



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND  
Ehituse ja arhitektuuri instituut

**UUE PÕLVKONNA EUROKOODEKS 5-1-2 JAOKS  
ESITATUD RISTKIHTPUIDUST  
KONSTRUKTSIOONIDE TULEPÜSIVUSE  
ARVUTUSMEETODITE TUNDLIKKUSE ANALÜÜS**

**SENSITIVITY ANALYSIS OF THE DESIGN METHODS OF  
CROSS-LAMINATED TIMBER MEMBERS PROPOSED FOR  
NEW GENERATION OF EUROCODE 5-1-2**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Marii Õismets

Üliõpilaskood: 165186 EAEI

Juhendaja: Professor Alar Just

Tallinn 2021

# AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

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

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

Autor: .....

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

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

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks<sup>1</sup>**

Mina, Marii Õismets

1. annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Uue põlvkonna Eurokoodeks 5-1-2 jaoks esitatud ristkihtpuidust konstruktsioonide tulepüsivuse arvutusmeetodite tundlikkuse analüüs“,

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.

## LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

**Üliõpilane:** Marii Õismets, 165186

**Õppekava, peeriala:** EAEI02/15 – Ehitiste projekteerimine ja ehitusjuhtimine

**Juhendaja(d):** Professor Alar Just

### Lõputöö teema:

Uue põlvkonna Eurokoodeks 5-1-2 jaoks esitatud ristkihtpuidust konstruktsioonide tulepüsivuse arvutusmeetodite tundlikkuse analüüs.

Sensitivity analysis of the design methods of cross-laminated timber members proposed for new generation of Eurocode 5-1-2.

### Lõputöö põhieesmärgid:

1. Eurokoodeks 5-1-2 kavandi (3rd Draft of EN1995-1-2) järgsed prooviarvutused.
2. Hinnata erinevate parameetrite mõju arvutuslikule tulepüsivusele (Parameetrid: söestumise algusaeg, tõrketekkeaeg, söestumise tegurid, nulltugevusega kiht).
3. Järeldused ja ettepanekud Eurokoodeks 5-1-2 töörühmale (CEN TC250 SC5 WG4).

### Lõputöö etapid ja ajakava:

| Nr | Ülesande kirjeldus                                                                                       | Tähtaeg  |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| 1. | Hinnatavate konstruktsioonide ja parameetrite valik                                                      | 1.12.20  |
| 2. | Ristkihtpuidust konstruktsioonide arvutused uute arvutusmeetodite järgi erinevate valitud parameetritega | 1.03.21  |
| 3. | Analüüs ja järeldused                                                                                    | 1.05.21  |
| 4. | Töö vormistamine                                                                                         | 23.05.21 |

**Töö keel:** eesti

**Lõputöö esitamise tähtaeg:** "24" mai 2021.a

**Üliõpilane:** Marii Õismets

..... ".....".....20.....a  
/allkiri/

**Juhendaja:** Alar Just

..... ".....".....20.....a  
/allkiri/

# SISUKORD

|                                                      |    |
|------------------------------------------------------|----|
| EESSÕNA .....                                        | 7  |
| Lühendite ja tähiste loetelu .....                   | 8  |
| 1.    SISSEJUHATUS .....                             | 10 |
| 2.    ÜLDOSA .....                                   | 12 |
| 2.1    Ristkihtpuidust .....                         | 12 |
| 2.2    Tulepüsivusest .....                          | 12 |
| 3.    RISTKIHTPUIDU SÖESTUMINE .....                 | 14 |
| 3.1    Euroopa söestumismudel .....                  | 14 |
| 3.1.1    Algselt kaitsmata puidu söestumine .....    | 14 |
| 3.1.2    Algselt kaitstud puidu söestumine .....     | 15 |
| 3.1.3    Tinglik söestumissügavus .....              | 17 |
| 3.1.4    Söestumise algusaeg .....                   | 17 |
| 3.1.5    Tõrketekkeage .....                         | 20 |
| 3.1.6    Konsolidatsiooniaeg .....                   | 21 |
| 3.2    Efektiivristlõike meetod .....                | 22 |
| 3.2.1    Efektiivne söestumissügavus .....           | 22 |
| 3.2.2    Null-tugevusega kiht .....                  | 23 |
| 4.    KANDEVÕIME ARVUTUS .....                       | 26 |
| 4.1    Puidu arvutustugevus .....                    | 26 |
| 4.2    Puidu efektiivristlõike karakteristikud ..... | 26 |
| 4.3    Kandevõimed .....                             | 29 |
| 4.3.1    Vahelae paindekandevõime .....              | 29 |
| 4.3.2    Seina kandevõime .....                      | 29 |
| 4.3.3    Seina stabiilsus .....                      | 30 |
| 5.    UURITUD KONSTRUKTSIOONID .....                 | 32 |
| 6.    ARVUTUSTULEMUSED JA JÄRELDUSED .....           | 34 |
| 6.1    Söestumise analüüs .....                      | 34 |
| 6.1.1    Söestumise graafikud .....                  | 34 |
| 6.1.2    Analüüs ja järeldused .....                 | 38 |
| 6.2    Katteta või 1xGtA12,5 võrdlus .....           | 41 |
| 6.2.1    Tulepüsivuse R60 korral .....               | 41 |
| 6.2.2    Tulepüsivuse R90 korral .....               | 42 |
| 6.3    Kattematerjalide mõju kandevõimele .....      | 44 |
| 6.3.1    Vahelaed .....                              | 44 |
| 6.3.2    Seinad .....                                | 47 |
| 6.3.3    Järeldused .....                            | 50 |

