



**TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL**  
INSENERITEADUSKOND  
Ehituse ja arhitektuuri instituut

**SLENDERI RISTKIHTLIIMPUIDUST  
VÄLISSEINAELEMENDI KONSTRUKTSIOONILINE  
LAHENDUS**

**THE STRUCTURAL ANALYSIS OF CROSS-LAMINATED  
TIMBER WALLELEMENT FOR SLENDER HOUSE**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Elina Jõpiselg

Üliõpilaskood: 177624-EAEI

Juhendaja: Alar Just

# 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.

19. mai 2022

Autor: .....

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." ..... 201.....

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....." .....201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

## **LIHTLITSENTS LÕPUTÖÖ REPRODUTSEERIMISEKS JA LÕPUTÖÖ ÜLDSUSELE KÄTTESAADAVAKS TEGEMISEKS**

Mina, Elina Jõpiselg,

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose **SLenderi riskihtliimpuidust välisseinaelemendi konstruktsiooniline lahendus,**

mille juhendaja on Alar Just

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

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

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

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

\_\_\_\_\_ (kuupäev)

---

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



# SISUKORD

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE .....	4
Lühendite ja tähiste loetelu.....	7
SISSEJUHATUS .....	10
1 SLENDERI TAUST.....	11
1.1 Lenderi tüüpkorterimaja.....	11
1.2 Nägemus sLenderist .....	12
2 LÄHTEANDMED JA KOORMUSED ELEMENDILE.....	15
2.1 Lähteandmed.....	15
2.2 Vahelae koormused .....	16
2.3 Katuslae koormused .....	17
2.4 Seinaelemendi koormused.....	19
2.5 Koormuskombinatsioonid ja sisejõud .....	20
2.5.1 Vahelagi.....	20
2.5.2 Katuslagi.....	21
2.5.3 Valitud seinaelement .....	22
3 VAHELAEELEMENTI KANDEVÕIME KONTROLL.....	25
3.1 Lähteandmed.....	25
3.2 Kandepiirseisundi kandevõime .....	26
3.3 Kasutuspiirseisundi kontrollid.....	27
3.4 Tuleolukorra kandevõime .....	28
4 KATUSLAEELEMENTI KANDEVÕIME KONTROLL.....	32
4.1 Lähteandmed.....	32
4.2 Kandepiirseisundi kandevõime .....	32
4.3 Kasutuspiirseisundi kontrollid.....	33
4.4 Tuleolukorra kandevõime .....	33
5 SEINAELEMENTI KANDEVÕIME KONTROLL.....	35
5.1 Lähteandmed.....	36
5.2 Posti kandevõime .....	36

5.2.1	Kandepiirseisund .....	37
5.2.2	Tuleolukorra kandevõime .....	39
5.3	Vahelae-seinaelemendi sõlm .....	42
5.4	Elemendi kõrge tala kandevõime .....	43
5.4.1	Kandepiirseisund .....	43
5.4.2	Tuleolukorra kandevõime .....	44
5.5	Elemendi madala tala kandevõime .....	47
5.5.1	Kandepiirseisund .....	48
5.5.2	Tuleolukorra kandevõime .....	48
5.6	I korruse kõrge tala kandevõime .....	50
5.6.1	Kandepiirseisund .....	50
5.6.2	Tuleolukorra kandevõime .....	51
KOKKUVÕTE .....		53
SUMMARY .....		54
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....		55
LISAD .....		57
	Lisa 1 – Väljavõte Peetri Puit OÜ brožüürist, liimpuidu tehnilised andmed [9] .....	57
GRAAFILINE OSA .....		58

# Lühendite ja tähiste loetelu

## Ladina suurtähed

$A_{c,0(90)}$  – ristkihtpuidu piki (ristikiudu) lamellide ristlõikepindala

CLT – ristkihtpuit (ingl k Cross Laminated Timber)

$E_{0,CLT,k}$  – ristkihtpuidu normatiivne elastsusmooduli väärtus

$E_i$  – elemendi elastsusmoodul

$(EI)_{ef}$  – ristkihtpuidust elemendi efektiivne paindejäikus arvestamata ristikiudu kihte

$(EI)_{ef,fi}$  – ristkihtpuidust elemendi efektiivne paindejäikus arvestamata ristikiudu kihte tule olukorras

$E_{0,CLT,mean}$  – ristkihtpuidu elastsusmooduli keskvärtus

$E_{0,CLT,0.05}$  – ristkihtpuidu elastsusmooduli 5% väärtus

$F$  – koormus

$F_d$  – koormuse arvutusväärtus, arvutuskoormus

$F_{Ed,i}$  – toereaktsioon vastaval elemendil

$F_{Ed,i,fi}$  – toereaktsioon vastaval elemendil tuleolukorras

$F_k$  – koormuse normväärtus, normkoormus

$G$  – alaliskoormus

$G_d$  – alaliskoormuse arvutusväärtus

$G_{r,CLT,k}$  – ristkihtpuidu nihkemooduli normatiivne väärtus

$I_{ef}$  – elemendi efektiivne inertsimoment arvestamata ristikiudu kihte

$I_i$  – elemendi või lamelli inertsimoment

$K_{CLT}$  – posti paindejäikus

$M_{Ed,i}$  – paindemoment vastavas elemendis

$M_{Ed,i,fi}$  – paindemoment vastavas elemendis tuleolukorras

$P_d$  – koormuskombinatsiooni tule, arvutusväärtus

$Q$  – muutuvkoormus

$S_{CLT}$  – ristkiht liimpuidust paneeli või posti nihkejäikus

$S_i$  – elemendi või lamelli staatiline moment

$S_{tot}$  – elemendi kogustaatiline moment

$T$  – aeg minutites

## Ladina väiketähed

$b$  – ehitise või elemendi või selle osa laius

$d_{char}$  – söestumissügavus

$d_{ef}$  – ristlõike efektiivne söestumissügavus

$d_0$  – nulltugevusega kihi paksus

$e_i$  – lamelli keskme kaugus elemendi keskteljest

$f_{c,0,CLT,d}$  – ristkihtpuidu arvutuslik survetugevus pikikiudu  
 $f_{c,0,CLT,k}$  – ristkihtpuidu normatiivne survetugevus pikikiudu  
 $f_{c,0,CLT,d,fi}$  – ristkihtpuidu arvutuslik survetugevus pikikiudu tule olukorras  
 $f_{c,90,CLT,d}$  – ristkihtpuidu arvutuslik survetugevus ristikiudu  
 $f_{c,90,CLT,k}$  – ristkihtpuidu normatiivne survetugevus ristikiudu  
 $f_{c,90,CLT,d,fi}$  – ristkihtpuidu arvutuslik survetugevus ristikiudu tule olukorras  
 $f_{m,CLT,d}$  – ristkihtpuidu arvutuslik paindetugevus  
 $f_{m,CLT,k}$  – ristkihtpuidu normpaindetugevus  
 $f_{m,CLT,d,fi}$  – ristkihtpuidu arvutuslik paindetugevus tule olukorras  
 $f_{r,CLT,d}$  – ristkihtpuidu arvutuslik nihketugevus ristikiudu  
 $f_{r,CLT,k}$  – ristkihtpuidu normatiivne nihketugevus ristikiudu  
 $f_{r,CLT,d,fi}$  – ristkihtpuidu arvutuslik nihketugevus ristikiudu tule olukorras  
 $f_{v,CLT,d}$  – ristkihtpuidu arvutuslik nihketugevus pikikiudu  
 $f_{v,CLT,k}$  – ristkihtpuidu normatiivne nihketugevus pikikiudu  
 $f_{v,CLT,d,fi}$  – ristkihtpuidu arvutuslik nihketugevus pikikiudu tule olukorras  
 $g_{ki}$  – omakaalukoormuse normväärtus  
 $h$  – hoone või elemendi või selle osa kõrgus  
 $h_{ef}$  – elemendi efektiivne paksus  
 $i$  – inertsiraadius  
 $k_{c,z}$  – ebastabiilsust arvestav tegur  
 $k_{def}$  – deformatsioonitegur  
 $k_{mod}$  – koormuse kestuse ja niiskusesisalduse mõju arvestav modifikatsioonitegur  
 $k_{mod,fi}$  – koormuse kestuse ja niiskusesisalduse mõju arvestav modifikatsioonitegur  
 tuleolukorra jaoks  
 $k_n$  – tegur, mis kajastab ühemõõtmelise ja kahemõõtmelise söestumiskiiruse suhet  
 $k_z$  – ebastabiilsustegur  
 $l$  – elemendi kahe toepunkti vaheline kaugus, ava sille  
 $l_{ef}$  – elemendi efektiivne pikkus  
 $q_{di}$  – muutuvkoormuse arvutuslik väärtus, arvutuslik muutuvkoormus  
 $q_{ki}$  – muutuvkoormuse normväärtus, normmuutuvkoormus  
 $t$  – lamelli paksus  
 $u_{fin}$  – lõplik deformatsioon  
 $u_{fin,G}$  – lõplik deformatsioon alalisest koormusest  
 $u_{fin,Q}$  – lõplik deformatsioon muutuvast koormusest  
 $u_{inst,G}$  – hetkeline läbipaine alalisest koormusest  
 $u_{inst,Q}$  – hetkeline läbipaine muutuvkoormusest  
 $w_{net,fin}$  – lõplik netoläbipaine



## Kreeka väiketähed

$\beta_c$  – sirgsuse tegur

$\beta_0$  – puidu ühemõõtmeline põlemiskiirus

$\beta_n$  – puidu kahemõõtmeline põlemiskiirus

$\gamma$  – materjali mahukaal

$\gamma_G$  – alaliskoormuse osavarutegur, mis arvestab ka arvutusmudeli ebatäpsusi ja mõõtmete hälbeid

$\gamma_M$  – materjali omaduse osavarutegur, mis arvestab ka arvutusmudeli ebatäpsusi ja mõõtmete hälbeid

$\gamma_{M,fi}$  – materjali omaduse osavarutegur tuleolukorra jaoks

$\gamma_Q$  – muutuvkoormuse osavarutegur, mis arvestab ka arvutusmudeli ebatäpsusi ja mõõtmete hälbeid

$\gamma_{Q,i}$  – i-nda muutuvkoormuse osavarutegur

$\sigma_{c,0,CLT,d}$  – ristkihtpuidu pikikiudu arvutuslik survepinge

$\sigma_{max}$  – maksimaalne normaalpinge

$\sigma_{max,fi}$  – maksimaalne normaalpinge tule olukorras

$\kappa$  – ristkihtpuidu nihkekorrektuuri tegur

$\lambda$  – elemendi saledus

$\lambda_{rel,z}$  – elemendi suhteline saledus, mis vastab paindele z-telje suhtes

$\tau_{r,d}$  – maksimaalne arvutuslik nihkepinge ristikiudu

$\tau_{r,d,fi}$  – maksimaalne arvutuslik nihkepinge ristikiudu tule olukorras

$\tau_{v,d}$  – maksimaalne arvutuslik nihkepinge pikikiudu

$\tau_{v,d,fi}$  – maksimaalne arvutuslik nihkepinge pikikiudu tule olukorras

$\psi_0$  – muutuvkoormuse kombinatsioonitegur

$\psi_1$  – muutuvkoormuse tavaväärtuse kombinatsioonitegur

$\psi_2$  – muutuvkoormuse tõenäolise väärtuse kombinatsioonitegur

## SISSEJUHATUS

Tänapäeva kiiresti arenevas maailmas on hakatud üha enam pöörama tähelepanu inimese elukeskkonnale ning jalajäljele. Energiahindade tõus ning Euroopa Liidu kliimaeesmärgid soodustavad olemasolevate kortermajade renoveerimist. Kuna eelmise sajandi keskpaigas ehitatud korterelamud hakkavad jõudma oma kasutusea lõppu, otsitakse uusi võimalusi keskkonnasõbralikult ning ruumi ära kasutades luua ajas püsivaid lahendusi.

Arhitektuurbüroo PART arhitektid Siim Tuksam ja Sille Pihlak on välja töötanud ristkihtpuidust kortermaja kontseptsiooni, mille raames kasutatakse ruumi ära maksimaalselt ning soovitakse kasutada ära tootmisjääke või toota võimalikult vähe jääke tekitades. Spiraalselt tõusva korruselisusega diagonaalsetest postidest ning horisontaalsetest taladest koosneva välisseina ja erilise topelfassaadi lahendusega on sLender ainulaadne.

Käesolevas magistritöös vaadeldakse peafassaadi. Vastavalt arhitektursele lahendusele saab välisseina jagada monteeritavateks tervikelementideks, mis koosnevad postidest ning taladest. Magistritöö eesmärgiks on valida välisseinaelement ning selle osad dimensioneerida. Kuna arhitektuurne lõpplahendus s.h sõmlahendused, on alles välja töötamisel, pole käesolevas töös sõmlahendusi kajastatud.

Peatükkidena on kajastatud töös käsitletava hoone saamisloogu ning peamised kasutatud lahendused: hoonele mõjuvad koormused ning selle arvutamiseks olulised lähteandmed, dimensioneeritakse vahelaek- ja katuslaepaneel ning seinaelement, samuti selle osad ja sõlm vahelaega.

Lõputöös kasutatud programmide loetelu:

- Arvutused – Microsoft Excel;
- Joonised ja skeemid – Autodesk AutoCAD 2022;
- Arvutusmudel – Autodesk Robot Structural Analysis 2022

**Märksõnad:** sLender, ristkihtliimpuit, CLT, kandevõime

# 1 SLENDERI TAUST

Käesolevas töös kajastatakse sLenderi kui mitmekorruselise puidust kortermaja välisseina arvutusi. Sellel nimetusel on ka oma saamisloogu, mis on seotud sajanditaguste sündmustega ning mille pärand kandub edasi tänapäeva.

## 1.1 Lenderi tüüpkortermaja

Tallinn kasvas 19. sajandi lõpus ning 20. sajandi alguses jõudsalt tulenevalt tööstusettevõtete rajamisest ning seeläbi asurkonna koondumisest linna. See aga tõi kaasa nõudluse odava eluaseme järgi ning aktiivse elamuehituse, mis hoogustus 1890. aastatel ning püsis kõrge I maailmasõja alguseni. Tekkisid suured puitasumid suureettevõtete ümbrusesse, sest ettevõtted kuulusid välisinvestoritele ning kapitali ei investeeritud linna s.h. ühiskondliku transpordi arendamisse. Näiteks Lutheri vineeri- ja mööblivabriku ümbrusesse tekkisid praegused Veerenni ning Uue-Maailma asumid. Tüüpilised hooned nendes asumites olid rõhtpalkkonstruktsiooni, paekivist sokli ning viilkatusega. Just Tallinnale iseloomulikud puitasumid, mis on terviklikult säilinud, on nüüdisaegses Euroopas haruldased. [1]

Nimetus Lenderi maja on kõnekeelde ilmunud viimastel aastakümnetel. Majatüübi nimetus pärineb esimese eestlasest Tallinna linnapea, inseneri ning ehitusettevõtja Voldemar Lenderi nimest, kuigi ta ei olnud esimene ega ka viljakaim seda tüüpi majade ehitaja. Terminipäritolu on pigem poliitilise kui arhitektuuriajaloolise taustaga. Nimelt oli 19. sajandi lõpus ning 20. sajandi alguses hääleõigus (valimisõigus) seotud hariduse või varandusliku seisuga. Eestlastest valijaskonna tekkega läbi puidust majade ehitamise ja hääleõiguse saamise valiti 1904 Voldemar Lender linnanõunikuks ning kaks aastat hiljem Tallinna linnapeaks. Kuni 1913 aastani juhtis Lender lisaks Tallinna linnale ka linnavalitsuse ehitusosakonda, soosides puidust üürimajade ehitust ning eestlastest väikekodanluse teket. Terminit Lenderi maja võib seeläbi pidada eelkõige tänuks panuse eest Tallinna linna ja eestikeelse linnaühiskonna arendamiseks. [1]

Lenderi maju on palju eriilmelisi ning nende liigitamine on keeruline, sest on ka ridamisi erandeid. 1893. aastal toimus oluline muutus tuleohutuseeskirjades, mille kohaselt hakati nõudma, et puidust koridori tüüpi majadest saaks teiselt korruselt välja kahe puidust trepi või ühe kivitrepikoja kaudu. Kuna teine variant oli kulukam, hakati neid ehitama peale I maailmasõda ning seda tüüpi maju nimetatakse Tallinna majadeks. [1]

Põhiliselt liigitatakse Lenderi maju teljelisuse – esifassaadil kohakuti paiknevate avade arvu – järgi (teljed moodustavad kohakuti paiknevad korteriaknad ning keskne trepikoda, Joonis 1.1). Levinumad on 3-, 5- ja 7-teljelised hooned, kuid eksisteerib ka ebasümmeetrilisi ning kuni 11-teljelisi hooneid. Paljuteljeliste majade puhul sageli ehitati algselt hoone ühekorruselisena ning aja möödudes lisati sellele teine korrus. Lenderi majadel üldjuhul avaneb esifassaadil paiknev välisüks tänavale ning selle kohal paikneb frontoon. Omaette erilised on näiteks Pelgulinnale iseloomulikud tänavajoonega risti olevad juurdeehitused või Lenderi maja arhitektuuri järgivad kivimajad või tornid ning omapäraseid nurgalahendused. Viimane tulenes kohustusest ehitada tänava ehitusjoonele hoolimata sellest, et tänavad ei pruukinud ristuda täisnurga all. [1]

Kuigi rohkem kui sajand on möödunud Lenderi majatüübi tekkest, on endiselt säilinud vajadus soodsa eluaseme järele töökohtade läheduses. Taaskord pöörduakse tagasi puidu juurde, kuid tänapäevale kohaselt erilisema nurga alt.



Joonis 1.1 5-teljeline Lenderi maja, levinuim lahendus [1]

## 1.2 Nägemus sLenderist

sLender on arhitektuuribüroo PART arhitektide Sille Pihlak ja Siim Tuksam looming. Teose saamislugu on kirjutatud vastavalt antud lõputöö autori arusaamale sLender'i hoone arengust tuginedes põhiliselt arhitektidega koostumistelt saadud informatsioonile. Käesolev saamislugu on Sille Pihlaku ja Siim Tuksamiga kooskõlastatud enne antud töö avalikustamist.

