TALLINNA TEHNIKAKÕRGKOOL

Margo Parkala

MOODULHOONE PUITVAHELAE PÕRANDAELEMENDI VIBRATSIOONI ANALÜÜS

LÕPUTÖÖ

Tallinn 2023

Margo Parkala

MOODULHOONE PUITVAHELAE PÕRANDAELEMENDI VIBRATSIOONI ANALÜÜS

LÕPUTÖÖ

Ehitusinstituut
Hoonete ehituse õppekava
Juhendaja: Aili Animägi

Tallinn 2023

Mina

Margo Parkala

tõendan, et lõputöö on minu kirjutatud. Töö koostamisel kasutatud teiste autorite, sh juhendaja teostele on viidatud õiguspäraselt.

Kõik isiklikud ja varalised autoriõigused käesoleva lõputöö osas kuuluvad autorile ainuisikuliselt ning need on kaitstud autoriõiguse seadusega.

Juhendaja (Aili Animägi, */allkirjastatud digitaalselt/*)

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina,
Margo Parkala

sünnikuupäev:

08.02.1996

annan Tallinna Tehnikakõrgkoolile (edaspidi kõrgkool) tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

„Moodulhoone puitvahelae põrandaelemendi vibratsiooni analüüs“

1. reprodutseerimiseks paberkandjal kõrgkooli raamatukogus avaldamise ja säilitamise eesmärgil;
2. elektroonseks avaldamiseks kõrgkooli repositooriumi kaudu;
3. kui lõputöö avaldamisele on instituudi direktori korraldusega kehtestatud tähtajaline piirang, lõputöö avaldada pärast piirangu lõppemist.

Olen teadlik, et nimetatud õigused jäävad alles ka autorile ja kinnitan, et:

1. lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid ega muid õigusi;
2. PDF-failina esitatud töö vastab täielikult kirjalikult esitatud tööle.

Tallinnas,

/allkirjastatud digitaalselt/

TALLINNA TEHNIKAKÕRGKOOL

Ehitusinstituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõpetaja:	**Margo Parkala**
Õpperühm:	KHE2019
Eriala:	Hoonete ehitus (1827)
Lõputöö teema:	**Moodulhoone puitvahelae põrandaelemendi vibratsiooni analüüs**

Lähteandmed töö koostamiseks:
Vibratsiooni käsitlevad teatmeteosed
Eesti, Soome, Norra ja Rootsi rahvuslikud lisad ja nõuded
Materjalide toodedokumentatsioonid
EC5 käsitlevad teatmeteosed
Teostatud uuringud

Töö sisu, ülesehitus ja lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

- Sissejuhatus
- Vibratsiooni kirjeldus
- Teostatud uuringud
- Mooduli geomeetria ja arvutusskeem
- Moodulhoone puitvahelae tehnoloogia kirjeldus
- Vibratsiooni arvutuskäik EC5 põhjal
- Konstruktsioonitüüpide arvutus
- Vibratsiooni käsitlevad nõuded
- Tulemuste analüüs ja võrdlus
- Abimeetmed ja lahendused vibratsiooni minimeerimiseks
- Kokkuvõte

Seletuskirja ning graafilise materjali sisu ja maht:

- Koos lisadega 40-50 lk

Lõputöö juhendaja:	Aili Animägi (nimi)	(allkiri)	23.02.2023 (kuupäev)
Lõpetaja:	Margo Parkala (nimi)	(allkiri)	23.02.2023 (kuupäev)
Kinnitaja:	Aivars Alt ehitusinstituudi direktor	(allkiri)	23.02.2023 (kuupäev)

Lõputöö ülesanne antud: 10.02.2023
Lõputöö esitamise tähtaeg: 02.05.2023

SISUKORD

TÄHISTE LOETELU 7
SISSEJUHATUS 8
1 VIBRATSIOONI KIRJELDUS 10
1.1 Vibratsiooni sissejuhatus 10
1.2 Vibratsiooni režiimi kuju 11
1.3 Vibratsiooni režiimi kuju puidust põrandakonstruktsioonis 12
1.4 Vibratsioon põrandakonstruktsioonides 13
2 TEOSTATUD UURING 15
2.1 Hamm/Richter/Winter 15
3 MOODULI GEOMEETRIA JA ARVUTUSSKEEM 24
4 MOODULI PUITVAHELAE TEHNOLOOGIA KIRJELDUS 26
5 EUROKOOD 5 VIBRATSIOONI ARVUTUSMETOODIKA 29
5.1 Efektiivse paindejäikuse EI_l ja EI_b arvutusmetoodika 29
5.2 Vööplaadi efektiivse laiuse b_{ef} arvutusmetoodika 31
5.3 Vibratsiooni arvutusmetoodika 32
5.4 Vibratsiooni tingimused 33
6 EUROKOOD 5 RAHVUSLIKUD LISAD 36
6.1 Eesti 37
6.2 Soome 37
6.3 Rootsi 38
6.4 Norra 38
6.5 Rahvuslike lisade kokkuvõte 40
7 PÕRANDAKONSTRUKTSIOONIDE ARVUTUS 41
7.1 Konstruktsioonitüüp A 41
7.1.1 Plaadi efektiivse laiuse b_{ef} arvutus 41
7.1.2 Efektiivse paindejäikuse EI_l ja EI_b arvutus 42
7.1.3 Vibratsiooni tingimuste kontroll 43
7.2 Konstruktsioon B 44
7.2.1 Plaadi efektiivse laiuse b_{ef} arvutus 45
7.2.2 Efektiivse paindejäikuse EI_l ja EI_b arvutus 45
7.2.3 Vibratsiooni tingimuste kontroll 46
7.3 Konstruktsioon C 48

7.3.1 Efektiivse paindejäikuse EI_l ja EI_b arvutusmetoodika 50
7.3.2 Efektiivse paindejäikuse Ei_l ja EI_b arvutus 53
7.3.3 Vibratsiooni tingimuste kontroll 54
8 TULEMUSTE ANALÜÜS JA VÕRDLUS 57
8.1 Omavõnkesagedus 57
8.2 Läbipaine 59
8.3 Ühikimpulsi kiirusvaste 60
KOKKUVÕTE 61
SUMMARY 63
VIIDATUD ALLIKAD 65
GRAAFILINE OSA 67

TÄHISTE LOETELU

a – piirläbipaine;

b – põranda pikkus;

B – ühikimpulsi kiirusvaste piirväärtus;

F – koondatud koormus;

l – põranda laius ehk sildeava pikkus;

f_1 – omavõnkesagedus;

n_{40} – omavõnkevormide hulk;

E – materjali elastsusmoodul;

I – keha/ristlõike telginertsimoment;

EI_l – efektiivne paindejäikus põranda sildeava suunas;

EI_b – efektiivne paindejäikus põranda pikkuse suunas;

b_{ef} – vööplaadi efektiivne laius;

$b_{c,ef}$ – mõlkumisest tingitud maksimaalne vööplaadi efektiivlaius;

b_w – tala ristlõike laius;

v_{max} – ühikimpulsi kiirusvaste;

w – maksimaalne hetkeline läbipaine;

k_δ – konstant;

s – talade samm;

ζ – sumbuvustegur.

SISSEJUHATUS

Puidust hoonete ja rajatiste ajalugu ulatub kaugesse minevikku, mistõttu peetakse puitu üheks esimeseks ehitusmaterjaliks. Täpsemalt, kandva konstruktsiooni rajamiseks mõeldud ehitusmaterjaliks. Aastate jooksul saadud teadmised ja kogemused on suurendanud puidu kasutust nii viimistluses kui ka kandekonstruktsioonis. Sellegipoolest ei ole tänane teadlikkus puitkonstruktsioonidest saavutatud eksimusteta. Ajaloost võime leida varieeruva põhjuse ja tagajärgedega õnnetusi, mis on tekkinud eelkõige teadmatusest ja paljudest tundmatutest faktoritest. Katsed, eksimused ja õnnetused on olnud aluseks tänastele puitkonstruktsioonide projekteerimiseks, ehitamiseks ja hooldamiseks mõeldud juhendmaterjalidele. Siiski peab arvestama, et projekteerimist hõlmavad juhendmaterjalid ei pruugi garanteerida 100% täpsusega vastet reaalsele olukorrale. Sellest tulenevalt on valemitesse lisatud osavarutegureid, mis välistaksid olukorra, kus reaalne situatsioon kaaluks üle teoreetilise situatsiooni.

Puitkonstruktsioonide projekteerimisel kasutatavas juhendmaterjalis Eurokood 5 eristatakse kahte konstruktsiooni piirseisundit. Esimene ja primaarsem on kandepiirseisund (*Ultimate Limit State*). Teiseks piirseisundiks on kasutuspiirseisund (*Serviceable Limit State*), mis käsitleb konstruktsiooni või selle osa deformatsioone ekspluatatsioonist. Konstruktsioonile tervikuna või mõne konstruktsiooni osale esitatud kasutuspiirseisundi nõuete ületamisel ei ole selle kasutamine enam inimesele mugav ja esteetilise välimusega. [1]

Käesolevas lõputöös analüüsitakse puitkonstruktsiooni kasutuspiirseisundi ühte fragmenti, milleks on vibratsioon. Tegemist on ühe suurima kergkonstruktsioonide mõjuriga, mis määrab konstruktsioonide kasutusmugavuse rahulolu. Hoonete ja selle osade pidev ehitustehnoloogiline areng on teinud suuri edusamme, millest üks huvitavamaid on ruumelementidest ehk moodulitest hooned. Moodulhoonete tehnoloogilise arengu valguses soovib autor analüüsida moodulhoone vibratsiooni aktuaalsust ja tuua välja olulisemad faktid, millele erilist tähelepanu pöörata. Tulemuste detailsuse huvides võetakse fookuse alla moodulhoone puitvahelae kolm puitvahelae põrandaelemendi konstruktsioonitüüpi, mille tulemusi analüüsitakse ja võrreldakse. Vahelae geomeetria on kõikide konstruktsioonitüüpide puhul identne. Arvututulemuste analüüsimiseks ja järelduste tegemiseks kaardistab autor vibratsiooni käsitlevaid nõudeid ja arvutusmetoodikad Eestis ning populaarsemates eksportriikides, milleks on Soome, Rootsi ja Norra.

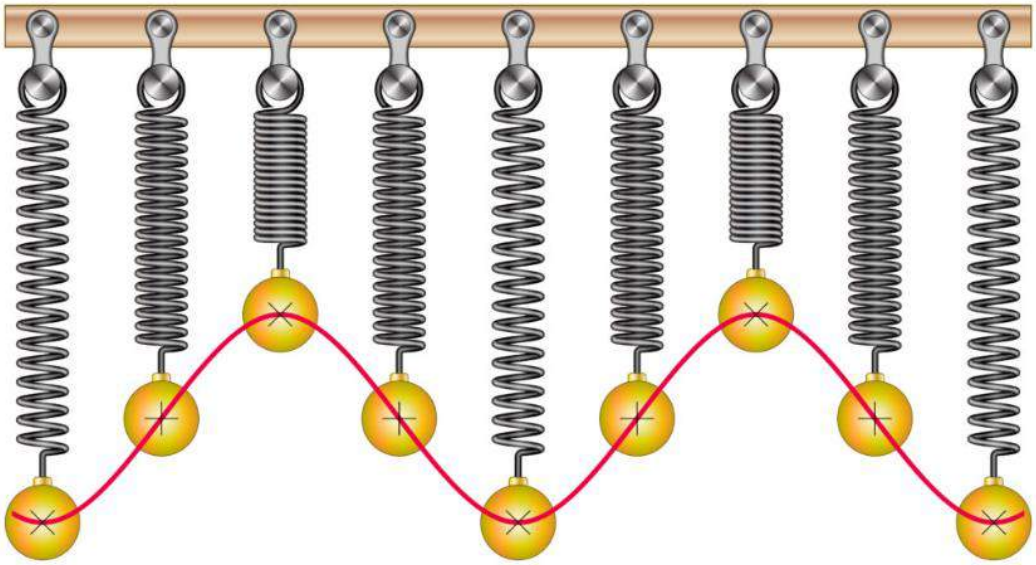
Käesolev lõputöö koosneb kaheksast peatükist. Esimene peatükk juhatab sisse vibratsiooni olemuse ja selle mõju inimesele ning puitkonstruktsioonidele. Teises peatükis annab autor ülevaate

puitvahelagede vibratsiooni kohta teostatud uuringust ja kaardistab tähtsamad tulemused ning faktid. Kolmandas peatükis selgitatakse mooduli geomeetria valikut ja tuuakse välja suuremate puitmajatootjate maksimaalsed mooduli gabariidid. Lisaks kirjeldatakse vahelae põrandakonstruktsiooni arvutusskeemi lähteandmed. Neljandas peatükis tutvustatakse moodulhoone puitvahelae tehnoloogiat ja tehakse põgus võrdlus elementmaja vahelaega. Viiendas peatükis tehakse sissejuhatus vibratsiooni arvutusmetoodikasse, mis põhineb Eurokood 5 ja sinna kuuluvatel rahvuslikel lisadel. Kuues peatükk annab ülevaate Eesti ja populaarsemate eksportriikide (Soome, Rootsi ja Norra) Eurokood 5 rahvuslikest lisadest. Seitsmes peatükk sisaldab kolme analüüsitava konstruktsioonitüübi kirjeldust ja arvutusi. Kaheksandas ja viimases põhiosa peatükis koostatakse saadud arvutustulemuste analüüs ja võrdlus.

1 VIBRATSIOONI KIRJELDUS

1.1 Vibratsiooni sissejuhatus

Kujutagem ette olukorda, kus tahke keha massiga *m* on ühendatud vedruga. Liigutades objekti oma tasakaaluasendist vertikaalsuunaliselt välja, hakkab keha võnkuma üles-alla (Joonis 1). Teisisõnu võib seda nähtust mõista kui vibreerimist. Ideaalkeskkonnas, kus puuduvad gravitatsioon, hõõrdejõud, sumbumine ja muud välised faktorid, on tahke keha võnkumine lihtharmooniline ehk sinusoidaalne ja konstantse sagedusega [2], [3]. Seda protsessi nimetatakse vabavõnkumiseks [3]. Vabavõnkumise eelduseks on ühe vabadusastme mudel, mille liikumine on piiritletud lineaarselt ühes suunas ja mida ei mõjuta välised faktorid [2]. Tegemist on laialt levinud matemaatilise mudeliga, mis aitab iga valdkonna inseneri oma uuritavat objekti paremini kirjeldada.



Joonis 1. Objekt massiga *m* võnkumine [2]

Vibratsiooni ehk mehaanilist võnkumist defineerivad parameetrid nagu võnkesagedus, amplituud ja sumbuvus. Võnkesagedus on väärtus, mis näitab objekti poolt ühes sekundis tehtud täisvõngete arvu. Võnkesageduse ühikuks on Hz ehk 1/T. Võnkesageduse pöördväärtusena 1/F saadakse võnkeperiood *T* (s), ehk ajavahemik, kus keha teeb ühe täisvõnke. Võnkesagedust mõõdetakse üldjuhul sekundites. Amplituud on keha maksimaalne teekonna pikkus tasakaaluasendist. [4]

Sumbuvust nimetatakse kui keha energiakadu väliste faktorite mõjul. Ilma sumbuvuseta oleks keha võnkumine lõpmatu, konstantse amplituudi ja sagedusega. Keha kineetilise energia sumbumisel kaduv energia muundatakse teisteks energiavormideks nagu näiteks soojusenergia ja helienergia. [5]

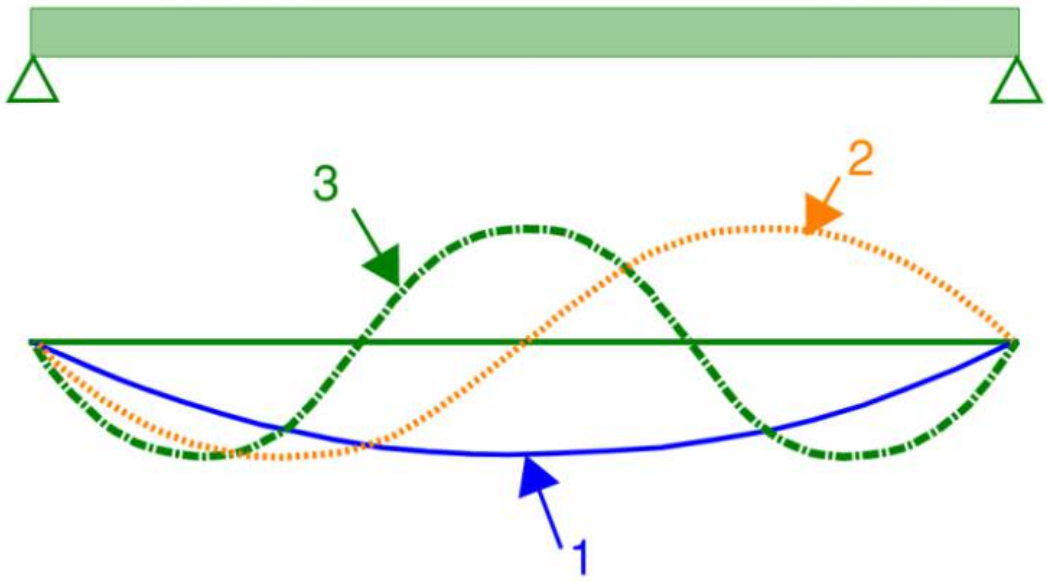
Vibratsioon jaguneb tekkepõhiselt kahte kategooriasse [6]:

- vabavibratsioon – kehale antud momentaalse jõu tagajärjel tekkiv vaba võnkumine;
- sundvibratsioon – pideva rütmilise jõu mõjumise tagajärjel tekkiv võnkumine.

Käesolevas lõputöös käsitletakse sundvibratsiooni, kuna põrandakonstruktsioon on pidevas kasutuses ja seetõttu on mõjuvad jõud dünaamilised ja pidevad.

1.2 Vibratsiooni režiimi kuju

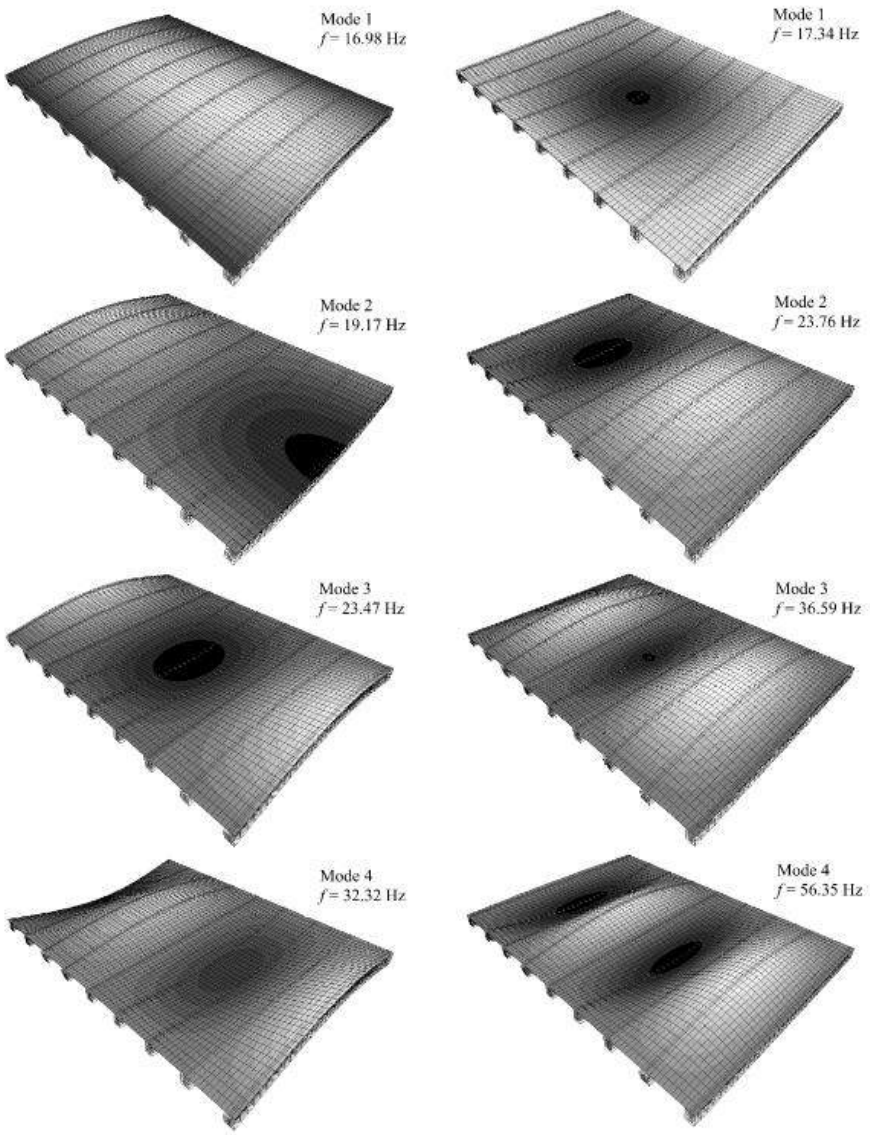
Igal kehal on oma fundamentaalne sagedus ehk omavõnkesagedus. Dünaamilise jõu mõjul tekkivat vibratsiooni, mille sagedus kattub keha omavõnkesagedusega, nimetatakse resonantssageduseks [7]. Resonantssageduse graafiliseks kujutamiseks kasutatakse vibratsiooni režiimi kuju ehk *Mode Shape*, mis on kujutatud alloleval joonisel (Joonis 2). [6], [7]



Joonis 2. Lihttala kolm primaarsemat vibratsiooni režiimi kuju ehk *Mode Shape* [6]

1.3 Vibratsiooni režiimi kuju puidust põrandakonstruktsioonis

Põrandakonstruktsioonis võib esineda mitme erineva sagedusega vibratsioone, millest igaüks tekitab erineva režiimi kuju. Hea ülevaate nendest kujudest annab alltoodud joonis (Joonis 3). Selle konkreetse näite puhul sõltub vibratsiooni režiimi kuju toetingimusest, mida põrandal arvestatakse kas kahest või neljast küljest toestatud. Joonisel (Joonis 3) olevas vasakus tulbas olevad näited kirjeldavad kahest küljest toestatud põranda režiimi kujusid ja paremas tulbas neljast küljest toestatud režiimi kujusid. Luues korrelatsiooni kahe erineva uuringu käigus saadud andmetest (Joonis 3) ja (Joonis 4), võib teha lihtsustatud ja üldistatud järelduse, et puidust vahelagede vibratsiooni režiimi primaarsemateks kujudeks on 1 ja 2 ehk *Mode 1* ja *Mode 2*. [8], [9]



Joonis 3. Põrandakonstruktsiooni vibratsiooni režiimi kujud sõltuvalt toetingimusest [8]

1.4 Vibratsioon põrandakonstruktsioonides

Vibratsiooni sageduse terminoloogia järgi võib põrandakonstruktsioone jaotada kahte gruppi, milleks on kõrgsagedusega põrandakonstruktsioonid ja madalsagedusega põrandakonstruktsioonid. Raudbetoonist ehk õõnespaneelidest vahelage tuntakse kui tüüpilise madalsagedusega põrandakonstruktsioonina. Puitkarkassiga vahelagi seejuures kuulub kõrgsagedusega põrandakonstruktsioonide kategooriasse. Käesolevas lõputöös keskendutakse puidust vahelaele ehk kõrgsagedusega konstruktsioonile. [10]

Hoones tekkivat vibratsiooni võivad põhjustada mitmed erinevad faktorid. Hooneväliseid vibratsioone tekitavad faktorid, mida käesolevas lõputöös ei käsitleta, võivad olla näiteks tuul ja maapinna kaudu levivad dünaamilised koormused. Erinevate hoonesiseste dünaamiliste mõjurite hulgas on puitmajades kaks primaarsemat vibratsioonitekitajat: inimesed ja kodumasinad [1]. Inimestest tekivad dünaamilised koormused peamiselt erineva tempoga kõndimisest ja ka hüppamisest. Kaks kriitilist ebamugavuse mõjurit on [1]:

- sammuvibratsioon;
- kodumasinatest tulenev vibratsioon.

