

Teräsrunkoisten välipohjien värähtelyjen hallinta

Asko Talja
VTT Rakennustekniikka



VALTION TEKNILLINEN TUTKIMUSKESKUS
ESPOO 1996

ISBN 951-38-4985-6
ISSN 1235-0605
Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 1996

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 Rakennustekniikka, Rakennusmateriaalit ja -tuotteet sekä puutekniikka, Kemistintie 3, PL 1807, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 7003

VTT Byggnadsteknik, Byggnadsmaterial och -produkter, träteknik, Kemistvägen 3, PB 1807, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 7003

VTT Building Technology, Building Materials and Products, Wood Technology, Kemistintie 3, P.O.Box 1807,
FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 7003

Tekninen toimitus Leena Ukskoski

VTT OFFSETPAINO, ESPOO 1996

Talja, Asko. Teräsrunkoisten välipohjien värähtelyjen hallinta [Vibration performance of steel-joint floors]. Espoo 1996, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita - Meddelanden - Research Notes 1790. 64 s. + liitt. 14 s.

UDK 69.016.7:69.025.3:534.83

Avainsanat buildings, steel structures, steels, structures, vibration, structural forms, floors, control, dynamic loads, instructions, dimensioning

TIIVISTELMÄ

Nykyinen suuntaus yhä kevyempiin välipohjiin ja suurempiin jänneväleihin sekä ihmisten vaatimustason kasvaminen lisäävät lattioille asetettuja värähtelyvaatimuksia. Tällä hetkellä Suomessa ei ole julkaistu aiheeseen liittyviä ohjeistoa. Tutkimus perustuu kirjallisuusselvitykseen ja siinä kuvataan lyhyesti ihmisten ja ihmisjoukkojen liikkeistä aiheutuvat dynaamiset kuormitukset, selvitetään värähtelyiden vaikutusta ihmiseen, esitetään sallittuja värähtelyjen suuruutta koskevaa kansainvälistä ohjeistoa, kuvataan eri maiden raskaiden ja kevyiden välipohjien mitoitusohjeita kävelystä aiheutuville värähtelyille sekä tehdään alustava ehdotus Suomessa käytettäväksi mitoitusmenetelmäksi. Julkaisun liitteenä on viisi mitoitusohjetta havainnollistavaa laskentaesimerkkiä.

Kävely sisältää jaksollisia ja iskumaisia dynaamisia kuormituksia, jotka voivat määrätä lattian värähtelyiden haitallisuuden. Ehdotettu mitoitusohje käsittää kolme eri mitoitusohjetta: Kävelystä aiheutuva lattian värähtely voi muodostua haitalliseksi, jos kävelyn jaksolliset kuormituskomponentit vahvistuvat liiaksi resonanssi-ilmiön vuoksi, jos lattia notkuu liikaa askelten alla tai detään yleensä mahdollisena, jos rakenteen värähtelyn alin ominaistaajuus on alle 8 Hz. Jos taaajuus on tätä suurempi, notkuminen ja tärinä voivat muodostua ongelmaksi. Matalat ominaistaajuudet ovat tyypillisiä raskaille ja korkeat ominaistaajuudet kevyille välipohjille.

Talja, Asko. Teräsrunkoisten välipohjien värähtelyjen hallinta [Vibration performance of steel-joint floors]. Espoo 1996, Technical Research Centre of Finland, VTT Tiedotteita - Meddelanden - Research Notes 1790. 64 p. + app. 14 p.

UDC 69.016.7:69.025.3:534.83

Keywords buildings, steel structures, steels, structures, vibration, structural forms, floors, control, dynamic loads, instructions, dimensioning

ABSTRACT

The recent tendency to lighter floors and longer spans together with high quality demands result to more attention in vibration criteria. At the moment no design rules regarding floor vibrations have been published in Finland. The publication is based on a literature study. Dynamic loading components about one person or a number of people, the human sensitivity to vibrations, different international proposals of vibration limits, and different design criteria proposals for vibrational serviceability are described. Also a preliminary design criteria proposal for Finland is given. The design method is clarified by five calculation examples.

Ordinary walking loading consist of both cyclic and impact components, which are essential for vibration harmfulness. The proposed design criteria comprises about three conditions: The vibrations may be harmful, if the resonance amplifies too much one of the cyclic loading components of walking loading, if the floor bends too much due to footfall contact or if the heel contact produces harmful floor trembling. The resonance is usually considered to be likely, if the lowest eigenfrequency of the floor is under 8 Hz. If the frequency is higher, bending and trembling may be problematic. Low eigenfrequencies are characteristic for heavy and high eigenfrequencies for light floors.

ALKUSANAT

Suomesta puuttuvat välipohjien värähtelyitä koskevat suunnitteluohjeet. Teräsrakenteiden ohjeet B6 ja B7 eivät ota kantaa lattioiden mitoittamiseen värähtelyille. Ohjeet esittävät vain staattiseen taipumaan perustuvat yleiset rajoitukset, mikä ei yleensä ole riittävä kävelystä aiheutuvien haitallisten värähtelyiden estämiseksi. Tutkimuksen tavoitteena on ollut koota asuin- ja toimistorakennusten teräsrunkoisten välipohjien värähtelyjen hallintaa koskeva olemassa oleva tieto ja laatia niiden avulla suomenkielinen perusjulkaisu, jota voidaan käyttää apuna kevyiden välipohjien tuotekehitystyössä, kuten rakenneratkaisujen kehittämissä, suunnittelulaskelmissa sekä mahdollisesti tarvittavien kokeiden suunnittelussa ja toteuttamisessa.

Tutkimus liittyy Teknologian kehittämiskeskuksen (TEKESin), Rautaruukki Oy:n, Kvaerner Pulping Oy:n ja Teräsrakenneyhdistyksen rahoittamaan Finnsteel-tekniologiaohjelmaan sekä VTT Teräs -tutkimusohjelman ‘Suunnittelu, mitoitus ja analysointi’ -projektiin. Tutkimus on osa TEKESin soveltavan teknisen tutkimuksen projektia ‘Värähtelemättömät savupiiput ja välipohjat’. Tutkimuksen päärahoittaja on ollut TEKES. Muina rahoittajina ovat olleet Rautaruukki Oy, Teräsrakenneyhdistys r.y., Kvaerner Pulping Oy (ent. Tampella Power Oy) ja Toivalan Konepaja Oy. Koko projektin projektipäällikkönä sekä tämän osatutkimuksen tekijänä ja raportin kirjoittajana on toiminut Asko Talja VTT Rakennustekniikasta. Kirjallisuushankinnat on suorittanut Anita Aronen VTT Tietopalvelusta. Raportin ulkoasun, tekstin ja kuvat on viimeistellyt Erja Schlesier VTT Rakennustekniikasta.

Projektin johtoryhmässä puheenjohtajana on toiminut Kaisa Juva Kvaerner Pulpingista ja sihteerinä Asko Talja VTT Rakennustekniikasta. Muut johtoryhmän jäsenet ovat Tom Warras Teknologian kehittämiskeskukselta, Kristian Witting Rautaruukista, Unto Kalamies Teräsrakenneyhdistyksestä, Vesa Mikkonen Toivalan Konepajasta, Tuomo Kärnä VTT Rakennustekniikasta ja Jouko Kouhi VTT Rakennustekniikasta. Jouko Kouhi on osallistunut johtoryhmätyöskentelyyn Finnsteel-tekniologiaohjelman vastuullisena ohjelmapäällikkönä. Kiitän projektin rahoittajia, johtoryhmää ja tutkimustyöhön osallistuneita.

Asko Talja

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	3
ABSTRACT	4
ALKUSANAT	5
1 JOHDANTO	8
2 IHMISTEN LIIKKEISTÄ AIHEUTUVAT DYNAAMISET KUORMITUKSET	9
2.1 Asuinrakennuksissa esiintyvät värähtelylähteet	9
2.2 Kävelystä aiheutuvat jaksolliset kuormitukset	9
2.3 Ihmisjoukoista aiheutuvat kuormitukset	11
2.4 Ihmisen liikkeistä aiheutuvat impulssikuormitukset	12
3 VÄRÄHTELYIDEN VAIKUTUS IHMISEEN	14
3.1 Ulkoiset ja sisäiset tekijät	14
3.2 Värähtelyjen suuruuden ja taajuuden merkitys.....	14
3.3 Muiden tekijöiden merkitys.....	15
4 VÄLIPOHJAN DYNAAMISEN KÄYTTÄYTYMISEN PERUSTEET	17
4.1 Ominaistaajuus	17
4.2 Resonanssivärähtely	18
4.3 Impulssin aiheuttama värähtely	20
5 SALLITTUJA VÄRÄHTELYJÄ KOSKEVAT OHJEET	21
5.1 Standardin ISO 2631 Osan 2 suositukset	21
5.2 ISO-standardin tulkinta kävelystä aiheutuville kuormituksille	22
5.3 Muut värähtelyrajatilaa koskevat ohjeet.....	23
5.4 Impulssikuormitukseen perustuvat ohjeet	25
6 JAKO MATALA- JA KORKEATAAJUUKSISIIN VÄLIPOHJIIN	27
6.1 Välipohjien värähtelymuodoista.....	27
6.2 Matalataajuuksiset välipohjat	28
6.3 Korkeataajuuksiset välipohjat	28
7 MATALATAAJUUKSISTEN VÄLIPOHJIEN OHJEET	30
7.1 Staattiseen laskentaan perustuvat mitoitukset	30
7.1.1 Ohjeiden nykytila	30
7.1.2 Kriteerit haitalliselle värähtelylle	31
7.1.3 Välipohjien dynaamisten ominaisuuksien määrittäminen.....	34
7.1.4 Menetelmän kalibrointi koetuloksiin ja vertailu muihin ohjeisiin ...	36
7.2 Dynaamiseen analyysiin perustuva mitoitukset	38
7.2.1 Dynaamiset suunnittelukuormitukset.....	38

7.2.2	Välipohjan kiihtyvyyssvasteen laskenta	39
7.2.3	Värähtelyn raja-arvot.....	41
8	KORKEATAAJUUKSISTEN VÄLIPOHJIEN OHJEET	42
8.1	Yhdysvaltojen ja Kanadan ohjeet.....	42
8.2	Ruotsin ohjeet.....	43
8.3	Australian ohjeet.....	45
8.4	Englannin ohjeet.....	46
8.5	Teräsrakenteiden Eurocode- ja ECCS-ohjeet.....	47
9	ALUSTAVA EHDOTUS MITOITUSMENETELMÄKSI	49
9.1	Mitoitusmenetelmäehdotuksen taustaa.....	49
9.2	Soveltuvuusalue.....	50
9.3	Mitoituskriteerit asuin- ja toimistorakennuksille	50
9.3.1	Matalataajuksiset välipohjat.....	50
9.3.2	Korkeataajuksiset välipohjat	52
10	VÄRÄHTELYOMINAISUUKSIIN VAIKUTTAVIA TEKIJÖITÄ.....	54
10.1	Liitosten jousto.....	54
10.2	Rakenteiden jatkuvuus	55
10.3	Rakenteiden jäykkyys.....	55
10.4	Lattian pinta-ala	56
10.5	Rakenteiden paino.....	56
10.6	Rakenteellinen vaimennus	57
10.7	Pistekuorman aiheuttama taipuma	58
11	JOHTOPÄÄTÖKSET	60
11.1	Yhteenvedo	60
11.2	Jatkotutkimustarpeet	60
	LÄHDELUETTELO	62

LIITE

LASKENTAESIMERKKEJÄ

1 JOHDANTO

Tämän julkaisun päätarkoitus on antaa välipohjien värähtelyjen hallintaan liittyvää perustietoa käytännön suunnittelua varten, mutta tietoa voidaan hyödyntää myös tutkimus- ja tuotekehitystyössä. Värähtelyistä aiheutuvat ongelmat ovat olleet tunnettuja jo pitkään, kuitenkin pyrkimys entistä kevyempiin rakenteisiin ja suurempiin jänneväleihin lisää haitallisten värähtelyjen ilmenemismahdollisuutta. Myös asumismukavuutta koskevia vaatimusten tiukentuminen edellyttää värähtelyjen parempaa huomioonottamista jo suunnittelussa. Välipohjien värähtely on monimutkainen ja teoreettisesti vaikeasti hallittava ilmiö. Perustietoa lisäämällä ja kehittämällä yksinkertaisia laskentaohjeita voidaan välttää virheet jo suunnitteluvaiheessa. Valmiissa rakenteissa tehdyt virheet ovat vaikeasti korjattavissa.

Ihmisen tuntemus värähtelyjen epämiellyttävyydestä ei riipu pelkästään rakenteen ominaisuuksista, vaan tuntemukseen vaikuttaa myös ihmisen oma ympäristön tila ja toiminnallisuus sekä tottumukset ja kulttuurierot. Ilmiö on rinnastettavissa melun ja tärinän aiheuttamaan epämiellyttävyyteen. Vaikutusten poistamiseksi pätevät myös samat periaatteet, häiriölähteen eristäminen tai rakenteen ominaisuuksien parantaminen siten, että siirtyvillä värähtelyillä on mahdollisimman pieni vaikutus ihmiseen. Erityisesti näihin seikkoihin voidaan vaikuttaa myös oikeilla rakenneratkaisuilla.

Välipohjien suunnittelua varten annetut yleiset teräsrakenteiden suunnitteluohjeet antavat vain suuntaa-antavia vaatimuksia ja ohjeita haitallisten värähtelyjen estämiseksi. Nykyisissä Suomen teräsrakenteiden ohjeissa esitetään vain normaali välipohjan taipumarajoitus, mutta euronormeissa on jo rajoitettu myös rakenteen ominaisvärähdystaajuutta. Puurakenteiden Eurocode 5 -ohjeet antavat teräsrakenteiden Eurocode 3 -ohjeita vaativammat mitoituskriteerit. Ohjeet onkin tehty erityisesti juuri kevyitä välipohjia varten. Ohjeen käyttöä on kuvattu lyhyesti mm. Kortesmaan (1995) artikkelissa.

Lattioiden värähtelyihin liittyvä tutkimus on ollut erityisen vilkasta Ruotsissa, jossa aiheesta on julkaistu mm. kaksi väitöskirjaa. Myös Yhdysvalloissa ja Kanadassa suunnitteluohjeita on viime vuosina tarkennettu. Tutkimus on kohdistunut pääasiassa puurunkoisiin välipohjiin, koska näillä kevytrakenteisilla rakenteilla värähtelyjen hallinta on ollut ongelmallisinta. Myös Suomessa on 1990-luvulla tehty ainakin kaksi aiheeseen liittyvää diplomityötä (Laavola 1990, Väänänen 1991). Laavolan diplomityön tuloksia on lisäksi sovellettu mm. Niemen (1996) teräsrakenteiden kevyiden välipohjien kehittämistä koskevassa diplomityössä.

Tässä esityksessä keskitytään erityisesti asuin- ja toimistotilojen välipohjien värähtelyihin. Rytmiseen liikuntaan tarkoitettujen tilat, tanssitilat, jalankulkusillat, konserttitilat, katsomotilat ja näköalamastot tarvitsevat omat erityistarkastelunsa, joiden ongelmakenttää kuvataan vain hyvin yleisellä tasolla. Tämän julkaisun tavoitteena on koota, tiivistää, selkeyttää ja havainnollistaa aikaisemmissa tutkimuksissa esitetty tieto ja täydentää sitä uudemmilla tutkimustuloksilla. Kirjallisuustutkimuksen perusteella pyritään esittämään kriteerit ja laskentamenetelmä teräsrunkoisten kevyiden välipohjien värähtelymitoituksen hallitsemiseksi. Menetelmää havainnollistetaan laskentaesimerkeillä.

2 IHMISTEN LIIKKEISTÄ AIHEUTUVAT DYNAAMISET KUORMITUKSET

2.1 ASUINRAKENNUKSISSA ESIINTYVÄT VÄRÄHTELYLÄHTEET

Värähtelyn lähteitä, jotka on otettava huomioon rakennusten suunnittelussa, on esitetty taulukossa 1.

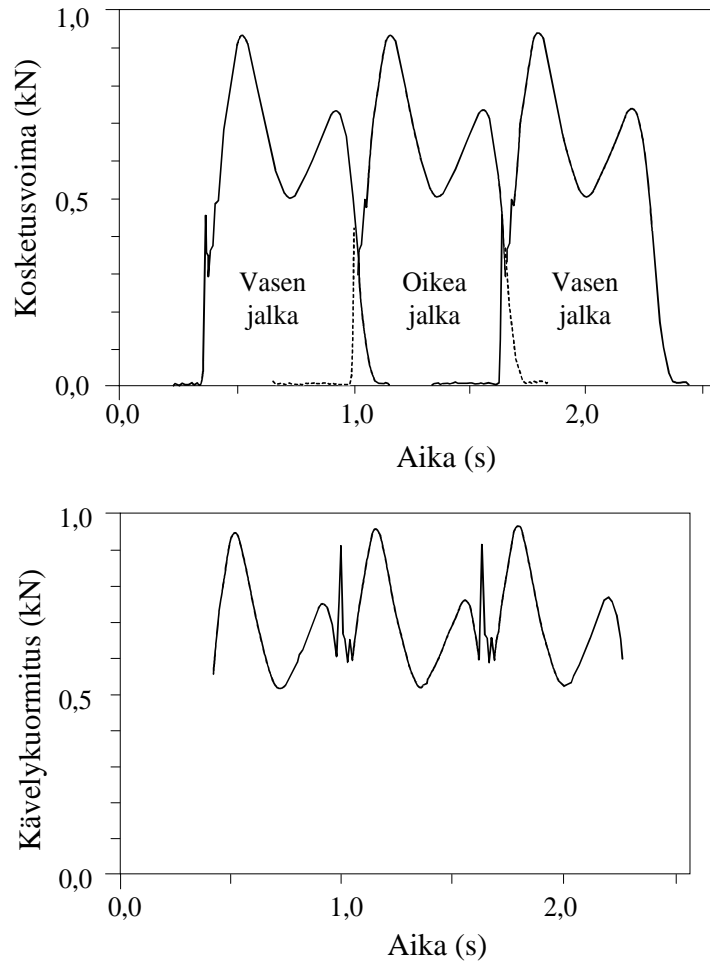
Taulukko 1. Rakennusten suunnitteluun vaikuttavia värähtelyn lähteitä.

Rakennukset yleensä	Asuinrakennusten välipohjat
<ul style="list-style-type: none">- liikenne- paalutuskoneet- louhintatyöt- kiertovesipumput- tuulikuormat (mastot ja savupiiput)- ihmismassojen liikkeet (katsomot)- työkoneet	<ul style="list-style-type: none">- kävely, juoksu- ovien sulkeminen- hyppiminen- voimistelu, tanssi- kaiuttimet, vapaasti sijoitettavat ilmastointilaitteet- hissit- pesukoneet, lingot, kuivausrummut

Asuin- ja toimistorakennuksissa esiintyvät dynaamiset kuormat aiheutuvat pääsääntöisesti ihmisten liikkeestä. Liikkeistä aiheutuvat kuormat ovat joko jaksollisia tai impulssikuormia. Jaksollinen kuorma aiheuttaa lattiaan tietyn taajuuden toistuvan pakoherätteen, impulssikuorma on kertaluonteinen ja vaimenee tietyn ajan kuluessa. Luonteeltaan jaksollisia kuormia ovat mm. kävely, juoksu ja tanssiminen. Impulssikuormia ovat taas esimerkiksi hypyt tai taakan nopea laskeminen lattialle. Myös impulssikuormat voivat saada aikaan lattian resonanssivärähtelyn, jos impulssit toistuvat säännöllisesti, kuten esim. tanssissa tai rytmisessä voimistelussa. Koneista ja laitteista aiheutuvat kuormat tuottavat lattiaan säännöllisen ja jaksollisen, tyypillisesti vakiotaaajuuksisen herätteen.

2.2 KÄVELYSTÄ AIHEUTUVAT JAKSOLLISET KUORMITUKSET

Tyypillinen askelkuormitus on esitetty kuvassa 1. Askelheräte sisältää sekä askelrytmistä aiheutuvia matalataajuuksisia (0 - 8 Hz) komponentteja että kantapään kosketuksesta aiheutuvia korkeataajuuksisia komponentteja (8 - 40 Hz). Askeltaajuus on kävelyssä normaalisti 1,4 - 2,5 Hz (sisätiloissa noin 1,6 Hz), juoksussa askeltaajuus voi nousta korkeammaksi, mutta on yleensä alle 3 Hz. Askelkuormituksesta aiheutuvaan kuormitukseen vaikuttaa painon lisäksi sukupuoli, kävelynopeus, kävelytyyli sekä kengän pohjien ja lattian materiaali (Ohlsson 1982).



Kuva 1. Kahdesta peräkkäisestä askeleesta muodostuva askelkuormitus (Ohlsson 1991).

Askelkuormitus F voidaan kuvata riittävän tarkasti sarjakehitelmällä

$$F = P \left[1 + \sum \alpha_i \cos(2\pi i f t) \right], \quad (1)$$

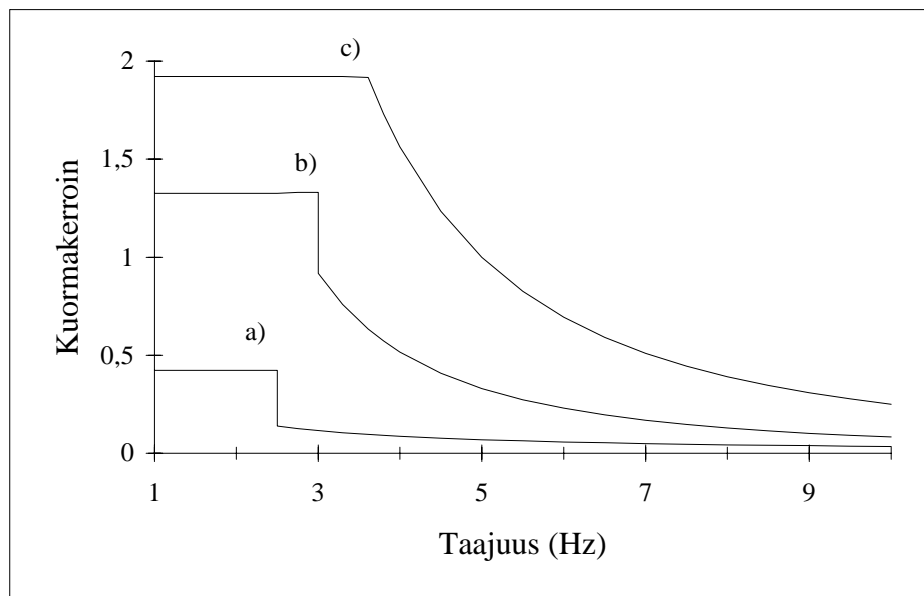
jossa P on henkilön paino (noin 750 N), f on askeltaajuus, α_i on dynaaminen kuormakerroin ja t on aika. Taulukossa 2 on esitetty eri sarjatekijöille kokeellisesti määritettyjä kuormakertoimia. Sarjan ensimmäinen tekijä on merkittävin ja kuvaa askeltaajuutta. Sarjan toinenkin tekijä, joka tulee kantapäähän ja päkiään kosketuksesta lattiaan, on vielä merkittävä. Kolmas ja varsinkin neljäs tekijä ovat jo huomattavasti merkityksettömpiä askelkuormituksen kuvaamisessa. Eri lähteissä esitetyt askelkuormitusten dynaamiset kuormakertoimet saattavat olla huomattavan erilaisia.

Taulukko 2. Dynaamisia kuormakertoimia kävelyllä.

Sarjan tekijä (i)	Allen ja Murray (1993a)		SCI (Wyatt 1989)	
	Taajuus (if)	Kerroin (α_i)	Taajuus (if)	Kerroin (α_i)
1	1,6 - 2,2	0,5	-	0,32
2	3,2 - 4,4	0,2	3 - 4	0,13
3	4,8 - 6,6	0,1	> 4,8	0,06
4	6,4 - 8,8	0,05	-	-

2.3 IHMISJOUKOISTA AIHEUTUVAT KUORMITUKSET

Eriksson (1994) on ehdottanut kuormakertoimien esittämistä jatkuvana taajuuden funktiona. Taulukon 2 portaiden poistamisella voidaan saavuttaa etuja mitoitusmenetelmiin liittyen. Kuvassa 2 ja taulukossa 3 on esitetty Erikssonin suositusten perusteella lasketut arvot kävelyn, juoksemisen ja hyppimisen kuormakertoimiksi. Tulokset perustuvat Erikssonin omiin mittaustuloksiin, joita hän on verrannut myös muiden tutkijoiden esittämiin arvoihin. Erikssonin suositukset kävelyllä mahtuvat taulukossa 2 esitettyihin rajoihin lukuun ottamatta taajuusaluetta 3 - 4 Hz, jossa arvot ovat vielä pienemmät (0,09 - 0,12) kuin SCI:n arvot. Kuvasta 3 nähdään myös, että juoksussa ja hyppimisessä kuormakertoimet kasvavat moninkertaisiksi kävelyyn nähden. Liikkuvasta ihmisjoukosta (n ihmistä) aiheutuva kuormitus voidaan arvioida korottamalla kuormakerrointa määräkertoimella K_n (taulukko 3).



Kuva 2. Erikssonin (1994) suosituksen perusteella lasketut yhden ihmisen liikkeistä aiheutuvat kuormakertoimet, a) kävely, b) juoksu, c) hyppiminen.

Taulukko 3. Kuvan 2 kuormakertoimet matemaattisessa muodossa.

	Taajuusalue	Kuormakerroin (α)	Määräkerroin (K_n)
Kävely	$f \leq 2,5$ Hz	0,42	$(n)^{0.9}$ 1)
	$f > 2,5$ Hz	$0,34/f$	$(n)^{0.5}$
Juoksu	$f \leq 3$ Hz	1,3	$(n)^{0.9}$ 1) 2)
	$f > 3$ Hz	$8,2/f^2$	$(n)^{0.5}$ 2)
Hyppiminen	$f \leq 3,6$	1,9	$(n)^{0.9}$
	$f > 3,6$	$25/f^2$	$(n)^{0.9}$ 2)

1) Kertoimet pätevät samassa tahdissa käveleville ryhmille, normaalille jalankulkuliikenteelle käytetään kerrointa $(n)^{0.5}$
 2) Kerrointa suositellaan käytettäväksi, koska tietoa ei ole riittävästi

Ihmisjoukoista aiheutuvista kuormituksista eri tiloissa on annettu ohjeita myös Kanadan rakennusmääräysten liitteessä (NRC 1990). Monista rytmisistä toiminnoista, kuten esimerkiksi tanssista, aiheutuu selvä harmoninen heräte, mutta myös voimistelussa esiintyy rytmisiä piirteitä, joita voidaan kuvata kävelyn tapaan harmonisilla komponenteilla (ks. taulukko 4).

Taulukko 4. Ihmisjoukon liikkeistä aiheutuvat dynaamiset kuormitukset (NRC 1990, Allen ja Murray 1993b).