|                                                                                                                           |                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|----|
| 6.4                                                                                                                       | Liimvuugi terviklikkuse mõju kandevõimele ..... | 52 |
| 6.4.1                                                                                                                     | Tulepüsivuse R60 korral .....                   | 53 |
| 6.4.2                                                                                                                     | Tulepüsivuse R90 korral .....                   | 55 |
| KOKKUVÕTE .....                                                                                                           |                                                 | 59 |
| SUMMARY .....                                                                                                             |                                                 | 61 |
| KASUTATUD KIRJANDUS .....                                                                                                 |                                                 | 63 |
| LISAD .....                                                                                                               |                                                 | 64 |
| Lisa 1 Arvutusnäide - vahelagi 40-20-40-20-40, kui kattematerjal puudub ja liimvuugi terviklikkus ei ole tagatud .....    |                                                 | 65 |
| Lisa 2 Arvutusnäide - vahelagi 40-20-40-20-40, kui kattematerjal puudub ja liimvuugi terviklikkus on tagatud.....         |                                                 | 68 |
| Lisa 3 Arvutusnäide - sein 20-20-20-20-20, kui kattematerjaliks GtF15+WB18 ja liimvuugi terviklikkus ei ole tagatud ..... |                                                 | 70 |
| Lisa 4 Arvutusnäide - sein 20-20-20-20-20, kui kattematerjaliks GtF15+WB18 ja liimvuugi terviklikkus on tagatud.....      |                                                 | 74 |
| Lisa 5 Arvutustulemused - vahelagi 20-20-20-20-20 .....                                                                   |                                                 | 78 |
| Lisa 6 Arvutustulemused - vahelagi 40-20-40-20-40 .....                                                                   |                                                 | 79 |
| Lisa 7 Arvutustulemused - vahelagi 40-40-40-40-40 .....                                                                   |                                                 | 80 |
| Lisa 8 Arvutustulemused - sein 20-20-20-20-20 .....                                                                       |                                                 | 81 |
| Lisa 9 Arvutustulemused - sein 40-20-40-20-40 .....                                                                       |                                                 | 82 |
| Lisa 10 Arvutustulemused - sein 40-40-40 .....                                                                            |                                                 | 83 |

## EESSÕNA

Antud lõputöö eesmärgiks on arvutada ja analüüsida katteplaatide ning liimvuugi terviklikkuse mõju ristkihtpuidust konstruktsioonide kandevõimele vastavalt uue Eurokoodeksi 5 osa 1-2 tulepüsivuse arvutusmeetoditele.

Siinkohal tahaksin tänada lõputöö juhendajat, Alar Justit, kes andis võimaluse kirjutada lõputöö antud teemal. Tema toetus on olnud väga suureks abiks lõputöö valmimisel. Samuti olen tänulik kõigile, kes on mind õpingute ja lõputöö kirjutamise ajal toetanud.

Võtmesõnad: ristkihtpuit, tulepüsivus, kandevõime, magistritöö.

## Lühendite ja tähiste loetelu

### Ladina suured tähed

- $A_{x,net}$  – ristlõike netopindala,  $\text{mm}^2$   
 $E_{0,05}$  – elastsusmooduli 5-protsentiili väärtus,  $\text{N/mm}^2$   
 $G_{9090}$  – nihkemoodul,  $\text{N/mm}^2$   
 $I_{x,ef}$  – efektiivse ristlõike inertsimoment,  $\text{mm}^4$   
 $L_c$  – seina kõrgus või vahelae pikkus,  $\text{mm}^4$   
 $M_{Rd,fi}$  – vahelae paindekandevõime tulekahjuolukorras,  $\text{kNm}$   
 $N_{Rd,fi}$  – seina kandevõime tulekahjuolukorras,  $\text{kN}$   
 $W_{x,ef}$  – efektiivristlõike vastupanumoment,  $\text{mm}^3$

### Ladina väiketähed

- $a_i$  – vaadeldava lamelli massikeskme kaugus kogu ristlõike massikeskmest,  $\text{mm}$   
 $b_x$  – ristlõike laius,  $\text{mm}$   
 $d_0$  – null-tugevusega kiht,  $\text{mm}$   
 $d_{char,n}$  – tinglik söestumissügavus,  $\text{mm}$   
 $d_{ef}$  – efektiivne söestumissügavus,  $\text{mm}$   
 $f_{c,0,d,fi}$  – puidu arvutuslik survetugevus pikikiudu,  $\text{N/mm}^2$   
 $f_{c,0,k}$  – puidu normatiivne survetugevus pikikiudu,  $\text{N/mm}^2$   
 $f_{d,fi}$  – puidu arvutustugevus tulekahju olukorras,  $\text{N/mm}^2$   
 $f_k$  – puidu tugevuse normväärtus,  $\text{N/mm}^2$   
 $f_{m,d,fi}$  – puidu arvutuslik paindetugevus tulekahjuolukorras,  $\text{N/mm}^2$   
 $f_{m,k}$  – puidu normatiivne paindetugevus,  $\text{N/mm}^2$   
 $h$  – algristlõike kõrgus,  $\text{mm}$   
 $h_{ef}$  – efektiivristlõike kõrgus,  $\text{mm}$   
 $h_i$  – vaadeldava kihi paksus,  $\text{mm}$   
 $h_p$  – kattematerjali paksus,  $\text{mm}$   
 $h_{res,i}$  – vaadeldava lamelli põlemata osa paksus,  $\text{mm}$   
 $i_z$  – inertsiraadius z-telje suhtes,  $\text{mm}$   
 $k_2$  – kaitsetegur  
 $k_{c,z}$  – ebastabiilsust arvestav nõtketegur  
 $k_{fi}$  – modifikatsioonitegur tulepüsivusarvutusel  
 $k_g$  – külguuugitegur  
 $k_h$  – paksustegur  
 $k_{j,i}$  – liitetegur  
 $k_\theta$  – temperatuurist sõltuv vähendustegur  
 $k_{pos,exp,i}$  – asukohategur, mis võtab arvesse vaadeldavale kihile eelneva kihi mõju