Mõlema mõjuri poolt tekitatud vibratsiooni suhtes on subjektid erineval moel vastuvõtlikud ja häiritud. Kodumasinatest tekkivat vibratsiooni käesolevas lõputöös ei käsitleta. ISO 2631-2 „Inimese tundlikkus vibratsioonidele“ dokumendis on inimeste vibratsioonitundlikkust kirjeldatud järgnevalt [11]:

- vibratsioonitundlikkus on seotud vibratsioonikiirendustega sageduste puhul alla 8 Hz;
- vibratsioonitundlikkus on seotud vibratsioonikiiruste sageduste puhul alla 8 Hz;
- vibratsioonitundlikkus on suurem, kui selle kestvus säilib pikema aja jooksul;
- vibratsioonitundlikkus on väiksem, kui seda tekitav allikas on inimesele teada;
- vibratsioonitundlikkus on väiksem inimese füüsilise tegevuse jooksul.

Puitkonstruktsioonide projekteerimist käsitlevas dokumendis „Eurokood 5“ kehtib põrandakonstruktsioonidele omavõnkesageduse miinimumnõue $f_1 > 8$ Hz. Tegemist on sätestatud piirväärtusega, mis on etaloniks, kuid mitte fikseeritud. Puitkonstruktsioonide projekteerimisel tuleb järgida Eurokood 5 kaasas käivaid rahvuslike lisasid, mille sisu võib vastavalt riigi eripäradele varieeruda. [1]

Madalamate põrandkonstruktsiooni omavõnkesage väärtuste puhul kui 8 Hz tekib dünaamiline resonants, mis on põhjustatud inimeste liikumisest. Konkreetne olukord võib tekkida ebatavapäraselt pikkades ja saledates põrandakonstruktsioonides, mille vibratsiooni arvutusmetoodikat Eurokood 5 ei täpsusta. Sellisel juhul ei ole suure tõenäosusega tegemist eluruumide põrandakonstruktsiooniga, kus kasutusmugavus on primaarse tähtsusega. [1]

2 TEOSTATUD UURING

Puitkonstruktsioonide vibratsioon on kompleksne nähtus, mille käitumist on teoreetiliste metoodikatega peaaegu võimatu täpselt ennustada. Teoreetilise metoodikaga ehk arvutusmetoodikaga tulemuste ennustamine põhineb üldjuhul ideaalmudelitel, mistõttu võivad erinevused ekspluatatsiooni- ja ideaaltingimuste vahel olla märkimisväärsed ja etteaimamatud. Selle probleemi kaardistamiseks on läbi viidud mitmeid uuringuid ja koostatud kirjalikke töid, mis igaüks keskendub kindlale objektiivile, saamaks võimalikult täpseid ja asjakohaseid tulemusi. Järgnevalt välja toodud uuring annab hea ülevaate puidust põrandakonstruktsiooni vibratsiooni teoreetilise ja ekspluatatsiooni olukorra erinevustest.

2.1 Hamm/Richter/Winter

Tegemist on laialt tuntud ja refereeritud uuringuga, mis viidi läbi aastatel 2007-2009 Müncheni Tehnikaülikooli teadlaste poolt. Uuringu koostajateks oli Patricia Hamm, Antje Richter ja Stefan Winter. Uuringu eesmärgiks oli analüüsida ligi 50 puidust hoone ja 100 vahelae/põranda käitumist vibratsioonile, mille alusel koostati raport järelduste ja soovitustega. Lisaks koostati laboris 1:1 suurusega vahelagi, et analüüsida konstruktsiooni ideaaltingimustes. Probleem, mis ajendas teadlasi sellist uuringut läbi viima, oli sama, mis eelmises peatükis mainitud. Eurokood 5 esitatud arvutusmetoodikaga tõestatud vibratsiooniohutud puitvahelaed tekitavad hiljem siiski inimestes regulaarselt ebameeldivusi ja sellest tulenevalt ei ole konstruktsiooni mugav kasutada. Teadlaste järeldus sellele probleemile on, et kehtivad arvutusmetoodikad ei ole piisavalt detailsed ja efektiivsed. [9]

Uuringu olulisemaks osaks oli vibratsiooni mõõdistamine objektil. Mõõdistusandmeid koguti kokku rohkem kui sajalt vahelae konstruktsioonilt, mis detailsemalt jagunesid järgnevalt [9]:

- 42 puidust vahelage raske tasanduskihiga;
- 8 puidust vahelagi kerge tasanduskihiga;
- 7 puidust vahelage ilma tasanduskihita;
- 4 puidust vahelage elastsete tugedega;
- 18 erikonstruktsiooniga vahelage;
- 16 komposiitvahelage puidust ja betoonist;
- 20 massiivpuidust vahelage raske tasanduskihiga;
- 7 massiivpuidust vahelage kerge tasanduskihiga;

- 11 massiivpuidust vahelage ilma tasanduskihita.

Raportist kahjuks ei selgu täpsem vahelagede sildeava pikkus ja konstruktsioonide kirjeldus, nagu näiteks kandva ja jäigastava elemendi parameetrid, mis vibratsiooni puhul tähtsat rolli omavad. Samuti ei ole kirjeldatud kerge ja raske tasanduskihi täpsemat selgitust ja nende parameetreid. Eeldada võib, et kõikidel uuritud puitsõrestikvahelagedel oli peal jäigastav plaat kas OSB[1], vineeri või PLP[2] näol. Kerge tasandus/viimistluskihi all on tõenäoliselt mõeldud parketti, vaipa või PVC-d ja raske tasandus/viimistluskihi all tasandussegu ning viimistluskihti. Tulemuste analüüsimiseks kaardistati vajalikud parameetrid, mis vajasid mõõdistamist ja arvutamist. [9]

Mõõdistatud väärtused [9]:

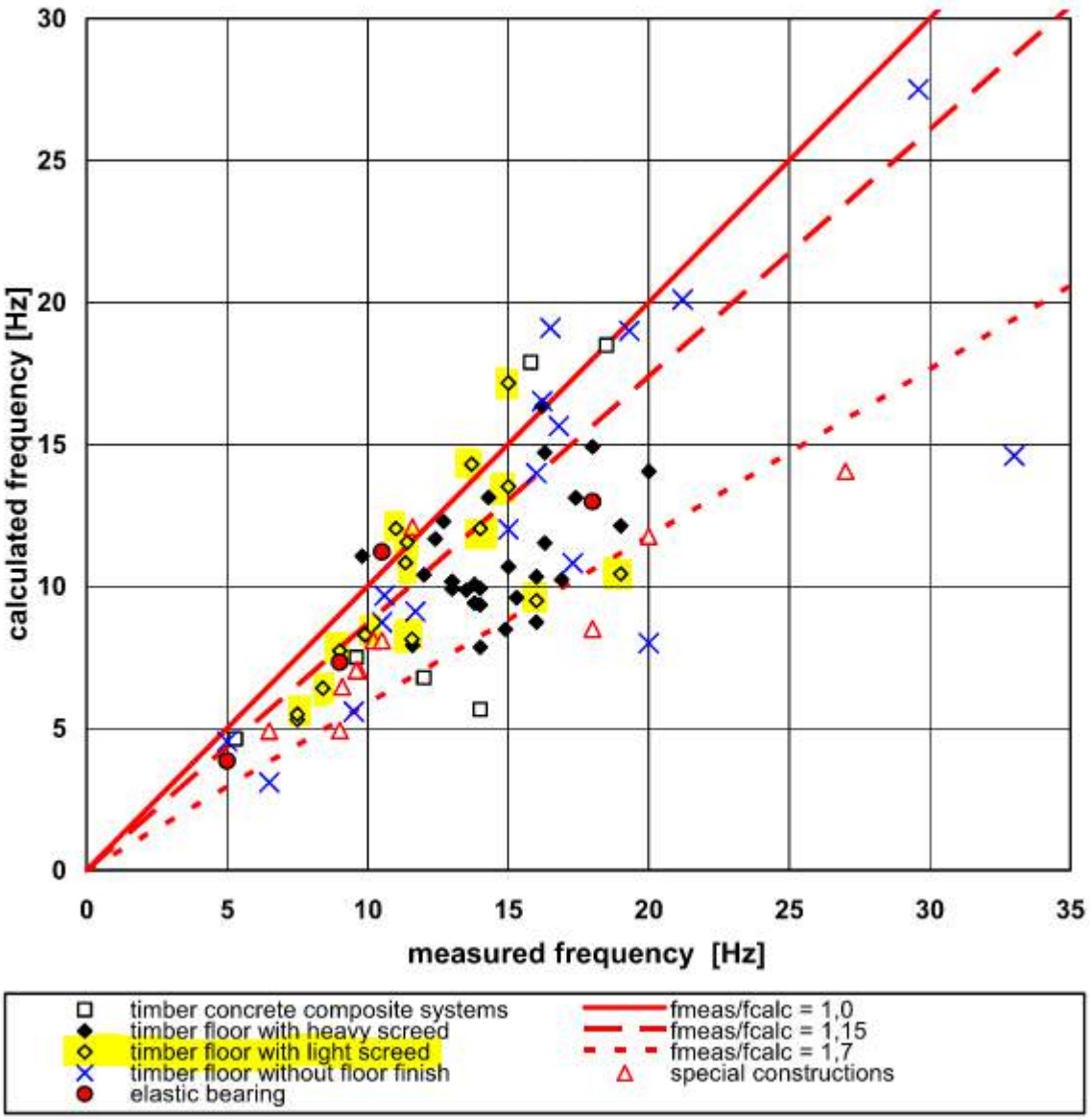
- põrandakonstruktsiooni omavõnkesagedus hüppe või sammu tagajärjel;
- sammust tekkinud vibratsioonikiirendus;
- sammust tekkinud vibratsioonikiirus;
- vibratsiooni sumbumine pärast sammu.

Arvutatud väärtused [9];

- põrandakonstruktsiooni omavõnkesagedus, *f;*
- ühikimpulsi kiirusvaste, *v;*
- vibratsioonikiirus, *a;*
- konstruktsiooni hetkeline vertikaalne läbipaine punktkoormuse rakendamisel, *w*.

Saadud tulemusi raportis arvulise detailsusena ei esitata. Selle asemel loodi joondiagramm mõõdistatud ja arvutatud tulemuste võrdluseks. Joondiagramm on esitatud alltoodud joonisel (Joonis 4). [9]

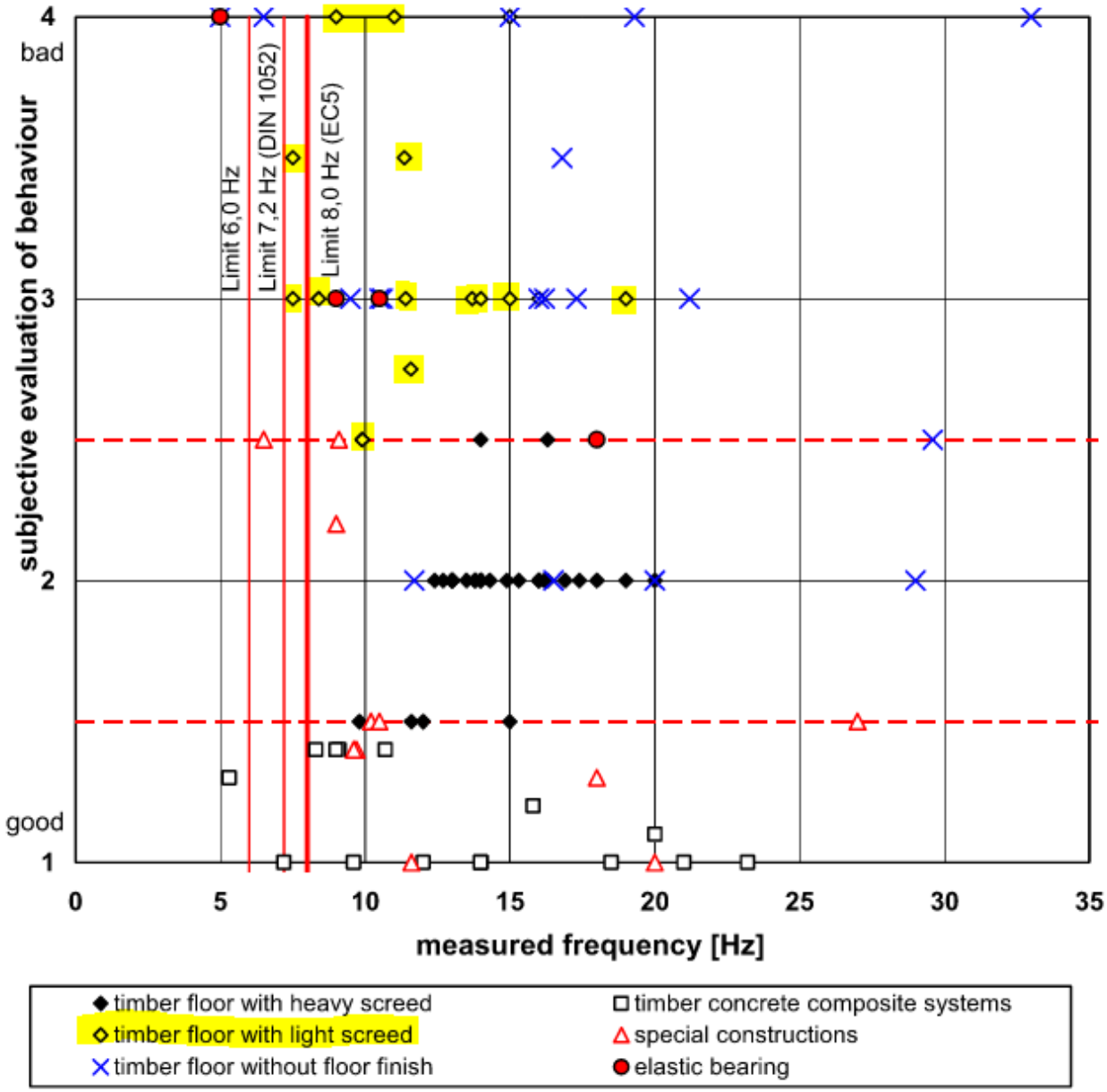
[1] Orienteeritud laastuga plaat
[2] Puitlaastplaat



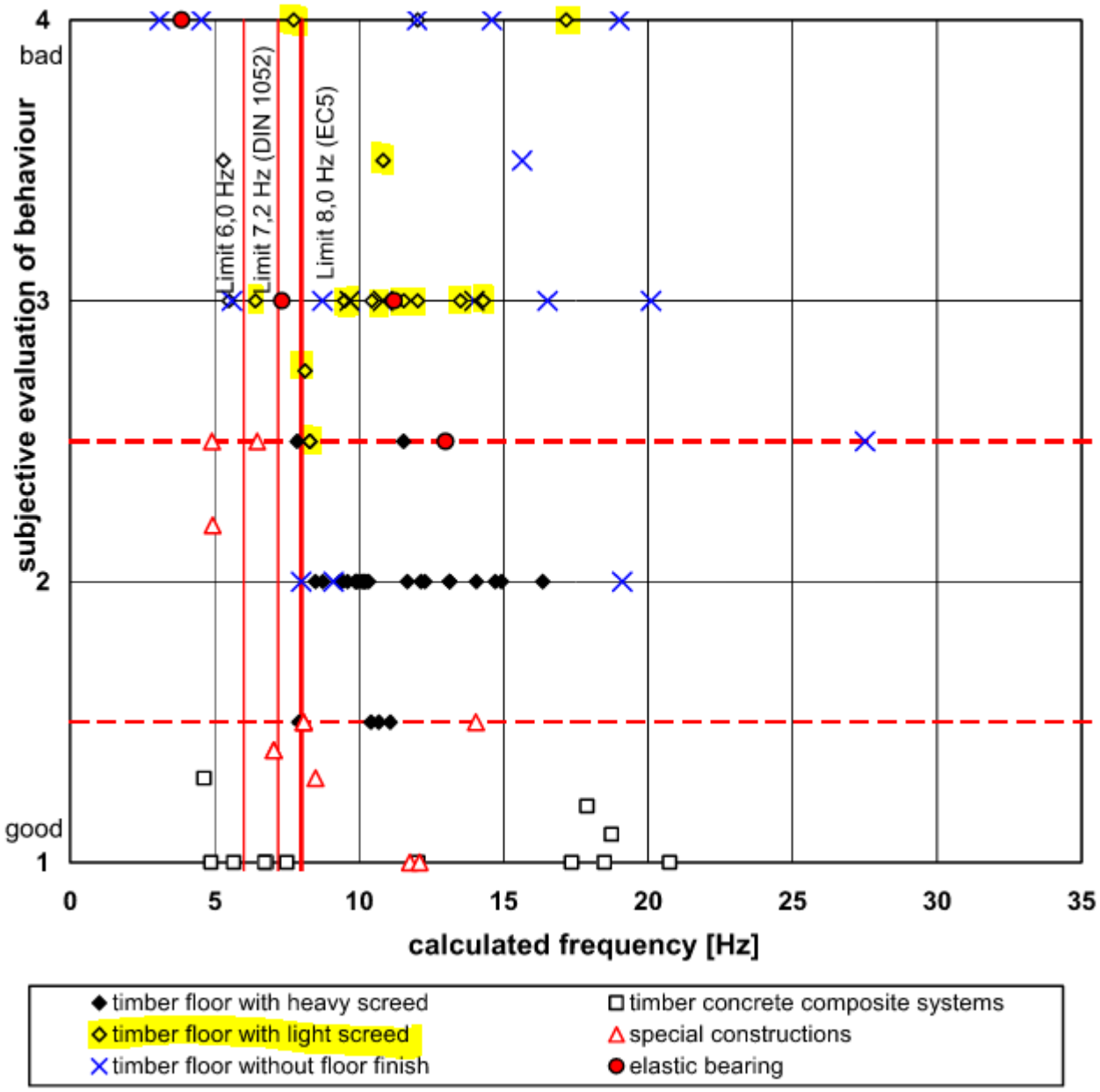
Joonis 4. Mõõdistatud ja arvutatud omavõnkesageduste võrdlusdiagramm [9]

Diagrammis tuleb tähelepanu pöörata kollaselt esile tõstetud väärtustele, mis esindavad lõputöö huviorbiidis olevaid konstruktsioone. Punane pidevjoon tähendab mõõdistatud ja arvutatud väärtuste võrdelist seost ja katkendjooned ebavõrdset seost. Graafikust võib järeldada, et peaaegu 80% juhtudest olid mõõdistatud väärtused suuremad kui arvutatud väärtused, ehk vibratsioonimugavuse seisukohalt positiivses suhtes. Suurem osa mõõdistatud väärtusi erines arvutatud väärtustest ligikaudu 20% võrra, äärmisel juhul ka 70%. Kolmel juhul oli arvutatud väärtus suurem kui mõõdistatud väärtus, mis tähendab, et otsest järeldust üledimensioneerimise suhtes teha ei saa. [9]

Lisaks objektiivsele uurimismetoodikale kasutati ka subjektiivset hinnangut. Subjektide arvu ja nende isikuandmeid ei ole avaldatud. Hindamisskaala koostati 4-palli süsteemis. Väärtus 1 vastas olukorrale, kus vibratsioonist tingitud ebamugavusi ei täheldatud. Väärtus 4 vastas olukorrale, kus vibratsioon tekitas tõsiseid ebamugavusi. Graafikud koostati nii arvutatud tulemuste (Joonis 5) kui mõõdetud tulemuste kohta (Joonis 6). [9]



Joonis 5. Subjektide hinnang vibratsioonimugavuse kohta (mõõdetud põranda omavõnkesagedus) [9]



Joonis 6. Subjektide hinnang vibratsioonimugavuse kohta (arvutatud põranda omavõnkesagedus) [9]

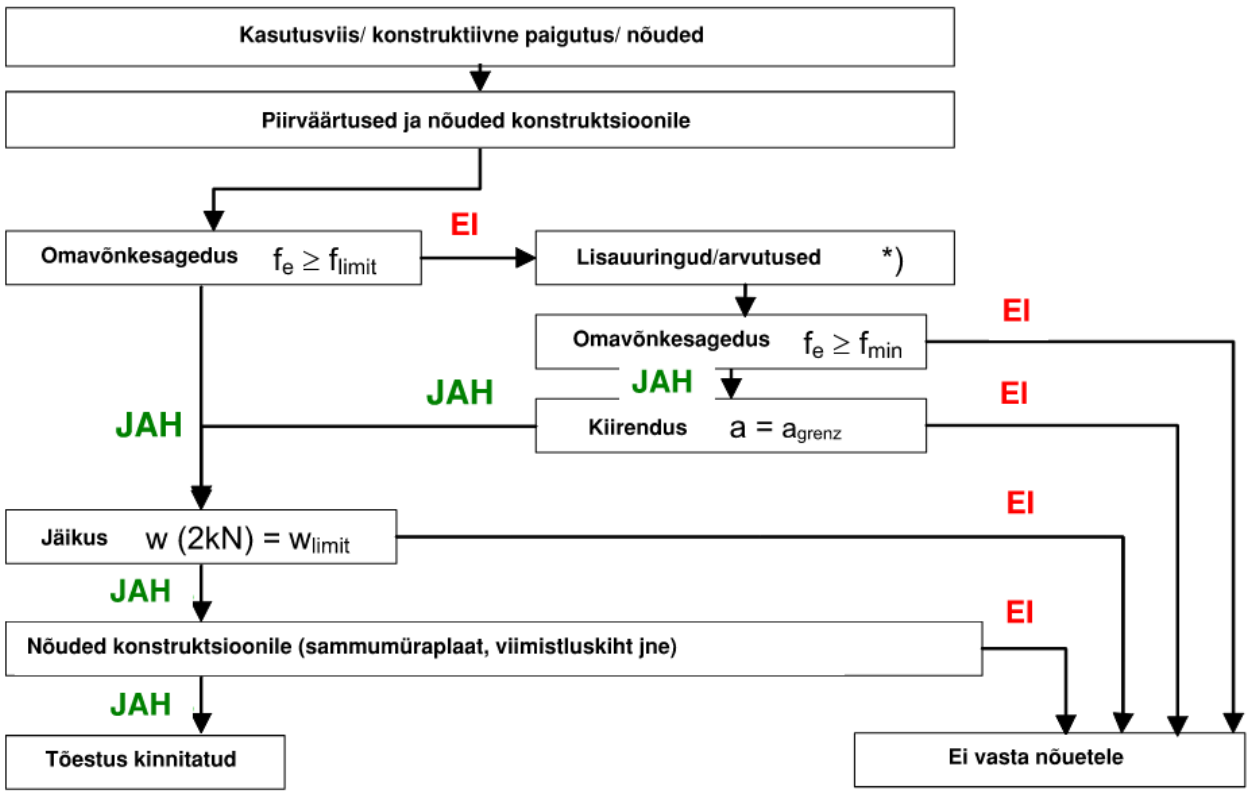
Graafikus tuleb jällegi tähelepanu pöörata kollaselt esile tõstetud väärtustele, mis esindavad lõputöös uuritava põrandakonstruktsiooni tüüpi. Mõlemas graafikus kerkib tugevalt esile fakt, et subjektid ei ole kasutusmugavusega rahul. Olukorra tõsidust väljendab ka asjaolu, et Eurokood 5 olevast omavõnkesageduse miinimumnõudest 8 Hz jäävad suurem osa vastuseid mõlemas graafikus paremale poole. [9]

Sellest on võimalik teha vaid üks järeldus – vibratsiooni tõsidust ei ole arvutusmetoodikate koostamisel piisavalt hinnatud ja kehtestatud piirväärtused ei ole asjakohased. [9]

Uuringu üheks osaks oli ka laboris ideaaltingimustes vahelae testimine ja analüüsimine. Uuringu raportis on selle protseduuri kohta liiga vähe ja üldistavat informatsiooni, mistõttu ei anna see lõputööle lisandväärtust.