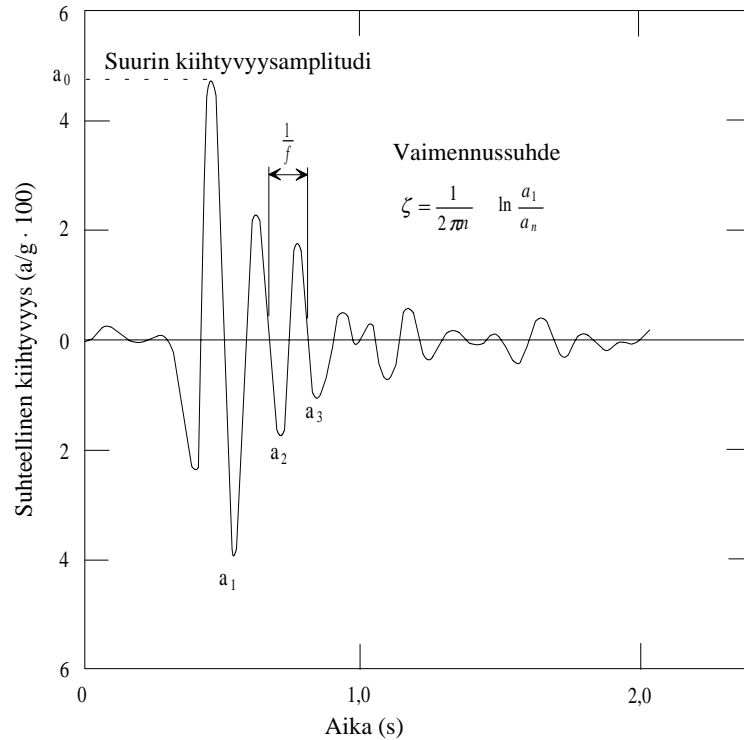
Toiminta	Herätteen taajuus	Ihmisten paino (W_p , kN/m ²)	Kuormakerroin (α)	Kuormitus (αW_p , kN/m ²)
Tanssi 1. harmoninen tekijä 2. harmoninen tekijä	1,8 - 2,8 3,6 - 5,6 ¹⁾	0,6 (2,5 m ² /pari)	0,5 0,1 ¹⁾	0,3 0,06 ¹⁾
Konsertti tai urheilutapahtumat	1,5 - 3	1,5 (0,5 m ² /ihminen)	0,25	0,4
Rytmisen voimistelu 1. harmoninen tekijä 2. harmoninen tekijä 3. harmoninen tekijä	2 - 2,75 4 - 5,5 6 - 8,25	0,2 (3,5 m ² /ihminen)	1,5 0,6 0,1	0,3 0,12 0,02

¹⁾ Allen ja Murray (1993b)

2.4 IHMISEN LIIKKEISTÄ AIHEUTUVAT IMPULSSIKUORMITUKSET

Kantapään kosketuksesta aiheutuu joka askeleella myös iskumainen impulssikuormitus (kuva 1), joka kestää vain noin 0,03 sekuntia ja jonka suuruus on tyypillisesti 3 - 4 Ns (Wyatt 1989). Merkittävämpi impulssikuormitus saadaan aikaan, kun keskipainoinen 76 kg:n ihminen pudottautuu nopeasti päkiöiltä kanta-

päille. Tässä ns. 'heel-drop' -testissä kantapää ovat aluksi 64 mm:n korkeudella (Allen ja Rainer 1976). Tällöin impulssin suuruudeksi saadaan tavallisesti noin 70 Ns ja sen kesto on noin 0,04 sekuntia. Impulssin seurauksena lattia jää värähtelemään. Värähtelyn vaimenemisnopeus riippuu vaimennussuhteesta (kuva 3). Vaikka liike esiintyy käytännössä vain esimerkiksi kurottauduttaessa ottamaan kirjaa hyllystä tai laskeuduttaessa portaita, ilmiöllä on arvoa sikäli, että se on suhteellisen yksinkertainen kuormitusfunktio testattaessa todellista rakennetta tai analysointimenetelmää, ja se antaa siten hyödyllistä tietoa rakenteen värähtelyherkkyydestä myöskin askelkuormituksille (Wyatt 1989).



Kuva 3. Tyypillinen lattian vaste pudottauduttaessa päkiöiltä kantapäille (Allen ja Rainer 1976).

3 VÄRÄHTELYIDEN VAIKUTUS IHMISEEN

3.1 ULKOISET JA SISÄISET TEKIJÄT

Työkoneiden ja laitteiden värähtely voi vaikuttaa sekä työtehoon, terveyteen että laitteen käyttömukavuuteen. Asuin- ja liikerakennusten välipohjien haitalliset värähtelyjen seuraukset rajoittuvat yleensä kuitenkin vain mukavuustekijöihin ja niiden seurannaisvaikutuksiin (keskittymishäiriöt, kalusteiden helinä yms.). Yleisiä värähtelyistä aiheutuvia epämukavuustekijöitä on lueteltu taulukossa 5.

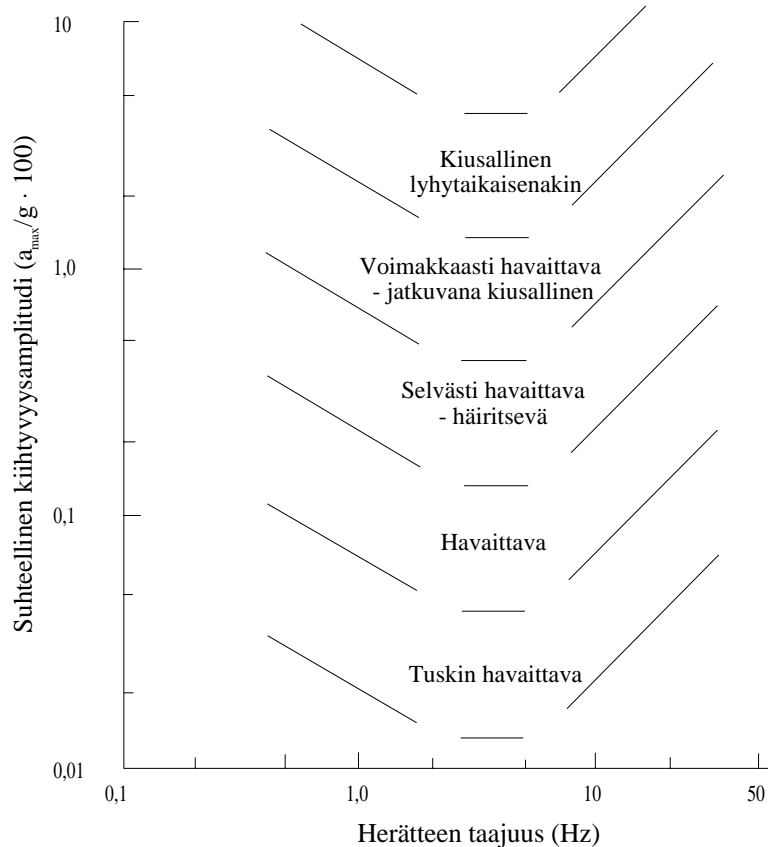
Taulukko 5. Värähtelyjen epämukavuuteen vaikuttavia tekijöitä (Griffin 1990).

Ulkoiset tekijät	Sisäiset tekijät
<ul style="list-style-type: none">- värähtelyn suuruus- värähtelyn taajuus- värähtelyn suunta- värähtelyn kesto- värähtelyn kohdistumispaikka- melu, lämpötila, jne.	<ul style="list-style-type: none">- vartalon asento (seisova, istuva)- kehon paino- kehon dynaaminen vaste- ikä, sukupuoli- tottumukset, odotukset, asenteet- toiminnallinen tila (työ, harrastus, lepo)

3.2 VÄRÄHTELYJEN SUURUUDEN JA TAAJUUDEN MERKITYS

Ulkoisista tekijöistä merkittävimmät ovat värähtelyn suuruus ja värähtelyn taajuus. SCI (Wyatt 1989) on esittänyt jatkuvan värähtelyn vaikutuksista kuvan 4 mukaisen riippuvuuden. Pienillä taajuuksilla (alle 1 - 2 Hz) värähtelyt siirtyvät sellaisenaan suoraan ihmiskehoon. Vähän suuremmilla taajuuksilla saavutetaan eri kehon osien ominaisvärähdysaikoja (vatsa, rintakehä, hartiat, kasvot). Tällä kuvan 4 vaakasuoralla taajuusalueella värähtelyn vaikutus korostuu eri elinten resonanssi-ilmiöiden vuoksi. Vielä suuremmilla taajuuksilla (yli 8 Hz) elimistön oma vaimennus alkaa vaikuttaa ja värähtelyn vaikutus ihmiseen on verrannollinen herätevärähtelyn suuruuteen.

Kuvassa 4 on verrattu myös jatkuvan jaksollisen herätevärähtelyn kiihtyvyytason merkitystä. Kiihtyvyydsamplitudin ollessa alle 0,05 % g värähtelyt alkavat olla jo havaittavissa, mutta vasta kun amplitudi on kymmenkertainen, värähtelyt muodostuvat häiritseviksi.



Kuva 4. Jatkuvan jaksollisen värähtelyn vaikutukset ihmisessä (Wyatt 1989).

3.3 MUIDEN TEKIJÖIDEN MERKITYS

Häiriön kestolla on suuri vaikutus elimistön rasittavuuteen ja värähtelyn häiritsevyyteen. Lyhytaikaisen iskumaisen impulssikuormituksen merkitys (esim. kävelyssä kantapään osuminen lattiaan) on huomattavasti pienempi kuin vastaavan jatkuvan herätteen.

Värähtelyistä saattaa aiheutua myös välillisiä häiriöitä, kuten lattian narinaa, astioiden kilinää, ikkunoiden helinää tai ovien kolinaa, jotka ovat yleinen syy tyytymättömyyteen. Suuri merkitys on myös totumuksilla, odotuksilla ja asenteilla. Esimerkiksi siirryttäessä kulkuvälineestä kotitiloihin vaatimustaso kasvaa merkittävästi. Perinteisessä betonitalossa elämään totuneet voivat kokea puu- tai terästaloon pienetkin värähtelyt häiritseviksi. Lähelle rautatietä rakennetussa talossa vakituisesti asuvat ovat totuneet juniin, vaikka vieraat kokevatkin junien aiheuttamat värähtelyt häiritsevinä. Matalien taajuuksien (alle 3 Hz) aiheuttamat värähtelyt voidaan kokea myös merkinä uhkaavasta vaarasta (katsomot, mastot, näköalatornit), vaikka niillä ei yleensä ole merkitystä lujuuteen. Kulttuureilla ja tavoilla on suuri merkitys siihen, mitkä asiat koetaan ylipäätään häiritsevinä.

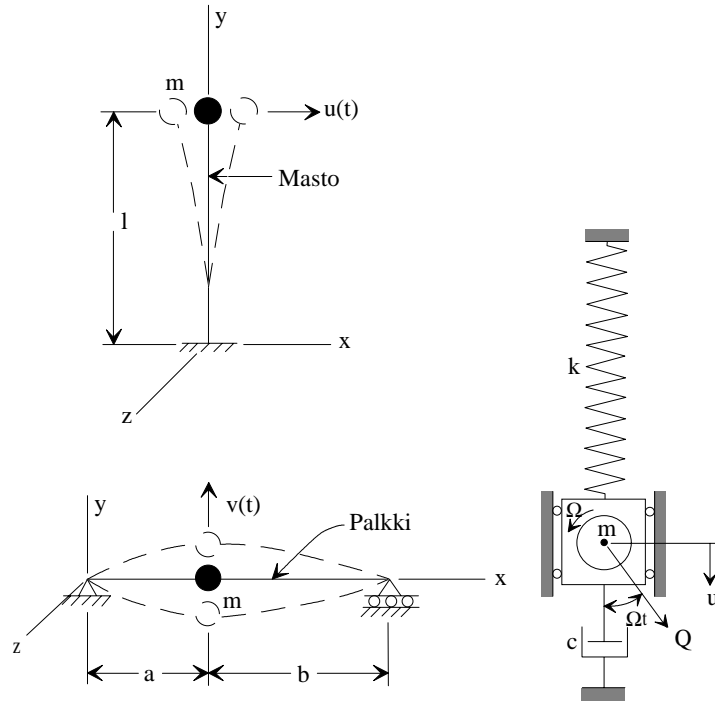
Ihmisen omalla toiminnallisuudella on myös suuri merkitys värähtelyn häiritsevyyteen. Ihmisille, jotka ottavat osaa häiriön tuottamiseen (esim. tanssi, voimistelu, urheilu), värähtely on häiritsevä vasta yli kymmenkertaisena siihen nähden,

mikä koetaan yleensä häiritseväksi asuin- tai toimistotiloissa. Tämän vuoksi eri käyttökohteet (liiketilat, asuintalot, sairaalat) ovat vaatimuksiltaan erilaisia ja vaatimustasot riippuvat jopa vuorokaudenajoista. Tuntematonta häiriön aiheuttajaa pidetään yleisesti tunnettua häiriön lähdettä haitallisempänä.

4 VÄLIPOHJAN DYNAAMISEN KÄYTTÄYTYMISEN PERUSTEET

4.1 OMINAISTAAJUUS

Usein rakenteiden käyttäytyminen kuvataan yhden vapausasteen värähtelynä. Tällöin massa diskretisoidaan yhteen kohtaan, rakenteen jäykkyys kuvataan jousella ja sisäinen vaimennus vaimentimella (kuva 5).



Kuva 5. Rakenteet (a) ja (b), jotka on idealisoitu yhden vapausasteen värähtelymallilla (c) (Weaver ym. 1989).

Ilman vaimenninta ($c = 0$) massa värähtelee harmonisesti järjestelmälle ominaisella taajuudella. Taajuus f ja poikkeama u voidaan laskea lausekkeista

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{ja} \quad u = A \cos(\omega t); \quad \omega = 2\pi f, \quad (2)$$

jossa amplitudi A riippuu herätteen suuruudesta. Maan vetovoiman massa aiheuttama staattinen siirtymä $u_{st} = mg/k$, joten $k = mg/u_{st}$ ja ominaistuuus f voidaan esittää myös muodossa

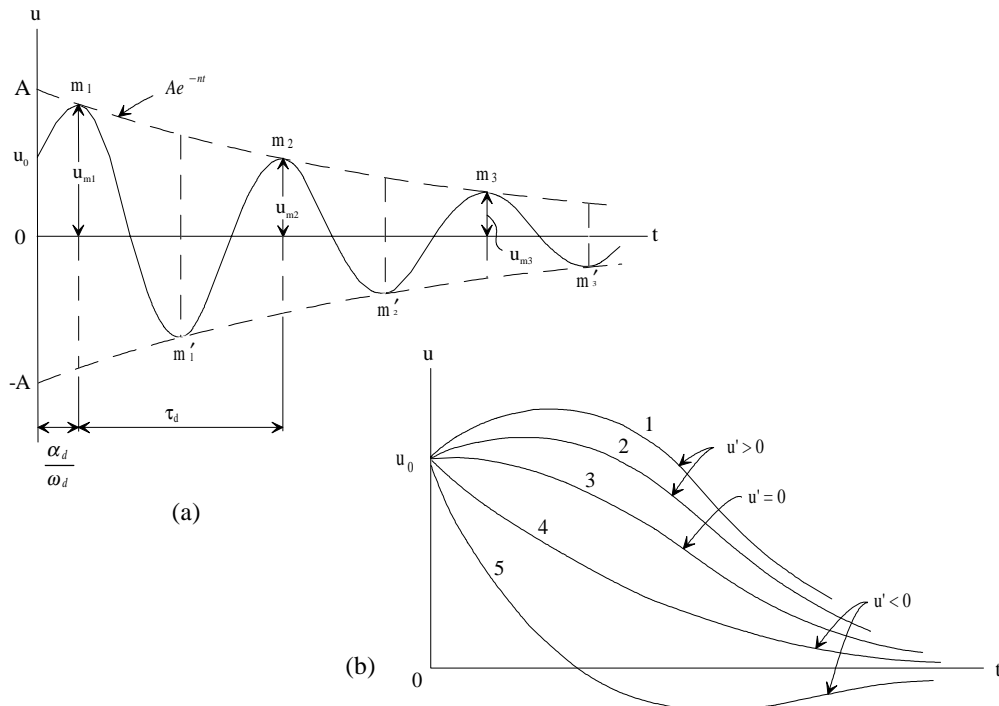
$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{u_{st}}}. \quad (3)$$

Koska palkki- ja laattarakenteillakin staattinen taipuma vastaa usein hyvin rakenteen ensimmäistä ominaisvärähdysmuotoa, kaava on käyttökelpoinen myös välipohjien alimman ominaistaajuuden arvioimisessa.

Kun rakenteeseen tuodaan vaimennin, jonka liikettä vastustava voima on suoraan verrannollinen massan nopeuteen (ns. viskoosi vaimennus), järjestelmän ominaistaajuuden ja poikkeaman lausekkeet muuttuvat muotoon

$$\frac{f_d}{f} = \frac{\omega_d}{\omega} = \sqrt{1 - \left(\frac{c/2m}{\omega}\right)^2} \quad \text{ja} \quad u = Ae^{-\frac{ct}{2m}} \cos(\omega_d t), \quad \text{kun } \frac{c/2m}{\omega} < 1, \quad (4)$$

jossa suurin amplitudi A riippuu aiheutetusta herätteestä. Kaavan ehto tarkoittaa sitä, että vaimennuksen on oltava niin pieni, että jaksollinen värähtely pääsee muodostumaan eikä pysähdy staattiseen tasapainoasemaansa (kuva 6). Rakennusten välipohjien sisäinen vaimennus on niin pieni, että värähtely on aina jaksollista.



Kuva 6. Jaksollinen vaimeneva värähtely (a) ja jaksoton vaimeneva värähtely (b) (Weaver ym. 1989).

4.2 RESONANSSIVÄRÄHTELY

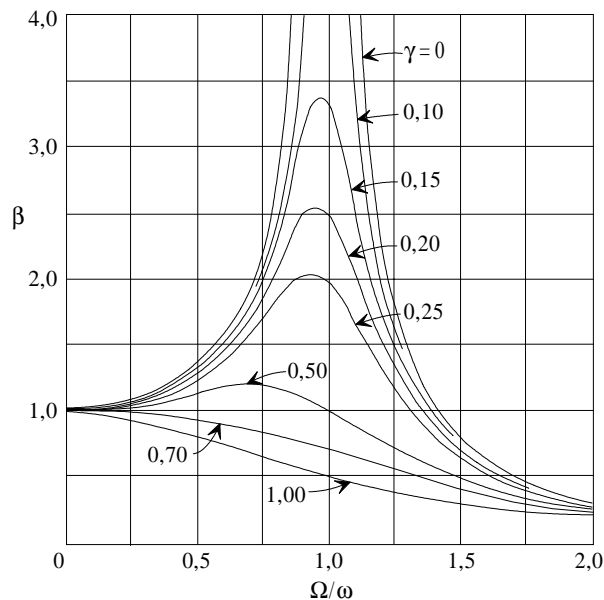
Kun massaun aiheutetaan pakkovoima $Q\cos(\Omega t)$ (kuva 5), massan poikkeama voidaan ilmoittaa muodossa

$$u = \frac{Q}{k} \beta \cos(\Omega t), \text{ jossa } \beta = \frac{1}{\sqrt{(1 - \Omega^2 / \omega^2)^2 + (2\gamma\Omega / \omega)^2}} ; \gamma = \frac{c/2m}{\omega} = \frac{c}{c_{cr}}. \quad (5)$$

Siirtymästä voidaan derivoimalla laskea massan nopeus ja kiihtyvyys. Tekijää γ kutsutaan kriittiseksi vaimennussuhteeksi. Siirtymän lausekkeesta nähdään, että jaksollisesta pakkovärähtelystä aiheutuva massan siirtymän amplitudi voidaan laskea kertomalla staattisen voiman Q aiheuttama siirtymä $u_{st} = Q/k$ suurennuskertoimella β . Kertoimen β arvo riippuu sekä taajuussuhteesta Ω/ω että vaimennuksen suuruudesta γ (kuva 7). Resonanssitapauksessa $\Omega/\omega = 1$ vasteeksi saadaan

$$u_{res} = \frac{1}{k} \frac{1}{2\gamma} Q \cos(\Omega t), \text{ kun } \frac{\Omega}{\omega} = \sqrt{1 - 2\gamma^2}. \quad (6)$$

Normaaleilla välipohjilla rakenteellinen vaimennus on vain noin 0,01 - 0,03, joten jaksollisen herätteen vaikutukset 17 - 50 -kertaistuvat, jos heräte jatkuu pitkään ja sen taajuus sattuu rakenteen ominaistajuudelle. Jo viiden jakson herätteellä saavutetaan 2/3 suurennuskertoimen maksimiarvoista (Wyatt 1989). Kuvasta nähdään, että mikäli herätteen taajuus on alle puolet rakenteen ominaistajuudesta, pienelläkin vaimennuksella suurennuskerroin on alle 1,5. Jos taas herätteen taajuus on yli 1,5-kertainen ominaistajuuteen nähden, rakenteen vaste on jopa pienempi kuin heräte. Kävelyn alhaisten taajuuskomponenttien vuoksi tätä aluetta ei kuitenkaan voida käytännössä hyödyntää.



Kuva 7. Vaimennuksen vaikutus suurennuskertoimeen (Weaver ym. 1989).

4.3 IMPULSSIN AIHEUTTAMA VÄRÄHTELY

Rakenteeseen voi kohdistua myös iskumaisia kuormituksia. Hetkellistä lyhytaikaista kuormitusta voidaan pitää impulssikuormituksena $J = Q t_I$, jos voiman Q vaikutus massaan on hyvin lyhytaikainen (t_I) ominaisvärähdysaikaan $T = 1/f$ nähden. Jos vaimennusta ei oteta huomioon, impulssin vaikutuksesta vapaasti liikkuva massa saa nopeuden J/m . Jousen varassa oleva massa jää värähtelemään vapaasti poikkeaman ollessa muotoa $u = u_{max} \cos(\omega t)$. Derivoimalla lauseke saadaan nopeuden amplitudiksi $u_{max}\omega$, jonka on oltava yhtä suuri kuin J/m . Tuloksena saadaan siirtymä-, nopeus ja kiihtyvyydvasteiden amplitudeille lausekkeet

$$u_{max} = \frac{J}{m\omega}, \quad v_{max} = \frac{J}{m} \quad \text{ja} \quad a_{max} = \frac{J\omega}{m}. \quad (7)$$

Tasomaisilla rakenneosilla, joilla massa on jakaantunut laajalle joustavalle alueelle, värähtely tapahtuu monivapausasteisena. Niiden käyttäytymistä ei tässä yhteydessä kuvata tarkemmin. Mielivaltaisen rakenteen pisteeseen (x_0, y_0) vaikuttavasta impulssista aiheutuva nopeus kuitenkin voidaan laskea summalausekkeella

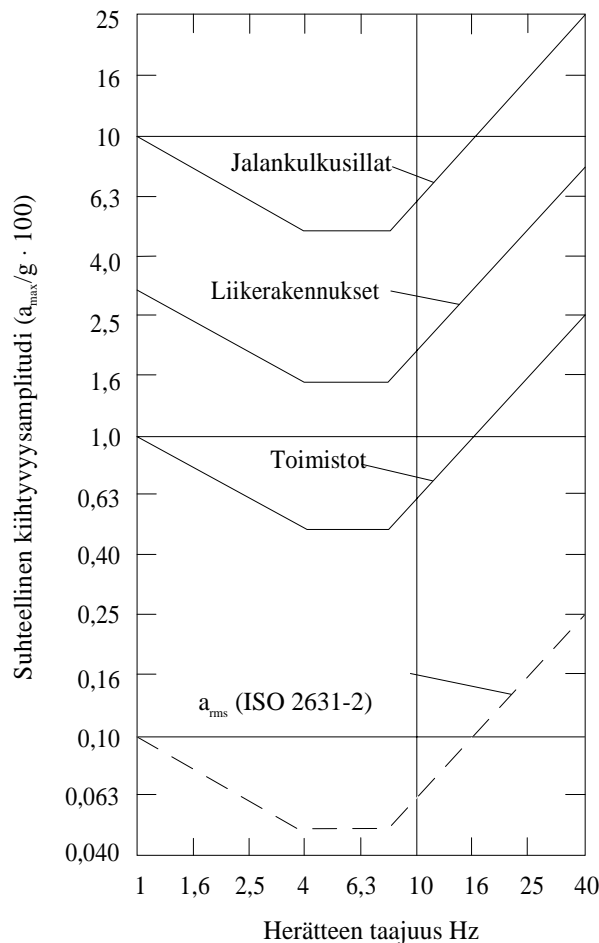
$$v_{max} = J \sum \frac{\Phi_n^2(x_0, y_0)}{M_n}. \quad (8)$$

jossa $\Phi_n(x_0, y_0)$ on ominaismuotoa n vastaava muotofunktion (modal shape function) arvo, joka on suhteutettu ominaismuodon suurimpaan arvoon, ja M_n on kyseiseen ominaismuotoon liittyvä ominaismassa (modal mass, generalized mass) (Ohlsson 1988).

5 SALLITTUJA VÄRÄHTELYJÄ KOSKEVAT OHJEET

5.1 STANDARDIN ISO 2631 OSAN 2 SUOSITUKSET

Kansainvälinen standardi ISO 2631-2 (1989) antaa rakennusten värähtelyraja-suositukset, joiden alapuolella rakenteista mitattujen värähtelyn haittavaikutus ihmiseen on pieni. Standardi antaa suositukset sekä kiihtyvyyden että nopeuden suhteen. Raja-arvot perustuvat tehollisarvon peruskuvaajaan (kuva 8), jota korjataan rakennuksen käyttötarkoituksen mukaan (taulukko 6). Annetut värähtelyraja-suositukset ovat arvoja, joita alemmilla arvoilla epämiellyttäviä tuntemuksia tai valituksia häiriöistä ei yleensä ole esiintynyt. Nopeuden värähtelyraja v_{rms} on suoraan yhteydessä kiihtyvyyksirajaan a_{rms} . Nopeuden raja-arvot voidaan laskea yksinkertaisella muunnoksella $v_{rms} = a_{rms}/(2\pi f)$. Kiihtyvyyden raja-arvo on vakio taajuusalueella 4 - 8 Hz, kun taas nopeuden raja-arvo on vakio yli 8 Hz:n taajuuksilla. ISO suosittelee rakennusten värähtelyiden mittaamista kiihtyvyyden perusteella.



Kuva 8. Kiihtyvyyden raja-arvokäyriä. Standardin ISO 2631-2 mukainen peruskäyrä ja suosituksia kiihtyvyyssamplitudin raja-arvokäyriksi kävelystä aiheutuville värähdyksille (Allen ja Murray 1993a).

Taulukko 6. Värähtelyrajan korjauskertoimet rakennuksen käyttötarkoituksen mukaan (ISO 2631-2 1989).

Käyttötarkoitus	Aika	Jatkuva tai ajoittainen värähtely	Hetkellinen, usean kerran päivässä toistuva värähtely
Kriittiset työskentelyalueet (esim. leikkaussalit, tarkkuuslaboratoriot jne.)	Päivä Yö	1	1
Asuinrakennukset	Päivä Yö	2 - 4 1,4	30 - 90 1,4 - 20
Toimistorakennukset	Päivä Yö	4	60 - 128
Työpajat	Päivä Yö	8	90 - 128

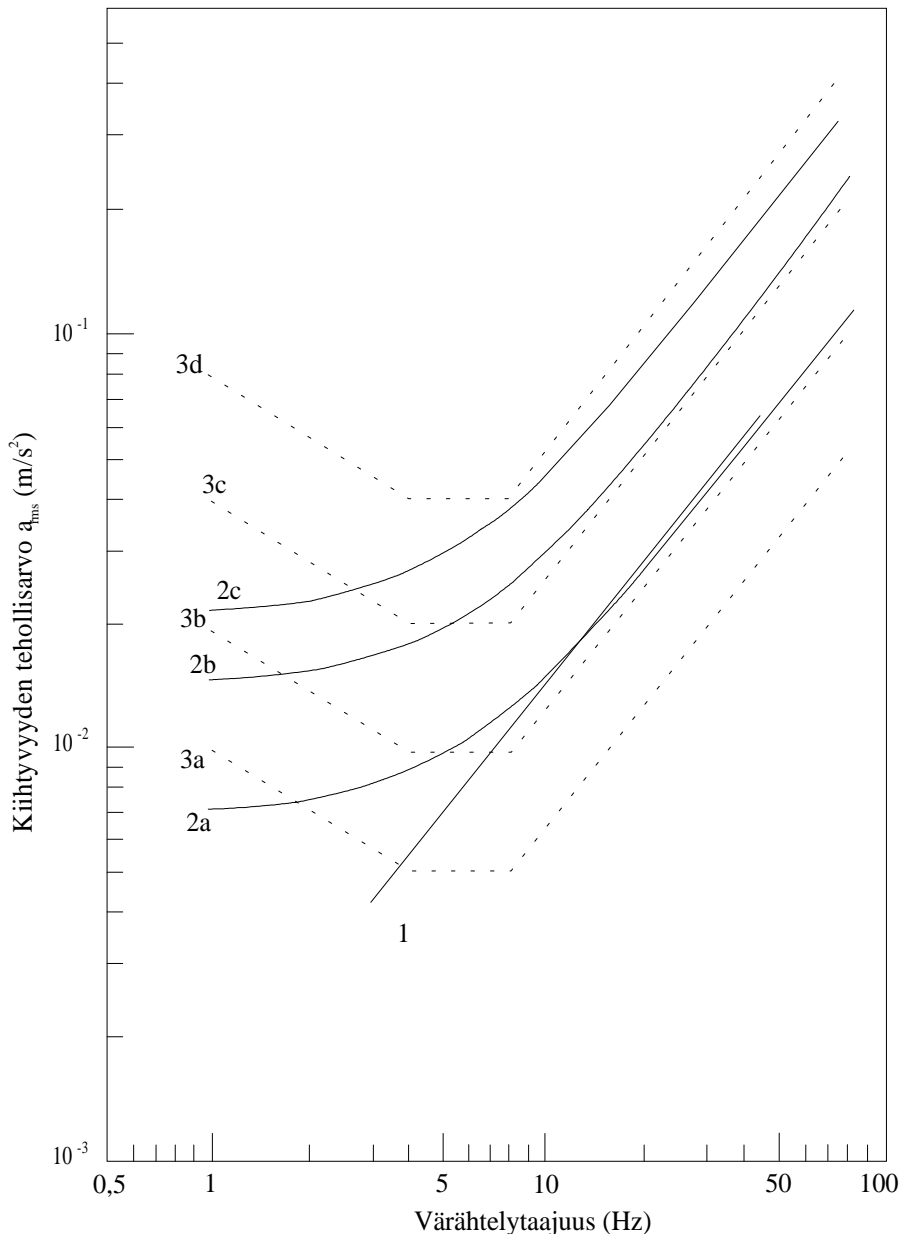
Taulukon 6 ajoittainen värähtely voi aiheutua esimerkiksi työkoneista (paalutuskoneet, iskuvasarat) tai kulkuvälineistä (junat, bussit, hissit). Kuitenkin kaikki alle kaksi sekuntia kestävät herätteet ovat taas hetkellisiä herätteitä. Jos hetkellinen häiriö toistuu useita kertoja päivässä (N), sen vaikutus otetaan huomioon kertomalla korjauskerroin tekijällä $1,7/\sqrt{N}$. Yksittäiseksi hetkelliseksi värähdykseksi asuinrakennuksissa voidaan katsoa myös yksittäinen yli kahden sekunnin tapahtuma (kesto $T \geq 2$ s). Tällöin korjauskerrointa korjataan tekijällä $1/T^{1,22}$ betonilattioilla ($T < 20$ s) ja tekijällä $1/T^{0,31}$ puulattioilla ($T < 60$ s). Standardi ei anna suoraa tietoa esim. kävelystä aiheutuvien värähtelyjen luonteesta eikä korjauskerrointa kävelykuormituksille.