$k_{pos,unexp,i}$  – asukohategur, mis võtab arvesse vaadeldavale kihile järgneva kihi mõju  
 $k_z$  – nõtketegur  
 $k_\rho$  – tihedustegur  
 $t$  – aeg, min  
 $t_a$  – konsolidatsiooniaeg, min  
 $t_{a,i}$  – lamelli konsolidatsiooniaeg, min  
 $t_{ch}$  – söestumise algusaeg, min  
 $t_{f,i}$  – põlenud lamelli ärakukkumise aeg, min  
 $t_{f,pr}$  – tõrketekkeae, min  
 $t_i$  – vaadeldava lamelli paksus, mm  
 $t_{prot,i}$  – vaadeldava kihi kaitseaeg, min  
 $t_{prot,0,i}$  – vaadeldava kihi baaskaitseaeg, min  
 $t_{prot,max,i}$  – maksimaalne kaitseaeg, min  
 $z$  – efektiivse ristlõike massikeskme kaugus mitte tulepoolsest küljest, mm  
 $z_i$  – vaadeldava lamelli massikeskme kaugus mitte tulepoolsest küljest, mm

### Kreeka suured tähed

$\Sigma t_{prot}$  – kaitsekihtide kaitseaegade summa, min  
 $\Sigma t_{prot,i-1}$  – vaadeldavale kihile eelnevate kihtide kaitseaegade summa, min  
 $\Delta t_i$  – vaadeldava kihi täiendav kaitseaeg, min  
 $\Delta t_{max,i}$  – maksimaalne täiendav kaitseaeg, min

### Kreeka väiketähed

$\beta_0$  – baassöestumismäär  
 $\beta_n$  – tinglik söestumiskiirus  
 $\beta_{n, faas i}$  – tinglik söestumiskiirus kindla faasi jooksul  
 $\beta_c$  – elemendi sirgsustegur  
 $\gamma_i$  – gamma-tegur ebasümmeetrilise ristlõike kandevõime leidmiseks  
 $\gamma_{M,fi}$  – puidu osavarutegur tulepüsivusarvutusel  
 $\lambda_y$  – saledus  
 $\lambda_{rel,z}$  – suhteline saledus  
 $\rho_k$  – tihedus, kg/m<sup>3</sup>  
 $\sigma_{c,0,Rd,fi}$  – arvutuslik survepinge pikikiudu, N/mm<sup>2</sup>

# 1. SISSEJUHATUS

Viimastel aastakümnetel on ehituses hakatud rohkem tähelepanu pöörama taastumatute ressursside kokkuhoiule ning keskkonna säästmisele. Puit on taastuv loodusvara ning on seetõttu saanud oluliseks ehitusmaterjaliks. Samuti on puidu eelisteks veel kergsus ja suhteliselt suur tugevus tiheduse kohta. [1]

Oluline teema seoses puitkonstruktsioonide kasutamisega ehituses on tulepüsivus, kuna puit on põlev materjal. Sellega on oluline arvestada, kui projekteerida puitkonstruktsioone. [1]

Käesoleval ajal toimub uue põlvkonna Eurokoodeksite koostamine. See protsess ei ole veel lõppenud ja uued normid veel ei kehti. Uues Eurokoodeks 5 osa 1-2 [2] on mitmeid uusi ning oluliselt muudetud projekteerimismudeleid ning -parameetreid.

Käesolev töö käsitleb ristkihtpuidu tulepüsivuse projekteerimist, arvestades liimvuugi käitumist tules ning kasutades erinevaid tõrketekkeagade väärtusi kipsplaatidega kaitstud ristkihtpuidust seinte ja vahelagede puhul.

Praegu kehtiv Eurokoodeks 5 ei sisalda ristkihtpuidu arvutusmeetodeid ning ka kipsplaatide tõrketekkeage.

Antud magistritöös on tehtud ristkihtpuidu arvutusmeetodi tundlikkuse analüüs, uurides sealjuures liimvuugi terviklikkuse ning kipsplaatide tõrketekkeagade mõju konstruktsiooni tulepüsivusele.

Antud lõputöös arvutatakse ristkihtpuidu kandevõime pärast 60, 90 ja 120 minutit kestnud tulekahju vastavalt Eurokoodeks 5 osa 1-2 esitatatud arvutusmeetoditele puidu söestumise kohta. Seejärel analüüsitakse tulemusi ning tehakse järeldused. Arvutuste jaoks on loodud mahukas Exceli fail.

Uuritavateks konstruktsioonideks on riskihtpuidust:

- vahelaepaneelid lamellidega 20-20-20-20-20, 40-20-40-20-40, 40-40-40-40-40
  - seinapaneelid lamellidega 20-20-20-20-20, 40-20-40-20-40, 40-40-40.
- Numbrid näitavad lamellide paksuseid millimeetrites.

Arvutused tehakse läbi erinevate kattematerjalidega:

- kattematerjal puudub;
- üks kiht kipsplaati, tüüp A paksusega 12,5 mm (GtA12,5);
- kaks kihti kipsplaati, tüüp A, mõlemad paksusega 12,5 mm (2xGtA12,5);
- üks kiht tuletõkkekipsplaati, tüüp F, paksusega 15 mm (GtF15);
- kaks kihti tuletõkkekipsplaati, tüüp F, paksusega 15 mm (2xGtF15);

- kombinatsioon tuletõkkekipsplaadist, tüüp F, paksusega 15 mm ning puitlaastplaadist paksusega 18 mm (GtF15+WB18);
- üks kiht tuletõkkekipsplaati, tüüp F, paksusega 20 mm (GtF20).