Üks oluline fakt, mis ajendas teadlasi täiendavaid katseid laboratooriumis läbi viima, oli staatilise- ja ekspluatatsioonimudeli erinevused. Erinevusest tingitud tulemusi kujutab joonis (Joonis 4), kus mõõdistatud ja arvutatud põranda omavõnkesagedused ei ole võrdelised. Erinevuse põhjuseks olid vaheseinad, mis olid staatilises mudelis määratud mittekandvaks, kuid täitsid ekspluatatsioonimudelis kandvat rolli. Sellest tulenevalt vähenes ekspluatatsiooniolukorras põranda sildeava pikkus ja mõjutas vibratsioonitulemusi oluliselt positiivses suunas. [9]

Uuringu ühe tulemusena koostati vibratsiooniohutute põrandate projekteerimisprotsessi diagramm, mida iga projekteerija rakendada võiks. Diagramm on esitatud alloleval joonisel (Joonis 7). [9]



Joonis 7. Projekteerimisprotsessi diagramm [9]

Joonisel (Joonis 7) oleva projekteerimisprotsessi diagrammi kasutamiseks tuleb eeldusinformatsioonina välja selgitada põrandakonstruktsiooni kasutusnõuded. Uuringu üheks tulemiks oli kasutusnõuetel põhinev kriteeriumite tabel, mis on abivahend lähteinformatsiooni kaardistamiseks [9]. Tabel on esitatud alloleval joonisel (Joonis 8).

nõuded vibratsiooni suhtes	kõrgemate nõudmistega põrandad	madalamate nõudmistega põrandad	põrandad ilma nõudmisteta
hindamine	1,0 kuni 1,5	1,5 kuni 2,5	2,5 kuni 4,0
paigaldusasend	korrused erinevate kasutusüksuste vahel	korrused ühe kasutusühiku vahel	
uurimisprojekti käigus uuriti kasutusviisi	nt väikese avaga koridorid, nt korrused erinevate kasutajate vahel, korrused kortermajades või korrused büroohoonetes	nt ühepereelamu korrused, olemasolevate hoonete korrus või kokkuleppel omanikuga	nt põrandad kasutamata ruumide all või väljaehitamata pööningukorrustel
vibratsioonide tajumise kirjeldus	Vibratsioonid ei ole tajutavad või on tajutavad ainult neile keskendudes. Vibratsioon ei ole häiriv.	Vibratsioon on tajutav, kuid mitte häiriv.	Vibratsioon on selgelt tajutav ja mõnikord tüütu.
sageduse kriteerium $f_e \geq f_{limit}$	$f_{limit} = 8\ Hz$	$f_{limit} = 6\ Hz$	-
jäikuse kriteerium / ühekordsest koormusest $w(2kN) \leq w_{limit}$	$w_{limit} = 0{,}5\ mm$	$w_{limit} = 1{,}0\ mm$	-
lisauuring / kiirendus, kui $f_e < f_{limit}$	$f_{min} \leq f_e < f_{grenz}$ where $f_{min} = 4{,}5\ Hz$ and $a_{limit} = 0{,}05\ m/s^2$	$f_{min} \leq f_e < f_{grenz}$ where $f_{min} = 4{,}5\ Hz$ and $a_{limit} = 0{,}10\ m/s^2$	-
nõuded ehitusele	ujuva tasanduskihi, raske tasanduskihi või kerge tasanduskihi paigaldamine täidisele või mitte, vt tabelit		-

Joonis 8. Kasutusnõuetel põhinev kriteeriumite tabel [9]

Lisaks jõuti uuringu käigus järeldusele, et põranda omavõnkesageduse kriteeriumi kõrval omab ehk mõnevõrra suuremat tähtsust ja osakaalu rakendatav staatilise koormuse väärtus ja sellest tekkiv hetkeline läbipaine. Eurokood 5 on vibratsiooni arvutusmetoodikas staatiliseks koormuseks määratud 1 kN, mis on uuringu osaliste jaoks liialt optimistlik väärtus [9], [12]. Seetõttu otsustati staatilist koormust ja sellest tekkivat hetkelise läbipainde arvutusmetoodikat modifitseerida. Uueks staatilise koormuse väärtuseks pakuti välja 2 kN ja modifitseeritud hetkelise läbipainde, *w* (2 kN) valem esitati järgnevalt (1) [9]:

$$w(2\ kN) = \frac{2 \cdot l^3}{48 \cdot EI_l \cdot b_{w(2kN)}}, \tag{1}$$

kus l – põranda sildeava pikkus, m;

EI_l – põranda sildeava suunas vastav paindejäikus laiusühiku kohta, Nm^2/m;

$b_{w(2kN)}$ – põrandatala (ribi) ristlõike laius, m.

Põrandatala (ribi) ristlõike laiuse $b_{w(2kN)}$ (mm) leidmiseks tuleb rakendada tingimust (2) [9]:

$$b_{w(2kN)} = min \begin{pmatrix} b_{ef} \\ b\ (width\ of\ floor) \end{pmatrix}, \tag{2}$$

kus b_{ef} – vöö efektiivne laius, m;

b – põranda laius, m.

Vöö efektiivlaiuse b_{ef} (mm) leidmiseks modifitseeritud valem (3) [9]:

$$b_{ef} = \frac{b}{1{,}1 \cdot \alpha}, \tag{3}$$

kus b – põranda laius, m;

α – tegur, leitav valemiga (4).

Teguri α leidmiseks koostati valem (4) [9]:

$$\alpha = \frac{b}{l} \cdot \sqrt[4]{\frac{EI_l}{EI_b}}, \tag{4}$$

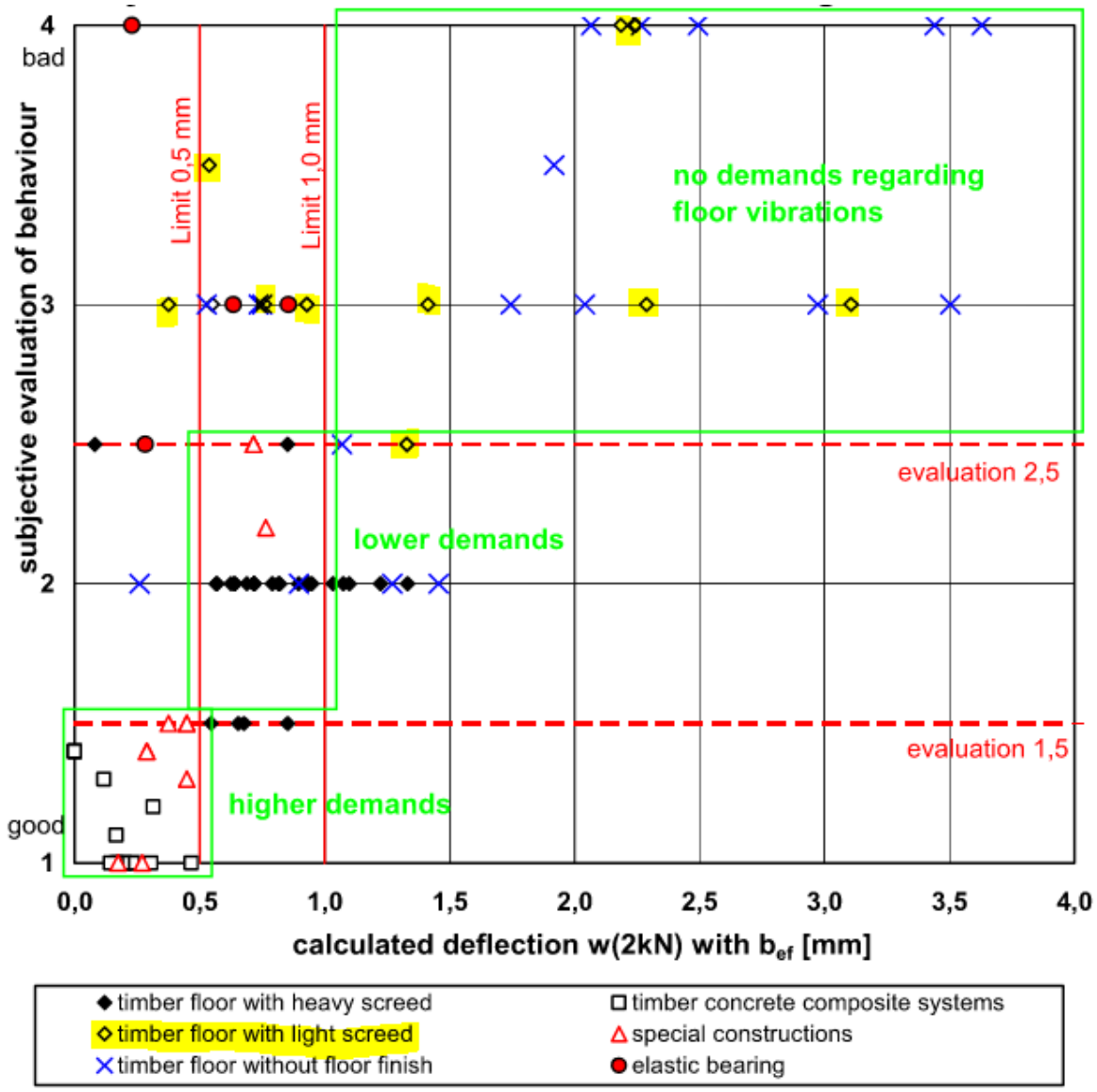
kus b – põranda laius, m;

l – sildeava pikkus, m;

EI_l – põranda sildeava suunas vastav paindejäikus laiusühiku kohta, Nm^2/m;

EI_b – põranda pikkuse suunas vastav paindejäikus laiusühiku kohta, Nm^2/m.

Põhjus, miks Eurokood 5 sisaldavat vibratsiooni arvutusmetoodikat ja staatilist koormust modifitseeriti, oli modifitseeritud valemi (1) abil leitud hetkelise läbipainde väärtuse ja subjektiivse hinnangu positiivne korrelatsioon (Joonis 9). Tähelepanu tuleb pöörata asjaolule, et eelnevalt välja toodud arvutusmetoodika ei ole hetkeseisuga standardiseeritud ja rahvuslikes lisades esindatud. Tegemist on vaid uuringu järelduste põhjal koostatud arvutusmetoodikaga, mis võiks olla lähteinformatsiooniks Eurokood 5 uuendamisele. Kõik puitkonstruktsioonidega seotud arvutused tuleb teostada vastavalt kehtivale Eurokood 5 ja sinna kuuluvate rahvuslike lisade alusel. [9]



Joonis 9. Valemi (1) abil leitud hetkelise läbipainde ja subjektiivse hinnangu korrelatsioon [9]

Kollaselt esile tõstetud väärtused esindavad lõputöös uuritavaid vahelaekonstruktsioone. Nende asetus graafikus ei väljenda positiivsust. Eelduslikult peaksid ja võiksid need väärtused paikneda all vasakus nurgas, äärmisel juhul keskmises sektsioonis. Graafikut aitab paremini mõista joonis (Joonis 8), kus on kirjeldatud kasutusnõudeid ja nende kriteeriumeid. [9]

Uuringu käigus saadud tulemuste järeldusena toodi välja, et ratsionaalsete lahendustega puitkonstruktsioonist ja kerge tasanduskihiga vahelagesid on peaaegu et võimatu projekteerida elamisühikute eraldamiseks. Ühe elamisühiku sees olevale vahelae konstruktsioonile soovitatakse rangelt lisada piisavalt paksus kihis sammumüraisolatsioon ja ujuv põrandakate. Sammumüra isolatsiooni parameetreid ei ole täpsustatud. [9]

3 MOODULI GEOMEETRIA JA ARVUTUSSKEEM

Konstruktsioonis tekkiva vibratsiooni analüüsimiseks tuleb esmalt määrata mooduli geomeetria ja teha sellele vastav arvutusmudel. Moodulite geomeetria määratakse üldjuhul juba arhitektuurses faasis, kuna just geomeetria on see, mis saab määravaks arhitektuursete ja konstruktiivsete lahenduste välja töötamisel. Moodulprojektide märksõnaks on eelkõige standard ja optimaalsus, mis loob eeldused efektiivseteks ja kulutõhusateks lahendusteks. Loomulikult ei ole välistatud igasugused erilahendused, mis nõuavad spetsiaalset lähenemist ja ei kuulu masstootmise valdkonda. Kui mooduli geomeetria määrab suuresti konstruktiivsed ja arhitektuursed lahendused, siis ka mooduli geomeetrial on omad piirangud, millest kõige määravamad tulenevad transpordist. Mooduleid transporditakse mitmel erineval viisil ja igal viisil on omad piirangud ja standardid, mille ületamine tähendab komplekssemaid konstruktiivseid lahendusi ja loomulikult suuremat projekti eelarvet. Suuremahulistes moodulprojektides võivad transpordikulud moodustada märkimisväärse osa kogu projekti eelarvest. Sellisel juhul oleks kuluefektiivne ja konstruktiivselt ratsionaalne määrata mooduli geomeetria vastavalt transpordinõuetest kaasnevatele kuludele. Transpordiviisidest suurima osakaalu moodustab maatransport, mille nõuded riigiti varieeruvad, kuid mida käesolevas lõputöös ei käsitleta. Moodulite transport Norra ja Rootsi organiseeritakse paljudel juhtudel ka kaubalaevadega, ehk sellisel juhul tuleb arvestada nii maa- kui ka meretranspordi nõuetega.

Käesolevas lõputöös analüüsitava mooduli geomeetriaks on järgmised parameetrid:

- laius 4 meetrit;
- pikkus 10 meetrit;
- kõrgus 3,7 meetrit.

Tegemist on optimaalsete ja üpris tüüpiliste parameetritega, mida võib märgata ka mitmete puitmajatootjate kodulehtedel. Tabelis (Tabel 1) on välja toodud erinevate tehasemaja tootjate maksimaalsed mooduli gabariidid.

Tabel 1. Puitmajatootjate maksimaalsed mooduli gabariidid [13]–[18]:

Ettevõte	**Laius (*b*), m**	**Pikkus (*l*), m**	**Kõrgus (*h*), m**
Timbeco Woodhouse OÜ	4,5	12,5	4,2
AS Matek	4,2	11,5	3,0
Kodumaja AS	5,3	14,5	4,5
Wohom OÜ	5,5	12,0	4,5
Ramirent Baltic AS	3,0	9,6	3,3
Harmet Constructions OÜ	5,2	15,6	5,6

Vaadates tabelis olevaid väärtusi, siis või eeldada, et lõputöös analüüsitava mooduli gabariidid on transporti silmas pidades optimaalsed ja sobituvad tootjate võimekusse.

Konstruktiivse projekteerimise jaoks on lisaks geomeetriale vaja teada ka konstruktiivse elemendi arvutusskeemi. Konstruktiivseks elemendiks käesolevas lõputöös on teise korruse mooduli põrandaelement. Arvutusskeem on konstruktsiooni või selle osa analüütiline skeem, mis kirjeldab konstruktsiooni käitumist koormuse/koormuste rakendamisel. Optimaalse keerukuse ja vastavalt reaalsele situatsioonile kehtiv arvutusskeem loob eeldused soovitud projekteerimistulemuste saavutamiseks. Arvutusskeem plaanilises vaates on esitatud (Joonis 26, graafiline osa) ja lõikes (Joonis 27, graafiline osa). Lihtsustuse tegemiseks ja tagavara kasuks arvestamisel võrdub vahelae geomeetria mooduli geomeetriaga.

Analüüsitava põrandaelemendi arvutusskeemi lähteandmed on järgnevad:

- põrandaelemendi tugedeks on kõik elemendi perimeetris olevad seinad, ehk element on toestatud neljast küljest;
- põrandaelementi käsitletakse lihttalana, kus ühes otsas on liikuv liigendtugi ja teises liigend;
- põrandaelemendi kandva konstruktsiooni peale on kinnitatud liimiga jäigastav põrandaplaat, mis varieerub konstruktsioonitüüpides;
- konstruktsiooni omakaal, esitatud konstruktsioonitüüpide peatükis;
- konstruktsiooni kandva- ja jäigastava elemendi parameetrid, mis on esitatud konstruktsioonitüüpide peatükis;
- põrandaelemendi geomeetria, *l* x *b;*
- põrandaelementi arvestatakse puitribipaneelina;
- põrandakonstruktsiooni paindejäikust *EI* arvestatakse T-tala kontseptsiooni põhimõttel, kus ülemises tasapinnas olev vöö ja ribi ehk sein töötavad homogeense konstruktsioonina.

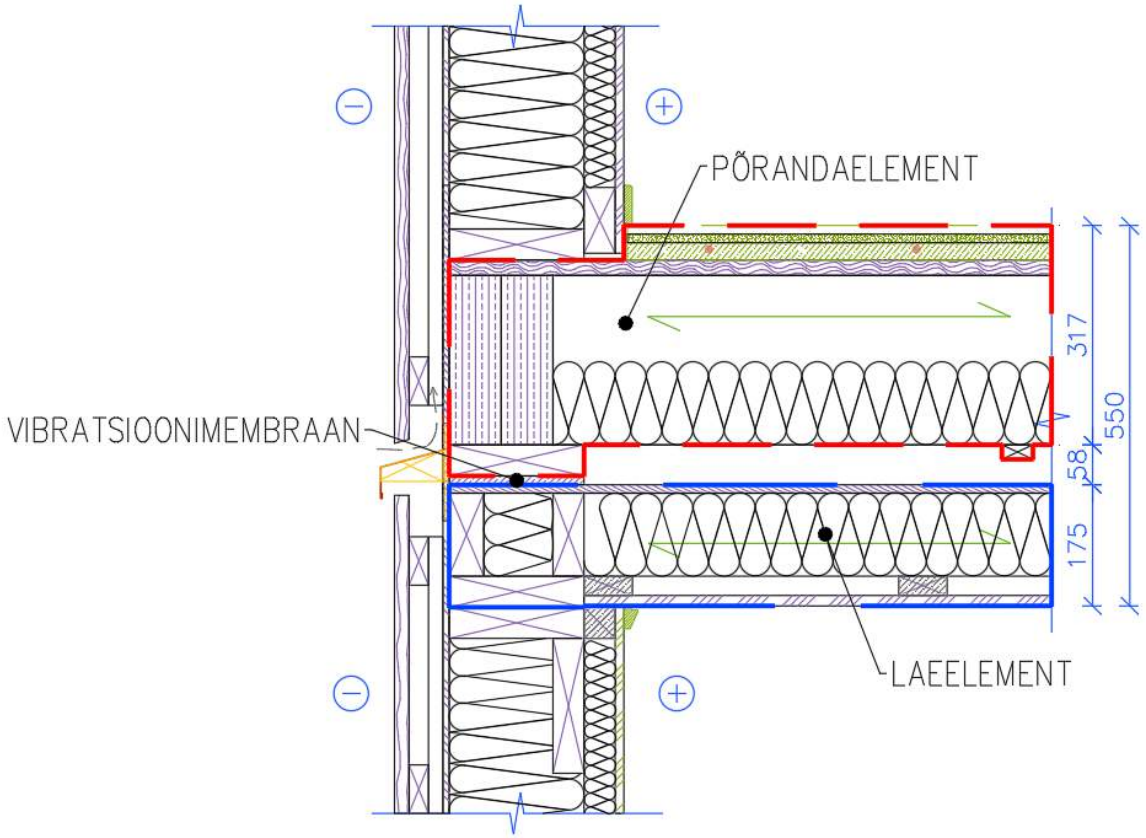
4 MOODULI PUITVAHELAE TEHNOLOOGIA KIRJELDUS

Käesolevas peatükis tehakse põgus ülevaade moodulhoone puitvahelae tehnoloogiast. Peatüki paremaks hoomamiseks kaasatakse teemasse võrdlusaspekt elementmaja vahelae näol.