5.2 ISO-STANDARDIN TULKINTA KÄVELYSTÄ AIHEUTUVILLE KUORMITUKSILLE

Seuraavassa esitetty kävelyherätteen luonteen tulkinta ISO-standardien avulla perustuu artikkeliin (Allen ja Murray 1993a). Toimistorakennuksille ISO suosittelee korjauskerrointa 4 jatkuvalla tai ajoittaisella värähtelyllä ja kerrointa 60 - 128 lyhytaikaiselle värähtelyllä. Ajoittainen värähtely voi aiheutua esimerkiksi paalutuskoneesta ja lyhytaikainen värähtely esimerkiksi voimakkaasta tuulenpuuskasta. Myös kävely on luonteeltaan ajoittaista, mutta ei niin usein toistuvaa kuin esim. paalutuskoneen heräte, joten voidaan arvioida, että kävelyn korjauskerroin olisi noin 5 - 8. Perustuen arvioon, jonka mukaan huippu- ja tehollisarvon suhde on kävelyherätteellä (kuva 1) noin 1,7, epämukavuutta aiheuttava kiihtyvyyden amplitudi on noin 0,4 - 0,7 % g kriittisellä taajuusvälillä 4 - 8 Hz. Jalankulkusilloille ISO 10137 (1992) suosittelee kerrointa 60, joka on noin 10-kertainen toimistotiloihin nähden. Ostoskeskuksissa ihmiset hyväksyvät värähtelyt, jotka ovat jotakin edellisten väliltä. Allenin ehdottamia kiihtyvyydsamplitudin suositusrajoja on esitetty kuvassa 8.

5.3 MUUT VÄRÄHTELYRAJATILAA KOSKEVAT OHJEET

Standardin ISO 2631 osan 2 kehitykseen ovat vaikuttaneet lukuisat tutkimukset ja eri maiden kansalliset sovellutukset ISO-standardin työversioista. Griffin (1990) on esittänyt eri maiden standarditilanteesta hyvän yhteenvedon, josta esitetään tässä joitakin otteita. Omia standardeja värähtelyrajatiloista ovat tehneet ainakin Saksa, Englanti, Kanada, Japani, Yhdysvallat ja Kanada. Erityisesti Saksassa on standardin kehittäminen ollut erittäin aktiivista. Kuvassa 9 on esitetty joitakin eri tutkimusten tai ohjeiden mukaisia värähtelyn raja-arvoja pystysuuntaiselle värähtelylle.



Kuva 9. Pystysuuntaisen kiihtyvyyden raja-arvoja eri ohjeiden mukaan. (1) Reiher & Master, 'heikosti havaittava', (2a) DIN 4150, $KB = 0,2$, (2b) DIN, $KB = 0,4$, (2c) DIN, $KB = 0,6$, (3a) ISO 2631, peruskäyrä, (3b) ISO 2631, kerroin 2, (3c) ISO 2631, kerroin 4, (3d) ISO 2631, kerroin 8 (Griffin 1990).

Reiherin ja Meisterin vuonna 1931 tekemiä laboratoriokokeita pidetään aiheeseen liittyvinä peruskokeina. Tulosten perusteella he esittivät värähtelyiden vaikutuksista kuusijakoisen luokittelun 'ei havaittava', 'heikosti havaittava', 'helposti havaittava', 'vahvasti havaittava', 'epämiellyttävä, todennäköisesti vaarallinen pitkän ajan kuluessa' ja 'hyvin epämiellyttävä, todennäköisesti vaarallinen lyhyen ajan kuluessa'. Näistä 'heikosti havaittava' on usein otettu asuintilojen värähtelyjen hyväksyttävyyden kriteeriksi. He päätyivät myös tulokseen, että kun taajuus on 5 - 60 Hz, värähtelyjen aistiminen on riippuvainen värähtelyn nopeusamplitudista, jolle havaittavuuden kynnsarvo on 0,3 mm/s.

Saksassa julkaistiin ensimmäinen aiheeseen liittyvä DIN-normi vuonna 1939, ja se on uusittu 1958 ja 1975. Normin rajatila perustuu värähtelyn kiihtyvyyssamplitudin (A , m/s^2), taajuuden (f) ja perustaajuuden $f_0 = 5,6$ Hz perusteella laskettuun kiihtyvyyden KB -arvoon, jonka raja-arvot on esitetty taulukossa 7. Kiihtyvyyssarvo KB lasketaan lausekkeesta

$$KB = \frac{20,2A}{\sqrt{1+(f/f_0)^2}} . \quad (9)$$

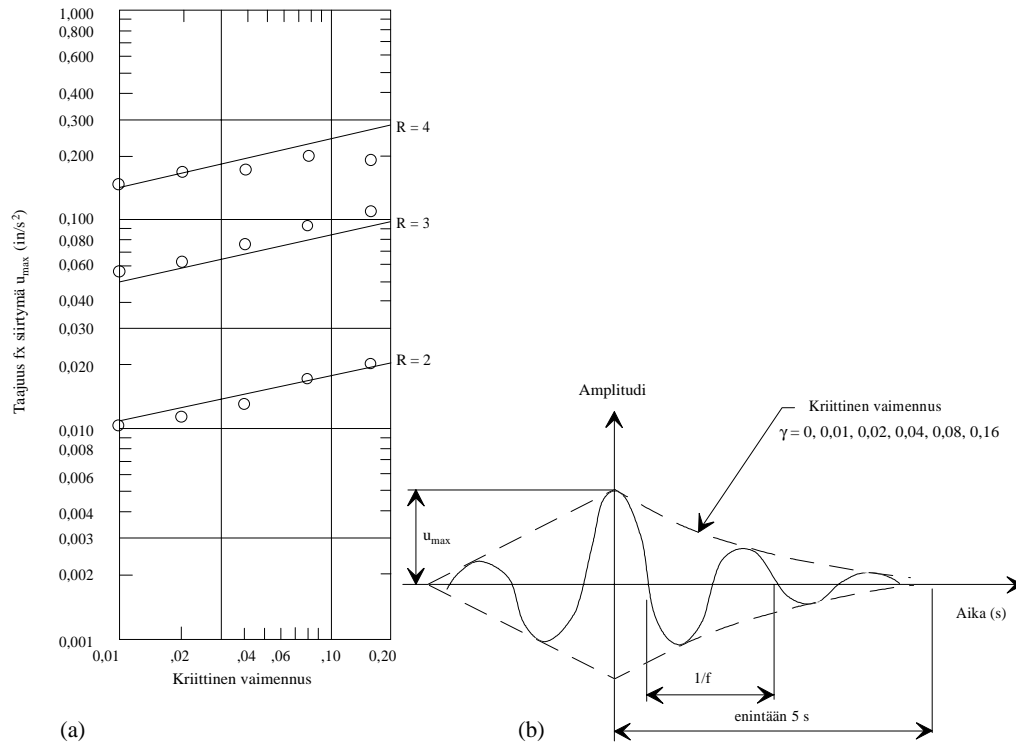
Vuonna 1986 on Verein Deutscher Ingenieure julkaissut ohjeen VDI 2057, jossa käyrät ovat ISO 2631:n osan 2 mukaiset, mutta jossa KB -arvojen käsite on kuitenkin edelleen säilytetty.

Taulukko 7. Värähtelyrajan KB -raja-arvot (m/s^2 , DIN vuodelta 1975) rakennuksen käyttötarkoituksen mukaan (Griffin 1990).

Rakennuspaikka	Aika	Jatkuvat tai ajoittaiset värähtelyt	Epäsäännölliset iskut
Yleiset asuinalueet, pientalo-alueet, lomanviettoalueet	Päivä	0,2	4
	Yö	0,15	0,15
Kylät, seka-alueet, keskustat	Päivä	0,3	8
	Yö	0,2	0,2
Liikealueet	Päivä	0,4	12
	Yö	0,3	0,3
Teollisuusalueet	Päivä	0,6	12
	Yö	0,4	0,4
Erityisalueet	Päivä	0,1 - 0,6	4 - 12
	Yö	0,1 - 0,4	0,15 - 0,4

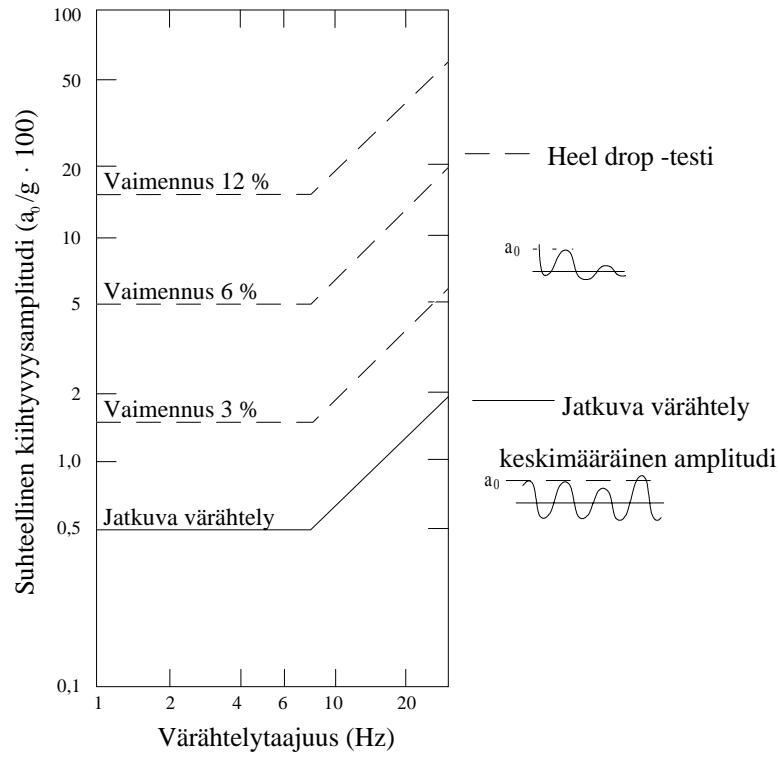
5.4 IMPULSSIKUORMITUKSEEN PERUSTUVAT OHJEET

Wiss ja Parmelee (1974) tutkivat kokeellisesti vaimenevan värähtelyn vaikutusta ihmisiin. Heräte aiheutettiin kuvan 10 mukaisena siirtymänä. Parametreina olivat taajuus (2,5 - 25 Hz), siirtymäamplitudi (0,0025 - 2,5 mm) ja vaimennus (1 - 16 %). Kuvan 10 tuloksista havaitaan, että värähtelyiden havaittavuus on riippuvainen värähtelynopeutta kuvaavan tekijän fu_{max} lisäksi myös vaimennuksesta γ .



Kuva 10. Siirtymäheräte (b) ja sen vaikutus ihmisiin (a). Kuvassa on esitetty huonosti havaittavan ($R = 2$), selvästi havaittavan ($R = 3$) ja voimakkaasti havaittavan ($R = 4$) värähtelyn alarajat. Pisteet ovat kokeiden keskiarvoja (Wiss ja Parmelee 1974).

Kanadan teräsrakennestandardin liitteessä (CAN/CSA 1994) on annettu ohjeet, joiden toteutuminen on myös yksinkertaisesti mitattavissa (kuva 11). Testinä käytetään heel drop -testiä, jossa ihminen pudottautuu nopeasti päkiöiltä kantapälle. Menetelmän käyttöalue on kuitenkin hyvin rajattu. Se soveltuu käytettäväksi betonilaatta-teräspalkkivälipohjille, joiden jänneväli on yli 8 m ja ominaistaajuus noin 5 - 8 Hz. Ohje ei kuitenkaan sovellu sellaisenaan kevyille välipohjille (ominaistaajuus yli 8 Hz) eikä suhteellisen joustaville välipohjille (ominaistaajuus alle 5 Hz). Heel drop -testi on usein kuitenkin käyttökelpoinen testi käytettäväksi värähtelyominaisuuksien pika-arvioinnissa.



Kuva 11. Suositukset Heel drop -testiin perustuviksi kiihtyvyyden huippuarvoiksi asuin- ja toimistotiloissa (CAN/CSA 1994).

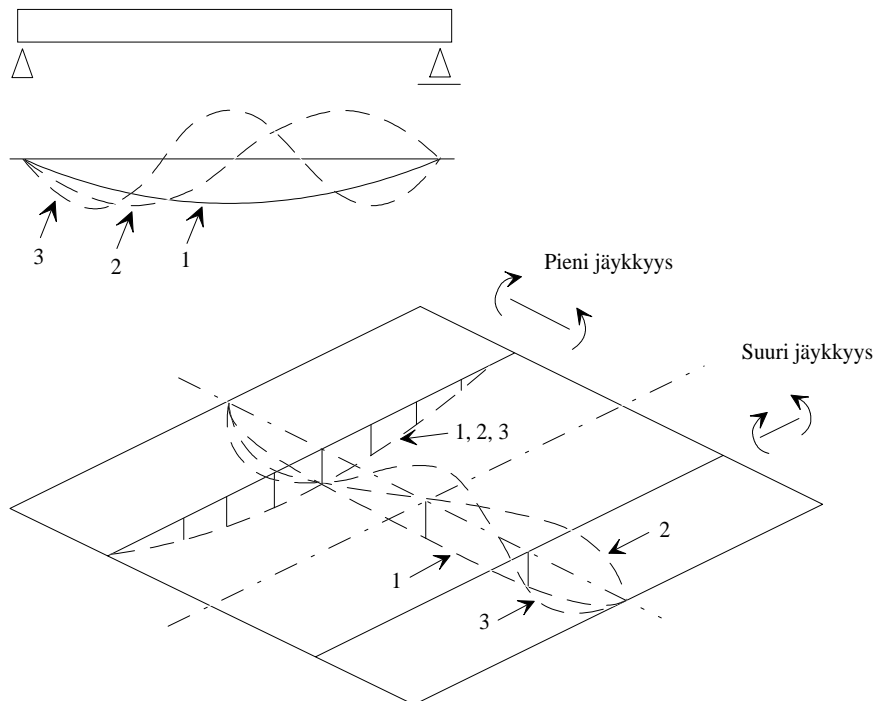
6 JAKO MATALA- JA KORKEATAAJUUKSISIIN VÄLIPOHJIIN

6.1 VÄLIPOHJIEN VÄRÄHTELYMUODOISTA

Välipohjat muodostuvat yleensä palkkimaisista ja laattamaisista osista, jolloin välipohjan jäykkyys on erilainen pituus- ja poikittaissuunnassa (ortotrooppinen laatta). Rakenteesta johtuen välipohjan värähtely ei ole yhden vapausasteen värähtelyä, vaan eri massapisteeet ja sisäiset jäykkyyserot voivat muodostaa huomattavan määrän erilaisia ominaisvärähdysmuotoja.

Kuvassa 12 on esitetty yksijänteen palkin alimmat ominaismuodot. Palkeilla alin ominaismuoto vastaa muodoltaan omasta painosta aiheutuvaa taipumaa. Alin ominaistajuus voidaan määrittää tämän staattisen taipuman avulla. Tällöin lausekkeessa (3) käytetään siirtymää, joka on noin 3/4 oman painon aiheuttamasta maksimitaipumasta. Ylemmät ominaistajuudet ovat vaikeammin arvioitavissa, yleensä toinen ominaistajuus on vähintään kolme kertaa alin ominaistajuus.

Ortotrooppisella laattalla ensimmäinen muoto on yleensä koko laatan taipumamuoto (kuva 12), jossa poikittaisjäykkyys lisää kokonaisjäykkyyttä ja kasvattaa siten ensimmäisen ominaistajuuden suuruutta pelkkään palkkitarkasteluun verrattuna. Seuraavat muodot ovat yleensä muotoja, jossa palkit värähtelevät toisiinsa nähden eri suuntiin. Mikäli välipohjan pintalaatta on joustava, se saattaa värähdellä myös itsenäisesti ilman merkittävää lattiapalkiston vaikutusta.



Kuva 12. Nivelletun palkin ja nivelletun ortotrooppisen laatan kolme alinta ominaisvärähdysmuotoa (Wyatt 1989).

Kävelyn alhaiset taajuuskomponentit voivat resonoida alimpien ominaismuotojen ($f_0 < 8$ Hz) kanssa, jolloin kävelystä aiheutuvat staattiset taipumat voivat monikymmenkertaistua. Lattioiden vaste impulssikuormille on analyttisesti vaikeimmin kuvattava ilmiö. Kävelyn aikana kantapään kosketuksesta aiheutuvat värähtelyt sisältävät taajuuksia 8 - 40 Hz. Impulssi herättää samanaikaisesti useita eri ominaisvärähdysmuotoja, jotka saattavat olla hyvinkin paikallisia ja joiden taajuudet ovat usein lähellä toisiaan. Muodot voivat käynnistyä amplitudiltaan samansuuruisina ja samanvaiheisina. Kuitenkin niiden taajuuseroista johtuen ne ovat pian eri vaiheissa ja tästä johtuen ne saattavat vaimeta huomattavasti nopeammin kuin erillisten värähtelytaajuuksien vaimennuksen perusteella olisi arvioitavissa (Wyatt 1989).

6.2 MATALATAAJUUKSISET VÄLIPOHJAT

Yleiseksi käytännöksi on muodostunut jakaa rakenteet kahteen eri perustyyppiin, matalataajuuksisiin välipohjiin ja korkeataajuuksisiin välipohjiin. Matalataajuuksisen lattian alin ominaistaajuus on alle 8 Hz ja korkeataajuuksisella lattialla alin ominaistaajuus on yli 8 Hz. Raja ei ole vakiintunut ja kirjallisuudessa esiintyy erilaisia rajoja väliltä 7 - 9 Hz. Rajan asettamista taajuuteen 8 Hz tukee myös standardin ISO 2631-2 (1989) värähtelyrajasuositus. Raja on kiihtyvyydellä mitattuna vakio välillä 4 - 8 Hz (kuva 8), mutta yli 8 Hz:n taajuuksilla raja on nopeudella mitattuna vakio.

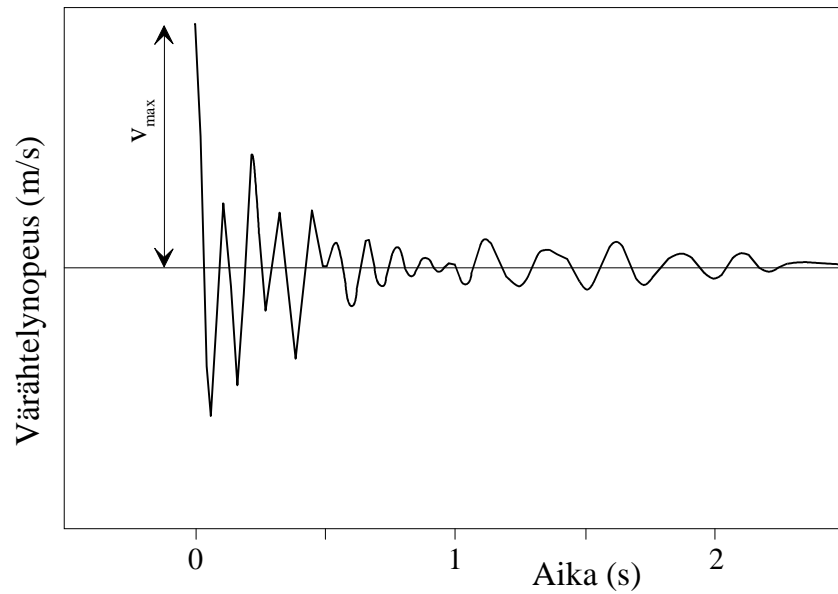
Epämukavuutta aiheuttavan värähtelyn muoto riippuu lattian vasteesta erityyppisille herätteille. Matalan taajuuden lattioilla jokin kävelystä aiheutuva taajuus (taulukko 2) resonoi lattian alimman ominaistaajuuden kanssa. Koko lattia värähtelee tällöin samalla taajuudella. Massalla on tällöin vaimennuksen lisäksi olennainen vaikutus lattian värähtelyamplitudin suuruuteen. Alhainen ominaistaajuus on yleinen raskailla, suurijännevälisillä lattioilla, mutta on mahdollinen myös keskiraskailla välipohjilla, jos jänneväli on yli 6 - 8 m (Ohlsson 1988). Erittäin raskailla välipohjilla massa on niin suuri, että resonanssilla kävelytaajuuksien kanssa ei ole käytännön merkitystä.

6.3 KORKEATAAJUUKSISET VÄLIPOHJAT

Korkeataajuuksiset välipohjat ovat yleensä kevyitä tai keskiraskaita. Rakenteen alin ominaistaajuus on niin paljon askelkuormituksesta aiheutuvia taajuuksia suurempi, että resonanssia ei pääse muodostumaan. Tällöin mitoittavaksi tekijäksi muodostuu joko kävelystä aiheutuva lattian notkuminen askelten alla tai kävelyn impulssikuormituksesta syntyvä tärinä. Lattian notkuminen on kävelytaajuuksista (1,6 - 2 Hz) värähtelyä, jonka voi kokea epämiellyttäväksi joko kävelijä itse tai useimmiten lähistöllä olevat muut ihmiset.

Kantapään kosketuksesta aiheutuva hetkellinen sysäys toimii lattian värähtelyn käynnistäjänä, jonka jälkeen värähtely jatkuu hitaasti vaimenevana (kuva 13). Korkean ominaistaajuuden lattiat ovat yleensä kevytrakenteisia, ja alhaisin ominaisvärähdysmuoto saattaa koskea vain osarakenteen, kuten esimerkiksi pintale-

vyn, värähtelyä. Vaikka luonnollinen vaimennus pienentääkin vaimennusta nopeasti, impulssista aiheutuva vaste on merkittävä, koska värähtelyä seuraava massa on pieni.



Kuva 13. Idealisoidusta impulssista aiheutuva lattian vaste (Ohlsson 1988).

7 MATALATAAJUUKSISTEN VÄLIPOHJIEN OHJEET

7.1 STAATTISEEN LASKENTAAN PERUSTUVA MITOITUS

7.1.1 Ohjeiden nykytila

Suomen teräsrakenteiden ohjeet eivät ota kantaa lattioiden mitoittamiseen värähtelyille. Ne esittävät vain staattisen taipumaan perustuvat yleiset taipumajointukset. Eurocode 3:n osassa 1 (ENV 1993-1-1 1992) annetaan rajoitukset alimmalle ominaistajuudelle. Asuin- ja toimistotilojen välipohjien alimman ominaistajuuden tulee olla vähintään 3 Hz. Ominaistajuuden laskemisessa käytettävä massa sisältää oman painon lisäksi sekä pysyvän että liikkuvan kuorman. Ehto täyttyy, jos omasta painosta ja kuormasta aiheutuva taipuma on alle 28 mm (vrt. lauseke (3)). Mikäli tiloissa harjoitetaan rytmistä liikuntaa, vastaavat raja-arvot ovat 5 Hz ja 10 mm.

Taajuusrajoitus 3 Hz estää resonanssin syntymisen alimman kävelytaajuuden kanssa (taulukko 2). Taajuusrajoitus 5 Hz taas estää resonanssin syntymisen kahden alimman tanssista tai rytmisestä voimistelusta syntyvän herätetaajuuden kanssa (taulukko 4).

Eurocode-ohjeet eivät anna rajoituksia välipohjien massalle, vaikka oletettavasti koskevatkin suhteellisen raskaita teräsbetoniliittorakenteita. Myös Kanadan rakentamismääräysten (NRC 1980) liitteessä esitetään erilaisille liikuntatiloille alimman ominaistajuuden minimiarvoja. Arvot ovat rytmiselle voimistelulle 8,8 Hz betonirakenteisilla (paino 5 kN/m²), 9,2 Hz liittorakenteisilla (paino 2,5 kN/m²) ja 13 Hz puurakenteisilla (paino 0,7 kN/m²) välipohjilla, mutta tällöin ominaistajuudet lasketaan pelkästään rakenteen oman painon perusteella ilman hyötykuormaa.

Teräsrakenteiden värähtelyä koskevana mitoitusta koskevana perusjulkaisuna voidaan Euroopassa pitää SCI:n Englannissa julkaisemaa opasta (Wyatt 1989). Pohjois-Amerikassa AISC ja CISC ovat myös viime vuosina valmistelleet uutta ohjetta. Ehdotusta on kuvattu artikkeleissa (Allen ja Murray 1993a ja 1993b). Ohje on pääperiaatteiltaan sama kuin SCI:n ohje ja perusteiltaan niin yksinkertainen, että sen mukainen mitoitusta pystytään suorittamaan ilman taulukkokirjoja tai elementtimenetelmänalyysijä. Molemmat ohjeet käsittelevät varsinaisesti suhteellisen raskaita teräsbetoniliittorakenteita, vaikka antavatkin karkeat ohjeet myös korkeataajuuksisten välipohjien mitoittamiseksi. Tässä kuvataan tarkemmin Allenin ja Murrayn ohjetta, koska se on SCI:n ohjetta uudempi, yksinkertaisempi ja havainnollisempi. Se soveltuu hyvin karkeaan värähtelymitoitukseen tai tarkemman menetelmän tulosten varmentamiseen.

7.1.2 Kriteerit haitalliselle värähtelylle

Kriteerien perusteena on yhden vapausasteen värähtely ja kuvan 8 kiihtyvyyssrajat. Yksinkertaistuksella jätetään ottamatta huomioon eri ominaismuotojen yhteisvaikutus ja herätetaajuuden mahdollinen resonanssi ylempien ominaistajuuksien kanssa. Yksinkertaistus voidaan yleensä tehdä, kun herätteet ovat lähtöisin ihmisten liikkeistä. Koneilla, joiden heräte on vakiotaajuuksinen, resonanssi voi ilmetä myös korkeammilla ominaistajuuksilla. Kävelyssä on myös havaittavissa selkeät herätetaajuudet, joten resonanssi voi periaatteessa ilmetä myös ylempien ominaistajuuksien kanssa. Artikkelin (Allen ja Murray 1993a) mukaan kokemus on kuitenkin osoittanut, että alin ominaistajuus on yleensä riittävä suunnittelussa. Sama pätee myös ihmismassojen liikkeistä, kuten tanssista ja voimistelusta, aiheutuviin kuormituksiin, koska (a) ylempien taajuuksien heräte on huomattavasti pienempi kun alempien taajuuksien heräte ja (b) ylempät taajuudet heräävät vaikeammin, koska ihmiset jakautuvat suuremmalle alueelle.

