



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

**MODULAARSE MASS-KOHANDATAVA
KORTERMAJA RUUMMOODULI
SPOONLIIMPUIDUST KONSTRUKTSIOONID**

**LAMINATED VENEER LUMBER CONSTRUCTIONS FOR A
ROOM MODULE OF A MODULAR MASS-ADJUSTABLE
APARTMENT BUILDING**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Julia Pupševa

Üliõpilaskood: 144584

Juhendaja: Eero Tuhkanen

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.

"....." 2021

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 2021

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

".....".....2021 .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Julia Pupševa, 144584
Õppekava, peeriala: EAEI02/09 - Ehitiste projekteerimine ja ehitusjuhtimine
Juhendaja(d): Lektor, Eero Tuhkanen, +372 520 6399

Lõputöö teema:

Modulaarse mass-kohandatava kortermaja ruummoduli spoonliimpuidust konstruktsioonid

Laminated veneer lumber constructions for a room module of a modular mass-adjustable apartment building

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Koostada spoonliimpuidust kandekonstruktsioon modulaarsele mass-kohandatavale korterelamule
2. Ristlõigete ja sõlmede dimensioneerimine
3. Lahendada moodul maksimaalne suurus 3x9

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Kirjanduse ülevaade moodulsüsteemidest ning puidu kasutamise võimalustest ruummodulites	
2.	Ääretingimuste kirjeldus	
3.	Konstruktsioonelementide arvutus kasutades spoonliimpuitu	
4.	Lõputöö vormistamine	

Töö keel: Eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: "07" jaanuar 2021a

Üliõpilane: Julia Pupševa ".....".....2021a
/allkiri/

Juhendaja: Eero Tuhkanen ".....".....2021a
/allkiri/

SISUKORD

Lühendite ja tähiste loetelu.....	6
SISSEJUHATUS	9
1. MOODULSÜSTEEMID	11
1.1 Ajalugu.....	11
1.2 Moodulite rakendus tänapäeval.....	13
1.3 Mooduli komponendid.....	15
1.4 Mustermajad	18
1.4.1 Printsibid	19
1.4.2 Hoone osad	20
1.4.3 Mustermaja ruummodul	22
1.5 Spoonliimpuit (LVL).....	24
2. PROJEKTEERIMISE PÕHIMÕTTED	27
2.1 Kandepiirseisund	27
2.2 Kasutuspiirseisund	27
2.3 Koormused ja keskkonnamõjud	30
3. MOODULI ELEMENTIDE ARVUTUS	32
3.1 Põrandaelemendi arvutusest üldiselt	32
3.1.1 Põrandaelemendi peatala kõrguse leidmine.....	33
3.2 Mehaaniliste liidetega tala arvutus	35
3.2.1 Koormused	36
3.2.2 Plaadi efektiivne laius	36
3.2.3 Efektiivse paindejäikuse leidmine (γ -meetod)	38
3.2.4 Pinged	40
3.2.5 Liite kandevõime	43
3.2.6 Arvutus kasutuspiirseisundis.....	45
3.3 Põrandaelemendi tala arvutus liimliitega	46
3.3.1 Koormused	47
3.3.2 Plaadi efektiivne laius	48
3.3.3 Efektiivse paindejäikuse leidmine	48
3.3.4 Pinged	49
3.3.5 Arvutus kasutuspiirseisundis.....	51
3.4 Laelemendi arvutus	53
3.4.1 Koormused	53
3.4.2 Plaadi arvutus punktkoormusele.....	54
3.4.3 Plaadi efektiivne laius	54
3.4.4 Efektiivse paindejäikuse leidmine	55
3.4.5 Pinged	56

3.4.6	Arvutus kasutuspiiriseisundis	57
3.5	Posti arvutus	57
3.5.1	Koormused	58
3.5.2	Stabiilsuse kontroll	59
3.5.3	Liite kandevõime	63
	KOKKUVÕTE	66
	SUMMARY	68
	KIRJANDUSE LOETELU	70
	LISAD	73
	Lisa 1 Mooduli M9 pörandaelementide dimensioneerimine	74
	Lisa 2 Mustermaja ruummoduli prototüübi pildid	78

Lühendite ja tähiste loetelu

Ladina suurtähed

A	ristlõike pindala
$E_{0,05}$	elastsusmooduli 5% väärtus
E_{mean}	elastsusmooduli keskvärtus
F	koormus
$F_{ax,Ed}$	kinnituselemendile mõjuv arvutuslik teljesuunaline jõud
$F_{ax,Rd}$	kinnituselemendi arvutuslik teljesuunaline väljatõmbekandevõime
$F_{ax,Rk}$	kinnituselemendi normatiivne teljesuunaline väljatõmbekandevõime
F_d	arvutuslik jõud
F_t	tõmbejõud
$F_{t,Rk}$	liite normatiivne tõmbekandevõime
$F_{tens,d}$	arvutuslik tõmbetugevus
$F_{tens,k}$	normatiivne tõmbetugevus
$G_{k,j}$	alaliskoormus
I	inertsimoment
K_{ser}	liite nihkemoodul
K_u	kandepiir seisundis kinnituselemendi nihkemoodul
M_d	arvutusmoment
$M_{y,Rk}$	kinnituselemendi voolupiirile vastava momendi noormväärtus
N	normaaljõud
R_d	arvutuslik kandevõime
R_k	normkandevõime
V	nihkejõud, lõikejõud, põikjõud
W	vastupanumoment
$Q_{k,i}$	domineeriv muutuvkoormus
$Q_{k,1}$	muu muutuvkoormus
$(EI)_{ef}$	efektiivne paindejäikus

Ladina väiketähed

a	kaugus
a_1	raskuskeskmete vahekaugus, ühes reas olevate kinnituselementide puidu kiudsuunaline vahekaugus
$a_{1,CG}$	kruvi keermestatud osa raskuskeskme ja elemendi otsa vaheline kaugus
a_2	raskuskeskmete vahekaugus, kinnituselementide ridavaheline kaugus ristikiudu
$a_{2,CG}$	kruvi keermestatud osa raskuskeskme ja elemendi serva vaheline kaugus

b_f	ribide samm
b_{ef}	efektiivne laius
b_w	seina laius
d	diameeter, läbimõõt, keerme välisläbimõõt
$f_{ax,k}$	normatiivne väljatõmbetugevus
$f_{c,0,d}$	arvutuslik survetugevus pikikiudu
$f_{f,c,d}$	plaadi arvutuslik survetugevus
$f_{f,t,d}$	plaadi arvutuslik tõmetugevus
$f_{head,k}$	kruvi pea läbitõmbe normatiivne parameeter
$f_{w,c,d}$	seina arvutuslik survetugevus
$f_{w,t,d}$	seina arvutuslik tõmetugevus
$f_{t,0,d}$	arvutuslik tõmbetugevus pikikiudu
$f_{v,0,d}$	arvutuslik nihketugevus
$f_{c,0,k}$	normatiivne survetugevus
$f_{m,0,k}$	normatiivne paindetugevus
$f_{t,0,k}$	normatiivne tõmbetugevus
$f_{v,0,k}$	normatiivne nihketugevus
f_1	põhisagedus
h	elemendi ristlõike kõrgus
i	elemendi ristlõike inertsiraadius
$k_{c,y}$	ebastabiilsust arvestav tegur
k_{mod}	koormuse kestuse ja niiskuse mõju arvestatav modifikatsioonitegur
k_y	evastabiilsustegur
l	sildeava
l_{ef}	efektiivne pikkus
m	mass ühikpinnale
n_{ef}	efektiivne kinnituselementide arv
p_d	jaotatud koormus
s	vahekaugus
w_{inst}	hetkeline läbipaine

Kreeka väiketähed

α	nurk jõu mõjumissuuna ja puidu kiudude vahel
β_c	sirguse tegur
γ	koormuse osavarutegur vastavalt indeksile
γ_i	liidete järeleandvust arvestav tegur
γ_M	materjali osavarutegur
λ	varda saledus

λ_y	paindele y-telje suhtes vastav saledus
$\lambda_{rel,y}$	suhteline saledus, mis vastab paindele y-telje suhtes
ρ_k	normtihedus
$\sigma_{c,0,d}$	kisuuunaline arvutuslik survepinge
$\sigma_{f,c,d}$	plaadi keskmine arvutuslik survepinge
$\sigma_{f,t,d}$	plaadi keskmine arvutuslik tõmbepinge
$\sigma_{m,i}$	elemendi äärmises kius tekkiv lisapinge
$\sigma_{m,y,d}$	arvutuslik paindepinge peatelje y suhtes
σ_i	Normaapinged paindemomendist
$\sigma_{w,c,d}$	seina keskmine arvutuslik survepinge
$\sigma_{w,t,d}$	seina keskmine arvutuslik tõmbepinge
τ_d	arvutuslik nihkepinge
τ_{max}	maksimaalsed nihkepinged
$\psi_{0,i}$	muutuvkoormuse kombinatsioonitegur

SISSEJUHATUS

Viimaste aastate jooksul on nii Euroopas kui ka Eestis olnud rikkuse ja heaolu kasv, mis on toonud kaasa ehitussektori tõusu. Eestis oli aastal 2019 kasutusele lubatud uusehituste eluruumide pind kokku 658 000 m², mis on rohkem kui kolm korda võrreldes aasta 2011 ning vahe on 452 000 m². Mitteeluhoonetest uusehitiste puhul oli aastal 2019 lubatud kasutusse kokku 680 000 m² ja see on peaaegu kaks korda rohkem võrreldes aasta 2011, siis oli võetud kasutusele 326 000 m² [1]. Selline nõudlus soodustab kiiremat ehitusaega, millega aga ei tohi kaasneda ehituskvaliteedi langemist. Silmas tuleb pidada ka mõju keskkonnale. Euroopa Liidus mõjutab ehitussektor 42% energia lõpptarbimist, toodab umbes 35% kasvuhuonegaaside heitmetest, tarbib enam kui 50% kõikidest kaevandatavatest materjalidest ja kasutab kuni 30% tarbeveest [2]. Sellest lähtuvalt peavad ehitusmeetodid ja materjalid olema keskkonna säästlikud.

Magistritöö teema valikuks pöördusin enda juhendaja, Eero Tuhkanen, poole kellel oli pakkuda Mustermaja projekt. Mustermaja on puitmoodulitest koosnev modulaarne ja masskohandatav ehitussüsteem kuni seitsmekorruseliste hoonetele [3]. Kuna moodulid valmistatakse tehases siis tagab see kiirema ehitusaja, kvaliteetsemad tooted ning ehitusel tekkib vähem jäätmeid kuna protsess on standardiseeritud. Eelprojekteeritud moodulite kasutamisel on suurel määral teada ka hoone tootmiseks ja ehituseks vajalikud materjalikogused, maksumus jt kvantitatiivsed näitajad [3]. Kuna moodul on valmistatud puidupõhilisest materjalist siis on tegu taastuva loodusvaraga juhul, kui seda ei kasutata enam kui mets uueneb.

Mustermaja oluliseimaks osaks on tehases toodetud ruummoodul. Tulenevalt transpordimise tingimustes on üldnõutud laius moodulil kuni 3 m, kõrgus koos autoplatvormi ja pakendiga kuni 4,5 m ja pikkus kuni 13 m [5]. Sellest lähtuvalt on Mustermaja moodulid projekteeritud kolmes nominaalsuuruses: 3×3 m (M3), 3×6 m (M6) ja 3×9 m (M9) [3]. Mustermaja eelprojekteeritud ruummoodul koosneb nurgapostidest, laaelemendist ja põrandaelemendist. Eelpool nimetatud osad on käesolevas magistritöös projekteeritud spoonliimpuidust ehk LVL-st.

Antud materjal oli valitud mitme põhjuse tõttu. Spoonliimpuidu valmistatakse puidust spoonide kokkuliimimise teel, mille tulemusel saavutatakse homogeenne materjal. Lisaks võimaldab LVL oma suurema tugevuse tõttu kasutada konstruktsioonides väiksemaid ristlõikeid võrreldes saematerjali või liimpuiduga. Ka keskkonna säästmise mõttes on spoonliimpuidul mitu eelist. Nagu juba mainitud, on puit taastuv loodusressurss. Lisaks kasutatakse spoonliimpuidu tootmisel suures osas taastuvenegiat [4],

sellega on kasvuhoonegaaside eritamine atmosfääri väiksem. Kuna kasvuhoonegaasid omakorda põhjustavad kliima soojenemist, mis on tänapäeval globaalseks probleemiks, siis on eriti oluline vähendada nende ülemäärast emiteerimist.

Käesoleva magistritöö eesmärgiks on korterelamu ruumimooduli M9 (pikkus 9 meetrit, laius 3 meetrit ja kõrgus 3,45 meetrit) lae- ja põrandaelemendi ning nurgapostide dimensioneerimine kande- ja kasutuspiirsesundis. Lõputöö põhiosa alguses on kirjeldatud moodulsüsteeme üldiselt ning lahti on selgitatud Mustermaja projekt ja selle kontseptsioon. Seejärel on käsitletud arvutuspõhimõtted, millele järgneb lae- ja põrandaelementide ning posti arvutused. Antud töös ei ole käsitletud arvutuslikku tugevust ja jäikust tulekahju olukorras ning ei ole käsitletud teraskonstruksioonid.

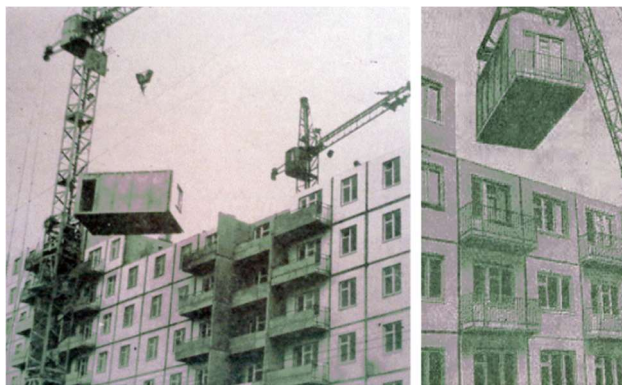
1. MOODULSÜSTEEMID

1.1 Ajalugu

Industrialiseerimine on mõjutanud 19. sajandi teises pooles järjest kasvavalt ehitustööstust. Peamised arenguvedurid ehitusmaterjalides olid teras ja betoon, jättes puidu teisejärguliseks. Aastal 1869 valmistas prantuse ettevõtte Hennebique seeriatoodena raudtee korraldajate maja, mida peetakse esimeseks betoonist ruumimoodulitest ehitiseks. Järgneva, 20. sajandi esimene pool möödus ruumimoodulite ehitamises edasise märkimisväärse arenguta. Tehases toodetavate puitkonstruktsioonide teerajaja Konrad Wachsmann kirjeldas aastal 1930 oma raamatus Holzhausbau - Technik und Gestaltung [“Puitmaja ehitamine - tehnoloogia ja disain”], kuid ruumiliste elementide eeltootmine jäi selles töös mainimata.[6]

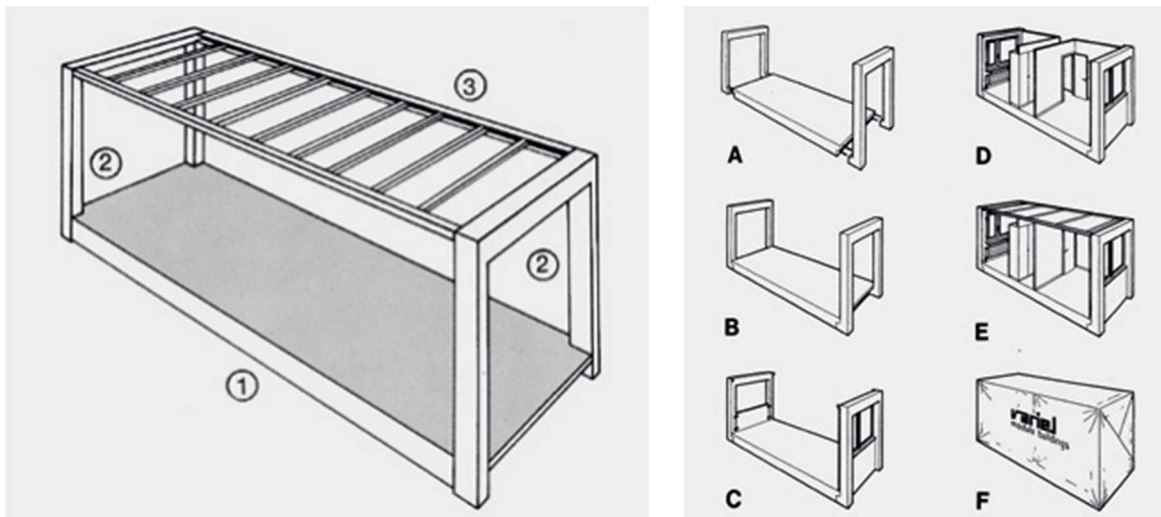
Olulised arengud ruumimoodulite tootmises toimusid 20. sajandi teises pooles. Sõltuvalt poliit-geograafilisest kontekstist mängisid elementide arengus rolli väga erinevad motivatsioonid, konstruktsioonid ja materjalid. Ameerika Ühendriigis ehitati alates 1960st põhiliselt raudbetoonmoodulitest koosnevaid kõrghooneid, kuid kasutus leidsid ka puidust ruumelemendid. Niinimetatud „Mobile Homes“, mis kujutasid ennast haagissuvila ja bangalo kombinatsiooni, olid liikuma panevaks jõuks moodulehituse arengus.[6]

Umbes samal ajal Nõukogude Liidus katsetati raudbetoonkonstruktsioone ning alates aastast 1959 ehitati viie- kuni üheksakorruselisi prototüüpe, mis koosnesid raudbetoonist toamoodulitest (joonis 1.1). Sellised prototüübid ehitati ennekõike eesmärgiga uurida efektiivsust ja majanduslikku aspekti võrreldes samal ajal arendatavate monteeritavatest raudbetoonelementidest konstruktsioonidega. Uurimustöö tulemusena hakati Nõukoguse liidus tootma kuni 5 meetrilisi ruumelemente, mille transport tehasesst ehitusplatsile pidi elementide gabariitide tõttu toimuma öösiti, suletud teedel.[6]



Joonis 1.1 Ruumelemendi montaaž Nõukogude Liidus. Allikas [7]

Kesk-Euroopas mängisid raudbetoonist ruumelemendid olulist rolli pärast II maailmasõda. Suurem osa linnadest olid hävitatud ning vaja oli kiirelt ja kuluefektiivselt ehitada. Šveitsis arendas välja arhitekt ja ettevõtja Franz Stucky koostöös ettevõttega Elcon aastast 1961 niinimetatud Varieli süsteemi (joonis 1.2). Kolmemõõtmeline avatud ruumi süsteem oli pikendatav nii vertikaalses kui ka horisontaalses suunas. Seda raudbetoonist ruumielementi kasutati elamutes, koolides ja kontorihoonetes ning toodeti litsentsi alusel isegi Põhja-Aafrikas ja Lõuna-Ameerikas. [8]



Joonis 1.2 Variel süsteem. 1-3 elemendid millest koosneb ruumimoodul. A-F skemaatiline joonis Variel-i mooduli tootmisest. Allikas [9]

Puidust ruumimoodulitest hakati Kesk-Euroopas ehitama 1970. aastate alguses ja reeglina olid hooned ühekorruselised. Põhja-Sakasamaa ettevõtte Holtmann tundis suurt huvi tehases valmistavate puitkonstruktsioonide vastu ning arendas välja süsteemid puidupõhiste ruumimoodulite ehitamiseks. Aastal 1972 viidi ellu hoonete projekte nii ajutiseks kui ka püsivaks kasutamiseks. Ehitati koolimaju ning haiglatele lisakorruseid. Liimpuitkarkassil põhinevate moodulite mõõdud olid 3x3 m, 3x6 m, 3x9 m ja isegi 3x12 m. Samal ajal arendasid ka teised ettevõtted mooduleid, kus katsetati erinevate moodulite suurustega, et vähendada transpordi maksumust. Kümme aastat hiljem oli ruumimoodulite nõudlus madal ja seetõttu lõpetas Holtmanni ettevõtte 1985. aastal selle äritegevuse. [10]

Mitmekorruselised puidust ruumimoodulitest koosnevad hooned töötati välja aastal 1990. Põhirõhk pandi hoone masskohandatavusele ja selle ajutisele iseloomule. Kuna sellel ajal puidupõhiseid materjale, mida oli lubatud kasutada kandekonstruktsioonis oli vähe, siis esimesed moodulid valmistati saepuidust karkassile. Näiteks esimesed load

ristkihtpuidule anti alles aastal 1998 ning see pani uue alguse puidust moodulite arengule. [10]

Nüüdseks on puitmoodulite ehitus ennast tõestanud mitmepereelamutes, hostelites, hotellides, koolides ja büroohoonetes. Isegi 200–300 moodulist koosnevad hooned ei ole enam haruldased. Modulaarehituses on kõvasti arenenud ka kõrguse mõttes. Aastal 2015 ehitati Soomes esimene kaheksakorruseline puitmoodulitest hoone (joonis 1.3). Kogu kompleks koosneb kolmest hoonest ning esimene maja valmis vaid üheksa kuuga.



Joonis 1.3 Puukuokka kaheksakorruseline kortermaja Jyväskyläs, Soomes. Arhitektid: OOPEAA. Allikas: <https://oopeaa.com>

1.2 Moodulite rakendus tänapäeval

Modulaarne ehitus ning moodulite kasutamine on mõistlik eelkõige nendes hoonetes või selle osades, kus esineb korduv ruumiplaneering. Selle järgi võib moodulit jäga järgmisteks tüüpideks. Esimene tüüp mooduleid on sanitaarruumi jaoks (joonis 1.4). Teine tüüp on suletud ruummoodulid, mis moodustavad terve hotellitoa, korteri või selle osa (joonis 1.5). Selleks, et tagada heliisolatsioon ja tuleohutus, peab kasutusüksus

(näiteks korter) vastama moodulite piiridele. Ühes moodulis ei saa olla kaks erinevat korterit. [12]



Joonis 1.4 Vannitoa moodul. Allikas <https://kaingaora.govt.nz/>



Joonis 1.5 Suletud ruumimooduli montaaž. Allikas <https://oopeaa.com/>

Kasutusel on ka avatud ruumimoodulid. Nende projekteerimine on keerulisem ning sageli toodetakse sellised elemendid terasprofiilidest, kuid tehtud on ka puidust ruumelemente. Näiteks kontorihoonetes ja koolides on ruumid tehtud mitmetest moodulites, kus ühenduskohad ei jää häirivalt nähtavaks. (joonis 1.6 ja 1.7)



Joonis 1.6 Avatud moodul montaaži ajal ja joonis 1.7 Lõpptulemus
Objekt: Euroopa Kool Frankfurdis, Saksamaal. Allikas [11]

Linnades on tekkinud suurenev nõudlus lisaruumide järele ning seejuures leiavad aina rohkem kasutust moodulid. Puitmoodulite eelised võrreldes teiste süsteemidega on väiksem kaal, mis on oluline just korruste juurdehitamisel olemasolevatele hoonetele. Samuti on kergus eeliseks montaažil. Horisontaalsete laienduste puhul on mooduli suuruse ja kuju valikul oluline vastastikune suhe olemasoleva ehitisega. Vertikaalse laiendamise ehk korruste lisamise puhul saab lisaruumi kavandada olemasolevatest kõrvalehitistest palju sõltumatult. Olemasoleva hoone kandekonstruktsioon,

planeering- ja tehnosüsteemid koos korruste lisamise ruumiliste nõuetega moodustavad planeerimise põhiparameetrid. Kõige lihtsam lahendus on siis, kui lisatavate moodulitega saab jätkata hoone mahtu. Kui see aga pole võimalik, saab näiteks koormused jagada, lisades näiteks puidust või terasest profiiltalasisid.[12]



Joonis 1.8 Lisakorruse ehitamine kasutatdes puitmooduleid Poissy, Prantsusmaa. Allikas: <http://www.virtuel.fr/>

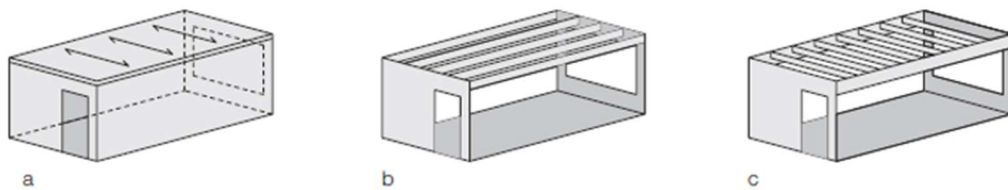
Kuigi modulaarsetel masskohandatavatel puitmoodulitel on suur potentsiaal, on need siiani jäänud prototüübi staadiumisse ja väiketootmisse. Takistuseks on nii väikene hulk arendajaid, kes eelistaks puithooneid, kuid ka piirkondade erinevad poliitilised ja majanduslikud parameetrid, mille hulka kuuluvad juriidilised ja normatiivsed määrused, tootmisvõimalused ning kinnisvarasektori pidev muutus. Sellepärast peab olema antud ehitussüsteem piisavalt paindlik.[12]

Tänapäeval on palju kasutust leidnud ka individuaalselt väljatöötatud ruumimoodulitest koosnevaid hooneid. Selline variant vastab näiteks Kesk-Euroopa ehitustavale. Antud juhul on hoone kavandamine primaarne ja arhitektid koostavad arhitektuurse projekti, mille alusel lahendatakse projektipõhiselt moodulite suurused. Sellise lähendamise puhul on tegemist pigem ehitusmeetodiga, mitte ehitussüsteemiga.[12]

1.3 Mooduli komponendid

Reeglina on ruumimoodulid risttahukad, mille tahkudeks on piki- ja põiksuunalised seinad, lagi või katus ja põrand. Seda juhul, kui kasutusüksus langeb kokku ühe mooduli mõõtmetega, näiteks hotellitoad või väikesed korterid. Sõltuvalt konstruktsioonist saab mõned küljed jätta ära. Suuremate klassruumide puhul võib moodulil jätta ära nii ühe kui kaks pikisuunalist seinu. Moodulites kuhu on planeeritud trepp, puuduvad lagi ja põrand. Selliste konstruktsioonide puhul tuleb võtta arvesse, et konstruktsioon on

horizontaalsuunas ebastabiilne ning seda tuleb kindlasti transportimisel ajutiselt jäigastada.

