



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

**MODULAARSE RUUMELEMENDI
SPOONLIIMPUIDUST (LVL) JA TERASEST
OTSARAAMI JÄIKUSE
EKSPERIMENTAALNE UURIMINE**

**EXPERIMENTAL RESEARCH IN RIGIDNESS OF THE
MODULAR ROOM ELEMENT END FRAME MADE OF
LAMINATED VENEER LUMBER (LVL) AND STEEL**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Anna Aamisepp

Üliõpilaskood: 177509

Juhendaja: Eero Tuhkanen

Tallinn 2022

(Tiitellehe pöördel)

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"....." 20.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 20.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Anna Aamisepp

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Modulaarse ruumelemendi spoonliimpuidust (LVL) ja terasest otsaraami jäikuse eksperimentaalne uurimine“,

mille juhendaja on Eero Tuhkanen,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

_____ (kuupäev)

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Anna Aamisepp 177509 (nimi, üliõpilaskood)

Õppekava, peeriala: EAEI02/17 Ehitiste projekteerimine ja ehitusjuhtimine .(kood ja nimetus)

Juhendaja(d): lektor Eero Tuhkanen (amet, nimi, telefon)

Lõputöö teema:

Modulaarse ruumelemendi spoonliimpuidust (LVL) ja terasest otsaraami jäikuse eksperimentaalne uurimine

Experimental Research in Rigidity of the Modular Room Element End Frame Made of Laminated Veneer Lumber (LVL) and Steel

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Uurida eksperimentaalselt ruumelemendi spoonliimpuidust ja terasest otsaraami jäikust
2. Võrrelda eksperimendi tulemusi teoreetiliste arvutustega

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Anda ülevaade kirjandusest	12.01.2022
2.	Ülevaade ruummoodulist ja otsaraami geomeetria kirjeldamine	12.02.2022
3.	Jäikuse teoreetiline arvutus	12.04.2022
4.	Katse seadistamine ja läbiviimine	19.04.2022
5.	Katse tulemuste kirjeldamine	06.05.2022
6.	Tulemuste analüüs	13.05.2022
7.	Lõputöö lõplik vormistamine	17.05.2022

Töö keel: eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** 19. mai 2022. a

Üliõpilane: ".....".....20.....a
/allkiri/

Juhendaja: ".....".....20.....a
/allkiri/

Programmijuht: ".....".....20.....a
/allkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

SISUKORD.....	5
Lühendite ja tähiste loetelu.....	7
SISSEJUHATUS	9
1. MOODULMAJADE JÄIGASTAMISE VÕIMALUSED.....	10
1.1 Jäigastamisest üldiselt.....	10
1.2 Jäikusseinade kasutamine.....	10
1.3 Diagonaalidest koosnevate moodulite (<i>diagrid</i>) kasutamine.....	12
1.4 Jäikuse tagamine sõlmühendustega	14
2. MUSTERMAJA RUUMELEMENT	18
2.1 Mustermaja.....	18
2.2 Ruumelemendi osad.....	19
2.3 Mooduli komponentide kandevõime.....	20
2.4 Mooduli horisontaalsuunaline jäikus	21
3. JÄIKUSE MÄÄRAMINE ARVUTUSLIKULT.....	22
3.1 Otsaraami geomeetria	22
3.2 Mooduli otsaraami arvutuslik horisontaalsuunaline jäikus.....	24
3.3 Naagelliite kandevõime.....	25
3.3.1 Naagelliite kandevõime alumiste sõlmede jaoks	27
3.3.2 Naagelliite kandevõime ülemise vasakpoolse sõlme jaoks.....	29
3.3.3 Naagelliite kandevõime ülemise parempoolse sõlme jaoks	30
3.4 Liite paindemooduli määramine	31
3.4.1 Paindemooduli leidmine alumistes sõlmedes	32
3.4.2 Paindemooduli leidmine ülemises vasakpoolses sõlmes	32
3.4.3 Paindemooduli leidmine ülemises parempoolses sõlmes	33
3.5 Horisontaalsuunalise otsasiirde leidmine	34
4. JÄIKUSE MÄÄRAMINE KATSELISELT	36
4.1 Katsemetoodika.....	36
4.2 Mõõtevahendid	37
4.3 Katse käik.....	38
4.4 Katse tulemused.....	38
5. TULEMUSTE ASETAMINE KONTEKSTI.....	41
5.1 Üldist	41
5.2 Tuulekoormuse leidmise alused	41
5.3 Tuulekoormuse leidmine M6 pikemale küljele	44
5.4 Tuulekoormuse leidmine otsaraamile.....	45
6. ANALÜÜS.....	47

KOKKUVÕTE	49
SUMMARY	50
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	51

Lühendite ja tähiste loetelu

Ladina suurtähed

$(EI)_{\text{post}}$	posti paindejäikus
$(EI)_{\text{LVL}}$	talade LVL osa paindejäikuse
$(EI)_s$	talade terasosa paindejäikus
$(EI)_{\text{tala}}$	talade paindejäikus
B_{ef}	spoonliimpuidu posti efektiivne laius
E_{LVL}	spoonliimpuidu elastsusmoodul
E_s	terase elastsusmoodul
I	ristküliku kujulise ristlõike inertsimoment
$F_{m,j}$	naaglile mõjuv koormus
$F_{v,Rk}$	naagli ühe nihkepinna kandevõime
$F_{v,Rk,liide}$	liite kandevõime
$F_{v,Rk,naagel}$	naagli kandevõime
F_{max}	koormus, mille juures raam puruneb
F_2	koormus $0,2F_{\text{max}}$
F_4	koormus $0,4F_{\text{max}}$
K_{ser}	liite hetkeline nihkemoodul
K_u	hetkeline liite nihkemoodul kandepiir seisundis
$K_{\Phi,ser}$	paindemoodul
M	liites mõjuv paindemoment
$M_{y,Rk}$	naagli voolavuspiirile vastav momendi normväärtus
R	jäikus

Ladina väiketähed

a_i	naaglite vahelised kaugused liites
$b_{\text{LVL},p}$	spoonliimpuit posti ristlõike laius
$b_{\text{LVL},t}$	spoonliimpuit tala ristlõike laius
b_s	teraslehe ristlõike laius
C_{dir}	suunategur
C_e	ekspositsioonitegur
C_{pe}	välisrõhu rõhutegur
C_{season}	aastaajategur
C_r	karedustegur
d	naagli diameeter
$f_{c,0,k}$	spoonliimpuidu normsurvetugevus pikikiudu
$f_{h,k}$	normmuljumistugevus
f_u	naagli tõmbetugevus

$h_{LVL,p}$	spoonliimpuit posti ristlõike kõrgus
$h_{LVL,t}$	spoonliimpuit tala ristlõike kõrgus
h_s	teraslehe ristlõike kõrgus
k	lõigete arv spoonliimpuidu ja terase liites
k_C	tegur normmuljumistugevuse leidmiseks
k_{ef}	tegur, mis oleneb naaglite paigutusest pikikiudu
k_r	maastikutüübitegur
k_{90}	tegur normmuljumistugevuse leidmiseks
l_j	naagli ja survetsooni vaheline kaugus
n	naaglite arv
r_j	naagli ja pöördepunkti vaheline kaugus
t_1	äärmise puitelemendi vähim paksus
u	liite deformatsioon
u_{ser}	hetkeline deformatsioon
v_b	tuule baaskiirus
w_e	tuulerõhk
q_b	keskmise tuule baaskiirusrõhk
q_p	tippkiirusrõhk
z	asukoha kõrgus maapinnast
z_{min}	miinimumkõrgus
z_{max}	maksimumkõrgus

Kreeka väiketähed

α	nurk koormuse ja puidu kiu suuna vahel
β	nurk naagli telje ja puidu osa laiema külje vahel
ρ_k	spoonliimpuidu mahukaal
ρ_{mean}	spoonliimpuidu mahukaal
φ_{ser}	sõlme pöördnurk
v_i	siire

SISSEJUHATUS

Ehitus on traditsiooniliselt olnud käsitöö. Alates esimesest tööstusrevolutsioonist 18. sajandil on ka ehitussektor muutunud. Esimene tööstusrevolutsioon tõi ehitusse mehaanilised seadmed, teine elektrienergia kasutamise oskuse ja sellega ka võimaluse toota erinevaid ehitusmaterjale massiliselt. Kolmas tööstusrevolutsioon tõi kaasa digitaalse revolutsiooni, mis ehituses väljendus infomudelite kasutamises. Praegune neljas tööstusrevolutsioon on üles ehitatud digitaalsele revolutsioonile. Tööstus 4.0 eesmärk on saavutada tootmissüsteem, mis on majanduslikult, sotsiaalselt ja keskkonna poolest jätkusuutlik. Ehituses tähendab see seda, et soovitakse tehases toota terve maja, selle juures inimressurssi kasutada nii vähe kui võimalik, et tagada võimalikult suur efektiivsus. Tulemuseks ongi moodulid või lausa terved hooned koos vajalike süsteemidega, mille saab hiljem platsil lihtsalt ja kiirelt püstitada. [1]

2020. aasta lõpus ja 2021. aastal on Euroopa Liidus kinnisvarahinnad tõusnud aastas 6%. Inimestel on Covid-19 pandeemiast tingitud piirangute tõttu jäänud rohkem raha üle investeringuteks ning tihti otsustatakse kinnisvarainvesteeringu kasuks, mis on tõstnud nõudlust korteritele. [2] Samuti on kasvanud ka ehitushinnad. Eestis on ehitushinnaindeks kasvanud 2021. aasta kolmandas kvartalis 11,8% võrreldes 2020. aasta kolmanda kvartaliga, millest suurema osa moodustavad ehitusmaterjalide hinna ja tööjõukulu kasv [3]. Tekkimas on olukord, kus kodu ostmine pole paljudele enam jõukohane. Moodulitest projekteeritud hooned on tänu efektiivsemale valmimisele taskukohasemad.

Moodulid võivad olla erinevatest materjalidest. Käesolev magistritöö keskendub Mustermaja spoonliimpuidust valmistatud moodulitele. Moodulid on taskukohase hinnaga, kuid samal ajal kergesti kohandatavad keskkonna ja elanike vajaduste järgi [4]. Mustermaja mooduleid on kolmes suuruses – M3, M6, M9, mis on vastavalt suurustega 3x3 m, 3x6 m ja 3x9 m. Moodulid koosnevad neljast nurgapostist ning lae – ja põrandaelementidest. Postide ja talade nurkades on teraslehed, mis seovad talad ja postid omavahel jäigaks raamiks. Moodulitest saab kokku panna kuni 7 korruselisi hooned. [5]

Magistritöö eesmärgiks on uurida eksperimentaalselt mooduli M6 otsaraami teras- ja puitliidete jäikust.

1. MOODULMAJADE JÄIGASTAMISE VÕIMALUSED

1.1 Jäigastamisest üldiselt

Moodulite kasutamine ehituses saab iga aastaga populaarsemaks. Ehitusseadustiku järgi peab ehitisel olema tagatud mehaaniline vastupidavus ja stabiilsus [6]. Selle alla kuulub ka hoone jäikuse tagamine, mida saab tagada mitmel erineval viisil. Käesolev peatükk annab ülevaate moodulite jäigastamise võimalustest.

1.2 Jäikusseinade kasutamine

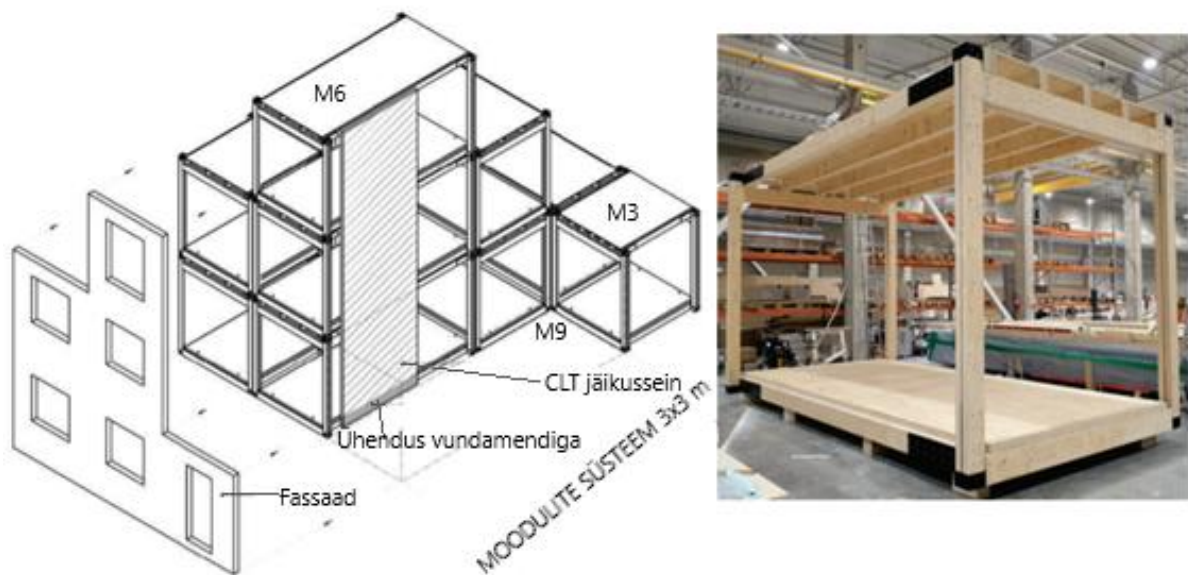
Terasmoodulite puhul kasutatakse jäigastamiseks tihti jäikusseinu (joonis 1.1). Moodul oma struktuurilt on raamkonstruktsioon, kuid lisatakse terasprofiilist kerged vaheseinad ja laed. Seinad paigaldatakse moodulile juba tehases. Mitme mooduli kõrvuti panemisel tagavad seinad ka heli- ja soojusisolatsiooni eri ruumide vahel, mille jaoks võib erinevates ühiskondlikes hoonetes olla suur vajadus. Eelkõige töötavad need seinad aga konstruktsiooni jäigastava elemendina. [7]



Joonis 1.1 Terasest jäikusseinad. Allikas [7].

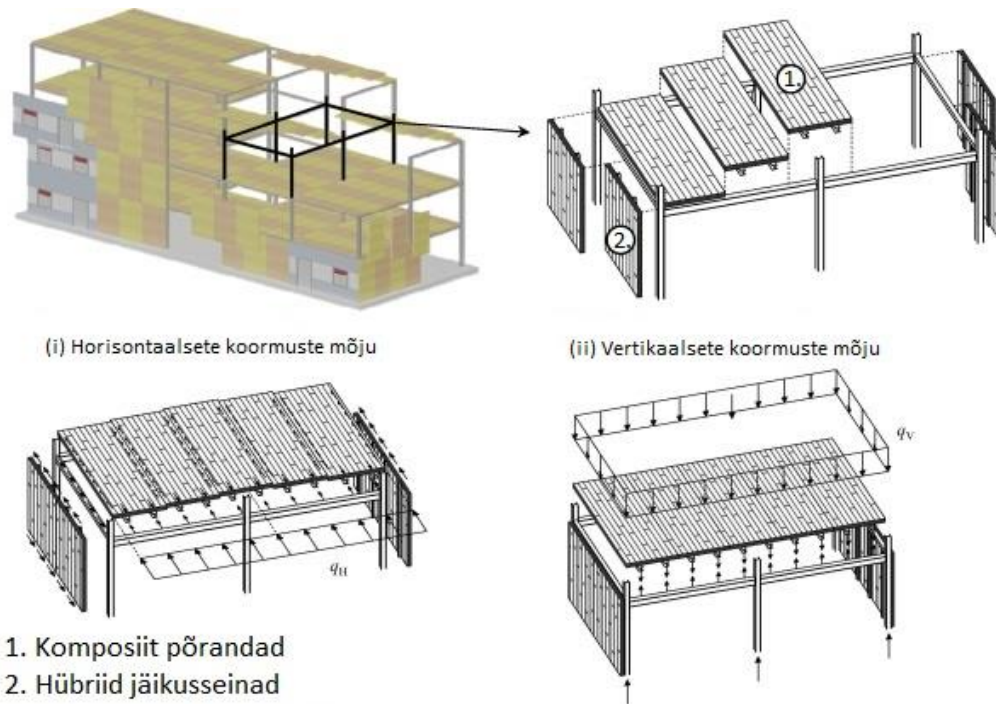
Puitmoodulitel kasutatakse samuti jäigastamiseks seinu (joonis 1.2). Puidust jäikusseintena kasutatakse tavaliselt orienteeritud kihtidega (OSB) plaate, kuid ka ristkiht-liimpuit (CLT) paneele. Puitu kombineeritakse terasega, sest puidust jäikusseinad on nõrkade tugevusomadustega. Jäikust tagavad konstruktsioonid koosnevad kahest teraspostist, mis on kahelt poolt kaetud OSB plaatidega. Sellises

konstruktsioonis võtavad teraspostid vastu vertikaalsed koormused, samal ajal OSB plaat tagab konstruktsiooni jäikuse. [8]



Joonis 1.2 Vasakul: puidust jäikusseinade kasutamine Mustermaja moodulitel, paremal: Mustermaja moodul. Foto autor: Egle Vogt. Allikas [9].

