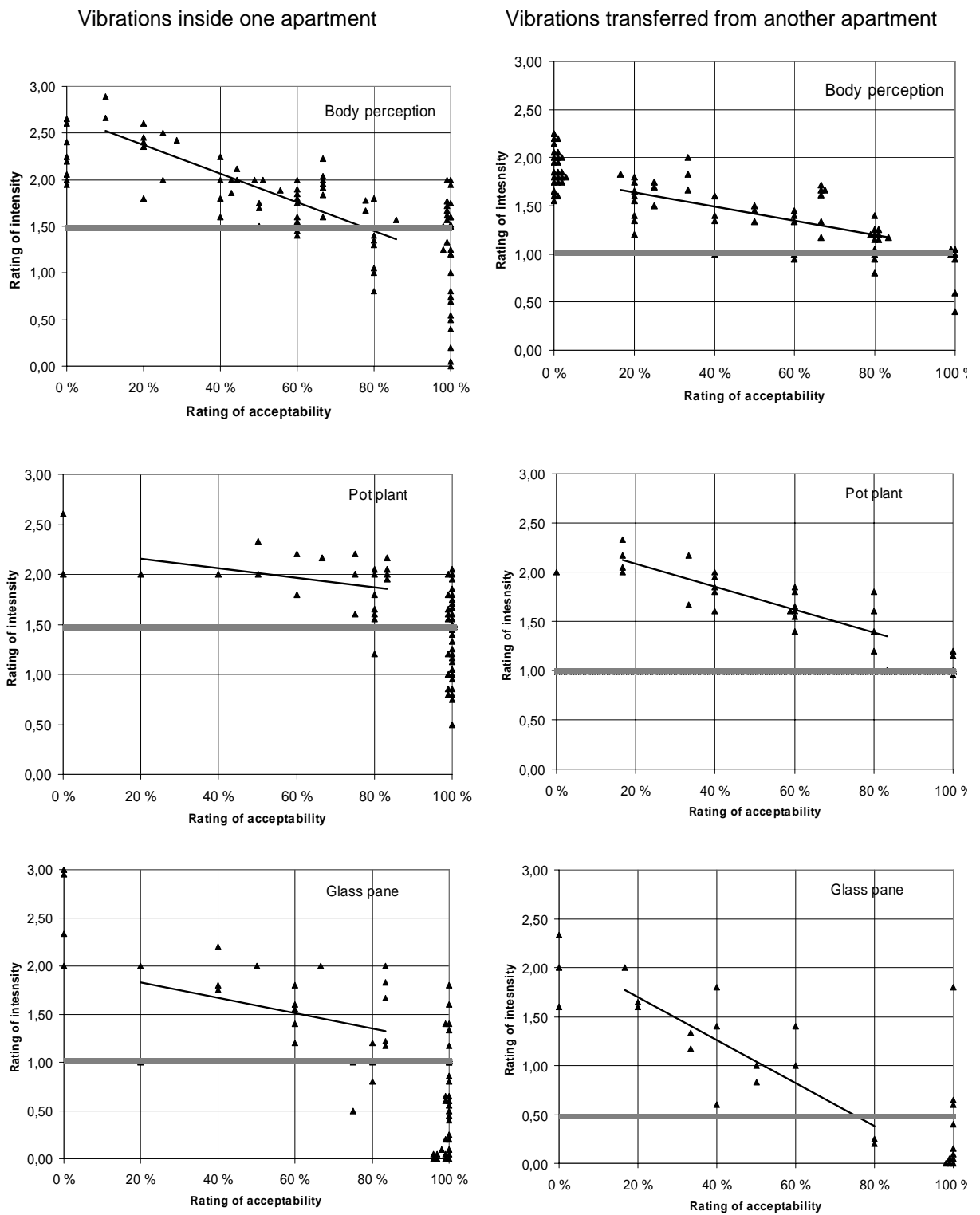


Figure 5. Vibration intensity vs. rating of acceptability. Measured quantities and trend lines. The horizontal line shows the limit described in the classification of table 1.