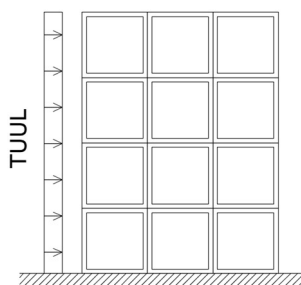


Joonis 1.9 Vahelae töötav suund ning vertikaalkoormuste ülekandmine seintele. a – Vahelaekonstruktsioon nt plaat toetub pikiseintele. b – Pikisuunas töötavad talad ning kandvad põikseinad. c – Peatalad töötavad pikisuunas ja lae abitalad põiksuunas, põikseinad on kandvad. Allikas [13]

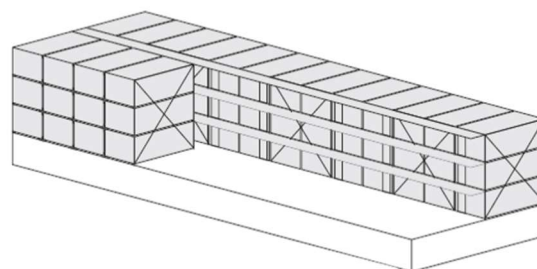
Vahelae töötava suuna määrab see, millised küljed/seinad ära jäeti. Kinniste moodulite puhul on mõistlik vertikaalkoormused üle kanda pikiseinte kaudu. Pikiseinu tuleks eelistada eelkõige selle tõttu, et siis on vahelaekonstruktsioonil lühem arvutuspikkus. Lisaks sellele on põikseintes tavapäraselt suuremad avad (aknad ja ukсед), mida tuleb võtta arvesse koormuste ülekandmisel. Sellise olukorra puhul töötavad põranda ja lae konstruktsioonid teineteisest sõltumatul ning nendele rakenduvad erinevad koormused. Põrandakonstruktsioonile rakenduvad kasuskoosmus ja omakaal ning vahelagi on ennast kandev. Kui moodulitel puuduvad kandvad pikiseinad siis on võimalik vahelaekonstruktsioon lahendada kahte moodi. Esimene võimalus on kanda koormused läbi põikseinte või kasutada alternatiivina poste ja talasid, ning teine võimalus hõlmab seinte asemel talade kasutamist (joonis 1.6 ja 1.9c). [13]

Tänapäeval on suur valik puidupõhiseid materjale ning moodulite ehitamisel saab kasutada erinevaid materjale ja süsteeme. Moodulite vertikaalsete konstruktsioonide projekteerimisel saab kasutada nii raamkonstruktsioone (postid ja talad), puitkarkassil põhinevad konstruktsioone, ristkihtpuit paneele, kui ka hübriidkonstruktsioone. Puuduvad üldtunnustatud reeglid, millist süsteemi rakendada. Otsus sõltub konkreetsest projektis ja seatud eesmärgist. [13]

Lisaks vertikaalsetele koormustele tuleb arvestada ka horisontaalseid koormusi, näiteks tuulekoormus. Sellised koormused tuleb kanda vundamentidesse. Modulaarsete hoonete puhul on moodulid tavaliselt omavahel ühendatud ja moodustavad ühe terviku (joonis 1.10). Selleks, et tagada hoone stabiilsust, kasutatakse sama põhimõtet, mis karkasshoonete puhul. Stabiilsust võib tagada liftišahti ja/või trepikoja kaudu, jäikusseinte abil või näiteks on võetud kasutusele ka trosside kasutamine diagonaalidena (joonis 1.11). [13]



Joonis 1.10 Skemaatiline joonis tuulekoormuse mõjust neljakorruselisele moodulhoonele. Autori tehtud joonis



Joonis 1.11 Skemaatiline joonis trosside kasutamisest hoone stabiilsuse tagamiseks. Allikas [13]

Allpool tabelis 1 ja 2 on toodud erinevate süsteemide eelised, kus kasutatakse järgnevat tähistust: + piiratud sobivus, ++ sobiv süsteem, +++ eriti hea. Tühi lahter tähendab, et kasutusele tuleb võtta muud meetmed. [13]

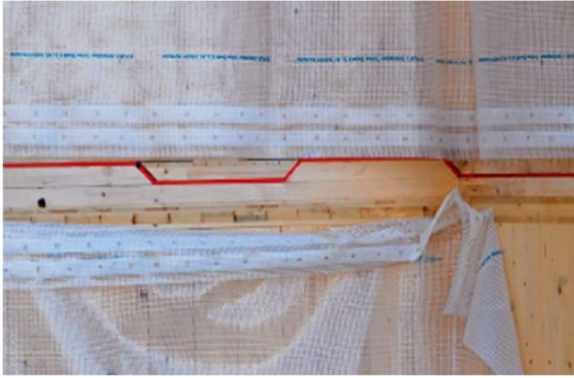
Vertikaalsed kandekonstruktsioonid	Postid	Puitkarkass	Massiivsed puitpaneelid
Suured vertikaalsed koormused	+++	+	+++
Suured horisontaalsed koormused paneeli tasapinnaga risti		+	+++
Hoone jäikus		+	+++

Tabel 1 Vertikaalsete kandekonstruktsioonide võrdlus

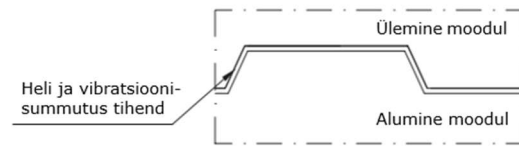
Horisontaalsed kandekonstruktsioonid	Talad	Puitkarkass	Massiivsed puitpaneelid
Suur sille	+++	++	+
Ruumi puhaskõrgus	+	++	++

Tabel 2 Horisontaalsete kandekonstruktsioonide võrdlus

Moodulite omavaheline ühendus tagatakse tavaliselt nihketappidega. Seetõttu on moodulite põrandas ja vahelaes tehtud spetsiaalsed „hambad“ (joonis 1.12 ja 1.13). Nende arv ja pikkus tuleb eraldi arvutada. Sellised vuugid on omavahel eraldatud elastse lindiga -heli ja vibratsiooni summutamiseks. [13]



Joonis 1.12 Moodulite ühenduskoht.
Allikas [13]



Joonis 1.13 Moodulite ühenduskoha skeem.
Allikas: <https://www.storaenso.com>

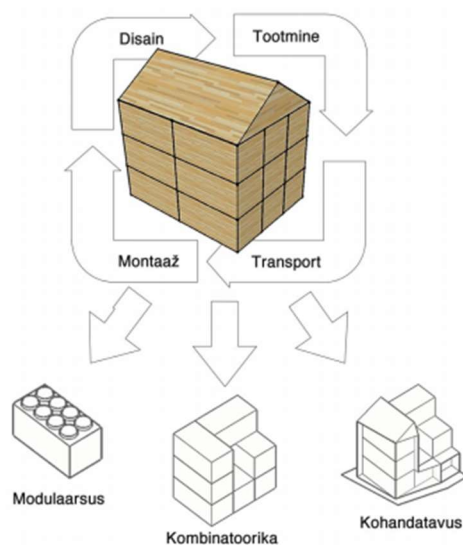
1.4 Mustermajad

Mustermaja on puitmoodulitest koosnev modulaarne ja masskohandatav süsteem kuni seitsmekorruselistele hoonetele. Tootearendusprojekti koordineerib EKA arhitektuuriteaduskond koostöös Eesti puitmajatootja Harmet OÜ-ga ja puitehituse entusiastidega. [3]

Eesmärk on luua paindlik süsteem, kus piiratud arvu diskreetsete moodulite kombineerimisel on võimalik projekteerida erinevaid hoone mahte ning need kohandada krundi kuju ja ümbruskonnaga (joonis 1.14). Teisisõnu: loodavad hoonete kontseptsioonilahendused peavad olema masskohandatavad [3]. Masskohandatava moodulaarse süsteemi puhul kehtib sama põhimõtte, mis näiteks autode tootmise puhul, kus kooskõlas seeriatootmisega on tehniliselt võimalik teha palju valikuid ja need on omaette selgelt määratletud lisavarustuse kataloogis [12]. Mustermajade puhul on ruumimoodul nõ seeriatoodete ning fassaadilahendusega antakse erinevaid välisilmeid ja sobitatakse ümbritseva linnaruumiga. Moodulite omavehelise kombineerimisel on aga võimalik luua erinevate suurustega kortereid, kusjuures nii korterite tubade arv kui ka tubade suurus saab olla erinev. Vastavalt nõudlusele on võimalik teha väiksed korterid või suured, avatud ruumid. Sellest tulenevalt on Mustermaja süsteem piisavalt kohandatav ja paindlik. [14]

Lisaks ülal loetletule peab olema süsteem keskkonnasõbralik ja arvestama peamiste tootmis-, transpordi- ja koostepiirangutega Euroopas. Mustermaja keskkonnasõbralikkus seisneb kaasaegses tehnilises lahenduses ning tehasetingimustes tootmises, millega tagatakse hoonete õhutihedus ja energiatõhusus. Teiseks on Mustermaja kandekonstruktsioonid ja põhitarandid võimalikult suures ulatuses puidust.[3]

Tehases toodetavate majade puhul on projekteerimine tähelepanu vääriv nõrk koht protsessis, mis moodustab kogu tootmisele kuluvast ajast kuni kolm neljandikku. Moodulitest hooned toodetakse tehasetingimustes päevade ja nädalatega, kuid eriprojektide koostamine võtab kuid [3]. Eelprojekteeritud moodulite kasutamine aitab seda aega märkimisväärselt lühendada. Mustermaja süsteemis on võimalik projekteerida erinevaid arhitekturseid lahendusi, kuid projekteeritava hoone kõik tehnilised sõlmed on standardiseeritud ning eelnevalt läbi lahendatud. Eelprojekteeritud moodulite kasutamisel on suurel määral teada ka hoone tootmiseks ja ehituseks vajalikud materjalikogused, maksumus ja teised kvantitatiivsed näitajad. [14]



Joonis 1.14 Mustermaja kontseptsioon. Allikas [3]

Lisaks modulaarsele mahule on võimalik Mustermaja täiendada ka erilahendustena projekteeritud osadega, milleks on tavapäraselt maa tasapinna korrus, sissepääsud, aatriumid jms. Erilahendused on Mustermaja loomulik esinemisvorm, mis võimaldab veelgi suuremat kontekstitundlikkust ja paindlikkust eriilmeliste hoonete loomisel. [3]

1.4.1 Printsiihid

Mustermajad vastavad allpool toodud printsiiptidele:

Informatiivsus. Hoone arhitektuur peab olema informatiivne - st. selle konstruktiivne ja tehniline ülesehitus ja toimimine on lihtsasti mõistetavad visuaalsel vaatlusel ning hoone rajamine, kasutamine ja hooldamine peaksid seetõttu olema võimalikult lihtsad. [15]

Universaalsus. Mustermaja moodulid ja elemendid peavad olema piisavalt lihtsad, et neid saaks toota erinevates tehastes. Hoone kooste ja ehitus peab olema jõukohane võimalikult suurele hulgale ehitusettevõtetele. Moodulite transpordil ei tohiks olla takistuseks transpordipiirangud erinevates regioonides. Moodulite transport peaks olema võimalik mööda maanteed, aga eelkõige mööda raudteid ja veeteid, ilma et transpordiks peaks taotlema erilubasid või eskorti.[15]

Keskkonnasõbralikkus. Mustermajade tootmine, transport ja rajamine, tootmise sisendenergia ja kasutusaegne energiavajadus on väike.[15]

Uuendatavus. Hoone komponendid peaksid olema kergesti ligipääsetavad, lahtimonteeritavad ning uuendatavad.[15]

Kestvus. Arvestades ehituses kasutatava puidu kasvutsükliga peaks hoone põhikonstruktsioonid vastu pidama vähemalt 100 aastat ning olema hiljem taaskasutatavad.[15]

Kohandatavus. Modulaarne süsteem ei tohiks saada oluliseks piiravaks teguriks hoone tüpologia valikul. Mustermaja süsteemi tuleb vaadata kui ruumiliste, konstruktiivsete ja tehniliste põhimõtete kogumikku, mis tingib ruumide teatava eripära sõltumata hoone tüpoloogiast või ruumide funktsioonist.[15]

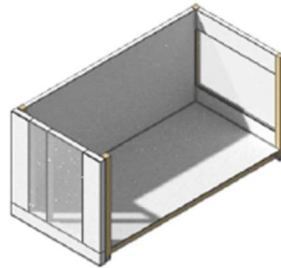
Avatus. Loodav kontseptsioon jääb ilma piiranguteta avatuks kõigile, kes tahavad seda edasi arendada.[15]

Autonoomsus. hoone funktsionaalsed ühikud (näiteks korterid kortermaja puhul) peaksid olema üksteisest sõltumatud nii juurdepääsu kui ka tehnosüsteemide mõistes.[15]

1.4.2 Hoone osad

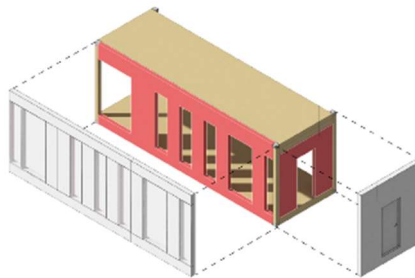
Mustermaja võib tinglikult jagada järgmisteks komponentideks ruummoodul, moodulitest koosnev kehand, skelett, nahk, jalam ja tehnosüsteemid. Tulenevalt transpordimise tingimustes on üldnõutud laius moodulil kuni 3m, kõrgus koos autoplatvormi ja pakendiga kuni 4,5m ja pikkus kuni 13m [5]. Sellest lähtuvalt on Mustermaja moodulid projekteeritud kolmes nominaalsuuruses: 3×3m (M3), 3×6m (M6) ja 3×9m (M9) [3]. Ruummooduli kirjeldatakse põhjalikumalt järgmises peatükis.

Mustermaja kehand on hoone ruumelementidest koosnev põhikomponent, mis toodetakse tehastingimustest kuni viimistluseni ehk kehand on ruummodulitest koosnev hoone arhitektuurne maht (joonis 1.15). Kehand on projekteeritud telgede võrgustikule 3×3m ja koosneb eri suurusega moodulitest (M3, M6 ja M9). Hoone kehand kaetakse fassaadi- ja katuseelementidega ehk tinglikult nahaga [14]. Mustermaja kehandid lahendatakse individuaalselt iga projekti puhul vastavalt selle lähteülesandele ja omapärasusele. Sellega antud hooneosa käesolevas lõputöös ei käsitleta.



Joonis 1.15 Mustermaja kehand. Joonise autor Lauri Läänelaid

Nahk on hoone fassaadielemendid koos avatäidetega, rõdud ja katuselemendid (joonis 1.16). Nahk on Mustermaja ilmsem masskohandatavuse väljendusvahend, mis võimaldab anda samale kehandile väga erinevaid välisilmeid [14]. Fassaadielemendid samuti lahendatakse iga hoone puhul individuaalselt ning antud töös ei ole nad käsitletud.



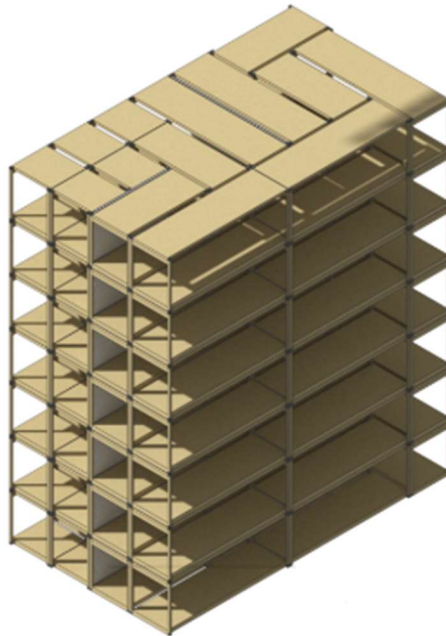
Joonis 1.16 Mustermaja nahk. Joonise autor Lauri Läänelaid

Jalam on hoone alumine maapinnaga kokkupuutuv osa ehk vundament. Hoone jalam projekteeritakse vastavalt hoone kujule, krundile ja hoone otstarbele. Jalam peab kandma hoone kehandi raskust ja toetama esimese korruse ruumimoodulite nurkasid. Jalam aitab vältida puidust moodulite kokkupuudet maapinnaga [15]. Käesolevas lõputöös vundamendid ei käsitleta.

Skelett on kehandit kandev süsteem, mis moodustub ruummodulite omavahelisel ühendamisel (joonis 1.17). Mooduli nurkades on ISO-nurgad, mis ühendatakse

omavahel juba ehitusplatsil. Lisaks moodulite ühendamisele kuuluva Mustermaja skeletti ka hoone stabiilsust tagavad elemendid milleks on jäikusseinad ja süsteemvälised elemendid nagu liftišahtid. Hoone vahelaed seotakse terasest lisaplaadi abil diafragmaks, mille kaudu kantakse horisontaalkoormused jäikusseintele [14]. Käesolevas lõputöös hoone stabiilsus ei ole käsitletud, kuid allpool on toodud jäikusseinte paiknemise nõuded. Jäikusseinad paiknevad moodulite vahele jäävates tühimikes ning nende paigutamisel tuleb lähtuda järgnevalt [14]:

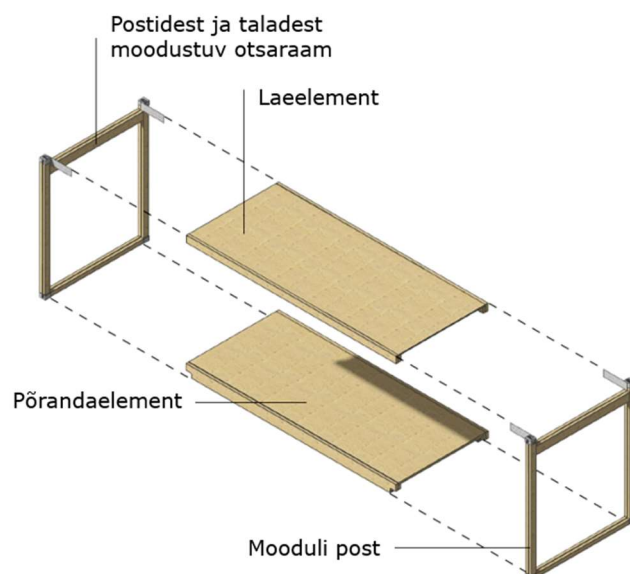
- mõlemas hoone ristsuunas peab olema vähemalt kaks jäikusseina.
- paralleelstelgedel paiknevad jäikusseinad ei pea olema kõrvuti.
- paralleelsete jäikusseinte omavaheline kaugus ei tohi ületada 9m.
- jäikusseina vähim paksus on 100mm ning maksimaalne plaanimõõt 3m.



Joonis 1.17 Mustermaja skelett. Joonise autor Lauri Läänelaid

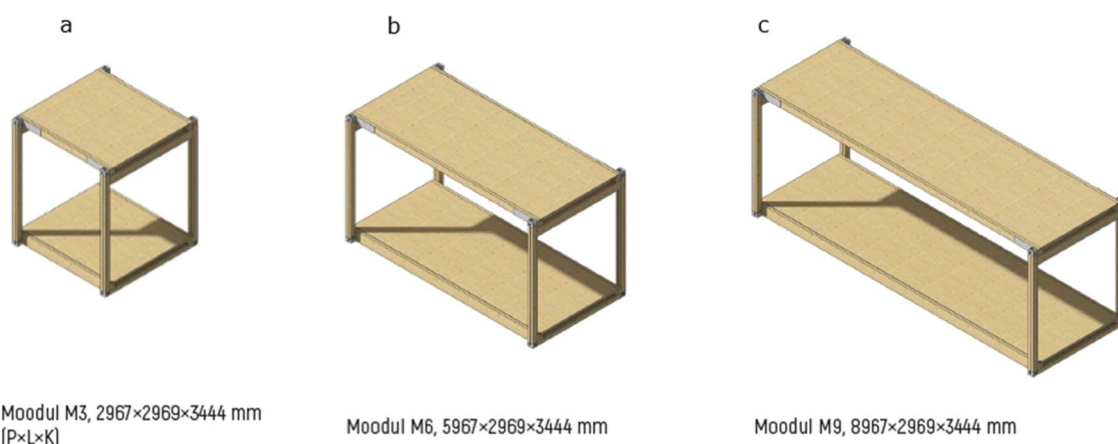
1.4.3 Mustermaja ruummoodul

Mustermaja olulisimaks osaks on tehases toodetud puidust ruummoodul. Moodul peab olema projekteeritud kuni seitsmekordsete hoonete ehitamiseks ja peab vastu transpordil ja paigaldamisel rakenduvatele dünaamilistele koormustele. Moodul koosneb lamineeritud vineerpuidust (LVL) nurgapostidest, laelemendist, põrandaelemendist ja terasest nurgäühendustest (joonis 1.18). [14]



Joonis 1.18 Mustermaja ruummoduli osad. Joonise autor Lauri Läänelaid

Mustermaja mooduleid toodetakse kolmes nominaalsuuruses: 3×3m (M3), 3×6m (M6) ja 3×9m (M9) ja kahes kõrguses: 3,44m ja 3,13m. Moodulite gabariitmõõdud on mõnevõrra väiksemad (joonis 1.19 a-c). [14]



Joonis 1.19 Mustermaja moodulite suurused. a – M3 moodul nominaalsuurusega 3x3m
b – M6 moodul nominaalsuurusega 3x6m ja c – M9 moodul nominaalsuurusega 3x9m.
Jooniste autor Lauri Läänelaid

Mooduli pikema külje talad on nihutatud mooduli perimeetrilt keskme suunas, jättes kahe mooduli vahele vaba vertikaalse tsooni laiusega 350mm. See on mõeldud vee- ja kanalisatsioonitorustiku paigalduseks ja püstikute ehituseks. [14]

Käesoleva lõputöö eesmärgiks on ruummoduli M9 lae- ja põrandaelemendi ning nurgapostide dimensioneerimine kande- ja kasutuspiiriseisundis. Postidest ja taladest moodustava otsaraami ja terasest nurgähendused käesolevas lõputöös ei käsitleta.