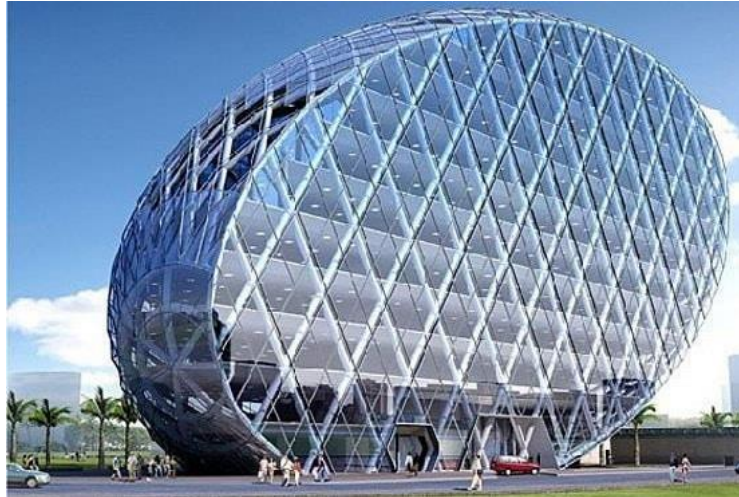
Puidust jäikusseinu võib kasutada ka terasmoodulitel, saades niimoodi hübriid konstruktsiooni (joonis 1.3). CLT paneelid kinnitatakse terasest talade külge mehaaniliste kinnitustega. Talad koos puitpaneelidega kinnitatakse terasest raamile, kasutades poltühendusi. Terasmoduleid kasutatakse eelkõige kõrghoonete valmistamiseks, sest terase tugevusomadused on puidu omadest paremad. Samal ajal on jäikusseinad ristkiht- liimpuidust, mis annab arhitektuurselt rohkem võimalusi hoone kujundamiseks. [10]



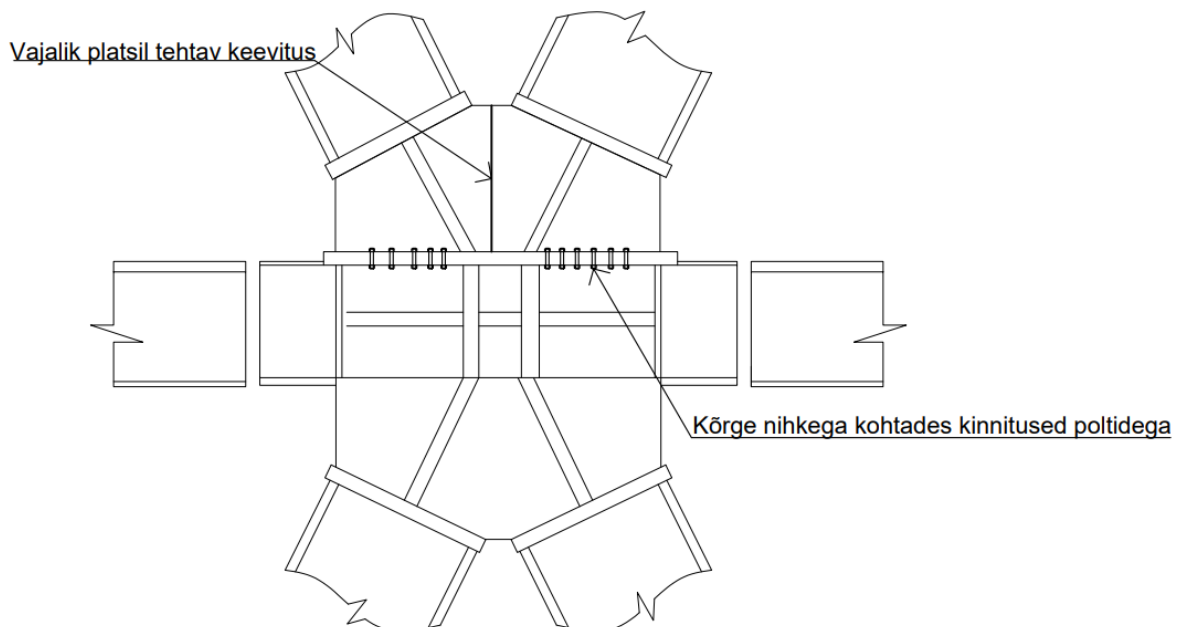
Joonis 1.3 Hübridmoodulid. Allikas [10]

1.3 Diagonaalidest koosnevate moodulite (*diagrid*) kasutamine

Diagrid süsteemis koosnevad moodulid diagonaalidest (joonis 1.4). Moodulid kokku pannes saab diagonaalidest raamistiku, mille jäikus on tänu diagonaalidele tagatud. *Diagrid* mooduleid võib teha metallist, puidust ja betoonist. Antud süsteemis jooksevad diagonaalid kokku sõlmedesse. Moodulite ühendused on samuti sõlmedes. Moodulid ühendatakse kas keevisliitega või poltidega. Ühes moodulis on koos kaks kuni kuus korrust. Arhitektuuriliselt ei anna antud süsteem palju võimalusi, sest on diagonaalide tõttu väga piiratud. Teisest küljest annab sellise süsteemi kasutamine suure ressurside kokkuhoiu. *Diagrid* mooduleid kasutatakse kõrghoonete, suure sildeliste hoonete või keeruka kujuga hoonete ehitusel. [11]

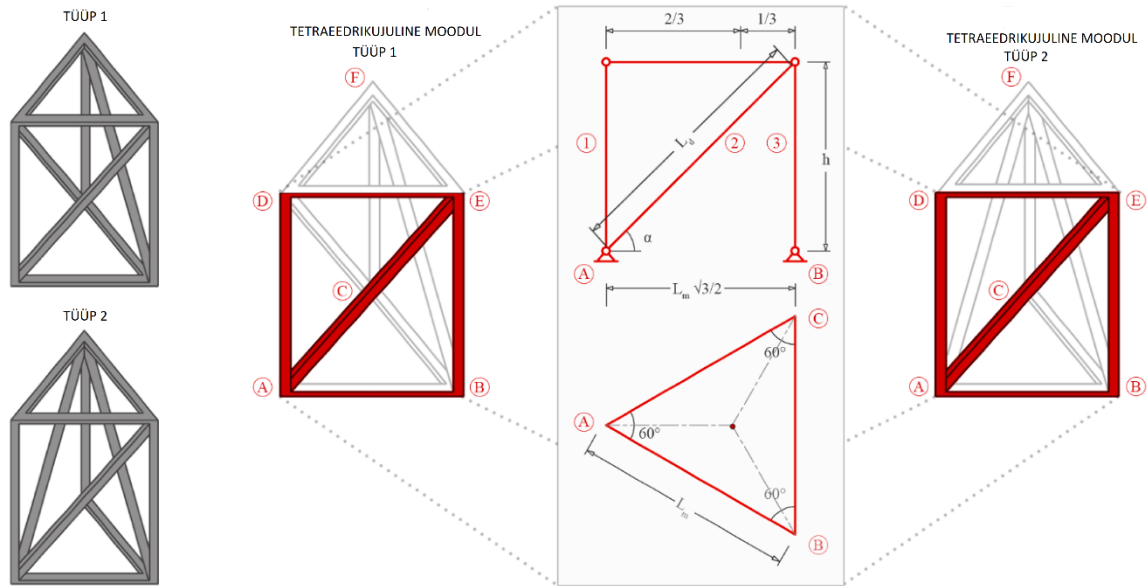


Joonis 1.4 *Diagrid* süsteemi näide. Allikas [11].

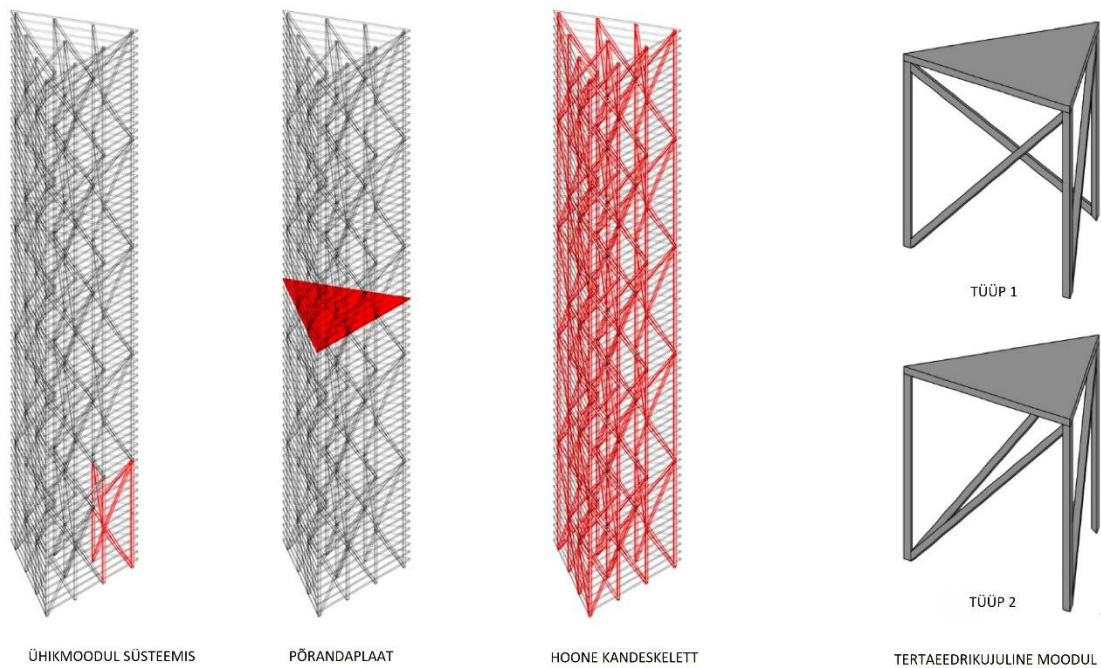


Joonis 1.5 *Diagrid* süsteemi sõlm. Reprodutseeritud allikast [11].

Diagrid'i eeskujul on välja töötatud ka uus tetraedrikujuline moodulsüsteem (joonised 1.6 ja 1.7). *Diagrid* süsteemi kahemõõtmelistest kolmnurkadest koosnev süsteem on edasi arendatud kolmemõõtmeliseks. Moodul koosneb nurgapostidest ning neid ühendavatest diagonaalidest ja taladest. Eristatakse tüüp 1 ja tüüp 2 mooduleid. Need erinevad üksteisest diagonaalide asetuse poolest, mis annab arhitektuuriliselt rohkem võimalusi hoonet kujundada. Antud moodulsüsteem on mõeldud eelkõige kõrghoonete ehitamiseks. Tetraedriliste moodulite kasutamine tagab kõrghoone puhul piisavalt suure jäikuse. Selle tõttu saab ära jätta suuremõõtmelised kandekonstruktsioonid ja jäigastavad seinad hoone keskel, mis annab arhitektuurselt rohkem võimalusi luua hoone sisse avatud ruume. [12]



Joonis 1.6 Tertaedrikujulise mooduli geomeetrised väärtused. Allikas [12].

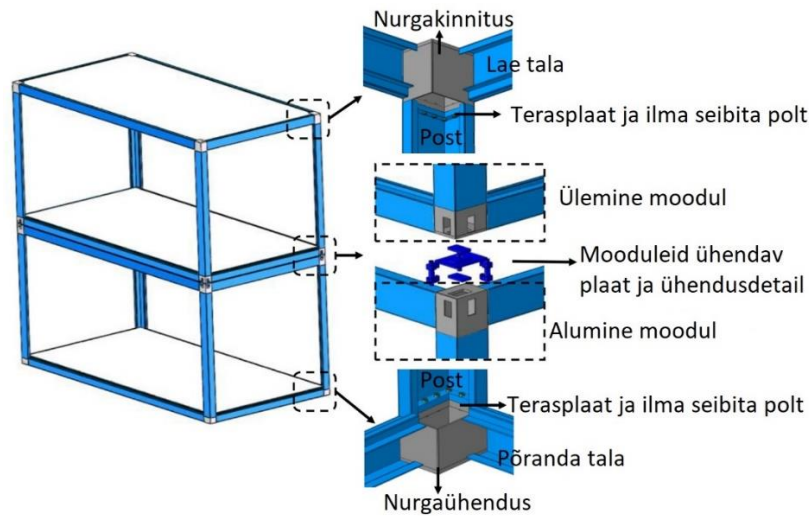


Joonis 1.7 Tetraedrikujuline moodulsüsteem. Allikas [12].

1.4 Jäikuse tagamine sõlmühendustega

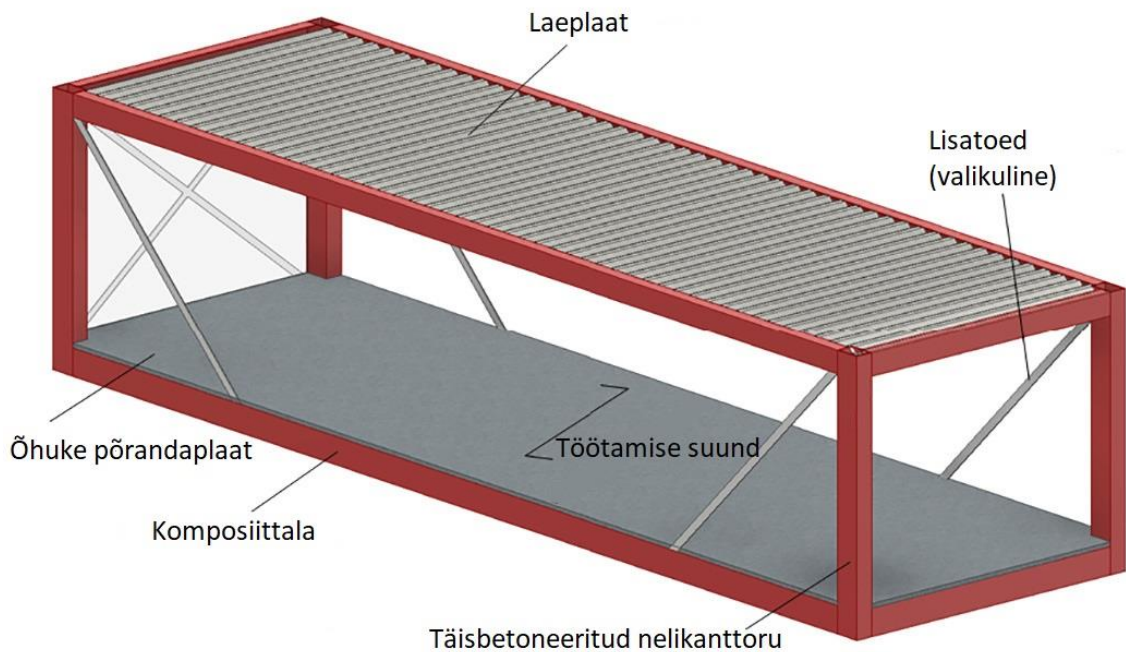
Jäikuse tagamine moodulitel on võimalik ka sõlmühenduste kaudu. Üks võimalus sõlmühenduse loomiseks on konteineri nurgähenduste kasutamine (joonis 1.8). Terasmooduli talad ja postid ühendatakse omavahel spetsiaalse nurgadetailiga. Talad

keevitatakse nurgakinnituse külge, postid aga kinnitatakse terasplaadi ja poldidega kinnituse külge. Mitmekorruseliste konstruktsioonide loomiseks kasutatakse moodulitel ühendusetaile, mis kinnitatakse nurgaühenduse külge. [13]