Mitoitus resonanssin perusteella

Massan kiihtyvyys a saadaan derivoimalla lauseke (5) kaksi kertaa. Resonanssissa $\Omega = \omega$, joten kiihtyvyyssamplitudiksi saadaan

$$a = \frac{1}{k} \frac{1}{2\gamma} \omega^2 Q. \quad (10)$$

Koska $\omega = \sqrt{k/m}$, saadaan massan kiihtyvyydeksi edelleen

$$a = \frac{1}{m} \frac{1}{2\gamma} Q. \quad (11)$$

Seuraavaksi siirrytään jousi-massasysteemistä todelliseen rakenteeseen ja ratkaisun perustapauksena pidetään yksijänteistä palkkia. Palkin ominaisvärähtelyn ensimmäinen muoto voidaan arvioida palkin keskelle sijoitetun korvausmassan avulla. Kun tasapaksu yksijänteinen palkki (paino W) korvataan painottomalla palkilla, jonka keskelle on sijoitettu pistemäinen massa, ja merkitsemällä näiden systeemien ominaistajuudet yhtäsuuriksi, saadaan värähtelyssä mukana olevaksi teholliseksi massaksi $m = 48/\pi^2 W/g \approx 0,5 W/g$. Ihmisistä aiheutuva dynaaminen heräte $Q = \alpha_i P$, jossa on α_i sysäyskerroin ja P on ihmisten paino. Käyttämällä lisäksi pienennyskerrointa R saadaan

$$\frac{a}{g} = \frac{R}{0,5 W} \frac{\alpha_i P}{2\gamma}. \quad (12)$$

Pienennyskerroimella R otetaan huomioon, että (a) resonanssissa suurennuskerroin ei yleensä muutaman jakson herätteestä ehdi kehittyä maksimiarvoonsa ja (b) havainnoitsija ja herätteen aiheuttaja eivät yleensä sijaitse samassa, värähtelyjen kannalta pahimmassa kohdassa. Suositeltava arvo on kävelysilloille 0,7 ja välipohjarakenteille 0,5. Lausekkeella (12) voidaan arvioida harmonisen kuormituksen aiheuttama maksimikiihtyvyys, jota voidaan verrata suurimpaan sallittuun

värähtelyrajaan a_0/g (kuva 8). Ehdossa tarkastellaan kaikki harmonisen värähtelyn komponentit $\alpha_i P$, jotka voivat resonoida rakenteen alimman ominaistajuuden kanssa.

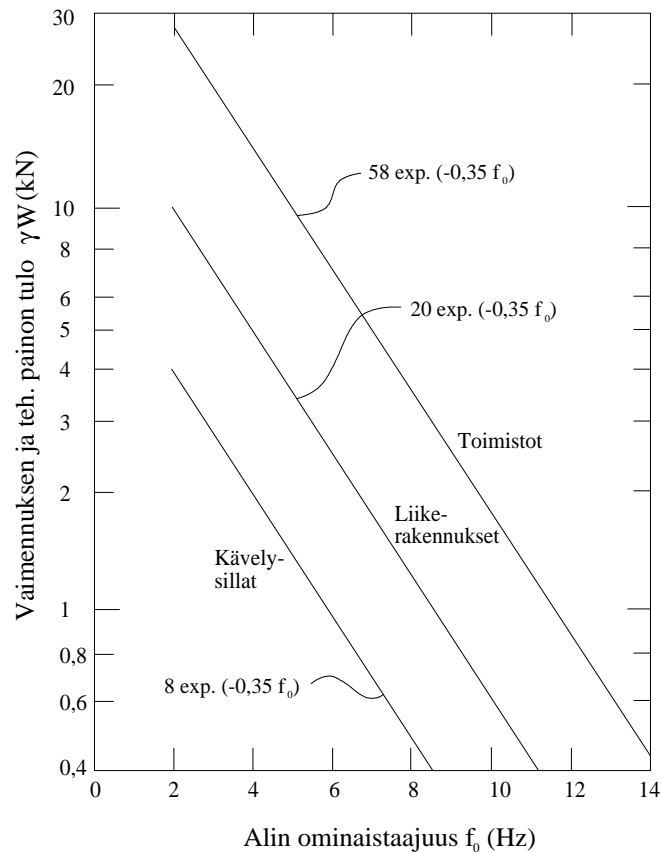
Lausekkeesta (12) voidaan johtaa myös ehto

$$\gamma W \geq \frac{R \alpha_i P}{a_0 / g}. \quad (13)$$

Kun rajoitetaan normaalista kävelystä aiheutuviin harmonisiin herätteisiin, ehto (13) voidaan esittää likimääräisesti myös muodossa (kuva 14)

$$\gamma W \geq K / e^{0,35 f_0} \quad \text{tai} \quad f_0 \geq 2,86 \ln(K / \gamma W). \quad (14)$$

Vakio K riippuu asetetusta kiihtyvyyssrajatilasta (taulukko 8). Likimääräistyksessä on käytetty taulukon 2 (Allen ja Murray) dynaamisia kuormakertoimia kävelylle, kuvan 8 kiihtyvyyssrajoja ja edellä suositeltuja pienennyskerroimen R arvoja.



Kuva 14. Lausekkeen (14) mukainen värähtelyrajatilan likiarvoratkaisu. Rajojen yläpuolella kuvan 8 mukaisten kiihtyvyyssriteerien voidaan katsoa toteutuvan (Allen ja Murray 1993a).

Taulukko 8. Lausekkeessa (14) käytetyt vakion K ja kriittisen vaimennussuhteen arvot (Allen ja Murray 1993a).

	K (kN)	γ
Toimistot, asuinrakennukset, kirkot	58	0,03*
Kauppakeskukset	20	0,02
Jalankulkusillat	8	0,01
* 0,05 kokonaan väliseinillä jaetuilla tiloilla. 0,02 välipohjille, jotka sisältävät vähän ei-kanavia rakenteita (sisäkatot, kanavat, huonekalut, jne.)		

Kriteerit resonanssin estämiseksi

Edellinen tarkastelu perustui kiihtyvyyden huippuarvojen tarkasteluun resonanssitilanteessa. Normaalissa kävelyssä herätteet ovat pienet, joten alhaisillakin ominaistajuuksilla voidaan päästä suunnittelukriteerit täyttävään ratkaisuun, mikäli massa ja vaimennus ovat riittävän suuret (kuva 14). Kun herätteet ovat suurempia (esim. voimistelu- ja tanssisalit, katsomot, jne), vaatimuksia on vaikeampi saada täytetyksi. Tällöin rakenteen ominaistajuuden minimiarvoa on rajoitettava siten, että herätetaajuuden suhde ominaistajuuteen nähden on riittävän pieni eikä resonanssia näin pääse muodostumaan (kuva 7). Toisena vaatimuksena on, että värähtelyn suurennuskertoimen on pysyttävä riittävän pienenä. Välipohjien alhaisella vaimennuksella on resonanssialueen ulkopuolella hyvin pieni merkitys suurennuskertoimeen, joten olettamalla vaimennus nolaksi saadaan varmalla puolella oleva arvio. Lausekkeesta (5) voidaan ratkaista kiihtyvyyden amplitudiksi

$$a = \frac{Q}{k} \frac{\Omega^2}{1 - \Omega^2/\omega^2}. \quad (15)$$

Sijoittamalla lausekkeeseen $k = \omega^2 m$ saadaan ratkaisuksi

$$\frac{\omega}{\Omega} = \sqrt{1 + \frac{Q}{ma}}. \quad (16)$$

Kun lisäksi otetaan kuormitukseksi herätteen harmoninen komponentti $Q = \alpha_i W_p$ (taulukko 4), kiihtyvyyden amplitudin raja-arvoksi $a = a_0$ ja palkin teholliseksi massaksi $m = 0,5 W/g$, saadaan ominaistajuudelle ehto

$$\frac{\omega}{\Omega} = \frac{f_0}{f_i} \geq \sqrt{1 + \frac{\alpha_i W_p}{0,5W a_0 / g}}. \quad (17)$$

Ehto on tarkistettava herätteen jokaiselle harmoniselle komponentille f_i erikseen.

Taipumarajoitus 1 kN:n pistekuormalle

Kolmantena suunnittelussa tarvittavana kriteerinä Allen ja Murray (1993a) antavat edellisten lisäksi korkeataajuuksisille välipohjille ehdon, että toimisto- ja asuinrakennuksissa välipohjan jäykkyyden pistekuormalle on oltava vähintään 1 kN/mm, jos alin ominaistajuus f_0 on suurempi kuin 9 Hz. Ehdon perusteena on esitetty kävelystä aiheutuvien taipumien välttäminen. Lattiat, joiden taajuus on 9 - 18 Hz, voivat olla epäedullisia myös askelista johtuville iskumaisille kuormituksille. Vaikka SCI:n ohjeessa (Wyatt 1989) impulssikuormitusten rajaksi on annettu 7 Hz, kriteeri tulee Allenin mukaan todellisuudessa määrääväksi vasta 9 Hz:n jälkeen, koska ohjeessa on jätetty huomiotta vaimennusajan pituuden merkitys epämukavuuden tunteeseen.

7.1.3 Välipohjien dynaamisten ominaisuuksien määrittäminen

Edellä esitetty laskentamalli perustuu yksijänteisen palkin tarkasteluun. Malli soveltuu sellaisenaan esimerkiksi yksijänteiselle jalankulkusillalle, jonka alin ominaistajuus on suoraan palkin ominaistajuus ja paino koko palkin paino. Välipohjat ovat kuitenkin yleensä laatasta ja erilaisista palkeista tehtyjä ortotrooppisia rakenteita, joilla voi olla useita ominaisvärähdysmuotoja, joiden ominaistajuudet voivat sijaita hyvin lähellä toisiaan. Alimman ominaistajuuden määrittämisessä tulee ottaa huomioon rakenneosien joustojen yhteisvaikutus. Yksinkertaistetussa tarkastelussa Allen ja Murray (1993a) ovat jakaneet tarkastelun lattiapalkkien värähtelyyn ja pääkannattimien värähtelyyn. Välipohjan alin ominaistajuus arvioidaan yhdistämällä nämä kaksi perustapausta.

Välipohjan oletetaan muodostuvan laatasta ja sitä kannattelevista lattiapalkeista, jotka vuorostaan on tuettu seiniin tai pilarien välisiin pääkannattimiin. Betonin kimmokertoimeksi voidaan olettaa 1,35 kertaa sen staattinen kimmokerroin. Kerrotoimella otetaan huomioon betonin suurempi jäykkyys dynaamiselle kuin staattiselle kuormitukselle. Jäyhyysmomentin määrittämisessä otetaan huomioon koko laatan leveys, mutta kuitenkin enintään 40 % jännevälistä. Uloketasoilla käytetään puolta edellisestä, johon lisätään palkin keskilinjan yli menevän ulkoneman leveys. Välipohjan painoon voidaan sisällyttää osa lattian liikkuvasta kuormasta (toimistoissa noin $0,5 \text{ kN/m}^2$).

Liitteessä 1 on esitetty laskentaesimerkki seuraavassa kuvattavan menetelmän käytöstä.

Lattiapalkkien värähtely

Tässä tapauksessa oletetaan lattiapalkkien värähtelevän yksinään. Ominaistaajuus arvioidaan yksijänteisen palkin perustapauksen avulla. Kun palkille omasta painosta $M_j g$ aiheutuva maksimitaipuma on Δ_j , palkin ominaistaajuus

$$f_j = \frac{\pi^2}{\pi} \sqrt{\frac{(EI)_j}{M_j L_j^3}} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{5}{384} \frac{g}{\Delta_j}} \approx 0,18 \sqrt{\frac{g}{\Delta_j}}. \quad (18)$$

Välipohjan värähtelyssä mukana oleva paino arvioidaan lausekkeesta

$$W_j = wB_j L_j, \quad (19)$$

jossa w on välipohjan paino pinta-alayksikköä kohden ja L_j on palkin jänneväli. Värähtelyssä mukana oleva tehollinen laattakaistan leveys B_j on

$$B_j = 2 (D_s / D_j)^{1/4} L_j, \quad (20)$$

jossa D_j ja D_s ovat leveysyksikköä kohden lasketut lattiapalkin ja laatan jäyhyysmomentit. Leveyden B_j suurimpana arvona käytetään arvoa $2/3$ lattian leveydestä lattiapalkkien poikittaissuunnassa. Kaavan muoto perustuu ortotrooppisen laatan toimintaan ja kerroin 2 on saatu kalibroimalla malli tehtyihin kokeisiin. Jos palkit ovat jatkuvia ja viereinen jänne on vähintään $0,7 L_j$, painoa W_j kasvatetaan 50 %:lla. Massan kasvattamisella otetaan huomioon viereisten jänteiden vaikutus tarkasteltavan kentän värähtelyyn.

Pääkannattimien värähtely

Tässä tapauksessa oletetaan pääkannattimien värähtelevän yksinään. Palkin ominaistajuus on

$$f_g = 0,18 \sqrt{\frac{g}{\Delta_g}}, \quad (21)$$

jossa Δ_g on yksittäiseen palkkiin omasta painosta aiheutuva taipuma. Värähtelyssä mukana oleva massa lasketaan lausekkeista

$$W_g = wB_g L_g \text{ ja} \quad (22)$$

$$B_g = 1,6 (D_j / D_g)^{1/4} L_g, \quad (23)$$

joissa w on välipohjan paino pinta-alayksikköä kohden, L_g on palkin jänneväli ja B_g on kannattimeen liittyvä tehollinen laattakaistan leveys. D_j ja D_g ovat leveysyksikköä kohden lasketut jäyhyysmomentit lattiapalkille ja pääkannattimelle. Kaava (23) on sama kuin kaava (20) lukuun ottamatta kerrointa 2, joka on pienennetty arvoon 1,6. Pienennys ottaa huomioon pääkannattimien päällä sijaitsevien lattiapalkkien rakenteeseen aiheuttaman epäjatkuvuuden. Jos lattiapalkit ovat symmetrisiä ja ne on liitetty pääpalkin uumaan leikkausliitoksella, kerroin voidaan kasvattaa arvoon 1,8. Leveyden B_g pienin arvo on pääkannattimien väli ja suurin arvo on $2/3$ koko lattian leveydestä pääpalkkien poikittaissuunnassa. Jos palkit ovat jatkuvia ja viereinen jänne on vähintään $0,7 L_g$, painoa W_g kasvatetaan 50 %:lla.

Lattiapalkkien ja pääkannattimien värähtelyn yhdistäminen

Lattiapalkkien ja pääkannattimien värähtelyn yhteisvaikutus perustuu kokonaisjoustoon, jossa lasketaan yhteen kannatettavasta painosta aiheutuvat lattiapalkin (Δ_j) ja pääpalkin (Δ_g) taipumat. Koko välipohjan ominaistajuus on tällöin

$$f_0 \approx \frac{1}{\sqrt{1/f_j^2 + 1/f_g^2}} = 0,18 \sqrt{\frac{g}{\Delta_j + \Delta_g}} \quad (24)$$

ja välipohjan värähtelyssä mukana oleva paino arvioidaan lausekkeesta

$$W = \frac{\Delta_j}{\Delta_j + \Delta_g} W_j + \frac{\Delta_g}{\Delta_j + \Delta_g} W_g. \quad (25)$$

Siinä erikoistapauksessa, että pääpalkin jänneväli L_g on pienempi kuin lattiapalkin teholliseen laattakaistaan liittyvä leveys B_j , värähtelymuodot eivät yhdisty täydellisesti. Tämä otetaan huomioon pienentämällä lausekkeissa (24) ja (25) käytettävä taipuma Δ_g arvoon

$$\Delta'_g = \frac{L_g}{B_j} \Delta_g; \quad 0,5 \leq \frac{L_g}{B_j} \leq 1,0. \quad (26)$$

Vapaiden reuna-alueiden värähtely

Reunastaan tukematon taso voi joskus olla ongelmallinen muuta aluetta vähäisemmän painon ja mahdollisesti pienemmän vaimennuksen vuoksi. Ongelmia on havaittu erityisesti auloihin liittyvillä sisätasoilla. Näiden reunapalkit pitäisi usein tehdä nykyistä jäykemmiksi. Vapaille reuna-alueille suositellaan suunnittelumenetelmään seuraavia täsmennyksiä: (a) Kun reunaa kannattelee lattiapalkki, laskettaessa lattiapalkin tehollista painoa lausekkeen (20) mukaan, kerroin 2,0 korvataan kertoimella 1,0; (b) Kun reunassa on pääkannatin, tehollinen paino arvioidaan suoraan siihen liittyvän rakenteen painon perusteella. Muuten lattia- ja pääpalkit tarkastellaan edellä esitetyn menetelmän mukaisesti.

7.1.4 Menetelmän kalibrointi koetuloksiin ja vertailu muihin ohjeisiin

Lausekkeen (20) kerroin 2 on määritetty taulukon 9 yksisuuntaisten laattojen (vain lattiapalkit) kalibrointikokeiden avulla. Taulukossa verrataan laskentamenetelmää myös muihin koetuloksiin. Sarakkeessa 'hyvät' vertaillaan niitä tuloksia, joissa käyttäjän mielestä värähtelyt eivät olleet häiritseviä, ja sarakkeessa 'huonot' niitä tuloksia, joissa värähtelyt olivat häiritseviä. Arvoa yksi suuremmat arvot täyttävät asetetut kriteerit. Koesarja 2:ssa yhden hyvin raskaan (3,6 kN/m²) lattiarakenteen osoittautumisen huonoksi vastoin laskentamenetelmän arviota Allen ja Murray selittävät johtuvan erittäin alhaisesta vaimennuksesta ja värähtelyjen siirtymisestä rakenteen pituus- ja poikittaissuuntaisen jatkuvuuden vuoksi.

Menetelmää on verrattu myös aikaisempiin suunnittelukriteereihin. Vertailu on tehty yksisuuntaisen välipohjan (vain lattiapalkit) perustapaukselle. Vertailuparametriksi on valittu vaimennuksen ja tehollisen massan tulo (γW), joka on merkittävin tekijä resonanssitapauksessa. Taulukossa 10 esitetään tulon minimiarvoja asuin- ja toimistotiloille eri ohjeiden mukaan. Taajuusalueella 5 - 7 Hz kaikilla ohjeilla päädytään suuruusluokaltaan samaan minimirajaan, joka on ymmärrettävää, sillä tämä alue on ollut ohjeiden perusteena ja alueelta on olemassa runsaasti kokeellista aineistoa. Kanadan teräsrakennusnormi (CAN/CSA 1994) perustuu pelkästään kantapäähän kosketuksen aiheuttamaan iskuun, tällöin matalilla taajuuksilla värähtelyn vaikutus aliarvioidaan ja korkeilla yliarvioidaan. Allen on verrannut tuloksia normin vuoden 1989 painokseen, jolloin taajuutta ei ollut rajoitettu. Vuoden 1994 uudistetussa teräsrakennusnormissa ehto on säilytetty, mutta sen pätevyysalue on rajattu alueelle 5 - 8 Hz. SCI:n ohje vastaa suhteellisen hyvin esitettyä menetelmää, joskin tarkasteltavan taajuuskaistan reuna-alueilla SCI:n ohje on hieman esitettyä menetelmää varmemmalla puolella.

Taulukko 9. Menetelmän vertailu koetuloksiin. Arvot on laskettu lähteen (Allen ja Murray 1993a) tulosten perusteella.

Välipohjatyyppi	Jänneväli (m)	Ominais- taajuus (f_0 , Hz)	Tekijä (γW) jaettuna lausekkeen (14) kriteerillä	
			Hyvät	Huonot
Koesarja 1, ominaistajuudet mitattuja				
Vain lattiapalkit (11 koetta)	8,7 - 22	4,0 - 8,8	1,06 - 2,24 (7kpl)	0,66 - 0,94 (4kpl)
Lattiapalkit ja pääkannattimet (5 koetta)	7,6 - 12,5	5,2 - 11,8	1,11 - 3,64 (3 kpl)	0,52 - 0,62 (2 kpl)
Vapaa reuna-alue (3 koetta)	12,2 - 13,7	2,4 - 8,4	-	0,25 - 0,89 (3 kpl)
Koesarja 2, ominaistajuudet laskettuja				
Lattiapalkit ja pääkannattimet (11 koetta)	6,0 - 13,4	4,0 - 7,7	1,32 - 1,59 (2 kpl)	0,40 - 1,03 (8 kpl) 1,30 (1 kpl)

Taulukko 10. Minimiarvoja vaimennuksen ja tehollisen massan tulolle (γW , kN) eri ohjeiden mukaan (Allen ja Murray 1993a).

Ominaistaajuus (f_0 , Hz)	Lauseke (14)	SCI (Wyatt 1989)	Kanada (CAN/CSA 1994)
2	28,8	Ei sallittu	Ei sallittu
4	14,3	17,5	4 *
6	7,1	8,8	6
8	3,5	3,0	7
10	1,75	3,0	8 *

* Vuoden 1989 normiversiossa ehdon soveltuvuutta ei ollut rajattu alueelle 5 - 8 Hz.

7.2 DYNAAMISEEN ANALYYSIIN PERUSTUVA MITOITUS

Edellä esitetty alimpaan ominaistaajuuteen perustuva käsinlaskentaan tarkoitettu menetelmä on hyvin yksinkertaistettu likimääräismenetelmä eikä siten aina johda hyvään lopputulokseen. Tarkemmissa analyyseissä tarvitaan elementtimenetelmää, sen tulosten jälkikäsitteilyohjelmia ja rakenteiden dynamiikan erikoisosaamista. Monilla ortotrooppisilla välipohjarakenteilla saattaa esiintyä 10 - 20 alle 10 Hz:n ominaistaajuutta, joilla kullakin on oma värähtelymuotonsa. Välipohjilla, joille on suoritettu värähtelymittauksia, ylempien ominaisuusmuotojen merkitys on dynaamisessa käyttäytymisessä havaittu usein merkittäväksi. Seuraavassa kuvataan Erikssonin (1994) väitöskirjassaan esittämä alustava ehdotus kehittyneeksi suunnittelumenetelmäksi. Menetelmä on työläs eikä sovellu käsinlaskentaan.

7.2.1 Dynaamiset suunnittelukuormitukset

Taulukkoon 3 perustuen Eriksson on johtanut taulukon 11 mukaiset kävelyherätettä koskevat dynaamiset suunnittelukuormitukset. Taulukon arvoissa on oletettu, että herätteen taajuus on suurempi kuin 2,5 Hz, joka on täten minimivaatimus myös rakenteen alimmalle ominaistaajuudelle. Ilmoitetut arvot ovat tässä tehollisarvoja. Kuormitusamplitudit on saatu taulukon 3 avulla kertomalla kävelyn kiihtyvyyssamplitudi ihmisten painolla ja määrätekiijällä. Tehollisarvot on saatu jakamalla kuormitusamplitudi tekijällä $\sqrt{2}$. Yhden ihmisen painoksi on oletettu 750 N. Eriksson ei ole antanut kuormituksia erikseen asuintiloille, mutta toimistiloille esitettyjä arvoja voitaneen soveltaa myös asuintiloille.

Laskennassa oletetaan jonkin taulukon 11 mukaisen kuormituskomponentin resonoivan rakenteen sen ominaistaajuuden kanssa, joka johtaa suurimpaan lattian värähtelyyn. Suunnittelussa rajoitetaan tämän taajuuden tarkasteluun.

Taulukko 11. Ehdotus dynaamiseksi kuormituksiksi F_{rms} , A (m^2) on lattian kokonaispinta-ala ja f (Hz) on lattian ominaistajuus.

	Kuormitustapaus	F_{rms} (kN)
Toimistot	1. Paikallinen kävely, 1 ihminen	$180/f$
Tavaratalot	1. Paikallinen kävely, 2 ihmistä 2. Kävely, koko alue, 0,05 ihmistä/ m^2 3. Kävely, alue 100 m^2 , 10 ihmistä	$250/f$ $40\sqrt{A}/f$ $570/f$
Kävelyalueet	2. Kävely, koko alue, 0,2 ihmistä/ m^2 3. Kävely, alue 100 m^2 , 40 ihmistä	$80\sqrt{A}/f$ $1100/f$

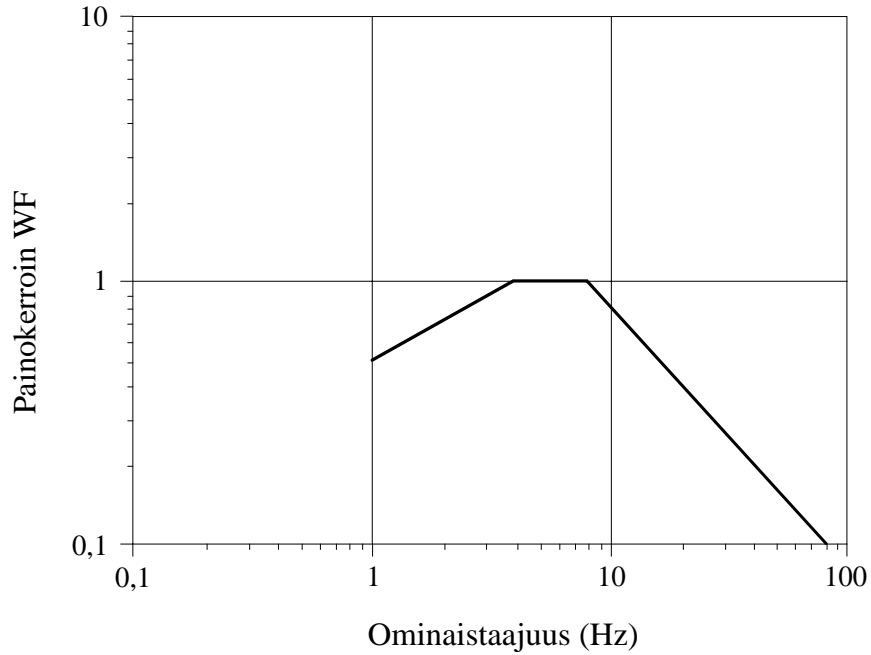
7.2.2 Välipohjan kiihtyvyyssvasteen laskenta

Yhden vapaasteen resonanssivärähtelyn suurimman kiihtyvyyssamplitudin lauseke (11) pätee myös ylemmille ominaisuudelle, kun harmonisen kuormituksen Q oletetaan kohdistuvan ominaisuuden maksimiin kohdalle, massa m korvataan värähtelymuodosta n riippuvalla ominaismassalla M_n (modal mass) ja vaimennus γ korvataan ominaistajuutta vastaavalla ominaisvaimennussuhteella γ_n (modal damping ratio). Vaikka ihmisistä aiheutuvat herätteet pienenevät ominaistajuuden kasvaessa (kuva 2), kiihtyvyydet voivat mahdollisesti pienemmistä ominaismassoista johtuen olla korkeammilla ominaistajuuksilla suuremmat kuin alimmalla ominaistajuudella.

Paikallisesta kuormituksesta $F_{rms}(f_n)$ ominaisuuteen n aiheutuva kiihtyvyyden painotettu tehollisarvo lasketaan lausekkeesta

$$a_{n,rms-p} = \frac{F_{rms}(f_n)}{2M_n\gamma_n} \cdot WF(f_n), \quad (27)$$

jossa $WF(f_n)$ on kuvan 15 mukainen taajuudesta riippuva painokerroin. Kerroin ottaa huomioon ihmisen herkkyyden riippuvuuden värähtelyn taajuudesta. Taajuuksilla 4 - 8 Hz kertoimen arvo on yksi. Muulla alueella kerroin on ISO 2631-2:n (1989) peruskäyrän (kuva 8) käänteisluku kerrottuna 4 - 8 Hz:n perusarvolla 0,005 m/s^2 .



Kuva 15. Kiihtyvyyden tehollisarvojen painokerroin taajuuden funktiona. Kerroin on $f_n/\sqrt{2}$, kun $f_n < 4$ Hz ja $8/f_n$ kun $f_n > 8$ Hz (Eriksson 1994).

Ominaistaajuudet (f_n), ominaismuodot (Φ_n) ja ominaismassat (M_n) määritetään yleensä kaupallisilla FEM-ohjelmilla. Ominaismuodot suhteutetaan siten, että kunkin muodon suurin arvo on yksi. Ainakin kaikki alle 8 Hz olevat ominaismuodot tulee ottaa mukaan tarkasteluun. Teräsbetoniliittorakenteilla kriittiseksi vaimennussuhteeksi valitaan 0,9 - 1,0 % huolimatta siitä, että monissa lähteissä annetaankin suurempia arvoja. Erikssonin mukaan erot johtunevat paljolti virheistä ja tulkintaeroista vaimennuksen määrittämisessä. Yhtä prosenttia suurempaa vaimennusta voidaan käyttää vain, mikäli rakenne on nimenomaan suunniteltu vaimentamaan pieniä värähtelyjä (esim. käyttämällä viskoelastisia materiaaleja). Samaa vaimennusta voidaan käyttää kaikilla ominaisvärähdysmuodoilla. Betonin dynaamisena kimmokertoimena Eriksson käyttää esimerkkilaskelmissaan arvoa, joka on 20 % staattista arvoa suurempi.