1.5 Spoonliimpuit (LVL)

Puit on üks vanemaid ning esimesi põhilisi ehitusmaterjale. Juba kiviajal kasutati seda ehitusmaterjalina. Puit on looduslik orgaaniline materjal. Puidule on ainuomane tema materjali omapärane struktuur ja kasvu iseloom, mille tulemusena materjali omadused on erinevamad ja keerukamad, kui teistel ehitusmaterjalidel nagu raudbetoon, teras või tellis. [16][17]

Puidul kui ehitusmaterjalil on hulk puuduseid. Tegu on anisotroopse materjaliga. See tähendab materjaliomaduste erinevus erinevates suundades. Kindlasti tuleb arvestada ka sellega, et puit muudab mahtu niiskuse hulga muutumisel. Lisaks esinevad pideval koormamisel puidus küllalt suured plastilised deformatsioonid. Tähelepanuta ei tohi jätta, et tegu on ka tuleohtliku materjaliga. [16][17]

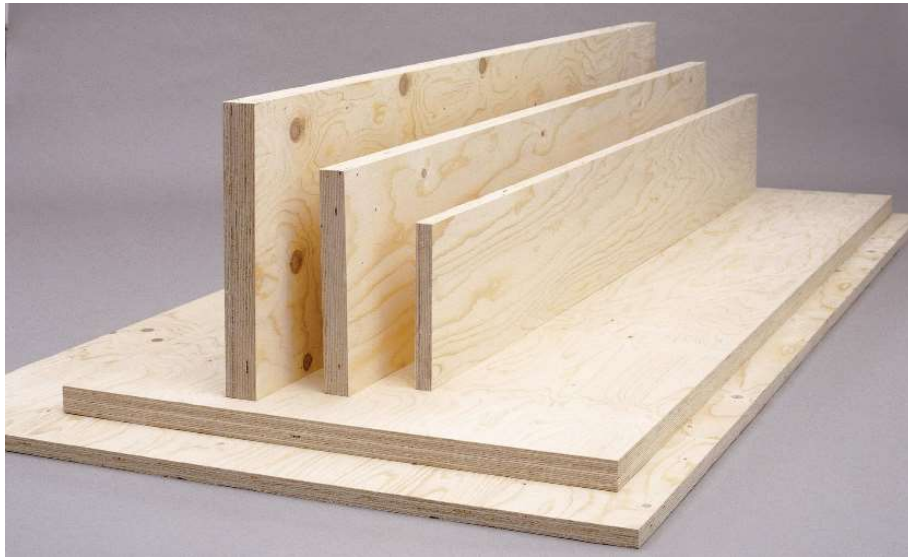
Kuid puidul on ka omad eelised. Näiteks on tegemist taastuva loodusvaraga juhul, kui seda ei kasutata enam kui mets uueneb. Kuni 70-80% puittoodete valmistamiseks kuluvast energiast saadakse tootmises tekkivatest puidujäätmetest. Puit on ka kergesti töödeldav [18]. Puidu eeliseks võib veel välja tuua, et puidul on väike soojuserijuhtivus $\lambda = 0.14 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (võrdluseks mineraalvill $\lambda = 0.04 \text{ W/m}\cdot\text{K}$; betoon $\lambda = 2.1 \text{ W/m}\cdot\text{K}$; teras $\lambda = 50 \text{ W/m}\cdot\text{K}$). [16]

Tänapäeva puitkonstruktsioonide kujunemist on oluliselt mõjutanud liimide kasutuselevõtt. Tänu liimimisele saab kujundada piiramatute mõõtmetega puitelemente. Siit tulenevalt on konstruktsioone palju lihtsam ja hõlpsamini valmistada kui varem. Tavalise saematerjali puhul seavad konstruktsioonide suurusele piirid palkide mõõtmed, kuid liimpuidu puhul on võimalus toota suuremõõtmelisi ja erisuguse kujuga elemente, kasutades parimal moel ära toormaterjali tugevusomadusi. Liimpuit suudab konkureerida kandevõimelt ja võimalike lahenduste mitmekesisuse poolest teiste ehitusmaterjalidega nagu teras ja raudbetoon. [16]

Spoonliimpuit või lamineeritud vineerpuit, Eestis on levinud ka soome keelest tulenev nimi kertopuu ehk LVL (inglisekeelne termin - *Laminated Veneer Lumber*) on kihiline materjal, mis valmistatakse puidust spoonide kokkuliimimise teel (joonis 1.20) [17]. Tänu sellele on lamineeritud vineerpuidul homogeense materjali omadused [19].

Spoonliimpuitu saadakse 3 mm paksuste spoonide kokku liimimisel plaadiks, kasutades ilmastikukindlat liimi [18]. Lõpliku LVL toote mõõtmed ei ole tooraine mõõtmetega piiratud ja isegi väikese läbimõõduga palkidest saab valmistada suuri LVL talasid ja paneele. Pigem piiranguks on tootmisliinid, millede tõttu on maksimaalsed pikkused 18-25m. Minimaalne pikkus on 2000mm ning lühemad komponendid tuleb eraldi lõigata.

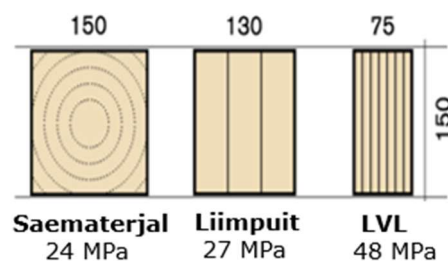
Standardsete talade paksuse ja kõrguse suhe on piiratud 1:8, et tagada mõõtmete stabiilsus tavalistes ehitusplatsi niiskustingimustes. [19]



Joonis 1.20 Spoonliimpuidust talad ja plaadid. Allikas: <https://www.woodproducts.fi/>

Spoonikihtide paigutus on standardtoodetel kõik ühes suunas ja ristehitusega toodetel on osa kihte, tavaliselt umbes 20%, peasuuna suhtes risti. See annab spoonliimpuidule suurema jäikuse, ning suurendab põikjõu kandevõimet. Vineerpakku koorimisel hajutatakse puidu looduslikud defektid nagu oksakohad väikesteks fragmentideks üle spooni tänu sellele saavutatakse homogeense materjali ja sellise toode tugevusnäitajad on kõrgemad kui tava puidul. Lisaks annab see võimaluse kasutada toorainena palgid, mis ei sobi saematerjaliks. [19]

Lamineeritud vineerpuidu tootmiskulud võrreldes, saematerjaliga, on kõrgemad (nagu iga inseneripuidu puhul) aga spoonliimpuit võimaldab kasutada väiksemaid ristlõikeid ning rakendada konstruktsioonides, kus sobivad saematerjali suurused puuduvad (joonis 1.21). [19]



Joonis 1.21 Tugevusomaduste võrdlus. Allikas [20]

Euroopas valmistatakse reeglina spoonliimpuitu kuuse- või männipuidust ehk kasutusel on okaspuit. Kuusel on parim tugevuse ja kaalu suhe ning selle madal vaigusisaldus on

ka tootmisprotsessi seisukohalt männist parem. Männispoonil on seevastu suurem tihedus, mis annab lõpptootele veidi kõrgemad tugevusomadused. Mõned LVL tootjad Euroopas kasutavad ka lehtpuitu, näiteks levinumad on pöök ja kask. Lehtpuidust spoonliimpuidu mehaanilised omadused on suurema tiheduse tõttu paremad. See aga võib tuua sisse täiendavad töötlemisnõuded, näiteks kruviühenduste puhul tekib vajadus eelpuurimiseks. Lisaks on lehtpuidu pind niisketes tingimustes ka hallituse kasvu suhtes tundlikum. [19]

Spoonliimpuitu peamiselt kasutatakse konstruktsioonides kandva osana ja seal, kus see jääb mittenähtavaks. Seetõttu põhineb tootmises spoonide sorteerimine peamiselt spoonide tugevusomadustel, mitte nende visuaalsetel omadustel. Koorimise käigus tekivad spoonis väikesed koorimispraod. Need praod võivad hiljem ilmned näiteks niiskuse kõikumisel. Lisaks võivad spoonide ühendused mõnikord kattuda, jättes vuugi kergelt lahti. See võib juhtuda ka hiljem, samuti niiskuse kõikumisest tulenevalt. Lihvimata pindadel võib tootmisprotsessi tõttu jääda ka mõni liimiplekk. [19]

Standardset spoonliimpuitu tarnitakse lihvimata. Seda saab siiski lihvida, et parandada pinna visuaalset väljanägemist nn optilise lihvimisega, mis puhastab ja silub pinda, eemaldades tumedad liimiplekid ja ühtlustades spoonide kõik kohalikud värvierinevused. Teine alternatiivne lihvimistöötlus on kalibreerimislihvimine, mida saab teha täpsemate paksustolerantside saavutamiseks. Seda meetodit aga ei ole soovitatav kasutada, kui hiljem ei ole planeeritud pinna katmine läbipaistmatu kattedkihiga. Lihvimise käigus võib jääda nähtavaks tume liimi kiht (joonis 1.22). [19]



Joonis 1.22 Spoonliimpuidust pärast lihvimist välja tulnud tume liimikihi. Allikas [21]

Spoonide jätkukohades, mis asuvad esiküljel ja on nähtavad, kasutatakse kokkuliimimiseks heledat värvi melamiinliimi. Seespool spoonide jätkukohades kasutatakse sama tumepruuni fenoolvaigu liimi, mida kasutatakse ka spoonide omavahelisel kokkuliimimisel. Kui LVL-i kasutatakse nähtavates kohtades, siis tuleb määrata, milline elemendi külg on nähtav. [19]

2. PROJEKTEERIMISE PÕHIMÕTTED

2.1 Kandepiirseisund

Kandepiirseisund vastab konstruktsiooni või selle elemendi suurimale kandevõimele. Konstruktsiooni või selle elemendi kandevõime on ristlõike või konstruktsiooni mehaaniline omadus, mida mõõdetakse jõu või momendi ühikutes [22]. Kandepiirseisundi hindamisel võrreldakse konstruktsioonis või selle elemendis tekkivaid sisepeingeid materjali tugevusomadustega [17].

Kandevõime arvutusväärtus tuleb arvutada järgmiselt [24]:

$$R_d = k_{\text{mod}} \frac{R_k}{\gamma_M} \quad (2.1)$$

kus R_k – kandevõime normväärtus
 γ_M – materjali osavarutegur
 k_{mod} – koormuse kestuse ja niiskusesisalduse mõju arvestav modifikatsioonitegur

Arvutuslikud koormustulemid (näiteks sisejõud) ei tohi ületada arvutuslikku kandevõimet kandepiirseisundis.

2.2 Kasutuspiirseisund

Horisontaalsete puitelementide puhul on konstruktsiooni dimensioneerimisel sageli määravaks just kasutuspiirseisundi arvutus. Kasutuspiirseisund peab tagama konstruktsiooni funktsioneerimise, välimuse säilimise ja olmemugavuse. Deformatsioonid, eelkõige läbipainded ei tohi kahjustada konstruktsioonide välimust, viimistlust või mittekanndvaid konstruktsioone, ning ei tohi piirata tõhusat kasutamist sealhulgas masinate ja seadmete töötamist. Vibratsioonid ei tohi põhjustada inimestele ebamugavusi, kahjustada konstruktsioone ja nende läheduses olevaid materjale. [17] [23]

Läbipaine. Koormuse poolt tekitatud hetkeline paigutus arvutatakse tugevusõpetuse kohaselt kasutades jäikusarvude keskväärtused. Lihttala korral, mis on koormatud ühtlaselt jaotud koormusega, leitakse hetkeline läbipaine seosega [23]:

$$w_{\text{inst}} = \frac{5}{384} \frac{p l_{\text{ef}}^4}{(EI)_{\text{ef}}} \quad (2.2)$$

kus p – arvutuslik joonkormus kasutuspiiriseisundis
 l – arvutus pikkus

Soovitavad piirläbipained rahvusliku lisa alusel on $l/400$.

Vibratsioonid võivad teatud juhtudel konstruktsioonide kasutatavust piirata. Põhiliseks probleemiks on inimeste tundlikkus vibratsioonidele ja sellest tulenev ebamugavustunne. Inimese tundlikkus vibratsioonidele on [23]:

- Seotud vibratsioonikiirendustega sageduste puhul alla 8Hz
- Seotud vibratsioonikiirustega sageduste puhul üle 8Hz
- Suurem vibratsiooni pikema kestuse puhul
- Väiksem, kui vibratsiooniallikas on teada
- Väiksem füüsilise tegevuse puhul

Sellest lähtudes on projekteerimisel kaks eesmärki. Esimene on vibratsioonitase vähendamine dünaamilise mõjutuse läheduses, teiseks tuleb vältida konstruktsiooni vibratsioonide kandumist kogu hoonele. [23]

Eurokoodeks 5 käsitleb pörandaid mille omavõnkesagedus (põhisagedus) on $f_1 > 8\text{Hz}$. Väiksemate omavõnkesageduste juures tuleb esile inimeste liikumisest põhjustatud dünaamilise resonantsi mõju [23].

Pörandade erinevad omavõnkesagedused võib arvutada ligikaudse valemiga [23]:

$$f_n = f_0 \sqrt{1 + n^4 \left(\frac{l}{b}\right)^4 \frac{(EI)_b}{(EI)_l}} \quad (2.3)$$

Kus f_1 ($n=1$) on ligikaudu võrdne vastava ühiklausega tala omavõnkesagedusega (põhisagedusega) f_0 . Ühes suunas kandvate pörandakonstruktsioonide põhisageduse võib leida avaldisega [24]

$$f_0 = f_1 = \frac{\pi}{2 \cdot l^2} \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}} \quad (2.4)$$

kus l – pörandade sildeava
 $(EI)_l$ – Pörandade silde l suunas vastav paindejäikus laiusühiku kohta
 m – pörandade mass pindala ühiku kohta

Elamute põrandad, mille põhisagedus on suurem, kui 8Hz, peaksid rahuldama järgmisi tingimusi [24]

$$\frac{w}{F} \leq a \quad (2.5)$$

ja

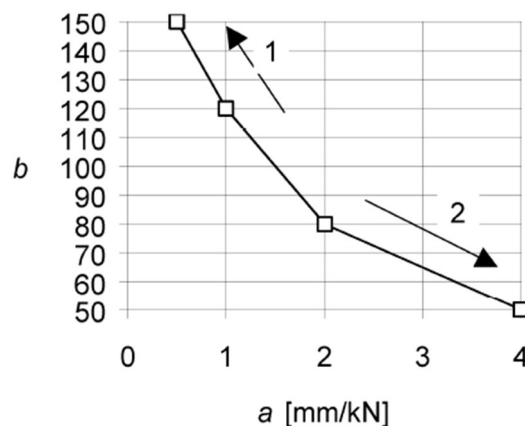
$$v \leq b(f_1 \zeta - 1) \quad (2.6)$$

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

v – ühikimpulsi kiirusvaste, s.o põranda vertikaalse vibratsiooni kiiruse (m/s) algväärtus.

ζ – sumbuvus tegur

a ja b – soovitatavad piirväärtused. Vaheline seos ning a ja b vaheline seos on esitatud joonisel 2.1



Joonis 2.1 Soovitatavad a ja b väärtused ning a ja b vaheline seos. Allikas [24]

Kontuuril neljast küljest toetatud täisnurkse plaadi korral, mõõtmetega $b \times l$, võib v väärtuse võtta ligikaudu järgmiselt [24]:

$$v = \frac{4(0,4 + 0,6n_{40})}{mb l + 200} \quad (2.7)$$

kus n_{40} – ühikimpulsi kiirusvaste

b – põranda laius

m – mass

l – põranda ava

Võnkeperioodide arvu n_{40} võib määrata valemiga [24]:

$$n_{40} = \left\{ \left(\left(\frac{40}{f_1} \right)^2 - 1 \right) \left(\frac{b}{l} \right)^4 \frac{(EI)_l}{(EI)_b} \right\}^{0.25} \quad (2.8)$$

Põranda ühes silde suunas vertikaalne hetkeline läbipaine kui $F=1\text{kN}$ on leitav seosega [24] [27]:

$$w = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{Fl^2}{42 k_\delta (EI)_l} \\ \frac{Fl^3}{48s(EI)_l} \end{array} \right. \quad (2.9)$$

kus s – talade vaheline kaugus

ja

$$k_\delta = \sqrt[4]{\frac{(EI)_b}{(EI)_l}} \quad (2.10)$$

2.3 Koormused ja keskkonnamõjud

Puitkonstruktsioonidele mõjuvad omakaal, kasuskoormused ja atmosfäärikoormused. Omakaalu koormusteks on kandekonstruktsioonide ja nende poolt kandvate konstruktsioonelementide kaal. Antud koormused määratakse konstruktsiooni mõõtmete alusel. Kasuskoormusteks tsiviilhoonetes on inimeste, inventari ja mööbli kaal ja need suurused on esitatud vastavates standardites. Atmosfäärikoormusteks on lume- ja tuulekoormus olenevad hoone suuruselt ja kujult ning geograafilisest asukohast. [25]

Koormused liigitatakse ajalise muutumise seisukohalt:

Alaliskoormused G. Nende hulka kuuluvad konstruktsioonide omakaal, statsionaarsete seadmete kaal, mahukahanemise ja ebaühtlase vajumise põhjustatud kaudne koormus; Muutuvkoormused Q. Hoone vahelagedele, taladele ja katusele mõjuv kasuskoormus, tuule- ja lumekoormus.

Erakordsed koormused A. Nende koormuste hulka kuuluvad näiteks plahvatused, transpordivahendite kokkupõrked konstruktsioonidega jms. [25]

Koormuse kestusklassid. Puit säilitab elastsuse lühiajalisel koormamisel ning konstruktsioonides tekivad suhteliselt väiksed deformatsioonid. Sama koormuste suurustel aga pikaajalisel koormamisel deformatsioonid kasvavad ja kui väiksed deformatsioonid taastuvad siis suured üldjuhul mitte [18]. Eurokoodeks 5 ja selle

standardi rahvuslik lisa määrab koormuste kestusklassid Eestis. Nii näiteks on omakaal alaline koormus mille kestus on enam kui 10 aastata. Kasuskoormus on aga keskkestev ja selle periood on 1 nädal kuni 6 kuud.

Kasutusklassid. Vastavalt Eurokoodeks 5 puitkonstruktsioonid saab jagada kolme kasutusklassi [24].

Kasutusklassi 1. Antud klassi iseloomustatakse materjali niiskusesisaldusega, mis vastab temperatuurile 20 °C ja õhu suhtelisele niiskusele kuni 65 % (mida ületatakse ainult mõneks nädalaks aastas).

Kasutusklassi 2 iseloomustatakse materjali niiskusesisaldusega, mis vastab temperatuurile 20 °C ja õhu suhtelisele niiskusele kuni 85 % (mida ületatakse ainult mõneks nädalaks aastas).

Kasutusklassi 3 iseloomustatakse kõrgema niiskusesisaldusega kui kasutusklassil 2. [24]

Koormuskombinatsioonid. Koormusi tuleb rakendada arvutustes kombinatsioonidena. Koormuskombinatsioon on üksikkoormuste kogum mis mõjutavat konstruktsiooni samaaegselt. Piirseisundi kontrollimisel määratakse konstruktsioonis koormuste mõjul tekkinud sisejõudude, pingete, paigutiste jm arvvaartused. Iga koormuskombinatsioon peab sisaldama püsikoormust ja lisaks sellele kas domineerivat muutuvkoormust või erakordset koormust. [26]

Arvutuslik koormus kandepiirseisundis üldjuhul leitakse valemiga [26]:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (2.11)$$

kus γ on koormuse osavarutegur vastavalt indeksile

$Q_{k,1}$ – domineeriv muutuvkoormus

$Q_{k,i}$ – muu muutuvkoormus

$G_{k,j}$ – alaliskoormus

$\psi_{0,i}$ – muutuvkoormuse kombinatsioonitegur

Arvutuslik koormus kasutuspiirseisundis üld juhul leitakse valemiga [26]:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (2.12)$$

kus $Q_{k,1}$ – domineeriv muutuvkoormus

$Q_{k,i}$ – muu muutuvkoormus

$G_{k,j}$ – alaliskoormus

$\psi_{0,i}$ – muutuvkoormuse kombinatsioonitegur

3. MOODULI ELEMENTIDE ARVUTUS

3.1 Põrandaelemendi arvutusest üldiselt

Põrandaelemendi arvutus on tehtud Mustermaja M9 mooduli jaoks mille nominaalsuurused on 9000x3000 mm ning gabariitmõõdud 8967x2969 mm. Arvutuste lihtsustamiseks valisin arvutuspikkuse $L=8700$ mm ja laiuse $B=2700$ mm.

Põranda ja lae konstruktsioonid on teineteisest sõltumatud ning nendele tuleb rakendada erinevad koormused. Põrandakonstruktsioonile rakenduvad kasuskoormus ja omakaal. Kuna Mustermaja moodulitel puuduvad kandvad pikiseinad ja vertikaalsed koormused antakse üle postide kaudu siis on võimalik põrandakonstruktsioon lahendada kahel viisil. Üks arvutusskeem on selline, kus servas olevad peatalad töötavad pikisuunas ja abitalad põiksuunas. Teine lahendus seisneb ainult pikisuunas töötavates talades. Selleks, et saavutada moodulis piisav puhaskõrgus, on põrandakonstruktsiooni paksus piiratud ja soovitatav on mitte ületada 300 mm.

Esialgu olis tehtud talade dimensioneerimine esimese arvutusskeemi järgi ning selle tulemusena selgus, et talade kõrgus ületab tunduvalt soovitava põrandakonstruktsiooni paksuse. Arvutused on esitatud allpool. Järgmise sammuna teostati arvutused pikisuunas töötavate talade jaoks ning nendele toetuvale plaadile. Tala ja plaadi arvutused omakorda jagunevad kinnitusviisi järgi mehaaniliste liidetega ja liimliitega arvutusteks.

Kasuskoormus kortermaja puhul on $q_k = 2,0$ kN/m² ja alaliskoormuse on valitud $g_{2,k} = 0,3$ kN/m². Keskkonnatingimused vastavad kasutusklassile 1.

Kandekonstruktsioon valmistatakse spoonliimpuidust. Arvutustes on kasutatud MetsäWood-i spoonliimpuit LVL P ja LVL C.

Osavarutegur $\gamma_Q = 1,5$

Osavarutegur $\gamma_G = 1,2$

Materjali osavaruteguri $\gamma_M = 1,2$.

Modifikatsioonitegur $k_{mod} = 0,8$ (keskmine kestus)

LVL 48 P

Elastsusmoodul $E = 13800$ N/mm²

Normatiivne paindetugevus $f_{m,0,edge,k} = 44$ N/mm²

Normatiivne tõmbetugevus $f_{t,0,k} = 35$ N/mm²

Normatiivne nihketugevus $f_{v,0,edge,k} = 4,2$ N/mm²

LVL 36 C

Elastsusmoodul $E=10500 \text{ N/mm}^2$

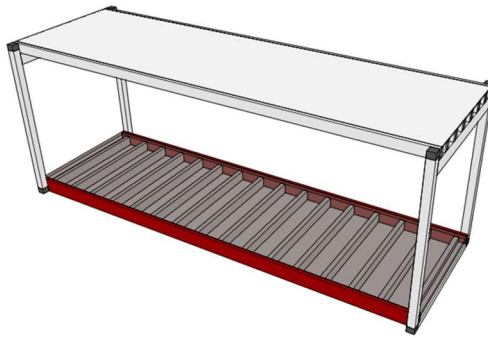
Normatiivne paindetugevus $f_{m,0,flat,k} = 36 \text{ N/mm}^2$

Normatiivne tõmbetugevus $f_{t,0,k} = 26 \text{ N/mm}^2$

Normatiivne nihketugevus $f_{v,0,flat,k} = 1.3 \text{ N/mm}^2$

3.1.1 Põrandaelemendi peatala kõrguse leidmine

Antud peatükis vaadeltakse arvutussüsteemi, mille puhul mooduli servas asuvad peatalad, mis töötavad pikisuunas (joonis 3.1). Leian antud talade ristlõige.