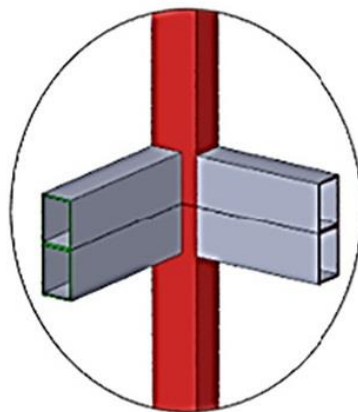


Joonis 1.8 Nurgaühendus. Allikas [13]

Jäikust tagava sõlmühenduse saab luua ka komposiitkonstruktsioonides (joonis 1.9). Antud komposiitmoodulid on oma olemuselt terasmoodulid, mille osad on kas täis betoneeritud või on nendele betoon ümber valatud. Teras ja betoon hakkavad koos tööle. Moodulid koosnevad täis betoneeritud postidest, teras-betoon komposiittaladest ning põranda- ja laeplaadist. Põrandaplaadina kasutatakse õhukest raudbetoonplaati. Talad ja postid keevitatakse omavahel, tekitades jäiga ühenduse. Moodulid omakorda ühendatakse nurkades postide ja talade kaudu. Betooni kasutamine suurendab konstruktsiooni tulepüsivust, kandevõimet ja konstruktsiooni üldist jäikust. Tänu nendele omadustele kasutatakse komposiitmooduleid eelkõige kõrghoonete ehitamiseks. [14]



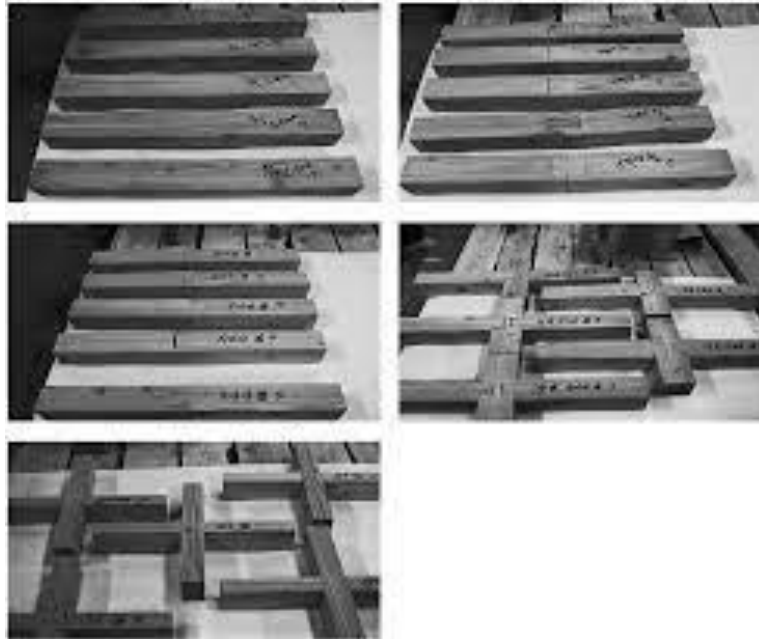
Joonis 1.9 Komposiitmoodul. Allikas [14]



Joonis 1.10 Komposiitmoodulite ühendussõlm. Allikas [14]

Puitmoodulites saab sõlmühendusi luua tapplitega. Sellist ühendust on kasutatud Hanoki ehituses. Hanok on Korea traditsiooniline majakonstruktsioon, mis oma olemuselt on tala-post raamkonstruktsioon. [15] Antud konstruktsioonis ei kasutata metallist kinnitusvahendeid nagu naaglid või kruvid. Talad ja postid ühendatakse omavahel tapplitega, mis võib olla näiteks T-kujuline (joonis 1.11). Selleks, et sellises konstruktsioonis pinged ühtlaselt jaotuks, peavad ühenduskohad olema tihedalt koos. Kui sellist ühendust teha õigesti ja kvaliteetselt, saab tulemuseks heade jäikusomadustega raami. [16] Puit-puit tapplite kvaliteetne tegemine nõuab aga väga

suurt meistri oskust, mis teeb selliste raamide tehases tootmise väga raskeks ning moodulites kasutamiseks on need ebamõistlikud [17].



Joonis 1.11 Näiteid puit-puit ühendustest Hanok stiilis majades. Allikas [16].

Puitkonstruktsioonide sõlmühendusi saab luua ka terasest kinnitustega. Kinnituste kasutamise eelis on väiksem sõltuvus töö tegija oskustest liiteid koostada. Tänu sellele on konstruktsioonide kokku panemine lihtsam ja kiirem ning see võimaldab tööprotsessi ka moodulite tootmise näol automatiseerida. [17] Üks võimalus kinnituste kasutamiseks on puit postide ja talade kinnitamiseks kasutada kruvisid [18]. Samuti on võimalik kasutada sõlmedes ka terasplaate (joonis 1.12), mis ühendatakse puiduga erinevate kinnitustega. Kinnitusteks võivad olla näiteks naaglid või poldid. [17]



Joonis 1.12 Näide terasplaadi kasutamisest liidetes. Allikas [17]

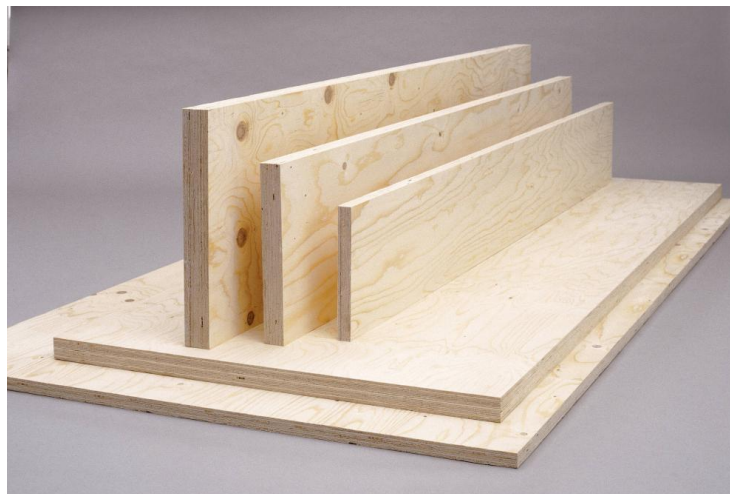
2. MUSTERMAJA RUUMELEMENT

2.1 Mustermaja

Mustermaja ruumelemente on kolmes erinevas mõõdus: M3 (3x3 m), M6 (3x6 m) ja M9 (3x9 m). Moodulid on kas 3,45 m või 3,13 m kõrged. Mustermaja mooduleid saab üksteise kõrvale ja otsa panna, moodustades sellega soovitud hoone skeleti. Ruumelemendile lisatakse vajalikud tehnosüsteemid, fassaadid, siseseinad ja siseviimistlus tehases. Ruumelemendi osad on valmistatud spoonliimpuidust (LVL). [19]

Spoonliimpuit ehk LVL on tehtud omavahel ilmastikukindla liimiga ühendatud 3 mm paksustest spoonidest. Tulemuseks on homogeenne materjal, sest võimalikud defektid hajutatakse ja liimitud spoonid lamineeritakse. Sellisel viisil ehituspuidu tootmine on kallim kui tavalise puidu kasutamine konstruktsioonides, kuid spoonliimpuidu homogeenisusest tulenevate heade tugevusomaduste tõttu on võimalik kasutada väiksemaid ristlõikeid. [20]

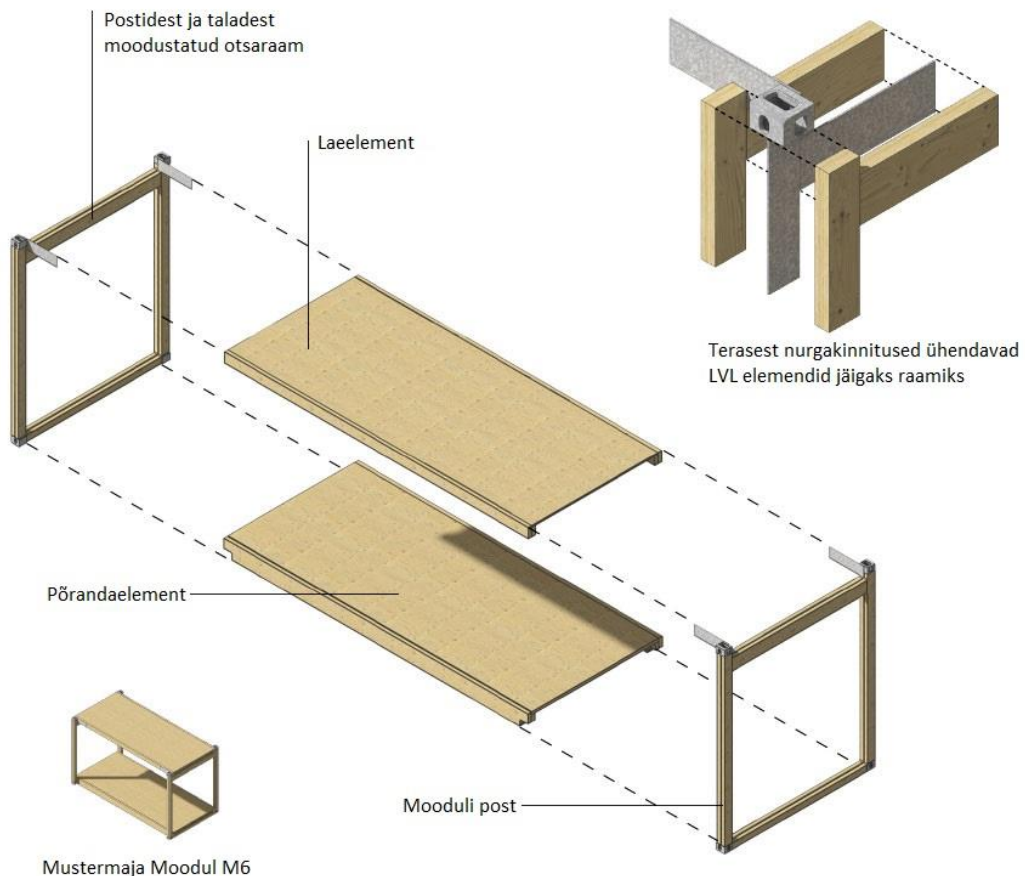
LVL jaguneb kaheks tüübiks: LVL P ja LVL C. LVL P puhul liimitakse kõik kihid ühe suunaliselt pikikiudu ja seda kasutatakse peamiselt postide ja talade jaoks. LVL C puhul liimitakse umbes 20% kihtidest ristipidi ülejäänud lamellidega võrreldes. LVL C kasutatakse peamiselt erinevate paneelide valmistamiseks. [20]



Joonis 2.1 Kerto LVL tooted. Allikas [21]

2.2 Ruumelemendi osad

Mustermaja ruumelement koosneb spoonliimpuidust pörandaelemendist, laeelemendist ja otsaraamist, mis koosneb nurga postidest, taladest ja terasest nurgakinnitustest. Nurgakinnituse eesmärk on konstruktsiooni jäikuse tagamine. [19] Postid ja talad on Mustermaja kandvateks osadeks. Lae- ja pörandaelemendid on teineteisest sõltumatud ja neile mõjuvad erinevad koormused. [22]



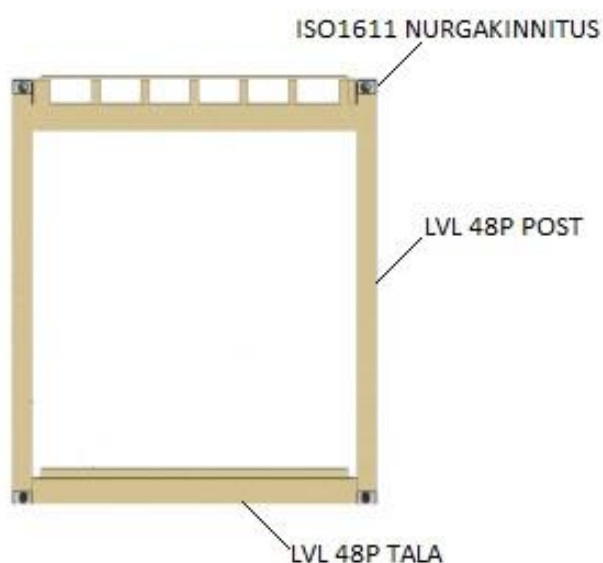
Joonis 2.2 Mustermaja ruumimoodul. Allikas [5]

Pörandaelement koosneb taladest ja plaadist. Talad on ristlõikega 75x225 mm ja valmistatud materjalist LVL 48P. Talade samm on 400 mm. LVL 36C plaat on 75 mm paksusega. Tala ja plaadi vahel on liimliide. [22]

Laeelement koosneb taladest ja plaadist. Talade materjaliks on valitud LVL 48P ja nende ristlõige on 75x200 mm. Talade samm on 400 mm. Plaadi materjaliks on LVL 36C ja plaadi paksus on 24 mm. Antud materjalid on kõige väiksemate ristlõigetega

standardtooted. Neid saab kasutada, sest laeelementidele mõjuvad koormused on väiksed, laeelement peab vastu võtma ainult omakaalu koormust. [22]

Otsaraam (joonis 2.3) koosneb kahest postist ja talast ning neid ühendavast terasest nurgakinnitusest [17]. Postidena kasutatakse LVL 48P liitposti. Ühe postiosa ristlõige on 75x160 mm ja kahe osa vahe on 10 mm, kus alumises otsas 250 mm ulatuses on 10 mm paksune terasplaat. Taladena kasutatakse LVL 48P liittalasi. Ühe liittala varda ristlõige on 75x220. Kahe ristlõike vahel on 10 mm paksusega terasplaat. Terasplaadi kõrgus on 200 mm. Terasplaat ja postid on omavahel fikseeritud naaglite ja kruvidega. Terasplaadi külge on keevitatud ISO1161 nurgakinnitus.