Määrääväksi ominaismuodoksi valitaan se muoto, jolla saadaan suurin kiihtyvyydvaste eli

$$a_{rms-p} = \max[a_{n,rms-p}]. \quad (28)$$

Tietylle alueelle tasan jakautuneesta kuormituksesta aiheutuva rakenteen suurin vaste lasketaan paikallisen kuormituksen vasteen ($a_{n,rms-p}$) avulla lausekkeesta

$$a_{n,rms-d} = K_{\Phi,n} a_{n,rms-p}. \quad (29)$$

Ominaismuodon korjaustekijä $K_{\Phi,n}$ lasketaan yhtälöstä

$$(K_{\Phi,n})^2 = \frac{1}{A} \iint_A [\Phi_n(x,y)]^2 dx dy, \quad (30)$$

jossa A on kuormituksen pinta-ala ja $\Phi_n(x,y)$ on suurimpaan arvoon suhteutetun ominaisuuden arvo pisteessä (x,y) . Kuten paikallisen kuormituksen tapauksessa, määräväaste on

$$a_{rms-d} = \max[a_{n,rms-d}]. \quad (31)$$

Tuloksena saatava vaste esitetään tietyn alueen "keskimääräisenä" arvona. Alueena käytetään toimistoissa sitä 20 m²:n aluetta, jolla saadaan suurin "keskimääräinen" vaste. Muissa taulukon 11 tiloissa voidaan alueeksi olettaa 100 m². Menettelyn perusteluna Eriksson esittää, että jos tietyssä rajatussa pisteessä vaste on huomattavasti korkeampi kuin muualla kyseisessä tilassa, havainnoitsija voi helposti vaihtaa sijaintiaan. "Keskimääräinen" vaste tietyllä lattian alueella A lasketaan lausekkeesta

$$[a_{rms-(p \text{ tai } d)}]_A = \max[K_{\Phi,n} a_{n,rms-(p \text{ tai } d)}]. \quad (32)$$

Tekijä $K_{\Phi,n}$ lasketaan yhtälöstä (31).

7.2.3 Värähtelyn raja-arvot

Tuloksena saatavan lausekkeen (32) mukaisen kiihtyvyyden $[a_{rms}]_A$ tulee olla taulukossa 12 esitettyä arvoa pienempi. Käyttötarkoituksen lisäksi Eriksson esittää luokituksen myös häiriötekijän toistuvuutta kuvaavaa häiriöväliä (return parameter). Häiriötekijä $a_{rms,10w}$ on lyhyestä häiriöstä aiheutuva 10 sekunnin ajalta määritetty tehollinen kiihtyvyydvaste, joka yhdessä häiriövälin kanssa määrää epämukavuuden tunteen. Aika 10 sekuntia kuvaa esimerkiksi sitä häiriötä, joka aiheutuu kun ihminen kävelee tarkasteltavan lattian yli. Laskettua vastetta $[a_{rms}]_A$ tarkastellaan tällaisena 10 sekunnin idealisoituna häiriönä. Parametrin valintaan vaikuttavat tilojen henkilöliikenteen määrän lisäksi myös rakenteen ominaisuudet. Häiriöväli sitä lyhyempi, mitä suurempi on rakenteen mahdollisten resonanssitaajuuksien määrä. Häiriöväli pienenee myös, jos häiriö voi tulla havaittajan useammalta eri suunnalta (esimerkiksi jatkuvat rakenteet). Eriksson antaa todennäköisinä häiriöväleinä toimistotiloille (60 - 3 600 sekuntia), tavarataloille (60 - 600 s) ja kävelytasolle (30 - 60 s). Häiriötaajuus oletetaan samaksi kaikilla taulukon 11 kuormitustapauksilla.

Taulukko 12. Värähtelyn raja-arvot $a_{rms,10w}$ (m/s²) rakennuksen käyttötarkoituksen ja kävelystä aiheutuvan herätteen toistuvuuden perusteella (Eriksson 1994).

	Häiriöväli (s)		
	30	600	3600
Toimistot	0,03	0,06	0,10
Tavaratalot	0,045	0,09	0,14
Kävelytasot	0,06	0,12	(0,19)

8 KORKEATAAJUUKSISTEN VÄLIPOHJIEN OHJEET

Korkeataajuuksisia välipohjia koskevat ohjeet perustuvat pääasiassa hyvin kevyille puurakenteisille välipohjille tehtyihin tutkimuksiin, joissa rakenteen alin ominaistajuus on usein 15 - 30 Hz. Ohjeet ovat suurelta osin kokemuseräisiä. Hyvin vähän on tutkittu rakenteita, joiden taajuus on välillä 8 - 15 Hz. Seuraava esitys on tiivistelmä pääasiasta artikkelista Kalkert ym. 1995, jossa käsitellään puurakenteisten välipohjien mitoituskriteerien kehittymistä viimeisen 15 vuoden aikana. Lisäksi luvussa käsitellään lyhyesti teräsrakenteiden ohjeiden tilannetta Euroopassa.

8.1 YHDYSVALTOJEN JA KANADAN OHJEET

Yhdysvalloissa mitoituskriteereinä ovat näihin päiviin asti olleet lujuus ja taipuma. Vuonna 1885 käyttöön otettu (Percival 1979) vanha taipumaraja $L/360$ (kuorma $1,9 \text{ kN/m}^2$) on käytössä edelleen, vaikka etenkin viime vuosina on havaittu, että ehto ei ole riittävä takaamaan hyväksyttävää käyttömukavuutta.

Kanadassa oli myös pitkään käytössä taipumaraja $L/360$. Onysko (1985) aloitti ohjeiden kehittämisen haastatteleamalla 107 rakennuksen käyttäjiä (yhteensä 646 lattiaa). Tulokset osoittivat, että tasaisen kuorman taipumarajoitus kuvasi huonosti värähtelyjen haitallisuutta. Onysko ehdotti 1 kN:n lattian keskellä olevasta voimasta aiheutuvan taipuman (mm) rajoittamista arvoon $6,7/L$ ($3\text{m} \leq L \leq 6 \text{ m}$) ja lisäksi alle 3 metrin jännevälillä taipuman rajoittamista arvoon $1,75 \text{ mm}$. Onyskon mielestä lattian vaimennusarvot on tunnettava tarkemmin, ennen kuin niitä voidaan käyttää suunnittelussa. Onysko tarkensi taipumaehtoa pariin otteeseen, vuonna 1986 muotoon $7,217/L$ ja vuonna 1988 muotoon $8,0/L$ (Onysko 1986 ja 1988). Viimeisessä muutoksessa hän nosti alle 3 metrin jänteen taipumarajoituksen arvoon $2,0 \text{ mm}$.

Foschi ja Gupta (1987) ehdottivat lattiapalkin keskellä sijaitsevan 1 kN:n voiman aiheuttaman taipuman rajoittamista arvoon 1 mm . Ehto on jännevälistä riippumaton. Tulos perustuu numeerisiin analyyseihin impulssikuorman ('heel-drop'-testi) siirtymisestä herätteen lähettäjältä $0,60 \text{ metrin}$ päässä olevaan havainnoitsijaan. Perusteena on käytetty vaimenevaa värähtelytyyppiä (Wiss ja Parmelee 1974), jonka vaikutus havainnoitsijaan on 'selvästi havaittavan' alaraja (kuva 10, $R = 3$). Tuloksia on tutkimuksessa verrattu myös sen hetken eri maiden suunnitteluohjeisiin. Taipumarajoitus 1 kN:n voimasta esiintyi tällöin vain Norjassa ($0,9 \text{ mm}$), Ruotsissa ($1,5 \text{ mm}$) ja Tanskassa ($0,9 \text{ mm}$). Muissa vertailumaissa Kanada, Yhdysvallat, Iso-Britannia, Saksa ja Suomi oli käytössä vain taipumaraja mitoituskuormitukselle.

National Building Code of Canada (NRC 1990) esittää liitteessä A (Explanatory Material) puurakenteille uuden 2 mm:n taipumarajoitukseen perustuvan ehdon. Ohjeessa määritetään värähtelyn suhteen suurin sallittu jänneväli (VCS, vibration controlled span) lausekkeesta

$$VCS = KS_i, \text{ jossa } \ln(K) = A - B \ln \frac{S_i}{S_{184}} + G. \quad (33)$$

Vakio A riippuu levytyksen paksuudesta, palkkijaosta ja lattian poikittaisjäykyydestä (suuruus 0,19 - 0,50), B riippuu lattian poikittaisjäykistyksestä (suuruus 0,33 - 0,41) ja G riippuu levytyksen ja lattiapalkin välisestä liitoksesta (suuruus 0 - 0,15). S_{184} on jänneväli, jolla 1 kN:n voima aiheuttaa 2 mm:n taipuman palkilla 38 x 184 mm. Ehto perustuu aikaisempiin Onyskon tutkimuksiin (1988) ja on artikkelissa esitetyistä vaatimuksista lievin. Kun $S_i = S_{184}$, saadaan K :n vaihteluväliksi 1,5 - 4,7.

Kalkertin yhteenvetoartikkelista puuttuu Foschin (1995) suosittelema Wissin ja Parmeleen (1974) mitoituskriteerin käyttö yhdessä kehittyneiden laskentamallien kanssa. Perusteena ehdon käytölle on havainto, että hiekkapussin pudotuskokeissa ja 'heel-drop'-kokeissa mitatut siirtymävasteet vastaavat muodoltaan Wissin ja Parmeleen kokeissa käyttämää vastetta (ks. kuvat 3 ja 10). Kriteeri perustuu siirtymän suurimpaan amplitudiin A (annetaan tuumina), värähtelyn taajuuteen F ja vaimennukseen D (annetaan prosentteina). Ehto annetaan muodossa

$$\log(FA) = 3,77 \log(R) + 0,217 \log D - 2,66. \quad (34)$$

Parametrin R arvoksi Foschi suosittelee käytettäväksi arvoa 4. Kun tehdään muunnos $A = u/0,0254$, $\zeta = 0,01D$, $f_0 = F$, ja sijoittamalla lausekkeeseen arvo $R = 4$ ehto voidaan esittää metrijärjestelmässä muodossa

$$f_0 u \leq 28,1 \cdot 10^{-3} \cdot \zeta^{0,217} \text{ (m/s)}. \quad (35)$$

Jos esimerkiksi $f_0 = 8$ Hz ja $\zeta = 0,01$, sallituksi amplitudiksi saadaan 1,3 mm. Käyttämällä ehdon alarajaa 2,5 Hz (Wiss ja Parmelee 1974), sallituksi värähtelyamplitudiksi tulisi 4,1 mm. Menetelmä ei sovellu käsinlaskentaan, koska se edellyttää värähdysamplitudin tuntemista. Kriteerin käyttöä käsittelevässä artikkelissa on lisäksi osoitettu, että (1) ihmisellä itsellään on oleellinen vaikutus kevyiden välipohjien värähtelyyn, (2) ihminen voidaan kuvata dynaamisessa laskentamallissa yhden vapausasteen värähtelijällä ja (3) staattiseen taipumaan perustuva mitoituskriteeri voidaan kehittää, kun värähtelykriteeri on hyväksytty.

Kalkertin artikkelista puuttuu myös Yhdysvalloissa esitetty kriteeri (Dolan ja Skaggs 1994), jossa lattian alin ominaistaajuus on yksikertaisesti rajoitettu arvoon 15 Hz. Tulos perustuu 15 välipohjalle laboratorio-olosuhteissa tehtyihin yli 200 värähtelytestiin ja 89 valmiin asuinhuoneiston lattian mittauksiin.

8.2 RUOTSIN OHJEET

Ohlsson (1991) valitsi kolme ehtoa suunnittelukriteereiksi. Ensimmäinen ehto, että lattian alimman ominaistaajuuden f_0 on oltava suurempi kuin 8 Hz, estää resonanssin syntymisen askelkuormitusten jaksollisten komponenttien kanssa (taulukko 2). Toinen ehto, että 1 kN:n pistekuormasta aiheutuva taipuma saa olla enintään 1,5 mm, rajoittaa lattian notkumista askelten alla. Kolmas ehto rajoittaa

kävelyn impulssimaisista tekijöistä aiheutuvaa värähtelyn suuruutta. Ehto rajoittaa suurimman arvioidun värähtelynopeuden v_{max} vaimennusominaisuuksien perusteella määräytyvään arvoon. Ensimmäinen ja kolmas ehto voidaan suorakaiteen muotoisella välipohjalla tarkastaa seuraavista lausekkeista:

$$f_0 = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}} > 8 \text{ Hz} \quad (36)$$

$$v_{max} = \frac{4(0,4 + 0,6n_{40})}{mbl + 200} < 100^{(f_0\zeta - 1)} \quad (37)$$

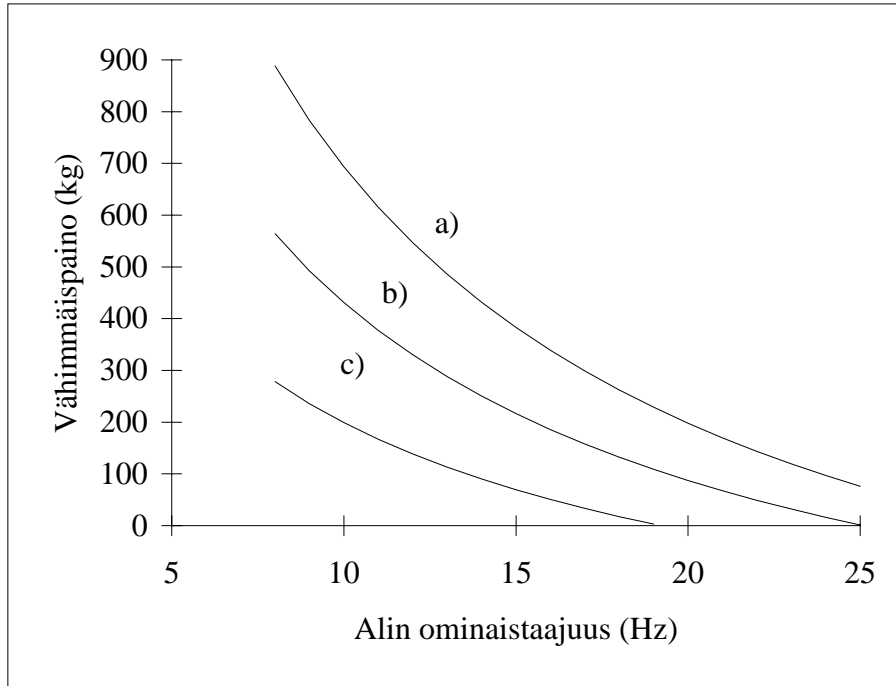
$$n_{40} = \left\langle \left[\left(\frac{40}{f_0} \right)^2 - 1 \right] \left(\frac{b}{l} \right)^4 \left[\frac{(EI)_l}{(EI)_b} \right] \right\rangle^{0,25} \quad (38)$$

Kaavoissa b on suorakaiteen muotoisen lattian leveys, l on lattian pituus, $(EI)_l$ ja $(EI)_b$ ovat välipohjan pituus- ja poikittaissuuntaiset taivutusjäykkyydet, m on välipohjan massa pinta-alayksikköä kohden, n_{40} on alle 40 Hz olevien ominaistajuuksien lukumäärä ja ζ on vaimennussuhde. Tavallisilla puulattioilla Ohlsson suosittelee käytettäväksi arvoa $\zeta = 0,01$.

Nopeusvasteen laskentaperusteena on käytetty yksikköimpulssia 1 Ns. Vasteessa on otettu huomioon ihmisen painosta tehollinen osuus 50 kg (lausekkeessa (37) tekijä 200/4), mutta ei kalustuksesta aiheutuvaa painoa. Yksikköimpulssista aiheutuvan sallitun suurimman nopeuden lausekkeet (37) ja (38) on johdettu suorakaiteen muotoiselle lattialle tehtyjen yksinkertaistusten avulla lausekkeesta (8). Menetelmän taustaa on selitetty tarkemmin mm. lähteissä (Ohlsson 1982 ja 1988).

Ohlssonin menetelmä on hyväksytty myös puurakenteiden Eurocode 5 -ohjeeseen (ENV 1995-1-1 1993). Lähteessä (Ohlsson 1988) on esitetty lisäksi toinen värähtelyn nopeusehto sellaisille rakenteille, joilla kävelykuormitus voi jatkua pitkään. Esimerkkinä mainitaan mm. kävelysillat, kun jänneväli on yli 4 m. Uudemmissa ohjeista ehto on kuitenkin jätetty pois.

Värähtelynopeuden perusteella voidaan laskea ehto lattian minipainolle (kuva 16). Kuvasta nähdään, että vaadittava lattian massa pienenee ehdon perusteella oleellisesti, mikäli poikittaista jäykkyyttä lisätään.



Kuva 16. Lattian minimipaino (mbl) Ohlssonin värähtelynopeudelle asettaman ehdon perusteella. Kuvan tapauksessa lattia on neliön muotoinen ($b/l = 1$) ja vaimennus $\zeta = 0,01$. Jäykkyyssuhde vaihtelee seuraavasti: a) $(EI)_1 / (EI)_b = 50$, b) $(EI)_1 / (EI)_b = 10$ ja c) $(EI)_1 / (EI)_b = 1$.

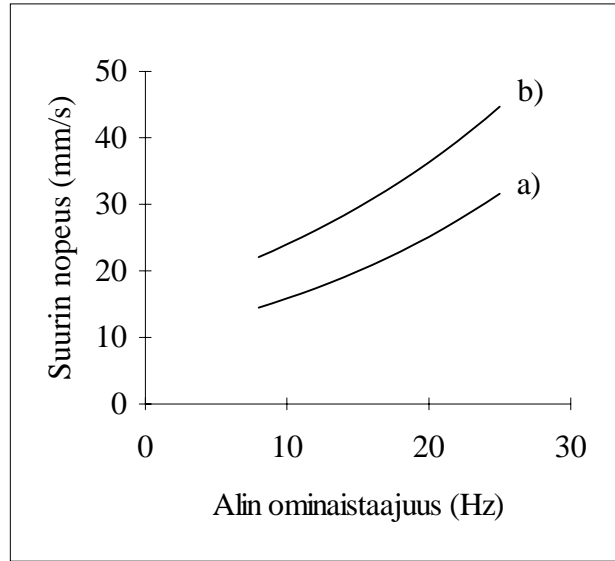
8.3 AUSTRALIAN OHJEET

Nykyinen Australian standardi AS 3623 (1993) koskee enintään kaksikerroksisia metallirunkoisia rakennuksia. Tarkoituksena on kuitenkin, että standardin seuraava versio olisi materiaalista riippumaton. Vaikka standardi noudattaakin pääpiirteissään Ohlssonin menetelmää, standardissa on joitakin pieniä eroja.

Kuten Ohlssonin ohjekin, standardi rajoittuu välipohjiin, joiden alin ominaistaajuus on yli 8 Hz. Yhden kilonewtonin pistekuormasta aiheutuva lattian suurin taipuma on kasvatettu Ohlssonin ehdottamasta 1,5 mm:stä arvoon 2,0 mm. Yhden newtonsekunnin impulssista aiheutuva lattian suurin värähtelynopeus on esitetty muodossa

$$\log_{10}(v_{\max}) < 1,2 + 2 \cdot f_0 \zeta. \quad (39)$$

Värähtelynopeuden suhteen Australian standardi on noin 30 - 35 % lievempi kuin Ohlssonin ehdotus (kuva 17). AS 3623:ssa välipohjan massa m voidaan sisällyttää myös liikkuvasta kuormituksesta osuus 30 kg/m^2 . Tätä lisää käytetään sekä ominaistaajuuden (lauseke (36)) että värähtelynopeuden (lauseke 37) laskemisessa. Vaimennussuhteena voidaan käyttää ilman erillisselvityksiä arvoa $\zeta = 0,9 \%$.



Kuva 17. Suurin värähtelyn nopeus (a) lausekkeen (37) (Ohlsson 1991, $\zeta = 1,0\%$) ja (b) lausekkeen (39) (AS 3623 1994, $\zeta = 0,9\%$) mukaan.

Standardin liitteessä annetaan ominaistajuuden f_0 ja arvon n_{40} laskemiseksi mahdollisuus käyttää lausekkeiden (36) ja (38) sijaan myös tarkempia lausekkeita

$$f_0 = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}} \sqrt{1 + \left[2 \left(\frac{l}{b} \right)^2 + \left(\frac{l}{b} \right)^4 \right] \frac{(EI)_b}{(EI)_l}} \quad (40)$$

$$n_{40} = \frac{b}{l} \left\langle \sqrt{1 + \left[\left(\frac{40}{f_0} \right)^2 - 1 \right] \frac{(EI)_l}{(EI)_b} - 1} \right\rangle^{1/2} \quad (41)$$

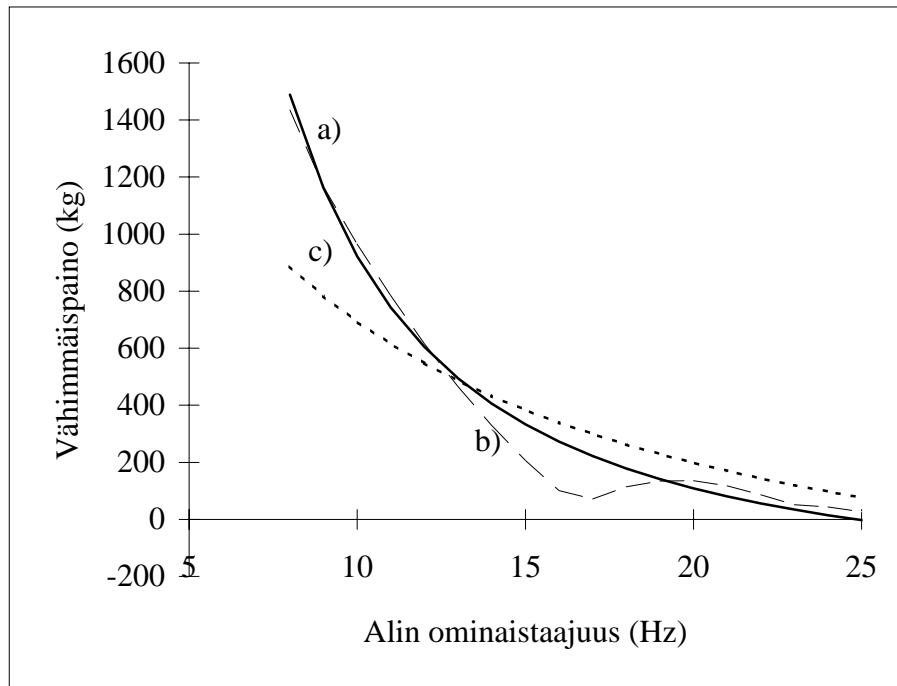
Lausekkeissa otetaan huomioon lattian poikittaisjäykkyyden ominaistajuutta kasvattava vaikutus, jos poikittaisjäykkyyden suhde pituusjäykkyyteen ei ole pieni, kuten Ohlsson varmalla puolella olevana likiarvona olettaa.

8.4 ENGLANNIN OHJEET

Kalkertin yhteenvetoartikkelista puuttuvat Englannissa tehdyt tutkimukset. Chuin (1988) mukaan Englannissa on puurakenteilla silloin ollut käytössä staattisen taipuman ehto L/333, kuitenkin enintään 14 mm. Seuraavassa kuvattu menetelmä (Chui 1988, Smith ja Chui 1988) perustuu Englannissa tehtyyn TRADAn (Timber Research and Development Association) rahoittamaan tutkimusohjelmaan. Chui ehdottaa (1) välipohjan ominaistajuudelle ehtoa $f_0 \geq 8$ Hz ja (2) suurimmaksi teholliseksi kiihtyvyydeksi arvoa

$$a_{rms} = \frac{2000K}{m\pi f_0^2} \leq 0,45 \text{ m/s}^2; f_0 = \frac{\pi}{2L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}}, K \approx 1,25f_0 + 30, \quad (42)$$

joissa m on puolet koko lattian ja "tehollisen" kalustuksen (280 kg) massasta. L on lattian jänneväli ja EI on lattiapalkkien yhteenlaskettu jäykkyys. Lattiassa ei käytetty poikittaisjäykkyyttä lisääviä rakenteita. Ehto perustuu impulssikuormitukseen, jonka suuruus on 0,5 kN ja kesto 0,05 - 0,07 sekuntia. Lisäksi on otettu huomioon vaimennus 3 % (sisältyy K -arvoon) ja ISO:n kiihtyvyyden raja-arvokäyrän kaltevuus yli 8 Hz:n taajuuksilla (kuva 8). Vaimennus sisältää ihmisten ja kalustuksen vaikutuksen. Lausekkeesta voidaan laskea välipohjan massan minimiarvo, jota on kuvassa 18 verrattu Ohlssonin ehtoon. Tulokset ovat hyvin samansuuntaisia.



Kuva 18. Chuin värähtelykriteerin vertailu Ohlssonin kriteeriin. a) Chuin ehto lausekkeen (42) likiarvon mukaan, b) ehto Chuin esittämän "tarkan" ratkaisun mukaan ja c) Ohlssonin kriteeri, kun $(EI)_l / (EI)_b = 50$ (vrt. kuva 16).

8.5 TERÄSRAKENTEIDEN EUROCODE- JA ECCS-OHJEET

Eurocode 3:n osassa 1.3 ei ohutlevyrakenteille esitetä osan 1.1 yleisistä vaatimuksista poikkeavia ehtoja. Osan 1.1 rajoitukset koskevat vain matalataajuuksisia välipohjia. ECCS:n teräsrunkoisia kevyitä välipohjia käsittelevässä julkaisussa (ECCS 1984) ohjeet viittaavat Ruotsin vuoden 1989 ohutlevyrakennenormeihin StBK-N5. Ehtoina ovat (1) taipumarajoitus $L/400$, (2) alin ominaistaajuus suurempi kuin 10 Hz ja (3) taipuma 1 kN:n pistevoiman vaikutuksesta enintään 2,5 mm. ECCS:n kevytrakenteisia rakennuksia käsittelevässä, vielä valmisteilla olevassa julkaisussa (ECCS 1996) esitetään AS 3623:n mukainen menetelmä. Aikaisemmissa työversioissa julkaisussa oli kuvattu Ohlssonin menetelmä.

SCI:n ohje (Wyatt 1989) on tarkoitettu teräsbetoniliittorakenteille. Välipohjille, joiden alin ominaistaajuus on yli 7 Hz, kantapään kosketuksesta aiheutuva värinä otetaan ohjeessa huomioon lausekkeella

$$R = \frac{30\,000}{mb_e L}, \quad (43)$$

jossa m on lattian massa (kg/m^2) sisältäen 10 % ihmisten ja varustelun painosta, b_e on lattian palkkijako, kuitenkin enintään 40 kertaa laatan paksuus, ja L on lattia-palkin jänneväli. Tekijä R saa normaaleilla toimistorakennuksilla olla enintään kahdeksan. Lausekkeen mukaan ehto täyttyy, kun $mb_e L > 3750$ kg.

Ehto perustuu impulssista aiheutuvaan kiihtyvyyssamplitudiin (lauseke (7)). Värähtelevänä alueena tarkastellaan yhtä lattiapalkkikaistaa, ja värähteleväksi massaksi arvioidaan $mb_e L/1,7$. Kantapään iskun aiheuttaman impulssin suuruus on noin 3 - 4 Ns, josta aiheutuvan vaimenevan värähtelyn tehollisen kiihtyvyyden arvioidaan olevan noin 60 - 75 % maksimikiihtyvyydestä. Tehollisen kiihtyvyyden raja-arvona on käytetty ISON (2631-2 1989) yli 8 Hz:n taajuuksien kaltevaa raja-arvokäyrää ($a_{rms}/R = 0,625 \cdot 10^{-3} \cdot f \text{ m/s}^2$, kuva 8), josta johtuen taajuudet supistuvat pois ja ehto riippuu vain välipohjan painosta.

Kanadan teräsrakenneohjeissa (CAN/CSA 1994) on SCI:n ohjetta vastaava ehto, jonka perustuu 'heel-drop'-impulssiin. Ehto johtaa SCI:n ohjeen vertailun mukaan noin kaksinkertaiseen välipohjan minimipainoon. Allen ja Murray (1993a) ehdottavat kokemukseen perustuen, että kevyillä liittorakenteisilla välipohjilla 1 kN:n pistekuormasta aiheutuva taipuma tulisi rajoittaa arvoon 1 mm, kun alin ominaistaajuus on yli 10 Hz.

9 ALUSTAVA EHDOTUS MITOITUSMENETELMÄKSI

9.1 MITOITUSMENETELMÄEHDOTUKSEN TAUSTAA

Välipohjat jaetaan niiden alimman ominaistajuuden perusteella matala- ja korkeataajuuksiin. Rajaksi valitaan 8 Hz. Mitoitusmenetelmäehdotus perustuu matalataajuuksisten ("raskaiden") välipohjien osalta kanadalaiseen lähteeseen (Allen ja Murray 1993a). Menetelmä vastaa periaatteiltaan englantilaista SCI:n ohjetta (Wyatt 1989), mutta on sitä selkeämpi. Korkeataajuuksisten ("kevyiden") välipohjien osalta mitoitus perustuu lähteeseen (Ohlsson 1991). Menetelmä on valittu myös puurakenteiden euronormiin Eurocode 5. Ohlssonin ohje on ollut Ruotsissa käytössä jo ainakin vuodesta 1988 lähtien, joten siitä on saatu myös käyttökokemuksia. Mitoitusmenetelmien valintakriteerinä on ollut niiden havainnollisuus ja helppokäyttöisyys. Niiden käyttö ei edellytä rakenteiden dynamiikan erityisosaamista tai erityisohjelmia, mutta sisältävät silti riittävän määrän parametreja rakenteiden värähtelyominaisuuksien optimoimiseksi.