Joonis 3.1 Illustreeriv joonis pikisuunas töötavate peatalade kohta.
Autori joonis.

Koormused

Kandepiirseisundis tuleb kasutada arvutuskoormusi ja kasutuspiirseisundis normkoormusi. Konstruktsiooni omakaaluks võtan $g_{1,k} = 0,5 \text{ kN/m}^2$.

Arvutuslik pinnakoormus kandepiirseisundis vastavalt valemile (2.11):

$$P_{d,1} = 1,2 \cdot (0,3 + 0,5) + 1,5 \cdot 2 = 3,96 \text{ kN/m}^2$$

Arvutuslik pinnakoormus kasutuspiirseisundis vastavalt valemile (2.12):

$$P_{d,2} = (0,3 + 0,5) + 2 = 2,8 \text{ kN/m}^2$$

Arvutuslik joonkormus kandepiirseisundis:

$$p_{d,1} = 3,96 \cdot \left(\frac{2,7}{2}\right) = 5,35 \text{ kN/m}$$

Arvutuslik joonkormus kasutuspiirseisundis:

$$p_{d,2} = 2,8 \cdot \left(\frac{2,7}{2}\right) = 3,78 \text{ kN/m}$$

Maksimaalsed arvutuslikud sisejõud:

$$M_d = \frac{p_d \cdot l^2}{8} = \frac{5,35 \cdot 8,7^2}{8} = 50,6 \text{ kNm}$$

$$V_d = \frac{p_d \cdot l}{2} = \frac{5,35 \cdot 8,7}{2} = 23,3 \text{ kN}$$

Peatala dimensioneerimine kandepiirseisundis

LVL tala paindetugevus vastavalt valemile (2.1)

$$f_{m,d} = 0,8 \cdot \frac{44}{1,2} = 29 \text{ N/mm}^2$$

Arvutuslik paindest tekkiv normaalpinge talas on leitav valemiga:

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_d}{W_y} = \frac{M_d \cdot 6}{b \cdot h^2} \quad (3.1)$$

kus M_d – maksimaalne paindemoment talas

$$W_y = \frac{b \cdot h^2}{6} \text{ - Vastupanumoment}$$

Tala laiuks valin 150mm ja kõrgus avaldub tugevustingimusest järgmisena:

$$h = \sqrt{\frac{6 \cdot M_d}{b \cdot f_{m,d}}} = \sqrt{\frac{6 \cdot 50,6 \cdot 10^6}{150 \cdot 29}} = 263 \text{ mm}$$

Antud kõrgus täidab Mustermaja konseptsioonist tuleneva põrandakonstruktsiooni kõrguse ja on alla 300mm, kuid enne tugevuskontrolli leian vajaliku tala kõrguse, mis tuleneb tala lubatud läbipaindest. Horisontaalsete puitelementide puhul on konstruktsiooni dimensioneerimisel sageli määravaks just kasutuspiirseisundi arvutus.

Peatala dimensioneerimine kasutuspiirseisundis

Vastavalt valemile (2.2) ja soovitatud piirläbipaindele rahvusliku lisa järgi (l/400) avaldan kõrguse:

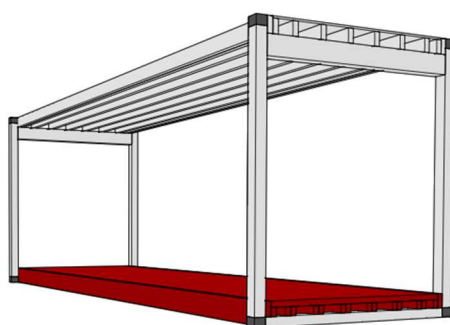
$$w_{inst} = \frac{5}{384} \frac{p l_{ef}^4}{EI} = \frac{5}{384} \cdot \frac{p l_{ef}^4}{E \cdot \frac{b \cdot h^3}{12}} \leq \frac{L}{400} \rightarrow h = \sqrt[3]{\frac{5}{384} \cdot \frac{p l_{ef}^4}{E \cdot \frac{b}{12} \cdot \frac{L}{400}}} = \sqrt[3]{\frac{5}{384} \cdot \frac{3,78 \cdot 8700^4}{13800 \cdot \frac{150}{12} \cdot \frac{8700}{400}}}$$

$$= 422 \text{ mm} > 300 \text{ mm} \text{ – tingimus ei ole täidetud}$$

Antud juhul, kuna sille on suur, saab määravaks kasutuspiirseisund ja lähim standardmõõdus LVL tala on 450mm. Sellest lähtuvalt antud lahendus ei sobi ja vahelaekonstruktsioon peab olema lahendatud teisel viisil, mida vaadeldakse järgmises peatükis.

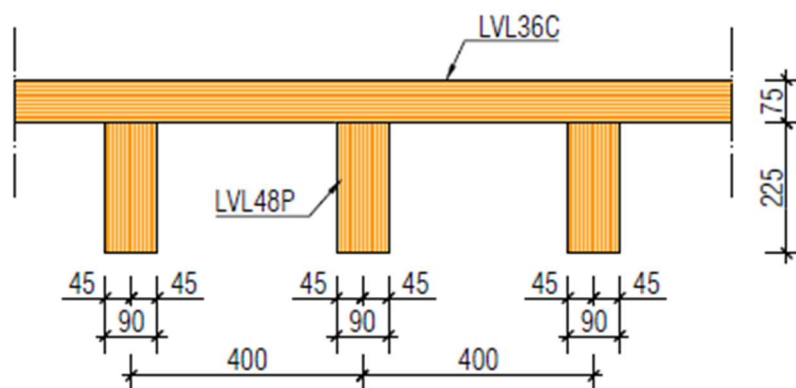
3.2 Mehaaniliste liidetega tala arvutus

Antud peatükis on esitatud arvutused põrandaelemendi pikisuunas töötavate talade ning nende toetuvale plaadile (joonis 3.2). Esialgelt on tehtud arvutused kus tala ja plaat on ühendatud omavahel mehaaniliste liidetega (isekeermestavad kruvid), millega on moodustatud komposiitkonstruktsioon. Kinnituselementidest tingitud järeleandvuse tõttu on sellised kinnitused võrreldes monoliitsete elementidega tugevuse poolest nõrgemad ja väiksema jäikusega [31]. Selletõttu on ka antud juhul mehaaniliste liidetega põrandaelemendi kostruktsioon suurema ristlõikega võrreldes liimliitega, mille arvutused on esitatud järgmises peatükis.



Joonis 3.2 Illustreeriv joonis põrandaelemendi kohta. Autori joonis.

Põrandaelemendi konstruktsioon koosneb antud juhul järgnevatest elementidest. Vöök on LVL 36 C plaat kõrgusega $h_1 = 75$ mm ning ribi koosneb LVL 48 P talast, kõrgusega $h_2 = 225$ mm ja laiusega $b_2 = 2 \times 45$ mm. Talastikku samm on $s = 400$ mm (joonis 3.3). Arvutustes on plaadi ja ribi ühendamiseks kasutatud isekeermestavaid kruve 2 x SFS WT-T- 8,2 x 160 sammuga 200 mm toe piirkonnas ja 300 mm tala keskel.



Joonis 3.3 Selgitav joonis. Autori joonis

3.2.1 Koormused

Tala omakaal:

$$\text{Plaat} \quad 5\text{kN/m}^3 \cdot 0,075\text{m} = 0,38 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Sein} \quad 5\text{kN/m}^3 \cdot (0,225\text{m} \cdot 0,090\text{m}) \cdot \frac{1}{0,4\text{m}} = 0,25 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Kokku} \quad g_k = 0,63 \text{ kN/m}^2$$

Vastavalt valemitele (2.11) arvutuslik pinnakoormus kandepiiriseisundis:

$$P_{d,1} = 1,2 \cdot (0,3 + 0,63) + 1,5 \cdot 2 = 4,11 \text{ kN/m}^2$$

Ja valemile (2.12) avutuslik pinnakoormus kasutuspiiriseisundis on:

$$P_{d,2} = (0,3 + 0,63) + 2 = 2,93 \text{ kN/m}^2$$

Arvutuslik joonkormus kandepiiriseisundis:

$$p_{d,1} = 4,11 \cdot 0,4 = 1,65 \text{ kN/m}$$

Arvutuslik joonkormus kasutuspiiriseisundis:

$$p_{d,2} = 2,93 \cdot 0,4 = 1,17 \text{ kN/m}$$

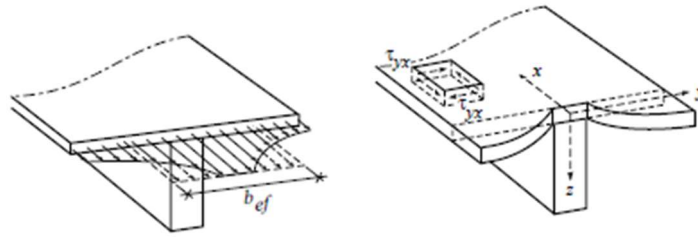
Maksimaalsed arvutuslikud sisejõud antud olukorras on:

$$M_d = \frac{p_d \cdot l^2}{8} = \frac{1,65 \cdot 8,7^2}{8} = 15,6 \text{ kNm}$$

$$V_d = \frac{p_d \cdot l}{2} = \frac{1,65 \times 8,7}{2} = 7,2 \text{ kN}$$

3.2.2 Plaadi efektiivne laius

Põikdeformatsioonidest tulenevalt ei ole pikipinged plaadi tugedevahelise osa keskpinnal ühtlaselt jaotatud (joonis 3.4). Vööde mõju paindejäikusele ja painde kandevõimele väheneb ribivahelise osa keskel. Pinge vähenemine oleneb põhiliselt suhetest b_f / L ja E / G , kus b_f on ribide samm, L on sildeava, E vöö elastsusmoodul paneeli pikisuunas ja G on nihkemoodul. Efektiivne vöö laius väheneb, kui E / G ja b_f / L suurenevad. Möhler jt (1963) annavad efektiivse vöö laiuse tuletuse, arvestades nihkedeformatsioone vöös. Tulemuseks on efektiivse ja tegeliku vöö laiuse suhe b_{ef} / b_f ühtlaselt koormatud lihttaladele. [29][30]



Joonis 3.4 Pingejaotus vöös põikdeformatsioonist. Allikas [30]

Efektiivne laius b_{ef} on defineeritud kui idealiseeritud vöö elemendi laius, mille puhul vöö keskel normaalpinged on võrdsed teooria järgi leitud maksimaalsete pingetega, arvestades vööde nihkedeformatsioone. Summaarne vöös mõjuv jõud jääb seetõttu samaks ning annab sama vastupanumomendi. [29][30]

Vastavalt Eurokoodeks 5 tuleb liimitud õhukesevööliste talade tugevuskontrollil arvesse võtta nihkedeformatsioonidest ja mõlkumisest tingitud pingete ebaühtlast jaotust vöödes. Kui täpsemat arvutust ei tehta siis on määratletud EC 5 ligikaudsed väärtused, ning vöö efektiivne laius b_{ef} (joonis 3.5) on sellisel juhul leitav järgmise valemiga [24]

$$b_{ef} = b_{c,ef} + b_w \quad (3.2)$$

kus $b_{c,ef}$ – mõlkumistingimusest tulenev laius
 b_w – tala laius

Lisa täpsustused kasutatavate lühendite kohta on toodud joonisel (3.5)

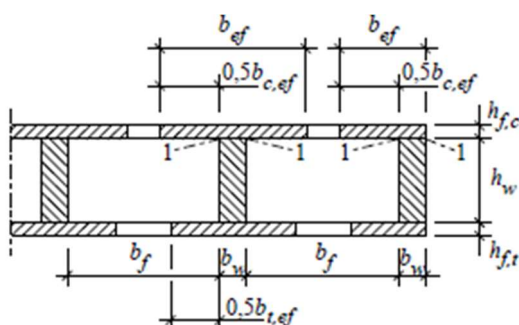
LVL on vaadeldav vineerina [30], sellega antud juhul on mõlkumistingimusest tulenev laius leitav järgmisena:

$$b_{c,ef} = 25 \cdot h_f = 25 \cdot 75 = 1875 \text{ mm}$$

ning vastavalt valemile (3.2) võrdub efektiivne laius:

$$b_{ef} = 1875 + 90 = 1965 \text{ mm}$$

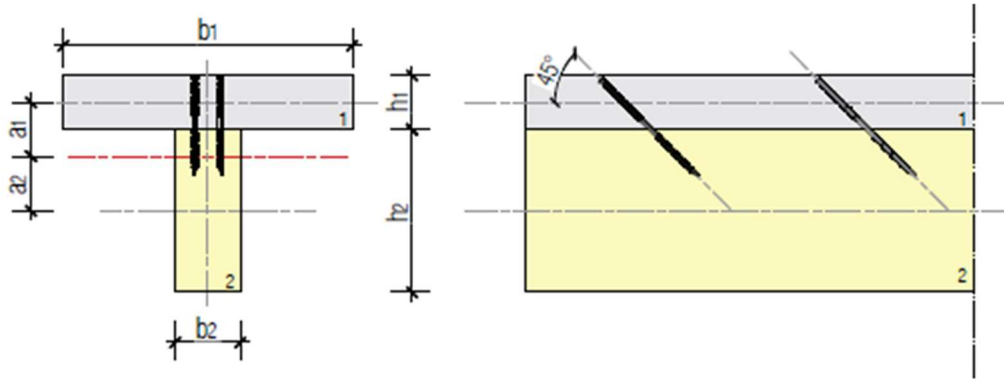
Kuna kogu vöö laius b_f võrdub 400mm ja efektiivne laius ei saa olla suurem antud väärtusest siis lõplikuks vöö efektiivlauseks valin $b_{ef} = 400 \text{ mm}$.



Joonis 3.5 Õhukesevööline tala. Lisaselgitused valemile (3.2)
 Allikas [30]

3.2.3 Efektiivse paindejäikuse leidmine (γ -meetod)

Kuni kolme mehaaniliselt ühendatud komponendiga talade puhul kasutatakse peamisi „ γ -meetod“ (Möhler, 1956). Antud arvutusmeetod sobib käsitsi arvutamiseks. Tegur γ on vahemikus 0 kuni 1, ning vähendab paindejäikuse võttes arvesse liidete järeleandvust. [31][32]



Joonis 3.6 Tala ristlõige

Plaat

$$h_1 = 75 \text{ mm}$$

$$b_1 = b_{ef} = 400 \text{ mm}$$

$$A_1 = h_1 \times b_1 = 30000 \text{ mm}^2$$

$$E_1 = 10500 \text{ N/mm}^2$$

$$I_1 = b \times h^3 / 12 = 400 \times 75^3 / 12 = 14,1 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

Ribi

$$h_2 = 225 \text{ mm}$$

$$b_2 = 90 \text{ mm}$$

$$A_2 = h_2 \times b_2 = 20250 \text{ mm}^2$$

$$E_2 = 13800 \text{ N/mm}^2$$

$$I_2 = 90 \times 225^3 / 12 = 85,4 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

Kruvi WT-T- 8,2 x 160:

$$d = 8,2 \text{ mm}$$

$$L = 160 \text{ mm}$$

$$l_{ef} = 65 \text{ mm}$$

$$\text{Nurga puhul } 45^\circ \dots 90^\circ \quad F_{ax,k,90} = f_{ax,k} = 13,35 \text{ N/mm}^2$$

$$M_{y,k} = 19,5 \text{ Nm}$$

$$f_{tens,k} = 28,6 \text{ kN}$$

Liidete järeleandvust arvestav tegur γ_i on leitav valemiga [32]:

$$\gamma_i = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 E_i A_i s_i}{K_i l^2}} \quad \text{Kui } i = 1 \text{ ja } i = 3 \quad (3.3)$$

- kus
- s_i – Kinnituselementide vahekaugus
 - l – Tala tugedevaheline kaugus
 - A – Pindala vastavalt indeksile
 - E – Elastsusmoodul vastavalt indeksile

Liite nihkemoodulid leitakse järgmiselt [31]:

$K_i = K_{ser,i}$ – kasutuspiirseisundi arvutustes,

$K_i = K_{u,i}$ – kandepiirseisundi arvutustes

Kus isekeermestava kruvi nihkemoodul on leitav valemiga [33]:

$$K_{ser} = 25 \cdot l_{ef} \cdot d \quad (3.4)$$

kus d – kruvi väline diameeter

l_{ef} – kruvi keerme pikkus

Kandepiirseisundis kinnituselemendi nihkemoodul on [24]:

$$K_u = \frac{2}{3} K_{ser} \quad (3.5)$$

Liidete järeleandvust arvestav tegur antud juhul $\gamma_2=1$.

Üksikelementide raskuskeskmete kaugus liitristlõike raskuskeskmest on leitavad seostega [32]:

$$a_2 = \frac{\gamma_1 E_1 A_1 (h_1 + h_2) - \gamma_3 E_3 A_3 (h_2 + h_3)}{2 \sum_{i=1}^3 \gamma_i E_i A_i} \quad (3.6)$$

kus h on kõrgus vastavalt indeksile

A on pindala vastavalt indeksile

E on elastsusmoodul vastavalt indeksile

ja

$$a_1 = \frac{h_1 + h_2}{2} - a_2 \quad (3.7)$$

kus h on kõrgus vastavalt indeksile

Efektiivne paindejäikus leitakse seosega [32]:

$$(EI)_{ef} = \sum_{i=1}^3 (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2) \quad (3.8)$$

kus γ_i on liidete järeleandvust arvestav tegur

a on üksikelemendi raskuskese kaugus liitristlõige raskuskeskmst

A on pindala vastavalt indeksile

E on elastsusmoodul vastavalt indeksile

Vastavalt valemile (3.4) kruvi nihkemoodul on

$$K_{\text{ser}} = 25 \cdot 130 \cdot 8,2 = 26650 \text{ N/mm}$$

Ja kandepiirseisundis nihkemoodul vastavalt valemile (3.5) on:

$$K_u = \frac{2}{3} \cdot 26650 = 17767 \text{ N/mm}$$

Järeleandvust arvestav tegur vastavalt valemile (3.3)

$$\gamma_1 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 E_1 A_1 s_1}{K_u l^2}} = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot 10500 \cdot 30000 \cdot 200}{17767 \cdot 8700^2}} = 0,684$$

Raskuskeskmete kaugus nulljoonest. Valemid (3.6) ja (3.7)

$$a_2 = \frac{0,684 \cdot 10500 \cdot 30000 \cdot (75 + 225) - 0}{2 \cdot (0,684 \cdot 10500 \cdot 30000 + 1 \cdot 13800 \cdot 20250)} = 65,3 \text{ mm}$$

$$a_1 = \frac{75 + 225}{2} - 65,3 = 84,7 \text{ mm}$$

Efektivne paindejäikus vastavalt valemile (3.8)

$$(EI)_{\text{ef}} = (10500 \cdot 14,1 \cdot 10^6 + 0,684 \cdot 10500 \cdot 30000 \cdot 84,7^2) + (13800 \cdot 85,4 \cdot 10^6 + 1 \cdot 13800 \cdot 20250 \cdot 65,3^2) = 4,06 \cdot 10^{12} \text{ N/mm}^2$$

3.2.4 Pinged

Plaadi efektiivlausega arvatud normaalpinged peavad rahuldama järgmisi tingimusi [29]:

$$\sigma_{f,c,d} \leq f_{f,c,d} \quad (3.9)$$

$$\sigma_{f,t,d} \leq f_{f,t,d} \quad (3.10)$$

kus $\sigma_{f,c,d}$ – plaadi keskmine arvutuslik survepinge
 $f_{f,c,d}$ – plaadi arvutuslik survetugevus
 $\sigma_{f,t,d}$ – plaadi keskmine arvutuslik tõmbepingeline
 $f_{f,t,d}$ – plaadi arvutuslik tõmetugevus

Seina normaalpinged peavad rahuldama järgmised tingimused [29]:

$$\sigma_{w,c,d} \leq f_{w,c,d} \quad (3.11)$$

$$\sigma_{w,t,d} \leq f_{w,t,d} \quad (3.12)$$

kus $\sigma_{w,c,d}$ – seina keskmine arvutuslik survepinge
 $f_{w,c,d}$ – seina arvutuslik survetugevus
 $\sigma_{w,t,d}$ – seina keskmine arvutuslik tõmbepinge
 $f_{w,t,d}$ – seina arvutuslik tõmetugevus

Normaalpinged paindemomendist on leitavad [31]:

$$\sigma_i = \frac{ME_i \gamma_i a_i}{(EI)_{ef}} \quad (3.13)$$

Momendi ümberjagunemise tulemusena liitristlõikes elemendi äärmises kius tekkiv lisapinge on leitav valemiga [31]:

$$\sigma_{m,i} = 0,5 \frac{ME_i h_i}{(EI)_{ef}} \quad (3.14)$$

Maksimaalsed nihkepinged tekivad seal, kus normaalpinged on nullid ja on leitavad järgmiselt [31]:

$$\tau_{\max} = \frac{\gamma_3 E_3 A_3 a_3 + 0,5 E_2 b_2 h^2}{b_2 (EI)_{ef}} \cdot V \quad (3.15)$$

Kus h on ristlõike nulljoone kaugus alumisest plaadist

Nihkepinged seina ja plaadi vahel leian järgmiselt:

$$\tau_1 = \frac{VE_1 A_1 a_1 \gamma_1}{(EI)_{ef} b_1} \quad (3.16)$$

$$\tau_2 = \frac{VE_1 A_1 a_1 \gamma_1}{(EI)_{ef} b_2} \quad (3.17)$$

Vastavalt valemile (3.13) survepinge plaadi keskel:

$$\sigma_{1,c} = \frac{15,6 \cdot 10^6 \cdot 10500 \cdot 0,684 \cdot 84,7}{4,06 \cdot 10^{12}} = 2,33 \text{ N/mm}^2$$

Plaadi äärmises kius tekkiv lisapinge vastavalt valemile (3.14):

$$\sigma_{1,m} = 0,5 \cdot \frac{15,6 \cdot 10^6 \cdot 10500 \cdot 75}{4,06 \cdot 10^{12}} = 1,51 \text{ N/mm}^2$$

Tõmbepinge seina keskel vastavalt valemile (3.13):

$$\sigma_{2,t} = \frac{15,6 \cdot 10^6 \cdot 13800 \cdot 1 \cdot 65,3}{4,06 \cdot 10^{12}} = 3,45 \text{ N/mm}^2$$

Ja lisapinge äärmises kius vastavalt valemile (3.14):

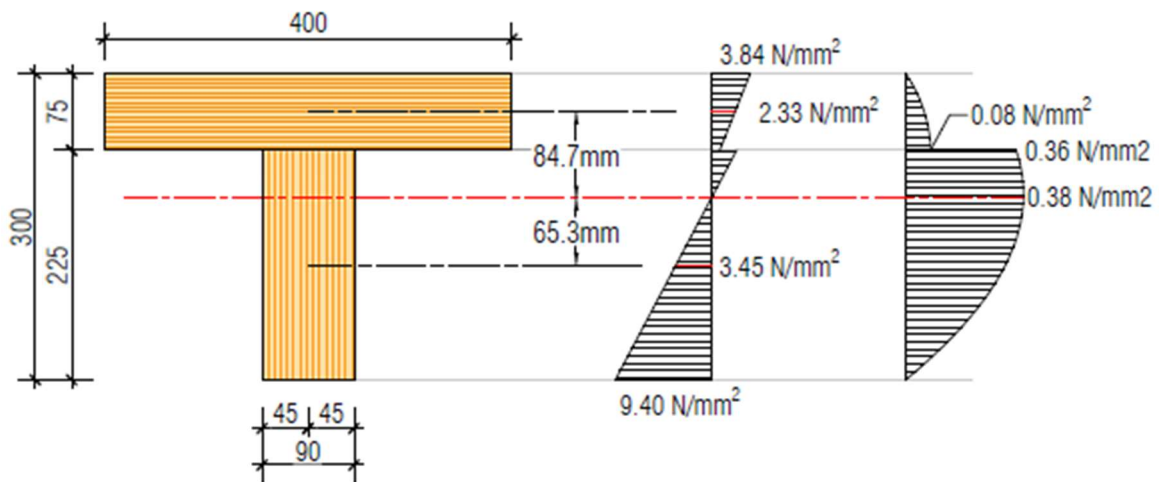
$$\sigma_{2,m} = 0,5 \cdot \frac{15,6 \cdot 10^6 \cdot 13800 \cdot 225}{4,06 \cdot 10^{12}} = 5,95 \text{ N/mm}^2$$

Nihkepinged vastavalt velemitele (3.15), (3.16) ja (3.17)

$$\tau_1 = \frac{7,2 \cdot 10^3 \cdot 10500 \cdot 30000 \cdot 84,7 \cdot 0,684}{4,06 \cdot 10^{12} \cdot 400} = 0,08 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_2 = \frac{7,2 \cdot 10^3 \cdot 10500 \cdot 30000 \cdot 84,7 \cdot 0,684}{4,06 \cdot 10^{12} \cdot 75} = 0,36 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_{\max} = \frac{0,5 \cdot 7,02 \cdot 10^3 \cdot 13800 \cdot 75 \cdot 178^2}{4,06 \cdot 10^{12} \cdot 75} = 0,38 \text{ N/mm}^2$$



Joonis 3.7 Tala ristlõige ja selle normaal- ja nihkepingeepüürid

Joonisel 3.7 on esitatud normaalpingete jaotus. Juhul kui pingete jaotus on lineaarne, on ühendus jäik. Antud juhul on tegu pooljäiga ühendusega, mis on tingitud mehaaniliste liidete järeleandvusest.