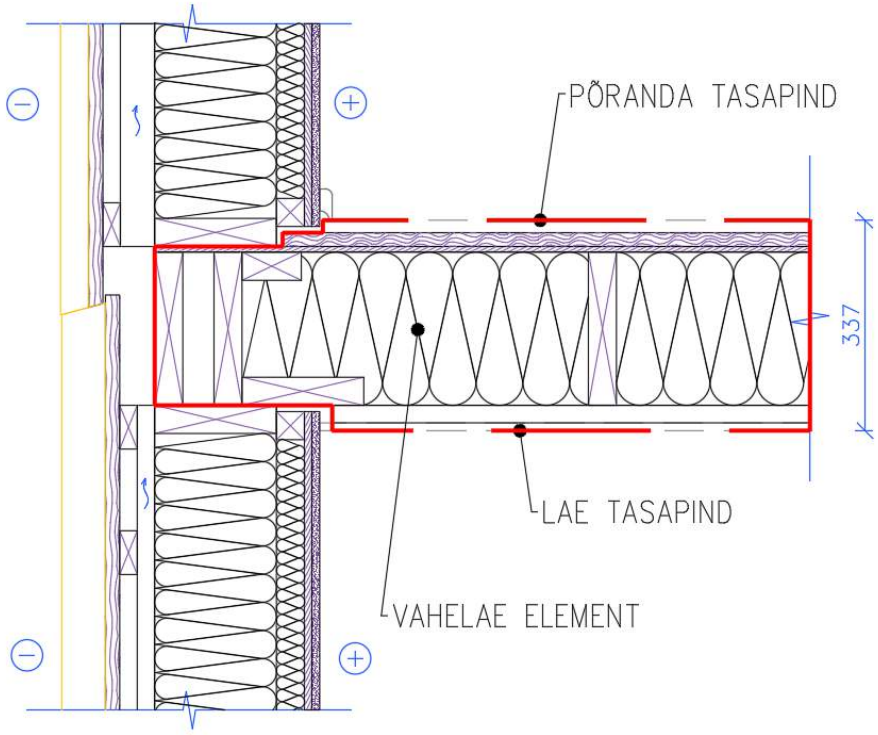
Elementmaja ja moodulmaja. Suur osa inimestest, kes ehitusterminoloogiaga niivõrd hästi kursis ei ole, kalduvad neid kahte terminit tihtipeale segi ajama. Mõlema termini ühiseks tunnuseks on tehases eeltoodetud produkt. Elementmaja, nii nagu ka termin ise ütleb, koosneb elementidest. Tehases toodetakse elemendid valmis ja tarnitakse objektile, kus neid monteeritakse. Tulemuseks on elementmaja. Moodulhoone koosneb samuti elementidest, kuid nende montaaž ei toimu objektil, vaid tehases. Tehases ühendatakse omavahel põrandaelement seinaelementidega ja laeelemendiga või katuseelemendiga, sõltuvalt korrusest ning tulemusena saadakse ruumelement. Objektil tõstetakse moodulid ehk ruumelemendid kokku ja tehakse vajalikud tehnosüsteemide ühendused ning viimistlustööd. Tulemusena saadakse ehitusterminoloogia järgi moodulmaja.

Moodulhoone suurimad ehitustehnoloogilised erinevused võrreldes elementmajaga tulenevad põranda- ja vahelaekonstruktsioonist. Käesolevas peatükist jäetakse välja esimese korruse põrandakonstruktsiooni erinevuse kirjeldus ja keskendutakse vahelaele.

Moodulhoonel jaguneb konstruktiivses mõistes vahelagi kaheks osaks. Esimese korruse moodustavatel moodulitel on ülemises horisontaalpinnas laeelement, millele rakendub vaid konstruktsiooni omakaal. Teise korruse moodustavatel moodulitel on alumises horisontaalpinnas põrandaelement, millele rakenduvad nii kasuskoormus kui ka konstruktsiooni omakaal. Ehk kokkuvõttes, tekib korrust eraldav vahelagi lae- ja põrandaelemendist (Joonis 10). Seetõttu tulebki moodulhoone vahelage mõista kui kahest eraldi elemendist koosnevat konstruktsiooni. Elementmajas koosneb vahelagi ühest elemendist, kus ülemist tasapinda nimetatakse põrandaks ja alumist laeks (Joonis 11).



Joonis 10. Moodulhoone vahelae sõlm



Joonis 11. Elementmaja vahelae sõlm

Joonisel (Joonis 10) ja joonisel (Joonis 11) võib näha primaarsemat erinevust, mis on vahelae konstruktsiooni paksus. Moodulhoonel on see ligikaudu 70% paksem võrreldes elementmaja vahelaega. Minnes mitte väga detailidesse, võib pelgalt sellest faktis järeldada, et moodulhoone vahelagi tagab parema kasutusmugavuse võrreldes elementmajaga. Kasutusmugavust mõjutavad lisaks vibratsioonile ka akustilised omadused. Konstruktsiooni paksusel on ka omad miinused, millest aktuaalseim on ruumi kadu.

Moodulhoonel on kaks konstruktsiooni – laeelement ja põrandaelement omavahel eraldatud spetsiaalsest polüuretaanist valmistatud elastomeeriga, mis aitab vähendada moodulite vahelise müra ja vibratsiooni levimist [19]. Spetsiaalne elastomeer tuleb vastavalt koormustele dimensioneerida, et materjal täidaks oma ettenähtud eesmärki. Dimensioneerimise protsessi detailidesse käesolevas lõputöös ei minda.

Moodulhoone vahelae põrandaelemendil on vibratsiooni seisukohalt üks konstruktiivne puudus. Vibratsioon on tugevalt seotud põranda jäikusega mõlemas põranda suunas EI_l ja EI_b, mida moodulhoone puitvahelae põrandaelemendis tagatakse peamiselt jäigastavate põrandaplaatidega ja põikisidemetega karkassi tasapinnas. Elemendi alumises tasapinnas seejuures ühtegi jäigastavat elementi ei kasutata. Üldjuhul on alumises tasapinnas ainult terasvõrk, mille eesmärk on vältida soojustusmaterjali eemaldumist. Elementmaja vahelae konstruktsioonil on seejuures jäigastavad elemendid mõlemas tasapinnas. Ülemises tasapinnas, nii nagu ka moodulhoone puitvahelae põrandaelemendil, täidab jäigastavat funktsiooni põrandaplaat ja alumises tasapinnas tihe põikiroovitus. Vajadusel lisatakse karkassi tasapinda ka põikisidemed.

Moodulhoone puitvahelae põrandaelemendi ülemises tasapinnas (v.a jäigastav põrandaplaat) on võimalik teha mitmeid variatsioone, sõltuvalt lähteülesandest ja kliendi soovist. Käesolevas lahenduses (Joonis 10) on kasutatud jäigastava plaadi peal põrandaküttematti, põrandakipsi ja viimistlusena puitparketti, mille all ventileeritav aluskate.

5 EUROKOOD 5 VIBRATSIOONI ARVUTUSMETOODIKA

Käesolev peatükk kirjeldab vibratsiooni arvutusmetoodikat, mis põhineb puitkonstruktsioonide projekteerimist sätestaval dokumendil nimega „Eurokood 5“. Vibratsiooni kontrolli eeldusinformatsioonina tuleb leida põrandakonstruktsiooni A ja B puhul efektiivsed paindejäikused EI_l ja EI_b ja vöö efektiivlaius b_{ef}. Paindejäikus tugevamas suunas arvutatakse T-tala kontseptsiooni põhimõttel, kus jäigastav põrandaplaat (vöö) ja tala (sein) töötavad homogeense konstruktsioonina. Täpsustav informatsioon asub joonisel (Joonis 12) [1]. Konstruktsioonitüüp C on konstruktiivselt mõnevõrra keerukam ja arvutusmetoodikalt spetsiifilisem, kuna homogeense konstruktsiooni moodustavad I-tala ja jäigastav põrandaplaat. Seetõttu käsitletakse seda teemat konkreetse konstruktsioonitüübi peatükis.

5.1 Efektiivse paindejäikuse EI_l ja EI_b arvutusmetoodika

Põrandakonstruktsiooni efektiivne paindejäikus *EI* koosneb kahest komponendist [1]:

- Materjalide keskmised elastsusmoodulite väärtused, $E_{mean;}$
- ristlõike inertsimomendid vaadeldava telje suhtes, *I*.

Efektiivne paindejäikus EI_{ef} (Nmm^2) leitakse valemiga (5) [1]:

$$(EI_{ef}) = \sum_{i=1}^{2} (E_i I_i + E_i A_i a_i^2), \tag{5}$$

kus E_i – materjali keskmise elastsusmooduli väärtus, N/mm^2;

I_i – ristlõike inertsimoment vaadeldava telje suhtes, mm^4;

a_i – üksikelementide raskuskeskmete kaugus liitristlõike raskuskeskmest, mm;

A_i – ristlõike pindala, mm^2.

Plaadi efektiivset paindejäikust EI_b (Nmm^2) leitakse valemiga (6) [20]:

$$EI_b = E \cdot I, \tag{6}$$

kus E – jäigastusplaadi keskmise elastsusmooduli väärtus, N/mm^2;

I – ristlõike inertsimoment vaadeldava telje suhtes, mm^4.

Valemiga (5) ja (6) leitud väärtused tuleb jagada laiusühikuga, et väärtus ja valemi vorming oleks korrektne. Paindejäikus EI_l tuleb jagada talade sammuga ehk 0,6 m. Paindejäikus EI_b tuleb jagada ühe laiusühikuga ehk 1,0 m. Tulemuseks saadakse väärtuse ühikuks Nmm^2/m.

Vööelemendi raskuskeskme kaugus liitristlõike raskuskeskmest a_1 (mm) leitakse valemiga (7) [1]:

$$a_1 = \frac{E_2 A_2 (h_1 + h_2)}{2(E_1 A_1 + E_2 A_2)}, \tag{7}$$

kus E_1 – vöömaterjali keskmise elastsusmooduli väärtus, N/mm^2;

h_1 – vöö ristlõike kõrgus vaadeldavas lõikes, mm;

h_2 – seina ristlõike kõrgus vaadeldavas lõikes, mm;

A_1 – vöö ristlõike pindala, mm^2;

A_2 – seina ristlõike pindala, mm^2;

E_2 – seinamaterjali keskmise elastsusmooduli väärtus, N/mm^2.

Seina raskuskeskme kaugus liitristlõike raskuskeskmest a_2 (mm) leitakse valemiga (8) [1]:

$$a_2 = \frac{h_1 + h_2}{2} - a_1, \tag{8}$$

kus a_1 – vöö raskuskeskmete kaugus liitristlõike raskuskeskmest, mm;

h_1 – vöö ristlõike kõrgus vaadeldavas lõikes, mm;

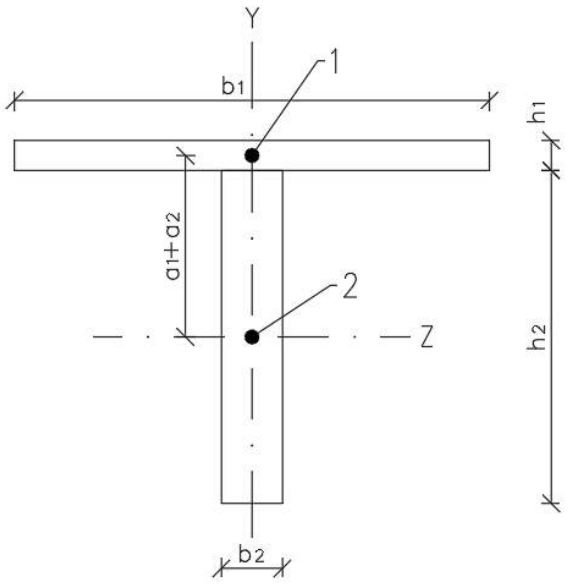
h_2 – seina ristlõike kõrgus vaadeldavas lõikes, mm.

Ristkülikukujulise ristlõike telginertsimoment I_z (mm^4) leitakse valemiga (9) [1]:

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12}, \tag{9}$$

kus b – ristlõike laius, mm;

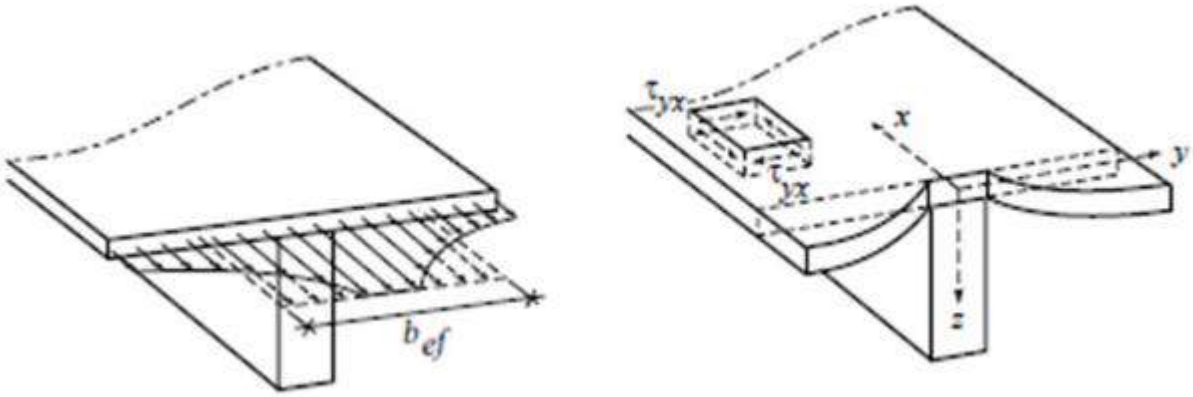
h – ristlõike kõrgus, mm.



Joonis 12. Ribipuitpaneeli ristlõige: 1 – vöö (plaat), 2 – ribi (tala) [1]

5.2 Vööplaadi efektiivse laiuse b_{ef} arvutusmetoodika

T-tala teooria kasutamiseks puitribipaneelide puhul tuleb rakendada efektiivlaiuse kontseptsiooni. Vööplaadi efektiivset laiust, selgitav joonis (Joonis 15), väljendab ideaalset vöö laiust, kus vöö keskel on normaalpinged võrdsed teoreetiliste maksimaalsete pingetega, arvestades seejuures vööde nihkedeformatsioone (Joonis 13). Sellise kontseptsiooni puhul jääb vöös summaarne mõjuv jõud konstantseks ja tulemuseks on sama vastupanumoment. [1]



Joonis 13. Pingejaotus vöös [1]

Täpsemate arvutuste mitte tegemisel, rakendub homogeensele konstruktsioonile Eurokood 5 kohaselt I- või U-tala ühenduse kontseptsioon, mille vöö efektiivne laius b_{ef} (mm) leitakse valemiga (10) [1]:

$$b_{ef} = b_{c,ef} + b_w, \tag{10}$$

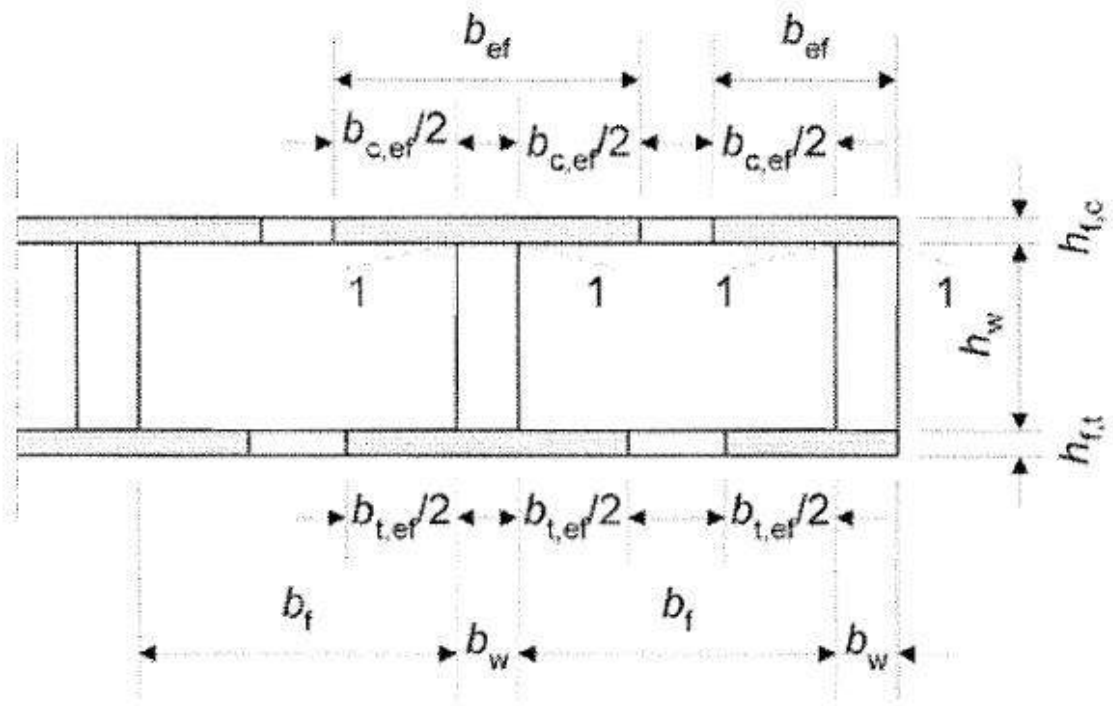
kus $b_{c,ef}$ – mõlkumisest tingitud maksimaalne vööplaadi efektiivlaius, mm;

b_w – seina ristlõike laius, mm.

Käesolevas lõputöös käsitlevas homogeenses konstruktsioonis asub vöö ülemises tasapinnas, ehk survetsoonis. Sellest tingitud, leitakse vöö maksimaalne efektiivlaius $b_{c,ef}$ mõlkumistingimust arvesse võttes (Joonis 13). Tabelis tuleb eristada materjale ja nende kiudude suundasid.

Vöö materjal	**Nihe**	**Mõlkumine**
Vineer, mille kiu suund välimises spoonis:		
Seina suunaline	$0{,}1\ell$	$20h_f$
Risti seinaga	$0{,}1\ell$	$25h_f$
Orienteeritud laastplaat	$0{,}15\ell$	$25h_f$
Laast- või kiudplaat juhusliku kiudude orientatsiooniga	$0{,}2\ell$	$30h_f$

Joonis 14. Nihkedeformatsioonist või mõlkumisest tingitud maksimaalne vööplaadi laius [12]



Joonis 15. Vöö efektiivlaiust b_{ef} selgitav lisajoonis [12]

5.3 Vibratsiooni arvutusmetoodika

Nii nagu ka eelnevates peatükkides mainitud, sätestab Eurokood 5 põrandakonstruktsioonidele omavõnkesageduse miinimumväärtuse 8 Hz. Nelinurkse põranda puhul, mis on neljast küljest toestatud, kehtib omavõnkesageduse f_1 (Hz) valem (11) [12]:

$$f_1 = \frac{\pi}{2l^2}\sqrt{\frac{(EI_l)}{m}}, \tag{11}$$

kus l – põranda sildeava, m;

EI_l – põrandakonstruktsiooni efektiivne paindejäikus sildeava suunas, Nm^2/m;

m – põrandakonstruktsooni mass, kg/m^2.

Tähelepanu tuleb pöörata asjaolule, et Eurokood 5 on vaikimisi paindejäikusena EI_l arvestatud plaadi ehk vöö paindejäikust ühiklaiuse kohta. Tegemist on lihtsustatud lähenemisega, kus vöö ja seina konstruktiivset homogeensust arvesse ei võeta. Käesolevas valemis (11) kasutatakse täpsema tulemuse saamiseks efektiivset konstruktsiooni paindejäikust, kus vöö ja sein töötavad homogeense konstruktsioonina. [12]

Teine põrandakonstruktsiooni iseloomustav parameeter, mida Eurokood 5 vibratsiooni arvutusmetoodikas käsitleb, on ühikimpulsi kiirusvaste ehk põranda vertikaalse vibratsiooni kiiruse algväärtus. Maksimaalset ühikimpulsi kiirusvastet v (m/Ns^2) nelinurkse ja neljast küljest toestatud põrandakonstruktsioonis arvutatakse valemiga (12) [12]:

$$v_{max} = \frac{4(0{,}4 + 0{,}6 \cdot n_{40})}{m \cdot b \cdot l + 200}, \tag{12}$$

kus l – põranda sildeava, m;

b – põranda laius, m;

m – põrandakonstruktsooni mass, kg/m^2;

n_{40} – omavõnkevormide hulk, mille omavõnkesagedus on alla 40 Hz.

Arvu n_{40} võib Eurokood 5 põhjal arvutada valemiga (13) [12]:

$$n_{40} = \left\{\left(\left(\frac{40}{f_1}\right)^2 - 1\right) \cdot \left(\frac{b}{l}\right)^4 \cdot \frac{(EI_l)}{(EI_b)}\right\}^{0{,}25}, \tag{13}$$

kus f_1 – põrandakonstruktsiooni omavõnkesagedus, Hz;

b – põranda laius, m;

l – põranda sildeva, m;

EI_l – põrandakonstruktsiooni efektiivne paindejäikus sildeava suunas, Nm^2/m;

EI_b – põrandakonstruktsiooni efektiivne paindejäikus pikkuse suunas, Nm^2/m.

Valemis tuleb arvestada tingimusega $EI_b < EI_l$. Lisaks, kui $n_{40} > 40$, võib saadud tulemuse hüljata. [12]

5.4 Vibratsiooni tingimused

Esimene tingimus, mida Eurokood 5 sätestab, on piirläbipaine a (mm), mis sõltub punktkoormusest tingitud maksimaalsest hetkelisest läbipaindest (14) [12]:

$$\frac{w}{F} \leq a, \tag{14}$$

kus w – maksimaalne vertikaalne hetkeline läbipaine, mis on põhjustatud mistahes punktis põrandale rakendatud vertikaalsest koondatud staatilisest jõust F, mm;

F – koondatud staatiline jõud, mis Eurokood 5 kohaselt on 1,0 kN.

Punktkoormus asetatakse põranda sildeava suhtes kõige ebasoodsamasse kohta, milleks on põranda sildeava keskpunkt. Eurokood 5 konkreetset läbipainde valemit välja ei too, kuid mainitud on fakti, et arvestada tuleb koormuse jaotusega. See tähendab, et korrektse läbipainde väärtuse leidmiseks

tuleb arvestada põrandakonstruktsiooni töötamist kahes suunas ehk paindejäikuste väärtustega EI_l ja EI_b. Põranda kahesuunalist paindejäikust arvestav maksimaalne hetkeline läbipaine w (mm) leitakse valemiga (15) [21]:

$$w \leq min \begin{cases} \dfrac{Fl^2}{42k_\delta(EI)_l} \\ \dfrac{Fl^3}{48s(EI)_l} \end{cases}, \tag{15}$$

kus F – koondatud koormus, kN;

l – põranda sildeava, m;

s – talade samm, m;

EI_l – põrandakonstruktsiooni efektiivne paindejäikus sildeava suunas, Nm^2/m;

k_δ – konstant.

Konstant k_δ leitakse valemiga (16) [21]:

$$k_\delta = \sqrt[4]{\frac{EI_b}{EI_l}}, \tag{16}$$

kus EI_l – põrandakonstruktsiooni efektiivne paindejäikus sildeava suunas, Nm^2/m;

EI_b – põrandakonstruktsiooni efektiivne paindejäikus pikkuse suunas, Nm^2/m.

