

KELLUVIEN LAATTOJEN ASKELÄÄNENERISTÄVYYDEN ANALYYTTINEN LASKENTA

Ville Kovalainen, Jesse Lietzén, Mikko Kylliäinen

A-Insinöörit
etunimi.sukunimi@ains.fi

Tiivistelmä

Perinteisesti kelluvan laatan askelääneneristävyysparannus on laskettu käyttämällä yksinkertaisia malleja, jotka kuvaavat joko lokaalisti tai resonoivasti käyttäytyvää laattaa. Alkuperäiset mallit perustuvat Cremerin (1952) ja Vérin (1971) teorioihin, jotka olettavat kantavan rakenteen olevan jäykkä massiivilaatta ja eristekerroksen toimivan ideaalisena jousena. Malleja ei ole määritetty kelluvan laatan ominaistajuudella, joka tunnetusti on askelääneneristävyysparannuksen kannalta ratkaiseva taajuusalue etenkin, kun ääniympäristöasetus 796/2017 laajensi mitattavaa taajuusaluetta 50 Hz asti. Toisaalta varsinkin kevytrakenteisilla välipohjilla voidaan havaita askelääneneristävyysparannusta myös ominaistajuuden alapuolella. Gudmundsson (1984) jatkoi kelluvan laatan mallien kehittämistä ja käsitteli aiempien teorioiden vaille huomiota jättämiä ongelmakohtia. Gudmundsson otti mallissaan huomioon rakenteen reunaehdot ja eristekerroksessa kulkevan taivutusaallon. Hän kuitenkin teki yksinkertaistuksia sekä laskentamenetelmissä että niissä käytettävissä lähtöarvoissa, millä arvioidaan olevan vaikutusta tuloksiin. Tässä artikkelissa tutkitaan Gudmundssonin mallin käyttäytymistä erilaisilla kelluvilla laatoilla ja välipohjatyypeillä. Erityisesti tutkitaan mallin käyttäytymistä kevyen välipohjan tapauksessa.

1 JOHDANTO

Kelluvan laatan tarkoitus on parantaa välipohjan askelääneneristävyyttä vähentämällä kantavaan rakenteeseen kohdistuvaa askeläänitehoa. Kelluva lattia koostuu joustavasta eristekerroksesta ja sen päälle asennetusta pintalaatasta. Eristekerros on tyypillisesti mineraalivillaa tai EPS-eristettä. Pintalaattana taas voi toimia esimerkiksi betoni- tai tasoitevalu tai rakennuslevykerros. Myös parkettia joustavine alusmateriaaleineen voidaan pitää kelluvana rakenteena.

Kelluvan laatan vaikutusta välipohjan askelääneneristävyyteen kuvaa kelluvan rakenteen askelääneneristävyysparannusvaikutus (ΔL). Tämä taajuudesta riippuva parannusvaikutus määritellään kelluvan laatan kykynä alentaa rakenteen askeläänitasoa verrattuna päällystämättömään kantavaan rakenteeseen. Standardien mukaan ΔL voidaan määrittää laboratoriomittauksin käyttäen äänilähteenä askelääninikojetta [1] tai laskennallisesti [2]. Laboratoriomittaukset tehdään tyypillisesti vertailubetonivälipohjalla, jolloin tuloksia ei välttämättä voi suoraan soveltaa puuvälipohjien askelääneneristävyysparannukseen. Koska



© 2019 Ville Kovalainen, Jesse Lietzén ja Mikko Kylliäinen. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Ei sovitettu –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

laboratoriomittaukset ovat usein työläitä ja kalliita, parannusvaikutuksen laskennallinen tarkastelu on houkuttelevaa.