Joonis 2.3. Mustermaja mooduli otsaraam. Allikas [5]

2.3 Mooduli komponentide kandevõime

Tänu toormaterjali defektide hajutamisele ja lamineerimisele on spoonliimpuit homogeenne materjal. Liimitavad vineerid on sarnaste tugevusomadustega, seega on lõpptoode LVL on oma tugevusomaduste poolest ligilähedane defektivaba puidu tugevusomadustega. LVL P tugevusomadused on pikikiudu kõige suuremad. LVL C kandevõime pikikiudu on umbes 20% väiksem, kuid tema tugevusomadused ristikiudu on suuremad ja seetõttu on ta sobilik paneelide valmistamiseks. [20]

Julia Pupševa dimensioneeris oma magistritöös ruumimooduli M9 kõrgusega 3,45 meetrit lae- ja põrandaelemendi ning nurgapostid. Tema tulemustest on näha, et ka suurte koormuste juures saab kasutada suhteliselt väikseid ristlõikeid. Mooduli posti

kõrgus on 3,15 meetrit. Selleks, et ehitada 7-korruseline konstruktsioon, peaks liitpost koosnema varrastest ristlõikega 75x160 mmm mis on moodulite liitumiskohas omavahel seotud. Teoorias saab spoonliimpuidust sellisel viisil teha väga suuri konstruktsioone. [22]

2.4 Mooduli horisontaalsuunaline jäikus

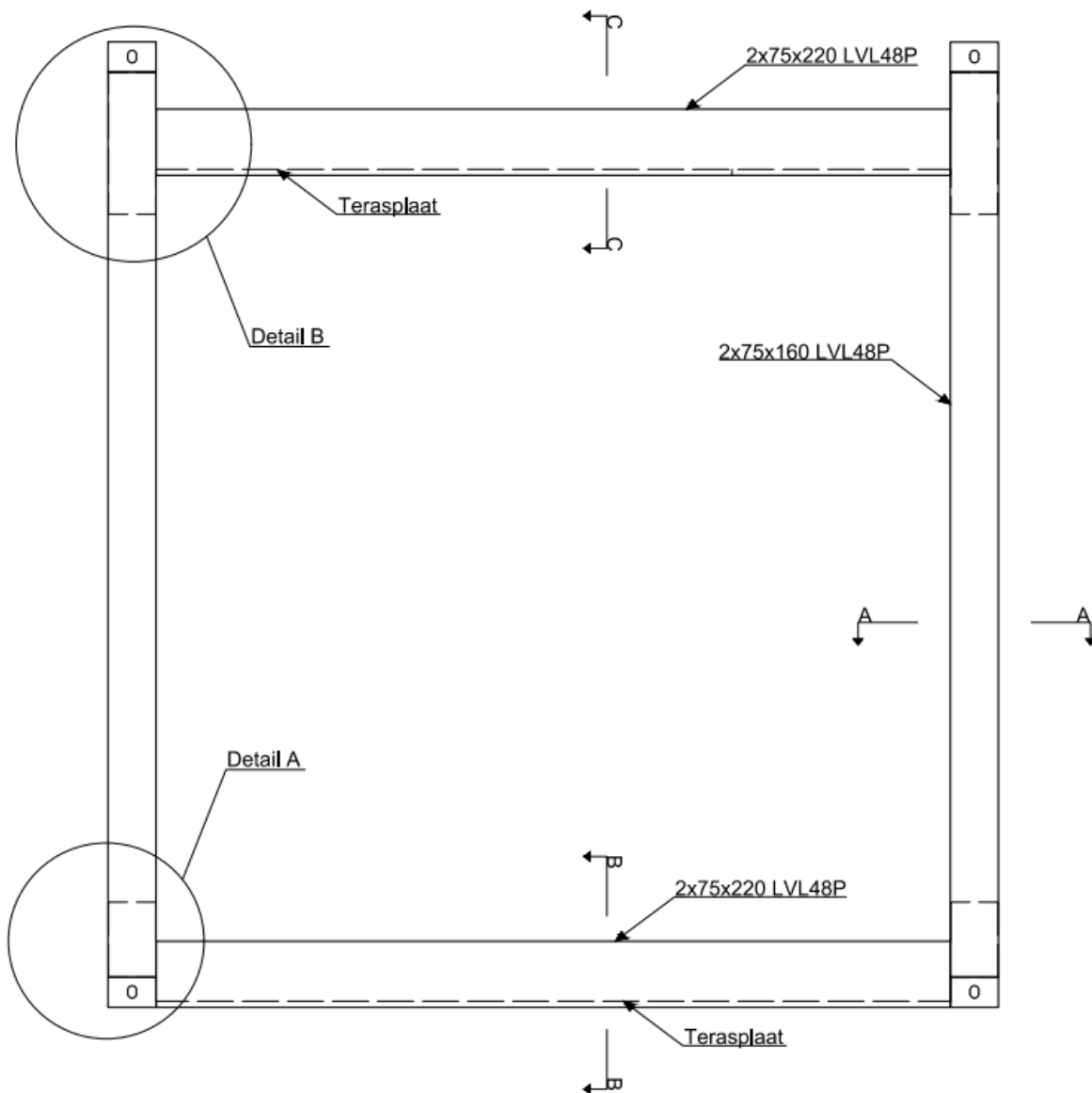
Jäikuse tagamiseks on otsaraami sõlmedes terasest kinnitused. Terasplaat on liitposti ja tala vahel, nurka on keevitatud nurgakinnitus. Elemendid on omavahel ühendatud naaglitega. [19] Ruumelemendi jäikust ei ole varem uuritud. Pikisuunalise jäikuse tagamiseks kasutatakse moodulites ja moodulite süsteemis eraldiseisvaid jäikusseinu (joonis 1.2) [9]. Otsaraamid töötavad iseseivalt ning nende jäikust määratakse käesolevas töös.

Raami jäikust hinnatakse horisontaalkoormusest tulenevast otsasiirde järgi. Otsasiire peab jääma lubatud piiridesse. Antud magistritöös esitatakse arvutused liite paindemooduli leidmiseks ning leitakse, kui suurt horisontaalkoormust võtab raam vastu maksimaalse lubatud otsasiirde puhul. Raami jäikust hinnatakse ka katseliselt.

3. JÄIKUSE MÄÄRAMINE ARVUTUSLIKULT

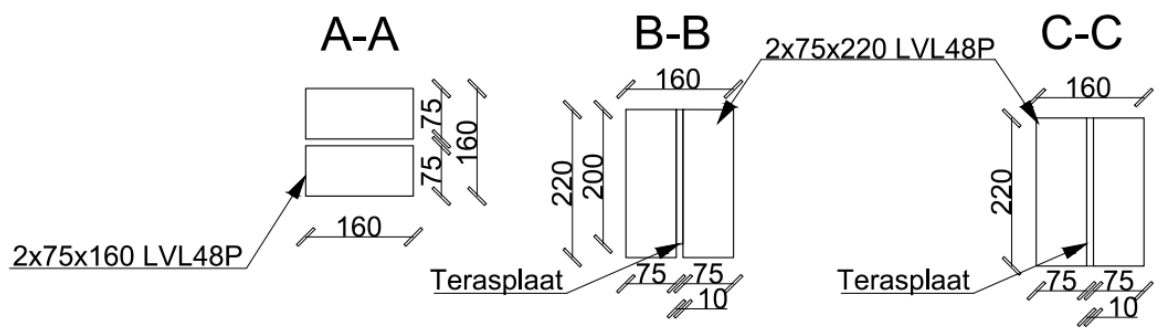
3.1 Otsaraami geometria

Otsaraam koosneb postidest ja taladest. Joonisel 3.1 on näidatud raami geometria.



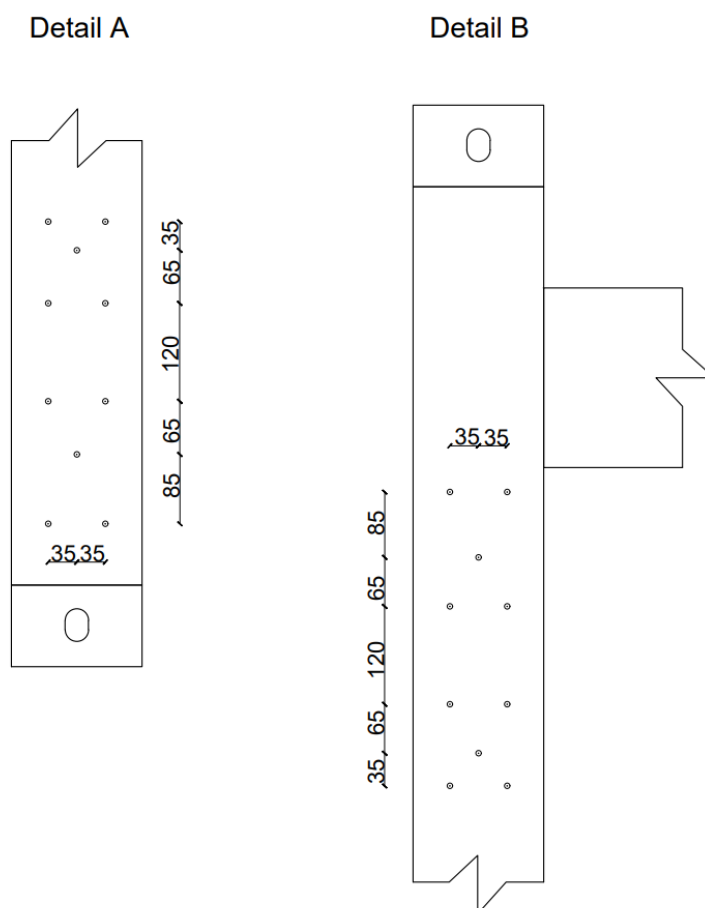
Joonis 3.1 Otsaraam

Peatükis 2.2 kirjeldatud liitpostid ja -talad on näidatud joonisel 3.2.



Joonis 3.2. Otsaraami lõiked.

Raami sõlmed on joonisel 3.1 tähistatud vastavalt Detail A ja Detail B. Detailid on esitatud joonisel 3.3.



Joonis 3.3. Detailid A ja B otsaraami sõlmedest

3.2 Mooduli otsaraami arvutuslik horisontaalsuunaline jäikus

Ehituskonstruktsioonidelt nõutakse, et need oleksid tugevad, püsivad ja jäigad. Jäikust saab hinnata konstruktsiooni elemendi siirde ja elemendi põhimõõtmete suhtega [23]. DIN 1994 järgi võib raami maksimaalne horisontaalsuunalise otsasiirde väärtus olla $h/500$ [24].

Antud peatükis esitatakse arvutused spoonliimpuidust ja terasest otsaraami horisontaalsuunalise jäikuse leidmiseks. Paindejäikus sõltub elemendi elastsusmoodulist E ja inertsimomendist I .

Ristkülikulise ristlõike inertsimoment leitakse valemiga [25]:

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (3.1)$$

Postid koosnevad kahest LVL 48P postist ristlõigetega 75x160 mm (joonised 3.1 ja 3.2). Inertsimoment leitakse valemiga 3.1 ja vastavalt eelpool mainitud seosele leitakse posti jäikus.

$$b_{LVL,p} = 75 \text{ mm}$$

$$h_{LVL,p} = 160 \text{ mm}$$

$$E_{LVL} = 13800 \text{ N/mm}^2$$

$$(EI)_{\text{post}} = 2 \cdot 13800 \cdot \frac{75 \cdot 160^3}{12} = 7,07 \cdot 10^{11} \text{ Nmm}^2$$

Talad koosnevad kahest LVL 48P talast ristlõigetega 75x220 mm ja teraslehest ristlõikega 10x200 mm (joonised 3.1 ja 3.2).

LVL 48P osa

$$b_{LVL,t} = 75 \text{ mm}$$

$$h_{LVL,t} = 220 \text{ mm}$$

Inertsimoment leitakse valemiga 3.1 ja vastavalt eelpool mainitud seosega leitakse jäikus.

$$(EI)_{LVL} = 13800 \cdot \frac{75 \cdot 220^3}{12} = 9,18 \cdot 10^{11} \text{ Nmm}^2$$

Teraslehe osa

$$h_s = 200 \text{ mm}$$

$$b_s = 10 \text{ mm}$$

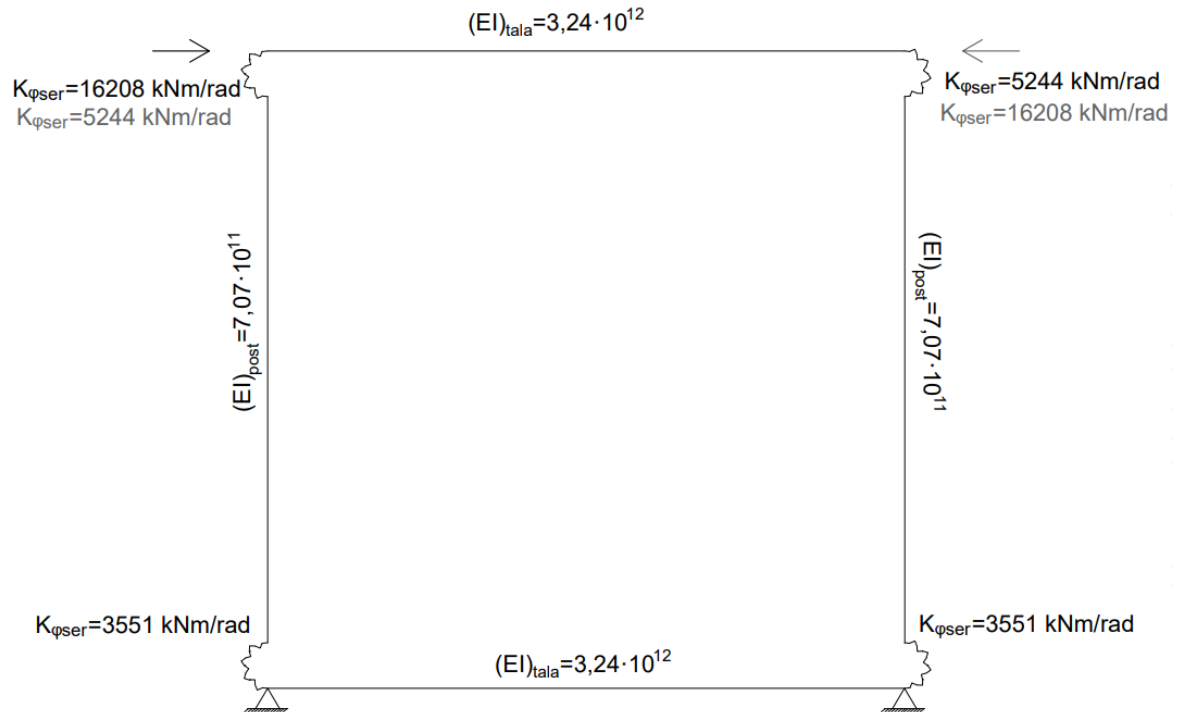
$$E_s = 210000 \text{ N/mm}^2$$

Inertsimoment leitakse valemiga 3.1 ja vastavalt eelpool mainitud seosele leitakse jäikus.

$$(EI)_s = 210000 \cdot \frac{10 \cdot 200^3}{12} = 1,40 \cdot 10^{11} \text{ Nmm}^2$$

Kokku

$$(EI)_{\text{tala}} = 2 \cdot 9,18 \cdot 10^{11} + 1,40 \cdot 10^{12} = 3,24 \cdot 10^{12} \text{ Nmm}^2$$



Joonis 3.4. Otsaraami varrasskeem.

Joonisel 3.4 on esitatud käesolevas lõputöös uuritava otsaraami varrasskeem. Paindejäikuste $K_{\varphi\text{ser}}$ arvutused on esitatud peatükis 3.4. Alumistes sõlmedes on paindejäikuste väärtused võrdes. Ülemistes sõlmedes on antud väärtused erinevad. Paindejäikuste väärtused sõltuvad koormuse suunast.

3.3 Naagelliite kandevõime

Selles peatükis leitakse otsaraami ülemiste ja alumiste sõlmede liidete kandevõimed. Otsaraami sõlmedes kasutatakse naagel- ja kruviliidet. Naaglitena on kasutusel RohtoBlaas SBD-7 7,5x155 naaglid, mida on liites 6 tk. Kruvidena kasutatakse 6x150 mm kruve. Kruvide arv liites on 4.

Kahelõikelise teras-puit naagelliite ühe nihkepinna kandevõime leidmiseks kasutatakse Johanseni valemit [26]:

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{f_{h,k} t_1 d}{f_{h,1,k} t_1 d \left[\sqrt{2 + \frac{4M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^k} - 1} \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}} \\ 2,3 \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \end{array} \right. \quad (3.2)$$

kus $F_{v,Rk}$ – ühe nihkepinna kandevõime, kN,

$f_{h,k}$ – puitelemendi normmuljumistugevus, N/mm²,

t_1 – äärmise puitelemendi vähim paksus või naagli süvistussügavus, mm,

d – naagli läbimõõt, mm

$M_{y,Rk}$ – kinnituselemendi voolavuspiirile vastav momendi normväärtus, Nmm,

k – nihkepindade arv,

$F_{ax,Rk}$ – kinnituselemendi teljesuunaline väljatõmbe tugevus, kN.

Valemis 3.3 tähistab liige $\frac{F_{ax,Rk}}{4}$ köie efekti. Naagelliites tuleb köie efekti mõju kandevõimele piirata suuruseni 0%. [26]

Voolavuspiirile vastav moment on toodud välja naaglite tootelehes. Naaglite $M_{y,Rk} = 42000$ Nmm. [27]

LVL normmuljumistugevus naagelliite korral leitakse valemiga [20]:

$$f_{h,k} = \frac{0,082 \cdot (1 - 0,01d) \rho_k}{(k_{90} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha) \cdot (k_C \cos^2 \beta + \sin^2 \beta)} \quad (3.3)$$

kus ρ_k – spoonliimpuidu mahukaal, kg/m³,

α – nurk koormuse ja puidu kiu suuna vahel. LVL-C/ GLVL-C ja $\alpha > 45^\circ$ võib arvestada $\alpha = 45^\circ$,

β – nurk naagli telje ja puidu laiema külje vahel,

k_{90} – tegur,

k_C – tegur.