Hoone arhitektuurilise nägemuse juured said alguse Eesti Kunstiakadeemia ning Peetri Puit OÜ koostööst, mille raames otsiti rakendust ristkiht liimpuidust (edaspidi ka CLT, ingl. *cross laminated timber*) tootmisjääkidele. Nimelt tekivad paneelidesse näiteks

akna- ja ukseavade tegemisel jäägid, mida saab vaadelda samal ajal massiivsete ning väikeste elementidena. Jääkmaterjali väärindamise käigus töötati välja standard-elementid, millest antud juhul koostati näiteks bussipeatus, mis on nähtav Joonis 1.2. Oma 2020 aastal kaitstud doktoritöodes käsitlesid Siim Tuksam ning Sille Pihlak vastavalt moduleeritud modulaarsust ehk standardelementidest variatsioonide loomist ning parameetrilist arhitektuuri ja inseneeria koostööd [2]. Neis kajastus ka projekti „ELEMENTaarne“ käigus loodud bussipeatus.



Joonis 1.2 Projekt "ELEMENTaarne" Autorid: Siim Tuksam ja Sille Pihlak [3]

Koostööd Peetri Puit OÜ-ga (tuntud ka kaubamärgi Arcwood nime all) jätkati. EAS-i toel alustati koostööprojektiga, mille raames sooviti püstitada Võistluse 7, Tallinn krundile tulevikku vaatava arhitektuuriga riskihtpuidust korterelamu, mis oleks samal ajal lihtne, taskukohane ning võimalikult kliimaneutraalne [3]. Antud hoonet kavandatakse kui uut võimalikku puidust tüüp-korteremaja, mis kujundaks linnaruumi nii nagu tegi seda sajand tagasi Lenderi maja. Seetõttu on valitud käesoleva hoone nimeks sLender ehk inglise keelest tõlgituna nõtkes ja sale, st minimeeritud jalajäljega paindlik korteremaja tüüpsüsteem.

Doktorite Sille Pihlaku ja Siim Tuksami poolt seoti diplomitööde tulemused ning projekti „ELEMENTaarne“ idee diagonaalsetest kandvatest seinaelementidest, matemaatilisest fassaadielementide mudelist ning uut tüüpi korteremaja nägemusest ühtseks tervikuks. Selle keskmeks on hoone tuuma, praegusel juhul trepikoja, ümber spiraalina tõusev ning langev korruselisus 1m kõrguste sammudena, kusjuures eraldi klassikalisi korruseid ei moodustu. Korruste astmeline lahendus on nähtav Joonis 1.3. Hoone vertikaalsed koormused võetakse vastu välisseinte ja tuumaga. Taoline lahendus võimaldab efektiivsemalt kasutada hoone mahtu ning seda paremini ära kasutada ka ajas muutuvate tingimuste korral. Kuna korrusel sees pole kandvaid seinu ning

trepikotta on planeeritud erinevate asukohtadega sissepääse, võib suurema korteri näiteks laste välja kolides kaheks teha ning osa eraldi korterina maha müüa/välja üürida. See võimaldab kasutuseta jäänud või ebapraktiliseks muutunud hooneosi taas väärtustada.



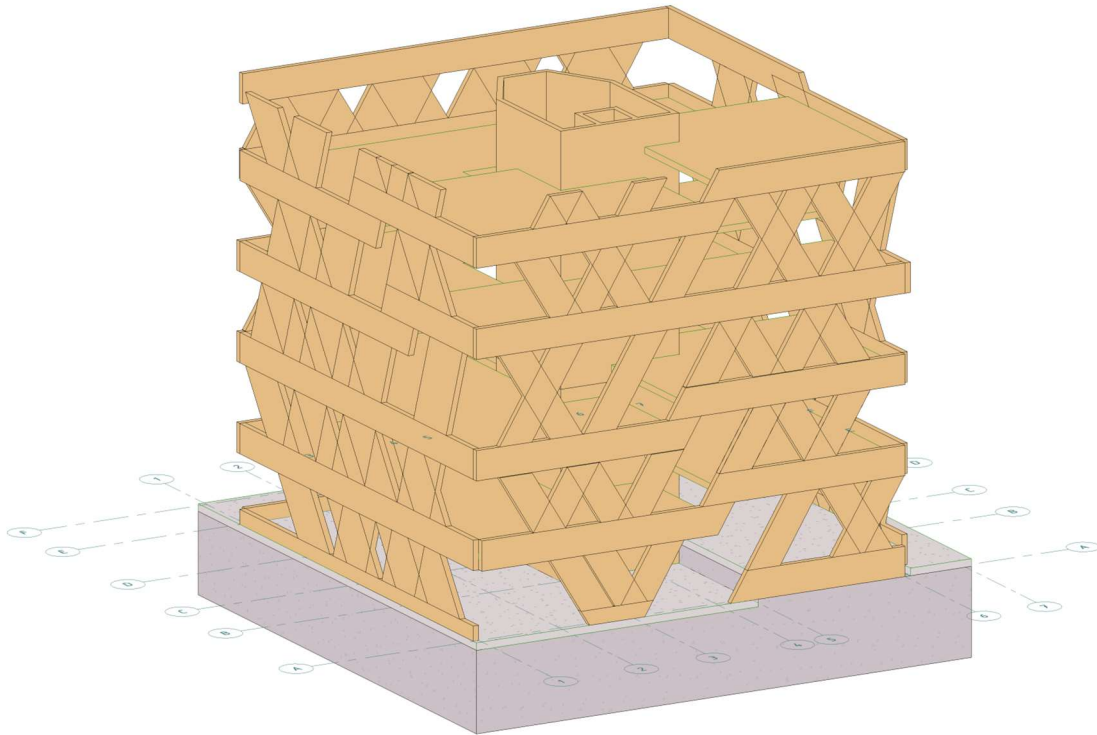
*Joonis 1.3 Osa hoone maketist, Foto: Siim Tuksam*

Välisseinaelemendid moodustuvad diagonaalsetest postidest ning horisontaalsetest taladest. Postid ning talad lõikuvad samas tasandis. Vahe- ja katuslae paneelid toetuvad trepikojale ning välisseintele. Hoone all paikneb maa-alune parkla, mis on samuti spiraalselt langev. Hoone välisseinad on soojustatud tuulutatava fassaadilahendusega tarindid. Kusjuures tarindile lisandub täiendav ruumiline konstruktsioon, moodustades topelfassaadi. Sellega soovitakse luua diagonaalsed toidukasvatamise pinnad, päikesevarjestus ning aknatagune mikrokliima. Topelfassaadi vahele on võimalik peita ka trepistikud näiteks evakuatsiooniks ning samuti saab kasutada ruumilisi pindu nt päikesepaneelide paigaldamiseks hoonet tänavalt vaatleja silmale varjatult.

Sarnaselt hoone nime „sugulasele“, on tegu uuendusliku lähenemisega nii ruumiplaneeringu, tuleohutuse, konstruktsiooni- kui ka fassaadilahenduse poolest antud ajahetkel. Jäävad vaid kaks küsimust: kas insenerid ja materjalid on tasemel, et visioonid reaalsuseks teha ning kas ühiskond on valmis sellise lahenduse vastu võtma.

## 2 LÄHTEANDMED JA KOORMUSED ELEMENDILE

Käesolevas peatükis kajastatakse valitud sLender'i vahelaet, katuslae ning seinaelemendile mõjuvaid koormusi. Hoone mudel on nähtav Joonis 2.1.



Joonis 2.1 SLenderi 3D mudel, nähtav vaade vasakult ja eestvaade

Tulenevalt hoone arhitektuursest kontseptsioonist ning plaanilahendusest on eeldatud katus- ning vahelaelt koormuste üle kandmist vundamendile trepikoja ja hoone perimeetril paiknevate seinte abil. Koormuskombinatsioonid, kombinatsioonitegurid ja arvutusolukorrad on valitud vastavalt Eurokoodeksile [4]. Materjalide mahukaalud ja hooneosade kasuskoormused ning nende varutegurid on valitud Eurokoodeksi 1 Osa 1-1 kohaselt [5]. Lumekoormused on valitud vastavalt sama Eurokoodeksi Osa 3 [6] ning tuulekoormused Osa 4 [7] alusel.

### 2.1 Lähteandmed

Hoone asukoht: Võistluse 7, Tallinn

Projekteeritud kasutusea kategooria: 4

Projekteeritud kasutusiga: 50 aastat

Käesolevas töös on kajastatud järgnevad arvutusolukorrad:

- alaline arvutusolukord, mis vastab konstruktsiooniosa normaalsetele kasutustingimustele
- erakordne arvutusolukord, mis vastab konstruktsiooniosa erandlikele kasutus- või keskkonnatingimustele tulekahju tagajärjel

Töös kajastatakse eelnevatele arvutusolukordadele vastavad piirseisundid alljärgnevalt:

- konstruktsiooni kui terviku või selle mis tahes osa staatilise tasakaalu kaotus jäiga keha eeldusel – kandepiirseisundi kontroll
- deformatsioonid, mis mõjutavad välimust, kasutajate mugavust või konstruktsiooni funktsioneerimist, eristades taastuvaid ja taastumatuid deformatsioone – kasutuspierseisundi kontroll

## 2.2 Vahelae koormused

Igal korrusel mõjuvad allpool kirjeldatud koormused. Mahukaalud on võetud vastavalt Lisale A EVS-EN 1991-1-1:2002 [5].

### Omakaalukoormused

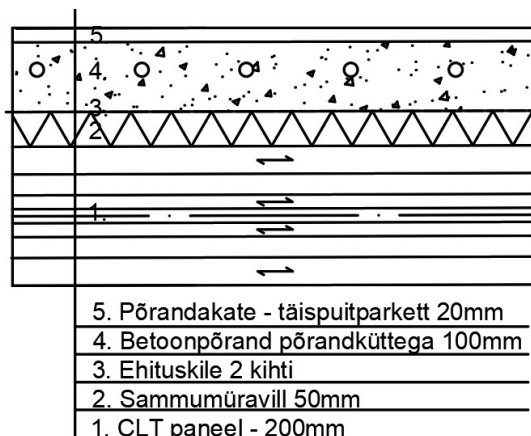
Kandev CLT vahelagi 200mm:  $g_{k1} = 0,20 * 4,2 = 0,84 \text{ kN/m}^2$

Sammumüravill 50mm:  $g_{k2} = 0,05 * 1,4 = 0,07 \text{ kN/m}^2$

Ujuv betoonpõrand põrandküttega 100mm:  $g_{k3} = 0,1 * 25 = 2,5 \text{ kN/m}^2$

Täispuitparkett koos aluskatte või liimiga 20mm:  $g_{k4} = 0,02 * 4,5 = 0,09 \text{ kN/m}^2$

Vahelae omakaalukoormus kokku:  $g_{k,VL} = 0,84 + 0,07 + 2,5 + 0,09 = 3,50 \text{ kN/m}^2$



Joonis 2.2 Vahelae konstruktsioonitüüp



## Kasuskoormused

Kasutusklass: klass A

Vahelae kasuskoormus vastavalt klassile A rahvuslikust lisast –  $q_k = 2,0 \text{ kN/m}^2$

Tulenevalt arhitektuursest kontseptsioonist võib muutuda mittekandvate korteritevaheliste seinte asukoht. Seda võetakse arvesse täiendava kasuskoormusena, kuna vahelagi võimaldab koormust külgsuunas jaotada. Eeldades CLT-st korteritevahelise seina paksuseks 200mm, saan vaheseina omakaaluks  $g_k = 2,6 * 0,2 * 3,7 \approx 1,92 \text{ kN/m}$ . Eelneva tõttu valin vahelaele täiendava kasuskoormuse  $q_k = 0,8 \text{ kN/m}^2$ . Antud kasuskoormus katab ka kipsist muutuva asukohaga kergseinte vastava koormuse.

Vahelae kasuskoormus kokku:  $q_{k,VL} = 2,0 + 0,8 = 2,8 \text{ kN/m}^2$

## 2.3 Katuslae koormused

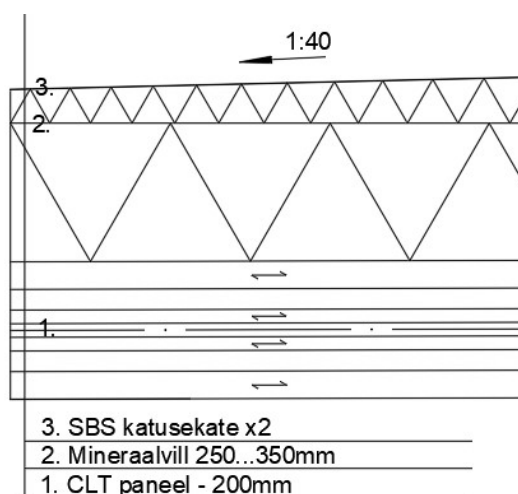
### Omakaalukoormus

Kandev CLT katuslagi 200mm:  $g_{k1} = 0,20 * 4,2 = 0,84 \text{ kN/m}^2$

Soojustus 250...350mm:  $g_{k2} = 0,35 * 0,3 = 0,11 \text{ kN/m}^2$

SBS-rullmaterjali kihtide panus katuslae omakaalu koormusesse on niivõrd väike, et seda pole eraldi täiendavalt välja toodud.

Katuslae omakaalukoormus kokku:  $g_{k,KL} = 0,84 + 0,11 \approx 0,95 \text{ kN/m}^2$



Joonis 2.3 Katuslae konstruktsioonitüüp

## Kasuskoormus

Katusele planeeritakse katuserass, mistõttu on tegu klassile A sarnaselt kasutatava katusega. Eelneva tõttu on tegu koormatud pinna klassiga I.

Katuslae kasuskoormus –  $q_k = 2,0 \text{ kN/m}^2$

Juurdepääsetava I klassist katuse puhul võib kasutada kasuskoormuse suuruse määramisel vähendustegurit. Vastav vähendustegur  $\alpha_A$  määratakse järgnevalt:

$$\alpha_A = \frac{5}{7} * \psi_0 + \frac{A_0}{A} = \frac{5}{7} * 0,7 + \frac{10}{170} = 0,5588 \leq 1,0, \text{ kus}$$

antud juhul  $\psi_0 = 0,7$

$$A_0 = 10 \text{ m}^2$$

koormuspinna suurus  $A = 170 \text{ m}^2$

Katuslae kasuskoormus kokku:  $q_{k,KL} = 2,0 * 0,5588 \approx 1,12 \text{ kN/m}^2$

## Lumekoormus

Katuse lumekoormus vastavalt asukohale ja rahvuslikule lisale, kuna katuse kalle on  $\alpha \leq 30^\circ$ , siis  $\mu_i = 0,8$ .

$\alpha$  – katuse kaldenurk horisontaali suhtes

$\mu_i$  – lumekoormuse kujutegur

$$s = \mu_1 * C_e * C_t * s_k = 0,8 * 1 * 1 * 1,5 = 1,2 \text{ kN/m}^2, \text{ kus}$$

avatustegur  $C_e = 1,0$

soojustegur  $C_t = 1,0$

$s$  – lumekoormus katusel

$s_k$  – normatiivne lumekoormus maapinnal, Tallinnas  $s_k = 1,5 \text{ kN/m}^2$

Tulenevalt arhitektuursest lahendusest on ka katus astmeline, mistõttu tuleb arvestada lumekoormuse määramisel ka lume võimaliku kogunemisega taoliste astmete juures. Tulenevalt astme kõrgusest  $h = 1,0 \text{ m}$  on hange pikkus  $l_s = 2 * h = 2 * 1,0 = 2,0 \text{ m}$ . Tulenevalt võimalikust soojustuse mõningast paksuse erinevusest astmetel on võetud hange pikkus  $l_s = 2,2 \text{ m}$  varu kasuks. Lume puistemahukaal  $\gamma = 2,0 \text{ kN/m}^3$ . Astme kõrvale tekkiva lume kuhja täiendava koormuse leidmiseks on kasutatud kujutegurit  $\mu_2$ .

$$\mu_2 = \frac{\gamma * h}{s_k} = \frac{2 * 1,1}{1,5} \approx 1,47$$

Lumekoormus takistuse kõrval:

$$s = \mu_2 * C_e * C_t * s_k = 1,47 * 1 * 1 * 1,5 = 2,2 \text{ kN/m}^2$$

## 2.4 Seinaelemendi koormused

Igal korral on võimalik kirjeldatud koormused. Välisseina kandva CLT-st osa paksuseks on eeldatud 220 mm.

### Omakaalukoormus

Kandev CLT seinosa 220mm:  $g_{k1} = 0,22 * 4,2 = 0,92 \text{ kN/m}^2$

Välisseina soojustus mineraalvill 200mm:  $g_{k2} = 0,2 * 1,4 = 0,28 \text{ kN/m}^2$

Tuuletõkkeplaat 50mm:  $g_{k3} = 0,05 * 1,4 = 0,07 \text{ kN/m}^2$

Roovitus 22x50mm sammuga 600mm:  $g_{k4} = 0,022 * 0,05 * 0,6 * 3,5 = 0,002 \text{ kN/m}^2$

Tsementkiud fassaadiplaat paksusega 10mm:  $g_{k5} = 0,01 * 18 = 0,18 \text{ kN/m}^2$

Topelfassaadi eeldatav omakaalukoormus:  $g_{k6} = 0,5 \text{ kN/m}^2$

Seinaelemendi omakaalukoormus kokku:  $g_{k,VL} = 0,92 + 0,28 + 0,07 + 0,002 + 0,18 + 0,5 = 2,05 \text{ kN/m}^2$

### Tuulekoormus

Maastikutüüp: III

Seinaelement asub kõrgusvahemikus 2,5 m ja 6,5 m, mistõttu valin  $z = 6,5 \text{ m}$ . Vastav tuule kiirusrõhk tuule baaskiiruse 21 m/s puhul on:

$$q_p(6,5) = 12,81 * \ln^2 \frac{6,5}{0,03} + 89,64 * \ln^2 \frac{6,5}{0,03} = 396,9 \text{ N/m}^2$$

Ristkülikulise põhiplaani hoonete puhul, mille kõrgus on väiksem kui hoone laius:

$$q_p(z_e) = q_p(z) = 396,9 \text{ N/m}^2$$

Kuna suhe  $h/b$  on ligilähedane ühega, on valitud  $c_{pe}$  väärtused vastavast lahtrist.