Tugevusekontroll

$$f_{c,0,d} = \frac{k_{\text{mod}}}{\gamma_m} \cdot f_{c,0,k} = \frac{0,8}{1,2} \cdot 26 = 17,3 > \sigma_{1,c} = 2,33 \text{ N/mm}^2 \text{ – tingimus on täidetud}$$

$$f_{m,0,\text{flat},d} = \frac{k_{\text{mod}}}{\gamma_m} \cdot f_{m,0,\text{flat},k} = \frac{0,8}{1,2} \cdot 36 = 24 > \sigma_{1,m} = 2,33 + 1,51 = 3,84 \text{ N/mm}^2 \text{ – tingimus on täidetud}$$

$$f_{t,0,d} = \frac{k_{\text{mod}}}{\gamma_m} \cdot f_{t,0,k} = \frac{0,8}{1,2} \cdot 35 = 23,3 > \sigma_{2,t} = 3,45 \text{ N/mm}^2 \text{ – tingimus on täidetud}$$

$$f_{m,0,\text{edge},d} = \frac{k_{\text{mod}}}{\gamma_m} \cdot f_{m,0,\text{edge},k} = \frac{0,8}{1,2} \cdot 44 = 29,3 > \sigma_{2,m} = 3,45 + 5,95 = 9,40 \text{ N/mm}^2 \text{ – tingimus täidetud}$$

$$f_{v,0,\text{flat},d} = \frac{k_{\text{mod}}}{\gamma_m} \cdot f_{v,0,\text{edge},k} = \frac{0,8}{1,2} \cdot 1,3 = 0,87 > \tau_1 = 0,08 \text{ N/mm}^2 \text{ – tingimus on täidetud}$$

$$f_{v,0,\text{edge},d} = \frac{k_{\text{mod}}}{\gamma_m} \cdot f_{v,0,\text{edge},k} = \frac{0,8}{1,2} \cdot 4,2 = 2,8 > \tau_{\max} = 0,38 \text{ N/mm}^2 \text{ – tingimus on täidetud}$$

3.2.5 Liite kandevõime

Täiskeermekruvide puhul on soovitatav kinnituselement paigaldada jõu mõjumise suuna suhtes kaldu ($30^\circ - 60^\circ$), et vähendada muljumispingeid puidu ja kinnituselemendi vahel ning kanda koormus üle võimalikult piki kruvi telge, kasutades ära metalli tugevust. Täiskeermekruvidega lahendused on orienteeritud töötama kinnituselemendi väljatõmbele puidust. Puit-puidule liidetes kaotatakse täiskeermega ära võimalust puruneda pea läbitõmbele, jõu ülekandmine toimub täis ulatuses keermes kaudu. [28]

Põikjõus tekkiv maksimaalne sidemejõud (toel) plaadi ja seina vahel määratakse avaldisega [31]:

$$F_i = \frac{\gamma_i E_i A_i a_i s_i}{(EI)_{ef}} \cdot V \quad (3.18)$$

kus s_i - kinnituselementide vahekaugus

Vastavalt sellele on jõud plaadi ja seina vahel (3.18):

$$F_1 = \frac{0,684 \cdot 10500 \cdot 30000 \cdot 84,7 \cdot 200}{4,06 \cdot 10^{12}} \cdot 7,2 \cdot 10^3 = 6428\text{N} \rightarrow 6,4 \text{ kN}$$

Kruvipaarile mõjuv koormus:

$$F_t = \frac{F_1}{\sin \alpha} = \frac{6,5}{\sin 45^\circ} = 7,6 \text{ kN}$$

Väljatõmbe normkandevõime üldkujul on [31]:

$$F_{ax,\alpha,Rk} = \frac{n_{ef} f_{ax,k} d l_{ef}}{1,2 \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha} \cdot \left(\frac{\rho_k}{\rho_a} \right)^{0,8} \quad (3.19)$$

kus n_{ef} – efektiivne kruvide arv
 d – keermes välismõõt
 l_{ef} – keermes süvistussügavus
 α – nurk kruvi telje ja kiu suuna vahel
 ρ_k – puitelemendi normtihedus

Kuna vastavusdeklaratsioonis ETA-12/0063 [33] väljatõmbetugevuse väärtuses $f_{ax,k}$ on juba arvestatud jõu ja kiudude vahelise nurga mõjuga siis valemis (3.19) jäetakse nimetajas ära liige $(1,2 \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha)$ ja kruvipaari normatiivne väljatõmbekandevõime on [31]:

$$F_{ax,\alpha,Rk} = n_{ef} f_{ax,k} d l_{ef} \cdot \left(\frac{\rho_k}{\rho_a} \right)^{0,8} \quad (3.20)$$

Kruvii normatiivne väljatõmbekandevõime vastavlt valemile (3.20) on:

$$F_{ax,\alpha,Rk} = 2^{0.9} \cdot 13.35 \cdot 8.2 \cdot 65 \cdot 1^{0.8} = 13278 \text{ N} \rightarrow 13,3 \text{ kN}$$

Arvutuslik väljatõmbekandevõime vastavalt valemile (2.1):

$$F_{ax,\alpha,Rd} = \frac{13,3 \cdot 0,8}{1,3} = 8,2 \text{ kN} > F_t = 7,6 \text{ kN} - \text{tingimus on tagatud}$$

Arvutuslik tõmbetugevus vastavalt valemile (2.1):

$$F_{tens,d} = \frac{28,6 \cdot 0,8}{1,3} = 17,6 \text{ kN}$$

Tõmbejõud ühele kruvile:

$$F_{t,1,2} = \frac{7,6}{2} = 3,8 \text{ kN} < F_{tens,d} = 17,6 - \text{tingimus on tagatud}$$

Kruvide minimaalsed vahekaugused:

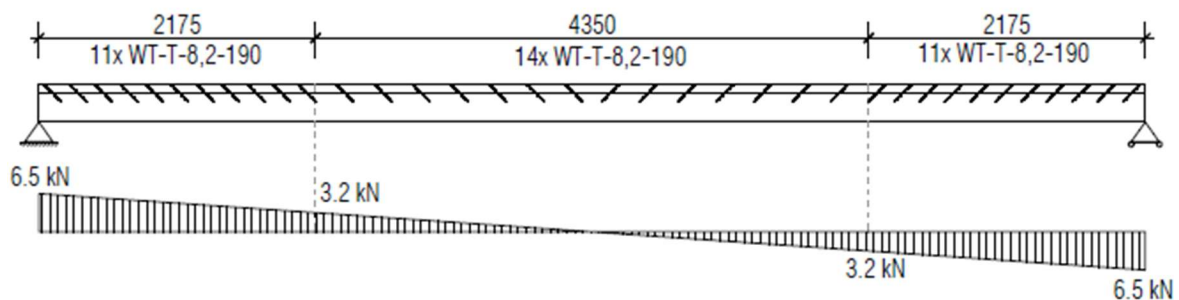
Minimaalne kruvide vahekaugus pikikiudu $a_1 = 7d = 57,4 \text{ mm}$

Minimaalne kruvide vahekaugus ristikiudu $a_2 = 5d = 41 \text{ mm}$

Minimaalne kruvi keermestatud osaraskuskeskme kaugus elemendi otasas: $a_{1,CG} = 10d = 82 \text{ mm}$

Minimaalne kruvi keermestatud osa raskuskeskme kaugus elemendi servast: $a_{2,CG} = 4d = 32,8 \text{ mm}$

Kuna tala keskel puudub põikjõud siis $\frac{1}{4}$ kaugusel toelt võtan kruvide sammuks 300mm ning toe läheduses kruvide sammuks võtan 200mm.



Joonis 3.8 Tala skeem ja põikjõuepüür.

3.2.6 Arvutus kasutuspiirseisundis

Läbipaine. Vastavalt jaotises 2.2 toodud valemile (2.2) tala läbipaine on:

$$w_{\text{inst}} = \frac{5}{384} \frac{p_{\text{ef}}^4}{(EI)_{\text{ef}}} = \frac{5}{384} \cdot \frac{1,17 \cdot 8700^4}{4,06 \cdot 10^{12}} = 21,5 \text{ mm}$$

Rahvusliku lisas soovitatavad piirläbipained on $l/400$, sellega:

$$\frac{8700}{400} = 21,75 \text{ mm} > w_{\text{inst}} = 21,5 \text{ mm} \text{ – tingimus on täidetud}$$

Vibratsioonid on leitud vastavalt jaotisessele 2.2 toodud valemitele.

Konstruktiooni paidejäikus I suunas on $(EI)_{\text{ef}} = 4,06 \cdot 10^{12} \text{ N/mm}^2 \rightarrow 4,06 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ sellest leian paindejäikuse laiusühiku kohta:

$$(EI)_1 = \frac{(EI)_{\text{ef}}}{s} = \frac{4,06 \cdot 10^6}{0,4} = 1,02 \cdot 10^7 \text{ Nm}^2/\text{m}$$

Ühes suunas kandvate talade põhisagedus on vastavalt valemile (2.4):

$$f_0 = f_1 = \frac{\pi}{2 \cdot 8,7^2} \sqrt{\frac{1,02 \cdot 10^7}{93}} = 6,87 \text{ Hz}$$

Mass ühiku kohta, antud juhul on:

$$m = g_k + g_{2k} = 63 \text{ kg/m}^2 + 30 \text{ kg/m}^2 = 93 \text{ kg/m}^2$$

Plaadi paindejäikus põranda talastikusuunalise telje suhtes laiusühiku kohta:

$$(EI)_b = E \cdot I = 10500 \cdot \frac{1000 \cdot 75^3}{12} = 3,69 \cdot 10^{11} \text{ Nmm}^2 \rightarrow 3,69 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$$

Põranda erinevad omavõnkesagedused leian valemiga (2.3):

$$f_n = 6,87 \sqrt{1 + 14 \left(\frac{8,7}{2,7}\right)^4 \cdot \frac{3,69 \cdot 10^5}{1,02 \cdot 10^7}} = 15,22 \text{ Hz} > 8 \text{ Hz}$$

Kuna põranda põhisagedus on suurem kui 8 Hz kontrollin, et oleksid täidetud tingimused (2.5) ja (2.6). Soovitatavad piirväärtused on võetud vastavalt joonisele 2.1 ning $a = 1,5 \text{ mm/kN}$ ja $b = 100$.

Hetkeline läbipaine kui $F=1\text{kN}$ on leitud valemiga (2.9):

$$w = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{Fl^2}{42 k_8 (EI)_1} = \frac{1 \cdot 10^3 \cdot 8,7^2}{42 \cdot \sqrt[4]{\frac{3,69 \cdot 10^5}{1,02 \cdot 10^7}} \cdot 1,02 \cdot 10^7} = 4,06 \cdot 10^{-4} \text{ m} = 0,406 \text{ mm} \\ \frac{Fl^3}{48s(EI)_1} = \frac{1 \cdot 10^3 \cdot 8,7^3}{48 \cdot 0,4 \cdot 1,02 \cdot 10^7} = 3,376^{-3} \text{ m} = 3,38 \text{ mm} \end{array} \right. \rightarrow$$

→ $w = 0.399\text{mm} \leq a = 1,5$ – tingimus on täidetud

Võnkeperioodide arvu n_{40} leian valemiga (2.8)

$$n_{40} = \left\{ \left(\left(\frac{40}{15,22} \right)^2 - 1 \right) \left(\frac{2,7}{8,7} \right)^4 \frac{1,02 \cdot 10^7}{3,69 \cdot 10^5} \right\}^{0,25} = 1,152$$

Vastavalt valemile (2.7) leian ühikimpulsi kiirusvaste v :

$$v = \frac{4 \cdot (0,4 + 0,6 \cdot 1,152)}{93 \cdot 2,7 \cdot 8,7 + 200} = 0,002 \text{ m/Ns}^2$$

Vastavalt valemile (2.6):

$$b^{(f_1 \zeta - 1)} = 100^{(15,22 \cdot 0,01 - 1)} = 0,02 \text{ m/Ns}^2$$

Põrandatele tuleks eeldada sumbuvusteguriks $\zeta = 0,01$ (s.o 1 %), kui ei ole muid sobivamaid väärtusi [24].

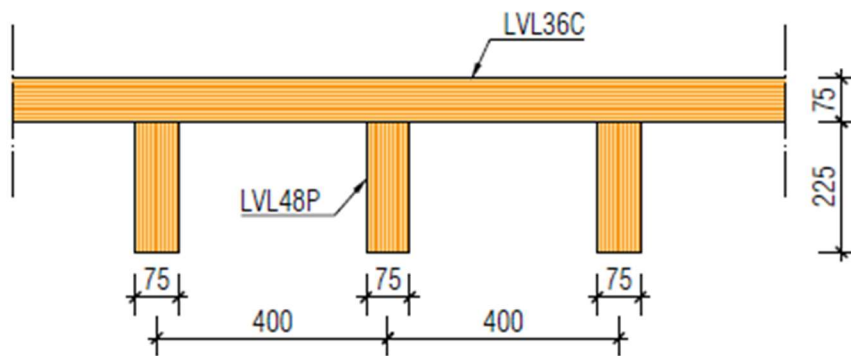
$$v = 0,002 \text{ m/Ns}^2 \leq b^{(f_1 \zeta - 1)} = 0,02 \text{ m/Ns}^2 \text{ – tingimus on täidetud}$$

3.3 Põrandaelemendi tala arvutus liimliitega

Antud peatükis on esitatud arvutused põrandaelemendi pikisuunas töötavate taladele ning nendele toetuvale plaadile (joonis 3.2). Tala ja plaat on omavahel kinnitatud liimliitega, mis samuti moodustab komposiitkonstruktsiooni.

Liimliitega konstruktsioonid valmistatakse tavapäraselt tehases, kus on võimalik tagada kõik vajalikud tingimused. Kõige olulisemad parameetrid on õige õhutemperatuur, pindade nake ja antud juhul spoonliimpuidu niiskusesisaldus [28]. Selleks, et liimühendus oleks parem tuleb vahetult enne liimi pealekandmist pinnad hõõveldada või freesida.

Põrandaelemendi konstruktsioon koosneb antud juhul järgnevatest elementidest. Võöks on LVL 36 C plaat kõrgusega $h_1 = 75$ mm ning ribi koosneb LVL 48 P talast, kõrgusega $h_2 = 225$ mm ja laiusega $b_2 = 75$ mm. Talastikku samm on $s = 400$ mm (joonis 3.9).



Joonis 3.9 Selgitav joonis. Autori joonis

3.3.1 Koormused

Tala omakaal:

$$\text{Plaat} \quad 5 \text{ kN/m}^3 \cdot 0,075 \text{ m} = 0,38 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Sein} \quad 5 \text{ kN/m}^3 \cdot (0,225 \text{ m} \cdot 0,075 \text{ m}) \cdot \frac{1}{0,4 \text{ m}} = 0,21 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Kokku} \quad g_k = 0,59 \text{ kN/m}^2$$

Vastavalt valemitele (2.11) arvutuslik pinnakoormus kandepiirsesundis:

$$P_{d,1} = 1,2 \cdot (0,3 + 0,59) + 1,5 \cdot 2 = 4,06 \text{ kN/m}^2$$

Ja valemile (2.12) avutuslik pinnakoormus kasutuspiirsesundis on:

$$P_{d,2} = (0,3 + 0,59) + 2 = 2,89 \text{ kN/m}^2$$

Arvutuslik joonkormus kandepiirsesundis:

$$p_{d,1} = 4,06 \cdot 0,4 = 1,63 \text{ kN/m}$$

Arvutuslik joonkormus kasutuspiirsesundis:

$$p_{d,2} = 2,89 \cdot 0,4 = 1,15 \text{ kN/m}$$

Maksimaalsed arvutuslikud sisejõud antud olukorras on:

$$M_d = \frac{p_d \cdot l^2}{8} = \frac{1,63 \cdot 8,7^2}{8} = 15,4 \text{ kNm}$$

$$V_d = \frac{p_d \cdot l}{2} = \frac{1,63 \times 8,7}{2} = 7,1 \text{ kN}$$

3.3.2 Plaadi efektiivne laius

Vastavalt jaotisele 3.2.2 leian plaadi efektiivse laius. Mõlkumistingimusest tulenev laius:

$$b_{c,ef} = 25 \cdot h_f = 25 \cdot 75 = 1875 \text{ mm}$$

Vastavalt valemile (3.2) võrdub efektiivne laius:

$$b_{ef} = 1875 + 75 = 1950 \text{ mm}$$

Kuna kogu vöö laius b_f võrdub 400mm ja efektiivne laius ei saa olla suurem antud väärtusest siis lõplikuks vöö efektiivlauseks valin $b_{ef} = 400\text{mm}$.

3.3.3 Efektiivse paindejäikuse leidmine

$$h_1 = 75 \text{ mm}$$

$$b_1 = b_{ef} = 400 \text{ mm}$$

$$A_1 = h_1 \times b_1 = 30000 \text{ mm}^2$$

$$E_1 = 10500 \text{ N/mm}^2$$

$$I_1 = b \times h^3 / 12 = 400 \times 75^3 / 12 = 14,1 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

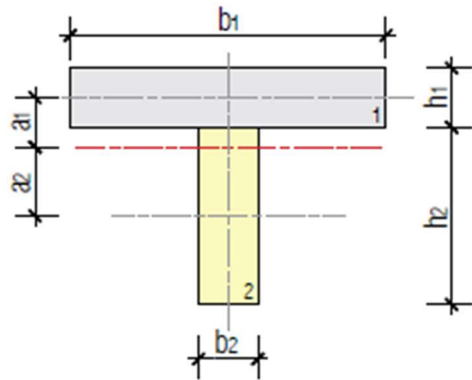
$$h_2 = 225 \text{ mm}$$

$$b_2 = 75 \text{ mm}$$

$$A_2 = h_2 \times b_2 = 16875 \text{ mm}^2$$

$$E_2 = 13800 \text{ N/mm}^2$$

$$I_2 = b \times h^3 / 12 = 75 \times 225^3 / 12 = 71,2 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$



Joonis 3.10 Tala ristlõige

Arvestades vöö ja seina erinevaid elastsusmooduleid on üksikelementide raskuskeskmete kaugus liitristlõike raskuskeskmest leitavad seostega[30]:

$$a_1 = \frac{\sum_{i=1}^2 z_i E_i A_i}{\sum_{i=1}^2 E_i A_i} = \frac{\frac{h_1}{2} E_1 A_1 + \left(h_1 + \frac{h_2}{2}\right) E_2 A_2}{E_1 A_1 + E_2 A_2} - \frac{h_1}{2} = \frac{E_2 A_2 (h_1 + h_2)}{2(E_1 A_1 + E_2 A_2)} \quad (3.21)$$

kus h on kõrgus vastavalt indeksile
 A on pindala vastavalt indeksile
 E on elastsusmoodul vastavalt indeksile

ja

$$a_2 = \frac{h_1 + h_2}{2} - a_1 \quad (3.22)$$

kus h on kõrgus vastavalt indeksile

Efektiivne paindejäikus leitakse seosega [30]:

$$(EI)_{ef} = \sum_{i=1}^2 (E_i I_i + E_i A_i a_i^2) \quad (3.23)$$

kus a on üksikelemendi raskuskese kaugus liitristlõige raskuskeskmest

A on pindala vastavalt indeksile

E on elastsusmoodul vastavalt indeksile

Vastavalt valemitele (3.21), (3.22) ja (3.23) leian:

$$a_1 = \frac{13800 \cdot 16875 \cdot (75 + 225)}{2 \cdot (10500 \cdot 30000 + 13800 \cdot 16875)} = 63,8 \text{ mm}$$

$$a_2 = \frac{75 + 225}{2} - 63,8 = 86,2 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} (EI)_{ef} &= (10500 \cdot 14,1 \cdot 10^6 + 10500 \cdot 30000 \cdot 63,8^2) + (13800 \cdot 71,2 \cdot 10^6 + 13800 \cdot 16875 \cdot 86,2^2) \\ &= 4,14 \cdot 10^{12} \text{ Nmm}^2 \end{aligned}$$

3.3.4 Pinged

Plaadi efektiivlaiusega arvatatud normaalpinged peavad rahuldama jaotuses 3.2.4 toodud tingimusi.

Survepinged plaadi keskel leitakse valemiga[29]:

$$\sigma_{1,c} = \frac{M}{(EI)_{ef}} E_1 a_1 \quad (3.24)$$

Paindepinged pladi ülemises pinnas[29]:

$$\sigma_{1,m} = \frac{M}{(EI)_{ef}} E_1 \left(a_1 + \frac{h_1}{2} \right) \quad (3.25)$$

Tõmbepinged seina keskel[29]:

$$\sigma_{2,t} = \frac{M}{(EI)_{ef}} E_2 a_2 \quad (3.26)$$

Paindepinged seina alumises pinnas [29]:

$$\sigma_{2,m} = \frac{M}{(EI)_{ef}} E_2 \left(a_2 + \frac{h_2}{2} \right) \quad (3.27)$$

Nihkepinged seina ja plaadi vahel [29]:

$$\tau_1 = \frac{VE_1A_1a_1}{(EI)_{ef}b_1} \quad (3.28)$$

$$\tau_2 = \frac{VE_1A_1a_1}{(EI)_{ef}b_2} \quad (3.29)$$

Maksimaalsed nihkepinged [29]:

$$\tau_{\max} = \frac{0,5VE_2b_2h^2}{(EI)_{ef}b_2} \quad (3.30)$$

Kus h on ristlõike nulljoone kaugus alumisest plaadist.