Perinteisesti kelluvan laatan askelääneneristävyuden parannus on laskettu käyttämällä yksinkertaisia malleja, jotka kuvaavat joko lokaalisti tai resonoivasti käyttäytyvää laattaa. Alkuperäiset ja standardissa ISO 12354-2 [2] esitetyt mallit perustuvat Cremerin [3] ja Vérin [4] teorioihin, jotka olettavat kantavan rakenteen olevan jäykkä massiivilaatta ja eristekerroksen toimivan ideaalisena jousena. Näistä Cremerin teoriaan perustuva malli lokaalisti käyttäytyvälle laatalle olettaa parannusvaikutuksen ΔL , taajuuden f ja kelluvan laatan ominaistajuuden f_0 välille yhteyden $\Delta L = 40 \log(f/f_0)$. Resonoivasti käyttäytyvän laatan parannusvaikutus taas määritellään $\Delta L = 30 \log(f/f_0)$. Näistä resonoivan laatan mallin mukainen parannusvaikutus on standardin [2] mukaan tyypillisesti varmalla puolella oleva alaraja-arvio [2].

Perinteisiä malleja ei ole määritelty kelluvan laatan ominaistajuudella, joka tunnetusti on askelääneneristävyuden kannalta ratkaiseva taajuusalue etenkin, kun ääniympäristöasetus 796/2017 [5] laajensi mitattavaa taajuusaluetta 50 Hz asti. Kelluvan laatan parannusvaikutus on ominaistajuuden alueella usein negatiivinen, jolloin kelluva rakenne vahvistaa askeläänikojeen aiheuttamaa askeläänitasoa. Toisaalta varsinkin kevytrakenteisilla välipohjilla voidaan havaita askelääneneristävyuden parannusta myös ominaistajuuden alapuolella [6]. Yksi mallien ongelmista on myös se, että usein ei voida etukäteen tietää, toimiiko kelluva laatta lokaalisti tai resonoivasti. Jos parannusvaikutusta arvioidaan aina resonoivasti käyttäytyvänä, moni lokaalisti käyttäytyvä rakenne ylimitoitetaan. Tämä voi johtaa tarpeettoman kalliisiin rakenneratkaisuihin.

Gudmundsson esitti raportissaan vuonna 1984 mallin [7], jonka avulla kelluvan laatan ΔL voidaan määrittää taajuusalueella $f < f_0$. Mallin avulla voidaan myös arvioida, käyttäytyykö kelluva laatta lokaalisti vai resonoivasti (Gudmundsson kutsuu lokaalisti käyttäytyvän rakenteen ratkaisua pakkovärähteleväksi osaksi). Gudmundsson kuitenkin teki yksinkertaisuuksia sekä laskentamenetelmissä että niissä käytettävissä lähtöarvoissa, millä arvioidaan olevan vaikutusta tuloksiin. Tässä artikkelissa tutkitaan Gudmundssonin mallin käyttäytymistä erilaisilla kelluvilla laatoilla ja välipohjatyypeillä. Erityisesti tutkitaan mallin käyttäytymistä kevyen välipohjan tapauksessa.

2 LASKENTAMALLI

Gudmundssonin esittämän mallin [7] mukaan kelluvan laatan askelääneneristävyuden parannus ΔL voidaan määrittää pakkovärähtelevän ja resonoivan osan summana:

$$\Delta L = \Delta L_{forced} + \Delta \Delta L_{res} \quad (1)$$

missä ΔL_{forced} kuvaa pakkovärähtelevän ja $\Delta \Delta L_{res}$ laatan resonoinnin vaikutusta askelääneneristävyuden parannukseen. Näistä ΔL_{forced} voidaan määrittää kantavaan rakenteeseen kohdistuvan askeläänitehon W_I (ilman kelluvaa) ja kelluvan laatan kautta kantavaan rakenteeseen kohdistuvan askeläänitehon W_{II} perusteella:

$$\Delta L_{forced} = 10 \log \left(\frac{W_I}{W_{II}} \right). \quad (2)$$

Kun kantavan rakenteen päällä ei ole kelluvaa rakennetta, kantavaan rakenteeseen kohdistuva askelääniteho W_I voidaan määrittää rakenteeseen kohdistuvan voimaherätteen \hat{F}_I sekä rakenteen ja ympäröivän fluidin kuorman (engl. ”radiation/fluid loading”) impedanssien Z_{p3} ja Z_f perusteella:

$$W_I = \frac{\rho c k \hat{F}_I^2}{4\pi} \int_0^k \frac{k_r}{|Z_{p3} + 2Z_f|^2 \sqrt{k^2 - k_r^2}} dk_r, \quad (3)$$