Tuulerõhk välisseintele erinevates tsoonides:

$$w_{e,A} = q_p(z_e) * c_{pe} = 396,9 * (-1,2) = -0,476 \text{ kN/m}^2$$

$$w_{e,B} = q_p(z_e) * c_{pe} = 396,9 * (-0,8) = -0,328 \text{ kN/m}^2$$

$$w_{e,D} = q_p(z_e) * c_{pe} = 396,9 * 0,8 = 0,328 \text{ kN/m}^2$$

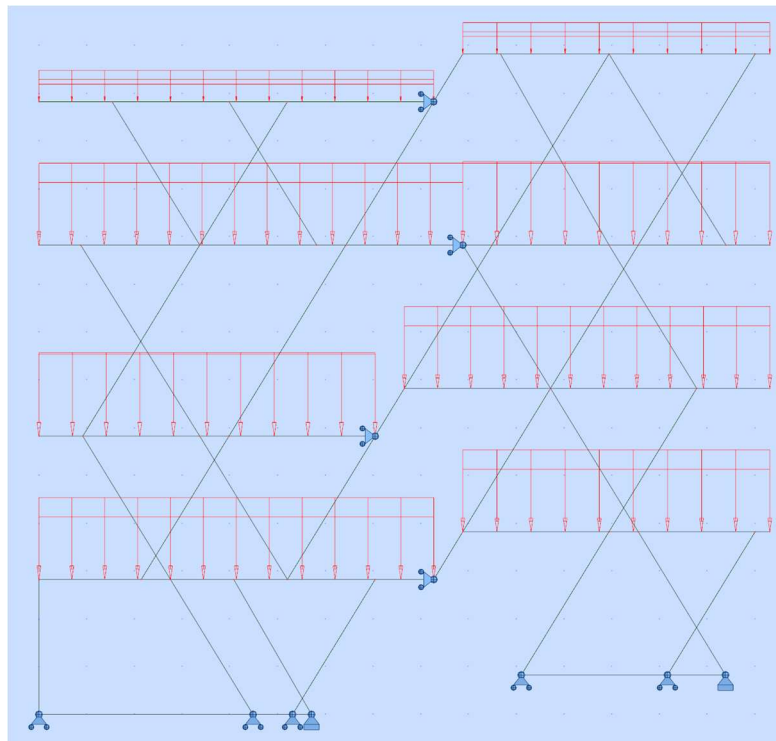
$$w_{e,E} = q_p(z_e) * c_{pe} = 396,9 * (-0,5) = -0,198 \text{ kN/m}^2$$

Tsooni A laius otsaseinal tuulepoolsest nurgast on  $15,3/5 = 3,06 \text{ m}$ , ülejäänud osa otsaseinal on tsoon B. Tuulepoolsele seinal on tsoon D ning tuulealusel seinal paikneb tsoon E.

## 2.5 Koormuskombinatsioonid ja sisejõud

Koormuste osavarutegurid ning kombinatsioonitegurid on valitud tulenevalt piirseisundist ning koormuse liigist vastavalt standardile EVS-EN 1990:2002 [4]. Katus- ja vahelae sisejõud on leitud ehitusmehaanikast tuntud valemite abil.

Seinaelemendi sisejõud on leitud Autodesk Robot Structural Analysis tarkvara kasutades, arvutuskeem on Joonis 2.4. Seinte ning vahelagede koormused on lisatud joonkoormusena taladele, postidel on eeldatud mõlemad otsad liigendkinnituseks varu kasuks. Hoone keskele on lisatud horisontaalsed toed korruste tasapinnas, sest hoone üldjäikuse tagamine on eeldatud trepikoja seinte abil.



Joonis 2.4 Eestvaate arvutuskeem

### 2.5.1 Vahelagi

Peatükis 2.2 on toodud vahelae koormuste arvutus, kusjuures saadud omakaalukoormus on  $g_{k,VL} = 3,50 \text{ kN/m}^2$  ning kasuskoormus  $q_{k,VL} = 2,80 \text{ kN/m}^2$ . Sisejõud on leitud suurima sildega ( $l = 5520 \text{ mm}$ ) vahelaepaneelile laiussega  $b = 3000 \text{ mm}$ .

#### Kandepiirseisund

Koormuskombinatsioon:

$$P_d = \gamma_G * g_{k,VL} + \gamma_Q * q_{k,VL} = 1,2 * 3,5 + 1,5 * 2,8 = 8,40 \text{ kN/m}^2$$

Toereaktsioon:

$$F_{Ed,VL} = \frac{P_d * b * l}{2} = \frac{8,40 * 3,0 * 5,52}{2} = 69,55 \text{ kN}$$

Paindemoment ava keskel:

$$M_{Ed,VL} = \frac{P_d * b * l^2}{8} = \frac{8,40 * 3,0 * 5,52^2}{8} = 95,98 \text{ kNm}$$

### Kandepiiriseisund tule olukord

Erakorralise arvutusolukorra koormuskombinatsioon:

$$P_d = g_{k,VL} + \psi_1 * q_{k,VL} = 3,5 + 0,5 * 2,8 = 4,9 \text{ kN/m}^2$$

Toereaktsioon:

$$F_{Ed,VL} = \frac{P_d * b * l}{2} = \frac{4,9 * 3,0 * 5,52}{2} = 40,57 \text{ kN}$$

Paindemoment ava keskel:

$$M_{Ed,VL} = \frac{P_d * b * l^2}{8} = \frac{4,90 * 3,0 * 5,52^2}{8} = 55,99 \text{ kNm}$$

### Kasutuspiiriseisund

Piirläbipainde leidmisel kasutatakse normkombinatsiooni kohese läbipainde leidmiseks.

$$P_d = g_{k,VL} + q_{k,VL} = 3,50 + 2,8 = 6,30 \text{ kN/m}^2$$

## 2.5.2 Katuslagi

Peatükis 2.32.3 on toodud katuslae koormuste arvutus, kusjuures saadud omakaalukoormus on  $g_{k,KL} = 0,95 \text{ kN/m}^2$  ning kasuskoormus  $q_{k,KL} = 1,12 \text{ kN/m}^2$ . Sisejõud on leitud suurima sildega ( $l = 5520 \text{ mm}$ ) vahelaepaneelile laiussega  $b = 3000 \text{ mm}$ .

### Kandepiiriseisund

Koormuskombinatsioon

$$P_d = \gamma_G * g_{k,KL} + \gamma_Q * q_{k,KL} = 1,2 * 0,95 + 1,5 * 1,12 = 2,82 \text{ kN/m}^2$$

Toereaktsioon:

$$F_{Ed,KL} = \frac{P_d * b * l}{2} = \frac{2,82 * 3,0 * 5,52}{2} = 23,35 \text{ kN}$$

Paindemoment ava keskel:

$$M_{Ed,KL} = \frac{P_d * b * l^2}{8} = \frac{2,82 * 3 * 5,52^2}{8} = 32,22 \text{ kNm}$$

### Kandepiiriseisund tule olukord

Erakorralise arvutusolukorra koormuskombinatsioon:

$$P_d = g_{k,KL} + \psi_1 * q_{k,KL} = 0,95 + 0,5 * 1,12 = 1,51 \text{ kN/m}^2$$

Toereaktsioon:

$$F_{Ed,KL} = \frac{P_d * b * l}{2} = \frac{1,51 * 3,0 * 5,52}{2} = 12,50 \text{ kN}$$

Paindemoment ava keskel:

$$M_{Ed,KL} = \frac{P_d * b * l^2}{8} = \frac{1,51 * 3,0 * 5,52^2}{8} = 17,25 \text{ kNm}$$

### Kasutuspiiriseisund

Piirläbipainde leidmisel kasutatakse normkombinatsiooni kohese läbipainde leidmiseks.

$$P_d = g_{k,KL} + q_{k,KL} = 0,95 + 1,12 = 2,07 \text{ kN/m}^2$$

### 2.5.3 Valitud seinaelement

Kuigi välissein koosneb diagonaalsetest postidest, mille vahel paiknevad aknad, on sisejõudude leidmisel eeldatud täispuitseinaga. Sellisel juhul on lubatud paigaldada postide vahele kuni  $t = \frac{0,92}{25} = 36,8 \text{ mm}$  kogupaksusega aknad eeldusel, et akende mahukaal on  $\gamma_{klaas} = 25 \text{ kN/m}^2$ . Kuna sellise kogupaksusega aknaid tõenäoliselt ei paigaldada, on tegu lihtsustusega varu kasuks.

Valitud seinaelement on leitav Joonis 5.1. Teljel A1-A5 on eeldatud, et parapett on seinalaaiune ning et selle kõrgus on 1,5m katuslae teljest. Vastavas telgede vahemikus IV korruse seiniosa kõrgus 3,0 m ning III korruse seiniosa kõrgus on 4,0 m. II korrusel on vastav kõrgus 3,0 m.

Seinaelemendi sisejõud on leitud Autodesk Robot tarkvara abil ning on leitavad Joonistel 2.5, 2.6 ja 2.7. Vastavast elemendist kontrollitakse kolme alamelemendi kandevõimet, nendeks on suurima pikijõuga koormatud post ning elemendi ülaosas paiknev kõrge tala ja alaosas paiknev madal tala koos sellega töötava kõrge talaga. Arvutatavate elementide koormuste väärtuste leidmist ei ole välja toodud, kuna välisseina postisüsteem jaotab koormused ümber viisil, mil nende käsitsi arvutamine ei anna täielikult õigeid tulemusi. Siiski on kontrollitud tarkvaraga leitud väärtusi ligikaudsete käsitsi arvutustega ning tulemused olid võrreldavad.

### Kandepiiriseisund

Koormuskombinatsioon:

$$P_d = \gamma_G * g_{k,VL} + \gamma_G * g_{k,KL} + \gamma_G * g_{k,S} + \gamma_Q * q_{k,VL} + \psi_0 * \gamma_Q * q_{k,SN}$$

### Kandepiiriseisund tule olukord

Erakorralise arvutusolukorra koormuskombinatsioon:

$$P_d = g_{k,VL} + g_{k,KL} + g_{k,S} + \psi_1 * q_{k,VL} + \psi_2 * q_{k,SN}$$

### **Posti sisejõud kandepiirseisundis**

Maksimaalne survejõud: 195,90 kN

Maksimaalne paindemoment samas postis tuulekoormusest posti keskel:

$$M_{Ed,P} = \frac{w_{eA} \cdot b \cdot l^2}{8} = \frac{1,5 \cdot -0,476 \cdot 2,143 \cdot 3,52^2}{8} = -2,37 \text{ kNm}$$

### **Posti sisejõud tule olukorras**

Maksimaalne survejõud: 132,90 kN

Maksimaalne paindemoment samas postis tuulekoormusest posti keskel:

$$M_{Ed,P} = \frac{w_{eA} \cdot b \cdot l^2}{8} = \frac{1,0 \cdot -0,476 \cdot 2,143 \cdot 3,52^2}{8} = -1,58 \text{ kNm}$$

### **Kõrge tala sisejõud kandepiirseisundis**

Maksimaalne tõmbejõud: 213,53 kN

Maksimaalne põikjõud: 48,02 kN

Maksimaalne paindemoment: 29,20 kNm

### **Madala tala sisejõud kandepiirseisundis**

Maksimaalne tõmbejõud: 279,43 kN

### **Madalat tala toetava kõrge tala sisejõud kandepiirseisundis**

Maksimaalne tõmbejõud: 279,43 kN

Maksimaalne põikjõud: 168,12 kN

Maksimaalne paindemoment: 95,74 kNm

### **Kõrge tala sisejõud tule olukorras**

Maksimaalne tõmbejõud: 145,36 kN

Maksimaalne põikjõud: 32,06 kN

Maksimaalne paindemoment: 19,50 kNm

### **Madala tala sisejõud tule olukorras**

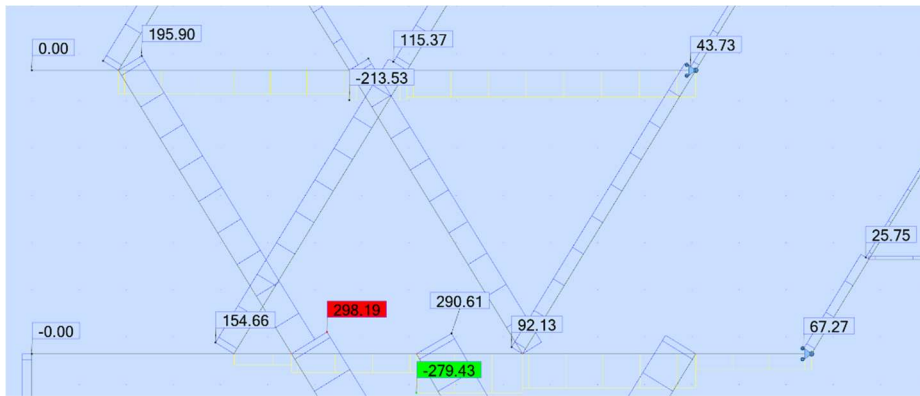
Maksimaalne tõmbejõud: 186,42 kN

### **Madalat tala toetava kõrge tala sisejõud tule olukorras**

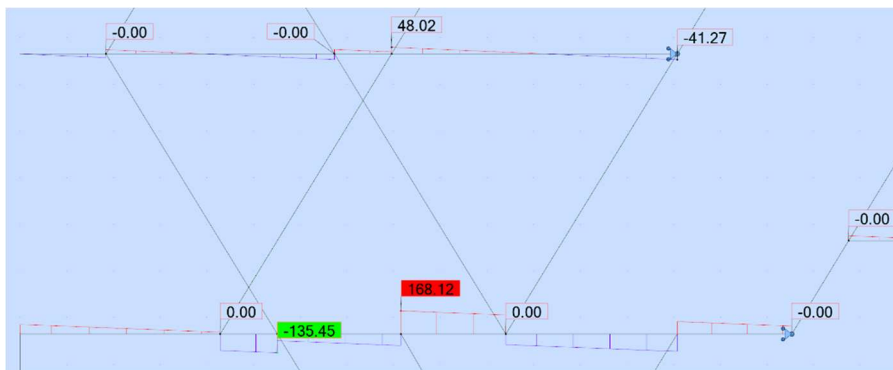
Maksimaalne tõmbejõud: 186,42 kN

Maksimaalne põikjõud: 112,27 kN

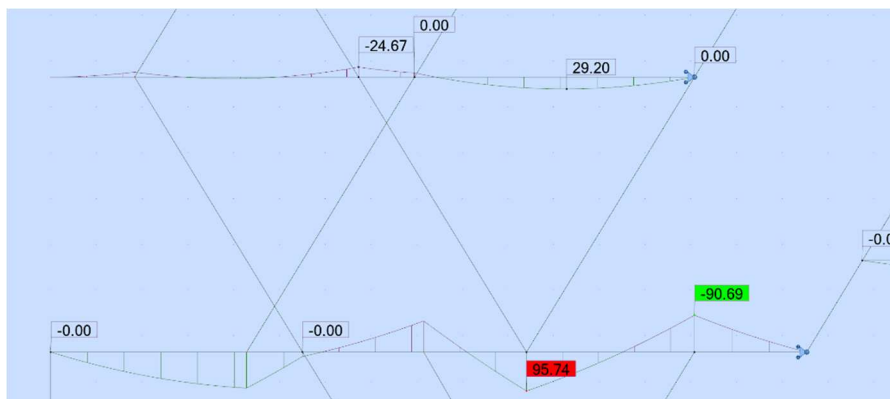
Maksimaalne paindemoment: 64,04 kNm



Joonis 2.5 Seinaelemendi pikijõud



Joonis 2.6 Seinaelemendi põikjõud



Joonis 2.7 Seinaelemendi pändemomendid



### 3 VAHELAELEMENDI KANDEVÕIME KONTROLL

Käesolevas peatükis on kajastatud suurima puhassildega vahelaelemendi kandevõime kontroll. Kuna Eurokood 5-s [8] pole kajastatud eraldi ristkihtliimpuitu, kasutan lamelliimpuidu kui sarnase materjali tüüpvaartusi erinevate abitegurite ja abiväärtuste leidmisel. On eeldatud, et konstruktsioonielementide paigaldamisel vastab materjali niiskus kasutusaja niiskusele. Ristkihtpuit elemendid peavad olema toodetud vastavalt Peeti Puit OÜ ETA-le nr 22/0107, mis on väljastatud 08.03.2022.

#### 3.1 Lähteandmed

Suurim puhasava on  $l=5520\text{mm}$  ning ühe paneeli laius  $b=3000\text{mm}$ . Sellise vahelaepaneeli kandepiirseisundi toereaktsioon  $F_{Ed,VL} = 69,55\text{ kN}$  ning maksimaalne paindemoment kandepiirseisundis  $M_{Ed,VL} = 95,98\text{ kNm}$ .

Eluruumide vahelagi asub köetavates sisetingimustes, mistõttu on valitud 1. kasutusklass. Kuna vahelaee mõjuvad kestusklassi poolest erinevad koormused (omakaal – alaline ja kasuskoormus – keskkestev), siis on valitud  $k_{mod}$  väärtus lühima kestusklassiga koormuse järgi, milleks on  $k_{mod} = 0,80$ .

Materjali varutegur  $\gamma_m = 1,25$ , sest tegu on lamelliimpuidu analoogmaterjaliga.