Vastavalt ülaltoodud valemitele on leitud normaalpinged. Survepinged plaadi keskel (3.24):

$$\sigma_{1,c} = \frac{15,4 \cdot 10^6}{4,14 \cdot 10^{12}} \cdot 10500 \cdot 63,8 = 2,5 \text{ N/mm}^2$$

Paindepinged pladi ülemises pinnas (3.25):

$$\sigma_{1,m} = \frac{15,4 \cdot 10^6}{4,14 \cdot 10^{12}} \cdot 10500 \cdot \left(63,8 + \frac{75}{2}\right) = 3,9 \text{ N/mm}^2$$

Tõmbepinged seina keskel (3.26):

$$\sigma_{2,t} = \frac{15,4 \cdot 10^6}{4,14 \cdot 10^{12}} \cdot 13800 \cdot 86,2 = 4,4 \text{ N/mm}^2$$

Paindepinged seina alumises pinnas (3.27):

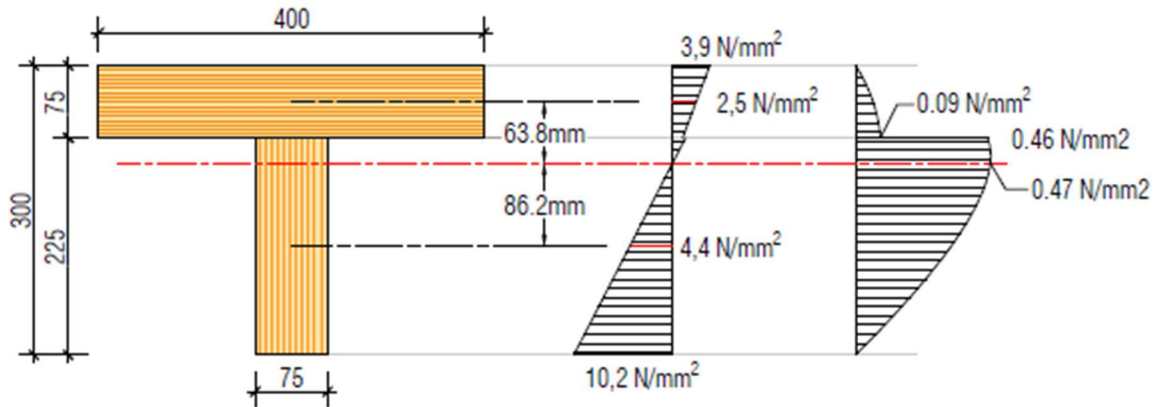
$$\sigma_{2,m} = \frac{15,4 \cdot 10^6}{4,14 \cdot 10^{12}} \cdot 13800 \cdot \left(86,2 + \frac{225}{2}\right) = 10,2 \text{ N/mm}^2$$

Ja vastavalt valemitele (3.28), (3.29) ja (3.30) nihkepinged on:

$$\tau_1 = \frac{7,07 \cdot 10^3 \cdot 10500 \cdot 30000 \cdot 63,8}{4,14 \cdot 10^{12} \cdot 400} = 0,09 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_2 = \frac{7,07 \cdot 10^3 \cdot 10500 \cdot 30000 \cdot 63,8}{4,14 \cdot 10^{12} \cdot 75} = 0,46 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_{\max} = \frac{0,5 \cdot 7,07 \cdot 10^3 \cdot 13800 \cdot 75 \cdot 199^2}{4,14 \cdot 10^{12} \cdot 75} = 0,47 \text{ N/mm}^2$$



Joonis 3.11 Tala ristlõige ja selle normaal- ja nihkepingeepüürid

Liimliite puhul arvestatakse, et vöö ja ribi ühendus on jäik, mille tõttu võib eeldada pingete lineaarset jaotust kogu tala ulatuses. Antud juhul on plaadi ja ribi elastsusmoodulid erinevad, ning pingete jaotus ei ole ideaalselt lineaarne (joonis 3.11).

Tugevusekontroll

$$f_{c,0,d} = \frac{k_{mod}}{\gamma_m} \cdot f_{c,0,k} = \frac{0.8}{1.2} \cdot 26 = 17.3 > \sigma_{1,c} = 2.5 \text{ N/mm}^2 \text{ – tingimus on täidetud}$$

$$f_{m,0,flat,d} = \frac{k_{mod}}{\gamma_m} \cdot f_{m,0,flat,k} = \frac{0.8}{1.2} \cdot 36 = 24 > \sigma_{1,m} = 3.9 \text{ N/mm}^2 \text{ – tingimus on täidetud}$$

$$f_{t,0,d} = \frac{k_{mod}}{\gamma_m} \cdot f_{t,0,k} = \frac{0.8}{1.2} \cdot 35 = 23.3 > \sigma_{2,t} = 4.4 \text{ N/mm}^2 \text{ – tingimus on täidetud}$$

$$f_{m,0,edge,d} = \frac{k_{mod}}{\gamma_m} \cdot f_{m,0,edge,k} = \frac{0.8}{1.2} \cdot 44 = 29.3 > \sigma_{2,m} = 10.2 \text{ N/mm}^2 \text{ – tingimus on täidetud}$$

$$f_{v,0,flat,d} = \frac{k_{mod}}{\gamma_m} \cdot f_{v,0,edge,k} = \frac{0.8}{1.2} \cdot 1.3 = 0.87 > \tau_1 = 0.09 \text{ N/mm}^2 \text{ – tingimus on täidetud}$$

$$f_{v,0,edge,d} = \frac{k_{mod}}{\gamma_m} \cdot f_{v,0,edge,k} = \frac{0.8}{1.2} \cdot 4.2 = 2.8 > \tau_{max} = 0.47 \text{ N/mm}^2 \text{ – tingimus on täidetud}$$

3.3.5 Arvutus kasutuspiirseisundis

Kasutuspiirseisundis kontrollin tala läbipained ja vibratsioonid.

Läbipaine vastavalt valemile (2.2) on:

$$w_{inst} = \frac{5}{384} \frac{1.15 \cdot 8700^4}{4.14 \cdot 10^{12}} = 20.8 \text{ mm}$$

Rahvusliku lisa soovitatavad piirläbipained on $l/400$, sellega:

$$w_{\text{inst}} = 20.8\text{mm} < \frac{8700}{400} = 21.75\text{mm} - \text{tingimus on täidetud}$$

Vibratsioonid on leitud vastavalt jaotisessele 2.2 toodud valemitele.

Konstruksiooni paidejäikus I suunas on $(EI)_{\text{ef}} = 4,14 \cdot 10^{12} \text{ N/mm}^2 \rightarrow 4,14 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ sellest leian paindejäikuse laiusühiku kohta:

$$(EI)_1 = \frac{(EI)_{\text{ef}}}{s} = \frac{4,14 \cdot 10^6}{0,4} = 1,04 \cdot 10^7 \text{ Nm}^2/\text{m}$$

Ühes suunas kandvate talade põhisagedus on vastavalt valemile (2.4):

$$f_0 = f_1 = \frac{\pi}{2 \cdot 8,7^2} \sqrt{\frac{1,04 \cdot 10^7}{89}} = 7,10 \text{ Hz}$$

Mass ühiku kohta, antud juhul on:

$$m = g_k + g_{2k} = 59 \text{ kg/m}^2 + 30 \text{ kg/m}^2 = 89 \text{ kg/m}^2$$

Plaadi paindejäikus põranda talastikusuunalise telje suhtes laiusühiku kohta:

$$(EI)_b = E \cdot I = 10500 \cdot \frac{1000 \cdot 75^3}{12} = 3,69 \cdot 10^{11} \text{ Nmm}^2 \rightarrow 3,69 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$$

Põranda erinevad omavõnkesagedused leian valemiga (2.3):

$$f_n = 6,95 \sqrt{1 + 1^4 \left(\frac{8,7}{2,7}\right)^4 \cdot \frac{3,69 \cdot 10^5}{1,04 \cdot 10^7}} = 15,61 \text{ Hz} > 8 \text{ Hz}$$

Kuna põranda põhisagedus on suurem kui 8 Hz kontrollin, et oleksid täidetud tingimused (2.5) ja (2.6). Soovitavad piirväärtused on võetud vastavalt joonisele 2.1 ning $a = 1,5 \text{ mm/kN}$ ja $b = 100$.

Hetkeline läbipaine kui $F=1\text{kN}$ on leitud valemiga (2.9):

$$w = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{F l^2}{42 k_{\delta} (EI)_1} = \frac{1 \cdot 10^3 \cdot 8,7^2}{42 \cdot \sqrt[4]{\frac{3,69 \cdot 10^5}{1,04 \cdot 10^7}} \cdot 1,04 \cdot 10^7} = 4,0 \cdot 10^{-4} \text{ m} = 0,40 \text{ mm} \\ \frac{F l^3}{48 s (EI)_1} = \frac{1 \cdot 10^3 \cdot 8,7^3}{48 \cdot 0,4 \cdot 1,04 \cdot 10^7} = 3,312 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 3,21 \text{ mm} \end{array} \right. \rightarrow$$

$$\rightarrow w = 0,40 \text{ mm} \leq a = 1,5 - \text{tingimus on täidetud}$$

Võnkeperioodide arvu n_{40} leian valemiga (2.8)

$$n_{40} = \left\{ \left(\left(\frac{40}{15,61} \right)^2 - 1 \right) \left(\frac{2,7}{8,7} \right)^4 \frac{1,04 \cdot 10^7}{3,69 \cdot 10^5} \right\}^{0,25} = 1,14$$

Vastavalt valemile (2.7) leian ühikimpulsi kiirusvaste v :

$$v = \frac{4 \cdot (0,4 + 0,6 \cdot 1,14)}{89 \cdot 2,7 \cdot 8,7 + 200} = 0,002 \text{ m/Ns}^2$$

Vastavalt valemile (2.6):

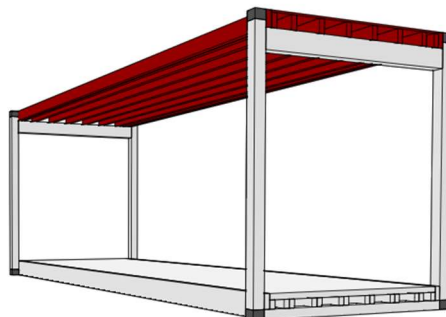
$$b^{(f_1 \zeta - 1)} = 100^{(15,26 \cdot 0,01 - 1)} = 0,02 \text{ m/Ns}^2$$

Põrandatele tuleks eeldada sumbuvusteguriks $\zeta = 0,01$ (s.o 1 %), kui ei ole muid sobivamaid väärtusi [24].

$$v = 0,002 \text{ m/Ns}^2 \leq b^{(f_1 \zeta - 1)} = 0,02 \text{ m/Ns}^2 \text{ – tingimus on täidetud}$$

3.4 Laelemendi arvutus

Antud peatükkis on tehtud arvutused mooduli laelemendile (joonis 3.12). Nagu varem oli mainitud siis põranda ja lae konstruktsioonid on teineteisest sõltumatud ning nendele tuleb rakendada erinevad koormused. Laelemendile rakendub ainult omakaal. Laeelement koosneb samuti taladeslt ja plaadist. Laelemendi arvutustes on valitud kõige väiksema ristlõikega standardtooded. Sellest tulenevalt vööks on valitud LVL 36 C plaat kõrgusega $h_1 = 24$ mm, ribiks on LVL 48 P kõrgusega $h_2 = 200$ mm ja laiusega $b_2 = 75$ mm (joonis 3.12). Talastikku samm on $s = 400$ mm.



Joonis 3.12 Illustreeriv joonis mooduli laelemendist. Autori joonis

3.4.1 Koormused

Tala omakaal:

$$\text{Plaat} \quad 5 \text{ kN/m}^3 \cdot 0,024 \text{ m} = 0,12 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Sein} \quad 5 \text{ kN/m}^3 \cdot (0,2 \text{ m} \cdot 0,075 \text{ m}) \cdot \frac{1}{0,4 \text{ m}} = 0,18 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Kokku} \quad g_k = 0,3 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Punktkoormus } Q_k = 1 \text{ kN/m}^2$$

Arvutuslik pinnakoormus

$$p_{d,1} = 1,2 \cdot 0,3 = 0,36 \text{ kN/m}^2$$

Arvutuslik joonkormus kandepiiriseisundis:

$$p_{d,1} = 0,36 \cdot 0,4 = 0,14 \text{ kN/m}$$

Arvutuslik joonkormus kasutuspiiriseisundis:

$$p_{d,2} = 0,3 \cdot 0,4 = 0,12 \text{ kN/m}$$

Maksimaalsed arvutuslikud sisejõud antud olukorras on:

$$M_d = \frac{p_d \cdot l^2}{8} = \frac{0,14 \cdot 8,7^2}{8} = 1,4 \text{ kNm}$$

$$V_d = \frac{p_d \cdot l}{2} = \frac{0,14 \cdot 8,7}{2} = 0,64 \text{ kN}$$

3.4.2 Plaadi arvutus punktkoormusele

Koondatud koormust loetakse lühiajaliseks ehitusaegseks koormuseks. Antud osas on kontrollitud LVL plaat punktkoormusel lihttala skeemi alusel.

LVL arvutuslik paindetugevus:

$$f_{m,f,0,d} = \frac{k_{\text{mod}} \cdot f_{m,0,k}}{\gamma_m} = \frac{0,9 \cdot 36}{1,2} = 27 \text{ N/mm}^2$$

Arvutuslik punktkoormus:

$$Q_d = 1,5 \cdot Q_k = 1,5 \cdot 1 = 1,5 \text{ kN}$$

Arvutuslik moment ava keskel:

$$M_d = \frac{Q_d \cdot l}{4} = \frac{1,5 \cdot 0,4}{4} = 0,15 \text{ kNm}$$

Paindepingete kontroll 0,5m laiusele ribale:

$$\sigma_{m,f,0,d} = \frac{M_d}{W_d} = \frac{6 \cdot 0,15 \cdot 10^6}{500 \cdot 24^2} = 3,1 < f_{m,f,0,d} = 27 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} - \text{tingimus on täidetud}$$

3.4.3 Plaadi efektiivne laius

Vastavalt jaotises 3.2.2 toodud valemitele on leitud plaadi efektiivne laius.

LVL on vaadeldav vineerina, sellega antud juhul on mõlkumistingimusest tulenev laius

$$b_{c,ef} = 25 \cdot h_f = 25 \cdot 24 = 600 \text{ mm}$$

ning vastavalt valemile (3.2) võrdub efektiivne laius:

$$b_{ef} = 600 + 75 = 675\text{mm}$$

Kuna kogu vöö laius b_f võrdub 400mm ja efektiivne laius ei saa olla suurem antud väärtusest siis lõplikuks vöö efektiivlaiuseks valin $b_{ef}=400\text{mm}$.

3.4.4 Efektiivse paindejäikuse leidmine

Plaadi efektiivse paindejäikuse leian vastavalt jaotises 3.3.3 toodud valemitele.

Laelemendi andmed:

$$h_1 = 24 \text{ mm}$$

$$h_2 = 200 \text{ mm}$$

$$b_1 = b_{ef} = 400 \text{ mm}$$

$$b_2 = 75 \text{ mm}$$

$$A_1 = h_1 \times b_1 = 9600 \text{ mm}^2$$

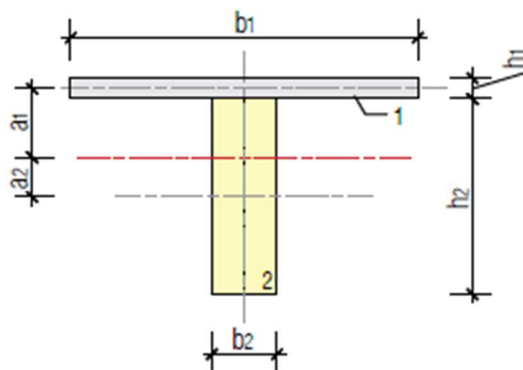
$$A_2 = h_2 \times b_2 = 15000 \text{ mm}^2$$

$$E_1 = 10500 \text{ N/mm}^2$$

$$E_2 = 13800 \text{ N/mm}^2$$

$$I_1 = b \times h^3 / 12 = 400 \times 24^3 / 12 = 0,46 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$I_2 = b \times h^3 / 12 = 75 \times 200^3 / 12 = 50 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$



Joonis 3.13 Laelemendi ristlõike

Vastavalt valemitele (3.21), (3.22) ja (3.23):

$$a_1 = \frac{13800 \cdot 15000 \cdot (24 + 200)}{2 \cdot (10500 \cdot 9600 + 13800 \cdot 15000)} = 75.3\text{mm}$$

$$a_2 = \frac{24 + 200}{2} - 75.3 = 36.7\text{mm}$$

$$(EI)_{ef} = (10500 \cdot 0.46 \cdot 10^6 + 10500 \cdot 9600 \cdot 75.3^2) + (13800 \cdot 50 \cdot 10^6 + 13800 \cdot 15000 \cdot 36.7^2) \\ = 1.55 \cdot 10^{12} \text{ Nmm}^2$$

3.4.5 Pinged

Vastavalt 3.3.4 jaotises toodud valemitele on leitud normaalpinged.

Survepinged plaadi keskel valem (3.24):

$$\sigma_{1,c} = \frac{1.4 \cdot 10^6}{1.55 \cdot 10^{12}} \cdot 10500 \cdot 75.3 = 0.71 \text{ N/mm}^2$$

Paindepinged pladi ülemises pinnas valem (3.25):

$$\sigma_{1,m} = \frac{1.4 \cdot 10^6}{1.55 \cdot 10^{12}} \cdot 10500 \cdot \left(75.3 + \frac{24}{2}\right) = 0.83 \text{ N/mm}^2$$

Tõmbepinged seina keskel valem (3.26):

$$\sigma_{2,t} = \frac{1.4 \cdot 10^6}{1.55 \cdot 10^{12}} \cdot 13800 \cdot 36.7 = 0.46 \text{ N/mm}^2$$

Paindepinged seina alumises pinnas valem (3.27):

$$\sigma_{2,m} = \frac{1.4 \cdot 10^6}{1.55 \cdot 10^{12}} \cdot 13800 \cdot \left(36.7 + \frac{200}{2}\right) = 1.7 \text{ N/mm}^2$$

Ja vastavalt valemitele (3.28), (3.29) ja (3.30) nihkepinged on:

$$\tau_1 = \frac{0.64 \cdot 10^3 \cdot 10500 \cdot 9600 \cdot 73.5}{1.55 \cdot 10^{12} \cdot 400} = 0.01 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_2 = \frac{0.64 \cdot 10^3 \cdot 10500 \cdot 9600 \cdot 73.5}{1.55 \cdot 10^{12} \cdot 75} = 0.04 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_{\max} = \frac{0.5 \cdot 0.64 \cdot 10^3 \cdot 13800 \cdot 75 \cdot 137^2}{1.55 \cdot 10^{12} \cdot 75} = 0.05 \text{ N/mm}^2$$

Tugevusekontroll

$$f_{c,0,d} = \frac{k_{\text{mod}}}{\gamma_m} \cdot f_{c,0,k} = \frac{0.8}{1.2} \cdot 26 = 17,3 > \sigma_{1,c} = 0.71 \text{ N/mm}^2 \text{ – tingimus on täidetud}$$

$$f_{m,0,\text{flat},d} = \frac{k_{\text{mod}}}{\gamma_m} \cdot f_{m,0,\text{flat},k} = \frac{0.8}{1.2} \cdot 36 = 24 > \sigma_{1,m} = 0.83 \text{ N/mm}^2 \text{ – tingimus on täidetud}$$

$$f_{t,0,d} = \frac{k_{\text{mod}}}{\gamma_m} \cdot f_{t,0,k} = \frac{0.8}{1.2} \cdot 35 = 23,3 > \sigma_{2,t} = 0.46 \text{ N/mm}^2 \text{ – tingimus on täidetud}$$

$$f_{m,0,\text{edge},d} = \frac{k_{\text{mod}}}{\gamma_m} \cdot f_{m,0,\text{edge},k} = \frac{0.8}{1.2} \cdot 44 = 29,3 > \sigma_{2,m} = 1.7 \text{ N/mm}^2 \text{ – tingimus on täidetud}$$

$$f_{v,0,\text{flat},d} = \frac{k_{\text{mod}}}{\gamma_m} \cdot f_{v,0,\text{edge},k} = \frac{0.8}{1.2} \cdot 1,3 = 0,87 > \tau_1 = 0.01 \text{ N/mm}^2 \text{ – tingimus on täidetud}$$

$$f_{v,0,\text{edge},d} = \frac{k_{\text{mod}}}{\gamma_m} \cdot f_{v,0,\text{edge},k} = \frac{0.8}{1.2} \cdot 4.2 = 2,8 > \tau_{\max} = 0.05 \text{ N/mm}^2 \text{ – tingimus on täidetud}$$

3.4.6 Arvutus kasutuspiiriseisundis

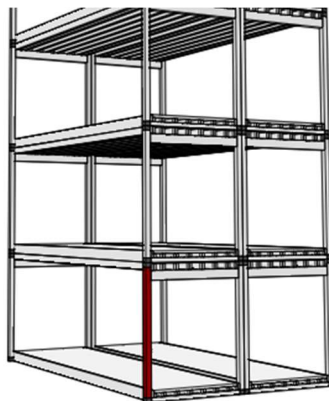
Vastavalt 3.3.2 jaotises toodud valemile (2.2) läbipaine on:

$$w_{\text{inst}} = \frac{5}{384} \frac{0.12 \cdot 8700^4}{1.55 \cdot 10^{12}} = 5.94 \text{ mm} < \frac{8700}{400} = 21.75 \text{ mm} - \text{tingimus on täidetud}$$

Soovitavad piirläbipained rahvusliku lisa järgi on $l/400$.

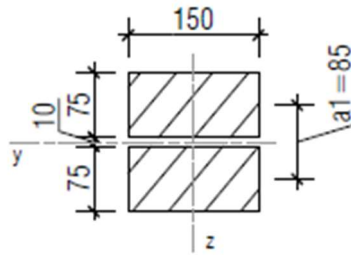
3.5 Posti arvutus

Antud peatükis on tehtud mooduli M9 posti arvutused. Mooduli postid võtavad vastu vertikaalkoormused, mis tulevad ülemistest moodulitest. Posti arvutus on tehtud seitsmekorruselise hoone jaoks tingimusel, et moodulid on teineteisega kohakuti (joonis 3.14). Kui moodulid on eri korrustel paigutatud teineteisega risti siis tuleb ette näha lisa postid. Lisa postid ei ole antud lõputöö mahus. Horisontaalkoormused võtavad vastu jäikusseinad.



Joonis 3.14 Kohakuti paigaldatud moodulid erikorrusel

Mooduli nominaalkõrgus on 3450 mm ning posti kõrgus $H = 3150$ mm. Keskkonnatingimused vastavad kasutusklassile 1. Postideks on valitud liitpostid, mis koosnevad kahest ühesugusest vardast 75×150 mm ning varaste vahekaugus $a = 10$ mm (joonis 3.15). Vardad on projekteeritud spoonliimpuidust LVL 35 P ning vaheklotsid on vineerist. Vardad ja klotsid on omavahel ühendatud SFS WT-T-8,2 \times 190 kruvidega. Liitpostide $l_1 = 600$ mm, $l_2 = 3150$ mm ja $a_1 = 85$ mm. Põrandaelemendi omakaal on $g_{k1} = 0,80$ kN/m², laeelemendi omakaal on $g_{k2} = 0,31$ kN/m².



Joonis 3.15 Liitposti ristlõige

Osavarutegur $\gamma_Q = 1,5$

Osavarutegur $\gamma_G = 1,2$

Materjali osavaruteguri $\gamma_M = 1,2$.