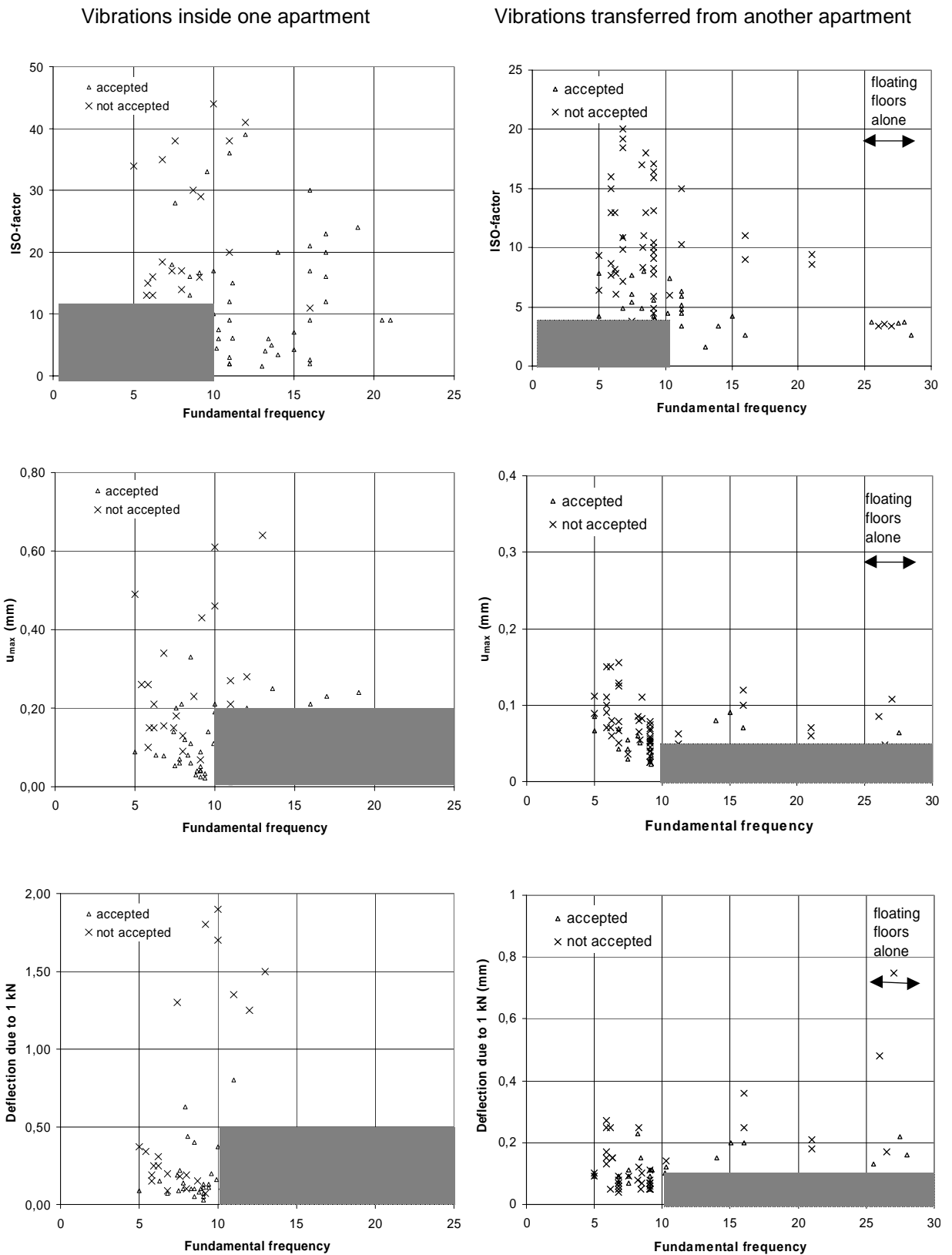


Figure 6. Measured test data for vertical vibrations of floor. The shaded area represents limit for vibration classes C (vibrations inside one apartment) and A (vibrations transferred from another apartment).