Vastavalt Peetri Puidu tehnilisele infole [9] kasutatakse ristkihtpuitelemendi tootmisel lamelliimpuidu omadustele vastavaid lamelle (vt Lisa 1). Käesoleval juhul on valitud C24 lamellid, kusjuures lamellid on valitud  $b = 200\text{ mm}$  ning paksus  $20\text{...}40\text{ mm}$ . Vahelaepaneel on nähtav Joonis 3.1. Sellest tulenevalt on lamelli  $b/t$  suhe  $> 4,0$ . Valitud andmete alusel on lamellide tehnilised omadused alljärgnevad:

$$f_{m,CLT,k} = 24\text{ MPa};$$

$$f_{v,CLT,k} = 3,5\text{ MPa};$$

$$f_{r,CLT,k} = 1,2\text{ MPa};$$

$$E_{0,CLT,k} = 11500\text{ MPa};$$

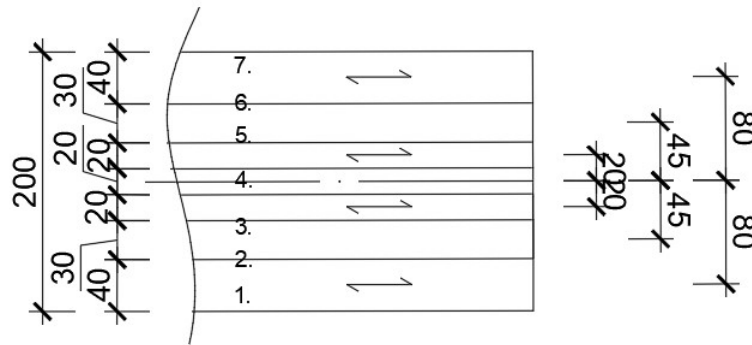
$$G_{r,CLT,k} = 65\text{ MPa}.$$

Vastavad arvutusväärtused on alljärgnevad:

$$f_{m,CLT,d} = k_{mod} * \frac{f_{m,CLT,k}}{\gamma_m} = 0,8 * \frac{24}{1,25} \approx 15,36\text{ MPa}$$

$$f_{v,CLT,d} = k_{mod} * \frac{f_{v,CLT,k}}{\gamma_m} = 0,8 * \frac{3,5}{1,25} \approx 2,24\text{ MPa}$$

$$f_{r,CLT,d} = k_{mod} * \frac{f_{r,CLT,k}}{\gamma_m} = 0,8 * \frac{1,2}{1,25} \approx 0,77 \text{ MPa}$$



Joonis 3.1 CLT vahelaepaneeli skeem

### 3.2 Kandepiirseisundi kandevõime

Vahelaepaneeli kandevõime leidmisel on kasutatud Timoshenko painde- ja nihkedeformatsioone arvestava tala mudelit. Kuigi kasutatavat mudelit ei peeta täpseimaks (võrreldes Eurokoodeksis 5 oleva  $\gamma$ -meetodi või nihke analoogia meetodiga), on see praktikas tunnustatud ning käesoleva töö raames piisava täpsusega. Timoshenko tala mudel ei arvesta paindel ristikiududega kihte, mistõttu tuleb leida valitud talale vastav efektiivne paindejäikus ning välja on toodud pikikiudu kihtide andmed. [10]

$$\begin{aligned} E_1 = E_3 = E_5 = E_7 &= 11500 \text{ MPa}; & e_1 = e_7 &= 80 \text{ mm}; & e_3 = e_5 &= 20 \text{ mm}; \\ I_1 = I_7 &= \frac{3000 \cdot 40^3}{12} = 16,0 \times 10^6 \text{ mm}^4; & I_3 = I_5 &= \frac{3000 \cdot 20^3}{12} = 2,0 \times 10^6 \text{ mm}^4; \\ S_1 = S_7 &= 3000 \cdot 40 \cdot 80 = 9,6 \times 10^6 \text{ mm}^3; & S_3 = S_5 &= 3000 \cdot 20 \cdot 20 = 1,2 \times 10^6 \text{ mm}^3; \\ A_1 = A_7 &= 3000 \cdot 40 = 120\,000 \text{ mm}^2; & A_3 = A_5 &= 3000 \cdot 20 = 60\,000 \text{ mm}^2; \end{aligned}$$

$$(EI)_{ef} = \sum(E_i \cdot I_i + E_i A_i \cdot e_i^2) = 2 \cdot 11500 \cdot 16,0 \times 10^6 + 2 \cdot 11500 \cdot 2,0 \times 10^6 + 2 \cdot 11500 \cdot 120\,000 \cdot 80^2 + 2 \cdot 11500 \cdot 60\,000 \cdot 20^2 \approx 1,86 \times 10^{13} \text{ MPa}$$

#### Paindekandevõime

Maksimaalsed servapinged:

$$\sigma_{max} = \frac{E_{0,CLT,mean} \cdot M_{Ed,VL} \cdot h}{(EI)_{ef} \cdot 2} = \frac{11500 \cdot 95,98 \times 10^6 \cdot 200}{1,86 \times 10^{13} \cdot 2} \approx 5,92 \text{ MPa}$$

$\sigma_{max} = 5,92 \text{ MPa} < f_{m,CLT,d} = 15,36 \text{ MPa}$ . Paindekandevõime on tagatud.

### Nihkekandevõime pikikiudu

Maksimaalsed nihkepinged pikikiudu:

$$\tau_{v,d} = \frac{F_{Ed,VL} * \Sigma(S * E_{0,CLT,mean})}{(EI)_{ef*b}} = \frac{69,55 \times 10^3}{1,86 \times 10^{13} * 3000} * 11500 * (9,6 \times 10^6 + 1,2 \times 10^6) \approx 0,15 \text{ MPa}$$

$\tau_{v,d} = 0,15 \text{ MPa} < f_{v,CLT,d} = 2,24 \text{ MPa}$ . Nihkekandevõime pikikiudu on tagatud.

### Nihkekandevõime ristikiudu

Maksimaalsed nihkepinged ristikiudu

$$\tau_{r,d} = \frac{F_{Ed,VL} * S * E_{0,CLT,mean}}{(EI)_{ef*b}} = \frac{69,55 \times 10^3}{1,86 \times 10^{13} * 3000} * 11500 * 9,6 \times 10^6 \approx 0,14 \text{ MPa}$$

$\tau_{r,d} = 0,14 \text{ MPa} < f_{r,CLT,d} = 0,77 \text{ MPa}$ . Nihkekandevõime ristikiudu on tagatud.

## 3.3 Kasutuspiirseisundi kontrollid

Kasutuspiirseisundi arvutused tehakse normatiivsete koormustega, milleks on toereaktsioon  $F_{Ed,VL} = 52,16 \text{ kN}$  ning paindemoment ava keskel  $M_{Ed,VL} = 71,99 \text{ kNm}$ . Peatükis 2.2 on leitud vahelae omakaalukoormus  $g_{k,VL} = 3,50 \text{ kN/m}^2$  ja kasuskoormus  $q_{k,VL} = 2,8 \text{ kN/m}^2$ .

### Lubatud piirläbipaine

Vahelaelementi on arvutatud kui tala kahel toel ning sellest tulenev lubatud piirläbipaine põrandatel vastavalt rahvusliku lisa tabelile 7.2 [8] on  $w_{net,fin} = \frac{l}{300} = \frac{5520}{300} = 18,4 \text{ mm}$ . Vahelaelemendil puudub eeltõus.

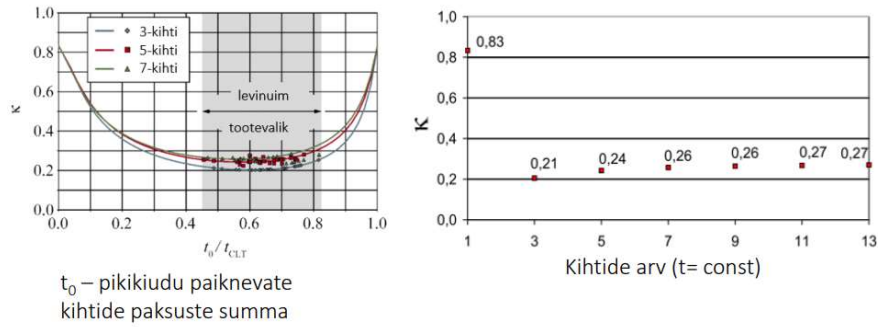
### Reaalsed läbipained

Kuna ristkihtliimpuit deformeerub toel, siis lisandub läbipaindele täiendav liige nihkest toel. Selle leidmiseks on kasutatud abitegureid. Kuna kõik lamellid on samast materjalist lihtsustub valem:

$$S_{tot} = \Sigma(G_{i,mean} * A_i) = 650 * 3000 * 200 = 3,90 \times 10^8 \text{ N}$$

Nihkekorrektuuri tegur  $\kappa$  on valitud Joonis 3.2 oleva skeemi kohaselt.  $\kappa = 0,26$ , sest tegu on 7-kihilise CLT paneeliga.

$$S_{CLT} = S_{tot} * \kappa = 3,90 \times 10^8 * 0,26 = 1,01 \times 10^8 \text{ N}$$



Joonis 3.2 Nihkekorrektuuriteguri  $\kappa$  arvutus [11] E. Tuhkaneni tõlge

Koormuse poolt hetkelised paigutised on alljärgnevad (koormus on võetud kogu paneeli laiuses):

$$u_{inst,G} = \frac{5 \cdot g_{k,VL} \cdot l_e^4}{384 \cdot (EI)_{ef}} + \frac{g_{k,VL} \cdot l^2}{8 \cdot S_{CLT}} = \frac{5 \cdot (3,50 \cdot 10^{-3} \cdot 3000) \cdot 5520^4}{384 \cdot 1,86 \cdot 10^{13}} + \frac{3,50 \cdot 10^{-3} \cdot 5520^2}{8 \cdot 1,01 \cdot 10^8} \approx 6,9 \text{ mm}$$

$$u_{inst,Q} = \frac{5 \cdot q_{k,VL} \cdot l_e^4}{384 \cdot (EI)_{ef}} + \frac{q_{k,VL} \cdot l^2}{8 \cdot S_{CLT}} = \frac{5 \cdot (2,8 \cdot 10^{-3} \cdot 3000) \cdot 5520^4}{384 \cdot 1,86 \cdot 10^{13}} + \frac{2,80 \cdot 10^{-3} \cdot 5520^2}{8 \cdot 1,01 \cdot 10^8} \approx 5,6 \text{ mm}$$

Sama roome käitumisega elementide puhul on puidu roome ja niiskuse koosmõju ajas ning nende mõjust tekkinud deformatsioone on võimalik arvestada deformatsiooniteguri  $k_{def} = 0,6$  abil. Antud deformatsioonitegur vastab kasutusklassile 1. Lõplikud läbipained, mis arvestavad ka roome ajalist mõju, on alljärgnevad:

$$u_{fin,G} = u_{inst,G} \cdot (1 + k_{def}) = 6,9 \cdot (1 + 0,6) \approx 11,1 \text{ mm}$$

$$u_{fin,Q} = u_{inst,Q} \cdot (1 + \psi_2 \cdot k_{def}) = 5,6 \cdot (1 + 0,3 \cdot 0,6) \approx 6,6 \text{ mm}$$

Lõplik läbipaine:

$$u_{fin} = u_{fin,G} + u_{fin,Q} = 11,1 + 6,6 = 17,7 \text{ mm}$$

$u_{fin} = 17,7 \text{ mm} < w_{net,fin} = 18,4 \text{ mm}$ . Vahelaelemendi läbipaine on lubatud piirides.

### 3.4 Tuleolukorra kandevõime

Elementi tuleolukorras arvutatakse kandepiiriseisundi erakorralise olukorra koormuskombinatsiooni koormustega, mis käesoleval juhul on toereaktsioon  $F_{Ed,VL,fi} = 40,57 \text{ kN}$  ning paindemoment ava keskel  $M_{Ed,VL,fi} = 55,99 \text{ kNm}$ . Põlemiskiirus vastavalt Eurokoodeks 5 [12] ja Peetri Puit OÜ andmetele on  $\beta_0 = 0,65 \text{ mm/min}$  eeldusel, et lamellidevahelised praod on kuni 2 mm. Tulenevalt hoone mõõtudest ning kasutusotstarbest, esitatakse kandekonstruktsioonidele nõutav tulepüsivus R120 [13]. Paneelide söestumist on arvatud vastavalt „Tuleohutud puitmajad 3“ käsiraamatule

[14] ja kandevõimed vastavalt Eurokoodeks 5-le. Käsiraamatu põhjal on valitud nulltugevusega kihi paksuseks  $d_0 = 10$  mm. Ümberarvutustegur  $k_{fi} = 1,15$ , avariilukorra modifikatsioonitegur  $k_{mod,fi} = 1,0$  ning materjali osavarutegur tule olukorras  $\gamma_{M,fi} = 1,0$ .

Lineaarse põlemise korral oleks söestumissügavus alljärgnev:

$$d_{char} = \beta_0 * T = 0,65 * 120 = 78 \text{ mm}$$

Kuna söestumissügavus on suurem kui esimese lamelli paksus, siis tuleb arvesse võtta liimvuugi lagunemist tules. Kui söestumissügavus jõuab lamelli paksuseni, siis toimub söestunud lamelli eemaldumine liimi sulamise tagajärjel, mistõttu avaneb tulele uus suurem nulltugevusega kiht. Eelneva tõttu hakkab järgmine lamell põlema kahekordse kiirusega kuniks saavutatakse söestumissügavus 25mm, seejärel aeglustub põlemiskiirus algväärtuseni.

$$\text{Esimese lamelli söestumisaeg: } T_1 = \frac{t}{\beta_0} = \frac{40}{0,65} = 61,5 \text{ min}$$

$$\text{Teise lamelli esimese 25mm topeltkiirusega söestumisaeg: } T_{2,1} = \frac{t}{2*\beta_0} = \frac{25}{2*0,65} = 19,2 \text{ min}$$

$$\text{Teise lamelli ülejäänud osa söestumise aeg: } T_{2,2} = \frac{t}{\beta_0} = \frac{5}{0,65} = 7,7 \text{ min}$$

$$\text{Kolmanda ja neljanda lamelli söestumisaeg: } T_3 = T_4 = \frac{t}{2*\beta_0} = \frac{20}{2*0,65} = 15,4 \text{ min}$$

Viies lamell jõuab R120 saavutamiseks ära söestuda vaid 0,8 min jooksul, mis teeb söestumissügavuseks  $d_{char,5} = 2 * \beta_0 * T = 2 * 0,65 * 0,8 = 1,0$  mm

Eelneva põhjal on kogu söestumissügavus 120 min jooksul:  $d_{char} = 40 + 25 + 5 + 20 + 20 + 1,0 = 111$  mm

Efektiivne söestumissügavus on:

$$d_{ef} = d_{char} + d_0 = 111 + 10 = 121 \text{ mm}$$

Sellest tulenevalt on vahelaelemendi jääkristlõike paksus:

$$h_{ef} = h - d_{ef} = 200 - 121 = 79 \text{ mm}$$

Tuleolukorras on ristkihtlamell puidu omaduste kirjeldamisel kasutatakse teistsuguseid varutegureid, mistõttu materjali tugevuste arvutusväärtused on alljärgnevad:

$$f_{m,CLT,d,fi} = k_{mod,fi} * k_{fi} * \frac{f_{m,CLT,k}}{\gamma_{M,fi}} = 1,0 * 1,15 * \frac{24}{1,0} \approx 27,6 \text{ MPa}$$

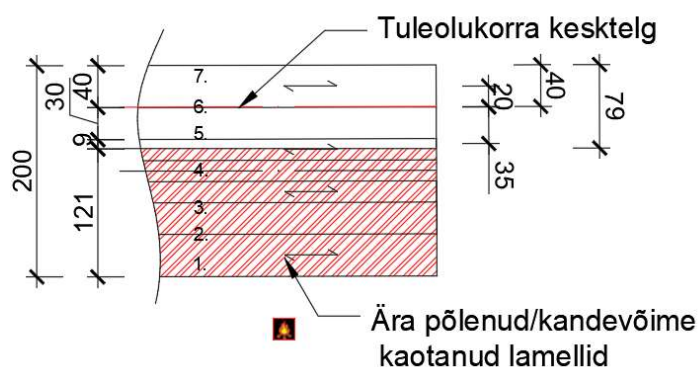
$$f_{v,CLT,d,fi} = k_{mod,fi} * k_{fi} * \frac{f_{v,CLT,k}}{\gamma_{M,fi}} = 1,0 * 1,15 * \frac{3,5}{1,0} \approx 4,03 \text{ MPa}$$

$$f_{r,CLT,d,fi} = k_{mod,fi} * k_{fi} * \frac{f_{r,CLT,k}}{\gamma_{M,fi}} = 1,0 * 1,15 * \frac{1,2}{1,0} \approx 1,38 \text{ MPa}$$

Sarnaselt eelnevale on leitud efektiivne paindejäikus vastavalt Timoshenko mudelile ning välja on toodud pikikiudu kihtide andmed. Vastava olukord on kajastatud Joonis 3.3.

$$\begin{aligned}
 E_3 = E_5 = E_7 &= 11500 \text{ MPa}; & e_7 &= 19,5 \text{ mm}; e_5 = 35 \text{ mm}; \\
 I_7 &= \frac{3000 \cdot 40^3}{12} = 16,0 \times 10^6 \text{ mm}^4; & I_5 &= \frac{3000 \cdot 9^3}{12} = 0,18 \times 10^6 \text{ mm}^4; \\
 S_7 &= 3000 \cdot 40 \cdot 19,5 = 2,34 \times 10^6 \text{ mm}^3; & S_5 &= 3000 \cdot 9 \cdot 35 = 0,95 \times 10^6 \text{ mm}^3; \\
 A_7 &= 3000 \cdot 40 = 120\,000 \text{ mm}^2; & A_5 &= 3000 \cdot 9 = 27\,000 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (EI)_{ef,fi} &= \sum(E_i \cdot I_i + E_i \cdot A_i \cdot e_i^2) = 11500 \cdot 16,0 \times 10^6 + 11500 \cdot 0,18 \times 10^6 + \\
 &+ 11500 \cdot 120\,000 \cdot 19,5^2 + 11500 \cdot 27\,000 \cdot 35^2 \approx 1,09 \times 10^{12} \text{ MPa}
 \end{aligned}$$



Joonis 3.3 Vahelaelemendi skeem tuleolukorras

### Paindekandevõime

Maksimaalsed servapinged:

$$\sigma_{max,fi} = \frac{E_{0,CLT,mean} \cdot M_{Ed,VL,fi} \cdot h}{(EI)_{ef,fi} \cdot 2} = \frac{11500 \cdot 55,99 \times 10^6 \cdot 79}{1,09 \times 10^{12} \cdot 2} \approx 23,31 \text{ MPa}$$

$\sigma_{max,fi} = 23,31 \text{ MPa} < f_{m,CLT,d,fi} = 27,6 \text{ MPa}$ . Paindekandevõime on tagatud.

### Nihkekandevõime pikikiudu

Maksimaalsed nihkepinged pikikiudu:

$$\tau_{v,d,fi} = \frac{F_{Ed,VL,fi} \cdot \sum(S \cdot E_{0,CLT,mean})}{(EI)_{ef,fi} \cdot b} = \frac{40,57 \times 10^3}{1,09 \times 10^{12} \cdot 3000} \cdot 11500 \cdot (2,34 \times 10^6 + 0,95 \times 10^6) \approx 0,47 \text{ MPa}$$

$\tau_{v,d,fi} = 0,47 \text{ MPa} < f_{v,CLT,d,fi} = 4,03 \text{ MPa}$ . Nihkekandevõime pikikiudu on tagatud.