jossa ρ on ilman tiheys, c on äänennopeus ilmassa ja k on aaltoluku. Kun määritetään kelluvan laatan kautta kantavaan rakenteeseen kohdistuvaa tehoa W_{II} , tulee ottaa huomioon kelluvan laatan ja kantavan rakenteen välinen impedanssi Z_{13} :

$$W_{II} = \frac{\rho c k \hat{F}_{II}^2}{4\pi} \int_0^k \frac{k_r}{|Z_{13}|^2 \sqrt{k^2 - k_r^2}} dk_r. \quad (4)$$

Kun kelluvan laatan alapuolista joustavaa kerrosta käsitellään lokaalisti toimivana jousena, impedanssi Z_{13} voidaan määrittää seuraavasti:

$$Z_{13} = Z_{p1} + Z_{p3} + 2Z_f + \frac{(Z_{p1} + Z_f)(Z_{p3} + Z_f)}{K/i\omega}. \quad (5)$$

Jos eriste huomioidaan aaltomediana, impedanssi esitetään muodossa:

$$Z_{13} = \cos(k_2 h_2) (Z_{p1} + Z_{p3} + 2Z_f) + i \sin(k_2 h_2) \left(\rho_2 c_2 + \frac{(Z_{p1} + Z_f)(Z_{p3} + Z_f)}{\rho_2 c_2} \right), \quad (6)$$

jossa h_2 on eristeen paksuus, k_2 eristeen aaltoluku, ρ_2 eristeen tiheys ja c_2 vaihenopeus eristeessä. Eristeen anisotrooppinen käyttäytyminen on mahdollista ottaa huomioon muutujassa k_2 , mutta jäykkyyseroja ei tässä artikkelissa oleteta (näitä ei myöskään perinteisesti määritetä). Kelluvan laatan resonoinnin vaikutus askelääneneristävyyden parannusvaikutukseen $\Delta\Delta L_{res}$ voidaan määrittää seuraavasti:

$$\Delta\Delta L_{res} = -10 \log \left(1 + Y \frac{\sigma_{1,res}}{\sigma_{3,forced}} \right), \quad (7)$$

jossa kerroin Y määritetään resonoivan ja pakkovärähtelevän kelluvan laatan värähtelynopeuksien $v_{1,res}$ ja $v_{1,forced}$ avulla:

$$Y = \frac{\langle v_{1,res}^2 \rangle}{\langle v_{1,forced}^2 \rangle} \quad (8)$$

Kertoimen Y suuruus riippuu kantavan rakenteen ja kelluvan laatan reunaehdoista. Tyypillisesti kelluvaa laattaa voidaan pitää reunoiltaan vapaana (engl. free, F). Gudmundsson esitti raportissaan kertoimen Y laskennan kahdelle eri tapaukselle: Y_{SF} ja Y_{CF} . Näistä ensimmäisessä on oletettu kantava rakenne yksinkertaisesti tuetuksi (engl. simple, S) ja jälkimmäisessä tapauksessa jäykästi tuetuksi (engl. clamped, C). Voima F lasketaan lähteessä [8] esitetyllä yksinkertaisella menetelmällä, jonka Lindblad on alun perin esittänyt.

3 LASKENTAMALLIN KÄYTTÄYTYMINEN

3.1 Materiaaliparametrit

Laskentamallin käyttäytymistä tutkitaan kahdella raakavälipohjalla ja kolmella eri kelluvalla rakenteella. Raakavälipohjana on joko 200 mm teräsbetoni (a) tai 200 mm puu (b). Varsinaisia CLT-rakenteita ei tarkastella tässä ortotrooppisuutensa vuoksi. Kelluvina rakenteina ovat:

1. 14 mm parketti ($m' = 7 \text{ kg/m}^2$), jonka alla alusmateriaali (dynaaminen jäykyys $s' = 68 \text{ MN/m}^3$)
2. 40 mm kuitutasoite ($m' = 80 \text{ kg/m}^2$), jonka alla 30 mm EPS-pohjainen askelääneneriste ($s' = 15 \text{ MN/m}^3$)
3. 80 mm betonivalu ($m' = 200 \text{ kg/m}^2$), jonka alla 50 mm mineraalivillapohjainen askelääneneriste ($s' = 10 \text{ MN/m}^3$)

Rakenteiden häviökertoimena käytetään standardin ISO 12354-1 [9] mukaista laboratoriotilanteen approksimaatiota. Eristeiden häviökertoimena $\eta_{2,\text{tot}}$ käytetään vakioarvoa 0.05, jonka voidaan ajatella kuvaavan häviökertoimen vähimmäisarvoa lähteiden [7] ja [10] perusteella.