Kirjallisuudesta löytyviin laskentamenetelmiin sisältyy huomattavia epätarkkuuksia ja ristiriitaisuuksia. Tiedot ovat yhä puutteellisia liittyen kävelyn aiheuttamaan herätteeseen, ihmisen värähtelyherkkyyteen, rakenteiden vaimennukseen, rakenteiden vasteen laskemiseen jne. Ehdotettu käsinlaskentaan soveltuva mitoitusmenetelmä on hyvin yksinkertaistettu eikä se siten ole tae rakenteen hyvästä käyttäytymisestä, mutta sen avulla pystytään välttämään useimmat suunnitteluvirheet. Vaativissa kohteissa suositellaan rakenteiden toiminnan varmentamista etukäteen joko kokeellisesti tai dynaamiseen rakenneanalyysiin perustuvilla laskentamenetelmillä. Eräs ohje rakenneanalyysimenetelmien käyttämisestä on kuvattu kohdassa 7.2. Ohjetta tulee kehittää rakenteista saatavien mittaustulosten ja rakennusten käyttäjiltä saatujen kokemusten perusteella.

Seuraavassa annettavia parametreja, kuten esim. dynaamista kuormitusta ja vaimennusta, ei tule valita kohtien 7.1 ja 8.2 arvoja edullisemmiksi, ellei siihen ole todella hyvin perusteltua syytä, esimerkiksi kokeellista varmennusta ja laskentamenetelmän taustaan perehtymistä. Yleisperiaatteena on, että kun käytetään jotakin tiettyä laskentamenetelmää, sitä on aina käytettävä yhtenä kokonaisuutena. Syytä tähän on se, että eri lähteissä esitetyt mitoitusmenetelmät on yleensä kalibroitu kokeiden avulla siten, että tuloksena on saatu kokonaismenetelmä, jota käytettäessä tarkastelluissa rakenteissa ei ole havaittu haitallisia värähtelyjä. Tulokset riippuvat valitusta perusparametrien kokonaisuudesta, johon kuuluvat mm. valittu heräte ja sen suuruus, vaimennus ja alimman ominaistajuuden arviointimenetelmä.

Rakenteet voidaan jakaa ainakin neljään erityyppiseen mitoitusapaukseen riippuen kuormituksen suuruudesta ja rakenteen dynaamisesta käyttäytymisestä. (1) Heräte on jaksollinen ja sen suuruus on voimakas, jolloin rakenteet pitää suunnitella siten, että resonanssia ei pääse syntymään. (2) Heräte on jaksollinen, mutta sen suuruus on heikko, jolloin rakenteet voidaan suunnitella resonanssita-

pauksen mukaan. (3) Heräte on iskumainen, jolloin rakenne pitää suunnitella siten, että siihen ei synny haitallisia värinöitä. Lisäksi rakenne tulee suunnitella siten, että (4) se ei notku haitallisesti askelten alla.

9.2 SOVELTUVUUSALUE

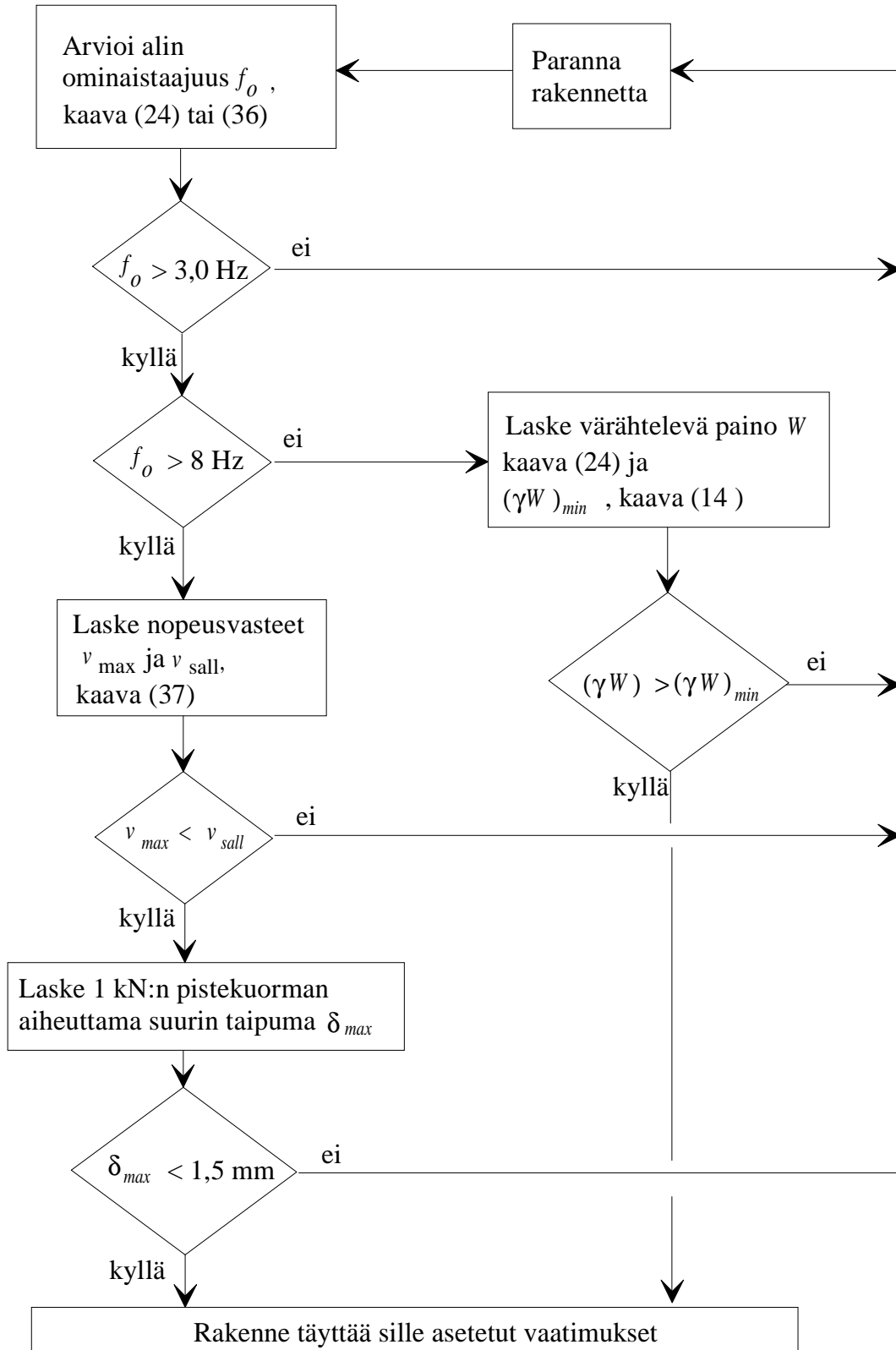
Ohje rajoittuu asuin- ja toimistorakennuksiin, ja niissäkin vain kävelystä aiheutuviin herätteisiin. Mikäli rakennuksessa on liikuntaan tarkoitettuja tiloja, ne tulee eristää muusta rakennuksesta tai rakenteet tulee suunnitella tarkemmilla menetelmillä. Samoin tulee menetellä niiden tilojen suhteen, joihin asennetaan mahdollisesti värähtelyä aiheuttavia koneita (pesukoneet, lingot, pumpput, jne.).

Erityistiloissa, kun kyseessä on kävelystä aiheutuvaa herätettä voimakkaampi jaksollinen heräte, rakenteen sisäinen vaimennus ei yleensä ole riittävä, vaan rakenne pitää suunnitella siten, että ainakin sen alin ominaistajuus on herätteen taajuutta suurempi eikä resonanssia täten pääse muodostumaan. Karkea arvio ominaistajuuden minimiksi saadaan esimerkiksi lausekkeen (17) avulla. Käytettävistä kuormituksista ja kiihtyvyyusrajoista tulee sopia tapauskohtaisesti rakennuksen käytön ja halutun vaatimustason mukaan.

9.3 MITOITUSKRITEERIT ASUIN- JA TOIMISTORAKENNUKSILLE

9.3.1 Matalataajuuksiset välipohjat

Matalataajuuksisilla välipohjilla mitoitus perustuu siihen, että resonanssi-ilmion vahvistamat kävelystä aiheutuvat jaksolliset kuormituskomponentit eivät saa olla häiritseviä. Kävelystä aiheutuva alle 2,5 Hz:n askeltaajuutta vastaava dynaaminen kuormituskomponentti on yleensä niin voimakas, että silloin ei rakenteita voida suunnitella resonanssitapauksen mukaan. Valitsemalla alimman ominaistajuuden minimirajaksi 3 Hz voidaan eliminoida myös juoksun alin taajuus. (taulukko 3). Kuvan 19 kaavio esittää mitoituksen kulun.



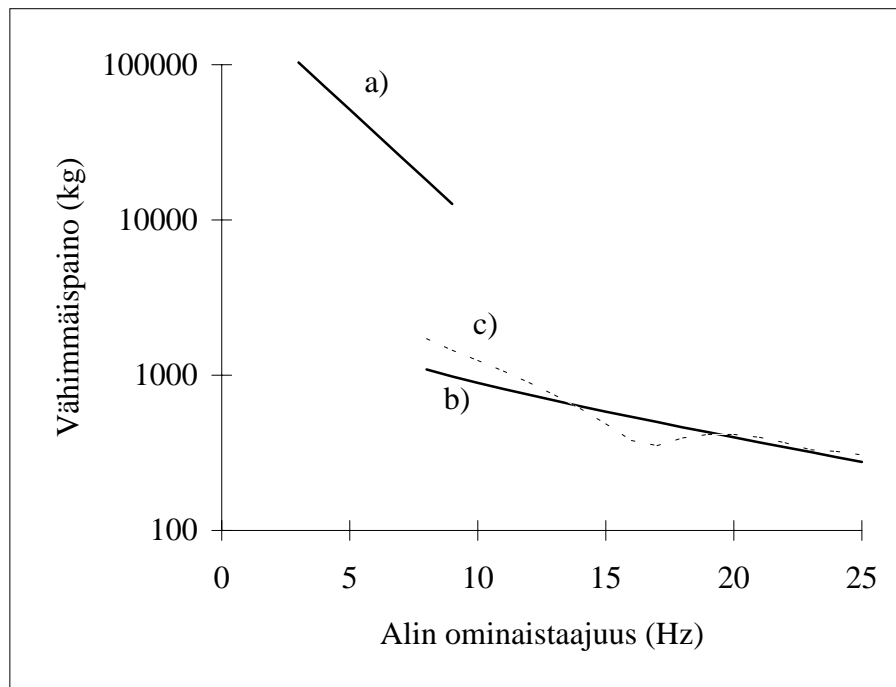
Kuva 19. Kaavio asuin- ja toimistorakennuksien välipohjien mitoituksesta.

Resonanssissa värähtelyn suuruuteen vaikuttavat pääasiassa rakenteen massa ja rakenteellinen vaimennus. Mitoituskriteeriksi suositellaan vaimennuksen ja välipohjan värähtelevän alueen tehollisen painon tuloa (γW) , jolle on kiihtyvyyss-

kriteerin perusteella johdettu alimmasta ominaistajuudesta riippuva minimiehto (lauseke (14) ja taulukko 8). Vähän kalustettujen teräsbetoniliittorakenteisten asuin- ja toimistorakennusten sekä liikerakennusten vaimennukseksi suositellaan arvoa $\gamma = 0,02$ (taulukko 8). Mitoitusmenetelmän yksityiskohdat on kuvattu kohdissa 7.1.2 ja 7.1.3 ja liitteen 1 laskentaesimerkeissä 1 ja 5.

9.3.2 Korketaajuuksiset välipohjat

Korkeataajuuksisilla välipohjilla rakenteen alin ominaistajuus on niin korkea, ettei resonanssia kävelystä aiheutuvien jaksollisten kuormitusten kanssa synny, mutta tällaiset välipohjat ovat herkkiä iskumaisille kuormituksille. Kantapään kosketuksesta aiheutuvalla värähtelyllä käytetään värähtelynopeuteen perustuvaa mitoituskriteeriä (lausekkeet (37) ja (38)), jonka toteutumiseen vaikuttaa alimman ominaistajuuden ja vaimennuksen lisäksi myös lattian poikittainen jäykkyys. Puu- ja ohutlevyrunkoisille välipohjille vaimennukseksi suositellaan arvoa $\zeta = 0,01$. Oikein suunnitelluilla matalan taajuuden välipohjilla lattian massan voidaan olettaa olevan niin suuri, että nopeuskriteeri ei tule määrääväksi (kuva 20).



Kuva 20. Välipohjan vähimmäispaino alimman ominaistajuuden funktiona. a) matalataajuuksinen lattia (lauseke (14), $\gamma = 0,03$), b) korkeataajuuksinen lattia (kuvan 16 kuvaaja a), ja c) korkeataajuuksinen lattia (kuvan 18 kuvaaja b). Lattian muoto ja jäykkyydet ovat samat kuin kuvassa 16. Kuvista 16 ja 18 poiketen käyrät sisältävät tässä myös värähtelyssä mukana olevan ihmisen ja kalustuksen tehollisen massan.

Korkeataajuuksiset välipohjat tulee tarkastaa myös kävelytaajuudesta aiheutuvalla notkumisella (taajuus alle 2,5 Hz), vaikka varsinaista rakenteen resonanssi-ilmiötä ei esiinnykään. Kriteerinä käytetään 1 kN:n pistekuormituksesta aiheutuvaa 1,5 mm:n maksimitaipumaa. Matalan taajuuden lattioilla lattian resonanssia kävelystä

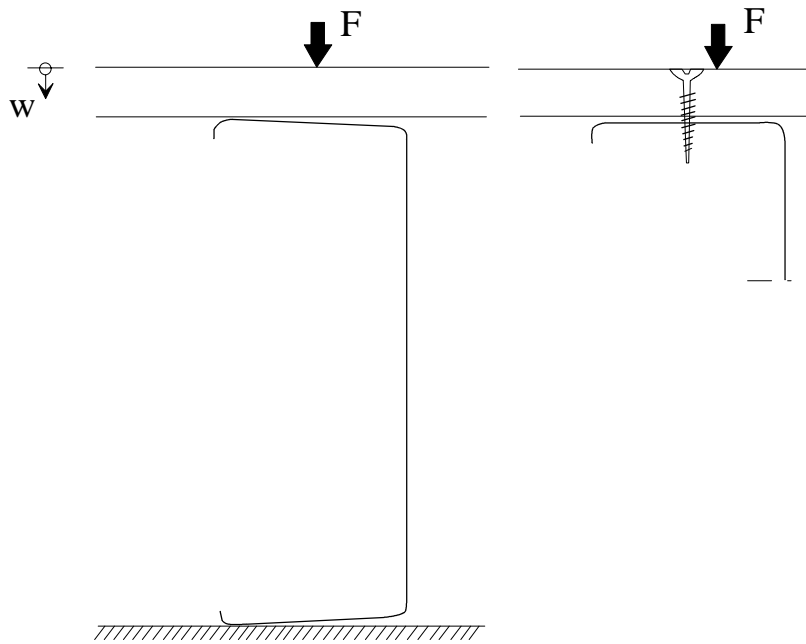
aiheutuvien ylempien taajuuksien kanssa voidaan katsoa notkumista määräävämmäksi tekijäksi, joten notkumistarkastelu ei ole täten tarpeellinen, kun lattiapalkkien väli pidetään riittävän pienenä ja lattialaatta riittävän jäykkänä.

Korkeataajuuksisen lattian mitoitusmenetelmän yksityiskohdat on kuvattu kohdassa 8.2 ja liitteen 1 laskentaesimerkeissä 2, 3 ja 4.

10 VÄRÄHTELYOMINAISUUKSIIN VAIKUTTAVIA TEKIJÖITÄ

10.1 LIITOSTEN JOUSTO

Erityisesti kevyillä välipohjilla rakenteiden sallitut taipumat saavat olla hyvin pieniä. Tällöin rakenneosien välisten liitosten tulee tuilla ja eri osarakenteiden välillä olla hyvin yhteensopivia ja välyksettömiä. Liitoksien välykset aiheuttavat helposti myös ääniä, jotka lisäävät värähtelyn haitallisuutta. Erityisesti tulee kiinnittää huomiota ohutlevytuotteiden mittatarkkuuteen ja ohutlevyruuveilla tehtyjen liitosten hyvään kontaktiin (kuva 21). Kiinnitysten tulee toimia sekä ylöspäin suuntautuville voimille. Ohutlevyrakenteiden liitoksiin syntyy lisääntynyttä joustoa myös paikallisista kuormituksista (esimerkiksi risteävät profiilit, ohutlevyprofiilien väli- ja päätytuet jne.). Usein näitä kohtia vahvennetaan erillisillä tukipaloilla. Paikalliselle joustolle ovat alttiita erityisesti ohutlevytuotteiden nurkkapyöritykset ja uumajäykisteet.



Kuva 21. Huono muototarkkuus ja pintojen välinen kontakti lisäävät joustoa (Ohlsson 1986).

Kevyiden välipohjien alapuolisten suhteellisten raskaiden kattolevytysten tai lattiaan kiinnitettyjen kevyiden väliseinien tulee olla riittävän jäykästi kiinni välipohjarakenteessa, jotta rakenteeseen ei synny sisäistä alhaisen taajuuden resonanssivärähtelijää.

Esivalmistetuilla elementeillä lattiapalkkien suuntaisten työmaaliitosten suunnitteluun ja toteutukseen on kiinnitettävä erityistä huomiota, jotta ne saadaan yhtä jäykiksi kuin suunnittelussa on oletettu.

10.2 RAKENTEIDEN JATKUVUUS

Rakenteiden alimman ominaistajuuden nostamisella parannetaan yleensä aina rakenteen ominaisuuksia. Rakenteen tekeminen jatkuvaksi ei kuitenkaan usein ole edullinen ratkaisu, vaikka siirtymällä kahdesta yksijänteisestä rakenteesta yhteen kaksijänteiseen rakenteeseen voidaan lisätä pakkovärähtelyssä mukana olevaa massaa 50 - 100 %. Massan kasvaminen pienentää suurinta kiihtyvyyttä ja nopeusamplitudia 35 - 50 % (lauseke (12), Ohlsson 1988). Ominaisuus kasvaa merkittävästi vasta, kun jänteet ovat huomattavan erisuuret. Jos kevyt lattiarakenne voidaan liittää jäykästi massiivisiin esim. betonisiin ulko- ja väliseiniin, ominaistajuuskin voidaan nostaa noin kaksinkertaiseksi.

Yleisperiaatteena kuitenkin on se, että huoneistojen välisiä jatkuvia rakenteita tulee välttää, sillä ne siirtävät alun perin paikallisen värähtelyn vaikutukset myös muihin tiloihin. Sama vaatimus tulee myös ääneneristyspuolelta. Myös häiriötiheys lisääntyy, koska häiriö voi tulla usealta eri suunnalta ja useista eri häiriölähteistä. Aiheutuva häiriö kasvaa, sillä ihminen on huomattavasti herkempi sellaisille värähtelyille, jotka eivät ole samassa tilassa aiheutettuja. Jäykät liitokset seinärakenteisiin siirtävät värähtelyt seiniin ja voivat saada myös seiniin kiinnitetty kalusteet värähtelemään. Erityisesti tila, jossa voi olla erityinen häiriön aiheuttaja (esim. pesukone), tai tila, jonka pitää olla erityisen häiriötön, pitää aina erottaa muusta lattiarakenteesta. Huoneen (tai mahdollisesti myös huoneiston) sisällä voidaan kuitenkin lattian taipumista pienentää tai värähtelyominaisuuksia parantaa lisäämällä järkevästi välikannattimia tai väliseiniä.

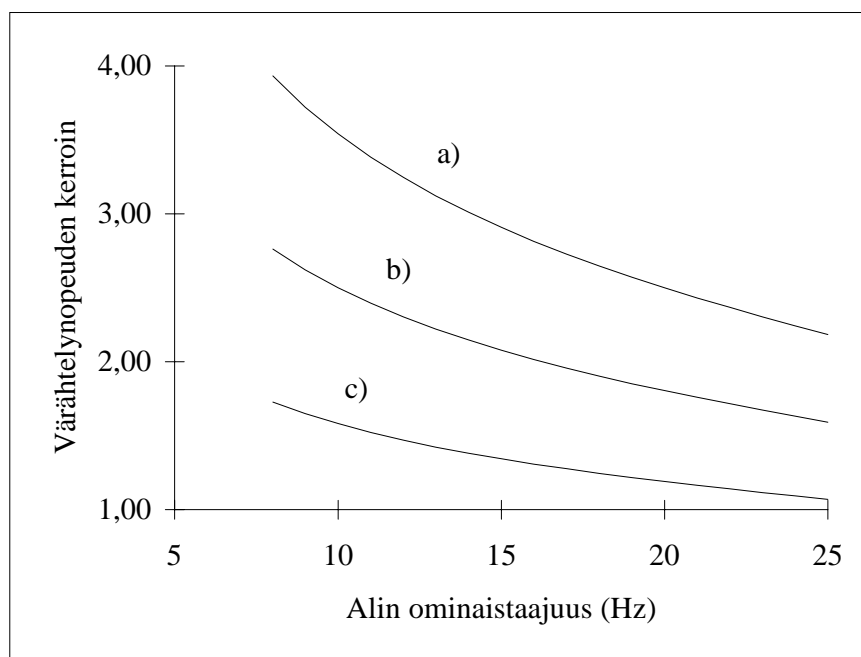
10.3 RAKENTEIDEN JÄYKKYYS

Lattian alimpaan ominaistajuuteen vaikuttaa pääasiassa sen omasta painosta aiheutuva suurin staattinen taipuma, joka taas laskentamalleissa riippuu lattian massasta ja pituussuuntaisesta jäykkyydestä (lausekkeet (18) ja (36)). Tähän voidaan parhaiten vaikuttaa joko lisäämällä palkin korkeutta tai pienentämällä massaa tai käyttämällä molempia yhdessä. Koska rakenteiden paino pyritään aina muutenkin minimoimaan, ainoiksi vaikuttamiskeinoiksi jää yleensä palkin korkeuden lisääminen, ainepaksuuden kasvattaminen tai palkkien määrän lisääminen.

Välipohjan värähtelyamplitudin suuruuteen vaikuttaa kuitenkin myös se lattian tehollinen pinta-ala, joka on mukana lattian värähtelyssä. Tähän pinta-alaan vaikuttaa taas välipohjan poikittaissuuntainen jäykkyys. Matalataajuuksisilla välipohjilla tämä pinta-ala vaikuttaa resonanssissa värähtelevän massan suuruuden kautta lattian kiihtyvyyssamplitudiin. Laskentamallissa värähtelyssä mukana oleva pinta-ala kasvaa pituus- ja poikittaisjäykkyyden suhteen pienetessä, kunnes suhde saavuttaa arvon 81 (lauseke (29)). Tätä pienemmällä suhteella pinta-ala on aina $2/3$ lattian kokonaispinta-alasta eikä poikittaisen jäykkyyden lisäämisellä enää saavuteta laskennallista hyötyä.

Korkeataajuuksisilla välipohjilla, joilla suunnittelukriteereinä on 1 kN:n piste-kuormasta aiheutuva suurin taipuma ja suurin värähtelynopeuden amplitudi,

poikittaisella jäykkyydellä on edellistä suurempi merkitys. Värähtelevän massan suuruuteen vaikuttaa oleellisesti alle 40 Hz olevien ominaistajuuksien lukumäärä (lausekkeet (37) ja (38)). Poikittaisen jäykkyyden kasvattamisella ominaistajuuksien lukumäärä n_{40} laskee merkittävästi, mikä kasvattaa värähtelevän massan suuruutta pienentäen samalla värähtelynopeutta suoraan verrannollisena kertoimeen $(0,4 + 0,6 n_{40})$ (kuva 22). Lisäksi ortotrooppisella laattalla pistekuormasta aiheutuva taipuma pienenee tapaukseen $(EI)_l/(EI)_b = 50$ nähden noin 35 %, kun $(EI)_l/(EI)_b = 20$ ja noin 60 %, kun $(EI)_l/(EI)_b = 1$ (Kortesmaa 1982).



Kuva 22. Esimerkki poikittaisen jäykkyyden lisäämisen vaikutuksesta värähtelynopeuden kertoimeen $(0,4 + 0,6 n_{40})$. Lattia on neliön muotoinen ($b/l = 1$) ja vaimennus $\zeta = 0,01$. Jäykkyyssuhde vaihtelee: (a) $(EI)_l/(EI)_b = 50$, (b) $(EI)_l/(EI)_b = 10$ ja (c) $(EI)_l/(EI)_b = 1$.

10.4 LATTIAN PINTA-ALA

Lattian jänteen pienentäminen kasvattaa alinta ominaistajuuksia, mutta toisaalta leveyden pienentäminen vähentää myös värähtelevää massaa. Matalataajuuksisilla lattioilla suurin kiihtyvyyys ja korkeataajuuksisilla lattioilla suurin värähtelynopeus ovat likimain kääntäen verrannollisia lattian kokonaispinta-alaan (lausekkeet (12) ja (37)). Alimman ominaistajuuden funktiona esitettynä molemmille tapauksille on luonteenomaista, että mitä pienempi on alin ominaistajuuks, sitä suurempi on oltava lattian kokonaispainon (kuva 20).

10.5 RAKENTEIDEN PAINO

Rakenteen pinta-alayksikköä kohden lasketun painon vähentäminen voi vaikuttaa rakenteen käyttäytymiseen joko edullisesti tai haitallisesti.

Matalan taajuuden lattioilla massan pienentämisen vaikutus on yleensä aina epäedullinen. Vaikka toisaalta resonanssitaajuus nousee, jolloin kävelystä aiheutuvan herätteen suuruus Q pienenee suhteessa $\sqrt{(m/m_0)}$ ($m < m_0$, lauseke (2) ja taulukko 3), niin toisaalta massan pienentäminen kasvattaa resonanssissa kiihtyvyyssamplitudia suhteessa m_0/m . Näiden yhteisvaikutuksesta kiihtyvyyssamplitudi kasvaa suhteessa $\sqrt{(m_0/m)}$. Jos kuitenkin resonanssitaajuus saadaan nostettua korkean taajuuden lattioiden alueelle, mitoitus voidaan tehdä korkean taajuuden lattioiden kriteereillä, jolloin vaikutus on yleensä aina edullinen.

Korkean taajuuden lattioilla massan vaikutus on huomattavasti merkityksettömmämpi kuin matalan taajuuden lattioilla. Massan pienentäminen kasvattaa alinta ominaistaajuutta, jolloin värähtelevän alueen pinta-ala kasvaa ja samalla värähtelyyn saatettava massa kasvaa (lauseke (38)). Tämä vaikuttaa värähtelynopeutta pienentävästi. Yleensä tämä pinta-alan kasvamisen vaikutus on suurempi kuin massan pienenemisen vaikutus (lauseke (37)), jolloin massan pienentämisen kokonaisvaikutus on lievästi edullinen, mutta voi joissakin tapauksissa olla epäedullinenkin.

Ihmisten, kalusteiden ym. liikkuvan kuorman painolla voi olla suuri merkitys lattian värähtelyominaisuuksiin. Ehdotetussa Ohlssonin menetelmässä näiden merkitystä ei ole otettu huomioon, mikä johtaa yleensä varmallalla puolella olevaan mitoitukseen. Jos on oletettavissa, että näiden kuormitusten vaikutus on suuri, ominaistaajuus voidaan laskea sisällyttäen kuormitukset välipohjan omaan painoon, mutta värähtelynopeus lasketaan silti ilman niitä. Lisäksi voidaan tarkastaa välipohjan käyttäytyminen myös matalataajuuksisena välipohjana. Menettelyllä varmistutaan lattian toiminnasta myös tällä raja-alueella.

Korkean taajuuden lattioilla on myös huomattava, että jos ne koostuvat useista eri osista, jotka ovat joustavasti kiinni toisissaan, värähtelevä massa saattaa olla pienempi kuin välipohjan kokonaismassa.