### **Nihkekandevõime ristikiudu**

Maksimaalsed nihkepinged ristikiudu

$$\tau_{r,d,fi} = \frac{F_{Ed,VL,fi} * S * E_{0,CLT,mean}}{(EI)_{ef,fi} * b} = \frac{40,57 \times 10^3}{1,09 \times 10^{12} * 3000} * 11500 * 2,34 \times 10^6 \approx 0,33 \text{ MPa}$$

$\tau_{r,d,fi} = 0,33 \text{ MPa} < f_{r,CLT,d,fi} = 1,38 \text{ MPa}$ . Nihkekandevõime ristikiudu on tagatud.

Vahelaelemendi tulepüsivus R120 on tagatud.

Vahelaelemendi kandevõime on tagatud.

## 4 KATUSLAELEMENTI KANDEVÕIME KONTROLL

Käesolevas peatükis on kajastatud suurima puhassildega katuslaelemendi tugevuskontrollid. On eeldatud, et katuslaepaneeliks kasutatakse samasuguseid paneele kui vahelagedes, mistõttu on teatud arvutuslikud parameetrid samad.

### 4.1 Lähteandmed

Suurim puhasava on  $l=5520\text{mm}$  ning ühe paneeli laius  $b=3000\text{mm}$ . Sellise katuslaepaneeli kandepiirseisundi toereaktsioon  $F_{Ed,KL} = 23,35\text{ kN}$  ning maksimaalne paindemoment kandepiirseisundis  $M_{Ed,KL} = 32,22\text{ kNm}$ .

Kuna katuslagi ning vahelagi paiknevad sarnastes tingimustes ning neile mõjuvad sarnase kestusklassiga koormused. Vahelaepaneeli kandevõime kontrollil on katuslae täiendavaks kontrollimiseks vajalikud parameetrid juba välja arvutatud.

### 4.2 Kandepiirseisundi kandevõime

#### Paindekandevõime

Maksimaalsed servapinged:

$$\sigma_{max} = \frac{E_{0,CLT,mean} * M_{Ed,KL} * h}{(EI)_{ef} * 2} = \frac{11500 * 32,22 * 10^6 * 200}{1,86 * 10^{13} * 2} \approx 1,99\text{ MPa}$$

$\sigma_{max} = 1,99\text{ MPa} < f_{m,CLT,d} = 15,36\text{ MPa}$ . Paindekandevõime on tagatud.

#### Nihkekandevõime pikikiudu

Maksimaalsed nihkepinged pikikiudu:

$$\tau_{v,d} = \frac{F_{Ed,KL} * \sum(S * E_{0,CLT,mean})}{(EI)_{ef} * b} = \frac{23,35 * 10^3}{1,86 * 10^{13} * 3000} * 11500 * (9,6 * 10^6 + 1,2 * 10^6) \approx 0,05\text{ MPa}$$

$\tau_{v,d} = 0,05\text{ MPa} < f_{v,CLT,d} = 2,24\text{ MPa}$ . Nihkekandevõime pikikiudu on tagatud.

#### Nihkekandevõime ristikiudu

Maksimaalsed nihkepinged ristikiudu

$$\tau_{r,d} = \frac{F_{Ed,KL} * S * E_{0,CLT,mean}}{(EI)_{ef} * b} = \frac{23,35 * 10^3}{1,86 * 10^{13} * 3000} * 11500 * 9,6 * 10^6 \approx 0,05\text{ MPa}$$

$\tau_{r,d} = 0,05\text{ MPa} < f_{r,CLT,d} = 0,77\text{ MPa}$ . Nihkekandevõime ristikiudu on tagatud.



### 4.3 Kasutuspiiriseisundi kontrollid

Kasutuspiiriseisundi arvutused teostatakse normatiivse kombinatsiooni koormustega, milleks on toereaktsioon  $F_{Ed,KL} = 17,14$  kN ning paindemoment ava keskel  $M_{Ed,KL} = 23,65$  kNm.

#### Lubatud piirläbipaine

Lubatud piirläbipaine on  $w_{net,fin} = \frac{l}{300} = \frac{5520}{300} = 18,4$  mm. Sarnaselt vahelaepaneelile puudub katuslaelemendil eeltõus.

#### Realsed läbipainded

Koormuse poolt hetkelised paigutised on alljärgnevad (koormus on võetud kogu paneeli laiuses):

$$u_{inst,G} = \frac{5 \cdot g_{k,KL} \cdot l_e^4}{384 \cdot (EI)_{ef}} + \frac{g_{k,KL} \cdot l^2}{8 \cdot S_{CLT}} = \frac{5 \cdot (0,95 \times 10^{-3} \cdot 3000) \cdot 5520^4}{384 \cdot 1,86 \times 10^{13}} + \frac{0,95 \times 10^{-3} \cdot 5520^2}{8 \cdot 1,01 \times 10^8} \approx 1,9 \text{ mm}$$
$$u_{inst,Q} = \frac{5 \cdot q_{k,KL} \cdot l_e^4}{384 \cdot (EI)_{ef}} + \frac{q_{k,KL} \cdot l^2}{8 \cdot S_{CLT}} = \frac{5 \cdot (1,12 \times 10^{-3} \cdot 3000) \cdot 5520^4}{384 \cdot 1,86 \times 10^{13}} + \frac{1,12 \times 10^{-3} \cdot 5520^2}{8 \cdot 1,01 \times 10^8} \approx 2,2 \text{ mm}$$

Lõplikud läbipainded, mis arvestavad ka roome ajalist mõju, on alljärgnevad:

$$u_{fin,G} = u_{inst,G} \cdot (1 + k_{def}) = 1,9 \cdot (1 + 0,6) \approx 3,0 \text{ mm}$$
$$u_{fin,Q} = u_{inst,Q} \cdot (1 + \psi_2 \cdot k_{def}) = 2,2 \cdot (1 + 0,3 \cdot 0,6) \approx 2,6 \text{ mm}$$

Lõplik läbipaine:

$$u_{fin} = u_{fin,G} + u_{fin,Q} = 3,0 + 2,6 = 5,6 \text{ mm}$$

$u_{fin} = 5,6 \text{ mm} < w_{net,fin} = 18,4 \text{ mm}$ . Vahelaelemendi läbipaine on lubatud piirides.

### 4.4 Tuleolukorra kandevõime

Elemendi tuleolukorra koormused on käesoleval juhul toereaktsioon  $F_{Ed,KL,fi} = 12,50$  kN ning paindemoment ava keskel  $M_{Ed,KL,fi} = 17,25$  kNm. Põlemiskiirus ning põlemisjärgsed arvutuslikud parameetrid on samad, mis vahelaelemendil, nõutav tulepüsivus on samuti R120.

#### Paindekandevõime

Maksimaalsed servapinged:

$$\sigma_{max,fi} = \frac{E_{0,CLT,mean} \cdot M_{Ed,KL,fi} \cdot h}{(EI)_{ef,fi} \cdot 2} = \frac{11500 \cdot 17,25 \times 10^6 \cdot 132}{1,09 \times 10^{12} \cdot 2} \approx 10,18 \text{ MPa}$$

$\sigma_{max,fi} = 10,18 \text{ MPa} < f_{m,CLT,d,fi} = 27,6 \text{ MPa}$ . Paindekandevõime on tagatud.

### **Nihkekandevõime pikikiudu**

Maksimaalsed nihkepinged pikikiudu:

$$\tau_{v,d,fi} = \frac{F_{Ed,KL,fi} * \Sigma(S * E_{0,CLT,mean})}{(EI)_{ef,fi} * b} = \frac{12,50 \times 10^3}{1,09 \times 10^{12} * 3000} * 11500 * (2,34 \times 10^6 + 0,96 \times 10^6) \approx 0,14 \text{ MPa}$$

$\tau_{v,d,fi} = 0,14 \text{ MPa} < f_{v,CLT,d,fi} = 4,03 \text{ MPa}$ . Nihkekandevõime pikikiudu on tagatud.

### **Nihkekandevõime ristikiudu**

Maksimaalsed nihkepinged ristikiudu

$$\tau_{v,d,fi} = \frac{F_{Ed,KL,fi} * S * E_{0,CLT,mean}}{(EI)_{ef,fi} * b} = \frac{12,50 \times 10^3}{1,09 \times 10^{12} * 3000} * 11500 * 2,34 \times 10^6 \approx 0,01 \text{ MPa}$$

$\tau_{v,d,fi} = 0,01 \text{ MPa} < f_{r,CLT,d,fi} = 1,38 \text{ MPa}$ . Nihkekandevõime ristikiudu on tagatud.

Katuslaeelemendi tulepüsivus R120 on tagatud.

Katuslaepaneeli kandevõime on tagatud.



samas nurgas ligikaudu 3,5 m pikkune konsoolne tala. Sisejõudude ühtlustamise eesmärgil on lisatud hoone nurka I korrusele teljele 1 toepost.

## 5.1 Lähteandmed

Valitud seinaelemendi posti mõõtmed on  $b = 1040$  mm ning pikkus mööda telge  $l_{ef} = 3520$  mm. Arvutuskeemi puhul on eeldatud, et posti mõlemad otsad on liigendkinnitusega. Reaalselt on tegu pooljäiga kinnitusega, mistõttu on tegu liigendkinnituse puhul veaga varu kasuks. Sellise seinaelemendi enim koormatud posti kandepiirseisundi pikijõud  $F_{Ed} = 195,90$  kN.

Post asub köetavates sisetingimustes, mistõttu on valitud 1. kasutusklass. Postile mõjuvad erineva kestusklassiga koormused (omakaal – alaline ja tuul – lühiajaline), siis on valitud  $k_{mod}$  väärtus lühima kestusklassiga koormuse järgi, milleks on  $k_{mod} = 0,90$ .

Materjali varutegur  $\gamma_m = 1,25$ , sest tegu on lamell-liimpuidu analoogmaterjaliga. Sarnaselt lagedele kasutatakse ristkihtpuitelemendi tootmisel lamell-liimpuidu omadustele vastavaid lamelle. Käesoleval juhul on valitud C24 lamellid, kusjuures lamellid on valitud  $b = 200$  mm ning paksus 20...40mm. Sellest tulenevalt on lamelli  $b/t$  suhe  $> 4,0$ . Valitud andmete alusel on lamellide tehnilised omadused alljärgnevad:

$$f_{c,0,CLT,k} = 24 \text{ MPa};$$

$$f_{c,90,CLT,k} = 2,5 \text{ MPa};$$

$$E_{0,CLT,0,05} = 9600 \text{ MPa}.$$

Vastavad arvutusväärtused on alljärgnevad:

$$f_{c,0,CLT,d} = k_{mod} * \frac{f_{c,0,CLT,k}}{\gamma_m} = 0,9 * \frac{24}{1,25} \approx 17,28 \text{ MPa}$$

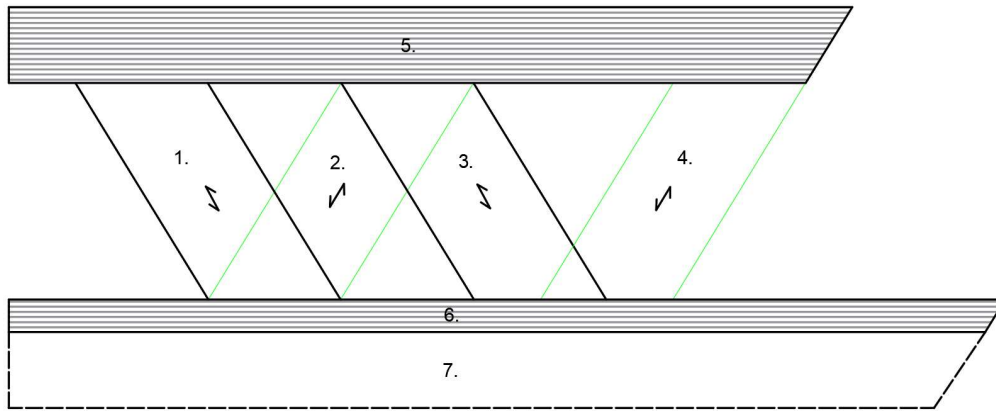
$$f_{c,90,CLT,d} = k_{mod} * \frac{f_{c,90,CLT,k}}{\gamma_m} = 0,9 * \frac{2,5}{1,25} = 1,8 \text{ MPa}$$

Seinalelemendi talad on arvutuskeemi kohaselt jätkuvtalad. Talade materjaliks on valitud liimpuit GL24h. Materjali lamellide tugevusomadused on samasugused nagu ristkihtliimpuidul.

## 5.2 Posti kandevõime

Posti kandevõime leidmisel on eeldatud, et lamellide pikikiud paiknevad piki posti telge ning ristkihtpuidu ristikihid siis vastavalt risti posti teljega. Kandevõime leidmisel on ära

kasutatud nii piki- kui ka ristikihtide kandevõime. Valitud elemendi enimkoormatud post on post nr 1 Joonis 5.2.



Joonis 5.2 Valitud seinalelemendi osad

### 5.2.1 Kandepiirseisund

Kandepiirseisundi arvutuste jaoks vajaminevad parameetrid on alljärgnevad:

$$e_1 = e_7 = 90 \text{ mm};$$

$$I_1 = I_7 = \frac{1040 \cdot 40^3}{12} = 5,55 \times 10^6 \text{ mm}^4;$$

$$A_1 = A_7 = 1040 \cdot 40 = 41\,600 \text{ mm}^2;$$

$$A_4 = 1040 \cdot 20 = 20\,800 \text{ mm}^2;$$

$$e_3 = e_5 = 25 \text{ mm};$$

$$I_3 = I_5 = \frac{1040 \cdot 30^3}{12} = 2,34 \times 10^6 \text{ mm}^4;$$

$$A_2 = A_3 = A_5 = A_6 = 1040 \cdot 30 = 31\,200 \text{ mm}^2;$$

$$E_{i=1\dots7,0,05} = 9600 \text{ MPa}$$

#### Survekandevõime

$$F_{Rd} = \sum A_{c,0(90),i} \cdot f_{c,0(90),d,i} = 2 \cdot 41\,600 \cdot 15,36 + 2 \cdot 31\,200 \cdot 15,36 + 2 \cdot 31\,200 \cdot 1,6 + 20\,800 \cdot 1,6 \approx 2665,7 \text{ kN}$$

$F_{Rd} = 2665,7 \text{ kN} < F_{Ed} = 195,9 \text{ kN}$ . Survekandevõime on tagatud.

#### Nõtkekandevõime

Posti nõtkekandevõime leidmisel on kasutatud ekvivalenttala meetodit. Selleks on leitud paindejäikus  $K_{CLT}$  ning nihkejäikus  $S_{CLT}$ .

$$K_{CLT} = \sum (E_{i,0,05} \cdot I_i + E_{i,0,05} \cdot A_i \cdot e_i^2) = 9600 \cdot 2 \cdot 5,55 \times 10^6 + 9600 \cdot 2 \cdot 2,34 \times 10^6 + 9600 \cdot 41\,600 \cdot 90^2 + 9600 \cdot 31\,200 \cdot 25^2 = 7,00 \times 10^{12} \text{ mm}^4$$

Nihkejäikuse leidmiseks on kasutatud abiteguried:

$$S_{tot} = \sum (G_{i,0,05} \cdot A_i) = 540 \cdot 1040 \cdot 220 = 1,24 \times 10^8 \text{ N}$$

Nihkekorrektuuri tegur  $\kappa$  on valitud Joonis 3.2 oleva skeemi kohaselt.  $\kappa = 0,26$ , sest tegu on 7-kihilise CLT paneeliga.

$$S_{CLT} = S_{tot} * \kappa = 1,24 \times 10^8 * 0,26 = 3,21 \times 10^7 \text{ N}$$

Valitud posti stabiilsuse leidmiseks vajaminevad abitegurid, mis on leitud vaid posti nõrgema telje suhtes:

$$n_{cr} = \frac{K_{CLT} * \pi^2}{l_k^2 * (1 + \frac{K_{CLT} * \pi^2}{S_{CLT} * l_k^2})} = \frac{7,00 \times 10^{12} * \pi^2}{3520 * (1 + \frac{7,00 \times 10^{12} * \pi^2}{3,21 \times 10^7 * 3520^2})} = 4,75 \times 10^6$$

Stabiilsusarvutus teostatakse suhtelise saleduse kaudu, milleks on:

$$\lambda_{rel} = \sqrt{\frac{A_{net,ef} * f_{c,0,CLT,k}}{n_{cr}}} = \sqrt{\frac{(2 * 41600 + 2 * 31200) * 24}{4,75 \times 10^6}} = 0,8578$$

Kuna  $\lambda_{rel} > 0,3$ , peavad keskelt surutud posti survepinged rahuldama tingimust  $\sigma_{c,0,CLT,d} \leq k_c * f_{c,0,CLT,d}$ , kus tegur  $k_c$  arvestab posti sirgust ja saledust. Seejuures tegur, mis arvestab surutud posti sirgust  $\beta_c = 0,1$ , sest tegu on liimpuidu analoogiga.

$$k = 0,5 * (1 + \beta_c * (\lambda_{rel} - 0,3) + \lambda_{rel}^2) = 0,5 * (1 + 0,1 * (0,8578 - 0,3) + 0,8578^2) = 0,8958$$

$$k_c = \min \left\{ \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel}^2}}, \frac{1,0}{0,8958 + \sqrt{0,8958^2 - 0,8578^2}} \right\} = 0,8666$$

Survepingete kontroll:

$$\sigma_{c,0,CLT,d} = \frac{F_{Ed}}{A_c} = \frac{195900}{2 * 41600 + 31200} = 1,35 \text{ MPa} \leq k_c * f_{c,0,CLT,d} = 0,8666 * 17,28 = 14,97 \text{ MPa}$$

Posti stabiilsus on tagatud.