Kipsplaatide tüübid on antud vastavalt standardile EN 520. Arvutused tehakse erinevate tõrketekkeageadega, milleks on tulekatsete andmebaasi analüüsil saadud 5%, 20% ja 50% fraktiili väärtused.

Lisaks arvestatakse ka lamellide vahel oleva liimvuugi terviklikkusega: liimvuugi terviklikkus on kas tagatud või ei ole tagatud.

Lõputöö põhiosa koosneb viiest peatükist:

- peatükk 2 räägib sissejuhatavalt ristkihtpuidu olemusest ja puidu tulepüsivusest;
- peatükk 3 kirjeldab sõestumise arvutusmeetodit vastavalt uuele Eurokoodeks EN1995-1-2:2020-le;
- peatükk 4 kirjeldab kandevõime arvutusmeetodit vastavalt Rootsi ristkihtpuidu käsiraamatu „KL-trähandbok“ meetodile;
- peatükk 5 tutvustab lõputöös uuritavaid konstruktsioone;
- peatükk 6 toob välja arvutuste tulemused ning järeldused.

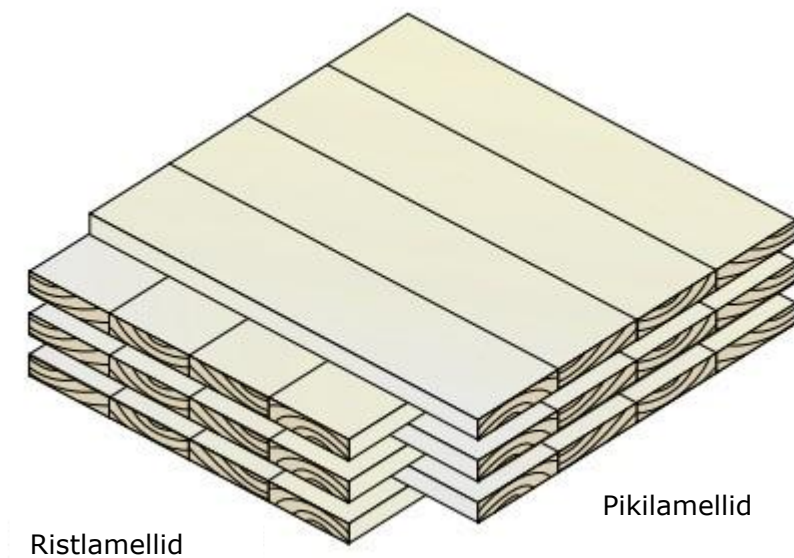
Lõputöö lisades on toodud arvutuspildid ning arvutustulemusi kokkuvõtavad tabelid.

## 2. ÜLDOSA

### 2.1 Ristkihtpuidust

Ristkihtpuit ehk CLT (inglise keeles *Cross Laminated Timber*) on puitmaterjalist ja liimist tööstuslikult valmistatud ehitusmaterjal. See koosneb serviti kokku liimitud puitlamellidest, kus lamellid on vaheldumisi üksteise suhtes risti (vt joonis 2.1). Ristkihtpuidust paneelil on üldjuhul paaritu arv kihte (enamasti 3- ja 5-kihilised) ja lamellid on paksustega 20, 30 ja 40 mm. [1]

Ristkihtpuitu kasutatakse enamasti seina- ja vahelaepaneelidena, sarnanedes seetõttu eelkõige just raudbetoonpaneelidele. Ristkihtpuidu eelisteks on kergem kaal, keskkonnasäästlikkus ja ka koormustaluvus kahes suunas tänu risti asetsetavatele lamellidele. [1]

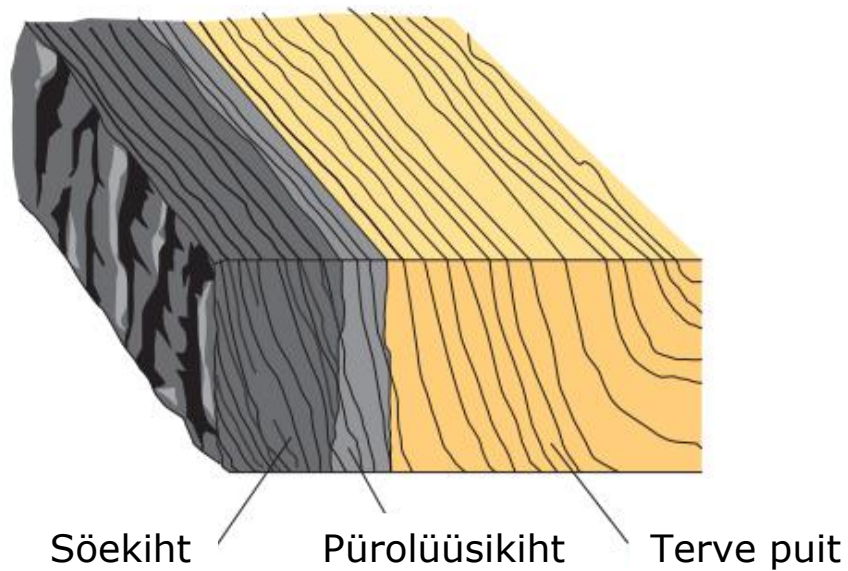


Joonis 2.1 Ristkihtpuit [3]

### 2.2 Tulepüsivusest

Puit on põlev materjal, mis hakkab söestuma siis kui pinnatemperatuur on üle 300 °C. Intensiivse põlemise järel tekib puidul isoleeriv puusöekiht, mis hakkab edasist söestumist aeglustama. Lisaks tekib söestunud ja terve puidu vahele pürolüüsikiht, mida tuli on mõjutanud, kuid täielikult lagunenud veel ei ole. Vaata joonis 2.2. [1]

Sellest tulenevalt on puitmaterjali tähtsaimaks omaduseks tulepüsivuse projekteerimisel ristlõike söestumise ulatus ning ka tugevus tulekahju korras. Tulepüsivusarvutusteks valitud arvutusmudel peab kajastama tegelikku puidu käitumist tules. Antud lõputöös lähtutakse uues Eurokoodeks 5 osa 1-2 antud arvutusmeetoditest ja nõuetest. [1]



*Joonis 2.2 Põlenud puidu kihid [4]*

### 3. RISTKIHTPUIDU SÖESTUMINE

Puidu söestumise arvutused on tehtud vastavalt EN 1995-1-2:2020 lõplikule mustandile (valmis 3.mail 2021) [2]. Valemeid tähistatakse vastavalt selles Eurokoodeksis antud valemi numbritele.