Teise tingimusena toob Eurokood 5 välja põrandakonstruktsiooni ühikimpulsi kiirusvaste v (m/Ns^2), mis on esitatud kujul (17) [12]:

$$v \leq B^{(f \cdot \xi - 1)}, \tag{17}$$

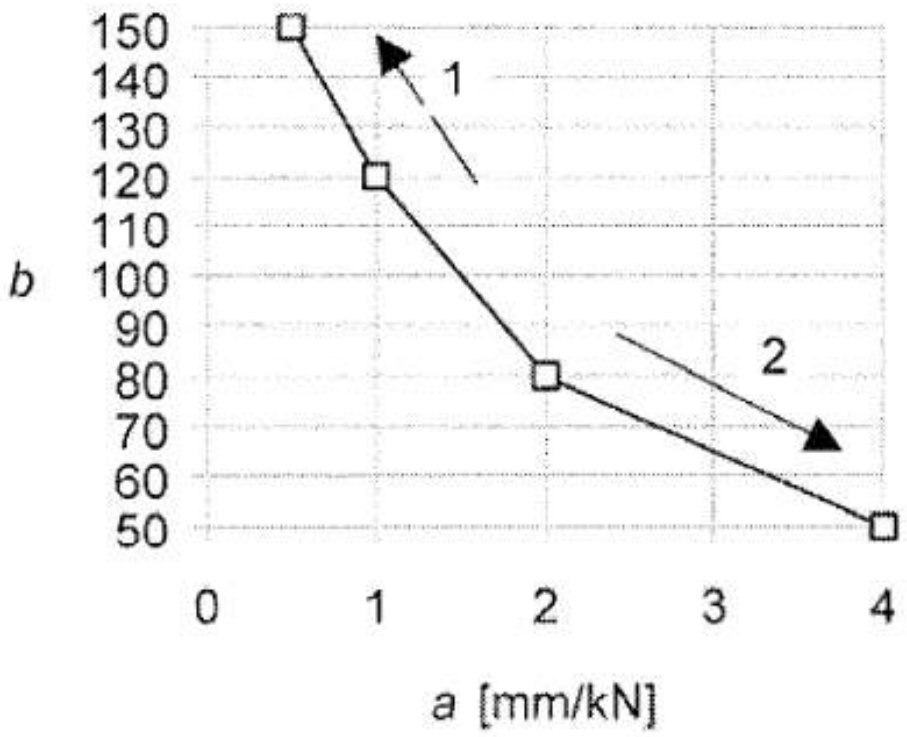
kus B – ühikimpulsi kiirusvaste piirväärtuse suurus, m/Ns^2;

f – põrandakonstruktsiooni omavõnkesagedus, Hz;

ξ – sumbuvustegur.

Parameeter B sõltub läbipainde piirväärtuse suurusest, mis on leitav jooniselt (Joonis 16). Sumbuvusteguri võib vaikimisi puit- ehk puidupõhiste põrandate jaoks võtta 0,01 (1%). Paremate väärtuste puhul tuleb selle kasutamist põhjendada [12]. Tähelepanu tuleb pöörata väärtusele B, mida ei tohi samastada väärtusega b, mis viitab põranda laiusele.

Tingimuste puhul võib märgata, et Eurokood 5 tinglike väärtusi dokumendis ei sätesta. Selle asemel on esitatud informatiivne diagramm, kus on välja toodud parameetrite a ja B korrelatsioon. Väärtus 1 väljendab head teostust ja väärtus 2 halba teostust (Joonis 16). [12]



Joonis 16. Soovitatud piirväärtused *a* ja *B* korrelatsioonist [12]

Konkreetsed piirväärtused ja tingimused on välja toodud Eurokood 5 rahvuslikes lisades. Lisaks tuleb jälgida arvutusmetoodikate erinevusi. Erinevused on välja toodud järgmises peatükis. [12]

6 EUROKOOD 5 RAHVUSLIKUD LISAD

Käesolevas peatükis tuuakse välja Eesti ja populaarsemate puitmajatootjate eksportriikide Eurokood 5 rahvuslikud lisad. Dokumendis keskendutakse vibratsiooni arvutusmetoodika erisustele ja piirväärtustele. Eksportriikideks on Soome, Rootsi ja Norra.

Eurokood 5 ehk EN 1995-1-1 on jätnud lahtiseks rahvuslike lisade jaoks järgnevad peatükid, mis on esitatud joonisel (Joonis 17). [12], [22]

2.3.1.2(2)P	Koormuste kestusklasside määramine
2.3.1.3(1)P	Kasutusklassid
2.4.1(1)P	Materjalide osavarutegurid
6.1.7(2)	Nihe
6.4.3(8)	Kahekaldega, kõverad ja kahekaldega altkõverusega talad
7.2(2)	Talade piirläbipainded
7.3.3(2)	Vibratsioonide piirväärtused
8.3.1.2(4)	Puit-puiduga naelliited: Juhised otsakius asuvatele naeltele
8.3.1.2(7)	Puit-puiduga naelliited: Lõhestumistundlikud liigid
9.2.4.1(7)	Seinapaneelide (diafragmade) lihtsustatud arvutusmeetod
9.2.5.3(1)	Tala- või sõrestiksüsteemi jäikussidemete modifikatsioonitegurid
10.9.2(3)	Ogaplaatsõrestike paigalduse kõrvalekalded: suurim kõverus sõrestiku tasandist
10.9.2(4)	Ogaplaatsõrestike paigalduse kõrvalekalded: suurim kõrvalekalle vertikaalasendist

Joonis 17. Erinõuded vastavalt Euroopa standardile „Eurokood 5“ [12], [22]

Rahvuslike lisade põhjuseks on eelkõige riikide erinev ehitustava, mis omakorda sõltub kliimast, ümbritsevast keskkonnast, kultuurist, inimeste nõudlikkusest, majandusest ja paljudest muudest mõjuritest.

6.1 Eesti

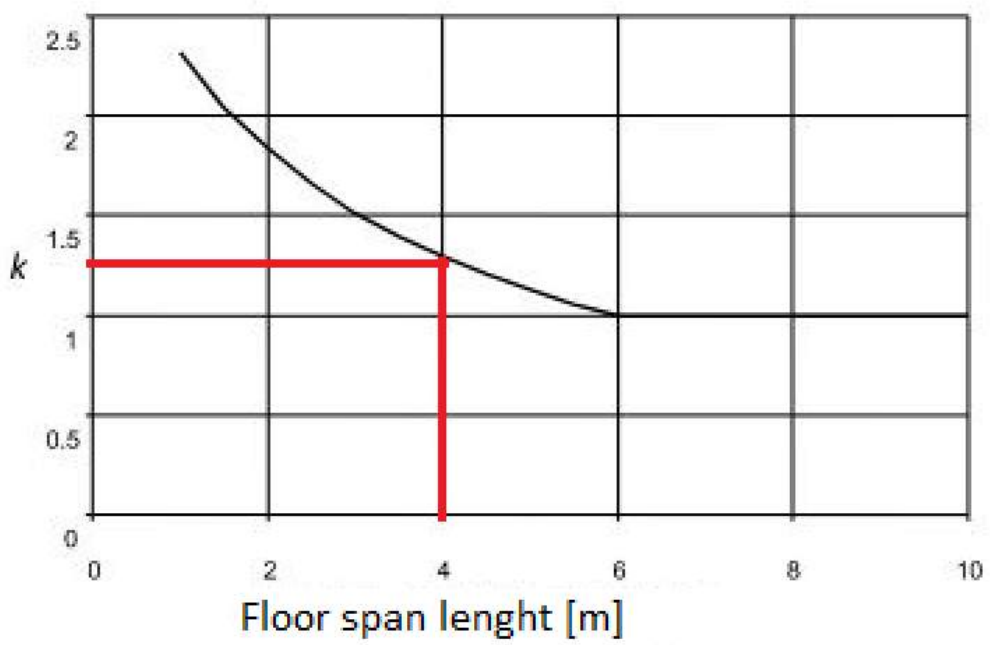
Eesti Vabariigis reguleerib puitkonstruktsioonide projekteerimist dokument nimega „EVS-EN 1995-1-1:2005/A2:2014“. Dokumendis keskendutakse peatükile NA.7.3.3(2), mis käsitleb elamute põrandate vibratsioone. [22]

Eesti Eurokood 5 rahvuslikus lisas tuuakse välja vaid põranda omavõnkesageduse piirväärtus, milleks on 8 Hz. Maksimaalse läbipainde ja ühikimpulsi piirväärtuste puhul viidatakse joonisel (Joonis 16) olevale diagrammile. Põrandakonstruktsiooni kasutusmugavuse huvides tuleks valida väärtused, mis esindaks head teostust. Tellija ja hoone kasutaja seisukohast valib autor piirläbipainde väärtuseks 1,0 mm/kN, millele vastab ühikimpulsi kiirusvaste piirväärtus 120 m/Ns^2. Vibratsiooni arvutusmetoodika põhineb Eurokood 5 põhiosal, mida on kirjeldatud viiendas peatükis. Maksimaalse vertikaalse läbipainde võib leida valemiga (15). [22]

6.2 Soome

Soomes kehtib Eurokood 5 rahvusliku lisana dokument nimega „SFS-EN 1995-1-1“. Soomes kehtib elamute põrandatele omavõnkesageduse piirväärtus 9 Hz. Selle arvutamiseks tuleb kasutada valemit (11). Valemis tuleb ühikpinna massina arvestada põrandakonstruktsiooni omakaalu ja lisakoormust 30 kg/m^2.

Kui omavõnkesageduse tingimus on rahuldatud, tuleb järgnevalt kontrollida maksimaalse piirläbipainde tingimust, milleks on $a \leq 0{,}50$ mm. Läbipainde väärtuse leidmiseks tuleb kasutada valemit (15). Koondatud koormuseks on 1 kN. Konkreetne läbipainde tingimus kehtib põranda sildeava puhul, kui $l \geq 6$ m. Lühemate sildeavadega põrandate puhul võib läbipainde piirväärtust korrutada teguriga k, mis on leitav jooniselt (Joonis 18). Ehk, kui $l = 4$ m, siis $k = 1{,}3$ ja piirläbipainde väärtuseks on sellisel juhul $0{,}50 \cdot 1{,}3 = 0{,}65$ mm. Lisaks tuleb leida ühikimpulsi kiirusvaste, mis on leitav valemiga (12) ja kontrollida selle tingimust (17). Sumbuvusteguriks võib võtta vaikimisi 0,01 (1%). Arvu n_{40} võib Eurokood 5 põhjal arvutada valemiga (13). [21]



Joonis 18. Põranda sildeava *l* (m) korrelatsioon teguriga *k* [21]

6.3 Rootsi

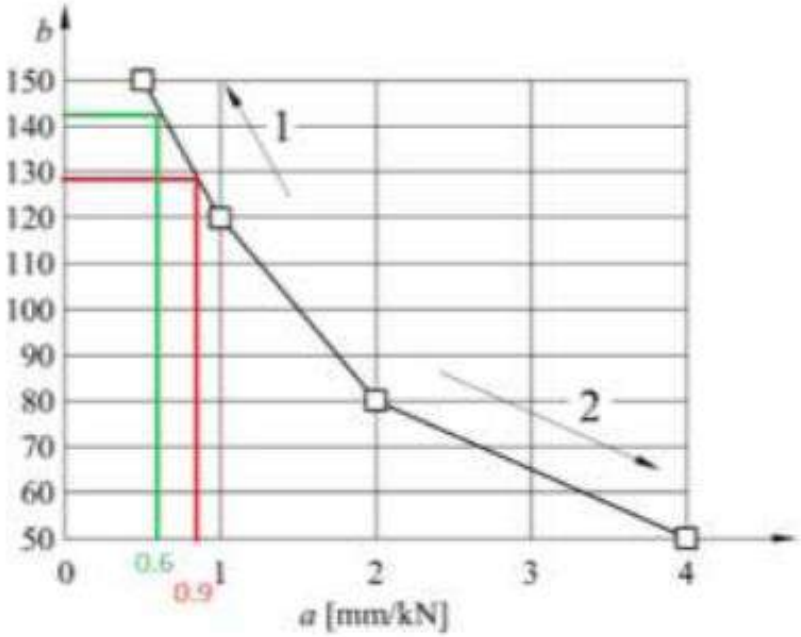
Rootsis kehtib Eurokood 5 rahvusliku lisana dokument nimega „SS-EN 1995-1-1“. Rootsi rahvuslikus lisas arvutusmetoodika erisusi ei esine. Piirväärtustena tuuakse välja maksimaalne läbipaine 1,5 mm/kN ja ühikimpulsi kiirusvaste 100 m/Ns^2. Põrandakonstruktsiooni omavõnkesageduse piirväärtus on sama, mis Eurokood 5 põhiosas, ehk 8 Hz. Maksimaalse vertikaalse läbipainde leidmiseks võib kasutada valemit (15). Ühikimpulsi kiirusvaste väärtuse leidmiseks tuleb kasutada valemit (12) ja sellele kehtib tingimus (17). Sumbuvusteguriks võib võtta Eurokood 5 kohaselt 0,01 (1%). Paremate väärtuste kasutamist tuleb põhjendada. Parameetri n_{40} võib Eurokood 5 põhjal arvutada valemiga (13). [12], [23]

6.4 Norra

Norra Eurokood 5 rahvusliku lisa dokumendi nimeks on „NS-EN 1995-1-1“. Nii nagu ka Rootsi, ei ole Norra teinud suuri muudatusi Eurokood 5 peatüki 7.3.3 arvutusmetoodikas ja piirväärtustes. Ühe erisusena on välja toodud läbipainde piirväärtused, mis peab rahuldama tingimust (14). Norra rahvusliku lisa kohaselt kehtivad järgnevad piirläbipainde väärtused [24]:

- *a* = 0,6 mm/kN kõrge jäikusnõudega põrandate puhul;
- *a* = 0,9 mm/kN tavalise jäikusnõudega põrandate puhul.

Kõrge ja tavalise jäikusnõude klassifikatsiooni ei ole eraldi välja toodud, mistõttu kontrollitakse mõlemaid nõudeid. Piirläbipainde väärtused kehtivad põrandate puhul, mille sildeava $l \leq 4{,}5$ m. Pikemate sildeavadega põrandate tingimusi ei ole täpsustatud. Väärtus *B* leitakse joonise (Joonis 16) abil. Tulemused on esitatud joonisel (Joonis 19). [24], [25]



Joonis 19. Norra rahvuslikus lisas kehtivad ühikimpulsi kiirusvaste *B* väärtused sõltuvalt läbipaindest *a* [25]

Põranda omavõnkesagedusele kehtib Eurokood 5 kohane tingimus, milleks on $f_1 \geq 8$ Hz. Väärtuse leidmiseks tuleb kasutada valemit (11). Massina *m* tuleb arvestada ainult põrandakonstruktsiooni omakaalu. Ühikimpulsi kiirusvaste leidmiseks tuleb kasutada valemit (12) ja sellele kehtib tingimus (17). Sumbuvusteguriks võib võtta Eurokood 5 kohaselt 0,01 (1%). Paremate väärtuste kasutamist tuleb põhjendada. Parameetri n_{40} võib Eurokood 5 põhjal arvutada valemiga (13). [12], [24]

6.5 Rahvuslike lisade kokkuvõte

Lõputöös käsitletavate riikide Eurokood 5 rahvuslike lisade kokkuvõtva ülevaate annavad tabelid (Tabel 2, Tabel 3). [12], [22]–[24]

Tabel 2. Eurokood 5 rahvuslike lisade arvutusmetoodikad

Riik	**OV. Sagedus**[3]	**Maksimaalne läbipaine**	**Ühikimpulsi kiirusvaste**
EC5[4] Soome NA	$f_1 = \frac{\pi}{2l^2}\sqrt{\frac{(EI_l)}{m+30}}$,	$w \leq min\begin{cases} \frac{Fl^2}{42k_\delta(EI)_l} \\ \frac{Fl^3}{48s(EI)_l} \end{cases}$,	$v_{max} = \frac{4(0{,}4 + 0{,}6 \cdot n_{40})}{m \cdot b \cdot l + 200}$,
EC5 Rootsi NA	$f_1 = \frac{\pi}{2l^2}\sqrt{\frac{(EI_l)}{m}}$,		
EC5 Norra NA			
EC5 Eesti NA			

Tabel 3. Eurokood 5 rahvuslike lisade piirväärtused

Riik	**OV. Sagedus**	**Piirläbipaine**	**Ühikimpulsi kiirusvaste**
EC5 Soome NA	$f_1 \geq 9$ Hz	$a \leq 0{,}50$ mm kui $l \geq 6$ m	$B = 150$ m/Ns^2
		kui $l \leq 6$ m, siis $a \cdot k = 0{,}50 \cdot 1{,}30 = 0{,}65$ mm	$B = 140$ m/Ns^2
EC5 Rootsi NA	$f_1 \geq 8$ Hz	$a = 1{,}5$ mm/kN	$B = 100$ m/Ns^2
EC5 Norra NA		$a = 0{,}6$ mm/kN; kõrge jäikusnõue	$B = 142$ m/Ns^2
		$a = 0{,}9$ mm/kN; madal jäikusnõue	$B = 129$ m/Ns^2
EC5 Eesti NA		$a = 1{,}0$ mm/kN	$B = 120$ m/Ns^2

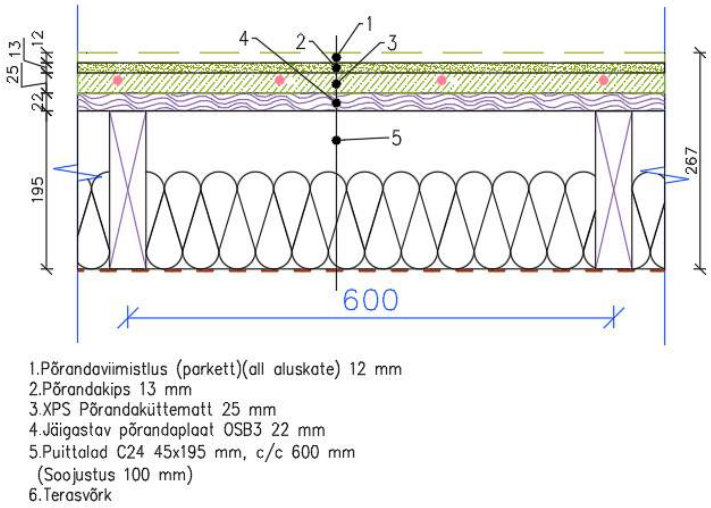
[3] Omavõnkesagedus
[4] *Eurocode 5*

7 PÕRANDAKONSTRUKTSIOONIDE ARVUTUS

Käesolevas peatükis tehakse kolme moodulhoone puitvahelae põrandakonstruktsiooni vibratsioonitingimuste kontroll. Kõiki põrandakonstruktsioone kontrollitakse Eesti ja lõputöös välja toodud eksportriikide Eurokood 5 rahvuslike lisade alusel. Konstruktsioonitüübid on autori koostatud ja lähteandmed pärinevad mitmete puitmajatootjate konstruktsioonitüüpide kombinatsioonidest. Konstruktsioonitüübid on kõik erinevad, et tulemustes kajastuksid määravad argumendid vibratsiooni analüüsimises.

7.1 Konstruktsioonitüüp A

Konstruktsioonitüüp A puhul on tegemist pigem äärmusliku lahendusega, kuna tala ristlõige ei pruugi rahuldada kõikide montaažiasendite kandepiirseisundi tingimusi [20, lk 539]. Sellest olenemata, tekitab järgnev arvutus hea võrdlusaspekti ja ülevaate konstruktsiooni käitumist vibratsioonile. Konstruktsiooni läbilõige ja kihtide kirjeldus on välja toodud joonisel (Joonis 20).



Joonis 20. Konstruktsioonitüüp A läbilõige

7.1.1 Plaadi efektiivse laiuse b_{ef} arvutus

Vastavalt joonisele (Joonis 14) leitakse mõlkumisest tingitud efektiivne laius, kui jäigastavaks põrandaplaadiks on orienteeritud laastplaat OSB3:

$$b_{c,ef} = 25 \cdot h_f = 25 \cdot 22 = 550 \text{ mm}.$$

Vastavalt valemile (10) võrdub efektiivne laius:

$$b_{ef} = 550 + 45 = 595 \text{ mm}.$$

Konstruktsiooni kirjeldavad parameetrid on järgnevad [20]:

- konstruktsiooni mass m = 45 kg/m^2;
- C24 tala keskmine elastsusmoodul E_{2mean} = 11000 N/mm^2;
- OSB3 keskmine elastsusmoodul laastudega paralleelselt $E_{1,0mean}$ = 4930 N/mm^2;
- OSB3 keskmine elastsusmoodul laastudega risti $E_{1,90mean}$ = 1980 N/mm^2;
- tala ristlõike kõrgus h_2 = 195 mm;
- OSB3 paksus h_1 = 22 mm;
- vöö efektiivne laius $b_1 = b_{ef}$ = 595 mm;
- tala ristlõike laius b_2 = 45 mm;
- tala ristlõike pindala A_2 = 45 · 195 = 8775 mm^2;
- plaadi ristlõike pindala A_1 = 22 · 595 = 13090 mm^2;
- tala inertsimoment I_2, valem (9) = ($b \cdot h^3$) / 12 = (45 · 195^3) / 12 = 27,8 · 10^6 mm^4;
- vöö inertsimoment I_1, valem (9) = (b · h^3) / 12 = (595 · 22^3) / 12 = 0,5 · 10^6 mm^4.