### Surve ja painde koosmõju

Seinapostides tekitab tuulekoormus paindemomendi. Surve ja painde koosmõju on kontrollitud enimkoormatud posti, mis paikneb ka suurima tuulekoormusega tsoonis. Postile mõjuv paindemoment  $M_{Ed,P} = 2,37 \text{ kNm}$  ning sellele vastav paindepinge:

$$\sigma_{m,CLT,d} = \frac{M_{Ed,P} * h}{I * 2} = \frac{2,37 \times 10^6 * 220}{2,29 \times 10^8 * 2} = 0,36 \text{ MPa}$$

Surutud ja painutatud posti korral tuleb rahuldada järgnevat tingimust:

$$\left( \frac{\sigma_{c,0,CLT,d}}{f_{c,0,CLT,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,CLT,d}}{f_{m,CLT,d}} = \left( \frac{1,35}{17,28} \right)^2 + \frac{0,36}{17,28} = 0,027 \leq 1,0 \text{ Kandevõime on tagatud.}$$

Survele ja paindele töötavate postide korral tuleb neid kontrollida ka püsivusele kui  $\lambda_{rel} > 0,3$ , vastav tingimus on:

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,CLT,d}}{k_c * f_{c,0,CLT,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{m,CLT,d}}{f_{m,CLT,d}} = \left(\frac{1,35}{0,8666 * 17,28}\right)^2 + \frac{0,36}{17,28} = 0,111 \leq 1,0 \text{ Kandevõime on tagatud.}$$

## 5.2.2 Tuleolukorra kandevõime

Valitud seinaelemendi enim koormatud posti tuleolukorras mõjuv pikijõud  $F_{Ed,fi} = 132,90$  kN. Põlemiskiirus vastavalt Eurokoodeks 5 ja Peetri Puit OÜ andmetele on  $\beta_0 = 0,65$  mm/min eeldusel, et lamellidevahelised praod on kuni 2 mm. Tulenevalt hoone mõõtudest ning kasutusotstarbest, esitatakse kandekonstruktsioonidele nõutav tulepüsivus R120. Nulltugevusega kihi paksuseks on võetud  $d_0 = 16$  mm, sest seinapaksus on suurem kui 175 mm [14]. Kuna seinapostil toimub kahemõõtmeline söestumine, siis tuleb arvestada söestumise käigus tekkivate ümarate nurkadega. Ümardunud nurki võib asendada vastava tingliku söestumissügavusega, mille leidmiseks kasutatakse söestumiskiirust  $\beta_n = \beta_0 * k_n = 0,65 * 1,08 = 0,702$  mm/min. Tegur  $k_n = 1,08$ , sest tegu on liimpuidu analoogia.

Vastavalt juhendaja soovitusel on kasutatud tulevase Eurokoodeks 5 Osa 1-2 ristkihtliimpuidust laia seinaelemendi söestumissügavuse lihtsustatud arvutust [15]. Vastav arvutus lubab kasutada lineaarset söestumist eeldusel, et söestumiskiirust suurendatakse 1.2 korda.

$$d_{char} = 1,2 * \beta_n * T = 1,2 * 0,702 * 120 = 101 \text{ mm}$$

Efektiivne söestumissügavus:

$$d_{ef} = d_{char} + d_0 = 101 + 16 = 117 \text{ mm}$$

Sellest tulenevalt on posti jääkristlõike paksus:

$$h_{ef} = h - d_{ef} = 220 - 117 = 103 \text{ mm ning}$$

Posti jääkristlõike laius:

$$b_{ef} = b - d_{ef} * 2 = 1040 - 2 * 117 = 806 \text{ mm}$$

Tuleolukorras on ristkihtlamell puidu omaduste kirjeldamisel kasutatakse teistsuguseid varutegureid, mistõttu antud omaduste arvutusväärtused on alljärgnevad:

$$f_{c,0,CLT,d,fi} = k_{mod,fi} * k_{fi} * \frac{f_{c,0,CLT,k}}{\gamma_{M,fi}} = 1,0 * 1,15 * \frac{24}{1,0} \approx 27,6 \text{ MPa}$$

$$f_{c,90,CLT,d,fi} = k_{fi} * k_{mod,fi} * \frac{f_{c,90,CLT,k}}{\gamma_{M,fi}} = 1,0 * 1,15 * \frac{2,5}{1,0} \approx 2,88 \text{ MPa}$$





Valitud posti stabiilsuse leidmiseks vajaminevad abitegurid, mis on leitud vaid posti nõrgema telje suhtes:

$$n_{cr,fi} = \frac{K_{CLT,fi} \cdot \pi^2}{l_k^2 \cdot \left(1 + \frac{K_{CLT,fi} \cdot \pi^2}{S_{CLT,fi} \cdot l_k^2}\right)} = \frac{6,24 \times 10^{11} \cdot \pi^2}{3520 \cdot \left(1 + \frac{6,24 \times 10^{11} \cdot \pi^2}{1,16 \times 10^7 \cdot 3520^2}\right)} = 4,77 \times 10^5$$

Stabiilsusarvutus teostatakse suhtelise saleduse kaudu, milleks on:

$$\lambda_{rel,fi} = \sqrt{\frac{A_{net,ef} \cdot f_{c,0,CLT,k}}{n_{cr,fi}}} = \sqrt{\frac{(32240 + 24180) \cdot 24}{4,77 \times 10^5}} = 1,6848$$

Kuna  $\lambda_{rel,fi} > 0,3$ , peavad keskelt surutud posti survepinged rahuldama tingimust  $\sigma_{c,0,CLT,d,fi} \leq k_{c,fi} \cdot f_{c,0,CLT,d,fi}$ , kus tegur  $k_{c,fi}$  arvestab posti sirgust ja saledust. Seejuures tegur, mis arvestab surutud posti sirgust  $\beta_c = 0,1$ , sest tegu on liimpuidu analoogiga.

$$k_{fi} = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,fi} - 0,3) + \lambda_{rel,fi}^2) = 0,5 \cdot (1 + 0,1 \cdot (1,6848 - 0,3) + 1,6848^2) = 1,9885$$

$$k_{c,fi} = \min \left\{ \frac{1}{k_{fi} + \sqrt{k_{fi}^2 - \lambda_{rel,fi}^2}}, \frac{1,0}{1,9885 + \sqrt{1,9885^2 - 1,6848^2}} \right\} = 0,3284$$

Survepingete kontroll:

$$\sigma_{c,0,CLT,d,fi} = \frac{F_{Ed,fi}}{A_c} = \frac{132900}{32240 + 2418} = 2,36 \text{ MPa} \leq k_{c,fi} \cdot f_{c,0,CLT,d,fi} = 0,3284 \cdot 27,6 = 9,06 \text{ MPa}$$

Posti stabiilsus on tagatud.

### Surve ja painde koosmõju

Seinapostides tekitab tuulekoormus paindemomendi. Surve ja painde koosmõju on kontrollitud enimkoormatud posti, mis paikneb ka suurima tuulekoormusega tsoonis. Postile mõjuv paindemoment  $M_{Ed,P} = 1,58 \text{ kNm}$  ning sellele vastav paindepinge:

$$\sigma_{m,CLT,d} = \frac{M_{Ed,P} \cdot h}{I \cdot 2} = \frac{1,58 \times 10^3 \cdot 6 \cdot 10^3}{6,50 \times 10^7 \cdot 2} = 1,25 \text{ MPa}$$

Surutud ja painutatud posti korral tuleb rahuldada järgnevat tingimust:

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,CLT,d}}{f_{c,0,CLT,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{m,CLT,d}}{f_{m,CLT,d}} = \left(\frac{2,36}{27,6}\right)^2 + \frac{1,25}{27,6} = 0,053 \leq 1,0 \text{ Kandevõime on tagatud.}$$

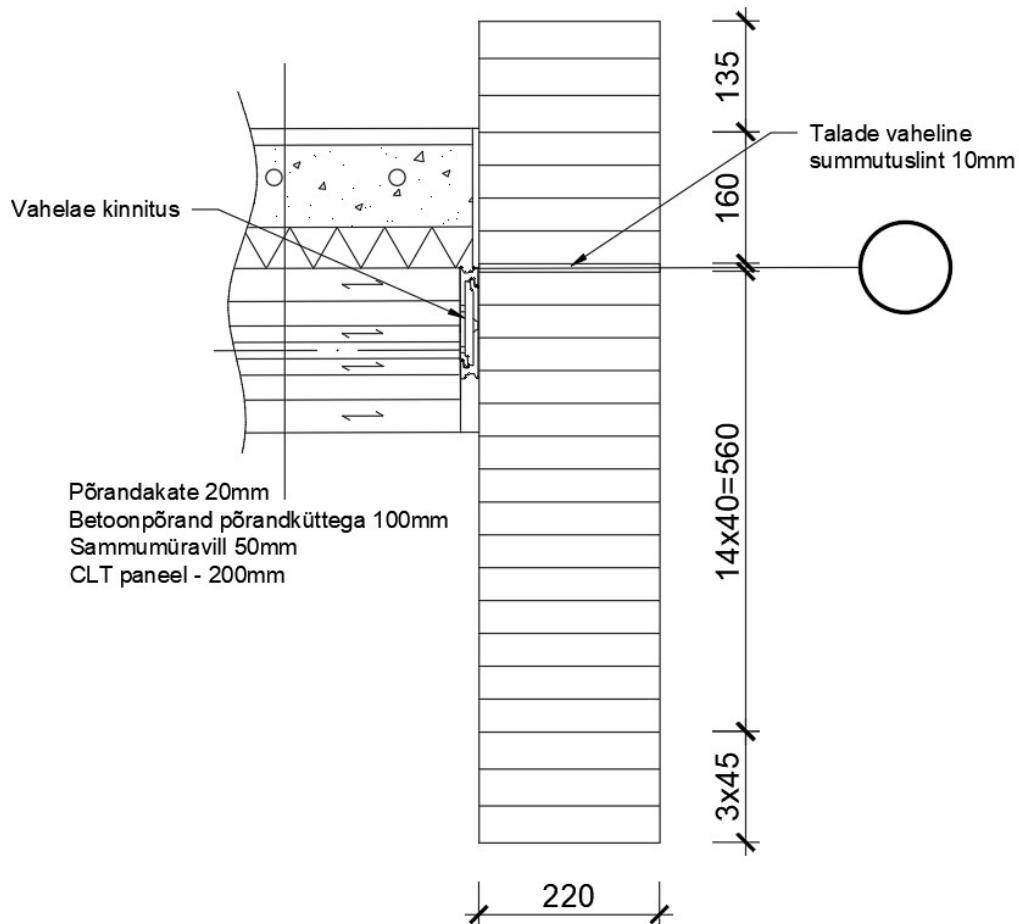
Survele ja paindele töötavate postide korral tuleb neid kontrollida ka püsivusele kui  $\lambda_{rel} > 0,3$ , vastav tingimus on:

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,CLT,d}}{k_c \cdot f_{c,0,CLT,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{m,CLT,d}}{f_{m,CLT,d}} = \left(\frac{2,36}{0,3284 \cdot 27,6}\right)^2 + \frac{1,25}{27,6} = 0,305 \leq 1,0 \text{ Kandevõime on tagatud.}$$

### 5.3 Vahelae-seinaelemendi sõlm

Seinaelemendi talade tugevuskontrolli teostamiseks on vaja teada lae ning seina sõlme põhimõttelist lahendust. Käesoleval juhul on jagatud korruste vahel paiknev 1,0 m kõrgune tala kaheks: 295 mm ja 695 mm kõrgusteks taladeks, mille vahel paikneb mürasummutuslint. Vahe- ja katuslagi kinnitub seinalelemendi ülemise kõrguse tala ülaosa külge.

Kuna madal tala on ligikaudu 13 korda väiksema jäikusega kui kõrge tala võib eeldada, et sisejõudude mõjul deformeerub madal tala niipalju, et jõud kantakse üle kõrgele talale, mis peab need vastu võtma täismahus. Seinalelemendi postid toetuvad aga elemendi alumisele madalale talale, mistõttu peab madal tala võtma vastu posti pikijõust tuleneva muljumise ning talasisesed pikijõud. Sõlme põhimõtteline lahendus on nähtav Joonis 5.4.



Joonis 5.4 Vahelae ja seina sõlme põhimõtteline lahendus

## 5.4 Elemendi kõrge tala kandevõime

Liimpuittalad peavad olema valmistatud vastavalt standardile EVS-EN 14080:2013 minimaalselt T14 lamellidest [16]. Elemendi kõrge tala on tähistatud Joonis 5.2 numbriga 5.

### 5.4.1 Kandepiir seisund

Kõrge tala mõõtmed on  $b = 220$  mm ning kõrgus  $h = 695$  mm. Posti toepinna laius horisontaaltasapinnas on  $b = 1225$  mm. Sellise tala kandepiir seisundi maksimaalne toereaktsioon  $F_{Ed,KT} = 195,9$  kN maksimaalne paindemoment kandepiir seisundis  $M_{Ed,KT} = 29,02$  kNm, maksimaalne põikjõud  $V_{Ed,KT} = 48,02$  kN ning maksimaalne tõmme  $F_{t,Ed,KT} = 213,53$  kN.

Elemendi kõrge tala on liimpuittala GL24h, selle modifikatsioonitegur  $k_{mod} = 0,90$  ning materjali varutegur  $\gamma_m = 1,25$ .

Valitud andmete alusel on lamellide tehnilised omadused alljärgnevad:

$$f_{m,k} = 24 \text{ MPa};$$

$$f_{v,k} = 3,5 \text{ MPa};$$

$$f_{c,90,k} = 2,5 \text{ MPa};$$

$$f_{t,0,k} = 19,2 \text{ MPa};$$

$$f_{c,0,k} = 24 \text{ MPa};$$

$$E_{0,k} = 11500 \text{ MPa}.$$

Vastavad arvutusväärtused on alljärgnevad:

$$f_{m,d} = k_{mod} * \frac{f_{m,k}}{\gamma_m} = 0,9 * \frac{24}{1,25} \approx 17,28 \text{ MPa}$$

$$f_{v,d} = k_{mod} * \frac{f_{v,k}}{\gamma_m} = 0,9 * \frac{3,5}{1,25} \approx 2,52 \text{ MPa}$$

$$f_{c,90,d} = k_{mod} * \frac{f_{c,90,k}}{\gamma_m} = 0,9 * \frac{2,5}{1,25} = 1,8 \text{ MPa}$$

$$f_{c,0,d} = k_{mod} * \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_m} = 0,9 * \frac{24}{1,25} = 17,28 \text{ MPa}$$

$$f_{t,d} = k_{mod} * \frac{f_{t,k}}{\gamma_m} = 0,9 * \frac{19,2}{1,25} \approx 13,82 \text{ MPa}$$

Täiendavad vajaminevad parameetrid:

$$I_1 = \frac{220 * 695^3}{12} = 6,15 * 10^9 \text{ mm}^4$$

$$A = 220 * 695 = 152 900 \text{ mm}^2$$

$$S = \frac{A * h}{8} = \frac{152 900 * 695}{8} = 1,33 * 10^7 \text{ mm}^3$$

### Tõmbekandevõime

Maksimaalsed tõmbepinged:

$$\sigma_{t,max} = \frac{F_{t,Ed,KT}}{A} = \frac{213530}{152\,900} \approx 1,40 \text{ MPa}$$

$\sigma_{t,max} = 1,40 \text{ MPa} < f_{t,d} = 13,82 \text{ MPa}$ . Tõmbekandevõime on tagatud.

### Paindekandevõime

Maksimaalsed servapinged:

$$\sigma_{m,max} = \frac{M_{Ed,KT} * h}{I * 2} = \frac{29,2 * 10^6 * 695}{6,15 * 10^9 * 2} \approx 1,65 \text{ MPa}$$

$\sigma_{m,max} = 1,65 \text{ MPa} < f_{m,d} = 17,28 \text{ MPa}$ . Paindekandevõime on tagatud.

### Nihkekandevõime

Maksimaalsete nihkepingete leidmiseks on kasutatud tala ristlõike efektiivlaiust, mis arvestab ka pragude tekke mõju. Liimpuidu korral tegur  $k_{cr} = 0,67$ , mistõttu efektiivne laius  $b_{ef} = b * k_{cr} = 220 * 0,67 = 147,4 \text{ mm}$ .

Maksimaalsed nihkepinged:

$$\tau_{v,d} = \frac{V_{Ed,KT} * S}{b_{ef} * I} = \frac{48020 * 1,33 * 10^7}{147,4 * 6,15 * 10^9} \approx 0,70 \text{ MPa}$$

$\tau_{v,d} = 0,70 \text{ MPa} < f_{v,d} = 2,52 \text{ MPa}$ . Nihkekandevõime pikikiudu on tagatud.

### Tala muljumiskandevõime

Diagonaalse posti pikijõud mõjub tala kiudude suhtes  $59^\circ$  nurga all, tegur  $k_{c,90} = 1,0$ .

Maksimaalsed survepinged kiudude suhtes nurga all:

$$\sigma_{c,59,d} = \frac{F_{Ed,KT}}{b * h} = \frac{195900}{1225 * 220} \approx 1,17 \text{ MPa}$$

Materjali survetugevus kiudude suhtes nurga all:

$$f_{c,59,d} = \frac{f_{c,0,d}}{\frac{k_{c,90} * f_{c,90,d}}{\sin 59^\circ + \cos 59^\circ}} = \frac{17,28}{1,0 * 1,8} \approx 2,36 \text{ MPa}$$

$\sigma_{c,59,d} = 1,17 \text{ MPa} < f_{c,59,d} = 2,36 \text{ MPa}$ . Muljumiskandevõime on tagatud.

## 5.4.2 Tuleolukorra kandevõime

Tala tuleolukorra maksimaalne toereaktsioon  $F_{Ed,KT,fi} = 132,90 \text{ kN}$ , maksimaalne paindemoment  $M_{Ed,KT,fi} = 19,50 \text{ kNm}$ , maksimaalne põikjõud  $V_{Ed,KT,fi} = 32,06 \text{ kN}$  ning maksimaalne tõmme  $F_{t,Ed,KT,fi} = 145,36 \text{ kN}$ . Põlemiskiirus ning nõutav tulepüsivus on samad, mis eelnevatel elementidel. Nulltugevusega kihi paksuseks on võetud

$d_0 = 7$  mm. Kuna seinapostil toimub kahemõõtmeline söestumine, siis tuleb arvestada söestumise käigus tekkivate ümarate nurkadega. Ümardunud nurki võib asendada vastava tingliku söestumissügavusega, mille leidmiseks kasutatakse söestumiskiirust  $\beta_n = \beta_0 * k_n = 0,65 * 1,08 = 0,702$  mm/min. Tegur  $k_n = 1,08$  liimpuidul.

Tala küljel toimub lineaarne söestumine:

$$d_{char,k\ddot{u}lg} = \beta_n * T = 0,702 * 120 = 84 \text{ mm}$$

Efektiivne söestumissügavus:

$$d_{ef,k\ddot{u}lg} = d_{char} + d_0 = 84 + 7 = 91 \text{ mm}$$

Tala alaosas toimub järk-järguline söestumine. Lineaarse põlemise korral oleks söestumissügavus tala alaosas samuti 84 mm. Kuna söestumissügavus on suurem kui esimese lamelli paksus, siis tuleb arvesse võtta liimvuugi lagunemist tules. Kui söestumissügavus jõuab lamelli paksuseni, siis toimub lamelli eemaldumine liimi sulamise tagajärjel, mistõttu avaneb tulele uus suurem nulltugevusega kiht. Eelneva tõttu hakkab järgmine lamell põlema kahekordse kiirusega kuniks saavutatakse söestumissügavus 25mm, seejärel aeglustub põlemiskiirus algväärtuseni.