#### 3.1 Euroopa söestumismudel

EN 1995-1-2:2020 kasutab söestumise arvutamiseks Euroopa söestumismudelit. See mudel koosneb erinevatest söestumise faasidest [2]:

- Tavasöestumisfaas (**faas 1**) – esialgselt kaitsmata puidu söestumine.
- Kapselfaas (**faas 0**) – söestumist ei toimu.
- Kaitsefaas (**faas 2**) – aeglane söestumine katteplaadi taga, kui katteplaat ise on veel paigal.
- Järelkaitsefaas (**faas 3**) – kiire söestumine katteplaadi lagunemise tõttu kuni piisavalt paksu söekihi tekkimiseni või lamelli ära kukkumiseni.
- Konsolideeritud söestumisfaas (**faas 4**) – aeglane söestumine piisavalt paksu söekihi tõttu.

##### 3.1.1 Algselt kaitsmata puidu söestumine

Algselt kaitsmata, sarnaste ristlõigetega ristkihtpuidu lõplik söestumine võib erineda tulenevalt sellest, kas liimvuugi terviklikkus on tulekahjuolukorras tagatud või mitte.

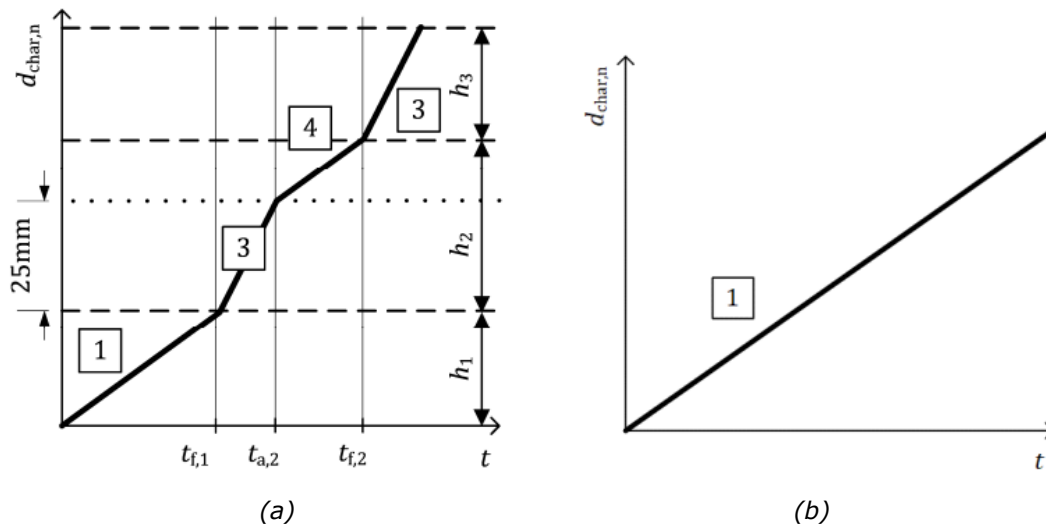
##### Liimvuugi terviklikkus ei ole tagatud

Algselt katmata puidu puhul algab söestumine koheselt ning kulgeb ühtlase kiirusega kuni esimese lamelli ära kukkumiseni (liimvuugi järele andmiseni), mida tähistab ajahetk  $t_{f,1}$ . Järgnevalt on teine lamell eelkuumenenud ja avatud tulele, mistõttu algab kiire söestumine. See lõpeb ajahetkel  $t_{a,2}$ , kui tekib piisavalt paks söekiht (25 mm) ning söestumine aeglustub. Aeglane söestumine kestab kuni teise lamelli ära kukkumiseni ehk ajahetkeni  $t_{f,2}$ . Järgnevate lamellide söestumise põhimõtte toimub sarnaselt teisele lamellile. Sellist söestumise põhimõtet nimetatakse ka astmemudeliks ja see on skeemina toodud joonisel 3.1 (a). [2], [5]

##### Liimvuugi terviklikkus on tagatud

Algselt katmata puit söestub ühtlase kiirusega algusest lõpuni, sest lamellide vahel olev liim ei anna järgi ehk iga lamell on järgnevale kaitseks tule eest. Sellist söestumise

põhimõtet nimetatakse ka lineaarseks mudeliks ja see on skeemina toodud joonisel 3.1 (b). [2]



Joonis 3.1 Katmata ristkihtpuidu söestumismudel (a) kui liimvuugi terviklikkus on tagamata (b) kui liimvuugi terviklikkus on tagatud [2]

### 3.1.2 Algselt kaitstud puidu söestumine

Algselt kaitstud, sarnaste ristlõigetega ristkihtpuidu lõplik söestumine võib erineda tulenevalt sellest, kas liimvuugi terviklikkus on tulekahjuolukorras tagatud või mitte.