Modifikatsioonitegur $k_{mod} = 0,8$ (keskmine kestus)

LVL48P materjali omadused:

Elastsusmoodul $E = 12000 \text{ N/mm}^2$

Elastsusmoodul $E_{0,05} = 10000 \text{ N/mm}^2$

Normatiivne paindetugevus $f_{m,0,edge,k} = 30 \text{ N/mm}^2$

Normatiivne tõmbetugevus $f_{c,0,k} = 30 \text{ N/mm}^2$

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

3.5.1 Koormused

Alaliskoormus:

$$\text{Laelemet} \quad 6 \cdot 0,31 \cdot \left(\frac{2,7 \cdot 8,7}{4}\right) = 10,9 \text{ kN}$$

$$\text{Põrandaelement} \quad 6 \cdot 0,8 \cdot \left(\frac{2,7 \cdot 8,7}{4}\right) = 28,2 \text{ kN}$$

$$\text{Posti omakaal} \quad 6 \cdot (5 \cdot 0,15 \cdot 0,15) \cdot 3,150 = 2,1 \text{ kN}$$

Normatiivne alaliskoormus kokku: $g_k = 41,2 \text{ kN}$

$$\text{Kasuskoormus (ühelt vahelaelt)} \quad 2 \cdot \left(\frac{2,7 \cdot 8,7}{4}\right) = 11,7 \text{ kN}$$

Ruumid kuuluvad klassidesse A – D (EVS-EN 1991-1-1:2002) [26] ja sellega võib korruste arvust tulenevalt kogukasuskoormust postidele ja seintele korrutada vähendusteguriga a_n .

$$a_n = \frac{2 + (n - 2) \cdot \psi_0}{n} \quad (2.31)$$

kus n – vaadeldavast konstruktsioonielemendist kõrgemal olevate ja samasse klassi kuuluvate korruste arv (> 2)
 ψ_0 – tegur vastavuses EN 1990 lisa A.1 tabeliga A.1.1

Vastavalt valemile (2.32) leian vähendusteguri:

$$a_n = \frac{2 + (6 - 2) \cdot 0,7}{6} = 0,8$$

Kogu normatiivne kasuskoormus postile:

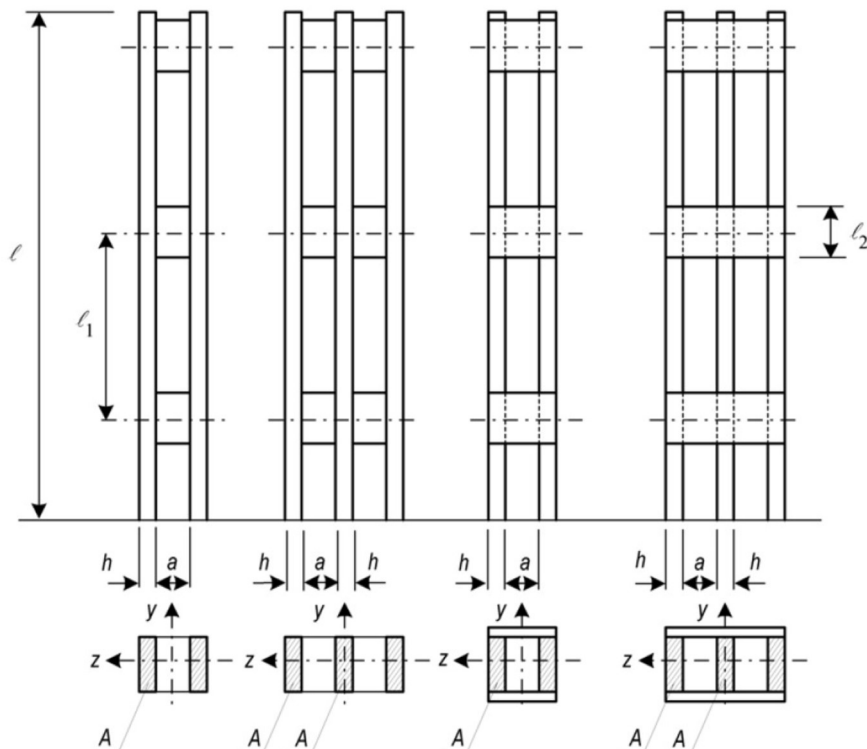
$$Q_k = 6 \cdot 0,8 \cdot 11,7 = 56,4 \text{ kN}$$

Vastavalt valemile (2.11) posti arvutuslik koormus on:

$$P_d = 1,2 \cdot 41,2 + 1,5 \cdot 56,4 = 134,0 \text{ kN}$$

3.5.2 Stabiilsuse kontroll

Posti y -telje suunalisele nõtkele (joonis 3.16) vastav kandevõime tuleks võtta võrdseks kõikide üksikute postivarraste summaarse kandevõimega [24].



Joonis 3.16 Liitpostid. Allikas [24].

Kandevõime y-telje suunalisele nõtkele (z-telje suhtes). Saleda, keskelt surutud varda tasakaaluasend muutub koormuse teataval väärtusel ebastabiilseks, teisiti öeldes varras nõtkub tasapinnast välja [34][35]. Elementide stabiilsusarvutus survel tehakse normide kohaselt suhteliste saleduste kaudu.

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad (2.32)$$

kus $E_{0,05}$ – elastsusmooduli 5% väärtus
 $f_{c,0,k}$ – normatiivne survetugevus pikikiudu
 λ_z – paindele y-telje suhtes vastav saledus

Varda saledus leitakse valemiga [34]:

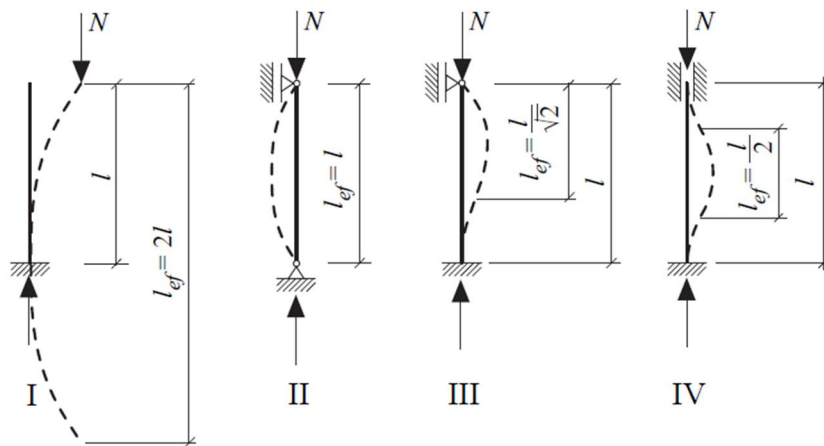
$$\lambda = \frac{l_{ef}}{i} \quad (2.33)$$

kus l_{ef} – arvutus pikkus, mis on leitud varda kinnitusest (joonis 3.17)
 i – ristlõike inertsiraadius

Ja ristlõike inertsiraadius on [34]:

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (2.34)$$

kus I – ristlõike inertsimoment
 A – ristlõike pindala



Joonis 3.17 Varda arvutus pikkus sõltuvalt kinnitusest. Allikas [35]

Kui suhteline saledus on $\lambda_{rel} > 0,3$, siis keskelt surutud elementides peavad survepinged püsivuskontrollil rahuldama tingimusi [34]

$$\sigma_{c,0,d} \leq k_{c,y} \cdot f_{c,0,d} \quad (2.35)$$

Kus vastav tegur $k_{c,z}$ arvestab elemendi saledust ja sirgust ning on avaldatav standardi järgi seosega:

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} \quad (2.36)$$

ja ebastabiilsustegur k_y standardi alusel on:

$$k_y = 0.5 \cdot (1 + \beta_c(\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) \quad (2.37)$$

kus β_c – tegur, mis arvestab surutud elemendi sirgust

Posti z-telje suunalist püsivust (y-telje suhtes) kontrollitakse arvestades, et efektiivne saledus on [24]:

$$\lambda_{ef} = \sqrt{\lambda^2 + \eta \frac{n}{2} \lambda_1^2} \quad (2.38)$$

kus n – postide arv

η – tegur vastavalt tabelile C.1 EVS–EN 1995

posti saledus

$$\lambda_y = l \sqrt{\frac{A_{tot}}{I_{tot}}} \quad (2.39)$$

Postivarraste saledus

$$\lambda_1 = \sqrt{12} \frac{l_1}{h} \quad (2.40)$$

Kahe vardaga postide A_{tot} ja I_{tot} arvutatakse valemitega [24]:

$$A_{tot} = 2A \quad (2.41)$$

$$I_{tot} = \frac{b[(2h + a)^3 - a^3]}{12} \quad (2.42)$$

Postide kuljedes on ISO teras-nurgad ning moodulid ühendatakse omavahel vertikaalselt ISO-nurkadele mõeldud „twistlock“ detailitega [14]. Sellega valin (II) arvutuskeemi vastavalt joonisele 3.14 ning arvutus pikkus on $l_{ef}=l$.

Alguses leian kande võime z-telje suhtes. Ritlõike inertsiraadius (2.34):

$$i_z = 2 \sqrt{\frac{75 \cdot 150^3}{75 \cdot 150}} = 86,6 \text{ mm}$$

Varda saledus vastavalt valemile (2.34)

$$\lambda_z = \frac{3150}{86,6} = 36,4$$

Suhteline saledus (2.32)

$$\lambda_{rel,z} = \frac{36,4}{\pi} \sqrt{\frac{30}{10000}} = 0,63$$

Ebastabiilsustegur on vastavalt valemie (2.37)

$$k_z = 0,5 \cdot (1 + 0,1(0,63 - 0,3) + 0,63^2) = 0,72 \quad - \text{ kus } \beta_c - \text{ spoonliimpuidu korral on } 0,1$$

Ebastabiilsust arvestav nõtketegur vastavõt valemile (2.36)

$$k_{c,z} = \frac{1}{0,72 + \sqrt{0,72^2 - 0,63^2}} = 0,95$$

Varda stabiilsuskontroll:

$$f_{c,0,d} = \frac{30}{1,2} \cdot 0,8 = 20 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N}{A} = \frac{134,0 \cdot 10^3}{2 \cdot 75 \cdot 150} = 5,96 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < k_{c,y} \cdot f_{c,0,d} = 0,95 \cdot 20 = 19,0 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} - \text{ tingimus on täidetud}$$

Leian kandevõime y-telje suhtes. Vastvalt valemile (2.41) ja (2.42):

$$A_{tot} = 2 \cdot 150 \cdot 75 = 22500 \text{ mm}^2$$

$$I_{tot} = \frac{150[(75 + 10)^3 - 10^3]}{12} = 51,2 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

Posti saledus on vastavalt valemile (2.39)

$$\lambda_y = 3150 \cdot \sqrt{\frac{22500}{51,2 \cdot 10^6}} = 66$$

Posti varda saledus vaheklotside vahelises osas vastavalt valemile (2.40)

$$\lambda_1 = \sqrt{12} \cdot \frac{700}{75} = 27,7 < 30, \text{ sellega valin } 30$$

Efektiivne saledus vastavalt (2.38):

$$\lambda_{ef} = \sqrt{66^2 + 3,5 \cdot \frac{2}{2} \cdot 30^2} = 86,7, \text{ kus } \eta = 3,5 \text{ vastavalt EVS-EN 1995 Tabel C.1}$$

Suhteline saledus (2.32)

$$\lambda_{rel,y} = \frac{86,7}{\pi} \sqrt{\frac{30}{10000}} = 1,51$$

Ebastabiilsustegur on vastavalt valemie (2.37)

$k_y = 0.5 \cdot (1 + 0.1(1.51 - 0.3) + 1.51^2) = 1.70$ - kus β_c - spoonliimpuidu korral on 0,1

Ebastabiilsust arvestav nõtketegur vastavalt valemile (2.36)

$$k_{c,y} = \frac{1}{1.70 + \sqrt{1.70^2 - 1.51^2}} = 0.40$$

Varda stabiilsuskontroll:

$$f_{c,0,d} = \frac{30}{1.2} \cdot 0.8 = 20 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N}{A} = \frac{134.0 \cdot 10^3}{2 \cdot 75 \cdot 150} = 5.96 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < k_{c,y} \cdot f_{c,0,d} = 0.4 \cdot 20 = 8.0 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} - \text{tingimus on täidetud}$$

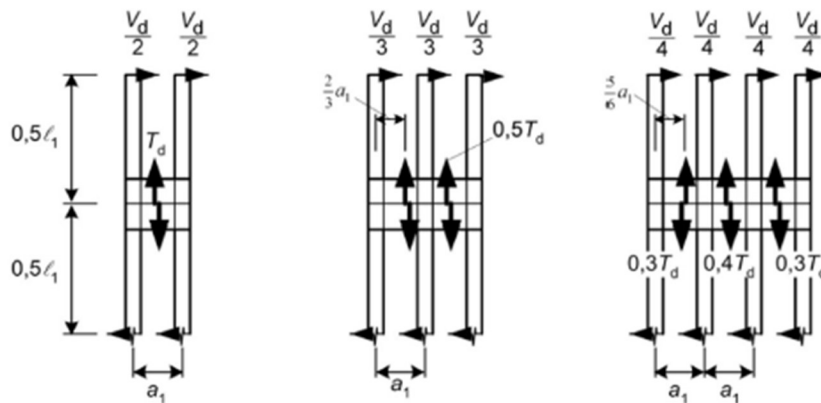
3.5.3 Liite kandevõime

Kui $\lambda_{ef} \geq 60$ nihkejõud V_d on leitav [24]:

$$V_d = \frac{F_{c,d}}{60 \cdot k_c} \quad (2.43)$$

Klotside nihkejõud (joonis 3.18) tuleb arvutada valemiga [24]:

$$T_d = \frac{V_d l_1}{a_1} \quad (2.44)$$



Joonis 3.18 Nihkejõudude jaotus ja koormus lappidele või klotsidel. Allikas [24]

Nihkejõud vastavalt valemile (2.43):

$$V_d = \frac{134}{60 \cdot 0.40} = 5.55 \text{ kN}$$

Klotside nihkejõud vastavalt valemile (2.44):

$$T_d = \frac{5.55 \cdot 600}{85} = 39.2 \text{ kN}$$

Kruviliitele mõjuv koormus:

$$F_t = \frac{T_d}{\sin\alpha} = \frac{39,2}{\sin 45^\circ} = 46,1 \text{ kN}$$

Kruvidele mõjuv koormus:

$$F_1 = \frac{46,1}{12} = 3,8 \text{ kN}$$

Arvutuslik tõmbetugevus vastavalt valemile (2.1):

$$F_{\text{tens,d}} = \frac{28,6 \cdot 0,8}{1,3} = 8,9 \text{ kN} > F_1 = 3,8 \text{ kN} - \text{tingimus on täidetud}$$

Väljatõmbe normkandevõime vastavalt valemile (3.20) on:

$$F_{\text{ax},\alpha,\text{Rk}} = 12^{0,9} \cdot 13,35 \cdot 8,2 \cdot 80 \cdot 1^{0,8} = 81968 \text{ N} \rightarrow 82 \text{ kN}$$

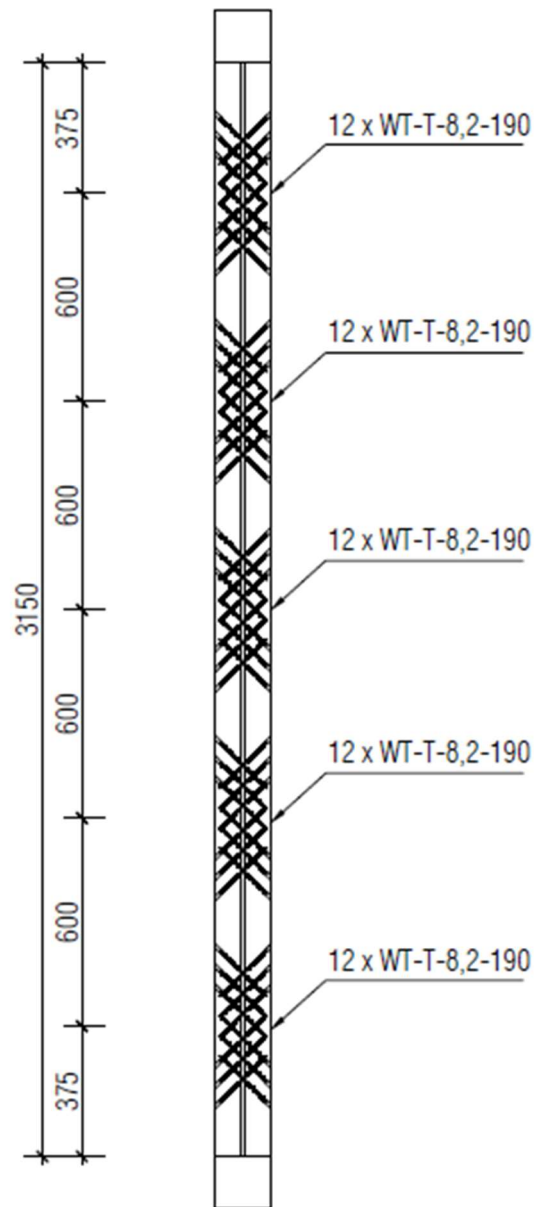
Kruvide grupist koosnevas liites, mis on koormatud kruvi varrega paralleelse jõukomponendiga, on efektiivne kruvide arv järgmine $n_{\text{ef}} = n^{0,9}$ [24].

Arvutuslik väljatõmbekandevõime vastavalt valemile (2.1):

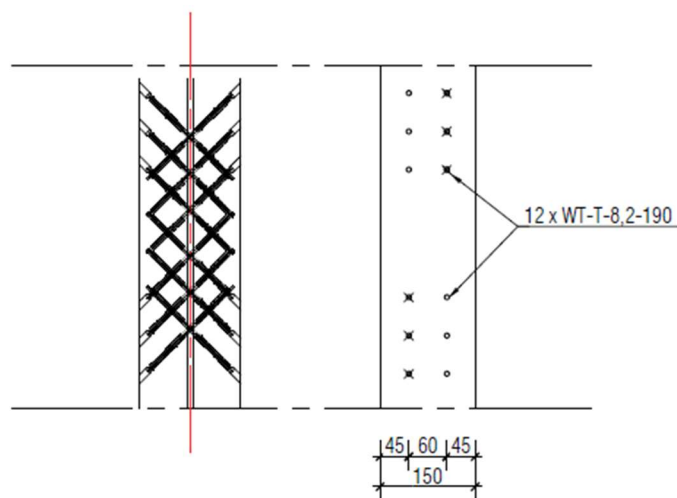
$$F_{\text{ax},\alpha,\text{Rd}} = \frac{82 \cdot 0,8}{1,3} = 50,4 \text{ kN} > F_t = 46,1 \text{ kN} - \text{tingimus on tagatud}$$

Kruvide minimaalsed vahekaugused:

Minimaalne kruvide vahekaugus pikikiudu	$a_1 = 7d = 57,4 \text{ mm}$
Minimaalne kruvide vahekaugus ristikiudu	$a_2 = 5d = 41 \text{ mm}$
Minimaalne kruvi keermestatud osaraskuskeskme kaugus elemendi otasas:	$a_{1,\text{CG}} = 10d = 82 \text{ mm}$
Minimaalne kruvi keermestatud osa raskuskeskme kaugus elemendi servast:	$a_{2,\text{CG}} = 4d = 32,8 \text{ mm}$



Joonis 3.19 Mooduli M9 liitepost.



Joonis 3.20 Posti kruviliide

KOKKUVÕTE

Käesoleva lõputöö raames olid projekteeritud spoonliimpuidust ruummoduli elementide konstruktsioonid Mustermaja modulaarsele mass-kohandatavale süsteemile, mis on mõeldud kuni seitsmekorruselistele hoonetele. Antud tootearendusprojekti koordineerib EKA arhitektuuriteaduskond ja puitmajatootja Harmet OÜ ning arendustegevusest võtavad osa paljud oma eriala spetsialistid.

Töö käigus on tehtud vajalikud arvutused ja projekteerimise tulemusena on saadud kõige suurema kortermaja ruummoduli M9 (nominaalsuurustega 3x9 m ja kõrgusega 3.45 m) elementide dimensioonid. M9 ruummoduli elementide hulka, mis on arvatud käesolevas töös, kuuluvad: laeelemendid, põrandaelemendid ning mooduli postid. Konstruktsioonides on kasutatud spoonliimpuitu, mis on üks tugevaim puidupõhine materjal. Spoonliimpuidu tootmine on ka palju väiksema ökoloogilise jalajäljega kui paljud teised laialtlevinud ehitusmaterjalid.

Mooduli spoonliimpuidust põrandaelement on projekteeritud komposiitkonstruktsioonina, mis koosneb taladest ning nendele toetuvast plaadist. Talade ja plaadi omavaheline kinnitus on arvatud nii mehaaniliste liidetega kui ka liimliitega. Mehaaniliste liidete järeleandvusest tingituna on selline kinnitus väiksema jäikusega võrreldes liimliitega ja ka tugevuse poolest nõrgem. Sellest tulenevalt on mehaaniliste liidetega põrandaelement suurema ristlõikega. Plaadiks on projekteeritud LVL 36 C kõrgusega 75 mm ning ribi koosneb kahest LVL 48 P talast, kõrgusega 225 mm ja laiusega 2x45 mm. Talastiku samm on $s = 400$ mm. Tala ja plaadi ühendamiseks on projekteeritud isekeermetavast kruvid SFS WT-T-8,2 x 160 sammuga 200 mm toe piirkonnas ($\frac{1}{4}$ talast) ja 300 mm tala keskel.

Liimliite puhul arvestatakse, et vöö ja ribi ühendus on jäik. Sellest tulenevalt on liimliitega konstruktsioon suurema tugevusega ning on võimalik kasutada väiksema ristlõikega elemente võrreldes mehaaniliste liidetega. Liimliitega konstruktsiooni nõrk koht on selle keerukam valmistamine. See nõuab erinevate tingimuste täpset täitmist: õiget õhutemperatuuri, piisavast pindade nakke tagamist, sobivat spoonliimpuidu niiskusesisaldust ja muid eritingimusi. Käesolevas töös on liimliitega põrandaelement projekteeritud LVL 36 C plaadist kõrgusega 75 mm ning LVL 48 P talast, kõrgusega 225 mm ja laiusega 75 mm. Talastiku samm on sama, mis mehaaniliste liidetega komposiitkonstruktsioonil, $s = 400$ mm.

Laelemendi konstruktsioon on samuti projekteeritud taladest ja nendele toetuvast plaadist. Antud moodulite puhul laeelemendile rakendub ainult omakaal ning sellest

lähtuvalt on konstruktsioon teistsugune, võrreldes põrandaelemendiga. Mooduli laeelemendi vööks on projekteeritud LVL 36 C plaat, mille paksus on 24 mm ja ribideks on kasutatud LVL 48 P talasid, kõrgusega 200 mm ja laiusega 75 mm. Talastiku samm on sama mis põrandakonstruktsioonil $s = 400$ mm. Talade ja plaadi omavaheline kinnitus on liimliitega.

Mooduli postideks on projekteeritud liitpostid, mis võtavad vastu seitsmekorruselise hoone vertikaalkoormused olukorras, kus moodulid on teineteisega eri korrustel kohakuti. Posti ristlõike moodustavad kaks ühesugust varrast LVL 35 P 75 x 150 mm. Varraste vahekaugus on 10 mm, selline vahekaugus on tingitud ISO-nurkade suurustest. Tüvevardad on ühendatud vaheklotsiga, milleks on 10 mm vineer. Vardad ja klotsid on omavahel kinnitatud kruvidega SFS WT-T-8,2 x 190.

Käesolevas töös tehtud arvutused näitavad, et teoreetiliselt on võimalik toota üsna suuremõõtmelisi spoonliimpuidust ruummoduleid. Antud töö edasiarendusena on võimalik projekteerida ruummoduli teraskonstruktsioonid ning lahendada tulepüsivust. Kuna sellised ruummodulid ei ole varasemalt kasutatud, on soovitatav läbi viia katsed projekteeritud elementide kandevõime ning vibratsioonide kontrollimiseks.

SUMMARY

In this Master's thesis have been designed Laminated Veneer Lumber constructions for room module of a «Pattern Buildings» modular mass-adjustable apartment building, which is suitable for the buildings up to seven floors. «Pattern Buildings» product development project is coordinated by the faculty of architecture of Estonian Academy of Arts and by the modular houses' manufacturer Harmet OÜ. In this project also take part a lot of specialists and enthusiasts.

The necessary calculations have been made during this work and as a result it was designed the largest room module M9 for the apartment building. Nominal sizes of this room module are 3x9 m and height is 3.45 m. In this thesis were calculated ceiling element, floor element and column. In the constructions is used LVL which is one of the strongest wood-based materials. Moreover, LVL manufacturing leaves much smaller ecological footprint than the many other common building materials.

Room module's floor element is designed as a composite structure of LVL beams and slabs. The fastening between the beams and the plate is calculated with both mechanical and glue joints. Due to the relative displacements caused by the fasteners mechanical joints are semi-rigid which means they are weaker than glue joints. As a result, the floor element with mechanical joints has a larger cross-section. The flange is designed of LVL 36 C with a height of 75 mm and the webs consists of two LVL 48 P beams with height 225 mm and wide 2 x 45 mm. The spacing between beams is 400 mm. For the beam and slab connection are used self-tapping screws SFS WT-T-8.2 x 160. In the support area the distance between screws is designed 200 mm and in the middle of the beam 300 mm.