Esimese lamelli söestumisaeg:  $T_1 = \frac{t}{\beta_n} = \frac{45}{0,702} = 64,1$  min

Teise lamelli esimese 25mm topeltkiirusega söestumisaeg:  $T_{2,1} = \frac{t}{2 * \beta_n} = \frac{25}{2 * 0,702} = 17,8$  min

Teise lamelli ülejäänud osa söestumise aeg:  $T_{2,2} = \frac{t}{\beta_n} = \frac{20}{0,702} = 28,5$  min

Kolmas lamell jõuab R120 saavutamiseks ära söestuda 10,0 min jooksul, mis teeb söestumissügavuseks  $d_{char,3} = 2 * \beta_n * T = 2 * 0,702 * 10 = 14$  mm

Efektiivne söestumissügavus:

$$d_{ef,alt} = d_{char} + d_0 = 104 + 7 = 111 \text{ mm}$$

Sellest tulenevalt on tala jääkristlõike paksus:

$$h_{ef} = h - d_{ef,alt} = 695 - 111 = 584 \text{ mm ning}$$

Tala jääkristlõike laius:

$$b_{ef} = b - d_{ef,k\ddot{u}lg} = 220 - 91 = 129 \text{ mm}$$

Alles jääv ristlõige on kirjeldatud Joonis 5.5.

Tuleolukorras on ristkihtlamellpuidu omaduste kirjeldamisel kasutatakse teistsuguseid varutegureid, mistõttu antud omaduste arvutusväärtused on alljärgnevad:

$$f_{m,d,fi} = k_{mod} * k_{fi} * \frac{f_{m,k}}{\gamma_m} = 1,0 * 1,15 * \frac{24}{1,0} = 27,6 \text{ MPa}$$

$$f_{v,d,fi} = k_{mod} * k_{fi} * \frac{f_{v,k}}{\gamma_m} = 1,0 * 1,15 * \frac{3,5}{1,0} \approx 4,02 \text{ MPa}$$

$$f_{c,90,d,fi} = k_{mod} * k_{fi} * \frac{f_{c,90,k}}{\gamma_m} = 1,0 * 1,15 * \frac{2,5}{1,0} \approx 2,88 \text{ MPa}$$

$$f_{c,0,d,fi} = k_{mod} * k_{fi} * \frac{f_{c,90,k}}{\gamma_m} = 1,0 * 1,15 * \frac{24}{1,0} = 27,6 \text{ MPa}$$

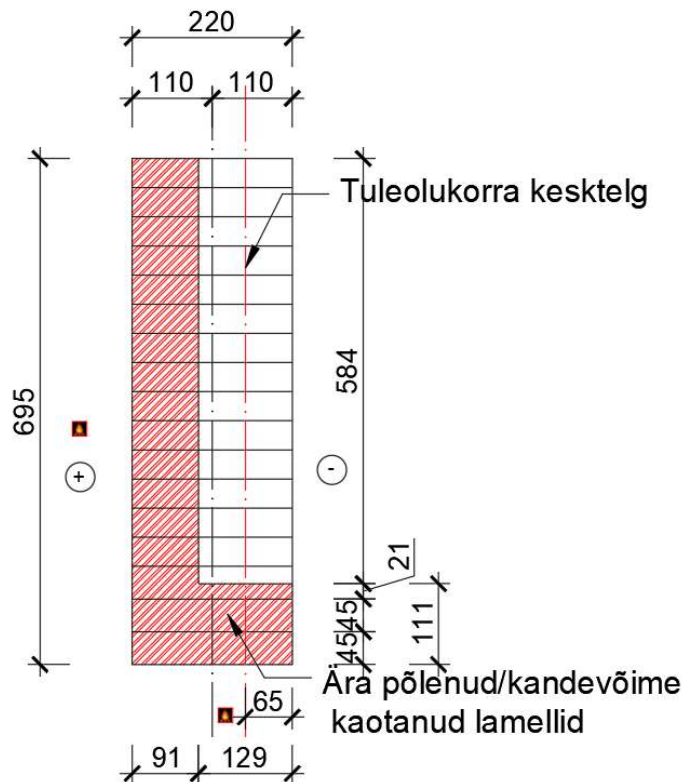
$$f_{t,d,fi} = k_{mod} * k_{fi} * \frac{f_{r,k}}{\gamma_m} = 1,0 * 1,15 * \frac{19,2}{1,0} \approx 22,1 \text{ MPa}$$

Täiendavad vajaminevad parameetrid:

$$I_1 = \frac{129 * 584^3}{12} = 2,14 * 10^9 \text{ mm}^4$$

$$A = 129 * 584 = 75\,336 \text{ mm}^2$$

$$S = \frac{A * h}{8} = \frac{75\,336 * 584}{8} = 5,50 * 10^6 \text{ mm}^3$$



Joonis 5.5 Kõrge tala skeem tuleolukorras

### Tõmbekandevõime

Maksimaalsed tõmbepinged:

$$\sigma_{t,max,fi} = \frac{F_{t,Ed,KT,fi}}{A} = \frac{145360}{75\,336} = 1,93 \text{ MPa}$$

$\sigma_{t,max,fi} = 1,93 \text{ MPa} < f_{t,d,fi} = 22,1 \text{ MPa}$ . Tõmbekandevõime on tagatud.

## Paindekandevõime

Maksimaalsed servapinged:

$$\sigma_{m,max,fi} = \frac{M_{Ed,KT,fi} * h}{I * 2} = \frac{19,5 \times 10^6 * 584}{2,14 \times 10^9 * 2} \approx 2,66 \text{ MPa}$$

$\sigma_{m,max,fi} = 2,66 \text{ MPa} < f_{m,d,fi} = 27,6 \text{ MPa}$ . Paindekandevõime on tagatud.

## Nihkekandevõime

Maksimaalsete nihkepingete leidmiseks on kasutatud tala ristlõike efektiivlaiust, mis arvestab ka pragude tekke mõju. Liimpuidu korral tegur  $k_{cr} = 0,67$ , mistõttu efektiivne laius  $b_{ef} = b * k_{cr} = 129 * 0,67 = 86,4 \text{ mm}$ .

Maksimaalsed nihkepinged:

$$\tau_{v,d,fi} = \frac{V_{Ed,KT,fi} * S}{b_{ef} * I} = \frac{32060 * 5,50 \times 10^6}{86,4 * 2,14 \times 10^9} \approx 0,95 \text{ MPa}$$

$\tau_{v,d,fi} = 0,95 \text{ MPa} < f_{v,d,fi} = 4,03 \text{ MPa}$ . Nihkekandevõime pikikiudu on tagatud.

## Tala muljumiskandevõime

Diagonaalse posti pikijõud mõjub tala kiudude suhtes  $59^\circ$  nurga all, tegur  $k_{c,90} = 1,0$ . Postist peale söestumist alles jääv toeosa on väiksem kui tala laius, mistõttu on kasutatud posti jääkristlõike mõõtmeid muljumiskandevõime leidmisel.

Maksimaalsed survepinged kiudude suhtes nurga all:

$$\sigma_{c,59,d,fi} = \frac{F_{Ed,KT,fi}}{b * h} = \frac{132900}{806 * 103} \approx 1,60 \text{ MPa}$$

Materjali survetugevus kiudude suhtes nurga all:

$$f_{c,59,d,fi} = \frac{f_{c,0,d,fi}}{\frac{f_{c,0,d,fi}}{k_{c,90} * f_{c,90,d,fi}} * \sin 59^2 + \cos 5^2} = \frac{27,6}{\frac{27,6}{1,0 * 2,88} * \sin 59^2 + \cos 5^2} \approx 3,77 \text{ MPa}$$

$\sigma_{c,59,d,fi} = 1,60 \text{ MPa} < f_{c,59,d,fi} = 3,77 \text{ MPa}$ . Muljumiskandevõime on tagatud.

## 5.5 Elemendi madala tala kandevõime

Madal tala on mõeldud põhiliselt elemendist terviku moodustamiseks, mis on omakorda vajalik montaažiks. Montaaži käigus mõjuvad sisejõud ning vastavad tugevuskontrollid ei ole käesoleva töö mahus. Elemendi madal tala on tähisega 6 Joonis 5.2.

### 5.5.1 Kandepiirseisund

Madala tala mõõtmed  $b = 220$  mm ning kõrgus  $h = 295$  mm. Posti toepinna laius horisontaaltasapinnas on  $b = 1225$  mm. Sellise tala kandepiirseisundi maksimaalne toereaktsioon  $F_{Ed,MT} = 195,9$  kN ning maksimaalne tõmme  $F_{t,Ed,MT} = 279,43$  kN.

Elemendi kõrge tala on liimpuittala GL24h, selle modifikatsioonitegur  $k_{mod} = 0,90$  ning materjali varutegur  $\gamma_m = 1,25$ . Tehnilised andmed on samasugused nagu kõrgel talal.

Täiendavad vajaminevad parameetrid:

$$I_1 = \frac{220 \cdot 295^3}{12} = 4,71 \times 10^8 \text{ mm}^4$$

$$A = 220 \cdot 295 = 64\,900 \text{ mm}^2$$

### Tõmbekandevõime

Maksimaalsed tõmbepinged:

$$\sigma_{t,max} = \frac{F_{t,Ed,MT}}{A} = \frac{279430}{64\,900} \approx 4,31 \text{ MPa}$$

$\sigma_{t,max} = 4,31 \text{ MPa} < f_{t,d} = 13,82 \text{ MPa}$ . Tõmbekandevõime on tagatud.

### Tala muljumiskandevõime

Diagonaalse posti pikijõud mõjub tala kiudude suhtes  $59^\circ$  nurga all, tegur  $k_{c,90} = 1,0$ .

Maksimaalsed survepinged kiudude suhtes nurga all:

$$\sigma_{c,59,d} = \frac{F_{Ed,MT}}{b \cdot h} = \frac{195900}{1225 \cdot 220} \approx 1,17 \text{ MPa}$$

Materjali survetugevus kiudude suhtes nurga all:

$$f_{c,59,d} = \frac{f_{c,0,d}}{\frac{f_{c,0,d}}{k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}} \cdot \sin 59^\circ + \cos 59^\circ} = \frac{17,28}{\frac{17,28}{1,0 \cdot 1,8} \cdot \sin 59^\circ + \cos 59^\circ} \approx 2,36 \text{ MPa}$$

$\sigma_{c,59,d} = 1,17 \text{ MPa} < f_{c,59,d} = 2,36 \text{ MPa}$ . Muljumiskandevõime on tagatud.

### 5.5.2 Tuleolukorra kandevõime

Tala tuleolukorra maksimaalne toereaktsioon  $F_{Ed,KT,fi} = 132,90$  kN, maksimaalne paindemoment  $M_{Ed,KT,fi} = 19,50$  kNm, maksimaalne põikjõud  $V_{Ed,KT,fi} = 32,06$  kN ning maksimaalne tõmme  $F_{t,Ed,KT,fi} = 145,36$  kN. Põlemiskiirus ning nõutav tulepüsivus on samad, mis eelnevatel elementidel. Nulltugevusega kihi paksuseks on võetud  $d_0 = 7$  mm. Kuna seinapostil toimub kahemõõtmeline söestumine, siis tuleb arvestada söestumise käigus tekkivate ümarate nurkadega. Ümardunud nurki võib asendada vastava tingliku söestumissügavusega, mille leidmiseks kasutatakse söestumiskiirust  $\beta_n = \beta_0 \cdot k_n = 0,65 \cdot 1,08 = 0,702$  mm/min. Tegur  $k_n = 1,08$  liimpuidul.



Tala küljel ja peal toimub lineaarne söestumine:

$$d_{char} = \beta_n * T = 0,702 * 120 = 84 \text{ mm}$$

Efektiivne söestumissügavus:

$$d_{ef} = d_{char} + d_0 = 84 + 7 = 91 \text{ mm}$$

Sellest tulenevalt on tala jääkristlõike paksus:

$$h_{ef} = h - d_{ef} = 295 - 91 = 204 \text{ mm ning}$$

Tala jääkristlõike laius:

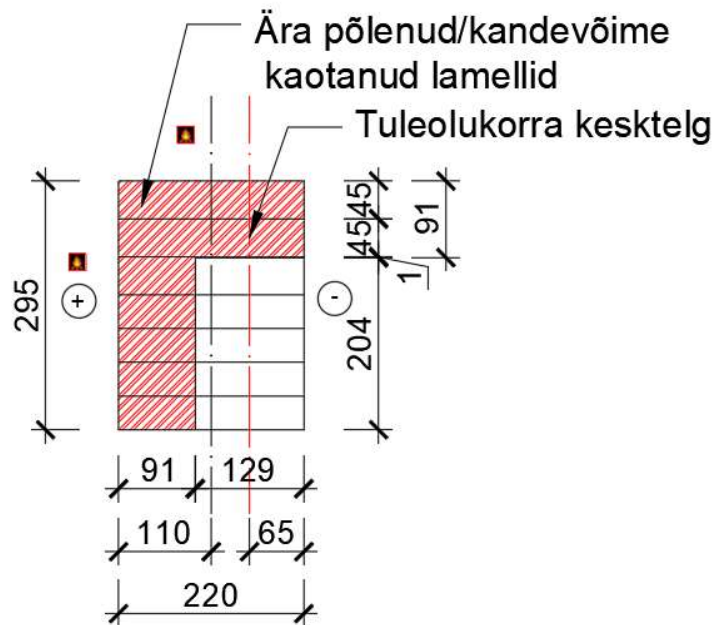
$$b_{ef} = b - d_{ef} = 220 - 91 = 129 \text{ mm}$$

Tuleolukorras on ristkihtlamell puidu omadused vastavad kõrge tala omadustega tuleolukorras. Madala tala jääkristlõige on nähtav Joonis 5.6.

Täiendavad vajaminevad parameetrid:

$$I_1 = \frac{129 * 204^3}{12} = 9,13 * 10^7 \text{ mm}^4$$

$$A = 129 * 204 = 26\,361 \text{ mm}^2$$



Joonis 5.6 Madala tala skeem tuleolukorras

## Tõmbekandevõime

Maksimaalsed tõmbepinged:

$$\sigma_{t,max,fi} = \frac{F_{t,Ed,KT,fi}}{A} = \frac{186420}{26361} = 7,11 \text{ MPa}$$

$\sigma_{t,max,fi} = 7,11 \text{ MPa} < f_{t,d,fi} = 22,1 \text{ MPa}$ . Tõmbekandevõime on tagatud.

## Tala muljumiskandevõime

Diagonaalse posti pikijõud mõjub tala kiudude suhtes  $59^\circ$  nurga all, tegur  $k_{c,90} = 1,0$ . Postist peale sõestumist alles jääv toeosa on väiksem kui tala laius, mistõttu on kasutatud posti jääkristlõike mõõtmeid muljumiskandevõime leidmisel.

Maksimaalsed survepinged kiudude suhtes nurga all:

$$\sigma_{c,59,d,fi} = \frac{F_{Ed,KT,fi}}{b \cdot h} = \frac{132900}{806 \cdot 103} \approx 1,60 \text{ MPa}$$

Materjali survetugevus kiudude suhtes nurga all:

$$f_{c,59,d,fi} = \frac{f_{c,0,d,fi}}{\frac{f_{c,0,d,fi}}{k_{c,90} \cdot f_{c,90,d,fi}} \cdot \sin 59^\circ + \cos 59^\circ} = \frac{27,6}{\frac{27,6}{1,0 \cdot 2,88} \cdot \sin 59^\circ + \cos 59^\circ} \approx 3,77 \text{ MPa}$$

$\sigma_{c,59,d,fi} = 1,60 \text{ MPa} < f_{c,59,d,fi} = 3,77 \text{ MPa}$ . Muljumiskandevõime on tagatud.

## 5.6 I korruse kõrge tala kandevõime

I korruse kõrge tala kandevõimet on kontrollitud, sest see moodustab valitud seinaelemendiga kandevõime seisukohast terviku. Tala on kontrollitud ülevalt mõjuvate koormuste osas. Elemendi kõrge tala on tähistatud Joonis 5.2 punktiirjoone ning numbriga 7.

### 5.6.1 Kandepiirseisund

Kõrge tala mõõtmed  $b = 220 \text{ mm}$  ning kõrgus  $h = 695 \text{ mm}$ . Posti toepinna laius horisontaaltasapinnas on  $b = 1225 \text{ mm}$ . Sellise tala kandepiirseisundi maksimaalne toereaktsioon  $F_{Ed,IKT} = 195,46 \text{ kN}$  maksimaalne paindemoment kandepiir-seisundis  $M_{Ed,IKT} = 95,74 \text{ kNm}$ , maksimaalne põikjõud  $V_{Ed,IKT} = 168,12 \text{ kN}$  ning maksimaalne tõmme  $F_{t,Ed,IKT} = 279,43 \text{ kN}$ .

Elemendi kõrge tala on liimpuittala GL24h ning selle omadused ja parameetrid on samasugused nagu eelnevatel liimpuittaladel.

### Tõmbekandevõime

Maksimaalsed tõmbepinged:

$$\sigma_{t,max} = \frac{F_{t,Ed,IKT}}{A} = \frac{279430}{152\,900} \approx 1,83 \text{ MPa}$$

$\sigma_{t,max} = 1,83 \text{ MPa} < f_{t,d} = 13,82 \text{ MPa}$ . Tõmbekandevõime on tagatud.

### Paindekandevõime

Maksimaalsed servapinged:

$$\sigma_{m,max} = \frac{M_{Ed,IKT} * h}{I * 2} = \frac{95,74 \times 10^6 * 695}{6,15 \times 10^9 * 2} \approx 5,41 \text{ MPa}$$

$\sigma_{m,max} = 5,41 \text{ MPa} < f_{m,d} = 17,28 \text{ MPa}$ . Paindekandevõime on tagatud.

### Nihkekandevõime

Maksimaalsete nihkepingete leidmiseks on kasutatud tala ristlõike efektiivlaiust, mis arvestab ka pragude tekke mõju. Liimpuidu korral tegur  $k_{cr} = 0,67$ , mistõttu efektiivne laius  $b_{ef} = b * k_{cr} = 220 * 0,67 = 147,4 \text{ mm}$ .