10.6 RAKENTEELLINEN VAIMENNUS

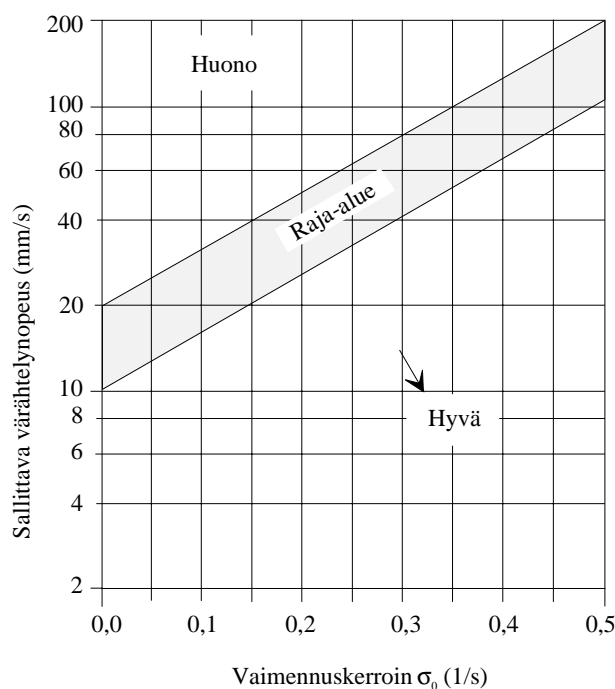
Vaimennus on tekijä, josta on olemassa hyvin ristiriitaisia suosituksia. Suositukset ovat puu- ja ohutlevyrunkoisilla välipohjilla yleensä 1 - 3 % ja teräsbetoniliittorakenteilla 1 - 5 %. Ylärajat sisältävät liikkuvan kuorman ja väliseinien vaikutuksen, alarajat koskevat yleensä kalustamattomia rakenteita. Kalustamattomilla rakenteilla laboratorio-olosuhteissa mitatut vaimennukset ovat molemmilla rakentyypeillä yleensä keskimäärin noin 1 % (Ohlsson 1982, Eriksson 1994).

Vaimennuksen suuruuteen vaikuttavat myös välipohjiin liittyvät rakenteet (väliseinät, alakatot jne.) sekä huoneen varustelu. Vaimennukseen vaikuttaa myös liitosten vaimennus. Esimerkiksi mekaanisilla liitoksilla koottujen rakenteiden vaimennus on yleensä suurempi kuin liimaliitoksilla koottujen rakenteiden.

Matalataajuuksisilla lattioilla suurin kiihtyvyys puoliintuu, kun vaimennus kaksinkertaistuu (lauseke (11)). Karkeasti voidaan arvioida, että jos vaimennus

arvioidaan todellisuuteen verrattuna kaksinkertaiseksi, muutos vastaa vaatimustason laskemista siirryttäessä asuintiloista liiketiloihin (taulukot 6, 7 ja 12). Nelinkertainen virhe vastaisi jo muutosta asuintiloista teollisuustiloihin.

Korkeataajuuksisilla latioilla sallittu värähtelynopeus kaksinkertaistuu, kun vaimennuksen ja ominaistaajuuden tulo kaksinkertaistuu (kuva 23). Olssonin mukaan siirtymäalue hyvän ja huonon alueen välissä käsittää välin sallitusta värähtelynopeudesta sen kaksinkertaiseen arvoon. Koska ISO 2631-2:n (1989) mukaan rakennuksen käyttötarkoituksen mukaiset korjauskertoimet pätevät myös värähtelynopeudelle, voidaan arvioida, että vaimennuksessa tehdyn virheen merkitys on korkea- ja matalataajuuksisilla latioilla sama.



Kuva 23. Lausekkeen (37) mukaan laskettu sallitun värähtelynopeuden riippuvuus alimman ominaistaajuuden ja vaimennuksen tulosta $\sigma_0 = f_0 \zeta$ (Ohlsson 1988).

10.7 PISTEKUORMAN AIHEUTTAMA TAIPUMA

Korkeataajuuksisten välipohjien staattisen taipuman kriteeri 1 kN:n pistevoimalle on eri lähteissä 0,9 - 2,5 mm. Löydetyissä lähteissä ei ole kuitenkaan löytynyt taipumarajan tulkintaa ISO 2631-2:n (1989) peruskäyrän avulla.

Jos ajatellaan ihmisen kävelemistä kuvitteellisella painottomalla ja vaimennuksettomalla lattialla, sen taipuma seuraa kävelykuormituksen muotoa. Jaksollisen kävelykuormituksen maksimiampplitudi on noin 75 % ihmisen painosta (kuva 1, lauseke (1) ja taulukko 2). Ihmisen keskimääräinen kävelytaajuus $f = 2$ Hz, jota vastaavaksi hyväksyttäväksi kiihtyvyydsamplitudiksi asuin- ja toimistotiloissa voidaan arvioida $a_{max} = 0,07 \text{ m/s}^2$ (kuva 8). Vastaava siirtymäamplitudi $u_{max} = a_{max}/(2\pi f)^2 = 0,44 \text{ mm}$. Kun ihmisen keskimääräinen paino on 750 N, voimaa 1 kN vastaavaksi siirtymäamplitudiksi saadaan

$$u_{\max} = \frac{1000}{0,75 \cdot 750} \cdot 0,44 = 0,8 \text{ mm}, \quad (44)$$

joka on noin puolet mitoituskriteeriksi esitetystä arvosta. Taipumakriteeri 1,5 mm lienee kuitenkin perusteltu, koska (1) kävelijä ei kävele paikallaan pahimmassa kohdassa, (2) kävelijä sietää itse aiheuttamaansa herätettä paremmin kuin muut ihmiset, jotka (3) yleensä sijaitsevat kauempana kävelijästä, jossa taipumat ovat huomattavasti pienemmät (vrt. kerroin $R = 0,5$ lausekkeessa (12)).

Taipumarajoituskin on siis perusteltavissa ISON peruskäyrän avulla. Koska kiihtyvyys kaksinkertaistuu, kun taipuma kaksinkertaistuu, niin taipuman arvioinnissa tehdyn suhteellisen virheen suuruus voidaan arvioida vastaavan vaimennuksessa tehdyn suhteellisen virheen suuruutta. Taipuman kaksinkertaistumisella on suuruusluokaltaan sama merkitys kuin vaimennuksen puolittamisella (ks. kohta 10.6).

11 JOHTOPÄÄTÖKSET

11.1 YHTEENVETO

Tässä kirjallisuusselvitykseen perustuvassa esitutkimuksessa on sekä kevyiden että raskaiden välipohjien mitoituksen osalta kuvattu värähtelyn haitallisuuteen vaikuttavat tekijät ja kansainvälinen osaaminen sekä tehty alustava ehdotus yksinkertaiseksi mitoitusohjeeksi.

Kävely sisältää jaksollisia ja iskumaisia dynaamisia kuormituksia. Lattian värähtely voi muodostua haitalliseksi, jos kävelyn jaksolliset kuormituskomponentit vahvistuvat liiaksi resonanssi-ilmiön vuoksi, jos lattia notkuu liikaa askelten alla tai jos kantapään kosketus lattiaan aiheuttaa haitallista tärinää. Resonanssia pidetään mahdollisena, jos rakenteen värähtelyn alin ominaistajuus on alle 8 Hz. Jos taajuus on tätä suurempi, notkuminen ja tärinä voivat muodostua ongelmaksi. Matalat ominaistajuudet ovat tyypillisiä raskaille ja alhaiset ominaistajuudet kevyille välipohjille. Kirjallisuudesta löytyneet tutkimukset on yleensä aina tehty erikseen joko kevyille puurakenteisille tai raskaille teräsbetoniliittorakenteisille välipohjille. Tutkimusten kahtiajakoisuuden ja värähtelyongelman tyyppin vaihtumisen vuoksi välipohjan mitoitus on erittäin epäjatkuva ominaistajuuden 8 Hz kohdalla.

Kirjallisuudesta löytyviin laskentamenetelmiin sisältyy huomattavia epätarkkuuksia ja ristiriitaisuuksia. Tiedot ovat yhä puutteellisia, mikä johtuu eroista mm. kävelyn aiheuttamassa herätteessä, ihmisten värähtelyherkkyydessä, rakenteiden vaimennuksessa ja rakenteiden vasteen laskemisessa. Ehdotettu käsinlaskentaan soveltuva mitoitusmenetelmä on hyvin yksinkertaistettu eikä siten ole taek rakenteen hyvästä käyttäytymisestä, mutta ohjeen avulla pystytään välttämään useimmat suunnitteluvirheet. Vaativissa kohteissa suositellaan rakenteiden toiminnan varmentamista etukäteen joko kokeellisesti tai dynaamiseen rakenneanalyysiin perustuvilla laskentamenetelmillä. Ohjetta tulee kehittää rakenteista saatavien mittaus tulosten ja rakennusten käyttäjiltä saatujen kokemusten perusteella.

Alustava mitoitusohje-ehdotus perustuu matalataajuuksisten, yleensä raskaiden välipohjien osalta kanadalaiseen lähteeseen (Allen ja Murray 1993a). Menetelmä vastaa periaatteiltaan englantilaista SCI:n ohjetta (Wyatt 1989). Ohjetta valmistellaan yhteiseksi Pohjois-Amerikan ohjeeksi (AISC, CISC). Korkeataajuuksisten, yleensä kevyiden välipohjien mitoitus perustuu lähteisiin Ohlsson 1988 ja 1991. Menetelmä on valittu myös puurakenteiden euronormiin Eurocode 5 (ENV 1995-1-1 1993). Mitoitusmenetelmät ovat havainnollisia ja helppokäyttöisiä. Niiden käyttö ei edellytä rakenteiden dynamiikan erityisosaamista tai erityisiä laskentaohjelmia, mutta ne sisältävät silti riittävän määrän parametreja rakenteiden värähtelyominaisuuksien optimoimiseksi.

11.2 JATKOTUTKIMUSTARPEET

Seuraavassa luetellaan eräitä rakennusten värähtelyihin ja erityisesti niiden käyttömukavuuteen liittyviä tärkeimpiä jatkotutkimustarpeita.

- (1) Suurimpana puutteena haitallisten värähtelyiden hallintaan liittyen lienee Suomessa mittaus- ja kokemusperäisen tiedon puute nykyisistä välipohjista. Rakenteiden nykytilan kartoitus on välttämätön ehto kehitettäessä entistä toimivampia välipohjaratkaisuja. Mittausten avulla voidaan konkretisoida tunne värähtelyjen haitallisuudesta, saada uutta tietoa laskennassa tarvittavista kokeellisista mitoituseräistä (vaimennus, värähtelyamplitudin suuruus, ominaistaajuus), luokitella rakenteiden toimivuutta ja kehittää mitoituseräitä. Projektin osatehtäviä voisivat olla esimerkiksi (a) kirjallisuustutkimukseen perustuva ehdotus kävelyherätteiden haitallisuuden mittausmenetelmäksi, (b) mittausvalmiuksien kehittäminen, (c) kattavan mittauskohdeotannan valitseminen (eri materiaalit, eri mitoituskriteerit, kokemukset), (d) värähtelymittaukset sisältäen käyttäjien kokemukset ja (e) systemaattinen mittaus tulosten analysointi.
- (2) Laskentamallien kehittäminen aukollisille, vapaareunaisille tai epäjatkuville välipohjille. Esiitetty mitoituserä-ehdotus koskee matalataajuuksisten välipohjien osalta vain reunoiltaan niveltuettua suorakaiteen muotoista välipohjaa, raskaiden välipohjien osalta myös vapaareunaiselle rakenteelle on esitetty karkea suositus. Käytännön rakenteita varten lisäohjeet ovat tarpeen.
- (3) Laskentaohjeiden kehittäminen liikuntatiloille, kävelysilloille ja katsomorakennuksille. Näillä rakenteilla sekä vaatimukset että herätteet poikkeavat asuin- ja toimistotilojen vaatimuksista. Mitoituserä joudutaan usein suorittamaan eliminoimalla resonanssin tai haitallisen notkumisen ja huojumisen mahdollisuus.
- (4) Suunnitteluohjeet koneista aiheutuvien haitallisten värähtelyjen estämiseksi. Kiinteistä koneista (esim. pesukoneet, lingot, ilmastointilaitteet, äänentoistolaitteet) aiheutuvien herätteiden taajuus ja suuruus riippuu niiden omasta vaimennusjärjestelmästä. Lattian ominaisuuksien merkityksen lisäksi olisi selvitettävä koneiden lisävaimentamismahdollisuudet ja periaatteet.
- (5) Suunnitteluohjelmistojen kehittäminen. Nykyaikainen ohjeistus on täydellinen vasta, kun sen käyttämiseen on olemassa Windows-ympäristöön kehitetyt ohjelmistot.

LÄHDELUETTELO

Allen, D. E., Murray, T. M. 1993a. Design criterion for vibrations due to walking. *Engineering Journal*, vol. 30, nro 4, s. 117 - 129.

Allen, D. E., Murray, T. M. 1993b. Vibration of composite floors. Teoksessa: *Proceedings of the Symposium on Structural Engineering in Natural Hazards Mitigation*. Irvine 19 - 21 April 1993. New York: American Society of Civil Engineers (ASCE). S. 1491 - 1496.

Allen, D. E., Rainer, J. H. 1976. Vibration criteria for long-span floors. *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 3, nro 2, s. 165 - 173.

AS 3623. 1993. Domestic metal framing. Standards Australia. 52 s. ISBN 0-7262-831-6-9

Chui, Y. H. 1988. Evaluation of vibrational performance of lightweight wooden floors. Teoksessa: Rafik, Y. I. (ed.) *Proceedings of 1988 International Conference on Timber Engineering*, Seattle 19 - 22 September 1988. Madison: Forest Products Research Society. S. 707 - 715.

CAN/CSA-S16.1. 1994. Steel structures for buildings. Limit states design. Canadian Standards Association. 142 s. ISSN 0317-5669

Dolan, J. E., Skaggs, T. 1994. Designing to reduce floor vibrations. ASAE International Winter Meeting, Atlanta 13 - 16 December 1994. Paper No 944549. 6 s.

ECCS. 1984. Lightweight steel based floor systems for multi-storey buildings. European Convention for Constructional Steelwork. 50 s. (ECCS Publication Nr. 34.)

ECCS. 1996. Lightweight steel framed housing. Technical committee TC 7, Technical working group TWG 7.7. (Draft of ECCS Publication.)

ENV 1993-1-1. 1992. Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1.1: General rules and rules for buildings. European Committee for Standardization. 252 s.

ENV 1995-1-1. 1993. Eurocode 5: Design of timber structures. Part 1.1: General rules and rules for buildings. European Committee for Standardization. 106 s.

Eriksson, P.-E. 1994. Vibration of low-frequency floors - Dynamic forces and response prediction. Göteborg: Chalmers University of Technology. 168 s. + liitt. 88 s. (Doctoral thesis, Publication D 94:3) ISBN 91-7032-953-2

Foschi, R. O., Gupta, A. 1987. Reliability of floors under impact vibration. *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 14, nro 5, s. 683 - 689.

Griffin. M. J. 1990. Handbook of human vibration. London: Academic Press Limited. 988 s. ISBN 0-12-303040-4

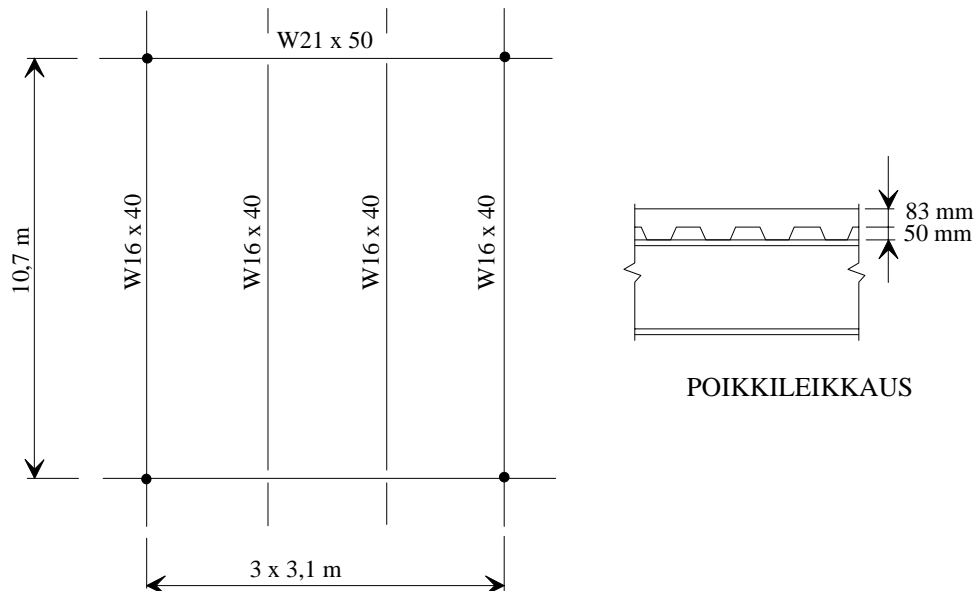
- ISO 2631-2. 1989. Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 2: Continuous and shock-induced vibrations in buildings (1 to 80 Hz). International Organization of Standardization. 18 s.
- ISO 10137. 1992. Bases for the design of structures. Serviceability of buildings against vibration. International Organization of Standardization. 32 s.
- Kalkert, R. E., Dolan, J. D., Woeste, F. E. 1995. Wood-floor vibration design criteria. *Journal of Structural Engineering*, vol. 121, nro 9, s. 1294 - 1297.
- Kortesmaa, M. 1982. Puiset lattiarakenteet. *Rakenteiden mekaniikka*, vol. 15, nro 3, s. 9 - 22.
- Kortesmaa, M. 1995. Puukerrostalon lattian värähtely. *Rakennustekniikka*, vol 51, nro 5, s. 17 - 20.
- Laavola, M. 1990. Kevyiden välipohjien värähtelyt. Diplomityö. Tampere: Tampereen teknillinen korkeakoulu. 92 s. + liitt. 31 s.
- Niemi, Jouko. 1996. Kevyet teräsrakenteiset välipohjat. Diplomityö. Oulu: Oulun yliopisto. 110 s. + liitt. 27 s.
- NRC. 1990. National building code of Canada. National Research Council of Canada. 424 s. + supplement 140 s. ISSN 0700-1207
- Ohlsson, S. 1982. Floor vibrations and human discomfort. Göteborg: Chalmers University of Technology. 203 s. + liitt. 74 s. (Doctoral thesis) ISBN 91-7032-077-2
- Ohlsson, S. 1986. Stiffness criteria and dynamic serviceability of light-weight steel floors. Teoksessa: *Proceedings of 1986 IABSE Colloquium - Thin-walled metal Structures in Buildings, Stockholm June 1986*. Zürich: International Association of Bridge and Structural Engineering. S. 427 - 433. (IABSE Report 99-0387223-2; 49)
- Ohlsson, S. 1988. Springiness and human-induced floor vibrations. A design guide. Stockholm: Swedish Council for Building Research. 141 s. (Publication D12:1988.) ISBN 91-540-4901-6
- Ohlsson, S. V. 1991. Serviceability criteria - especially floor vibration criteria. Teoksessa: *Proceedings of International Timber Research Engineering Conference, London 2 - 5 September 1991*. London: Timber Research and Development Association (TRADA). S. 1.58-1.65.
- Onysko, D. M. 1985. Serviceability criteria for residential floors based on field study of consumer response. Ottawa: Forintek Canada Corporation. 148 s. + liitt. 10 s. (Project No: 03-50-10-008.)
- Onysko, D. M. 1986. Performance criteria for residential floors based on consumer responses. Ottawa: Forintek Canada Corporation. 16 s.

- Onysko, D. M. 1988. Performance and acceptability of wood floors - Forintek studies. Ottawa: Forintek Canada Corporation. 20 s.
- Percival, D. H. 1979. History of L/360. Forest Products Journal, vol. 29, nro 8, s. 26 - 27.
- Smith, I., Chui, Y. H., 1988. Design of lightweight wooden floors to avoid human discomfort. Canadian Journal of Civil Engineering, vol. 15, nro 2, s. 254 - 262.
- Väänänen, H. 1991. Puisten ala- ja välipohjarakenteiden värähtelyjen rajoittaminen. Diplomityö. Espoo: Teknillinen korkeakoulu. 112 s. + liitt. 38 s.
- Weaver, W., Timoschenko, S. P., Young, D. H. 1989. Vibration problems in engineering. New York: John Wiley & Sons. 610 s.
- Wiss, J. F., Parmelee, R. A. 1974. Human perception of transient vibrations. Journal of the structural division, proceedings of ASCE, vol. 100, nro 4, s. 773 - 787.
- Wyatt, T. A. 1989. Design guide on the vibration of floors. Ascot: The Steel Construction Institute. 43 s. (SCI Publication P076.) ISBN 1 870004 34 5

LASKENTAESIMERKKEJÄ

ESIMERKKI 1

Tällä esimerkillä (Allen, D.E., Murray, T.M. 1993. Vibration of composite floors. Teoksessa: Proc. of the Symposium on Structural Engineering in Natural Hazards Mitigation. S. 1491 - 1496.) havainnollistetaan matalataajuuksisten lattioiden laskentamenetelmää. Tehtävänä on tarkistaa, täyttääkö kuvassa 1 esitetty rakenne toimistotiloille asetetut vaatimukset kävelystä aiheutuvien herätteiden suhteen. Betonikansi ja palkit toimivat liittorakenteena. Lattiapalkit ovat jatkuvia, mutta pääkannattimet ovat yksijänteisiä.



Kuva 1. Toimiston välipohjajakonstruktio. Kuvan pilarien välinen ruutu on yksi laajemmasta pohjasta (Allen ja Murray 1993).

Rakennetiedot	Pääkannatinjako	10,7 m
	Lattiapalkkijako	3,1 m
	Pääkannattimet	W21 x 50
	Lattiapalkit	W16 x 40
	Kannen paksuus	83 mm + 50 mm = 133 mm
	Kannen paino	2,0 kN/m ²
	Teräksen kimmokerroin	200 000 N/mm ² (E_s)
	Kevytbetonin kimmokerroin	21 500 N/mm ² ($= E_s/9,3$)

Lattiapalkkien värähtely

Käyttämällä tehollista laatan leveyttä 3,1 m (= lattiapalkkijako), joka on pienempi kuin $0,4 L_j = 0,4 \times 10,7 \text{ m} = 4,3 \text{ m}$, teräksen kimmokertoimen suhteen redusoi-

duksi lattiapalkin jäyhyysmomentiksi saadaan $I_j = 87\,600\text{ cm}^4$. Kunkin lattiapalkin painoksi pituusyksikköä kohden voidaan laskea

$$w = 3,1 \times (0,5 + 2,0 + 0,2 + 0,58 / 3,0) = 9,0\text{ kN / m} \quad (1)$$

joka sisältää 0,5 kN liikkuvaa kuormaa ja 0,20 kN kiinteitä varusteita. Taipuma lasketaan lausekkeesta

$$\Delta_j = \frac{5wL_j^4}{384E_s I_j} = \frac{5 \times 9 \times 10700^4}{384 \times 200 \times 10^3 \times 87,6 \times 10^7} = 8,8\text{ mm} \quad (2)$$

Palkin ominaistajuudeksi saadaan

$$f_j = 0,18 \sqrt{\frac{g}{\Delta_i}} = 0,18 \sqrt{\frac{9810}{8,8}} = 6,0\text{ Hz} \quad (3)$$

Käyttämällä laatan keskimääräistä paksuutta 108 mm, teräksen kimmokertoimen suhteen redusoitu laatan jäyhyysmomentti on

$$D_s = \frac{100 \times 10,8^3}{12} \frac{1}{9,3} = 1130\text{ cm}^4 / \text{m} \quad (4)$$

Lattiapalkin ja teholliseen laattakaistan muodostaman palkin jäyhyysmomentti on (lattiapalkkijako 3,1 m)

$$D_j = \frac{87600}{3,1} = 28\,300\text{ cm}^4 / \text{m} \quad (5)$$

Teholliseksi laattakaistan leveydeksi saadaan

$$B_j = 2,0 (D_s / D_j)^{1/4} L_j = 2,0 \times (1130 / 28\,300)^{1/4} \times 10,7 = 9,57\text{ m} \quad (6)$$

Koska välipohjarakenne käsittää ainakin yhden kentän tarkasteltavan kentän molemmin puolin, lattian leveys on vähintään $3 \times 9,3\text{ m} = 27,9\text{ m}$ ja koska $2/3 \times 27,9 = 18,6\text{ m} > 9,57\text{ m}$, tehollisena leveytenä voidaan käyttää arvoa 9,57 m. Käyttämällä korotettua kerrointa 1,5, jolla otetaan huomioon välipohjan jatkuvuus, teholliseksi painoksi saadaan

$$W_j = 1,5 w B_j L_j = 1,5 \times (9,0 / 3,1) \times 9,57 \times 10,7 = 446\text{ kN} \quad (7)$$

Pääkannattimien värähtely

Käyttämällä tehollista laatan leveyttä $0,4 L_j = 0,4 \times 9,3\text{ m} = 3,72\text{ m}$, teräksen kimmokertoimen suhteen redusoiduksi pääpalkin jäyhyysmomentiksi saadaan $I_g = 136\,500\text{ cm}^4$. Edelleen saadaan

$$w = 2,5 \times (9,0 \times 10,7) / 9,3 + 0,73 = 26,6\text{ kNm / m} \quad (8)$$

$$\Delta_g = \frac{5wL_g^4}{384E_s I_g} = \frac{5 \times 26,6 \times 9300^4}{384 \times 200 \times 10^3 \times 136,5 \times 10^7} = 9,5 \text{ mm ja} \quad (9)$$

$$f_g = 0,18 \sqrt{\frac{g}{\Delta_g}} = 0,18 \sqrt{\frac{9810}{9,5}} = 5,8 \text{ Hz} \quad (10)$$

Kun $D_j = 28\,300 \text{ cm}^4/\text{m}$ ja $D_g = 136\,500 / 10,7 = 12\,800 \text{ cm}^4/\text{m}$, tehollinen leveys

$$B_g = 1,8 (D_j / D_g)^{1/4} L_g = 1,8 \times (28\,300 / 12\,800)^{1/4} \times 9,3 = 20,4 \text{ m} \quad (11)$$

Koska se on pienempi kuin $2/3 (3 \times 10,7) = 21,4 \text{ m}$, teholliseksi painoksi saadaan

$$W_g = w B_g L_g = (26,6 / 10,7) \times 20,4 \times 9,3 = 472 \text{ kN} \quad (12)$$

Lattiapalkkien ja pääkannattimien värähtelyn yhdistäminen

Tässä tapauksessa pääkannattimen jänneväli $L_g = 9,3 \text{ m}$ on pienempi kuin lattiapalkkien tehollinen leveys $B_j = 9,57 \text{ m}$, joten pääkannattimen taipuma on ensin pienennettävä arvoon

$$\Delta'_g = \frac{L_g}{B_j} \Delta_g = \frac{9,3}{9,57} \times 9,5 = 9,2 \text{ mm} \quad (13)$$

Tämän jälkeen voidaan laskea koko välipohjarakenteen värähtelyn alin ominaistaajuus ja tehollinen paino

$$f_0 \approx 0,18 \sqrt{\frac{g}{\Delta_j + \Delta'_g}} = 0,18 \sqrt{\frac{9810}{8,8 + 9,2}} = 4,2 \text{ Hz ja} \quad (14)$$

$$W = \frac{\Delta_j}{\Delta_j + \Delta'_g} W_j + \frac{\Delta'_g}{\Delta_j + \Delta'_g} W_g = \frac{8,8}{8,8 + 9,2} \times 446 + \frac{9,2}{8,8 + 9,2} \times 472 = 218 + 241 = 459 \text{ kN} \quad (15)$$

Tulosten tarkastelu

Tarkasteltavalle toimistotilalle $\gamma = 0,03$ ja $K = 58 \text{ kN}$, tällöin ehdon

$$(\gamma W = 0,03 \times 459 = 13,8 \text{ kN}) \geq (K / e^{0,35 f_0} = 58 / e^{0,35 \times 4,2} = 13,3 \text{ kN}) \quad (16)$$

tai ehdon

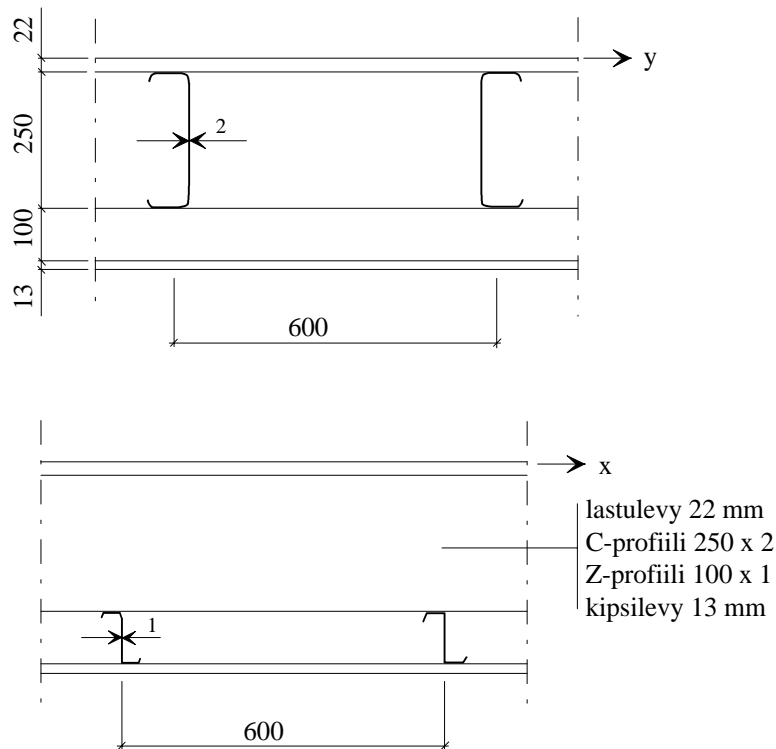
$$[f_0 = 4,2 \text{ Hz}] \geq [2,86 \ln(K/\gamma W) = 2,86 \ln(58 / (0,03 \times 459)) = 4,1 \text{ Hz}] \quad (17)$$

toteutuminen osoittavat, että välipohja täyttää sille asetetut vaatimukset.