3.2 Laskentatulokset

Laskenta suoritetaan diskreetisti terssikaistojen keskitäajuuksilla. Rakennekombinaatioiden tulokset on esitetty kuvaajissa 1a-3b (kuvat 1 ja 2). Kuvissa on esitetty laskentatulokset eri vaiheille:

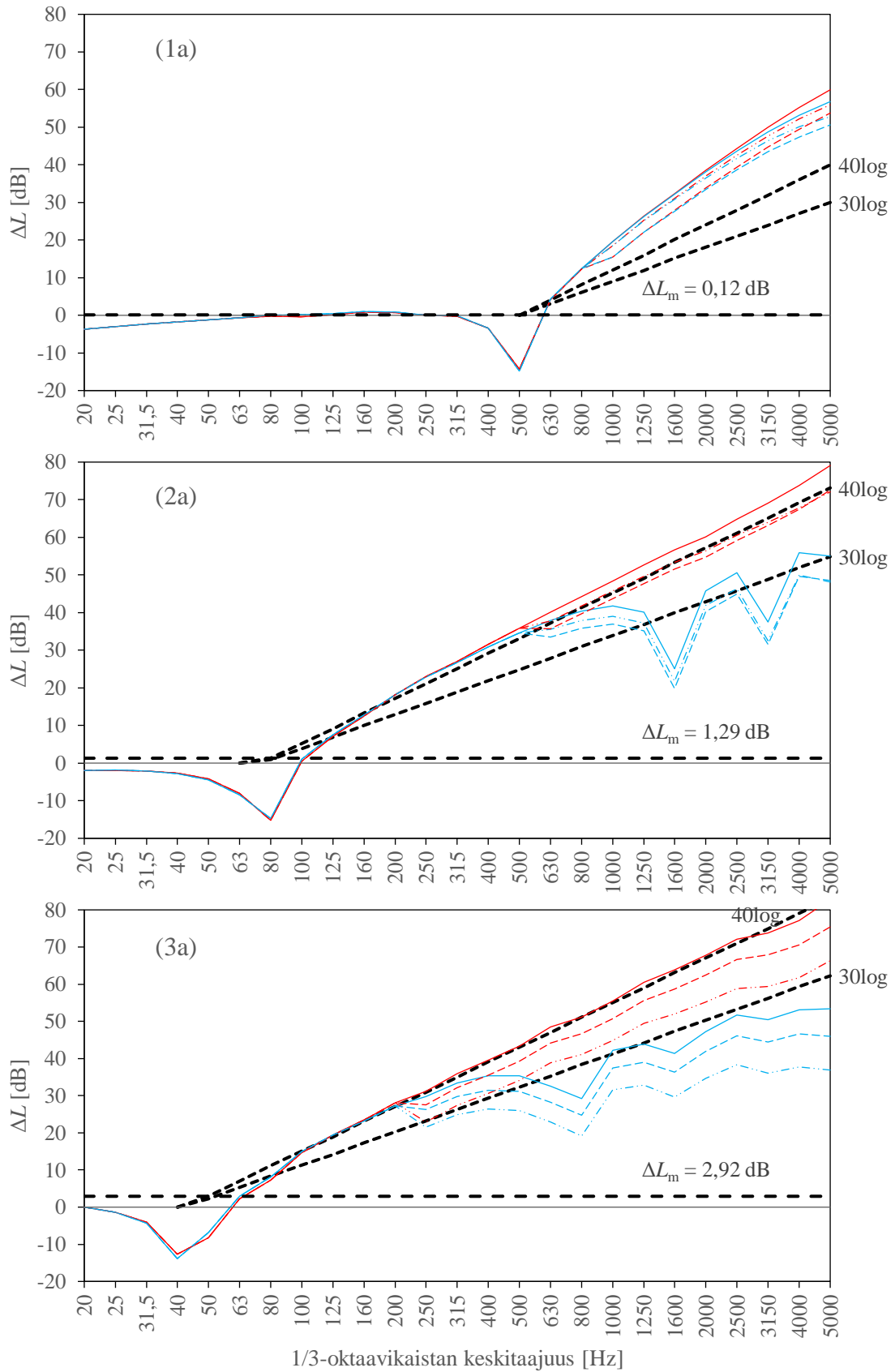
1. Pakkovärähtelevä ratkaisu lokaalisti käyttäytyvällä eristeellä (punainen viiva, kaavat (2) ja (5))
2. Pakkovärähtelevä ratkaisu aaltomediana käyttäytyvällä eristeellä (sininen viiva, kaavat (2) ja (6))
3. Kohtiin 1 ja 2 lisätty resonoivasta värähtelystä johtuva heikennys tuennalla CF (katkoviiva, kaavat (1) ja (7))
4. Kohtiin 1 ja 2 lisätty resonoivasta värähtelystä johtuva heikennys tuennalla SF (1)(7) (piste-piste-katkoviiva, kaavat (1) ja (7))