Tegur k_{90} leitakse valemiga [20]:

$$k_{90} = 1,15 + 0,015 = 1,165 \quad (3.4)$$

Tegur k_C leitakse valemiga [20]:

$$k_C = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{d-2} \\ 1,15 \end{array} \right. \quad (3.5)$$

Liites tekkiv moment leitakse seosega [26]:

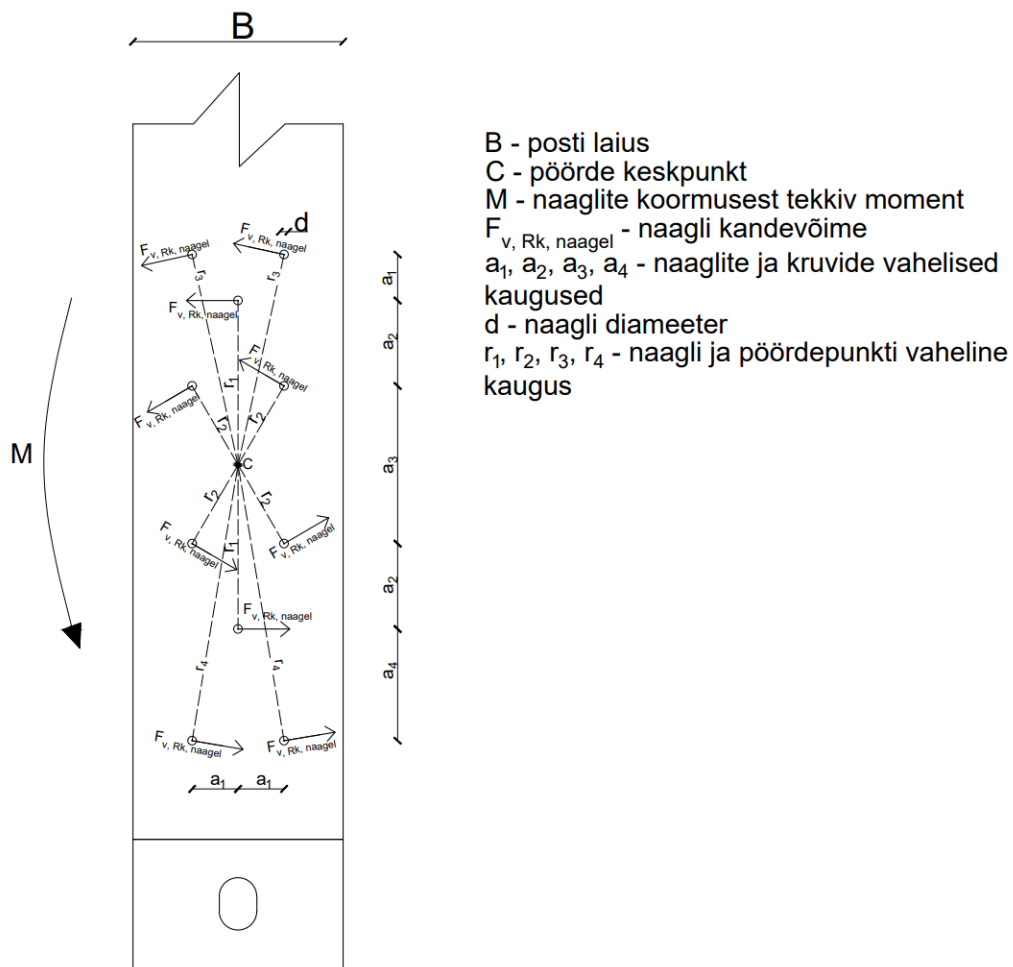
$$M = \sum_{j=1}^n F_{M,j} r_j \quad (3.6)$$

kus M – liites tekkiv moment, kNm,

$F_{M,j}$ – naagli koormus, võrdne naagli kandevõimega, kN,
 r_j – naagli kaugus pöördekeskpunktist, mm.

3.3.1 Naagelliite kandevõime alumiste sõlmede jaoks

Joonisel 3.5 on näidatud naaglite ja kruvide asetused liites.



Joonis 3.5. Otsaraami alumine sõlm

Allolevad parameetrid on kasutusel järgnevatel arvutustel:

$$f_u = 600 \text{ N/mm}^2$$

$$k = 2$$

$$d = 6,5 \text{ mm}$$

$$t_1 = 75 \text{ mm}$$

$$n = 10$$

$$a_1 = 35 \text{ mm}$$

$$a_2 = 65 \text{ mm}$$

$$a_3 = 120 \text{ mm}$$

$$a_4 = 85 \text{ mm}$$

$$\rho_k = 480 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{mean}} = 510 \text{ kg/m}^3$$

$$\alpha = 45^\circ$$

$$\beta = 90^\circ$$

$$M_{yk} = 42000 \text{ Nmm}$$

Tegur k_C vastavalt valemile 3.5.

$$k_C = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{6}{6-2} = 1,44 \\ 1,15 \end{array} \right.$$

$$k_C = 1,44$$

LVL normmuljumistugevus leitakse vastavalt valemile 3.3.

$$f_{h,k} = \frac{0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot 6) \cdot 480}{(1,165 \cdot \sin^2 45 + \cos^2 45) \cdot (1,44 \cdot \cos^2 90 + \sin^2 90)} = 34,0 \text{ N/mm}^2$$

Ühe nihkepinna kandevõime vastavalt valemile 3.2.

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} 34 \cdot 75 \cdot 6 \cdot 10^{-3} = 16,6 \text{ kN} \\ \left[34 \cdot 75 \cdot 6 \left[\sqrt{2 + \frac{4 \cdot 42000}{34 \cdot 6 \cdot 75^2}} - 1 \right] \right] \cdot 10^{-3} = 7,64 \text{ kN} \\ (2,3\sqrt{2} \cdot 42000 \cdot 6 \cdot 6) \cdot 10^{-3} = 9,91 \text{ kN} \end{array} \right.$$

$$F_{v,Rk} = 7,64 \text{ kN}$$

Ühe naagli kandevõime

$$F_{v,Rk,naigel} = 2 \cdot 7,64 = 15,3 \text{ kN}$$

Alumises sõlmes asub pöördepunkt naaglite keskel (joonis 3.4). Naaglite- ja naelte kaugused pöördepunktist on järgmised:

$$r_1 = 65 + \frac{120}{2} = 125 \text{ mm}$$

$$r_2 = \sqrt{\left(\frac{120}{2}\right)^2 + 35^2} = 69,5 \text{ mm}$$

$$r_3 = \sqrt{\left(35 + 65 + \frac{120}{2}\right)^2 + 35^2} = 164 \text{ mm}$$

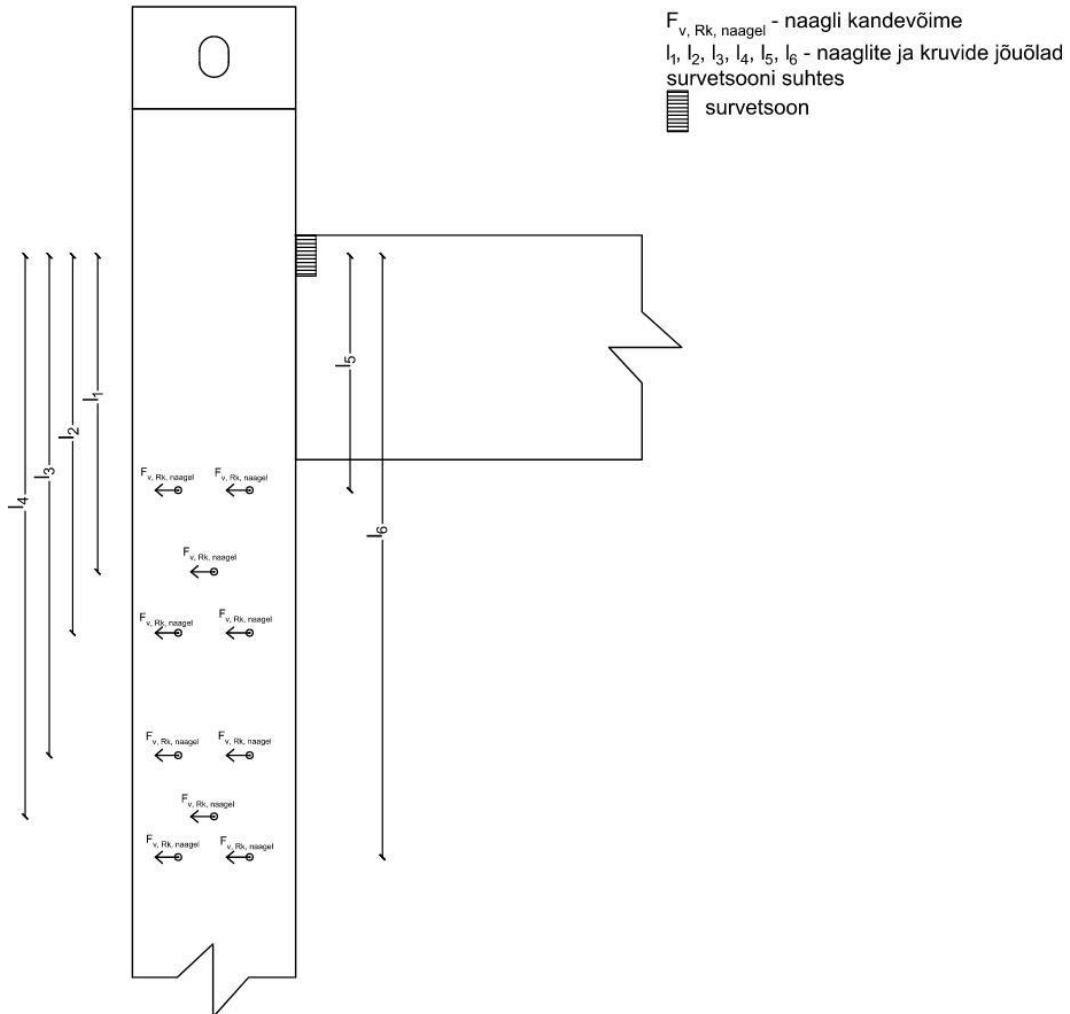
$$r_4 = \sqrt{\left(85 + 65 + \frac{120}{2}\right)^2 + 35^2} = 213 \text{ mm}$$

Liites tekkiv momendi kandevõime arvutatakse seosega 3.6.

$$M = (2 \cdot 15,3 \cdot 125 + 4 \cdot 15,3 \cdot 69,5 + 2 \cdot 15,3 \cdot 164 + 2 \cdot 15,3 \cdot 213) \cdot 10^{-3} = 19,6 \text{ kNm}$$

3.3.2 Naagelliite kandevõime ülemise vasakpoolse sõlme jaoks

Ülemises vasakus sõlmes on naaglite omavaheline paigutus ühetaoline alumiste sõlmede omadega. Samuti on kasutatud samu materjale ja naagleid, seega ühe naagli kandevõime on võrdne punktis 3.3.1 leituga. Momendikandevõime muutub, sest ülemises sõlmes tekib posti ja tala vahele survetsoon, mille tõttu naaglite jõuõlad muutuvad (joonis 3.6).



Joonis 3.6. Otsaraami ülemine vasakpoolne sõlm

Naaglite jõuõlad on järgmised:

$$l_1 = 310 \text{ mm};$$

$$l_2 = 370 \text{ mm};$$

$$l_3 = 490 \text{ mm};$$

$$l_4 = 550 \text{ mm};$$

$l_5 = 230 \text{ mm};$

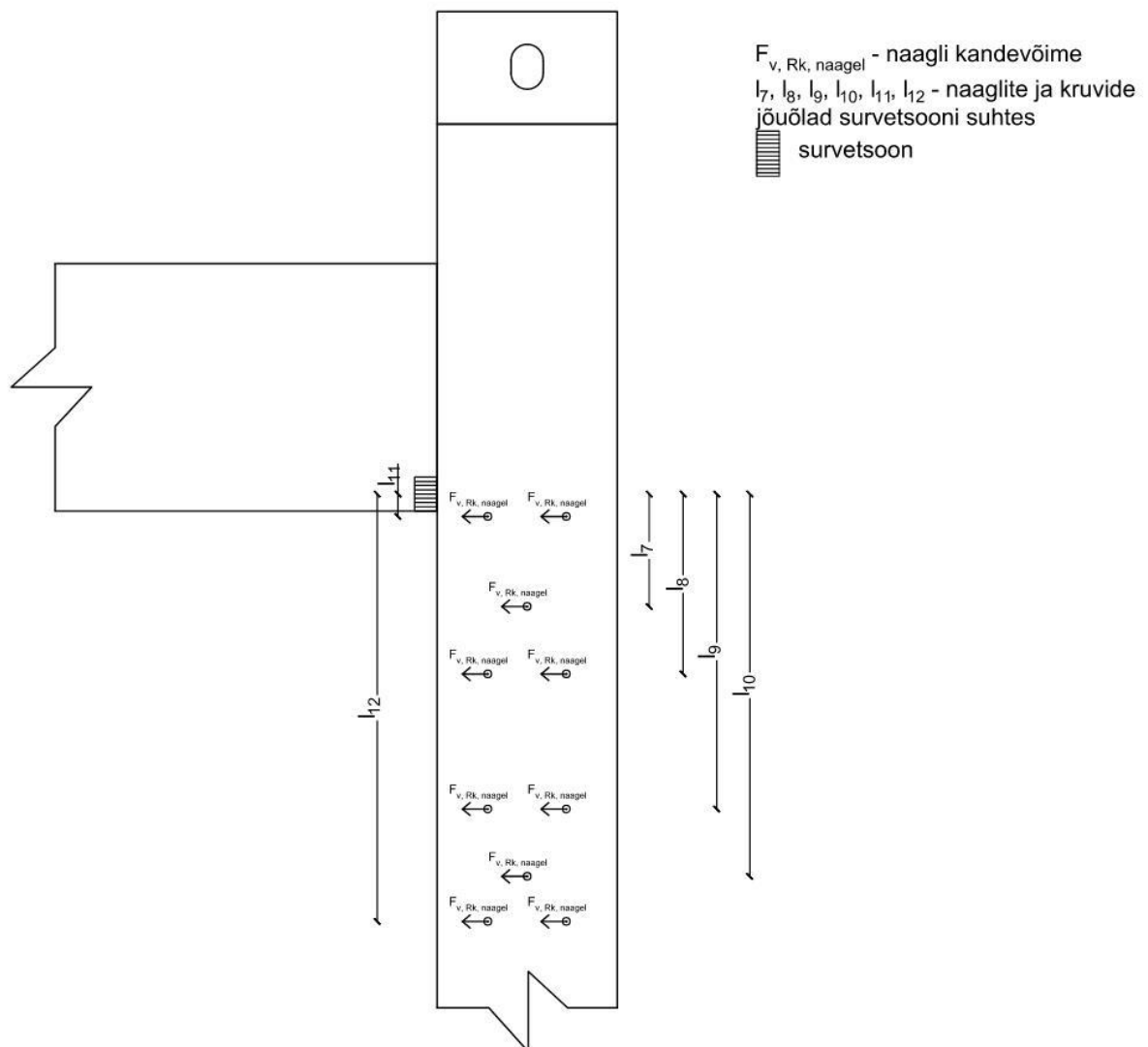
$l_6 = 590 \text{ mm}.$

Kandepiirseisundis liites tekkiv moment arvutatakse seosega 3.6.

$$M = (15,2 \cdot 310 + 2 \cdot 15,2 \cdot 370 + 2 \cdot 15,2 \cdot 490 + 15,2 \cdot 550 + 2 \cdot 15,2 \cdot 230 + 2 \cdot 15,2 \cdot 590) \cdot 10^{-3} = 32,3 \text{ kNm}$$

3.3.3 Naagelliite kandevõime ülemise parempoolse sõlme jaoks

Ülemises parempoolses sõlmes asetsevad samuti naaglid omavahel nagu alumistes sõlmedes. Naagli kandevõime arvutus on esitatud punktis 3.3.1. Parempoolse sõlmes olevate naaglite jõuõlad survetsooni suhtes on näidatud joonisel 3.7.



Joonis 3.7. Otsaraami ülemine parempoolne sõlm

Naaglite jõuõlad on järgmised:

$l_1 = 100 \text{ mm};$
 $l_2 = 160 \text{ mm};$
 $l_3 = 280 \text{ mm};$
 $l_4 = 340 \text{ mm};$
 $l_5 = 20 \text{ mm};$
 $l_6 = 380 \text{ mm}.$

Kandepiirseisundis liites tekkinud moment arvutatakse seosega 3.6.

$$\begin{aligned}
 M &= (15,2 \cdot 100 + 2 \cdot 15,2 \cdot 160 + 2 \cdot 15,2 \cdot 280 + 15,2 \cdot 340 + 2 \cdot 15,2 \cdot 20 + 2 \cdot 15,2 \cdot 380) \cdot 10^{-3} = \\
 &= 16,2 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

3.4 Liite paindemooduli määramine

Liite paindemoodul määratakse valemiga:

$$K_{\varphi,ser} = \frac{M}{\varphi_{ser}} \quad (3.7)$$

kus $K_{\varphi,ser}$ – liite paindemoodul, kNm/rad,
 φ_{ser} – sõlme pöördnurk, rad.