ESIMERKKI 2

Tämä esimerkki (Ohlsson, S. 1988. *Springiness and human-induced floor vibrations. A design guide*. Tukholma: Swedish Council for Building Research, 141 s.) kuvaa korkeataajuuksisen lattian mitoitusta kävelykuormituksille. Tehtävänä on tarkistaa, täyttääkö kuvassa 2 esitetty rakenne asuintiloille asetetut vaatimukset. Lastulevy on kiinnitetty C-profiiliin itseporautuvilla ruuveilla.

Rakennetiedot	Lastulevy	$t = 22 \text{ mm}$
	C-profiili	$l = 4800 \text{ mm},$ $h = 250 \text{ ja } t = 2 \text{ mm}$ $I_C = 696 \text{ cm}^4$
	Z-profiili	$b = 6000 \text{ mm},$ $h = 100 \text{ mm ja } t = 1 \text{ mm}$ $I_Z = 282 \text{ cm}^4$
	Kipsilevy	$h = 13 \text{ mm}$



Kuva 2. Asuintalon välipohjarakenteen pituus- ja poikittaisleikkaus (Ohlsson 1988).

Ominaisraajuuden laskenta

Lattian pituusjäykkyys muodostuu C-profiilin jäykkyydestä

$$(EI)_l = \frac{EI_C}{0,6 \text{ m}} = \frac{210 \cdot 10^9 \cdot 696 \cdot 10^{-8}}{0,6} = 2436 \text{ kNm}^2 / \text{m} \quad (1)$$

Välipohjan massa neliometriä kohden sisältää lastulevyn, C- ja Z-profiilin ja kipsilevyn massan:

$$m = 15,4 + 6,0 / 0,6 + 1,6 / 0,6 + 10 = 38,1 \text{ kg} / \text{m}^2 \quad (2)$$

Alin ominaistajuus

$$f_0 = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}} = \frac{\pi}{2 \cdot 4,8^2} \sqrt{\frac{2436 \cdot 10^3}{38,1}} = 17,2 \text{ Hz} \quad (3)$$

Ominaistajuus on suurempi kuin 8 Hz, joten lattiaa pitää tarkastella korkeataajuuksisena välipohjana.

Värähtelyn nopeuden tarkastus

Lattian poikittaisjäykkyys muodostuu Z-profiilin, lastulevyn ja kehävaikutuksen summasta:

$$(EI)_b = 210 \cdot 10^9 \cdot 28,2 \cdot 10^{-8} / 0,6 + 2,1 \cdot 10^3 + 2,1 \cdot 10^3 = 103 \text{ kNm}^2 / \text{m} \quad (4)$$

Nopeusvaste v_{\max} lasketaan lausekkeista

$$n_{40} = \left\langle \left[\left(\frac{40}{f_0} \right)^2 - 1 \right] \left(\frac{b}{l} \right)^4 \left[\frac{(EI)_l}{(EI)_b} \right] \right\rangle^{1/4} = \left\langle \left[\left(\frac{40}{17,2} \right)^2 - 1 \right] \left(\frac{6}{4,8} \right)^4 \left[\frac{2436}{103} \right] \right\rangle^{1/4} = 3,99 \quad (5)$$

$$v_{\max} = \frac{4(0,4 + 0,60n_{40})}{mbl + 200} = \frac{4(0,4 + 0,60 \cdot 3,99)}{38,1 \cdot 6 \cdot 4,8 + 200} = 8,61 \cdot 10^{-3} \text{ m} / \text{s}^2 \quad (6)$$

Vaimennukseksi oletetaan tässä $\zeta = 0,8 \%$, jolloin sallituksi nopeudeksi saadaan

$$v_{\text{sall}} = 100^{(f_0 \zeta - 1)} = 100^{(17,2 \cdot 0,008 - 1)} = 18,8 \cdot 10^{-3} \text{ m} / \text{s}^2 \quad (7)$$

Koska laskettu nopeus 8,6 mm/s on selvästi pienempi kuin sallittu arvo 18,8 mm/s, rakenne täyttää värähtelyn nopeudelle asetetun vaatimuksen.

Pistevoiman 1 kN aiheuttaman taipuman tarkastus

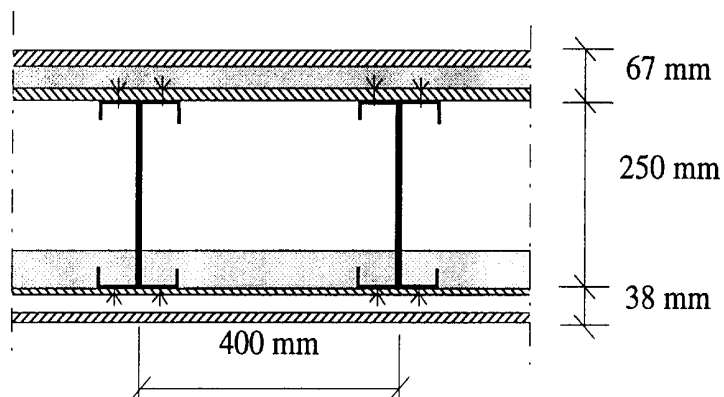
Oletetaan aluksi yhden C-profiilin kantavan yksinään koko pistekuorman. Tällöin taipuma on

$$\delta_{\max} = \frac{Fl^3}{48EI_C} = \frac{1000 \cdot 4,8^3}{48 \cdot 210 \cdot 10^9 \cdot 696 \cdot 10^{-8}} = 1,58 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (8)$$

Koska taipuma on suurempi kuin 1,5 mm, taipuma on laskettava tarkemmalla menetelmällä. Arinamallilla taipumaksi saadaan 0,50 mm, joka on huomattavasti raja-arvoa 1,5 mm pienempi.

ESIMERKKI 3

Tässä esimerkissä verrataan lattialevyn ja lattipalkin mahdollista liittovaikutuksen merkitystä kävelykuormasta aiheutuvaan lattian värähtelyyn. Ensimmäisessä tapauksessa (1) lattialevyn ja palkin välillä ei oleteta olevan liittovaikutusta. Toisessa tapauksessa (2) levyn ja lattiapalkin liitos oletetaan täydelliseksi. Lattia oletetaan suorakaiteen muotoiseksi, lattian kaikkien reunojen oletetaan tukeutuvan jäykkiin seinärakenteisiin, rakenne on katkaistu väliseinien kohdalta ja lattiapalkit ovat lattian pituussuuntaiset.



Kuva 3. Tarkasteltava välipohjaleikkaus.

Rakennetiedot

Lastulevy $t_1 := 22 \text{ mm}$

Mineraalivilla

Kuusivaneri $t_2 := 15 \text{ mm}$

C-profiilit $h := 250 \text{ mm}$

(pareittain) $b_f := 65 \text{ mm}$

(6kpl / 1200 mm) $c := 20 \text{ mm}$

$t := 2 \text{ mm}$

Tuulensuojakipsilevy

Joustoranka

Kipsilevy

Teräksen kimmokerroin $E := 210 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$

Vanerin kimmokerroin

- puristus pituussuunnassa $E_1 := 7.2 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$

- taivutus pituussuunnassa $E_{b,l} := 9.5 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$

- taivutus poikittaissuunnassa $E_{b,t} := 2.5 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$

Lastulevyn kimmokerroin
taivutukselle

$$E_c := 1.8 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$$

Lattian pituus

$$l := 7.4 \text{ m}$$

Lattian leveys

$$b := 6.0 \text{ m}$$

Lattian massa

$$m := 90 \text{ kg/m}^2$$

Alimman ominaistajuuden laskenta

Ilman liittovaikutusta

$$I_C := \frac{t}{12} \cdot (h^3 + 6 \cdot b_f \cdot h^2 + 6 \cdot c \cdot h^2 - 12 \cdot h \cdot c^2 + 8 \cdot c^3)$$

$$I_C = 7.727 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$EI_{l_1} := E \cdot \frac{6 \cdot I_C}{1.2} \cdot 10^{-12}$$

$$EI_{l_1} = 8.114 \cdot 10^6 \text{ Nm}^2/\text{m}$$

$$f_{o_1} := \frac{\pi}{2 \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{EI_{l_1}}{m}} \quad f_{o_1} = 8.6 \text{ Hz}$$

Liittovaikutuksen kanssa

Koska C-profiiliparien välinen etäisyys on vain 400 mm, pintalevy voidaan katsoa teholliseksi koko leveydeltään.

$$A_C := (h + 2 \cdot b_f + 2 \cdot c) \quad t_{red} := \frac{E_l}{E} \cdot t_2 \quad A_C = 420 \text{ mm}^2$$

$$t_{red} = 0.514 \text{ mm}$$

$$e_G := \frac{6 \cdot A_C \cdot \left(\frac{h}{2} + \frac{t_2}{2} \right)}{6 \cdot A_C + 1200 \cdot t_{red}}$$

$$e_G = 106.4 \text{ mm}$$

$$EI_{l_2} := E \cdot \frac{6 \cdot I_C + 6 \cdot A_C \cdot \left(\frac{h}{2} + \frac{t_2}{2} - e_G \right)^2 + 1200 \cdot t_{red} \cdot e_G^2}{1.2} \cdot 10^{-12}$$

$$EI_{l_2} = 9.637 \cdot 10^6 \text{ Nm}^2/\text{m}$$

$$f_{o_2} := \frac{\pi}{2 \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{EI_{l_2}}{m}} \quad f_{o_2} = 9.4 \text{ Hz}$$

Sekä ilman liittovaikutusta että liittovaikutuksen kanssa ominaistajuus on suurempi kuin 8 Hz, joten lattiaa tulee tarkastella molemmissa tapauksissa korkeataajuuksisena välipohjana.

Värähtelyn nopeuden tarkastus

Lattian poikittaisjäykkyys lasketaan muodostuvan lastulevyn ja vanerin jäykkyyksien summana.

$$EI_{b,t} := \frac{E_{c,t} I^3 + E_{b,t} t^3}{12} \cdot 10^{-9} \quad EI_{b,t} = 2.3 \cdot 10^3 \quad \text{Nm}^2/\text{m}$$

Nopeusvaste v_{max} lasketaan lausekkeista

$$i := 1..2 \quad n_{40_i} := \left[\left[\left(\frac{40}{f_{o_i}} \right)^2 - 1 \right] \cdot \left(\frac{b}{l} \right)^4 \cdot \left(\frac{EI_{l_i}}{EI_{b,t}} \right) \right]^{0.25}$$
$$n_{40_1} = 13.3$$
$$n_{40_2} = 13.3$$
$$v_{max_i} := \frac{4 \cdot (0.4 + 0.6 \cdot n_{40_i})}{m \cdot b \cdot l + 200}$$
$$v_{max_1} = 7.99 \cdot 10^{-3} \quad \text{m/s}$$
$$v_{max_2} = 7.98 \cdot 10^{-3} \quad \text{m/s}$$

Vaimennukseksi oletetaan tässä 1 %, jolloin sallituksi nopeudeksi saadaan

$$v_{sall_i} := 100^{(f_{o_i} \cdot 0.01 - 1)}$$
$$v_{sall_1} = 0.0149 \quad \text{m/s}$$
$$v_{sall_2} = 0.0154 \quad \text{m/s}$$

Koska lasketut suurimmat nopeudet ovat pienemmät kuin sallitut nopeudet, rakenne täyttää sekä liittovaikutuksen kanssa että ilman sitä värähtelyn nopeudelle asetetun vaatimuksen.

Pistevoiman 1 kN aiheuttaman taipuman tarkistus

Lastulevyn ja vanerin taipuminen pistekuorman alla

Oletetaan aluksi yhden C-profiiliparin kantavan yksinään koko pistekuorman ilman poikittaisjäykkyyden kuormitusta tasoittavaa vaikutusta.

$$F := 1000 \quad \text{N} \quad \delta_{max_i} := \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot 0.4 \cdot EI_{l_i}}$$
$$\delta_{max_1} = 2.6 \cdot 10^{-3} \quad \text{m}$$
$$\delta_{max_2} = 2.2 \cdot 10^{-3} \quad \text{m}$$

Koska taipuma on sekä ilman liittovaikutusta että liittovaikutuksen kanssa suurempi kuin 1,5 mm, taipuma kannattaa arvioida tarkemmalla menetelmällä, joka ottaa huomioon myös poikittaisen jäykkyyden pistekuormitusta tasaavan vaikutuksen.

Lähteen 'Kortesmaa, M. 1981 (luonnos). Puurakenteisten ala- ja välipohjien toimintavaatimukset ja rakennratkaisut. Espoo: VTT, Rakennetekniikan laboratorio. 80 s.' mukaan saadaan reunoiltaan niveltuetun ortotrooppisen suorakaidelaatan suurin taipuma lausekkeista

$$\beta_y := \frac{EI_{b,t}}{EI_{l_2}} \quad \beta_y = 2.39 \cdot 10^{-4}$$

$$\alpha := \frac{b}{l} \quad \alpha = 0.811$$

$$\gamma := \frac{4}{\pi^4 \cdot \alpha} \cdot \sum_{m=1}^{25} \sum_{n=1}^{25} \frac{1}{(2 \cdot m - 1)^4 + \beta_y \cdot \left(\frac{2 \cdot n - 1}{\alpha}\right)^4} \quad \gamma = 0.192$$

Suurimmaksi taipumaksi saadaan

$$\delta_{max_i} := \gamma \frac{F \cdot l^2}{EI_{l_i}} \quad \delta_{max_1} = 1.3 \cdot 10^{-3} \quad \text{m}$$

$$\delta_{max_2} = 1.09 \cdot 10^{-3} \quad \text{m}$$

Koska tarkemmin laskettu taipuma on sekä ilman liittovaikutusta että liittovaikutuksen kanssa pienempi kuin 1,5 mm, rakenteen jäykkyys täyttää välipohjan notkumiselle asetetun vaatimuksen. Lastulevyn ja vanerin yhteisjäykkyys pituussuunnassa on

$$EI_{b,l} := \frac{E \cdot c \cdot t \cdot l^3 + E \cdot b \cdot l \cdot t^3}{12} \cdot 10^{-9} \quad EI_{b,l} = 4.269 \cdot 10^3 \quad \text{Nm}^2/\text{m}$$

Arvioidaan vielä vertailun vuoksi myös levykenttien taipumaa lattiapalkkien välissä. Lähteen 'Kortesmaa, M. 1982. Puiset lattiarakenteet. Rakenteiden mekaniikka, vol. 15, nro 3, s. 17 - 20' mukaan saadaan kaksiaukkoisen jatkuvan isotrooppisen laatan, jonka sivusuhte on 4, suurin taipuma saadaan seuraavasti

$$\beta_y := \frac{EI_{b,l}}{EI_{b,t}} \quad \beta_y = 1.86$$

$$\gamma := 0.017 \quad (\text{extrapoloitu lähteen kuvasta 4})$$

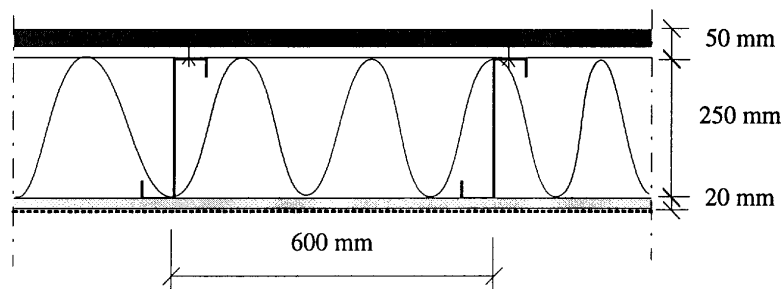
$$a := 0.2 \quad \text{m}$$

$$w_{max,p} := \gamma \frac{F \cdot a^2}{EI_{b,t}} \quad w_{max,p} = 2.96 \cdot 10^{-4} \quad \text{m}$$

Mikäli tämä lasketaan mukaan kokonaistaipumaan, notkumiselle asetettu vaatimus ei täyty. Usein kuitenkin laatan taipumisen merkitys jätetään ottamatta huomioon, jos sen vaikutusalue on niin pieni, että sen aiheuttama häiriö vaikuttaa vain itse kävelijään.

ESIMERKKI 4

Tässä esimerkissä tutkitaan betonilaatasta ja Z-profiileista muodostuvan liittolaattalattian värähtelyominaisuuksia (kuva 4). Lattia oletetaan suorakaiteen muotoiseksi, lattian kaikkien reunojen oletetaan tukeutuvan jäykkiin seinärakenteisiin, rakenne on katkaistu väliseinien kohdalta ja lattiapalkit ovat lattian pituussuunnassa.



Kuva 4. Tarkasteltava välipohjaleikkaus.

Rakennetiedot

Betonialaatta (K30)	$h_1 := 50 \text{ mm}$
Profiilipelti ($t = 0,6 \text{ mm}$)	$h_2 := 20 \text{ mm}$
Z-profiilit	$h := 250 \text{ mm}$
	$b_f := 65 \text{ mm}$
	$c := 20 \text{ mm}$
	$t := 1,5 \text{ mm}$
Profiiliväli	$a := 600 \text{ mm}$
Mineraalivilla	
Puuranka	
Perferoitu pelti	
Teräksen kimmokerroin	$E_s := 210 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$
Betonin (K30) kimmokerroin	$E_{c,l} := 1,35 \cdot 5000 \cdot 10^6 \cdot \sqrt{30}$
- pituussuunnassa	$E_{c,l} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$
- poikittaissuunnassa*)	$E_{c,t} := 0,5 \cdot E_{c,l}$
Lattian pituus	$l := 6,0 \text{ m}$

Lattian leveys $b := 7.2 \text{ m}$
 Lattian massa $m := 135 \text{ kg/m}^2$

*) Kertoimella 0,5 on arvioitu laatan taivutushalkeamien merkitystä

Alimman ominaistajuuden laskenta

$$A_C := (h + 2 \cdot b_f + 2 \cdot c) \quad A_C = 420 \text{ mm}^2$$

$$I_C := \frac{t}{12} \cdot (h^3 + 6 \cdot b_f h^2 + 6 \cdot c \cdot h^2 - 12 \cdot h \cdot c^2 + 8 \cdot c^3) \quad I_C = 5.796 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$t_{red} := \frac{E_{c,l}}{E_s} \cdot h_{ave} \quad h_{ave} := h_l - \frac{h_2}{2}$$

$$t_{red} = 7.042 \text{ mm}$$

$$e_G := \frac{A_C \cdot \left(\frac{h}{2} + \frac{h_2}{2} + \frac{h_{ave}}{2} \right)}{A_C + a \cdot t_{red}} \quad e_G = 14 \text{ mm}$$

$$EI_l := \frac{E_s \cdot \left[I_C + A_C \cdot \left(\frac{h}{2} + \frac{h_2}{2} + \frac{h_{ave}}{2} - e_G \right)^2 \right] + E_{c,l} \cdot \left(\frac{a \cdot h_{ave}^3}{12} + a \cdot h_{ave} \cdot e_G^2 \right)}{a} \cdot 10^{-9}$$

$$f_o := \frac{\pi}{2 \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{EI_l}{m}} \quad f_o = 8.8 \text{ Hz} \quad EI_l = 5.438 \cdot 10^6 \text{ Nm}^2/\text{m}$$

Koska ominaistajuus on suurempi kuin 8 Hz, lattiaa tulee tarkastella korkeataajuuksisena välipohjana.

Värähtelynopeuden tarkastus

Lattian poikittaisjäykkyys on laatan keskimääräisen korkeuden mukaan

$$EI_{b,t} := \frac{E_{c,t} \cdot h_{ave}^3}{12} \cdot 10^{-9} \quad EI_{b,t} = 9.859 \cdot 10^4 \text{ Nm}^2/\text{m}$$

Nopeusvaste v_{max} lasketaan lausekkeista

$$n_{40} := \left[\left[\left(\frac{40}{f_o} \right)^2 - 1 \right] \cdot \left(\frac{b}{l} \right)^4 \cdot \left(\frac{EI_l}{EI_{b,t}} \right) \right]^{0.25} \quad n_{40} = 6.9$$

$$v_{max} := \frac{4 \cdot (0.4 + 0.6 \cdot n \cdot 40)}{m \cdot b \cdot l + 200} \quad v_{max} = 3.01 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$$

Vaimennukseksi oletetaan tässä 1 %, jolloin sallituksi nopeudeksi saadaan

$$v_{sall} := 100^{(f_o \cdot 0.01 - 1)} \quad v_{sall} = 0.015 \quad \text{m/s}$$

Koska laskettu nopeus on pienempi kuin sallittu nopeus, rakenne täyttää värähtelyn nopeudelle asetetun vaatimuksen.

Pistevoiman 1 kN aiheuttaman taipuman tarkistus

Oletetaan aluksi yhden C-profiilin kantavan yksinään koko pistekuorman ilman poikittaisjäykkyyden kuormitusta tasoittavaa vaikutusta.

$$F := 1000 \text{ N} \quad \delta_{max} := \frac{3 \cdot F \cdot l^3}{48 \cdot a \cdot 10^{-3} \cdot EI_l} \quad \delta_{max} = 4.1 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Koska taipuma on suurempi kuin 1,5 mm, taipuma kannattaa arvioida tarkemmalla menetelmällä, joka ottaa huomioon myös poikittaisen jäykkyyden pistekuormitusta tasaavan vaikutuksen.

Lähteen 'Korteesmaa, M. 1981 (luonnos). Puurakenteisten ala- ja välipohjien toimintavaatimukset ja rakenneratkaisut. Espoo: VTT, Rakennetekniikan laboratorio. 80 s.' mukaan saadaan reunoiltaan niveltuetun ortotrooppisen suorakaide-laatan suurin taipuma lausekkeista

$$\beta_y := \frac{EI_{b,t}}{EI_l} \quad \beta_y = 0.018$$

$$\alpha := \frac{b}{l} \quad \alpha = 1.2$$

$$\gamma := \frac{4}{\pi^4 \cdot \alpha} \cdot \sum_{m=1}^{10} \sum_{n=1}^{10} \frac{1}{(2 \cdot m - 1)^4 + \beta_y \cdot \left(\frac{2 \cdot n - 1}{\alpha}\right)^4} \quad \gamma = 0.065$$

Suurimmaksi taipumaksi saadaan

$$\delta_{max} := \gamma \frac{F \cdot l^2}{EI_l} \quad \delta_{max} = 4.3 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

Koska tarkemmin laskettu taipuma on pienempi kuin 1,5 mm, rakenteen jäykkyys täyttää välipohjan notkumiselle asetetun vaatimuksen.

ESIMERKKI 5

Tässä esimerkissä tarkastellaan esimerkin 4 (kuva 4) betonilaatata ja Z-profiileista muodostuvan liittolaattalattian värähtelyominaisuuksia, kun jänneväli kasvatetaan 6,0 metristä 6,3 metriin, jolloin lattiaa on tarkasteltava matalan taajuuden välipohjana.

Lattian värähtelyn ominaistajuus

Lattiapalkkijako 0.6 m on pienempi kuin $0,4l = 2,5$ m, joten palkkiin liittyvänä laatan tehollisena osuutena voidaan käyttää koko palkkiväliä. Teräksen kimmokertoimen redusoiduksi lattiapalkin jäyhyysmomentiksi saadaan (EI_l esimerkistä 4)

$$I_j := \frac{EI_l}{E_s} \cdot a \quad I_j = 1.55 \cdot 10^{-5} \quad \text{m}^4 \quad a := 0.6 \quad \text{m}$$
$$L_j := l + 0.3 \quad L_j = 6.3 \quad \text{m}$$
$$g := 9.81 \quad \text{m/s}^2$$

Lattiapalkin paino pituusyksikköä kohden on

$$w_1 := a \cdot g \cdot m \quad w_1 = 795 \quad \text{N/m}$$

Jos painoon sisällytetään ohjeessa ehdotettu 500 N/m^2 liikkuvan kuorman osuus, painoksi saadaan

$$w_2 := w_1 + a \cdot 500 \quad w_2 = 1095 \quad \text{N/m}$$

Omasta painosta aiheutuva staattinen taipuma on

$$i := 1..2 \quad \Delta_i := \frac{5 \cdot w_i \cdot L_j^4}{384 \cdot E_s \cdot I_j} \quad \Delta_1 = 5 \cdot 10^{-3} \quad \text{m}$$
$$\Delta_2 = 6.88 \cdot 10^{-3} \quad \text{m}$$

Palkin ominaistajuudeksi saadaan

$$f_{o_i} := 0.18 \cdot \sqrt{\frac{g}{\Delta_i}} \quad f_{o_1} = 7.98 \quad \text{Hz}$$
$$f_{o_2} = 6.8 \quad \text{Hz}$$

Palkin värähtelyssä mukana oleva lattian paino

Teräksen kimmokertoimen suhteen redusoitu laatan jäyhyysmomentti pituusyksikköä kohden lattian poikittaissuunnassa on ($EI_{b,t}$ esimerkistä 4)

$$D_s := \frac{EI_{b,t}}{E_s} \quad D_s = 4.69 \cdot 10^{-7} \quad \text{m}^4/\text{m}$$

Teräksen kimmokertoimen suhteen redusoitu lattian jäyhyysmomentti lattian pituus-suunnassa on

$$D_j := \frac{I_j}{a} \quad D_j = 2.59 \cdot 10^{-5} \quad \text{m}^4/\text{m}$$

Teholliseksi laattakaistan leveydeksi saadaan

$$B_j := 2 \cdot \left(\frac{D_s}{D_j} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot L_j \quad B_j = 4.62 \quad \text{m}$$

Tätä arvoa voidaan käyttää tehollisena leveytenä, koska sen arvo on pienempi kuin 4.8 m, joka on 2/3 lattian leveydestä. Värähtelyssä mukana olevaksi lattian teholliseksi painoksi saadaan

$$W_{j_i} := \frac{w_i}{a} \cdot B_j \cdot L_j \quad W_{j_1} = 3.858 \cdot 10^4 \quad \text{N}$$

$$W_{j_2} = 5.314 \cdot 10^4 \quad \text{N}$$

Tulosten tarkastelu

Jos vaimennukseksi oletetaan $\gamma := 0.02$ ja $K := 58 \cdot 10^3 \text{ N}$, niin

$$\frac{\gamma W_{j_i}}{\frac{7.72 \cdot 10^2}{1.06 \cdot 10^3} \text{ N}} \ll \frac{K \cdot e^{-0.35 \cdot f_{o_i}}}{\frac{3.56 \cdot 10^3}{5.37 \cdot 10^3} \text{ N}} \ll 1$$

$$\frac{\gamma W_{j_i}}{\frac{7.72 \cdot 10^2}{1.06 \cdot 10^3} \text{ N}} \ll \frac{K \cdot e^{-0.35 \cdot f_{o_i}}}{\frac{0.217}{0.198}} \ll 1$$

joten välipohja ei täytä likimainkaan asuin- ja toimistotiloille asetettua vaatimusta. Sillä, sisällytetäänkö välipohjan painoon ohjeessa ehdotettu liikkuvan kuorman osuus 500 N/m^2 on pieni, vain noin 10 %:n vaikutus lopputulokseen.

Kyseinen välipohja täyttäisi ainoastaan jalankulkusilloille asetetut vaatimukset, jolloin

$$K := 8 \cdot 10^3 \text{ N}$$

$$\frac{\gamma W_{j_i}}{\frac{7.72 \cdot 10^2}{1.06 \cdot 10^3} \text{ N}} > \frac{K \cdot e^{-0.35 \cdot f_{o_i}}}{\frac{4.9 \cdot 10^2}{7.41 \cdot 10^2} \text{ N}} > 1$$

$$\frac{\gamma W_{j_i}}{\frac{7.72 \cdot 10^2}{1.06 \cdot 10^3} \text{ N}} > \frac{K \cdot e^{-0.35 \cdot f_{o_i}}}{\frac{1.573}{1.434}} > 1$$