Maksimaalsed nihkepinged:

$$\tau_{v,d} = \frac{V_{Ed,IKT} * S}{b_{ef} * I} = \frac{168120 * 1,33 \times 10^7}{147,4 * 6,15 \times 10^9} \approx 2,46 \text{ MPa}$$

$\tau_{v,d} = 2,46 \text{ MPa} < f_{v,d} = 2,52 \text{ MPa}$ . Nihkekandevõime pikikiudu on tagatud.

### Tala muljumiskandevõime

Diagonaalse posti pikijõud mõjub tala kiudude suhtes  $59^\circ$  nurga all, tegur  $k_{c,90} = 1,0$ .

Maksimaalsed survepinged kiudude suhtes nurga all:

$$\sigma_{c,59,d} = \frac{F_{Ed,IKT}}{b * h} = \frac{195900}{1225 * 220} \approx 1,17 \text{ MPa}$$

Materjali survetugevus kiudude suhtes nurga all:

$$f_{c,59,d} = \frac{f_{c,0,d}}{\frac{f_{c,0,d}}{k_{c,90} * f_{c,90,d}} * \sin 59^\circ + \cos^2} = \frac{17,28}{1,0 * 1,8 * \sin 59^\circ + \cos 59^\circ} \approx 2,36 \text{ MPa}$$

$\sigma_{c,59,d} = 1,17 \text{ MPa} < f_{c,59,d} = 2,36 \text{ MPa}$ . Muljumiskandevõime on tagatud.

## 5.6.2 Tuleolukorra kandevõime

Tala tuleolukorra maksimaalne toereaktsioon  $F_{Ed,IKT,fi} = 132,90 \text{ kN}$  maksimaalne paindemoment  $M_{Ed,IKT,fi} = 64,04 \text{ kNm}$ , maksimaalne põikjõud  $V_{Ed,KIT,fi} = 112,27 \text{ kN}$  ning maksimaalne tõmme  $F_{t,Ed,IKT,fi} = 186,42 \text{ kN}$ . Põlemiskiirus, nõutav tulepüsivus ja materjali omadused tules on samad, mis eelnevatel elementidel. Käsitletav tala söestub

samamoodi nagu elemendi kõrge tala, mistõttu on jääkristlõike parameetrid samad. Kõrge tala söestumine on kajastatud Joonis 5.5.

### Tõmbekandevõime

Maksimaalsed tõmbepinged:

$$\sigma_{t,max,fi} = \frac{F_{t,Ed,IKT,fi}}{A} = \frac{186420}{75\,336} = 2,48 \text{ MPa}$$

$\sigma_{t,max,fi} = 2,48 \text{ MPa} < f_{t,d,fi} = 22,1 \text{ MPa}$ . Tõmbekandevõime on tagatud.

### Paindekandevõime

Maksimaalsed servapinged:

$$\sigma_{m,max,fi} = \frac{M_{Ed,IKT,fi} \cdot h}{I \cdot 2} = \frac{64,04 \times 10^6 \cdot 584}{2,14 \times 10^9 \cdot 2} \approx 8,75 \text{ MPa}$$

$\sigma_{m,max,fi} = 8,75 \text{ MPa} < f_{m,d,fi} = 27,6 \text{ MPa}$ . Paindekandevõime on tagatud.

### Nihkekandevõime

Maksimaalsete nihkepingete leidmiseks on kasutatud tala ristlõike efektiivlaiust, mis arvestab ka pragude tekke mõju. Liimpuidu korral tegur  $k_{cr} = 0,67$ , mistõttu efektiivne laius  $b_{ef} = b \cdot k_{cr} = 129 \cdot 0,67 = 86,4 \text{ mm}$ .

Maksimaalsed nihkepinged:

$$\tau_{v,d,fi} = \frac{V_{Ed,IKT,fi} \cdot S}{b_{ef} \cdot I} = \frac{112370 \cdot 5,50 \times 10^6}{86,4 \cdot 2,14 \times 10^9} \approx 3,34 \text{ MPa}$$

$\tau_{v,d,fi} = 3,34 \text{ MPa} < f_{v,d,fi} = 4,03 \text{ MPa}$ . Nihkekandevõime pikikiudu on tagatud.

### Tala muljumiskandevõime

Diagonaalse posti pikijõud mõjub tala kiudude suhtes  $59^\circ$  nurga all, tegur  $k_{c,90} = 1,0$ . Postist peale söestumist alles jääv toeosa on väiksem kui tala laius, mistõttu on kasutatud posti jääkristlõike mõõtmeid muljumiskandevõime leidmisel.

Maksimaalsed survepinged kiudude suhtes nurga all:

$$\sigma_{c,59,d,fi} = \frac{F_{Ed,IKT,fi}}{b \cdot h} = \frac{132900}{806 \cdot 103} \approx 1,60 \text{ MPa}$$

Materjali survetugevus kiudude suhtes nurga all:

$$f_{c,59,d,fi} = \frac{f_{c,0,d,fi}}{\frac{f_{c,0,d,fi}}{k_{c,90} \cdot f_{c,90,d,fi}} \cdot \sin 59^\circ + \cos 59^\circ} = \frac{27,6}{\frac{27,6}{1,0 \cdot 2,88} \cdot \sin 59^\circ + \cos 59^\circ} \approx 3,77 \text{ MPa}$$

$\sigma_{c,59,d,fi} = 1,60 \text{ MPa} < f_{c,59,d,fi} = 3,77 \text{ MPa}$ . Muljumiskandevõime on tagatud.

## KOKKUVÕTE

SLender on juurtega sajanditaguses ajas, kuid sisult tulevikku suunatud arhitektuurse lahendusega kortermaja. SLender nimetus tuleneb 1890. aastate lõpus tekkinud tüüpsetest puitkonstruktsioonist üürikortermajade nimest - Lenderi maja. Kuigi arhitektuurne lahendus soosib ühest küljest efektiivset ruumikasutust, korteriomandite suuruste muutmist, uusi lahendusi ja kliimaneutraalsete materjalide kasutust, siis teisest küljest tekitab kitsaskohti tuleohutus ning valitud kandeskeem.

Arhitektuurse lahenduse põhjal on tehtud eeldused tüüpkonstruktsioonidele ja kasuskoormustele. Arhitektuursest nägemusest tulenevalt on korteritevahelised seinad liigutatavad ning need ei ole seeläbi osaks kandekonstruktsioonist. Koormuste jaotuse teeb keeruliseks välisseina kandeskeem, mis on ebasümmeetriline.

Ristkihtliimpuidust vahe- ning katuslagede puhul sai määravaks laepaneelide läbipaine. Laepaneelide ühendus välisseinas paikneva talaga sai algsest planeeritud lahendusest erineva põhimõttelise lahenduse. Seda tulenevalt suurest põikjõust talas, mille kandevõime madalama liimpuittala puhul valitud elemendil ei olnuks piisav.

Välisseinaelemendi ristkihtliimpuidust postide puhul on ebatavaline nende paiknemine diagonaalselt, mistõttu olid kandevõime kontrollid keerulisemad kui vertikaalse posti puhul. Postidel sai määravaks nõtkekandevõime tule olukorras. Nagu juba eelnevalt on mainitud, sai valitud elemendi liimpuittalade puhul määravaks nihkekandevõime.

Käesoleva magistritöö raames ei ole lahendatud elementidevahelisi sõlmi, montaažikoormusi ning hoone üldjäikust. Sõlmede, montaažikoormuste ja hoone jäikusega saab täiendavalt tegeleda, kui lahendustega on jõutud eskiisi etapist eel- või põhiprojekti etappi.

Autori hinnangul pakkus antud magistritöö koostamine uusi teadmisi, olemasolevate teadmiste rakendamist praktikas ning võimaluse osaleda põneva projekti loometöös.

## SUMMARY

sLender apartment building has its roots looking back a century but with an architectural vision looking into the future. The name sLender comes from the name of the apartment house - Lender House - which appeared in the late 1890s from a typical wooden construction. Although the architectural solution favours on the one hand the efficient use of space, the resizing of apartment properties, new solutions and the use of climate-neutral materials, on the other hand, fire safety and chosen structural scheme create difficulties for engineers.

Based on the architectural sketches, assumptions have been made for standard structures and payloads. Due to the architectural vision, the walls between the apartments are movable and are therefore not part of the load-bearing structure. The load distribution is complicated by the asymmetrical load-bearing scheme of the outer wall.

The deflection of the ceiling panels became decisive for our cross-laminated timber panels. The connection of the ceiling panels to the beam in the outer wall ended up with a different solution from the original plan. This was due to the high transverse force in the beam for which the lower beam would not have been sufficient.

Cross-laminated timber columns in an outer wall element had unusual diagonal arrangement, which made load-bearing controls more difficult than in the case of vertical columns. The buckling of the columns in a fire situation became decisive. As already mentioned, the shear load capacity of beams became decisive.

Within the framework of this master's thesis, the nodes between the elements, the assembly loads and the general stability of the building have not been solved. Nodes, assembly loads and the building stability can be further addressed once the concept have reached from the sketch stage to the preliminary or main design stage.

In authors opinion, conducting of this master's thesis offered new knowledge, the opportunity of applying existing knowledge in practice and the opportunity to participate in the creative work of an exciting project.

## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] A. Martin, Lenderi maja. Hoonetüübi areng ja säästev uuendamine, Tallinn: Tallinna Kultuuriväärtuste Amet, 2011.
- [2] J. Huimerind, „Doktoritöodes uuriti modulaarehitiste võimalusi ja puudujääke,“ Novaator, 30 12 2020. [Võrgumaterjal]. Available: <https://novaator.err.ee/1223080/eka-doktoritöodes-uuriti-modulaarehitiste-voimalusi-ja-puudujaake>. [Kasutatud 19 05 2022].
- [3] S. Pihlak, „Nelja korruselise kortermaja projekteerimine ristkiht liimpuidust,“ Eesti Kunstiakadeemia, Tallinn, 2022.
- [4] EVS-EN 1990:2002 + NA:2002 EUROKODEKS Ehituskonstruktsioonide projekteerimise alused, Eesti Standardikeskus.
- [5] EVS-EN 1991-1-1:2002 + NA:2002 EHITUSKONSTRUKTSIOONIDE KOORMUSED Osa 1-1: Üldkoormused. Mahukaalud, omakaalud, hoonete kasuskoormused, Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus.
- [6] EVS-EN 1991-1-3:2006 + A1:2016 + NA:2016 EHITUSKONSTRUKTSIOONIDE KOORMUSED Osa 1-3: Üldkoormused. Lumekoormus, Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus.
- [7] EVS-EN 1991-1-4:2005 + NA:2007 EHITUSKONSTRUKTSIOONIDE KOORMUSED Osa 1-4: Üldkoormused. Tuulekoormus, Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus.
- [8] EVS-EN 1995-1-1:2005 + A1 + NA + A2 EUROKODEKS 5: Puitkonstruktsioonide projekteerimine Osa 1-1: Üldist. Üldreeglid ja reeglid hoonete projekteerimiseks, Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus.
- [9] „Arcwood CLT-Ristkihtpuit,“ Peetri Puit OÜ, 2021. [Online]. Available: <https://www.arcwood.ee/et/clt-ristkihtpuit>. [Accessed 19 05 2022].
- [10] E.-J. Just, K. Õiger and A. Just, in *Puit ja puidupõhised konstruktsioonid*, Tallinn, TTÜ Kirjastus, 2015, pp. 234-239.
- [11] R. Harris and G. S. A. Ringhofer, Focus Solid Timber Solutions. European Conference on Cross Laminated Timber, 2013.
- [12] EVS-EN 1995-1-2:2005 Eurokodeks 5: Puitkonstruktsioonide projekteerimine. Osa 1-2: Üldreeglid. Tüüpüsvusarvutus, Eesti Standardikeskus.
- [13] EVS 812-7:2018 EHITISTE TULEOHUTUS Osa 7: Ehitisele esitatavad tuleohutusnõuded, Eesti Standardikeskus.

- [14] B. .. j. Östman, Tuleohutud puitmajad 3 Põhja- ja Baltimaade teadmisi koondav juhendmaterjal, Tallinn: ET INFOkeskuse AS, 2014.
- [15] prEN 1995-1-2:2022 Eurocode 5 – Design of timber structures Part 1-2: Structural fire design.
- [16] EVS-EN 14080:2013 PUITKONSTRUKTSIOONID Lamell-liimpuit ja plankliimpuit Nõuded, Eesti Standardikeskus.



# LISAD

## Lisa 1 – Väljavõte Peetri Puit OÜ brožüürist, liimpuidu tehnilised andmed [9]

### TEHNILISED NÄITAJAD

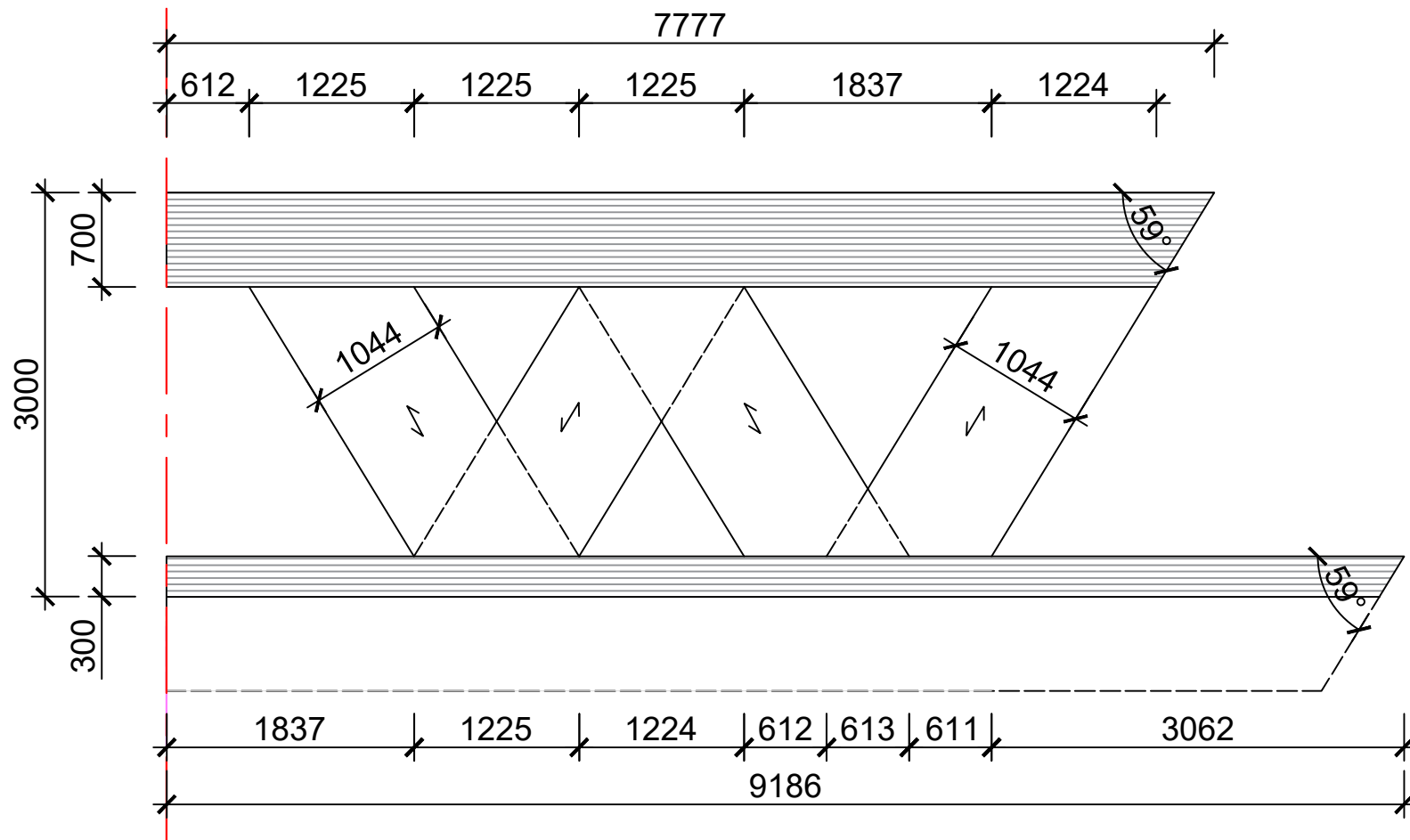
Tugevusklass		GL24h	GL28h	GL32h	
Paindetugevus	$f_{m,k}$	24	28	32	N/mm <sup>2</sup>
Tõmbetugevus	$f_{t,0,k}$	19,2	22,3	25,6	N/mm <sup>2</sup>
	$f_{t,90,k}$	0,5		0,5	N/mm <sup>2</sup>
Survetugevus	$f_{c,0,k}$	24	28	32	N/mm <sup>2</sup>
	$f_{c,90,k}$	2,5	2,5	2,5	N/mm <sup>2</sup>
Nihketugevus	$f_{v,k}$	3,5	3,5	3,5	N/mm <sup>2</sup>
Elastusmoodul	$E_{0,mean}$	11500	12600	14200	N/mm <sup>2</sup>
	$E_{0,0.05}$	9600	10500	11800	N/mm <sup>2</sup>
	$E_{90,mean}$	300	300	300	N/mm <sup>2</sup>
Nihkemoodul	$G_{mean}$	650	650	650	N/mm <sup>2</sup>
Nihkemoodul	$\rho_k$	385	425	440	kg/m <sup>3</sup>
	$\rho_{mean}$	420	460	490	kg/m <sup>3</sup>


EN 14080:2013

## **GRAAFILINE OSA**

# Valitud seinaelement mõõtmetega

M 1:50



	<p><i>Tallinna Tehnikaülikool</i>  <i>Ehituse ja arhitektuuri instituut</i>  <i>Ehitajate tee 5, Tallinn, 19086</i></p>	<p><i>Töö nimetus:</i>  SLenderi ristkihtliimpuidust välisseina-  elemendi konstruktsiooniline lahendus</p>
<p>Autor  Kood, rühm</p>	<p>Elina Jõpiselg  177624, EAEI-61</p>	<p><i>Joonise nimetus:</i>  Valitud seinaelement mõõtmetega</p>
<p><i>Juhendas:</i></p>	<p>A. Just</p>	<p><i>Kuupäev:</i> 19.05.2022 <i>Joonise nr:</i> 1</p>