Lisäksi kuvaajissa on esitetty seuraavat apukäyrät:

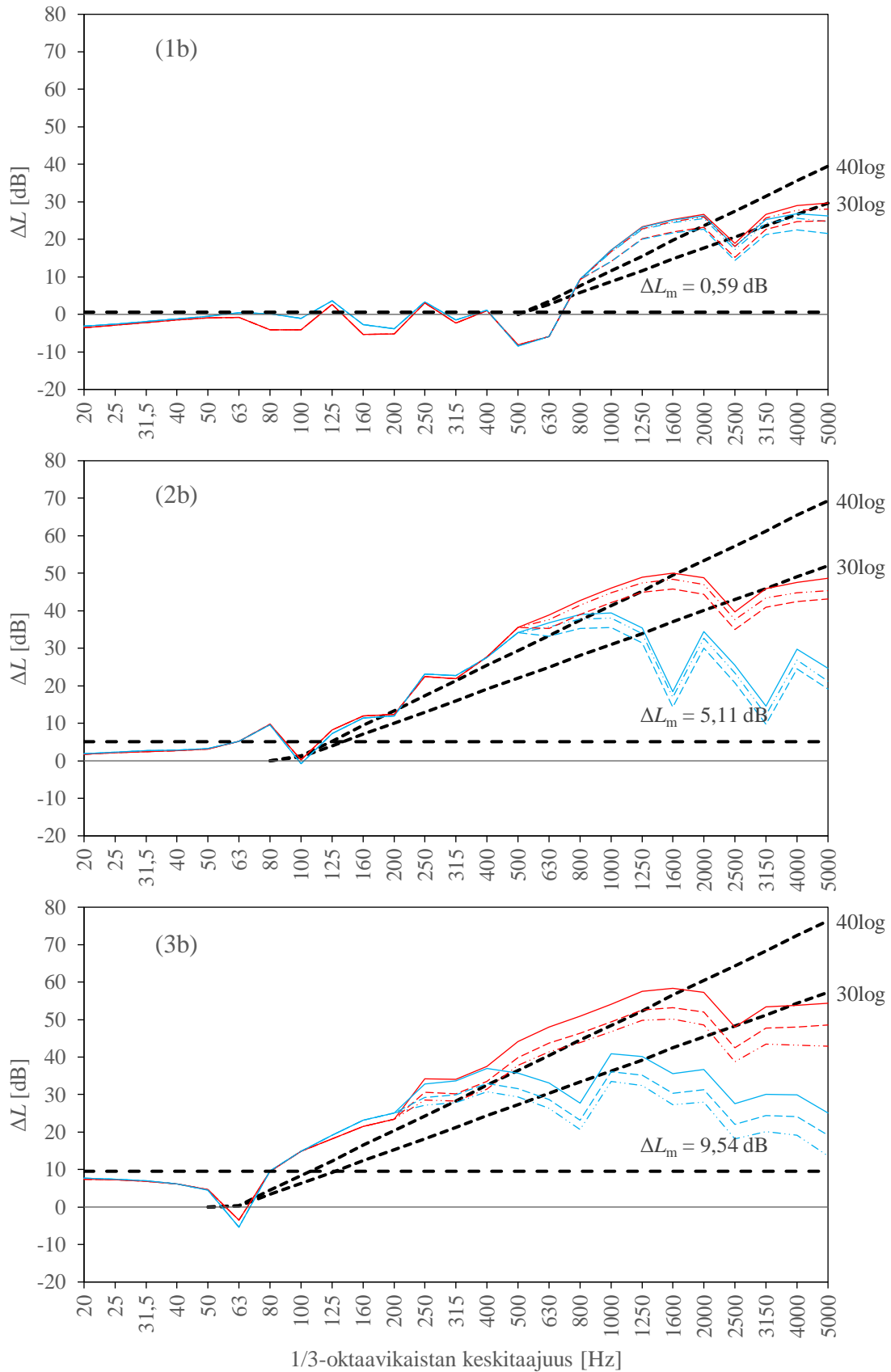
- Standardin ISO 12354-2 laskentamallin mukaiset tulokset $40\log(f/f_0)$ ja $30\log(f/f_0)$ (mustat katkoviivat)
- Massalisäys (musta katkoviiva, kaava (9))