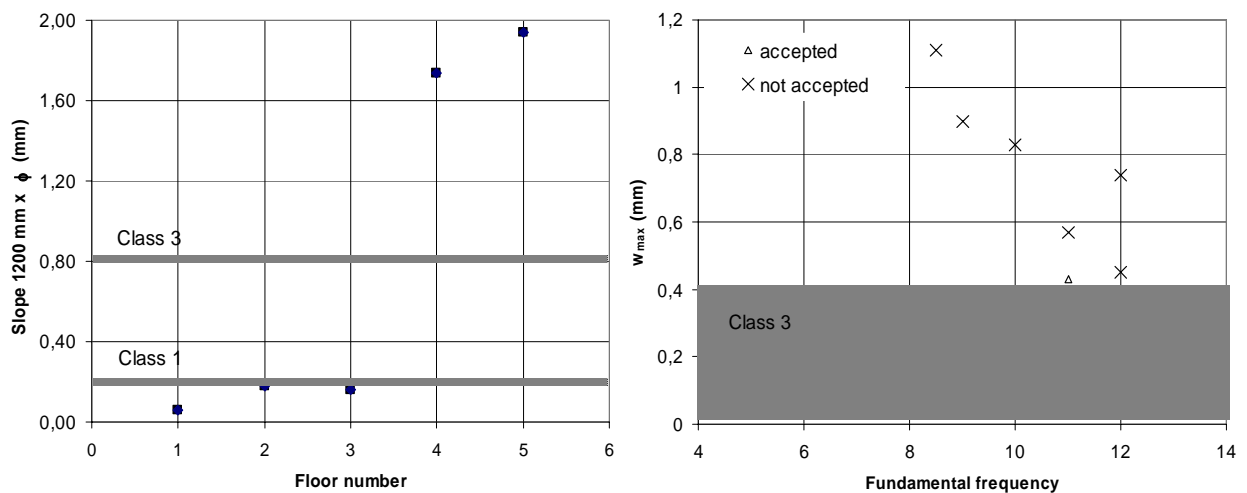


Figure 7. Measured test data of horizontal vibrations measured from the height of 1.2 m. Left: Static displacement due to a 1 kN point load for five different floating floors. Right: Dynamic displacement amplitudes of due to walking on light-weight floors.

5. ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish to thank Rautaruukki Oy, Sepa Oy, Finnforest Oy, Gyproc Oy, Sasmo Oy, The Finnish Association of Construction Product Industries (RTT), National Technology Agency of Finland (Tekes), The Finnish Ministry of the Environment and The International Iron and Steel Institute (IISI) for funding the tests and investigations, which enabled the work reported in this paper.

6. REFERENCES

- AISC/CISC. 1997. Steel design guide series 11. Floor vibrations due to human activity. American Institute of Steel Construction. 70 p.
- CCMC. 1998. Development of design procedures for vibration controlled spans using engineered wood members. Draft of Concluding report. Canadian Construction Materials Centre. 39 p.
- Hu, L. J. 2000. Serviceability design criteria for commercial and multifamily floors. Canadian Forest Service Report No. 4. Forintek Canada Corp. 126 p. + app. 40 p.
- ISO 2631-1. 1997. Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1: General requirements. 31 p.
- ISO 2631-2. 1989. Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 2: Continuous and shock-induced vibrations in buildings (1 to 80 Hz). International Standards Organisation. 18 p.



Tekijä(t) Talja, Asko, Toratti, Tomi & Järvinen, Erkki			
Nimeke Lattioiden värähtelyt Suunnittelu ja kokeellinen arviointi			
Tiivistelmä Julkaisussa esitetään menetelmät, joilla voidaan laskennallisesti ja kokeellisesti arvioida eri materiaaleista valmistettujen asuin- ja toimistorakennusten välipohjien kävelystä aiheutuvien välipohjien värähtelyiden suuruutta ja haitallisuutta. Esitetyt menetelmät ovat materiaaliriippumattomia. Laskennallisessa 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 ominaistajuus 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 käsinlaskentaa tai FEM-laskentaa käyttäen. Kriteereille asetettujen raja-arvojen perusteella välipohjat jaetaan viiteen eri värähtelyluokkaan. Suunnittelussa käytettävän värähtelyluokan valinta riippuu sallittavan häiriön suuruudesta. Värähtelykäyttämisen kokeellisesta arvioimisesta esitetään suosituksia lattian värähtelyluokan määrittämisestä. Luokittelu voidaan tehdä vertaamalla mitattuja kävelystä aiheutuvia värähtelyjä, paikallisesta kuormituksesta aiheutuvia taipumia ja paikallisesta kuormituksesta aiheutuvia kallistumia ehdotettuihin raja-arvoihin. Lisäksi julkaisussa esitetään menetelmät aistinvaraisen arvioinnin suorittamiseksi ja sen tulosten tulkitsemiseksi. Ehdotetut menetelmät ja raja-arvot perustuvat neljäntoista erityyppisen lattian testiin. Yhteensä testejä on noin sata. Testeissä lattioille on tehty värähtelyiden arviointi mittaamalla ja aistinvaraisesti. Julkaisun liitteessä esitetään yhteenveto mitattujen ja aistinvaraisten arviointien vastaavuudesta.			
Avainsanat floors, vibrations, residential buildings, office buildings, tests, disturbance, construction materials, design criteria, frequency			
Toimintayksikkö VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Rakenne- ja talotekniikkajärjestelmät, Kemistintie 3, PL 1805, 02044 VTT			
ISBN 951-38-5937-1 (nid.) 951-38-5938-X (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Projektinumero R1SU00913	
Julkaisuaika Helmikuu 2002	Kieli Suomi, eng. tiiv.	Sivuja 50 s. + liitt. 12 s.	Hinta B
Projektin nimi Asuinrakennusten välipohjien mekaanisten värähtelyjen hallinta		Toimeksiantaja(t) Finnforest Oyj, Gyproc Oy, Parma Betonila Oy, Rautaruukki Oyj, Sasmox Oy, Sepa Oy, Teknologian kehittämiskeskus (Tekes), Ympäristöministeriö	
Avainnimeke ja ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (nid.) 1455-0865 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Myynti: VTT Tietopalvelu PL 2000, 02044 VTT Puh. (09) 456 4404 Faksi (09) 456 4374	