7.1.2 Efektiivse paindejäikuse EI_l ja EI_b arvutus

Vastavalt valemile (7) leitakse vööelemendi raskuskeskme kaugus liitristlõike kaugusest:

$$a_1 = \frac{11000 \cdot 8775(22 + 195)}{2(4930 \cdot 13090 + 11000 \cdot 8775)} \approx 65 \text{ mm}.$$

Vastavalt valemile (8) leitakse seina raskuskeskme kaugus liitristlõike kaugusest:

$$a_2 = \frac{22 + 195}{2} - 65 \approx 43{,}5 \text{ mm}.$$

Vastavalt valemile (5) leitakse efektiivne paindejäikus põranda sildeava suunas:

$$EI_l = (11000 \cdot 27{,}8 \cdot 10^6 + 11000 \cdot 8775 \cdot 43{,}5^2) + (4930 \cdot 0{,}5 \cdot 10^6 + 4930 \cdot 13090 \cdot 65^2)$$
$$\approx 7{,}64 \cdot 10^{11} \text{ Nmm}^2 \rightarrow 7{,}64 \cdot 10^5 \text{ Nm}^2.$$

Saadud tulemus tuleb jagada laiusühikuga ehk talade sammuga, milleks on 0,6 m.

$$\frac{7{,}64 \cdot 10^5}{0{,}6} = 12{,}7 \cdot 10^5 \text{ Nm}^2/\text{m}.$$

Vastavalt valemile (6) leitakse paindejäikus põranda pikkuse suunas:

$$EI_b = 1980 \cdot \frac{1000 \cdot 22^3}{12} \approx 1{,}76 \cdot 10^9 \text{ Nmm}^2 \rightarrow 2{,}48 \cdot 10^3 \text{ Nm}^2.$$

Saadud tulemus tuleb jagada laiusühikuga, milleks on 1,0 m:

$$\frac{2{,}48 \cdot 10^3}{1{,}0} = 2{,}48 \cdot 10^3 \text{ Nm}^2/\text{m}.$$

7.1.3 Vibratsiooni tingimuste kontroll

Vastavalt valemile (11) ja Eesti, Norra ning Rootsi Eurokood 5 rahvusliku lisadele leitakse põrandakonstruktsiooni omavõnkesagedus:

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \cdot 4^2}\sqrt{\frac{12{,}7 \cdot 10^5}{45}} \approx 16{,}49 \text{ Hz} \rightarrow \text{Tingimus on täidetud.}$$

Vastavalt valemile (11) ja Soome Eurokood 5 rahvusliku lisale leitakse põrandakonstruktsiooni omavõnkesagedus:

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \cdot 4^2}\sqrt{\frac{12{,}7 \cdot 10^5}{45 + 30}} \approx 12{,}78 \text{ Hz} \rightarrow \text{Tingimus on täidetud.}$$

Vastavalt valemile (16) leitakse konstant k_δ:

$$k_\delta = \sqrt[4]{\frac{1{,}76 \cdot 10^3}{12{,}7 \cdot 10^5}} \approx 0{,}19.$$

Vastavalt valemile (15) leitakse maksimaalne läbipaine:

$$w \leq min \begin{cases} \dfrac{1000 \cdot 4^2}{42 \cdot 0{,}19 \cdot 12{,}7 \cdot 10^5} = 0{,}00157 \text{ m} \rightarrow 1{,}57 \text{ mm} \\ \dfrac{1000 \cdot 4^3}{48 \cdot 0{,}6 \cdot 12{,}7 \cdot 10^5} = 0{,}00174\text{m} \rightarrow 1{,}74 \text{ mm} \end{cases} \rightarrow w \approx 1{,}57 \text{ mm}.$$

Vastavalt Eesti Eurokood 5 rahvuslikule lisale, kehtib piirläbipainde tingimus (14):

$$\frac{1{,}57}{1} \leq 1{,}00 \text{ mm/kN} \rightarrow \text{Tingimus ei ole täidetud.}$$

Vastavalt Rootsi Eurokood 5 rahvuslikule lisale, kehtib piirläbipainde tingimus (14):

$$\frac{1{,}57}{1} \leq 1{,}50 \text{ mm/kN} \rightarrow \text{Tingimus ei ole täidetud.}$$

Vastavalt Norra Eurokood 5 rahvuslikule lisale, kehtib piirläbipainde tingimus madala jäikusnõudega põrandatele (14):

$$\frac{1{,}57}{1} \leq 0{,}90 \text{ mm/kN} \rightarrow \text{Tingimus ei ole täidetud.}$$

Vastavalt Norra Eurokood 5 rahvuslikule lisale, kehtib piirläbipainde tingimus kõrge jäikusnõudega põrandatele (14):

$$\frac{1{,}57}{1} \leq 0{,}60\ \mathrm{mm/kN} \rightarrow \text{Tingimus ei ole täidetud.}$$

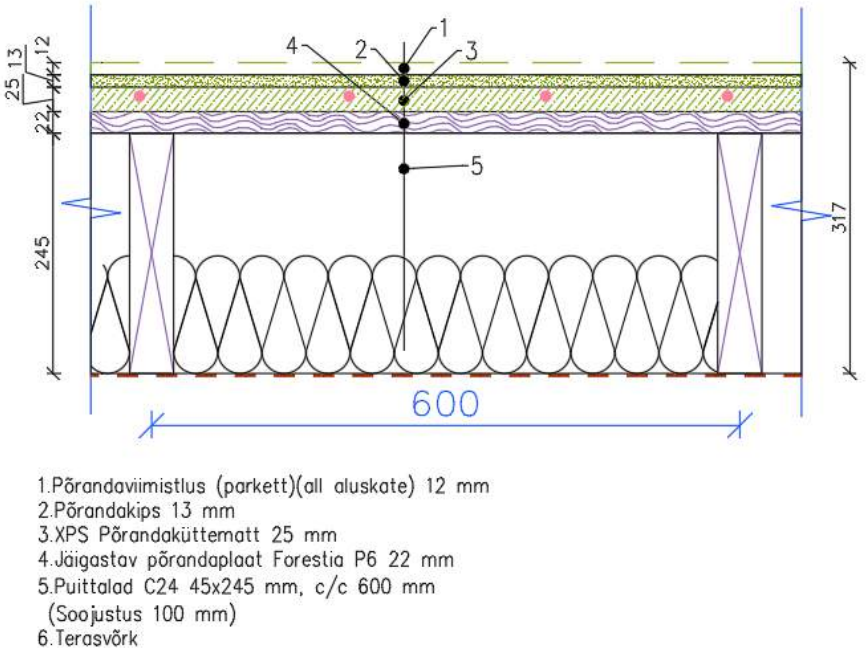
Soome Eurokood 5 rahvusliku lisa kohaselt kehtib piirläbipainde tingimus (14), kui l = 4 m:

$$\frac{1{,}57}{1} \leq 0{,}50 \cdot 1{,}3 = 0{,}65\ \mathrm{mm/kN} \rightarrow \text{Tingimus ei ole täidetud.}$$

Ülejäänud tingimusi ei ole mõistlik kontrollida, kuna läbipainde tingimus ei ole täidetud mitte ühegi riigi puhul.

7.2 Konstruktsioon B

Konstruktsioonitüüp B erinevused võrreldes tüübiga A on põrandatala ristlõige ja jäigastava põrandaplaadi materjal. Jättes kõrvale ülejäänud konstruktiivsed kihid, siis tala ristlõikega 45x245 mm ja jäigastav põrandaplaat Forestia P6 on enimlevinud kombinatsioon moodulhoonete puitvahelae põrandaelemendi konstruktsioonis. Neljameetrise sildeava puhul täidab C24 tugevusklassiga ja 45x245 mm ristlõikega puittala suure tõenäosusega kõiki montaažiasendite kandepiirseisundi tingimusi [20, lk 539]. Konstruktsioonitüüp B läbilõige ja kihtide kirjeldus on välja toodud joonisel (Joonis 21).



Joonis 21. Konstruktsioonitüüp B läbilõige

7.2.1 Plaadi efektiivse laiuse b_{ef} arvutus

Vastavalt joonisele (Joonis 14) leitakse mõlkumisest tingitud efektiivne laius, kui jäigastavaks põrandaplaadiks on puitkiudplaat Forestia P6:

$$b_{c,ef} = 30 \cdot h_f = 30 \cdot 22 = 660 \text{ mm}.$$

Vastavalt valemile (10) võrdub efektiivne laius:

$$b_{ef} = 660 + 45 = 705 \text{ mm}.$$

Kuna talade samm on 600 mm, siis plaadi efektiivne laius ei saa olla suurem. Järelikult b_{ef} = 600 mm.

Konstruktsiooni kirjeldavad parameetrid on järgnevad [26], [27]:

- konstruktsiooni mass m = 50 kg/m^2;
- tala keskmine elastsusmoodul E_2 = 11000 Nmm^2;
- Forestia P6 keskmine elastsusmoodul E_1 = 2550 Nmm^2;
- tala ristlõike kõrgus h_2 = 245 mm;
- Forestia P6 paksus h_1 = 22 mm;
- vöö efektiivne laius $b_1 = b_{ef}$ = 595 mm;
- tala ristlõike laius b_2 = 45 mm;
- tala ristlõike pindala A_2 = 45 · 245 = 11025 mm^2;
- plaadi ristlõike pindala A_1 = 22 · 595 = 13200 mm^2;
- tala inertsimoment I_2, valem (9) = $(b \cdot h^3) / 12 = (45 \cdot 245^3) / 12 = 55{,}1 \cdot 10^6$ mm^4;
- vöö inertsimoment I_1, valem (9) = $(b \cdot h^3) / 12 = (595 \cdot 22^3) / 12 = 0{,}5 \cdot 10^6$ mm^4.

7.2.2 Efektiivse paindejäikuse EI_l ja EI_b arvutus

Vastavalt valemile (7) leitakse vööelemendi raskuskeskme kaugus liitristlõike kaugusest:

$$a_1 = \frac{11000 \cdot 11025(22 + 245)}{2(2550 \cdot 13090 + 11000 \cdot 11025)} \approx 104{,}7 \text{ mm}.$$

Vastavalt valemile (8) leitakse seina raskuskeskme kaugus liitristlõike kaugusest:

$$a_2 = \frac{22 + 245}{2} - 104{,}7 = 28{,}8 \text{ mm}.$$

Vastavalt valemile (5) leitakse efektiivne paindejäikus põranda sildeava suunas:

$$EI_l = (11000 \cdot 55{,}1 \cdot 10^6 + 11000 \cdot 11025 \cdot 28{,}8^2)$$
$$+ (2550 \cdot 0{,}5 \cdot 10^6 + 2550 \cdot 13090 \cdot 104{,}7^2) \approx 10{,}74 \cdot 10^{11}\ \mathrm{Nmm}^2$$
$$\rightarrow 10{,}74 \cdot 10^5\ \mathrm{Nm}^2.$$

Saadud tulemus tuleb jagada laiusühikuga ehk talade sammuga, milleks on 0,6 m:

$$\frac{10{,}74 \cdot 10^5}{0{,}6} = 17{,}9 \cdot 10^5\ \mathrm{Nm}^2/\mathrm{m}.$$

Vastavalt valemile (6) leitakse paindejäikus põranda pikkuse suunas:

$$EI_b = 2550 \cdot \frac{1000 \cdot 22^3}{12} \approx 2{,}27\ \cdot 10^9\ \mathrm{Nmm}^2 \rightarrow 2{,}27 \cdot 10^3\ \mathrm{Nm}^2.$$

Saadud tulemus tuleb jagada laiusühikuga, milleks on 1,0 m:

$$\frac{2{,}27 \cdot 10^3}{1{,}0} = 2{,}27 \cdot 10^3\ \mathrm{Nm}^2/\mathrm{m}.$$

7.2.3 Vibratsiooni tingimuste kontroll

Vastavalt valemile (11) ja Soome Eurokood 5 rahvusliku lisale leitakse põrandakonstruktsiooni omavõnkesagedus:

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \cdot 4^2}\sqrt{\frac{17{,}9 \cdot 10^5}{50 + 30}} \approx 14{,}69\ \mathrm{Hz} \rightarrow \text{Tingimus on täidetud.}$$

Vastavalt valemile (11) ja Eesti, Norra ning Rootsi Eurokood 5 rahvusliku lisadele leitakse põrandakonstruktsiooni omavõnkesagedus:

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \cdot 4^2}\sqrt{\frac{17{,}9 \cdot 10^5}{50}} \approx 18{,}58\ \mathrm{Hz} \rightarrow \text{Tingimus on täidetud.}$$

Vastavalt valemile (16) leitakse konstant k_δ:

$$k_\delta = \sqrt[4]{\frac{2{,}27 \cdot 10^3}{17{,}9 \cdot 10^5}} \approx 0{,}19.$$

Vastavalt valemile (15) leitakse maksimaalne läbipaine:

$$w \leq min \begin{cases} \dfrac{1000 \cdot 4^2}{42 \cdot 0{,}19 \cdot 17{,}9 \cdot 10^5} = 0{,}00112 \text{ m} \rightarrow 1{,}12 \text{ mm.} \\ \dfrac{1000 \cdot 4^3}{48 \cdot 0{,}6 \cdot 17{,}9 \cdot 10^5} = 0{,}00124 \text{ m} \rightarrow 1{,}24 \text{ mm.} \end{cases} \rightarrow w \approx 1{,}12 \text{ mm.}$$

Vastavalt Eesti Eurokood 5 rahvuslikule lisale, kehtib piirläbipainde tingimus (14):

$$\frac{1{,}12}{1} \leq 1{,}00 \text{ mm/kN} \rightarrow \text{Tingimus ei ole täidetud.}$$

Vastavalt Rootsi Eurokood 5 rahvuslikule lisale, kehtib piirläbipainde tingimus (14):

$$\frac{1{,}12}{1} \leq 1{,}50 \text{ mm/kN} \rightarrow \text{Tingimus on täidetud.}$$

Vastavalt Norra Eurokood 5 rahvuslikule lisale, kehtib piirläbipainde tingimus madala jäikusnõudega põrandatele (14):

$$\frac{1{,}12}{1} \leq 0{,}9 \text{ mm/kN} \rightarrow \text{Tingimus ei ole täidetud.}$$

Vastavalt Norra Eurokood 5 rahvuslikule lisale, kehtib piirläbipainde tingimus kõrge jäikusnõudega põrandatele (14):

$$\frac{1{,}12}{1} \leq 0{,}6 \text{ mm/kN} \rightarrow \text{Tingimus ei ole täidetud.}$$

Soome Eurokood 5 rahvusliku lisa kohaselt kehtib piirläbipainde tingimus (14) kui l = 4 m:

$$\frac{1{,}12}{1} \leq 0{,}50 \cdot 1{,}3 = 0{,}65 \text{ mm/kN} \rightarrow \text{Tingimus ei ole täidetud.}$$

Läbipainde tingimus on täidetud vaid Rootsi puhul, mistõttu jätkatakse kontrolli vaid selles riigis kehtivate piirväärtuse alusel.

Vastavalt valemile (13) ja Rootsi Eurokood 5 rahvuslikule lisale leitakse tegur n_{40}:

$$n_{40} = \left\{ \left(\left(\frac{40}{18{,}58} \right)^2 - 1 \right) \cdot \left(\frac{10}{4} \right)^4 \cdot \frac{(17{,}9 \cdot 10^5)}{(2{,}27 \cdot 10^3)} \right\}^{0{,}25} \approx 18{,}29$$

Vastavalt valemile (12) ja Rootsi Eurokood 5 rahvuslikule lisale leitakse põrandakonstruktsiooni ühikimpulsi kiirusvaste:

$$v_{max} = \frac{4(0{,}4 + 0{,}6 \cdot 18{,}29)}{50 \cdot 10 \cdot 4 + 200} \approx 0{,}021 \text{ m/Ns}^2.$$

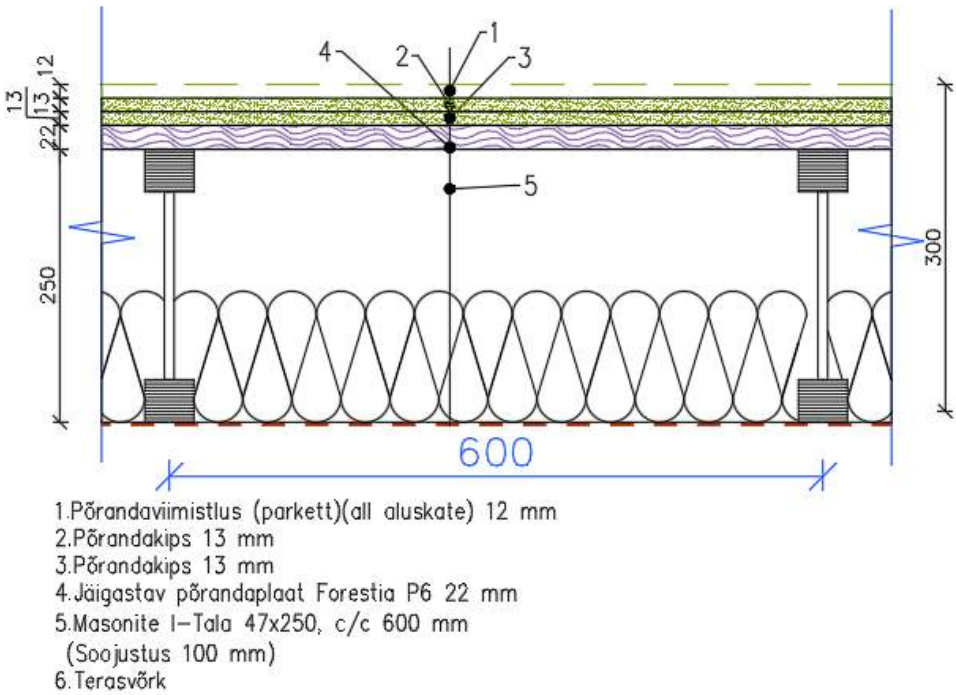
Ühikimpulsi kiirusvaste väärtus peab rahuldama Rootsi Eurokood 5 rahvuslikus lisas sätestatud tingimust (17):

$$0{,}021 \leq 100^{(18{,}58 \cdot 0{,}01-1)} = 0{,}024 \text{ m/Ns}^2 \rightarrow \text{Tingimus on täidetud.}$$

7.3 Konstruktsioon C

Konstruktsioon C on alternatiivne lahendus tavapuiduga karkassile. C24 tugevusklassiga puittalad on asendatud kergtaladega, mis on tootena tuntud kui Masonite I-talad. Kihistusest on välja jäetud XPS põrandaküttematt, mis on asendatud 13 mm põrandakipsiga. Jäigastavaks põrandaplaadiks on Forestia P6 puitkiudplaat.

Käesolevas peatükis arvutatakse eraldiseisvalt I-tala ja põrandaplaadi konstruktiivset homogeensust. Arvutusmetoodika pärineb tala tootja juhendmaterjalist. Lihtsustatud variandiga on võimalik vibratsiooni kontrollida ka vaid tala enda paindejäikuse väärtusega, kuid suure tõenäosusega ei rahuldata läbipainde tingimust, mis enamikel juhtudel määravaks osutub. Viimast arvutusmetoodikat ei soovita ka tala tootja. Tala tootja juhendmaterjalis on huvitava faktina välja toodud I-talade soovituslikud omavõnkesageduse ja läbipainde piirväärtused, mis erinevad Eurokood 5 välja toodud väärtustest. Parima kasutusmugavuse saavutamiseks tuleks omavõnkesageduse miinimumväärtusena arvestada 16 Hz ja hetkeline läbipaine 1 kN koormuse puhul ei tohiks olla suurem kui 1,0 mm. Konstruktsioonitüübi C läbilõige ja kihistuste kirjeldus on välja toodud joonisel (Joonis 22). [28]



Joonis 22. Konstruktsioonitüüp C läbilõige

Kandva konstruktsiooni geomeetrilised parameetrid on järgnevad [27], [28]:

- tala kõrgus h = 250 mm;
- tala vöö laius b_f = 47 mm;
- tala vöö kõrgus $h_w = 250 - 2 \cdot 47 = 156$ mm;
- tala vöö kõrgus h_f = 47 mm;
- tala seina paksus t_w = 10 mm;
- põrandaplaadi ehk vöö laius b_{P6} = 600 mm:
- Forestia P6 plaadi paksus t_{P6} = 22 mm;
- Konstruktsiooni mass m = 60 kg/m^2.

Tala seina (OSB3) mehaanilised parameetrid on järgnevad [28]:

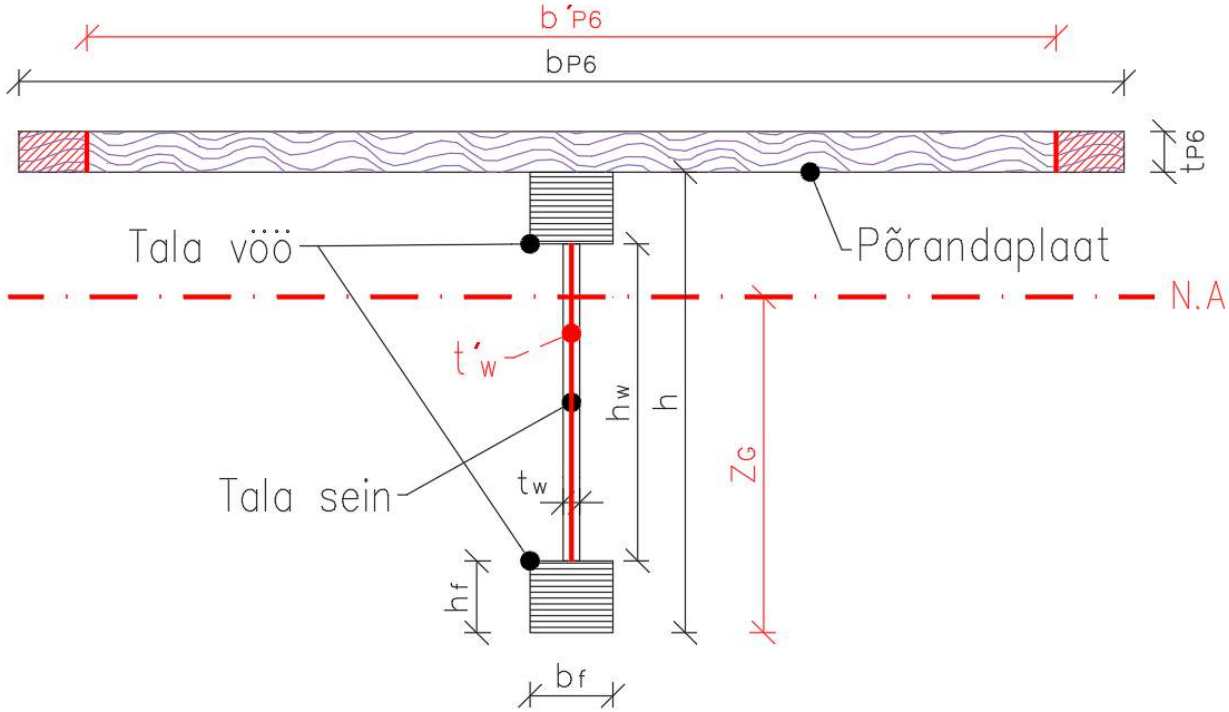
- Keskmine elastsusmoodul $E_{0w,mean}$ = 3800 N/mm^2.

Tala vöö (C30) mehaanilised parameetrid on järgnevad [28]:

- Keskmine elastsusmoodul $E_{0f,mean}$ = 12000 N/mm^2.

Põrandaplaadi (Forestia P6) mehaanilised parameetrid on järgnevad [27]:

- Keskmine elastsusmoodul $E_{P6,mean}$ = 2550 N/mm^2.



Joonis 23. Kandva konstruktsiooni geomeetriline skeem [28]

7.3.1 Efektiivse paindejäikuse EI_l ja EI_b arvutusmetoodika

Kandva konstruktsiooni efektiivne paindejäikus põranda sildeava suunas EI_l (Nmm^2) leitakse valemiga (18) [28]:

$$EI_l = E_{0f,mean} \cdot I_{ef}, \tag{18}$$

kus $E_{0f,mean}$ – kandva konstruktsiooni efektiivne paindejäikus sildeava suunas, Nmm^2;

I_{ef} – Kandva konstruktsiooni telginertsimoment, mm^4;

t_{P6} – kandva konstruktsiooni inertsimoment, mm^4.

Kandva konstruktsiooni efektiivne paindejäikus põranda pikkuse suunas EI_b (Nmm^2) leitakse valemiga (19) [28]:

$$EI_b = \frac{E_{P6,mean} \cdot 1000 \cdot {t_{P6}}^3}{12}, \tag{19}$$

kus $E_{P6,mean}$ – põrandaplaadi keskmine elastsusmoodul, N/mm^2;

t_{P6} – põrandaplaadi paksus, mm.