Kelluvan rakenteen tuoma massalisäys koko rakenteeseen on varsinkin kevytrakenteisilla raakavälipohjilla merkittävä, jonka karkea askeläänitaso parannus ominaistaajuuden f_0 alapuolella lasketaan kaavalla (9) [6]:

$$\Delta L_m = 20 \log \left(1 + \frac{m_1}{m_3} \right), \quad (9)$$



Kuva 1. Kelluvien laattojen (1-3) askeläänenparannusarvojen tulokset 200 mm betonille (a).



Kuva 2. Kelluvien laattojen (1-3) askeläänenparannusarvojen tulokset 200 mm puulle (b).

3.3 Tulosten tarkastelu

Tulosten tarkastelussa täytyy huomata, että laskenta on tehty vain terssikaistojen keskitaajuuksilla, jolloin kuvaajissa esiintyy ”piikkejä”. Kapeakaistaisessa tarkastelussa ja signaalia suodattamalla erot todennäköisesti tasoittuisivat. Voimamallilla otetaan huomioon vain muutos spektrien muodoissa, eikä impulssitason muutoksia oteta huomioon. Tämä normalisointi pienentää mm. kelluvan laatan ominaistaajuuden alapuolella saavutettavaa parannusta.

Pakkovärähtelevä tulos (kaavat 2 ja 5) ilman voimamallin ja resonoivan termin huomioon ottamista jäykällä raakavälipohjalla on periaatteellisesti sama lähtökohta kuin Cremerin klassisessa kaavassa $40\log(f/f_0)$. Kuvassa 3a nähdään, että laskennat ovat tällöin hyvin lähellä toisiaan, kun tehdään samat oletukset kuin Cremer, eikä voimatasoissa ole muutoksia, eikä resonoivaa värähtelyä oteta huomioon. Sen sijaan, kun otetaan huomioon voimaspekttrin muutos (1a) ja resonoiva värähtely (3a, katkoviivat), eroja syntyy. Tulosten perusteella $40\log(f/f_0)$ ja $30\log(f/f_0)$ -sovitteet eivät vastaa kyseisen laskentamenetelmän tuloksia suurimmalla osaa kombinaatioista, eikä $30\log(f/f_0)$ -sovite ole aina vaihteluvälin minimiarvo. Aaltomediana toimiva eriste ja resonoiva termi käytännössä heikentävät lähtötilannetta. Näiden vaikutusten suuruus riippuu koko rakenteesta. Ohuemmalla eristeellä on kuitenkin havaittavissa pienempi muutos jousi- ja aaltomediamallin välillä.