Author(s) Talja, Asko, Toratti, Tomi & Järvinen, Erkki			
Title Vibration of floors Design and testing procedures			
Abstract <p>This report describes calculation and testing methods for the rating of walking induced vibrations on floors of residential and office buildings. The methods are independent of the building material used in the floor. For the design of floors for vibrations, design criteria and limit values for these criteria are given. When the floor is evaluated for the body perception of vibrations, the criteria to be used are the local deflection of a 1 kN point load or the floor acceleration due to the walking of a person. The deflection criterion should be used if the floor fundamental frequency is over 10 Hz, otherwise the acceleration criterion is used. When the vibrations are rated based on their effects on objects, either visual movements or sounds, the inclination of the floor surface caused by a 1 kN point load is used as a basis. For the verification of these criteria, instructions for manual design methods and FEM-methods are given. Based on the limit values of the above criteria, floors are classified into five different vibration classes. The decision of the vibration class to be used in the design of the building is founded on the acceptability level of the vibration disturbance permitted. Recommendations are given for the testing of floor vibrations and in choosing the vibration class for a particular floor. The floor classification can be done by comparing measured walking induced vibrations, local deflections and floor inclinations caused by a point load to the proposed limit values for the different vibration classes. Additionally, this report describes a testing method and a test result interpretation procedure to be used when rating the floor by subjective vibration experiments. The recommended methods and limiting criteria values are based on experiments carried out on fourteen different types of floors from different materials. Altogether, about one hundred floors have been tested. Both vibration measurements and subjective floor ratings have been done in these floor tests. In the appendix of the report, a summary analysis of the correlation between the vibration measurements and the subjective ratings is given.</p>			
Keywords floors, vibrations, residential buildings, office buildings, tests, disturbance, construction materials, design criteria, frequency			
Activity unit VTT Building and Transport, Structures and Building Services, Kemistintie 3, P.O.Box 1805, FIN-02044 VTT			
ISBN 951-38-5937-1 (soft back ed.) 951-38-5938-X (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Project number R1SU00913	
Date February 2002	Language Finnish	Pages 50 p. + app. 12 p.	Price B
Name of project Vibration control of residential floors		Commissioned by Finnforest Oyj, Gyproc Oy, Parma Betonila Oy, Rautaruukki Oyj, Sasmox Oy, Sepa Oy, The National Technology Agency (Tekes), Ministry of the Environment	
Series title and ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (soft back edition) 1455-0865 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Sold by VTT Information Service P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 9 456 4404 Fax +358 9 456 4374	