#### Liimvuugi terviklikkus ei ole tagatud

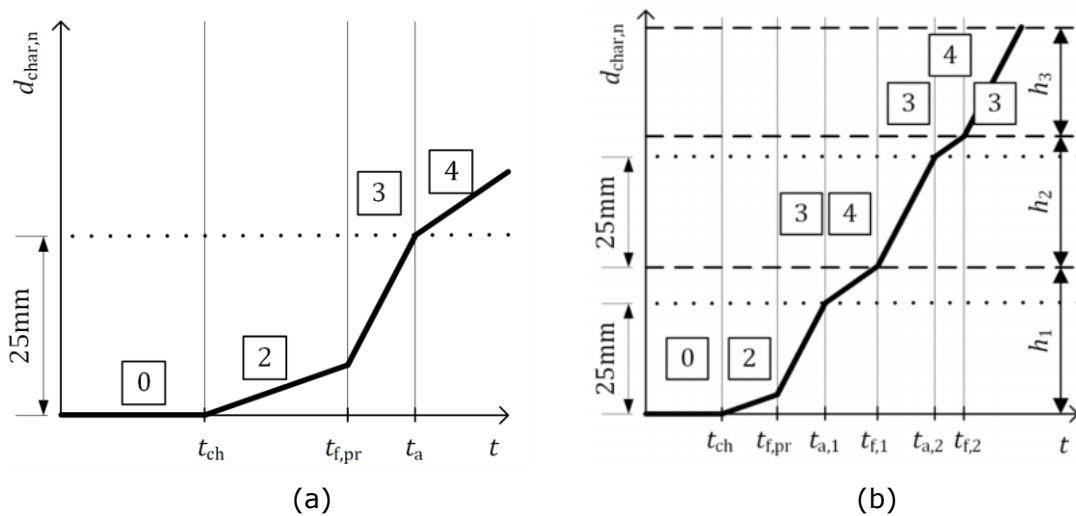
Algselt kaetud puidu puhul ei alga söestumine koheselt, kuna kattematerjal kaitseb esialgu puitu söestumise eest. Aeglane söestumine katteplaadi taga algab ajahetkel  $t_{ch}$  kui katteplaadi kaitseaeg on saavutatud ning kestab kuni katteplaadi lagunemiseni ehk ajahetkeni  $t_{f,pr}$ . Alates katteplaadi lagunemisest toimub kiire eelkuumenenud puidu söestumine kuni ajahetkeni  $t_{a,1}$ , kui tekib piisavalt paks söekiht ning söestumine aeglustub. Aeglane söestumine kestab kuni esimese lamelli ära kukkumiseni ehk ajahetkeni  $t_{f,1}$ . Teine lamell hakkab kiiresti söestuma kuni piisava söekihi tekkimiseni  $t_{a,2}$  ning seejärel aeglustub. Ajahetkel  $t_{f,2}$  kukub lamell ära ning järgnevate lamellide söestumise põhimõte toimub sarnaselt teisele lamellile. Söestumismudel on toodud joonisel 3.2 b). [2]

Esineb ka olukordi, kus  $t_{ch} = t_{f,pr}$ , ehk puidu söestumise algusaeg on võrdne katteplaadi tõrketekkeajaga. See tähendab seda, et puit hakkab söestuma alles siis, kui katteplaat on lagunenu. Selline söestumismudel on toodud joonisel 3.3 b). [2]

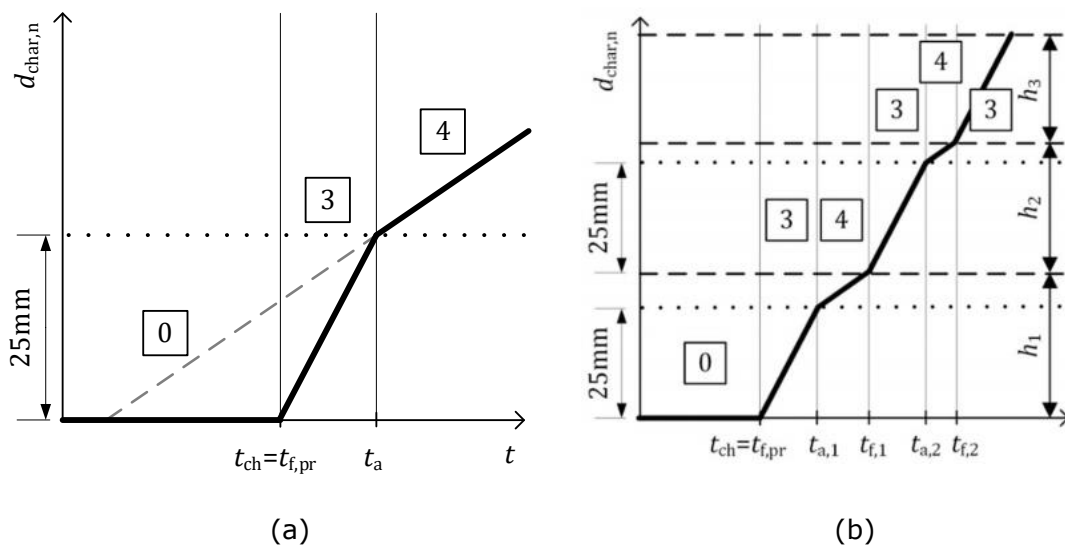
### Liimvuugi terviklikkus on tagatud

Liimvuugi terviklikkus ei mõjuta esimese lamelli põlemise protsessi. Seega on põhimõtte sama, mis algselt kaitstud puidu põlemisel, kui liimvuugi terviklikkus ei olnud tagatud. Erinevus seisneb aga selles, et kui terviklikkus on tagatud, siis lamellide vaheline liim ei anna järgi. Seega pärast piisava söekihi tekkimist jätkub aeglane söestumine kuni lõpuni välja. Selline söestumismudel on joonisel 3.2 (a). [2]