Kandva konstruktsiooni telginertsimoment I_{ef} (mm^4) leitakse valemiga (20):

$$I_{ef} = I_{HB,ef} + A_{HB250,ef} \cdot \left(z_G - \frac{h}{2}\right)^2 + I_{P6,ef} + A_{P6,ef} \cdot \left(h + \frac{t_{P6}}{2} - z_G\right)^2, \quad (20)$$

kus $I_{HB,ef}$ – kandva konstruktsiooni efektiivne paindejäikus sildeava suunas, Nmm^2;

$A_{HB250,ef}$ – tala efektiivne pindala, mm^2;

z_G – kandva konstruktsiooni nulljoon ehk neutraalne telg, mm;

h – tala kõrgus, mm;

$I_{P6,ef}$ – kandva konstruktsiooni inertsimoment, mm^4;

$A_{P6,ef}$ – põrandaplaadi efektiivne pindala, mm^2;

t_{P6} – põrandaplaadi paksus, mm.

Kandva konstruktsiooni nulljoont ehk neutraalset telge z_G (mm) leitakse valemiga (21) [28]:

$$z_G = \frac{A_{P6,ef} \cdot \left(h + \frac{t_{P6}}{2}\right) + A_{HB250,ef} \cdot \frac{h}{2}}{A_{P6,ef} + A_{HB250,ef}}, \quad (21)$$

kus $A_{P6,ef}$ – põrandaplaadi efektiivne pindala, mm^2;

h – tala kõrgus, mm;

t_{P6} – põrandaplaadi paksus, mm;

$A_{HB250,ef}$ – tala vöö keskmine elastsusmoodul, N/mm^2.

Põrandaplaadi telginertsimoment $I_{P6,ef}$ (mm^4) leitakse valemiga (22) [28]:

$$I_{P6,ef} = \frac{b'_{P6} \cdot (t_{P6})^3}{12}, \quad (22)$$

kus b'_{P6} – põrandaplaadi efektiivne laius, mm;

t_{P6} – põrandaplaadi paksus, mm.

Tala telginertsimoment $I_{HB,ef}$ (mm^4) leitakse valemiga (23) [28]:

$$I_{HB,ef} = \frac{b_f \cdot h^3}{12} - \frac{(b_f - t'_w) \cdot {h_w}^3}{12}, \quad (23)$$

kus b_f – tala vöö laius, mm;

h – tala kõrgus, mm;

t'_w – tala seina efektiivne paksus, mm;

h_w – tala vöö kõrgus, mm.

Põrandaplaadi efektiivne pindala $A_{P6,ef}$ (mm^2) leitakse valemiga (24) [28]:

$$A_{P6,ef} = b'_{P6} \cdot t_{P6}, \tag{24}$$

kus b'_{P6} – põrandaplaadi efektiivne laius, mm;

t_{P6} – põrandaplaadi paksus, mm.

Tala efektiivne pindala $A_{HB250,ef}$ (mm^2) leitakse valemiga (25) [28]:

$$A_{HB250,ef} = 2 \cdot b_f \cdot h_f + t'_w \cdot h_w, \tag{25}$$

kus b_f – tala vöö laius, mm;

h_f – tala vöö kõrgus, mm;

t'_w – tala seina efektiivne paksus, mm;

h_w – tala vöö kõrgus, mm.

Tala seina efektiivne paksus t'_w (mm) leitakse valemiga (26) [28]:

$$t'_w = t_w \cdot n_w, \tag{26}$$

kus t_w – tala seina paksus, mm;

n_w – tala seina ja vöö elastsusmoodulite suhtarv.

Põrandaplaadi efektiivne laius b'_{P6} (mm) leitakse valemiga (27) [28]:

$$b'_{P6} = b_{P6} \cdot n_{P6}, \tag{27}$$

kus b_{P6} – põrandaplaadi laius, mm;

n_{P6} – põrandaplaadi ja tala vöö elastsusmoodulite suhtarv.

Tala seina ja vöö elastsusmoodulite suhtarv n_w leitakse valemiga (28) [28]:

$$n_w = \frac{E_{0w,mean}}{E_{0f,mean}}, \tag{28}$$

kus $E_{0w,mean}$ – tala seina keskmine elastsusmoodul, N/mm^2;

$E_{0,fmean}$ – tala vöö keskmine elastsusmoodul, N/mm^2.

Põrandaplaadi ja tala vöö elastsusmoodulite suhtarv n_{P6} leitakse valemiga (29) [28]:

$$n_{P6} = \frac{E_{P6,mean}}{E_{0f,mean}}, \tag{29}$$

kus $E_{P6,mean}$ – põrandaplaadi keskmine elastsusmoodul, N/mm^2;

$E_{0,fmean}$ – tala vöö keskmine elastsusmoodul, N/mm^2.

7.3.2 Efektiivse paindejäikuse Ei_l ja EI_b arvutus

Vastavalt valemile (29) leitakse põrandaplaadi ja tala vöö elastsusmoodulite suhtarv:

$$n_{P6} = \frac{2550}{12000} \approx 0{,}21.$$

Vastavalt valemile (28) leitakse tala seina ja vöö elastsusmoodulite suhtarv:

$$n_w = \frac{3800}{12000} \approx 0{,}32.$$

Vastavalt valemile (27) leitakse põrandaplaadi efektiivne laius:

$$b'_{P6} = 600 \cdot 0{,}21 \approx 126 \text{ mm}.$$

Vastavalt valemile (26) leitakse tala seina efektiivne paksus:

$$t'_w = 10 \cdot 0{,}32 \approx 3{,}2 \text{ mm}.$$

Vastavalt valemile (25) leitakse tala efektiivne pindala:

$$A_{HB250,ef} = 2 \cdot 47 \cdot 47 + 3{,}2 \cdot 156 = 4917{,}2 \text{ mm}^2.$$

Vastavalt valemile (24) leitakse põrandaplaadi efektiivne pindala:

$$A_{P6,ef} = 126 \cdot 22 = 2772 \text{ mm}^2.$$

Vastavalt valemile (23) leitakse tala telginertsimoment:

$$I_{HB,ef} = \frac{47 \cdot 250^3}{12} - \frac{(47 - 3{,}2) \cdot 156^3}{12} \approx 4{,}73 \cdot 10^7 \text{ mm}^4.$$

Vastavalt valemile (22) leitakse põrandaplaadi telginertsimoment:

$$I_{P6,ef} = \frac{126 \cdot 22^3}{12} = 111804 \text{ mm}^4.$$

Vastavalt valemile (21) leitakse nulljoone ehk neutraalse telje kaugus:

$$z_G = \frac{2772 \cdot \left(250 + \frac{22}{2}\right) + 4917{,}2 \cdot \frac{250}{2}}{2772 + 4917{,}2} \approx 174 \text{ mm}.$$

Vastavalt valemile (20) leitakse kandva konstruktsiooni telginertsimoment:

$$I_{ef} = 4{,}73 \cdot 10^7 + 4917{,}2 \cdot \left(174 - \frac{250}{2}\right)^2 + 111804 + 2772 \cdot \left(250 + \frac{22}{2} - 174\right)^2$$
$$= 8{,}02 \cdot 10^7 \text{ mm}^4.$$

Vastavalt valemile (19) leitakse kandva konstruktsiooni efektiivne paindejäikus põranda pikkuse suunas:

$$EI_b = \frac{2550 \cdot 1000 \cdot 22^3}{12} = 2{,}26 \cdot 10^9 \text{ Nmm}^2 \rightarrow 2{,}26 \cdot 10^3 \text{ Nm}^2.$$

Saadud tulemus tuleb jagada ühiklaiusega, milleks on 1,0 m:

$$\frac{2{,}26 \cdot 10^3}{1{,}0} = 2{,}26 \cdot 10^3 \text{ Nm}^2/\text{m}.$$

Vastavalt valemile (18) leitakse kandva konstruktsiooni efektiivne paindejäikus põranda sildeava suunas:

$$EI_l = 12000 \cdot 8{,}02 \cdot 10^7 = 9{,}62 \cdot 10^{11} \text{ Nmm}^2 \rightarrow 9{,}62 \cdot 10^5 \text{ Nm}^2.$$

Saadud tulemus tuleb jagada laiusühikuga ehk talade sammuga, milleks on 0,6 m.

$$\frac{9{,}62 \cdot 10^5}{0{,}6} = 16{,}03 \cdot 10^5 \text{ Nm}^2/\text{m}.$$

7.3.3 Vibratsiooni tingimuste kontroll

Vastavalt valemile (11) ja Soome Eurokood 5 rahvusliku lisale leitakse põrandakonstruktsiooni omavõnkesagedus:

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \cdot 4^2}\sqrt{\frac{16{,}03 \cdot 10^5}{60 + 30}} \approx 13{,}10 \text{ Hz} \rightarrow \text{Tingimus on täidetud.}$$

Vastavalt valemile (11) ja Eesti, Norra ning Rootsi Eurokood 5 rahvusliku lisadele leitakse põrandakonstruktsiooni omavõnkesagedus:

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \cdot 4^2}\sqrt{\frac{16{,}03 \cdot 10^5}{60}} \approx 16{,}05 \text{ Hz} \rightarrow \text{Tingimus on täidetud.}$$

Vastavalt valemile (16) leitakse konstant k_δ:

$$k_\delta = \sqrt[4]{\frac{2{,}26 \cdot 10^3}{16{,}03 \cdot 10^5}} \approx 0{,}19.$$

Vastavalt valemile (15) leitakse maksimaalne läbipaine:

$$w \leq min \begin{cases} \dfrac{1000 \cdot 4^2}{42 \cdot 0{,}19 \cdot 16{,}03 \cdot 10^5} = 0{,}00125 \text{ m} \rightarrow 1{,}25 \text{ mm} \\ \dfrac{1000 \cdot 4^3}{48 \cdot 0{,}6 \cdot 16{,}03 \cdot 10^5} = 0{,}00138 \text{ m} \rightarrow 1{,}38 \text{ mm} \end{cases} \rightarrow w \approx 1{,}25 \text{ mm}.$$

Vastavalt Eesti Eurokood 5 rahvuslikule lisale, kehtib piirläbipainde tingimus (14):

$$\frac{1{,}25}{1} \leq 1{,}00 \text{ mm/kN} \rightarrow \text{Tingimus ei ole täidetud.}$$

Vastavalt Rootsi Eurokood 5 rahvuslikule lisale, kehtib piirläbipainde tingimus (14):

$$\frac{1{,}25}{1} \leq 1{,}50 \text{ mm/kN} \rightarrow \text{Tingimus on täidetud.}$$

Vastavalt Norra Eurokood 5 rahvuslikule lisale, kehtib piirläbipainde tingimus madala jäikusnõudega põrandatele (14):

$$\frac{1{,}25}{1} \leq 0{,}9 \text{ mm/kN} \rightarrow \text{Tingimus ei ole täidetud.}$$

Vastavalt Norra Eurokood 5 rahvuslikule lisale, kehtib piirläbipainde tingimus kõrge jäikusnõudega põrandatele (14):

$$\frac{1{,}25}{1} \leq 0{,}6 \text{ mm/kN} \rightarrow \text{Tingimus ei ole täidetud.}$$

Soome Eurokood 5 rahvusliku lisa kohaselt kehtib piirläbipainde tingimus (14) kui l = 4 m:

$$\frac{1{,}25}{1} \leq 0{,}50 \cdot 1{,}3 = 0{,}65 \text{ mm/kN} \rightarrow \text{Tingimus ei ole täidetud.}$$

Läbipainde tingimus on täidetud vaid Rootsi rahvusliku lisa puhul, mistõttu jätkatakse kontrolli vaid selles riigis kehtivate piirväärtuse alusel.

Vastavalt valemile (13) ja Rootsi Eurokood 5 rahvuslikule lisale leitakse tegur n_{40}:

$$n_{40} = \left\{ \left(\left(\frac{40}{16{,}05} \right)^2 - 1 \right) \cdot \left(\frac{10}{4} \right)^4 \cdot \frac{(16{,}03 \cdot 10^5)}{(2{,}26 \cdot 10^3)} \right\}^{0{,}25} \approx 19{,}49.$$

Vastavalt valemile (12) ja Rootsi Eurokood 5 rahvuslikule lisale leitakse põrandakonstruktsiooni ühikimpulsi kiirusvaste:

$$v_{max} = \frac{4(0{,}4 + 0{,}6 \cdot 19{,}49)}{50 \cdot 10 \cdot 4 + 200} \approx 0{,}022 \text{ m/Ns}^2.$$

Ühikimpulsi kiirusvaste väärtus peab rahuldama Rootsi Eurokood 5 rahvuslikus lisas sätestatud tingimust (17):

$$0{,}022 \leq 100^{(16{,}05 \cdot 0{,}01 - 1)} = 0{,}021 \text{ m/Ns}^2 \rightarrow \text{Tingimus ei ole täidetud.}$$

8 TULEMUSTE ANALÜÜS JA VÕRDLUS

Käesolevas peatükis võetakse kokku kõigi kolme konstruktsioonitüübi tulemused ja tehakse vastavad järeldused. Tulemused jaotatakse tingimuste põhjal kolme kategooriasse:

- omavõnkesagedus;
- läbipaine;
- ühikimpulsi kiirusvaste.

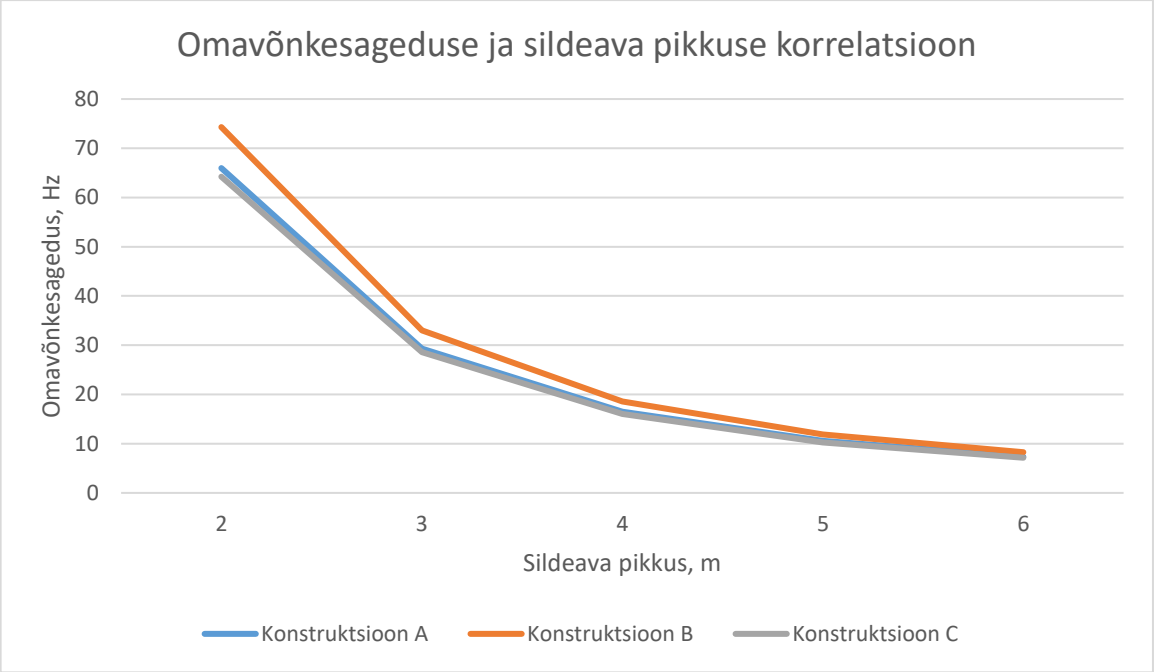
8.1 Omavõnkesagedus

Omavõnkesageduse piirväärtus ei saanud määravaks mitte ühegi konstruktsioonitüübi puhul. 8 Hz tundub olevat väga konservatiivne lävend, mis vähemalt nelja meetrise sildeavaga põrandatele takistuseks ei osutu. Minimaalse omavõnkesageduse väärtuse omandas konstruktsioonitüüp A, kus Soome Eurokood 5 rahvusliku lisa kohaselt saadi tulemuseks 12,78 Hz. See on ligi 60% kõrgem tulemus, kui standardne piirväärtus 8 Hz, mis jätab üpris suure varu tingimuse täitmiseks. Kõikide põrandakonstruktsioonide omavõnkesageduse väärtused vastavalt sihtriigi rahvuslikele lisadele on välja toodud tabelis (Tabel 4). Lisaks eelnevalt nimetatud väärtusele on tabelis välja toodud kandva konstruktsiooni efektiivse paindejäikuse väärtused, mis konstruktsiooni massi ja sildeava pikkuse kõrval väga tähtsat rolli omavad.

Tabel 4. Nelja meetrise sildeavaga põrandate omavõnkesagedused

Omavõnkesagedus f_1 (Hz)	**Eesti**	**Soome**	**Rootsi**	**Norra**
Tingimus	**$f_1 \geq 8$ Hz**	**$f_1 \geq 9$ Hz**	**$f_1 \geq 8$ Hz**	**$f_1 \geq 8$ Hz**
Konstruktsioon A $EI_l = 12{,}7 \cdot 10^5$ Nm^2/m $EI_b = 2{,}48 \cdot 10^3$ Nm^2/m	16,49	12,78	16,49	16,49
Konstruktsioon B $EI_l = 17{,}9 \cdot 10^5$ Nm^2/m $EI_b = 2{,}27 \cdot 10^3$ Nm^2/m	18,58	14,69	18,58	18,58
Konstruktsioon C $EI_l = 16{,}3 \cdot 10^5$ Nm^2/m $EI_b = 2{,}26 \cdot 10^3$ Nm^2/m	16,05	13,10	16,05	16,05

Eelnevalt välja toodud tabelis on välja toodud omavõnkesageduse väärtused vaid nelja meetrise sildeava puhul. Valemis (11) on aga üks muutuja, milleks on sildeava pikkus. Ülejäänud väärtused on fikseeritud parameetrid, milleks on konstruktsioonitüübi ühikpinna mass ja efektiivne paindejäikus sildeava suunas. Sellest tulenevalt koostas autor omavõnkesageduse ja sildeava pikkuse korrelatsiooni diagrammi, kus on näha sildeava pikkuse mõju põrandakonstruktsiooni omavõnkesagedusele. Joonisel (Joonis 24) olevas diagrammis on sildeava maksimaalseks pikkuseks kuus meetrit, kuna maksimaalne jätkamata C24 tala pikkusmõõt on 6 meetrit. Kuna valemis (11) tuleb ühikpinna massi riikide rahvusliku lisa alusel määrata, siis täpsustusena tuleb mainida, et joonisel (Joonis 24) esitatud väärtused on saadud vaid konstruktsiooni omakaalu arvestades.



Joonis 24. Omavõnkesageduse ja sildeava pikkuse korrelatsiooni diagramm

Üleval olevalt diagrammist võib näha, et põranda sildeava pikenedes langeb omavõnkesageduse väärtus drastiliselt. Kuue meetrise sildeava puhul on kõikide konstruktsioonitüüpide omavõnkesageduse väärtus juba kriitilises piirkonnas, mistõttu on juba selles kontrollfaasis nende konstruktsioonide kasutusmugavus ja sobivus kahtluse all. Järgmise tingimuse täitmisesse, milleks on läbipaine, tuleks sellisel juhul suhtuda pigem pessimistlikult kui optimistlikult. Nelja meetrine sildeava, mis on ka uuritava mooduli sildeava pikkuseks, tagab iga konstruktsiooni puhul rahuldava omavõnkesageduse väärtuse. Kõik konstruktsioonitüübid täitsid ka omavõnkesageduse tingimuse. Konstruktsioon C puhul, kus kandev tala on I-tala, on täidetud ka tala tootja poolt määratud soovituslik minimaalne omavõnkesagedus, milleks on 16 Hz.

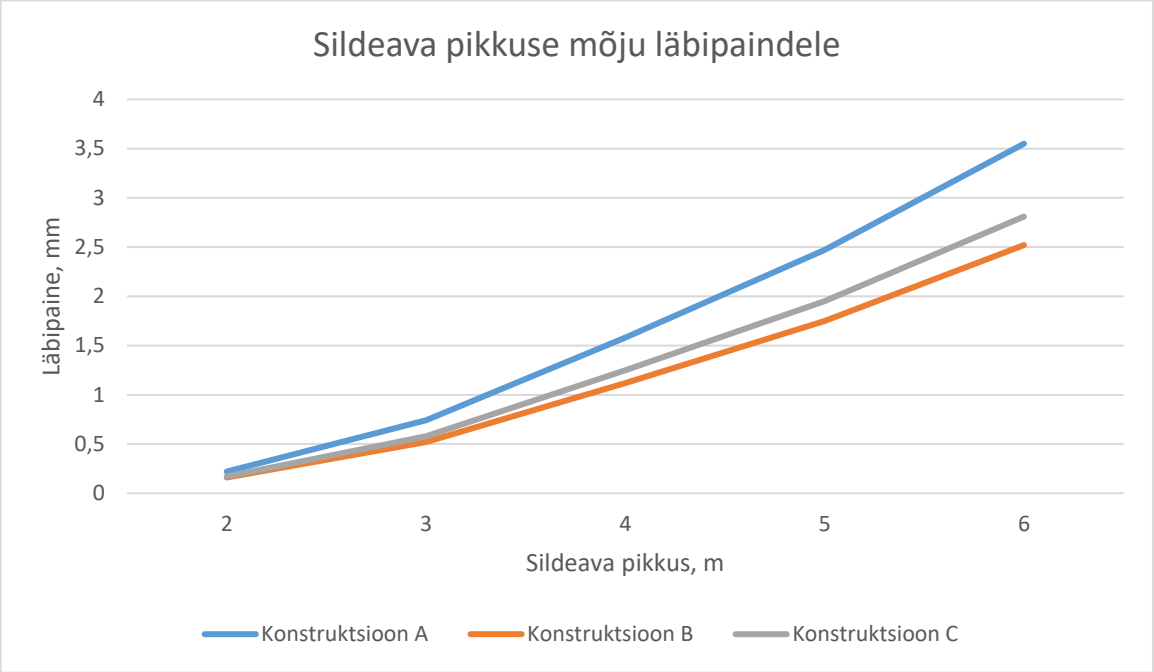
8.2 Läbipaine

Hetkeline läbipaine, mis on tingitud sildeava tsentrisse paigutatud 1 kN koormusest, on tingimus, mis nendest kolmest omab enim mõju tingimuste mitte täitmisel. Kõik konstruktsioonitüübid läbisid esimese tingimuse, milleks oli omavõnkesagedus, üsna suure varuga, mistõttu võib ekslikult eeldada, et konstruktsioon justkui sobiks uuritava mooduli geomeetria puhul. Arvutustulemused näitasid aga vastupidist. Kõige leebem läbipainde piirväärtus on Rootsil, mis sai takistuseks ainult konstruktsioonitüüp A jaoks. Ülejäänud konstruktsioonitüübid läbisid Rootsi Eurokood 5 rahvuslikus lisas kehtestatud üsna konservatiivse läbipainde tingimuse edukalt. Eesti Eurokood 5 rahvuslikus lisas konkreetseid läbipainde piirväärtusi ei ole sätestatud, mistõttu pidi autor graafiku (Joonis 16) abil valima sellise piirväärtuse, mis tagaks rahuldava kasutusmugavuse. Selleks piirväärtuseks valis autor 1,0 mm, mida kahjuks ei täitnud mitte ükski konstruktsioonitüüp. Konstruktsioonitüüp B oli kõige lähedamal selle tingimuse täitmisele, kui piirväärtust ületati vaid 0,12 mm. Kõige rangemad läbipainde tingimused on nelja riigi hulgas sätestatud Norras ja Soomes. Soomes kehtivat piirväärtust, mis nelja meetrise sildeava puhul on 0,65 mm, ei täitnud mitte ükski konstruktsioonitüüp. Sama stsenaarium kehtib ka Norra puhul. Mitte ükski konstruktsioonitüüp ei täitnud kõrge- ja madala jäikusnõudega põrandatele kehtestatud läbipainde tingimusi. Tabel (Tabel 5) annab ülevaate uuritavate riikide läbipainde piirväärtustest, konstruktsioonitüüpi iseloomustavatest jäikusväärtustest ja arvutustulemusena saadud läbipainde väärtustest.