VTT TIEDOTTEITA – RESEARCH NOTES

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

- 2083 Tarvainen, Veikko, Pietilä, Jukka & Serenius, Matti. Puun öljykuivaus, öljykylästäys ja värjäys. 2001. 65 s. + liitt. 9 s.
- 2084 Hietaniemi, Jukka, Mangs, Johan & Hakkarainen, Tuula. Burning of Electrical Household Appliances: An Experimental Study. 2001. 60 p. + app. 23 p.
- 2085 Valkiainen, Matti, Klobut, Krzysztof, Leppäniemi, Sami, Vanhanen, Juha & Varila, Reijo. PEM-polttokennoon perustuvat mikro-CHP-järjestelmät. Tilannekatsaus. 2001. 60 s.
- 2090 Koukkari, Heli, Petäkoski-Hult, Tuula, Rönkä, Kimmo, Regårdh, Elina, Lappalainen, Veijo, Eerikäinen Miia, Norvasuo, Markku & Koota, Jaana. Esteetön asuinkortteli. 2001. 112 s. + liitt. 68 s.
- 2091 Toratti, Tomi. Puurakenteiden seisminen suunnittelu. 2001. 57 s. + liitt. 16 s.
- 2093 Andstén, Tauno. Käsisammuttimien käyttö ruokaöljypalojen sammutuksessa. Kirjallisuustutkimus. 2001. 28 s.
- 2100 Pakanen, Jouko, Möttönen, Veli, Hyytinen, Mikko, Ruonansuu, Heikki & Törmäkangas, Kaija. Dynaamisten HTML-sivujen ja multimedian hyödyntäminen taloteknisten järjestelmien käytön, huollon ja vikadiagnostiikan opastamiseen. 2001. 20 s. + liitt. 10 s.
- 2101 Toratti, Tomi. Seismic design of timber structures. 2001. 53 p. + app. 16 p.
- 2102 Kolari, Sirpa & Luoma, Marianna. Ilmanvaihtojärjestelmän puhtaan asennusmenetelmän kehittäminen. 2001. 47 s.
- 2103 Koivu, Tapio, Mäntylä, Kaj, Loikkanen, Kaisu, Appel, Mikael & Pulakka, Sakari. Innovaatiotoiminnan kehittäminen kiinteistö- ja rakennuskliimassa. Lähtökohtia ja kokeiluja. 2001. 81 s. + 19 s.
- 2104 Hostikka, Simo, Kokkala, Matti & Vaari, Jukka. Experimental Study of the Localized Room Fires. NFSC2 Test Series. 2001. 49 p. + app. 46 p.
- 2106 Anttila, Virpi & Luoma, Juha. Turvaväiden käyttökokeilu junissa. Käyttö ja matkustajien mielipiteet. 2001. 27 s. + liitt. 9 s.
- 2108 Vares, Sirje. Kerrostalon ympäristövaikutukset. LVIS-2001-tyyppikerrostalo. 2001. 49 s.
- 2109 Ranta-Maunus, Alpo, Fonselius, Mikael, Kurkela, Juha & Toratti, Tomi. Reliability analysis of timber structures. 2001. 102 p. + app. 3 p.
- 2110 Anttila, Virpi. Talvijalankulku, liukastumistapaturmat ja kelitiedottamisen kehittäminen. 2001. 51 s. + liitt. 11 s.
- 2112 Ala-Outinen, Tiina, Myllymäki, Jukka, Baroudi, Djebbar & Oksanen, Tuuli. Ruostumaton teräs tulipalolle altistetuissa rakenteissa. 2001. 53 s. + liitt. 9 s.
- 2113 Sipilä, Kari, Kirjavainen, Miikka, Ritola, Jouko & Kivikoski, Harri. Liikenne- ja yleisten alueiden sulanapito-järjestelmät. Energiatalous ja tekninen toteutus. Kesäkeli-projekti. 2001. 75 s. + liitt. 15 s.
- 2116 Ryytänen, Tiia, Kallonen, Raija & Ahonen, Eino. Palosuojaajat tekstiilit. Ominaisuudet ja käyttö. 2001. 101 s.
- 2118 Kärki, Otto. Alkolukko rattijuopumuksen ehkäisyssä. Esiselvitys. 2001. 85 s. + liitt. 3 s.
- 2119 Tillander, Kati & Keski-Rahkonen, Olavi. Rakennusten syttymistäajuudet PRONTO-tietokannasta 1996–1999. 2001. 66 s. + liitt. 16 s.
- 2120 Koota, Jaana. Construction site safety. Case United States. 2001. 39 p. + app. 3 p.
- 2121 Tervonen, Juha & Räsänen, Jukka. Environmental assessment of strategic transport actions. SEA in CODE-TEN. 2001. 25 p. + app. 7 p.
- 2123 Hietaniemi, Jukka, Baroudi, Djebbar, Korhonen, Timo, Björkman, Jouni, Kokkala, Matti & Lappi, Esa. Yksikerroksisen teollisuushallin rakenteiden palonkestävyyden vaikutus paloturvallisuuteen. Riskiana-lyysi ajasta riippuvaa tapahtumapuumallia käyttäen. 2002. 95 s. + liitt. 51 s.
- 2124 Talja, Asko, Toratti, Tomi & Järvinen, Erkki. Lattioiden värähtelyt. Suunnittelu ja kokeellinen arviointi. 2002. 51 s. + liitt. 13 s.