Sõlme pöördnurk määratakse seosega:

$$\varphi_{ser} = \frac{u_{ser}}{r} \quad (3.8)$$

kus u_{ser} – liite hetkeline deformatsioon tõmbejõust, mm.

Liite deformatsioon leitakse valemiga [25]:

$$u_{ser} = \frac{F_k}{K_{ser}} \quad (3.9)$$

kus u – liite deformatsioon, mm,
 F_k – liitele mõjuv koormus, kN,
 K_{ser} – liite hetkeline nihkemoodul, N/mm.

Liites mõjuv jõud on võrdne liite kandevõimega.

Naagelliite kandevõime leitakse seosega [25]:

$$F_{v,Rk,liide} = nF_{v,Rk,naagel} \quad (3.10)$$

kus $F_{v,Rk,liide}$ – naagelliite efektiivne kandevõime, kN
 n – naaglite arv, tk
 $F_{v,Rk,naagel}$ – ühe naagli normkandevõime pikikiudu, kN

Hetkeline nihkemoodul naagelliite ühe nihkepinna kohta leitakse valemiga [26]:

$$K_{\text{ser}} = \rho_{\text{mean}}^{1,5} \frac{d}{23} \quad (3.11)$$

3.4.1 Paindemooduli leidmine alumistes sõlmedes

Käesolevas punktis leitakse paindemooduli väärtus alumiste sõlmede jaoks (joonis 3.4).

Hetkeline nihkemoodul ühe nihkepinna kohta valemi 3.11 järgi on

$$K_{\text{ser}} = 510^{1,5} \frac{6,5}{23} = 3255 \text{ N/mm}$$

Liite nihkemoodul on seega

$$K_{\text{ser}} = 3255 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 10 = 130197 \text{ N/mm}$$

Naagelliite kandevõime vastavalt valemile 3.10.

$$F_{v,Rk,liide} = 10 \cdot 15,3 = 153 \text{ kN}$$

Liite hetkeline deformatsioon valemi 3.9 järgi

$$u_{\text{ser}} = \frac{153 \cdot 10^3}{130197} = 1,17 \text{ mm}$$

Sõlme pöördnurk valemi 3.8 järgi on

$$\varphi_{\text{ser}} = \frac{1,17}{213} = 0,00552 \text{ rad}$$

Liite paindemoodul saadakse valemiga 3.7

$$K_{\varphi, \text{ser}} = \frac{19,6}{0,00552} = 3551 \text{ kNm/rad}$$

3.4.2 Paindemooduli leidmine ülemises vasakpoolses sõlmes

Käesolevas punktis leitakse paindemooduli väärtus ülemise vasakpoolse sõlme jaoks (joonis 3.5).

Hetkeline nihkemoodul ühe nihkepinna kohta valemi 3.11 järgi on

$$K_{\text{ser}} = 510^{1,5} \frac{6,5}{23} = 3255 \text{ N/mm}$$

Liite nihkemoodul on seega

$$K_{\text{ser}} = 3255 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 10 = 130197 \text{ N/mm}$$

Naagelliite kandevõime vastavalt valemile 3.10.

$$F_{v,Rk,liide} = 10 \cdot 15,3 = 153 \text{ kN}$$

Liite hetkeline deformatsioon valemi 3.9 järgi

$$u_{ser} = \frac{153 \cdot 10^3}{130197} = 1,17 \text{ mm}$$

Sõlme pöördenuk valemi 3.8 järgi on

$$\varphi_{ser} = \frac{1,17}{590} = 0,00199 \text{ rad}$$

Liite paindemoodul saadakse valemiga 3.7

$$K_{\varphi,ser} = \frac{32,3}{0,00199} = 16208 \text{ kNm/rad}$$

3.4.3 Paindemooduli leidmine ülemises parempoolses sõlmes

Käesolevas punktis leitakse paindemooduli väärtus ülemise parempoolse sõlme jaoks (joonis 3.6).

Hetkeline nihkemoodul ühe nihkepinna kohta valemi 3.12 järgi on

$$K_{ser} = 510^{1,5} \frac{6,5}{23} = 3255 \text{ N/mm}$$

Liite nihkemoodul on seega

$$K_{ser} = 3255 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 10 = 130197 \text{ N/mm}$$

Naagelliite kandevõime vastavalt valemile 3.10.

$$F_{v,Rk,liide} = 10 \cdot 15,3 = 153 \text{ kN}$$

Liite hetkeline deformatsioon valemi 3.9 järgi

$$u_{ser} = \frac{153 \cdot 10^3}{130197} = 1,17 \text{ mm}$$

Sõlme pöördenuk valemi 3.8 järgi on

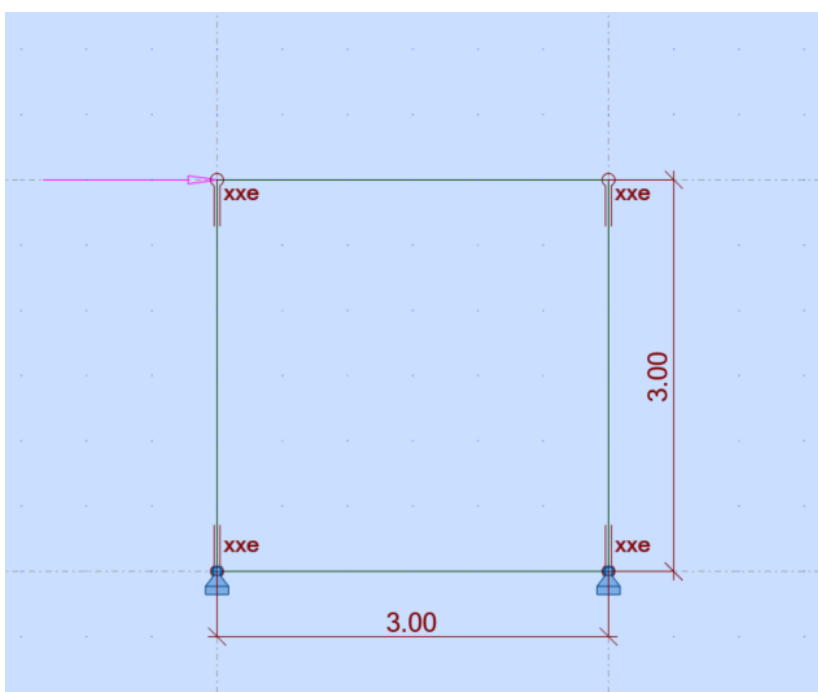
$$\varphi_{ser} = \frac{1,17}{380} = 0,00309 \text{ rad}$$

Liite paindemoodul saadakse valemiga 3.7

$$K_{\varphi,ser} = \frac{16,2}{0,00309} = 5244 \text{ kNm/rad}$$

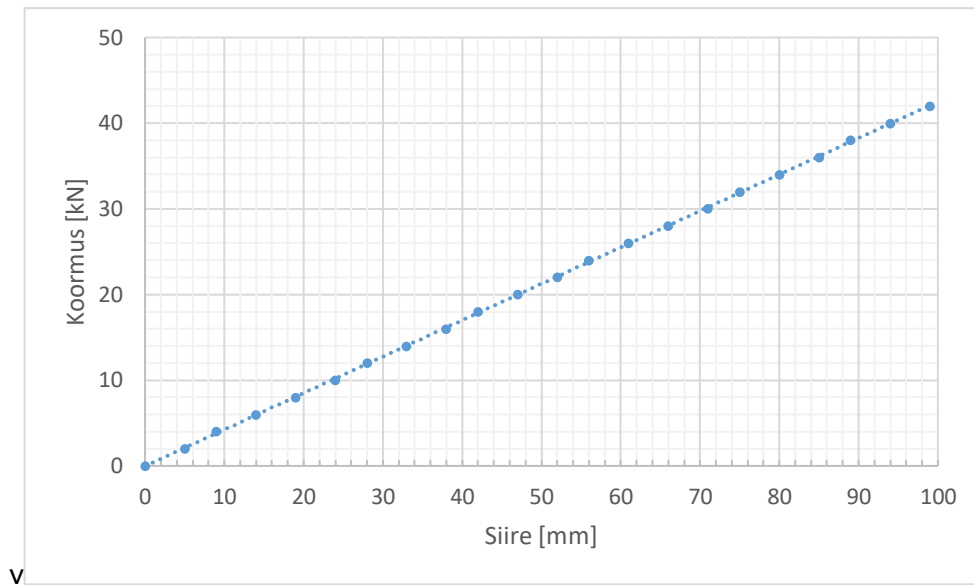
3.5 Horsiontaalsuunalise otsasiirde leidmine

Käesolevas magistritöös leitakse otsaraami arvutuslik horisontaalsuunaline otsasiire tarkvaraga Autodesk Robot Structural Analysis 2022. Tarkvara abiga modelleeritakse raam mõõtmetega 3x3 m. Raami elementidele ehk taladele ja postidele antakse peatükis 3.2 leitud jäikuste väärtused. Terasplaadist ja spoonliimpuidust koosnevaid talasid käsitletakse mudelis lihtsustatult ühtse materjaline, kasutades vastavat elastsusmoodulit. Sõlmedesse pannakse liigendid, mis defineeritakse peatükis 3.4 leitud paindemooduli kaudu. Vastavad arvulised väärtused on näidatud joonisel 3.3. Horisontaalsuunaline koormus rakendatakse raami ülemisse nurka. Horsiontaalsuunalise siirde arvutamine toimub mudel tarkvaraga. Mudelisse sisestatud arvutusskeem on esitatud joonisel 3.6.



Joonis 3.8. Otsaraami mudeli arvutusskeem

Mudelis rakendatakse otsaraamile koormust astmega 2 kN. Mudelarvutusi korrati kuni otsaraami siire saavutas tulemuse 100 mm. Tulemused on esitatud joonisel 3.7.



Joonis 3.9. Otsaraami arvutuslik horisontaalsuunaline siire

Joonisel 3.9 esitatud tulemused on arvutuslikud. Tulemused katsest esitatakse peatükis 4.

4. JÄIKUSE MÄÄRAMINE KATSELISELT

4.1 Katsemetoodika

Käesoleva magistritöö käigus katsetati Mustermaja ruumelemendi M6 otsaraami jäikust Tallinna Tehnikaülikooli Ehituse Mäemaja laboris. Ümberlükke vältimiseks kinnitati katsekeha pörandasse. Raami nihke vältimiseks ehitati raami nurga ette takistusena teraskonstruktsioon. Raami katsetati Ehituse Mäemaja labori jõuseina juures. Jõuseina paksus on 750 mm ja selle abil on võimalik raami koormata korruga neljast punktist koormusega kuni 250 kN. Katse viidi läbi standardi EN 594 järgi, mida modifitseeriti antud eksperimendi jaoks. Standard sätestab, et raami koormatakse 300 ± 120 sekundi jooksul ühtlaselt kuni selle purunemiseni. Konstruktsioon loetakse purunenuks, kui sellele on rakendatud maksimaalne koormus või selline koormus, mille juures on raami ülemise nurga siire 100 mm. Koormust suurendati astmeliselt iga 15 sekundi järel. Raami jäikus on avaldatav seosega [28]:

$$R = \left[\frac{F_4 - F_2}{v_4 - v_2} \right] \quad (4.1)$$

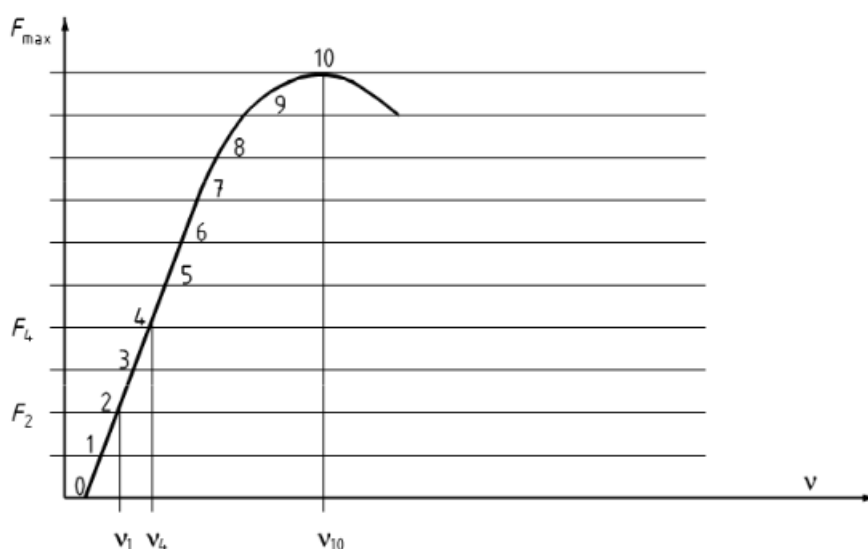
kus R – jäikus, N/mm,

F_2 – koormus $0,2F_{\max}$, N,

F_4 – koormus $0,4F_{\max}$, N,

v_2 ja v_4 – koormustele vastavad siirded, mm.

Vajalikud mõõdetavad koormused on näidatud joonisel 4.1



Joonis 4.1. Katse jõu-siirde graafik. Allikas [28]



Joonis 4.2. Katsekeha Ehituse Mäemaja laboris

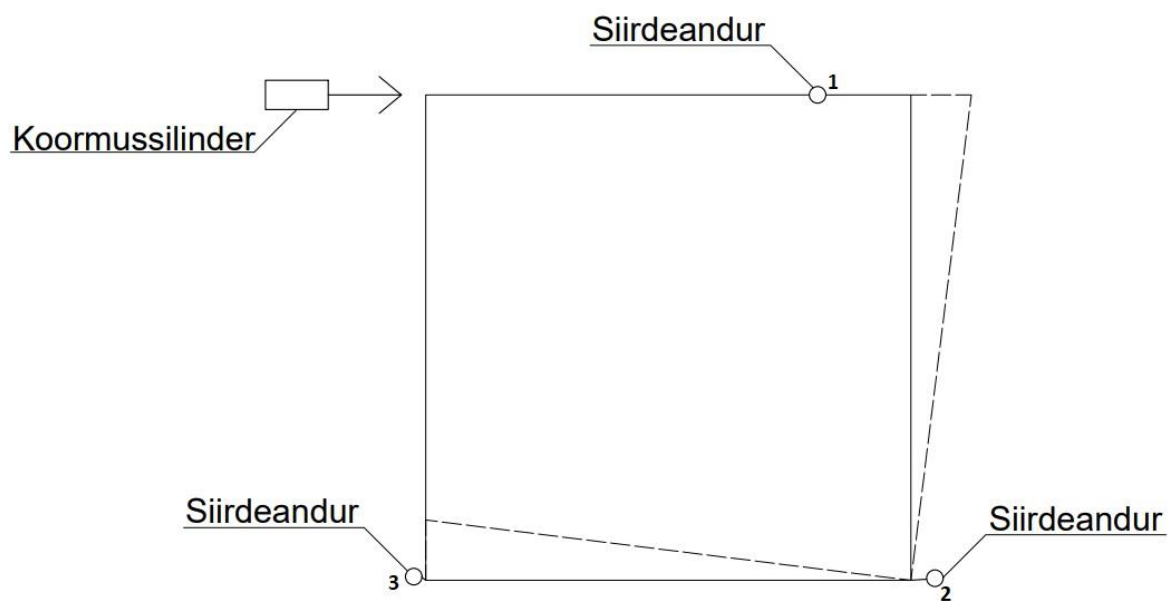
4.2 Mõõtevahendid

Otsaraami koormati Form Test AS-N tüüpi katsesüsteemi koormussilindriga EPZ-D 200 kN. Silindri juhtimiseks ehk koormuse suurendamiseks kasutati Proteus Pro tarkvara ja Digimaxx 1000 kontrollerit. Siirdeid ja jõudu mõõdeti LDVT siirdeanduritega. LDVT andurid kujutavad endast elektritrafosid, mida kasutatakse lineaarse nihke mõõtmiseks. Koormamisest saadud andmed salvestati HBM Quantum MX840B universaalvõimendiga ja Catman DAQ tarkvaraga (HMB 2019).