While glued joints are deemed rigid and as a result have a higher strength and give opportunity to use elements with a smaller cross-section compared to mechanical joints. The cons of glues joints is in complicated manufacturing. Air temperature, adhesion of the surfaces, the appropriate moisture of the LVL and other special conditions must be complied. Flange for the floor element with glued joints is designed of LVL 36 C board with a height 75 mm and for the webs are used LVL 48 P beams with a height 225 mm and a width 75 mm. The spacing between beams is 400 mm.

The construction of the ceiling element is also designed from beams and slabs. The difference between floor element is that the ceiling element is bearing only a self-weight. Ceiling element flange is LVL 36 C board with thickness 24 mm and for the webs are used LVL 48 P beams with height 200 mm and width 75 mm. The spacing between

beams is 400 mm. The spacing between beams is the same as the floor element 400 mm. For the connection is used glued joints.

Room module column is designed as a composite structure withstands the vertical loads of a seven-storey building in a situation where the modules are placed in line with each other on each floor. The cross-section of the column is formed by two identical bars of LVL 35 P 75 x 150 mm. The distance between the bars is 10 mm and it is due to the size of the ISO corners. All the details of composite column are fastened to each other with self-tapping screws SFS WT-T-8.2 x 190.

The calculations made in the thesis show that it is theoretically possible to produce large-sized room modules constructions consisting of laminated veneer lumber. As a further development of this work, it is possible to design the steel structures of the room module and design the fire resistance. Since such room modules have not been used before, it is recommended to make the tests for checking the load-bearing capacity and vibration of the designed elements.

KIRJANDUSE LOETELU

- [1] „Statistikaameti andmebaas“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://andmebaas.stat.ee/Index.aspx?lang=et&DataSetCode=EH46U> [kasutatud 10.12.2020]
- [2] „Euroopa Komisjon - Ressursitõhusa Euroopa tegevuskava“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/PDF/?uri=CELEX:52011DC0571&from=EN> [kasutatud 10.12.2020]
- [3] R. Puusepp, E. Vogt, „Tallinn Mustermajad. Kokkuvõte“, 2019
- [4] LVL handbook Europe, *Global Warming impact of LVL Federation of the Finnish Woodworking Industries*, 2nd revised edition 2020, p 24
- [5] E.Vogt, N.Teetamm, „Moodulsüsteem 369“, Tallinna Tehnikaülikool, 2019
- [6] W. Huß, M. Kaufmann, K. Merz, „Building in timber room modules“: *1896: The first room module – a by-product of the industrialisation of concrete construction*, Munich, Detail Business Information, 2019, p.9
- [7] Joonis 1.1 allikas [Online]: <https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/66309/1/978-5-8057-1012-5-2018-11.pdf>
- [8] W. Huß, M. Kaufmann, K. Merz, „Building in timber room modules“: *1960s/1970s: Room module euphoria*, Munich, Detail Business Information, 2019, pp.9-11
- [9] Joonis 1.2 allikas [Online]: https://www.vub.be/arch/backyard/images/reuse/Book_Student_homes_by_WVDM_on_the_VUB_campus_in_Elsene.pdf
- [10] W. Huß, M. Kaufmann, K. Merz, „Building in timber room modules“: *1990s / 2000s: Timber room modules for multistorey buildings*, 2019, pp.11-15
- [11] Joonise 1.6 ja 1.7 allikas [Online]: https://www.mikado-online.de/wp-content/uploads/2016/03/4_2016_TDM_Frankfurt.pdf
- [12] W. Huß, M. Kaufmann, K. Merz, „Building in timber room modules“: *Design and Typology*, 2019, pp.16-25
- [13] W. Huß, M. Kaufmann, K. Merz, „Building in timber room modules“: *Constructing with Timber*, 2019, pp.26-35
- [14] R.Puusepp, L. Läänelaid „Mustermajad. Masskohandatavate hoonete tööstuslik ehitussüsteem“ Vaheraport, Eesti Kunstiakadeemia arhitektuuriteaduskond, versioon: Beeta, 2020
- [15] „369 Pattern Buildings“ Available [Online]: Allikas: <https://patternbuildings.com/>
- [16] E. J. Just, K. Õiger ja A. Just, „Puit- ja puidupõhised konstruktsioonid“ : *Puit- ja plastkonstruktsioonide lühiülevaade*, Tallinn, TTÜ Kirjastus, 2018, lk. 12-17.
- [17] E. J. Just, „Puitkonstruktsioonid loengu konspekt“ 2018

- [18] E. J. Just, K. Õiger ja A. Just, „Puit- ja puidupõhised konstruktsioonid“ : *Puit- ja puidupõhilised materjalid*, Tallinn, TTÜ Kirjastus, 2018, lk. 18-60.
- [19] LVL handbook Europe, *LVL as a construction material*, Federation of the Finnish Woodworking Industries, 2nd revised edition 2020, pp 9-50
- [20] Joonise 1.20 Allikas [Online]: https://ultralam.com/wp-content/uploads/2017/11/Ultralam_LVL_ENG_brochure.pdf
- [21] Joonise 1.21 Allikas [Online]: <https://www.metsawood.com/global/Tools/MaterialArchive/MaterialArchive/Kerto-manual-lvl-visual-properties.pdf>
- [22] E. J. Just, K. Õiger ja A. Just, „Puit- ja puidupõhised konstruktsioonid“: *Piirseisundid*, Tallinn, TTÜ Kirjastus, 2018, lk. 74-77.
- [23] E. J. Just, K. Õiger ja A. Just, „Puit- ja puidupõhised konstruktsioonid“ : *Arvutus kasutuspiirseisundis*, Tallinn, TTÜ Kirjastus, 2018, lk. 104-116.
- [24] *Eurokoodeks 5: Puitkonstruktsioonide projekteerimine Osa 1-1: Üldist. Üldreeglid ja reeglid hoonete projekteerimiseks. Eesti standardi rahvuslik lisa. EVS-EN 1995-1-1/NA:2007+A1:2008/NA:2009, Eesti Standardikeskus, 2009.*
- [25] E. J. Just, K. Õiger ja A. Just, „Puit- ja puidupõhised konstruktsioonid“: *Koormused*, Tallinn, TTÜ Kirjastus, 2018, lk. 104-116.
- [26] *Eurokoodeks. Ehituskonstruktsioonide projekteerimise alused. EVS-EN 1990:2002+NA:2002, Eesti Standardikeskus, 2002*
- [27] LVL handbook Europe, *structural design of LVL structures*, Federation of the Finnish Woodworking Industries, 2nd revised edition 2020, pp 112-141
- [28] E. J. Just, K. Õiger ja A. Just, „Puit- ja puidupõhised konstruktsioonid“: *Puitkonstruktsioonide liited*, Tallinn, TTÜ Kirjastus, 2018, lk. 117-178.
- [29] E. J. Just, K. Õiger ja A. Just, „Puit- ja puidupõhised konstruktsioonid“: *Liimitud puitribipaneelid ja õhukesevöölised talad*, Tallinn, TTÜ Kirjastus, 2018, lk. 229-234.
- [30] H. J. Blaß, C. Sandhaas, „Timber Engineering. Principles for Design“: *Glued composite members*, Karlsruhe, KIT Scientific Publishing, 2017, pp 233-248
- [31] E. J. Just, K. Õiger ja A. Just, „Puit- ja puidupõhised konstruktsioonid“: *Mehaaniliste liidetega talade arvutamine*, Tallinn, TTÜ Kirjastus, 2018, lk. 187-207.
- [32] H. J. Blaß, C. Sandhaas, „Timber Engineering. Principles for Design“: *Mechanically jointed members and CLT elements*, Karlsruhe, KIT Scientific Publishing, 2017, pp 249-262
- [33] *European Technical Assessment. ETA -12/0063, SFS Self-tapping Screws WT*, Deutsches Institut für Bautechnik, 2018.
- [34] E. J. Just, K. Õiger ja A. Just, „Puit- ja puidupõhised konstruktsioonid“: *Arvutus lande- ja kasutuspiirseisundis*, Tallinn, TTÜ Kirjastus, 2018, lk. 82-116.

- [35] H. J. Blaß, C. Sandhaas, „Timber Engineering. Principles for Design“: *Stability*, Karlsruhe, KIT Scientific Publishing, 2017, pp 177-194
- [36] SFS, „Timber Construction Fasteners“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.sfs.com/sfs_download/media/general_media/downloadcenter/sfs_intec_mo_uk/timber_construction/Timber_Construction_Fasteners_brochure.pdf, [kasutatud 25.11.2020]
- [37] Building Systems by Stora Enso, „3–8 Storey Modular Element Buildings“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.storaenso.com/-/media/Downloads/Download-center/Documents/Product-brochures/Wood-products/Design-Manual-A4-Modular-element-buildings20161227finalversion-40EN.pdf> [kasutatud 10.10.2020]
- [38] Laminated veneer lumber (LVL) bulletin – New European strength classes, [Võrgumaterjal]. Available: https://puutuoteteollisuus.fi/images/pdf/LVL_bulletin_eng.pdf, [kasutatud 18.11.2020]

LISAD

Lisa 1 Mooduli M9 pörandaelementide dimensioneerimine

Tabel L1.1 Pörandaelemendi peatala dimensioneerimine

Tala laius	[mm]	75	2x45	2x51	2x57	2x63	2x75
Tala kõrgus tugevustingimusest	[mm]	371	339	318	301	287	263
Tala kõrgus läbipaindest	[mm]	532	500	480	462	447	422

Tabel L1.2 Mehaanilise liitega pörandaelemendi tala dimenseoneerimine (Kruvid SFS WT-T-8.2x160)

		63	75	2x45	2x51
Andmed					
h ₁	[mm]	75	75	75	75
b ₁	[mm]	400	400	400	400
h ₂	[mm]	225	225	225	225
b ₂	[mm]	62	75	90	102
A ₁	[mm ²]	30000	30000	30000	30000
A ₂	[mm ²]	13950	16875	20250	22950
I ₁	[mm ⁴]	1,41E+07	1,41E+07	1,41E+07	1,41E+07
I ₂	[mm ⁴]	5,89E+07	7,12E+07	8,54E+07	9,68E+07
E ₁	[N/mm ²]	10500	10500	10500	10500
E ₂	[N/mm ²]	13800	13800	13800	13800
Efektivne paindejäikus					
K _{ser}	[N/mm]	26650	26650	26650	26650
K _u	[N/mm]	17767	17767	17767	17767
γ ₁		0,684	0,684	0,684	0,684
a ₁	[mm]	70,8	77,9	84,7	89,3
a ₂	[mm]	79,2	72,1	65,3	60,7
(EI) _{ef}	[Nmm ²]	3,25E+12	3,65E+12	4,06E+12	4,37E+12
Koormused					
Omakaal	kN/m ²	0,55	0,59	0,63	0,66
ULS	kN/m ²	4,02	4,06	4,11	4,15
SLS	kN/m ²	2,85	2,89	2,93	2,96
USL p _d	kN/m	1,61	1,63	1,65	1,66
SLS p _d	kN/m	1,14	1,15	1,17	1,18
M	kNm	15,2	15,4	15,6	15,7
V	kN	7,0	7,1	7,2	7,2
Pinged					
σ _{1,c}	[N/mm ²]	2,38	2,36	2,33	2,31
σ _{1,m}	[N/mm ²]	1,84	1,66	1,51	1,42
σ _{1,max}	[N/mm ²]	4,23	4,02	3,84	3,72

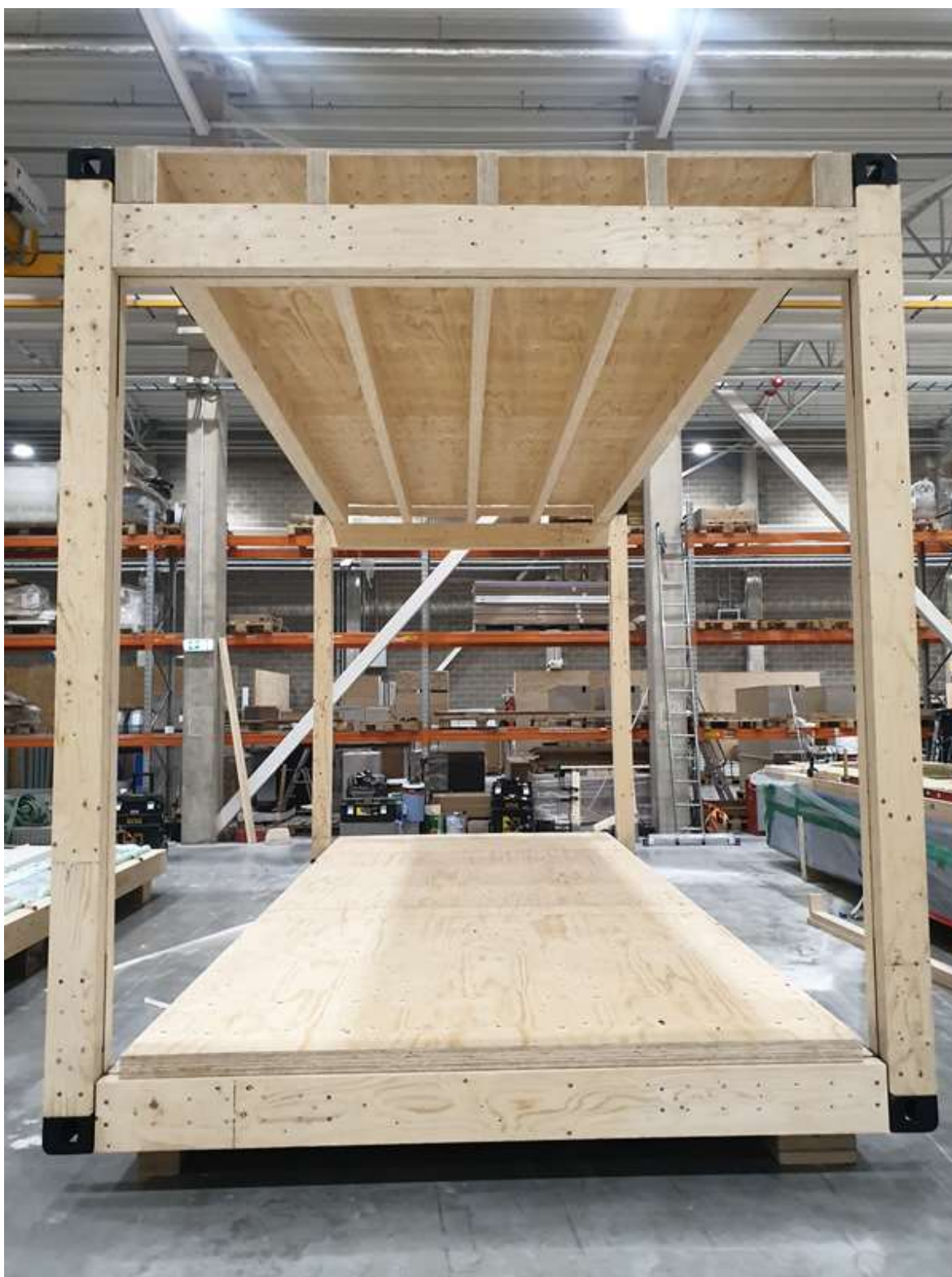
		63	75	2x45	2x51
$\sigma_{2,t}$	[N/mm ²]	5,12	4,19	3,45	3,02
$\sigma_{2,m}$	[N/mm ²]	7,27	6,54	5,95	5,59
$\sigma_{2,max}$	[N/mm ²]	12,39	10,74	9,40	8,60
τ_1	[N/mm ²]	0,082	0,081	0,080	0,080
τ_2	[N/mm ²]	0,53	0,43	0,36	0,31
τ_{max}	[N/mm ²]	0,55	0,46	0,38	0,34
h	[mm]	192	185	178	173
Liite kandevõime					
F_1	[N]	6568	6506	6428	6364
F_t	[kN]	7,7	7,6	7,6	7,5
F_ax,a, Rk	[kN]	13,3	13,3	13,3	13,3
F_ax,a, Rd	[kN]	8,2	8,2	8,2	8,2
F_t,1,2	[kN]	3,9	3,8	3,8	3,7
F_tens,d	[kN]	17,6	17,6	17,6	17,6
Läbipaine					
w_inst	[mm]	26,18	23,61	21,50	20,23
L/400	[mm]	21,75	21,75	21,75	21,75
		120%	109%	99%	93%
Vibratsioon					
(EI)l, ef	[Nmm ²]	3,25E+12	3,65E+12	4,06E+12	4,37E+12
(EI)l, ef, 1m	[Nm ² /m]	8,12E+06	9,12E+06	1,02E+07	1,09E+07
(EI)b, ef, 1m	[Nmm ²]	3,691E+11	3,691E+11	3,691E+11	3,691E+11
(EI)b, ef, 1m	[Nm ² /m]	3,69E+05	3,69E+05	3,69E+05	3,69E+05
fn=	[Hz]	15,59	15,42	15,22	15,07
f1=	[Hz]	6,42	6,66	6,87	6,99
m1	[kg/m ²]	84,94	88,59	92,81	96,19
n_40	-	1,077	1,114	1,152	1,179
v_max	[m/Ns ²]	0,002	0,002	0,002	0,002
b^(f_1*ζ-1)	[m/Ns ²]	0,020	0,020	0,020	0,020
kb	-	0,462	0,449	0,437	0,429
w	[mm]	0,481	0,441	0,406	0,385
w	[mm]	4,225	3,761	3,376	3,140
a	[mm/kN]	1,5	1,5	1,5	1,5

Tabel L1.3 Liimliitega pörandaelemendi tala dimenseoneerimine

		57	63	75	2x45
Andmed					
h_1	[mm]	75	75	75	75
b_1	[mm]	400	400	400	400
h_2	[mm]	225	225	225	225
b_2	[mm]	57	63	75	90
A_1	[mm ²]	30000	30000	30000	30000
A_2	[mm ²]	12825	14175	16875	20250
I_1	[mm ⁴]	1,41E+07	1,41E+07	1,41E+07	1,41E+07
I_2	[mm ⁴]	5,41E+07	5,98E+07	7,12E+07	8,54E+07
E_1	[N/mm ²]	10500	10500	10500	10500
E_2	[N/mm ²]	13800	13800	13800	13800
Efektivne paindejäikus					
a_1	[mm]	54,0	57,5	63,8	70,5
a_2	[mm]	96,0	92,5	86,2	79,5
(EI)_ef	[Nmm ²]	3,44E+12	3,69E+12	4,14E+12	4,66E+12
Koormused					
Omakaal	kN/m ²	0,54	0,55	0,59	0,63
ULS	kN/m ²	4,00	4,02	4,06	4,11
SLS	kN/m ²	2,84	2,85	2,89	2,93
SLS p_d	kN/m	1,13	1,14	1,15	1,17
USL p_d	kN/m	1,60	1,61	1,63	1,65
M	kNm	15,15	15,22	15,38	15,57
V	kN	6,96	7,00	7,07	7,16
Pinged					
$\sigma_{1,c}$	[N/mm ²]	2,49	2,49	2,48	2,47
$\sigma_{1,c,max}$	[N/mm ²]	4,22	4,12	3,95	3,79
$\sigma_{2,t}$	[N/mm ²]	5,83	5,27	4,42	3,67
$\sigma_{2,c,max}$	[N/mm ²]	12,66	11,68	10,18	8,85
τ_1	[N/mm ²]	0,09	0,09	0,09	0,09
τ_2	[N/mm ²]	0,60	0,55	0,46	0,38
τ_{max}	[N/mm ²]	0,61	0,55	0,47	0,39
h	[mm]	208,54	205,04	198,74	191,99
Läbipaine					
w_inst	[mm]	24,57	23,08	20,79	18,76
L/400	[mm]	21,75	21,75	21,75	21,75
		113%	106%	96%	86%
Vibratsioon					
(EI)l, ef	[Nmm ²]	3,44E+12	3,69E+12	4,14E+12	4,66E+12
(EI)l, ef, 1m	[Nm ² /m]	8,61E+06	9,22E+06	1,04E+07	1,16E+07
(EI)b, ef, 1m	[Nmm ²]	3,691E+11	3,691E+11	3,691E+11	3,691E+11
(EI)b, ef, 1m	[Nm ² /m]	3,69E+05	3,69E+05	3,69E+05	3,69E+05
fn=	[Hz]	15,80	15,74	15,61	15,45

		57	63	75	2x45
f1=	[Hz]				
m1	[kg/m ²]	83,53125	85,21875	88,59375	92,8125
n_40	-	1,085	1,106	1,143	1,183
v_max	[m/Ns ²]	0,002	0,002	0,002	0,002
b^(f_1*ζ-1)	-	0,021	0,021	0,021	0,020
kδ	-	0,455	0,447	0,435	0,422
w	[mm]	0,460	0,437	0,400	0,367
w	[mm]	3,983	3,720	3,312	2,945
a	[mm/kN]	1,5	1,5	1,5	1,5

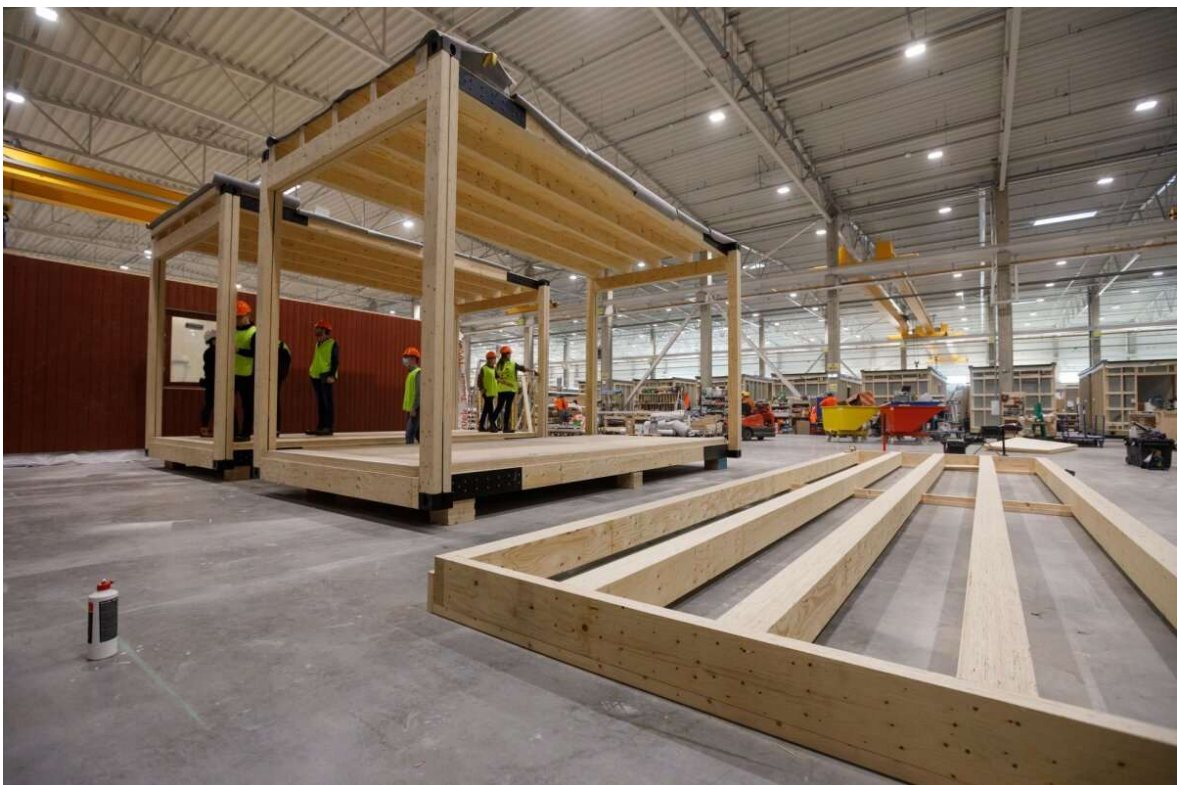
Lisa 2 Mustermaja ruummoduli prototüübi pildid



Joonis L2.1 Mustermaja M6 mooduli prototüüp. Allikas [15]



Joonis L2.2 Mustermaja M6 mooduli prototüüp. Allikas [15]



Joonis L2.3 Mustermaja M6 mooduli prototüüp. Allikas [15]