Raakavälipohja vaikuttaa kelluvan rakenteen parannusarvoon. Erityispiirteinä huomataan kelluvan rakenteen ominaistaajuuden alapuolella saavutettava hyöty kevyillä raakavälipohjilla, mikä johtuu kelluvan rakenteen tuomasta lisämässasta. Massa vaikuttaa rakenteen impedansseihin ja siten kohdistuvaan voimatasoon ja taivutusaaltojen kytkentään. Suuremmilla taajuuksilla huomataan, ettei parannus sen sijaan ole yhtä suuri kuin betonirakenteilla, mikä johtuu mm. voimaspekttrin muutoksesta (kovaan pintaan kohdistuu enemmän suuria taajuuksia kuin puupinnalla).

Kelluvan rakenteen ominaistaajuudella tapahtuva heikennys oli tutkituissa laskentatapauksissa -15...0 dB välillä, johon vaikuttaa eristeen häviökerroin. Heikennyksen suuruus riippuu häviökertoimen lisäksi myös tarkasteltavasta rakennekokonaisuudesta. Suuruus on toki riippuvainen myös siitä, miten laskentataajuus on osunut ominaistaajuuden kohdalle.

4 LOPPUPÄÄTELMÄ

Käytetty laskentamalli vaikuttaa lupaavalta, koska erot eri raakavälipohjien välillä ovat johdonmukaisia ja mallilla voidaan laskea tulokset kelluvan laatan ominaistaajuuden alueella sekä tätä pienemmillä taajuuksilla, jotka ovat merkittävässä roolissa varsinkin kevyt-rakenteisilla välipohjilla. Laskentamallilla ei tarvitse tehdä tulkintaa kelluvan rakenteen käyttäytymisestä (forced / resonant), jolloin tulos riippuu vain materiaaliparametreista. Laskentamalli on siitä syystä suhteellisen herkkä materiaaliparametreille, jolloin eroja mittauksiin oletettavasti tulee varsinkin eristeen ominaisuuksien vuoksi, koska eristeen häviökertoimista tai jäykkyyksistä eri suuntiin harvoin on tietoa. Gudmundsson [7] toteaaakin, että näiltä osin tuloksia on jouduttu sovittamaan mittauksiin. Kevyiden raakavälipohjien kohdalla resonoivan termin tarkkuuden myös havaittiin heikkenevän.

VIITTEET

- [1] SFS-EN ISO 10140-1, Acoustics. Laboratory measurement of sound insulation of building elements. Part 1: Application rules for specific products. 2010, Helsinki, Suomen standardisoimisliitto SFS ry.
- [2] SFS-EN ISO 12354-2, Building acoustics. Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements. Part 2: Impact sound insulation between rooms, 2017, Helsinki, Suomen standardisoimisliitto SFS ry.
- [3] Cremer, L., Theorie des Klopschalles bei Decken mit schwimmendem Estrich, *Acustica* 2(1952), 167-178.
- [4] Vér, I. L., Impact Noise Isolation of Composite Floors, *Journal of the Acoustical Society of America*, 50(1971), 1043-1050.
- [5] Ympäristöministeriön asetus rakennuksen ääniympäristöstä 796/2017. Helsinki, ympäristöministeriö.
- [6] Zeitler, B., Schneider, M., On the relevance of impact source impedance at low frequencies – Part 2: Floors with floating toppings, International congress on sound and vibration (ICSV24), 23.-27.7.2017, Lontoo.
- [7] Gudmundsson, S., Report TVBA-3017: Sound insulation improvement of floating floors. A study of parameters, 1984, Lund, Lund Institute of Technology.
- [8] Brunskog, J., Hammer, P., The Interaction Between the ISO Tapping Machine and Lightweight Floors, *Acta Acustica united with Acustica*, 89(2008), 296-308.
- [9] SFS-EN ISO 12354-1, Building acoustics. Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements. Part 1: Airborner sound insulation between rooms, 2017, Helsinki, Suomen standardisoimisliitto SFS ry.
- [10] Schiavi, A., Improvement of impact sound insulation: A constitutive model for floating floors, *Applied Acoustics*, 129(2018), 64-71.