4.3 Katse käik

Ruummooduli otsaraamile kinnitati horisontaalsuunalise siirde mõõtmiseks siirdeandur. Koormussilindriga rakendati raamile koormust, tõstes seda iga 15 sekundi järel. Andmeid salvestati iga 0,02 sekundi järel. Katse lõppes raami maksimaalse koormuse saavutamisele. Katse põhimõtteline skeem on toodud joonisel 4.3.

Pärast katset salvestati katseandmed Excelisse. Otsasiirde saamiseks lahutati siirdeanduri nr 1 tulemusest siirdeanduri nr 2 tulemus. Anduriga 3 kontrolliti võimalikku raami nurga tõstet.

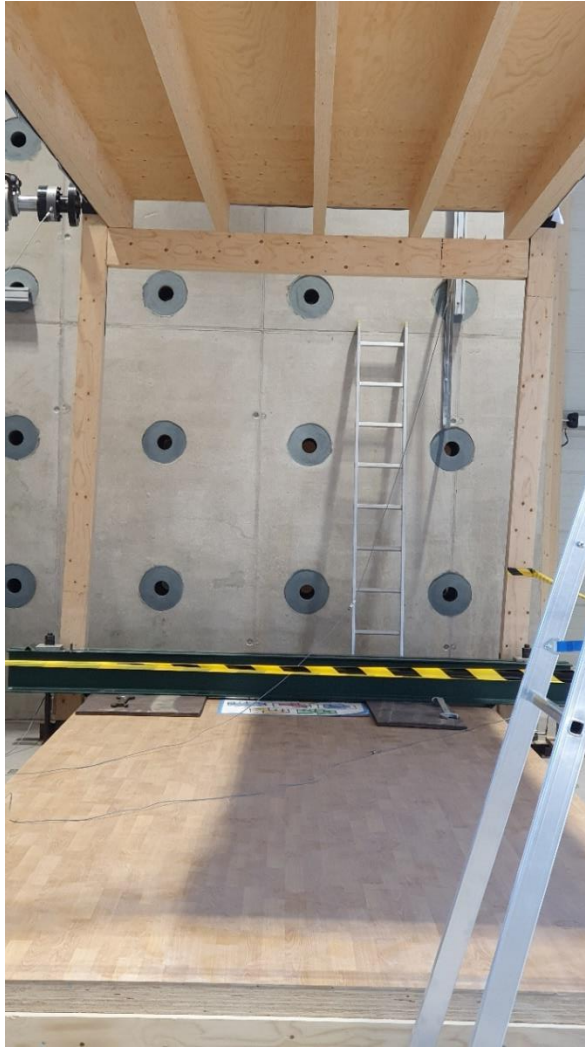


Joonis 4.3. Katse põhimõtteline skeem

4.4 Katse tulemused

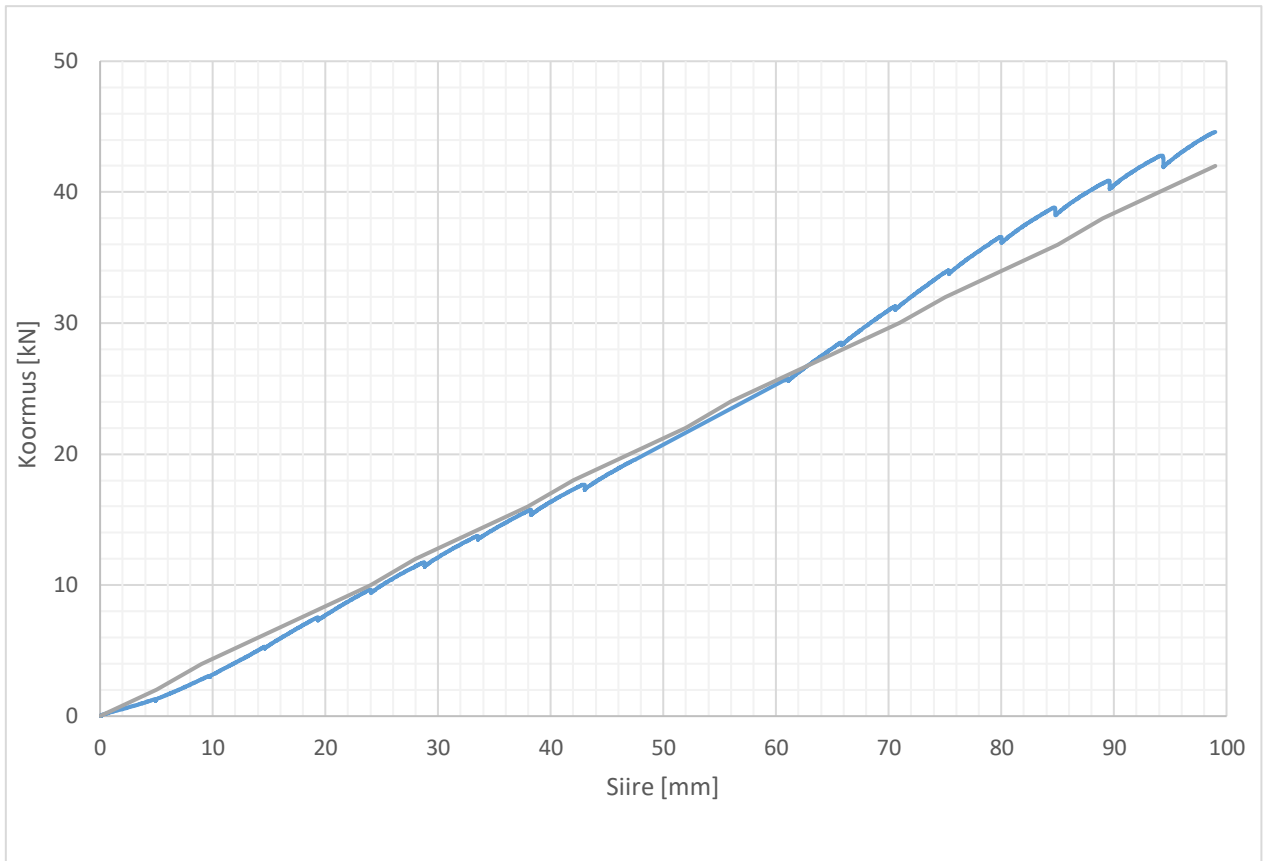
Peale koormamist oli visuaalselt näha, et raam on märgatavalt siirdunud oma algest asendist. Samuti oli kuulda eksperimendi lõpu poole mooduli praksumist, mis viitab kandevõime saavutamisele.

Siirdeandurid 2 ja 3 tulemust ei andnud. See näitab, et raami ankurdus põrandasse oli piisav.



Joonis 4.4. Raami siire

Katse tulemused on esitatud joonisel 4.5 sinise joonega. Samale graafikule on halli joonega lisatud teoreetilised tulemused, mis on leitud peatükis 3.



Joonis 4.5. Teoreetiline ja reaalne jõu-siirde graafik

Jooniselt 4.5 on näha, et katse tulemused ja arvutuslikud tulemused on lähedased. Suuremad erinevused tekivad umbes 27 kN juures. Arvutuslik graafik on terves ulatuses lineaarne, katse tulemustest on aga näha, et ülemises otsas hakkab graafik kõverduma. Seega jõuab raam umbes 30 kN juures plastsesse olekusse.

5. TULEMUSTE ASETAMINE KONTEKSTI

5.1 Üldist

Kõige tavalisem horisontaalsuunaline koormus praktilises elus on tuulekoormus. Selles peatükis leitakse tuulekoormus ruumelemendi M6 otsaraamile.

5.2 Tuulekoormuse leidmise alused

Tuulekoormus leitakse vastavalt standardile EVS-EN 1991.

Tuulerõhk arvutatakse valemiga [29]:

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe} \quad (5.1)$$

kus w_e -välispinnale mõjuv tuulerõhk, kN/m²,

$q_p(z_e)$ - tippkiirusrõhk, kN/m²,

c_{pe} - välisrõhu rõhutegur.

Käesolevad töös määratakse välisrõhutegurid tsoonide D ja E jaoks. Välisrõhutegurite arvulised väärtused on esitatud tabelis 5.1.

Tabel 5.0.1. Välisrõhutegurid. Allikas [29]

Tsoon	D		E	
	$c_{pe, 10}$	$c_{pe, 1}$	$c_{pe, 10}$	$c_{pe, 1}$
5	+0,8	+1,0	-0,7	
1	+0,8	+1,0	-0,5	
≤ 0,25	+0,7	+1,0	-0,3	

Antud töös vaadatakse mooduli otsaraami kui kandekonstruksiooni seega kasutatakse tegurit $c_{pe, 10}$.

Tippkiirusrõhk leitakse valemiga [29]:

$$q_p(z) = c_e(z) \cdot q_b \quad (5.2)$$

kus $c_e(z)$ - ekspositsioonitegur,

q_b – keskmine baaskiirusrõhk, kN/m².

Ekspositsioonitegur arvutatakse valemiga [29]:

$$c_e(z) = c_r(z)^2 + 7 \cdot k_r \cdot c_r(z) \quad (5.3)$$

kus $c_r(z)$ – karedustegur,

k_r – maastikutüübitegur.

Karedustegur arvestab keskmise tuulekiiruse muutumist ehitise juures sõltuvalt kõrgusest maapinnast ja maapinna karedusest. Karedustegur leitakse vastavalt tingimusele [29]:

$$\begin{aligned} c_r(z) &= k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \text{ kui } z_{\min} \leq z < z_{\max} \\ c_r(z) &= c_r(z_{\min}) \text{ kui } z < z_{\min} \end{aligned} \quad (5.4)$$

kus z – asukoha kõrgus maapinnast, m,

z_0 – karedusmõõt, m,

z_{\min} – miinimumkõrgus, m,

z_{\max} – maksimumkõrgus, võetakse 200 m, m.

Tegurid z_0 ja z_{\min} sõltuvad maastikutüübist ja need võetakse tabelist 5.2.

Tabel 5.0.2. Maastikutüübid ja maastiku parameetrid. Allikas [29]

Maastikutüüp	z_0 [m]	z_{\min} [m]
0 Meri või kaldapiirkod, mis on avatud merele	0,003	1
I Järved või tasane horisontaalne maastik ilma olulise taimkatteta ja ilma takistusteta	0,01	1
II Maastik madala taimkattega (nagu rohi) ja üksikute takistustega (puud, hooned), mille vaheline kaugus võrdub vähemalt 20-kordse kõrgusega	0,05	2
III Maastik, mis on kaetud ühtlase taimkatte või	0,3	5

ehitistega või üksikute takistustega, mille vaheline kaugus ei ole suurem 20-kordsest kõrgusest (nagu maa-asuladm äärelinnapiirkond, ühtlaselt metsaga kaetud alad)		
IV Maastik, kus vähemalt 15% pinnast on kaetud hoonetega, mille keskmine kõrgus ületab 15 m	1,0	10

Maastikutüübitegur k_r leitakse valemiga [29]:

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07} \quad (5.5)$$

kus $z_{0,II}$ – karedusmõõt II maastikutüübi puhul, m.

Keskmine tuule baaskiirusrõhk arvutatakse seosega [29]:

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 \quad (5.6)$$

kus ρ – õhu tihedus, kg/m^3 ,

v_b – tuule baaskiirus, m/s.

Õhu tihedus $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$.

Tuule baaskiirus leitakse valemiga [29]:

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b0} \quad (5.7)$$

kus c_{dir} – suunategur,

c_{season} – aastaajategur,

v_{b0} – tuule põhiline baaskiirus, m/s.

Tegurite c_{dir} ja c_{season} väärtused võib võtta standardi EVS-EN-1991 järgi 1,0.

Tuule põhilise baaskiiruse väärtuseks arvestatakse Eestis $v_{b0} = 21 \text{ m/s}$.

5.3 Tuulekoormuse leidmine M6 pikemale küljele

Antud magistritöös leitakse tuulerõhud kõikides maastikutüüpides. Kasutusel on ainult tsoonid D ja E. M6 pikemale küljele mõjuva tuulerõhu saamiseks tuleb liita tsoonide D ja E väärtused kokku.

Mooduli M6 parameetrid on järgmised:

$$H = 3 \text{ m};$$

$$B = 6 \text{ m};$$

$$D = 3 \text{ m};$$

$$z_e = 3 \text{ m}.$$

Tuulekoormus maastikutüübi 0 jaoks

Tuule baaskiirus valemiga 5.7:

$$v_b = 1 \cdot 1 \cdot 21 = 21 \text{ m/s}$$

Keskmine tuule baaskiirusrõhk valemiga 5.6:

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot 25 \cdot 21^2 = 0,276 \text{ kN/m}^2$$

Maastikutüüp 0, seega:

$$z_0 = 0,003 \text{ m}$$

$$z_{\min} = 1 \text{ m}$$

$$z_{0II} = 0,05 \text{ m}$$

Maastikutüübitegur vastavalt valemile 5.5:

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{0,003}{0,05}\right)^{0,07} = 0,156$$

$z > z_{\min}$, seega vastavalt valemile 5.4:

$$c_r(z) = 0,156 \cdot \ln\left(\frac{3}{0,003}\right) = 1,078$$

Ekspositsioonitegur leitakse valemiga 5.3:

$$c_e(z) = 1,078^2 + 7 \cdot 0,156 \cdot 1,078 = 2,339$$

Tippkiirusrõhk vastavalt valemile 5.2:

$$q_p(z) = 2,339 \cdot 0,276 = 0,64 \text{ kN/m}^2$$

Tuulerõhud tsoonides D ja E vastavalt valemile 5.1:

$$w_{eD} = 0,64 \cdot 0,8 = 0,52 \text{ kN/m}^2$$

$$w_{eE} = 0,64 \cdot (-0,5) = -0,32 \text{ kN/m}^2$$

Küljele mõjuva tuulerõhu leidmiseks tuleb tsoonide väärtused kokku liita. Tsooni E puhul tuleb kasutada absoluutväärtust.

$$w_e = 0,52 + |-0,32| = 0,84 \text{ kN/m}^2$$

Analoogiliselt on leitud väärtused ka teiste maastikutüüpide jaoks. Tulemused on esitatud tabelis 5.3.

Tabel 5.0.3. Ruummooduli M6 pikemale küljele mõjuvad tuulerõhud

w_e [kN/m ²]	0	I	II	III	IV
Tsoon D	0,52	0,46	0,36	0,28	0,26
Tsoon E	-0,32	-0,29	-0,23	-0,18	-0,16
Kokku	0,84	0,75	0,59	0,46	0,42

5.4 Tuulekoormuse leidmine otsaraamile

Otsaraamile mõjub tuulekoormus punktkoormusena. Tuulekoormus leitakse raamile kõikides maastikutüüpides kahes olukorras: ühekorruseline hoone ja kahekorruseline hoone.

Ühekorruselise hoone puhul võtab raami nurk vastu veerand pinnale mõjuvast koormusest. Raamile mõjuv punktkoormus on seega maastikutüüp 0 puhul:

$$F_1 = \frac{0,84 \cdot 3 \cdot 6}{4} = 3,78 \text{ kN}$$

Kahekorruselise hoone puhul võtab raami nurk vastu veerand alumise korruse pinnale mõjuvast koormusest ja pool ülemisele korrusele mõjuvast koormusest. Raamile mõjuv punktkoormus maastikutüüp 0 puhul:

$$F_2 = \frac{0,84 \cdot 3 \cdot 6}{4} + \frac{0,84 \cdot 3 \cdot 6}{2} = 11,3 \text{ kN}$$

Analoogiliselt on arvatatud punktkoormused ka teiste maastikutüüpide jaoks. Tulemused on välja toodud tabelis 5.4.