Tabel 5. Konstruktsioonitüüpide läbipainde väärtused nelja meetrise sildeva puhul

Läbipaine ***w*** **(mm)**	**Eesti**	**Soome**	**Rootsi**	**Norra**
Tingimus	$a \leq 1{,}00$ **mm**	**Kui** $l = 4$ **m**	$a \leq 1{,}50$ **mm**	$a \leq 0{,}90$ **mm**
		$a \leq 0{,}65$ **mm**		$a \leq 0{,}60$ **mm**
Konstruktsioon A $EI_l = 12{,}7 \cdot 10^5$ Nm²/m $EI_b = 2{,}48 \cdot 10^3$ Nm²/m	1,57	1,57	1,57	1,57
Konstruktsioon B $EI_l = 17{,}9 \cdot 10^5$ Nm²/m $EI_b = 2{,}27 \cdot 10^3$ Nm²/m	1,12	1,12	1,12	1,12
Konstruktsioon C $EI_l = 16{,}3 \cdot 10^5$ Nm²/m $EI_b = 2{,}26 \cdot 10^3$ Nm²/m	1,25	1,25	1,25	1,25

Põhilisi läbipainde tingimuse läbikukkumise põhjuseid on kolm. Põranda jäikus, sildeava pikkus ehk käesolevas lõputöös mooduli laius ja talade samm. Üheks teoreetiliseks võimaluseks läbipainet vähendada, oleks muuta talade sammu tihedamaks, kuid kuna valemis (15) tuleb arvestada ka põranda jäikusväärtuste suhtarvuga, siis seetõttu on muudetavaid tegureid rohkem kui talade samm. Nendest kolmest läbikukkumise põhjusest kõige suurema mõjuga on põranda sildeava pikkus. Seda argumenti väljendab ka joonis (Joonis 25), kus on näha läbipainde drastilist suurenemist sildeava pikenedes.



Joonis 25. Sildeava pikkuse mõju läbipaindele

Loomulikult on läbipainet võimalik vähendada konstruktiivsete võtetega, kuid see nõuab täpset põranda jäikusparameetrite arvutust ja nende võtete tasuvuse analüüsi. Käesolevas lõputöös seda lahendust mahu tõttu ei analüüsita.

8.3 Ühikimpulsi kiirusvaste

Tegemist on viimase tingimusega, milleni jõudsid vaid konstruktsioonitüübid B ja C. Tingimust kontrolliti vaid Rootsi Eurokood 5 rahvuslikus lisas kehtivate väärtuste alusel, kuna läbipainde tingimus täideti ainult Rootsis kehtivate piirväärtuse puhul. Konstruktsioonitüüp B täitis Rootsis kehtiva ühikimpulsi kiirusvaste tingimuse edukalt. Seda sama ei saa väita konstruktsioonitüüp C kohta, mis kahjuks ületas tingimust 0,001 ühiku võrra. Tegemist on üsna marginaalse läbikukkumisega, kuid siiski faktiline argument, millest ei tohiks kõrvale vaadata.

KOKKUVÕTE

Lõputöös uuritavad konstruktsioonitüübid tegid üllatavalt halva tulemuse. Konstruktsioonitüüp A puhul oli tulemus ootuspärane, kuid B ja C puhul ei saa kindlasti seda sama väita. Nelja meetrise laiuse ja kümne meetrise pikkuse moodulhoone vahelae põrandaelemendi konstruktsioonitüübiks sobib vaid variant B, mida võib rakendada vaid Rootsi ehitusturul. Eesti ehitusturule autori valitud piirläbipainde korral variant B ei sobi, kuid reaalses situatsioonis on tellijaga võimalik kooskõlastada täpsed piirväärtused rahvuslikus lisas kajastatud graafiku (Joonis 16) baasil, mis arvestaks kõikide osapoolte soove. Sellest tulenevalt ei saa Eesti Eurokood 5 rahvusliku lisa kohaselt teha kinnitavaid järeldusi konstruktsioonitüüpide sobivusest ja mittesobivusest. Problemaatiliseks pöörab olukorra asjaolu, et konstruktsioonitüüp B puhul on kasutatud maksimaalset C24 tugevusklassi tala ristlõiget, milleks on 45x245 mm. See tähendab, et üle nelja meetri laiuse moodulhoone puhul ei pruugi olla võimalik tavalise C24 tugevusklassi puittalaga vibratsioonitingimusi täita. Probleem esineb juba nelja meetri laiuse mooduliga. Soome ja Norra kõrge jäikusnõudega põrandate läbipainde tingimuse täitmiseks oleks nelja meetri laiuse mooduli ja konstruktsioonitüüp B puhul vaja läbipainet vähendada ligikaudu 55%. Konstruktsioonitüüp C puhul küündib see juba üle 60%. Ratsionaalsete konstruktiivsete lahendustega tundub see tõsiselt väljakutsuva, kui et mitte võimatu ülesandena.

Üheks võimalikuks lahenduseks oleks kasutada suurema ristlõike ja kandevõimega LVL[5] talasid või sama ristlõige topelt talana. Seega tuleks mooduli laiust ja vahelae põrandaelemendi konstruktsiooni paksust juba arhitektuurses faasis sildeava suhtes kriitilise pilguga vaadata. Konstruktsiooni kandepiirseisund võib ju olla täidetud, kuid arvestamata ei saa jätta kasutuspiirseisundi tingimusi milleks on siirded ja vibratsioon.

Kui välja jätta kõiksugu parendavad konstruktiivsed lahendused, siis teiseks ja ehk fundamentaalseks probleemiks on vibratsiooni ja seda hõlmavad arvutusmetoodikad. Lõputöö käigus uuris autor mitmeid arvutusnäiteid ja teatmeteoseid põrandate vibratsiooni kohta. Kõik tõlgendasid arvutusvalemites olevaid parameetreid erinevalt, mistõttu saavutati sarnaste konstruktsioonide puhul ka väga erinevad tulemused. Sellest tulenevalt võivad käesolevas lõputöös uuritavate konstruktsioonitüüpide kehvad tulemused olla seotud arvutusmetoodikatega, mis on liiga lihtsakoelised ja kohati väga ebamääraselt tõlgendatavad. Sama argument on välja toodud ka lõputöös kajastatud uuringus.

[5] Liimkihtpuit

Arvutusmetoodikates esineb ka palju puudusi, mis suudaks põrandakonstruktsiooni terviklikku töötamist efektiivsemalt hinnata. Ühe näitena võib välja tuua karkassi põiksidemed ja nende efektiivsuse tõendamine. Hetkel puudub selle konstruktiivse lahenduse kohta üheselt mõistetav ja detailne arvutusmetoodika. Täiendamist vajavad kindlasti ka riikide rahvuslikud lisad, mis võiksid parema tulemuse ja probleemide vältimise eesmärgil olla detailsemad. Hea näitena võib hetkel välja tuua Soome Eurokood 5 rahvuslikus lisas olevat vibratsiooni peatüki 7.3.3, kus on välja toodud mitmeid lisanüansse ja arvutusmetoodika täpsustusi. Positiive on, et Eurokood 5 on hetkel uuendamisel ja loodetavasti pööratakse tähelepanu ka põrandate vibratsiooni peatükile.

SUMMARY

Vibration analysis of Modular Building Timber Floor Elements

The topic of this final thesis is the analysis of vibration of floor elements of interior timber ceilings of a modular building. The aim of the thesis is to analyse the vibration of the four-metre floor element of the interior timber ceiling of a modular building and map vibration requirements in Estonia and the most popular export countries. Structural types with three different layering are analysed in the paper. The primary differences in the structural types are the parameters of the load-bearing beam and the rigidifying floor plate. The surveyed module is four metres wide and ten metres long. For ease of the calculation model, the geometry of the floor equals the geometry of the module. In addition to an analysis of the structural types, vibration requirements in force in Estonia and the most popular countries of export are provided. These countries of export are Finland, Sweden and Norway. In order to highlight the topicality of the subject of the thesis, the author refers to a research paper as one of the most used and useful sources, focused specifically on vibration of interior timber ceilings. The selection of the geometry of the module is briefly explained and the technology of the interim ceiling of a modular building described.

The calculation method for vibration is taken from a document regulating the design of timber structures, named EN 1995-1-1:2004. This is colloquially known as Eurocode 5. Other calculation methods related to strength of materials are taken from instructions of manufacturers, national annexes to Eurocode 5, and literary sources. For more precise and efficient calculation results, the effective bending stiffness is considered as the bending stiffness value of the floor structure. This means that the floor structure works as a wooden rib panel where the rigidifying floor panel in the upper layer and the beam in the structural layer work as a joint structure when load is applied. The calculation method for effective bending stiffness of the structural type C is provided separately in the chapter for this specific type of structure, as the wooden rib panel are formed by an I-beam and the rigidifying floor plate.

The calculation results for all structural types were unexpectedly bad. The structural type A successfully passed the specific oscillation frequency requirement in force in the countries, but the deflection turned out to be crucial, being too large with a four-metre span. The structural type B was the most successful. Requirements to specific oscillation frequency were met successfully, but the deflection limitations in force in Estonia, Finland and Norway turned out to be crucial. The structural type B successfully met requirements to vibration in floor structures in force in Sweden and it can be

used as a four-metre floor structure for an interim ceiling of a modular house. The structural type C was close to the same result, but in the end, the limit of unit impulse velocity response also turned out to be pivotal; this was exceeded by 0.001 units. The value is marginal, but nevertheless a factual argument which cannot be ignored. This means that the structural type C cannot be applied in modular projects for any of the countries if the width of the module is ≤ 4 m. The length of span was the determining factor in all structural types, causing far too much deflection.

One cause for poor results may also be excessively simplistic calculation methods concerning vibration, which are subject to vague interpretations. There are no clear guidelines and formulas in calculation methods which would allow to assess the efficiency of various rigidifying structural solutions. One such example is transverse bonds.

On a positive note, Eurocode 5 is currently being updated and the calculation method for vibration of floor structures will hopefully also receive some attention.

VIIDATUD ALLIKAD

[1] E.-J. Just *et al.*, *Puit- ja puidupõhised konstruktsioonid: õpik kõrgkoolidele*, 2., Parand. tr. Tallinn: [Tallinna Tehnikaülikooli] Kirjastus, 2018.

[2] C. Y. P.E, „Single Degree of Freedom Systems“, *EngineerExcel*, 26. märts 2022. https://engineerexcel.com/single-degree-of-freedom-systems/ (vaadatud 2. märts 2023).

[3] „Lihtharmooniline võnkumine“, *Vikipeedia*. 1. veebruar 2022. Vaadatud: 2. märts 2023. [Online]. Available at: https://et.wikipedia.org/w/index.php?title=Lihtharmooniline_v%C3%B5nkumine&oldid=6042096

[4] „II. VÕNKUMINE.LAINED“, *Füüsika põhivara*, 1. juuni 2016. https://opik.kirsman.ee/pohikool/8klass/vonkumine-lained/ (vaadatud 2. märts 2023).

[5] W. Schiren ja T. Swahn, „Vibration in residential timber floors“. Linnaeus University, 2019.

[6] Q. Suckling, „VIBRATION ANALYSIS OF SLABS USING RAM CONCEPT“, *Sheer Force Engineering*, 13. oktoober 2021. https://sheerforceeng.com/vibration-analysis-of-floor-slabs-using-ram-concept/ (vaadatud 3. märts 2023).

[7] D. Software, „Mode Shape“, *Dlubal*, 16. august 2019. https://www.dlubal.com/en/solutions/online-services/glossary/000069 (vaadatud 3. märts 2023).

[8] I. Glisovic ja B. Stevanovic, „VIBRATIONAL BEHAVIOUR OF TIMBER FLOORS“.

[9] P. Hamm, A. Richter, ja S. Winter, „Floor vibrations – new results“.

[10] T. Toratti ja A. Talja, „Classification of Human Induced Floor Vibrations“.

[11] EVS, „ISO 2631-2:2003“, *EVS*. https://www.evs.ee/en/iso-2631-2-2003 (vaadatud 4. märts 2023).

[12] European Commitee for standardization, „EN 1995-1-1:2004+A1“. 2008.

[13] „Element- ja moodulhooned“, *Timbeco*. https://timbeco.ee/ (vaadatud 18. veebruar 2023).

[14] „Moodul – MATEK“. https://www.matek.ee/et/module/ (vaadatud 18. veebruar 2023).

[15] „Kodumaja - Kuidas teeme“, *Kodumaja*. https://kodumaja.ee/kuidas-teeme/ (vaadatud 18. veebruar 2023).

[16] „WOHOM - Moodulmajad“. https://wohom.ee/moodulmajad/ (vaadatud 18. veebruar 2023).

[17] „MOODULMAJA PUIT - Ramirent EE“. https://www.ramirent.ee/tooted/soojakud-ja-konteinerid-15/moodulmajad-223/moodulmaja-puit-2664/ (vaadatud 18. veebruar 2023).

[18] „Ehitusprotsessid | Harmet Construction“. https://www.hcs.ee/ehitusprotsessid/ (vaadatud 18. veebruar 2023).

[19] „Vibrafoam“. https://plastok.ee/ (vaadatud 1. märts 2023).

[20] J. Rohusaar *et al.*, Toim, *Ehituskonstruktori käsiraamat*, 2., Parand. ja Täiend. tr. Tallinn: Ehitame Kirjastus, 2010.

[21] Suomen Rakentamismäärayskokoelma, „SFS-EN 1995-1-1 + A1 + A2 + AC“. Suomen Rakentamismäärayskokoelma, 2016.

[22] Eesti Standardikeskus, „EVS_EN_1995_1_1_2005+NA_2007+A1_2008+NA_2009_et.pdf“. Eesti Standardikeskus, 6. august 2015.

[23] Swedish Institute for Standards, SIS, „SS-EN 1995-1-1:2004“. Vaadatud: 9. märts 2023. [Online]. Available at: https://www.sis.se/en/produkter/construction-materials-and-building/construction-industry/technical-aspects/ssen1995112004/

[24] S. Norge, „NS-EN 1995-1-1:2004+A1:2008+NA:2009“. Standard Norge. Vaadatud: 10. märts 2023. [Online]. Available at: https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=386787

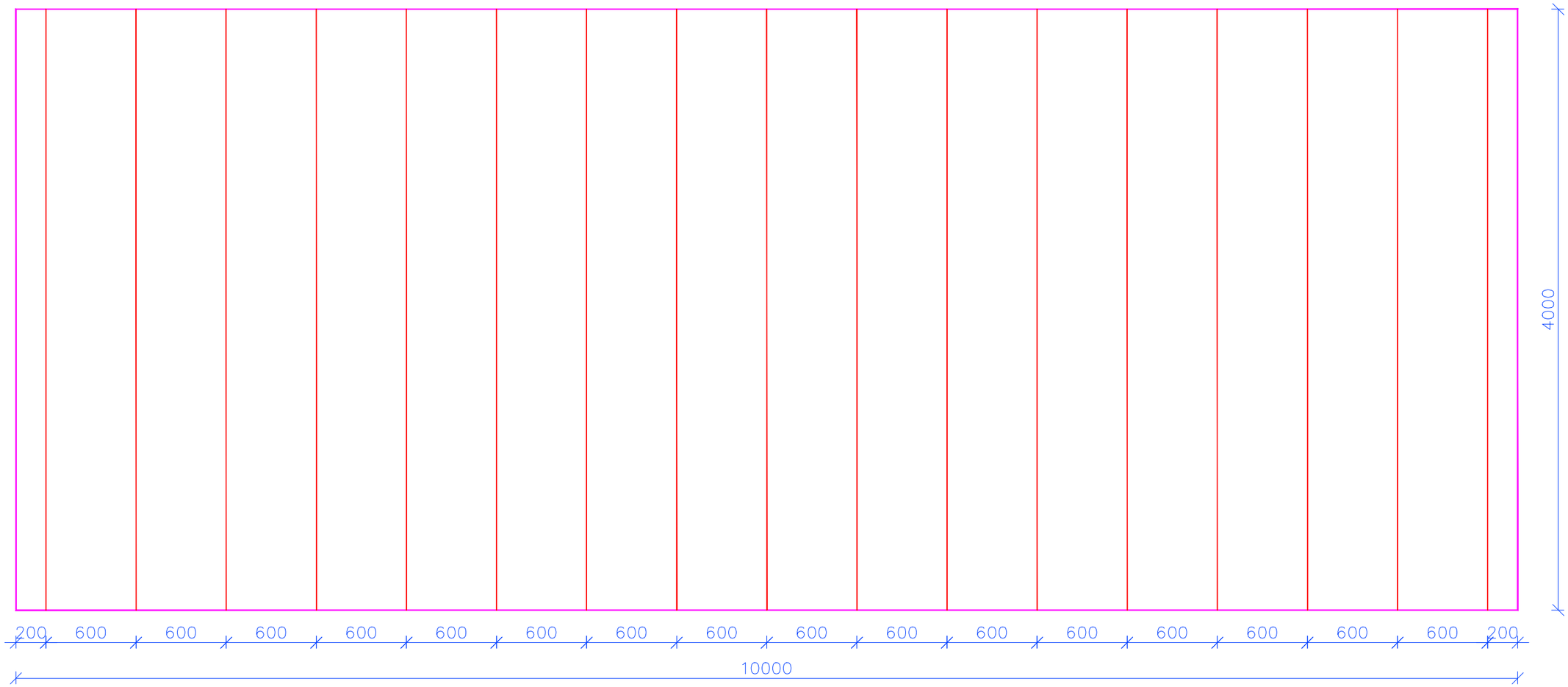
[25] B. Ida Nordegen, „Assessments of vibrational properties of timber joist floors.pdf“. Norwegian University of Life Sciences, 2017.
[26] Swedish Forest Industries Federation ja Swedish Wood, „Design of timber structures-2“. Swedish Forest Industries Federation, 2016.
[27] F. AS, „Product Data Sheet - Forestia AS“. Forestia AS, 2020.
[28] M. Beams, „The I-Joist Handbook“. Masonite Beams AB, 2022.

GRAAFILINE OSA

Joonis 26. Arvutusskeemi plaan

Joonis 27. Arvutusskeemi lõige

VAHELAE PLAANILINE ARVUTUSSKEEM
M1:30

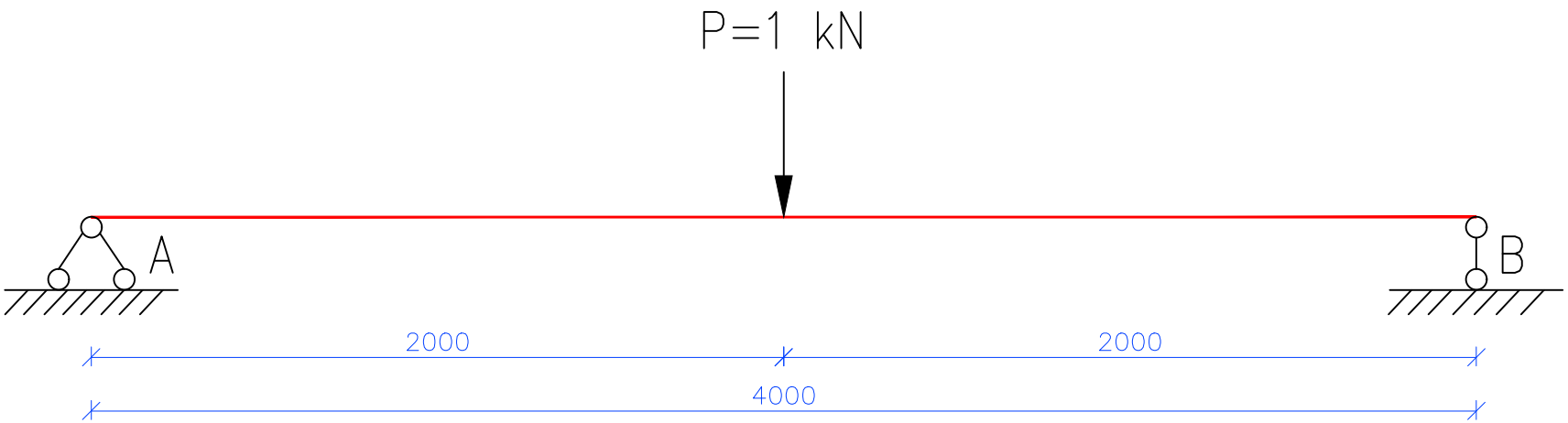


PÕRANDATALAD/RIBID
SERVATALAD

TALLINNA TEHNIKAKÕRGKOOL	LÕPUTÖÖ MOODULHOONE PUITVAHELAE PÕRANDAELEMENDI VIBRATSIOONI ANALÜÜS		
Koostas: M.Parkala	Joonise nimetus ARVUTUSSKEEMI PLAAN		
Juhendas: A.Animägi			
Juhendas:	Joonise nr 26	Töö nr EHE053	Õpperühm: KHE2019
TALLINN 14.04.2023	Skaala 1:30	Leht: 1	Lehti: 2

VAHELAE ARVUTUSSKEEMI LÕIGE

M1: 20



TALLINNA TEHNIKAKÕRGKOOL	LÕPUTÖÖ MOODULHOONE PUITVAHELAE PÕRANDAELEMENDI VIBRATSIOONI ANALÜÜS		
Koostas: M.Parkala	Joonise nimetus ARVUTUSSKEEMI LÕIGE		
Juhendas: A.Animägi			
Juhendas:	Joonise nr 27	Töö nr EHE053	Õpperühm: KHE2019
TALLINN 14.04.2023	Skaala 1:30	Leht: 2	Lehti: 2