Ka siin võib esineda olukordi, kus  $t_{ch} = t_{f,pr}$ , ehk puidu söestumise algusaeg on võrdne katteplaadi tõrketekkeajaga. See tähendab seda, et puit hakkab söestuma alles siis, kui katteplaat on lagunenud. Söestumismudel on toodud joonisel 3.3 (a). [2]



Joonis 3.2 Kaetud ristkihtpuidu söestumise mudel, kui liimvuugi terviklikkus on (a) tagatud või (b) tagamata ja  $t_{ch} < t_{f,pr}$  [2]



Joonis 3.3 Kaetud ristkihtpuidu söestumise mudel, kui liimvuugi terviklikkus on (a) tagatud või (b) tagamata ja  $t_{ch} = t_{f,pr}$  [2]



### 3.1.3 Tinglik söestumissügavus

Tinglik söestumissügavus  $d_{char,n}$  arvutatakse vastavalt valemile (5.1). [2]

$$d_{char,n} = \sum_{Faasid} (\beta_n * t) \quad (5.1)$$

kus,  $t$  – söestumise aeg ühe faasi jooksul, min;

$\beta_n$  – tinglik söestumiskiirus ühe faasi jooksul, mm/min.

Antud töös käsitletakse ristkihtpuitu, seega arvutatakse selle tinglikud söestumiskiirused erinevates faasides vastavalt valemitele (7.10), (7.11) ja (7.12). [2]

$$\text{Faas 1 ja 4} \quad \beta_{n,faas\ 1,4} = k_g * \beta_0 \quad (7.10)$$

$$\text{Faas 2} \quad \beta_{n,faas\ 2} = k_2 * k_g * \beta_0 \quad (7.11)$$

$$\text{Faas 3} \quad \beta_{n,faas\ 3} = 2 * k_g * \beta_0 \quad (7.12)$$

kus,  $\beta_0$  – baassöestumismäär, mm/min;

Kuna antud töös on tegemist ristkihtpuiduga, siis  $\beta_0 = 0,65 \text{ mm/min}$  [2].

$k_g$  – külgvuugitegur;

Kuna antud töös eeldatakse, et lamellide vahe on väiksem kui 2 mm, siis  $k_g = 1$  [2].

$k_2$  – kaitsetegur, arvutatakse vastavalt valemile (5.3).

$$k_2 = 1 - \frac{h_p}{55}, \text{ kus } h_p - \text{kipsplaadi paksus} \quad (5.3)$$

### 3.1.4 Söestumise algusaeg

Algselt kaitsmata puidu puhul algab söestumine koheselt. Kaitstud ristlõigete puhul ei alga söestumine kohe vaid ajahetkel  $t_{ch}$ . See on hetk, kui kaitseplaat veel püsib, kuid algab juba aeglane söestumine kaitseplaadi taga. See arvutatakse vastavalt valemile (5.6). [2]

$$t_{ch} = \min \left\{ \sum t_{prot}, t_{f,pr} \right\} \quad (5.6)$$

kus,  $\sum t_{prot}$  – kaitsvate kihtide kaitseaegade summa, min;

$t_{f,pr}$  – tõrketekkeae, min.

**Kaitseaeg  $t_{prot,i}$** 

Vaadeldava kihi kaitseaeg arvutatakse vastavalt valemile (7.56). [2]

$$t_{prot,i} = (t_{prot,0,i} * k_{pos,exp,i} * k_{pos,unexp,i} + \Delta t_i) * k_{j,i} \quad (7.56)$$

kus,  $t_{prot,0,i}$  – kihi  $i$  baaskaitseaeg, min;

$k_{pos,exp,i}$  – asukohategur, mis võtab arvesse kihile  $i$  eelneva kihi mõju;

$k_{pos,unexp,i}$  – asukohategur, mis võtab arvesse kihile  $i$  järgneva kihi mõju;

$\Delta t_i$  – täiendav kaitseaeg kihile  $i$ , min;

$k_{j,i}$  – liitetegur.

**Baaskaitseaeg  $t_{prot,0,i}$** 

Antud lõputöö raames on kaitsekihiks A- või F-tüüpi kipsplaadid või kipsplaat koos puitlaastplaadiga. Vaadeldava kihi  $i$  baaskaitseaeg arvutatakse vastavalt valemile (7.57) või (7.60). [2]

A-või F-tüübi puhul:

$$t_{prot,0,i} = 30 * \left(\frac{h_i}{15}\right)^{1.2} \quad (7.57)$$

Puitplaadi puhul:

$$t_{prot,0,i} = \frac{h_i}{k_\rho * k_h * \beta_0} \quad (7.60)$$

kus,  $h_i$  – vaadeldava kihi paksus, mm;

$k_\rho$  – puitplaadi tihedusega arvestav tegur;

$$k_\rho = \sqrt{\frac{450}{\rho_k}}, \text{ kus } \rho_k - \text{tihedus, kg/m}^3 \text{ [2].}$$

$k_h$  – puitplaadi paksusega arvestav tegur;

$$k_h = \begin{cases} 1 & \text{kui } h_p \geq 20 \text{ mm} \\ \sqrt{\frac{20}{h_p}} & \text{kui } h_p < 20 \text{ mm} \end{cases}, \text{ kus } h_p - \text{paneeli paksus, mm [2].}$$

$\beta_0$  – baassöestumismäär, mm/min.

Kuna antud töös on tegemist ristkihtpuiduga, siis  $\beta_0 = 0,65 \text{ mm/min}$  [2].

Kui on tegemist 2xGtF15 plaadiga, siis siis neid käsitletakse ühe kihina ning paksus  $h_i$  asendatakse paksusega  $h_p$ , mis arvutatakse vastavalt valemile (7.66). [2]

$$h_p = h_1 + 0,8 * h_2 \quad (7.66)$$

kus,  $h_1$  ja  $h_2$  – on vastavalt esimese ja teise F-tüüpi kipsplaadi paksus, mm.