Tabel 5.4. Punktkoormused tuulekoormusest

	0	I	II	III	IV
W_e [kN/m ²]	0,84	0,75	0,59	0,46	0,42
F_1 [kN]	3,78	3,38	2,66	2,07	1,89
F_2 [kN]	11,3	10,1	7,96	6,21	5,67

6. ANALÜÜS

Vastavalt peatükis 3 esitatud seosele võib raami maksimaalne horisontaalsuunaline siire olla $h/500$, mis 3 m kõrguse raami puhul on 6 mm. Jooniselt 4.1 on näha, et siirde 6 mm saavutab raam juba 2 kN koormuse juures. Arvutuslikult on maksimaalse lubatud siirde tekkimiseks vajalik koormus natukene suurem. Arvutuslikult toimib koormuse ja siirde kasv lineaarselt, realsuses toimub aga raami liidetes enne lineaarselt toimima hakkamist kontaktpindade tekkimine. Kontaktpindade tekkimise tõttu on reaalsed tulemused mõnevõrra väiksemad.

Peatükis 3 leitud liidete momendikandevõime järgi on raami momendikandevõime

$$M = 2 \cdot 19,6 + 32,3 + 16,2 = 87,7 \text{ kNm}$$

Sellele momendile vastab punktkoormus

$$F = \frac{87,7}{3} = 29,2 \text{ kN}$$

Jooniselt 4.1 saab hinnata, et koormuse $F = 29,2$ kN juures on otsaraami siire umbes 67 mm, seega rohkem kui 10 korda suurem standardi järgi lubatud raami horisontaalsuunalisest siirdest. Antud koormuse juures on graafikult ka näha, et joon hakkab kõverduma, mis tähendab, et hakkavad tekkima plastsed deformatsioonid. Võib eeldada, et koormuse $F = 29,2$ kN juures saavutab raam oma kandevõime. Raamile võib seega teoreetiliselt rakendada koormust 10 korda rohkem, kui seda võiks selleks, et saavutada siire 6 mm.

Tuulekoormus on praktikas kõige enamlevinud horisontaalsuunaline koormus. Peatükis 5 leiti tuulekoormusest tekkiv punktkoormus M_6 otsaraamile ühe- ja kahekorruselise hoone jaoks kõikides maastikutüüpides. Tulemused on esitatud tabelis 5.4 Nagu ülevalpool mainitud, on raami maksimaalne lubatud horisontaalsuunaline siire 6 mm ja selle siirde saavutab raam 2 kN juures. Moodul sobib ühekorruselisena maastikutüüpidesse III ja IV. Mooduli jäikus kasvab lineaarselt, seega kui panna 2 moodulit kõrvuti, saab 6 mm siirde saavutamiseks rakendada raamile koormust 4 kN. Ühekorruselisena saab kahest moodulist koosneva hoone juba paigutada ka maastikutüüpidesse II, I ja 0. Selleks, et raam vastaks kasutuspiiriseisundi nõudele ka kahekorruselisena, peab maastikutüübi IV puhul olema kõrvuti 3, maastikutüüp II puhul 4 ja maastikutüüp 0 puhul 6 moodulit. Maastikutüüp III puhul jääks siire alla 6 mm 4 mooduli kõrvuti panemisel. Raamile mõjuv punktkoormus on $F = 6,21$ kN. Selline koormus lubaks panna ka 3 moodulit. Siire oleks küll üle 6 mm, aga see vahe oleks vaevu märgatav. Sarnane seis on ka kahekorruselise hoone puhul maastikutüübis I.

Tuule poolt tekitatud koormus oleks $F = 10,1$ kN. Selleks, et siire ei ületaks 6 mm, peaks arvutuslikult kõrvuti panema 6 moodulit. 5 mooduli puhul oleks siire üle 6 mm, kuid vahe oleks vaevu märgatav.

Arvutustest selgub, et raami postid on ise jäikusomadustelt head. Raami jäikust vähendavad just liitekohad. Liitekohti saab teoreetiliselt teha jäigemaks tehes neid tugevamaks. See tähendab näiteks naaglite lisamist. Mingil hetkel see aga enam ei avalda mõju, sest raami posti enda jäikus ei muutu ja raami post võib koormuse all katki minna, samal ajal kui liide on terve. Ka antud lõputöös ei annaks naaglite lisamisega enam jäikust tõsta. Naaglite lisamine toimiks ainult juhul kui koos naaglite lisamisega suurendada ka postide ja talade ristlõikeid. Liitposti asemel saaks panna kolmikposti jne. Antud samm ei oleks aga väga otstarbekas, sest kandevõime poolest seda vaja pole ja sellisel viisil materjali ebaotstarbekas kasutamine on suur majanduslik kulu ja kahjulik keskkonnale.

Jäikust saaks tõsta ka ilma naaglite lisamiseta. Selleks tuleks naaglite asendit muuta nii, et tala ja posti vaheline kontaktpind tekiks varem. Ülemistes sõlmedes saaks naaglid asetada ülespoole (rohkem tala poole). Survetsooni ja naaglite vahelised jõuõlad väheneksid ja kontaktpind saaks varem tekkida.

KOKKUVÕTE

Käesoleva magistritöö eesmärgiks on uurida eksperimentaalselt ruumelemendi M6 otsaraami jäikust. Ruumelementide kasutamine ehituses muutub järjest vajalikumaks. Moodulite kasutamine aitab erinevaid ressursse kokku hoida, mis tagab tarbijale taskukohasema lõpptoote.

Ruummoduleid saab teha mitmetest erinevatest materjalidest. Kasutusel on terasmoodulid, puitmoodulid ja hübriidmoodulid. Samuti saab moodulsüsteemi abil luua arhitektuurset efektseid hooneid, kasutades *Diagrid* või selle sarnaseid süsteeme. Samuti saab jäikust tagada erinevalt, tehes seda nurgakinnitustega, jäikusseinte või diagonaalidega.

Mustermaja moduleid on kolmes erinevas mõõdus: M3, M6 ja M9. Mustermaja süsteemi põhimõte seisneb selles, et moduleid saab panna üksteise kõrvale ja peale, saades soovitud hoone. Moodul ise koosneb otsaraamidest, laelemendist ja põrandaelemendist. Otsaraam koosneb nurga postidest ja kahest talast. Postid ja talad on oma olemuselt mõlemad LVL-48 P liitpostid. Talades on kahe spoonliimpuidu ristlõike vahel terasplaat.

Arvutuslik otsasiire leiti tarkvaraga Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2022. Käsitsi arvutati otsaraami postide ja talade paindejäikused ja liidete paindemoodulid. Vastavad parameetrid sisestati mudelisse ja tulemuste põhjal koostati graafik, mis on esitatud joonisel 3.9.

Mooduli M6 katsetamine toimus Tallinna Tehnikaülikooli Ehituse Mäemajas. Raamile rakendati horisontaalsuunaline koormus ning vastavad horisontaalsuunalised siirded salvestati. Eksperimendi tulemused on esitatud joonisel 4.5.

Antud magistritöös uuritud raami maksimaalne lubatud horisontaalsuunaline otsasiire on DIN 1994 järgi 6 mm. Selle siirde saavutab raam 2 kN koormuse juures. Jäikust saaks parandada, kui vähendada ülemiste liidete ümber tegemisega posti ja tala vahelise kontaktpinna tekkimiseks kuluvat aega.

Lubatud otsasiirde saavutamiseks võib raamile rakendada koormust 2 kN, kuid raami tegelik kandevõime on rohkem kui 10 korda suurem. Teoreetiliselt võib raamile lubada ka suuremaid siirdeid kui 6 mm, kuid praktikas võib see mooduli kasutajat häirida. Silmaga nähtavad siirded võivad inimestes tekitada hoones olles ohutunnet. Inseneride ülesanne aga on luua ruume, kus inimesed tunnevad ennast hästi ja ohutult.

SUMMARY

The purpose of this master's thesis is to research the rigidity of the room module M6 end frame. The necessity to use room modules in construction is growing rapidly. The usage of room modules helps to economise resources which provides more affordable product to the consumer.

Varied materials can be used for constructing modules. There are modules made of steel, lumber and hybrid modules, which are made of two different materials. Using Diagrid module system is architecturally very effective. Providing sufficient rigidity is also achievable in numerous ways: using shear walls, diagonals or corner fixings.

Pattern Building modules are made in 3 different sizes: M3, M6 and M9. The principle of the system is to create buildings by putting modules next and on top of each other. The module is composed of end frames, ceiling element and a floor element. The end frame consists of two corner columns and of two beams. The beams and columns are made of laminated veneer lumber. Steel plate is added to the beams.

Theoretical horizontal deformation was calculated using Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2022. The flexural rigidity of the components and flexural modulus of joints were calculated. Results are presented on Figure 3.9.

The experiment was conducted in Tallinn University of Technology's construction lab. Horizontal load was applied to the frame and deformations were fixed. The results of the experiment are presented on Figure 4.5.

According to DIN 1994, the maximum horizontal deformation of researched frame can be 6 mm. When the horizontal load of 2 kN is applied, the deformation is 6 mm. Rigidity of the frame could be improved by reconstructing the dowel joints. This would improve the evolving of the contact surface between the column and the beam.

Maximum 2 kN is allowed to apply to the frame for it to reach its maximum allowed deformation. In reality the load bearing capacity of the frame is more than 10 times bigger. In theory, much bigger deformations can be allowed but this might have negative affect for people, who might feel unsafe. The mission for engineers is to create rooms, where people feel good and safe.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

[1] W. S. Alaloul, M. S. Liew, N. A. W. A Zawawi, I. B. Kennedy "Industrial Revolution 4.0 in the constructin industry: Challenges and opportunities for stakeholders," Ain Shams Engineering Journal, vol 11, no 1, pp 225-230, March 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2019.08.010>

[2] N. Battistini, M. Falagiarda, J. Gareis, A. Hackmann, M. Roma "The euro area housing market during the COVID-19 pandemic," ECB Economic Bulletin, July 2021. [Online]. Loetud aadressil: https://www.ecb.europa.eu/pub/economic-bulletin/articles/2021/html/ecb.ebart202107_03~36493e7b67.en.html Kasutatud: 23.11.2021.

[3] Statistikaamet, Materjalide hinnatõus paisutas ehitushinnaindeksit ka kolmandas kvartalis, 2021, [Online]. Loetud aadressil: <https://www.stat.ee/et/uudised/ehitushinnaindeks-iii-kvartal-2021> Kasutatud: 23.11.2021.

[4] R. Puusepp, „Tallinna mustermaja“, Sirp, November 2019. [Online]. Loetud aadressil: <https://sirp.ee/s1-artiklid/arhitektuur/tallinna-mustermaja/>. Kasutatud: 24.11.2021.

[5] 369 Pattern Buildings, Room module, 2021, [Online]. Loetud aadressil: <https://patternbuildings.com/docs/room-module/> Kasutatud: 24.11.2021.

[6] *Ehitusseadustik*, RT I, 05.03.2015, 1. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.riigiteataja.ee/akt/103012022008?leiaKehtiv> Kasutatud: 23.01.2022.

[7] E-F. Deng, L. Zong, Y. Ding „Numerical and analytical study on initial stiffness of corrugated steel plate shear walls in modular construction,“ Steel and Composite Structures, vol 31, no 3, pp 347-359, July 2019, doi: 10.12989/scs.2019.32.3.347

[8] D. Trutalli, L. Marchi, R. Scotta, L. Pozza "Seismic Response of a Platform-Frame System with Steel Columns," Buildings, April 2017, doi: 10.3390/buildings7020033

[9] E. Tuhkanen, „Slotted-In Steel Plate Connections with Dowels in Cross-Laminated Timber Shear Walls“, [doktoridissertatsioon], Inseneriteaduskond, TalTech, Tallinn, Eesti, 2021. [Online]. Loetud aadressil: <https://digikogu.taltech.ee/et/Item/25d2c18f-714e-4116-87c4-c897b2fc5753>

[10] C. Loss, M. Piazza, R. Zandonini "Connections fot steel-timber hybrid prefabricated buildings. Part II: Innovative modular structures," Construction and

Building Materials, vol 122, September 2016, doi:
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.001>

[11] F. U. Rahman "Diagrid Structural System – Types, Materials and Advantages", The Constructor. [Online]. Loetud aadressil: <https://theconstructor.org/structural-engg/diagrid-structural-system/13731/> Kasutatud 28.11.2021.

[12] G. Angelucci, F. Mollaioli, R. Tardocchi "A New Modular Structural System for Tall Buildings Based on Tetrahedral Configuration," Buildings, vol 10, no 12, pp 240. December 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/buildings10120240>

[13] X. Wang, P. Su, J. Liu, S. Zhao "Seismic performance of ATLS modular house based on joint stiffness analysis," Journal of Constructional Steel Research, vol 183, August 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106770>

[14] J. Y. R. Liewm Y. S. Chua, Z. Dai "Steel concrete composite systems for modular construction of high-rise buildings," Structures, vol 21, pp 135-149, October 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.02.010>

[15] J. Humbert, S-J. Lee, M-J. Park "Improving the Moment Resistance of a Concealed Timber Post Base Joint" in Materials and Joints in Timber Structures, vol 9, Springer, Dordrecht, 2014, pp 13-29, doi: https://doi.org/10.1007/978-94-007-7811-5_2

[16] G-C. Kim, J. Matsumurra "A Study on the Bending Properties of Traditional Korean Joints," Journal of The Faculty of Agriculture Kyushu University, vol 56, no 2, pp 353-360, May 2011. [Online]. Loetud aadressil: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.914.8598&rep=rep1&type=pdf> Kasutatud: 04.12.2021.

[17] Y-M. Kim, S-G. Lee, S-H. Lee "Evaluation of effective lateral stiffness of a Korean-traditional wooden house with new joint types," Engineering Structures, vol 94, pp 113-121, July 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.03.008>

[18] M. Johanides, L. Kubíncová, D. Mikolášek, A. Lokaj, O. Sucharda, P. Mynářčík, "Analysis of Rotational Stiffness of the Timber Frame Connection," Sustainability, vol 13, no 1, pp 156, February 2021, doi: <http://dx.doi.org/10.3390/su13010156>

[19] R. Puusepp, L. Läänelaid, M. Zvereva, E. Volt, K. Kalbe, E. Tuhkanen, *Pattern buildings. An Industrial Building System for Mass-Customizable Buildings*, Version: Beta, Tallinn, Estonian Academy of Arts, Faculty of Architecture, June 2020. [Online]. Loetud aadressil:

https://drive.google.com/file/d/1i9PSPOLDwxSW3d2ksSBDcno_JIvx5LyK/view
Kasutatud: 06.12.2021

[20] J. Hakkarainen, L. Linkosalmi, A. Huovinen, et al, *LVL Handbook. Europe*. 2nd ed, Finland: Federation of the Finnish Woodworking Industries, 2020.

[21] PUUINFO, Products. *Laminated Veneer Lumber (LVL)*, 2020. [Online]. Pilt aadressilt: <https://puuinfo.fi/tuotteet/engineered-wood-products/laminated-veneer-lumber/kerto-lvl/?lang=en> Kasutatud: 08.12.2021

[22] J. Pupševa, „Laminated veneer lumber constructions for a room module of a modular mass-adjustable apartment building. Modulaarse mass-kohandatava kortermaja ruummoduli spoonliimpuidust konstruktsioonid“, [Magistritöö], Inseneriteaduskond, TalTech, Tallinn, Eesti, 2021. [Online]. Loetud aadressil: <https://digikogu.taltech.ee/en/Item/25153811-1712-4d0f-9f84-3dbb02dadd46>

[23] A. Räämet, R. Räämet, Ehitusmehaanika. Varraskonstruktsioonide staatika. Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2018.

[24] *Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1: General design rules and application rules for buildings*. DIN EN 1994-1-1:2010-12, 2010.

[25] T. Masso (toimetaja), Ehituskonstruktori käsiraamat, 4. trükk, EHITAME kirjastus, 2014

[26] E.-J. Just, K. Õiger, A. Just, Puit- ja puidupõhised konstruktsioonid, Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2015

[27] SBD. SELF-DRILLING DOWEL. *Technical data sheet*. Loetud aadressil: [Online] <https://www.rothoblaas.com/products/fastening/screws/screws-structures/sbd>
Kasutatud: 11.05.2022

[28] *Puitkonstruktsioonid. Katsemeetodid. Puitraamiga seinaplaatide tõmbetugevus ja jäikus*. EVS-EN 594:2011, EVS. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.evs.ee/et/evs-en-594-2011> Kasutatud: 14.05.2022

[29] *Eurokoodeks 1: Ehituskonstruktsioonide koormused. Osa1-d: Üldkoormused. Tuulekoormus*. EVS-EN 1991-1-4:2005, EVS. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.evs.ee/et/evs-en-1991-1-4-2005+na-2007> Kasutatud: 17.05.2022