#### **Asukohategur $k_{pos,exp,i}$**

See tegur võtab arvesse kaitsekihile  $i$  eelnevate kihtide mõju. Kui kihile  $i$  ei eelne ühtegi kihti, siis valemis (7.56) tegur  $k_{pos,exp,i} = 1$ . Ka kahekorde F-tüüpi kipsikihi puhul  $k_{pos,exp,i} = 1$ , kuna neid vaadeldakse ühe kihina. [2]

Antud töös arvutatakse  $k_{pos,exp,i}$  puitplaadile, kuna talle eelneb F-tüüpi kipsplaat. Samuti ka kahekordse A-tüüpi kipsplaadi puhul arvutatakse asukohategur teisele kipsikihile, kuna neid vaadeldakse kahe erineva kihina. Sellistel juhtudel arvutatakse asukohategur vastavalt valemile (7.79). [2]

$$k_{pos,exp,i} = \begin{cases} 1 - 0,6 * \frac{\sum t_{prot,i-1}}{t_{prot,0,i}}, & \text{kui } \sum t_{prot,i-1} \leq \frac{t_{prot,0,i}}{2} \\ 0,5 * \sqrt{\frac{t_{prot,0,i}}{\sum t_{prot,i-1}}}, & \text{kui } \sum t_{prot,i-1} > \frac{t_{prot,0,i}}{2} \end{cases} \quad (7.79)$$

kus,  $t_{prot,0,i}$  – kihi  $i$  baaskaitseaeg, min;

$\sum t_{prot,i-1}$  – kihile  $i$  eelnevate kihtide kaitseaegade summa, min.

#### **Asukohategur $k_{pos,unexp,i}$**

See tegur võtab arvesse kihile  $i$  järgneva kihi mõju. Antud töös järgneb kihile  $i$  alati kas kipsplaat või puitpaneel. Sellisel juhul võetakse asukohategur  $k_{pos,unexp,i} = 1$ . [2]

#### **Liitetegur $k_{j,i}$**

Antud töös arvutatakse kihte, mille taha jäävad puitplaadid, seega on liitetegur  $k_{j,i} = 1$  [2].

#### **Täiendav kaitseaeg $\Delta t_i$**

Täiendav kaitseaeg arvutatakse siis, kui tulepoolseks kipsplaadiks on F-tüüpi kipsplaat või kipskiudplaat. Sellisel juhul arvestatakse sellele järgneva kihi kaitseaja arvutamisel täiendava kaitseajaga. [2]

Antud töös arvutatakse täiendav kaitseaeg puitplaadist kihile WB18, kuna sellele eelneb F-tüüpi kipsplaadi kiht. Arvutus tehakse vastavalt valemile (7.93). [2]

$$\Delta t_i = \frac{(t_{f,pr} - \sum_{k=i}^{i-1} t_{prot,k}) * \Delta t_{max,i}}{t_{prot,max,i}} \leq \Delta t_{max,i} \quad (7.93)$$

kus,  $t_{f,pr}$  – kihi  $i$  tõrketekkeae, min;

$\sum_{k=i}^{i-1} t_{prot,k}$  – kihile  $i$  eelnevate kihtide kaitseaegade summa, min;

$t_{prot,max,i}$  – maksimaalne kaitseaeg, min;

$\Delta t_{max,i}$  – maksimaalne täiendav kaitseaeg, min.

Maksimaalne kaitseaeg  $t_{prot,max,i}$  arvutatakse valemiga (7.95). [2]

$$t_{prot,max,i} = \frac{t_{prot,0,i}}{k_2} \quad (7.95)$$

kus,  $t_{prot,0,i}$  – kihi  $i$  baaskaitseaeg, min;

$k_2$  – kaitsetegur.

$$k_2 = 1 - \frac{h_p}{55}, \text{ kus } h_p \text{ – kipsplaadi paksus [2].} \quad (5.3)$$

Maksimaalne täiendav kaitseaeg  $\Delta t_{max,i}$  arvutatakse valemiga (7.97). [2]

$$\Delta t_{max,i} = t_{prot,max,i} - t_{prot,0,i} * k_{pos,exp,i} * k_{pos,unexp,i} * k_{j,i} \quad (7.97)$$

kus,  $t_{prot,max,i}$  – maksimaalne kaitseaeg, min;

$t_{prot,0,i}$  – kihi  $i$  baaskaitseaeg, min;

$k_{pos,exp,i}$  – asukohategur, mis võtab arvesse kihile  $i$  eelneva kihi mõju;

$k_{pos,unexp,i}$  – asukohategur, mis võtab arvesse kihile  $i$  järgneva kihi mõju;

$k_{j,i}$  – liitetegur.

### 3.1.5 Tõrketekkeae

Tõrketekkeae  $t_{f,pr}$  on ajahetk, kui katteplaat laguneb ning eelnevalt plaadi taga olnud puit on nüüd tulele avatud. Algab kiire söestumine.

Tõrketekkeae sõltub kaitsekihtide tüübist kui ka nende arvust. EN 1995-1-2:2020 annab arvutusvalemid tõrketekkeaja leidmiseks, mis on 20% fraktilidel põhinevad. Antud lõputöös on kasutatud K. Kraudoki leitud tõrketekkeaeade 5%, 20% ja 50% fraktille [6]. Need põhinevad katseandmetel ja on arvutatavad vastavalt tabelile 3.1.

Lisaks suurendatakse neid aegasid veel 20% võrra, kuna kipsplaat asub puitelemendil [2].

5% fraktil tähendab sisuliselt seda, et 95% katsetulemustest on väärtustelt suuremad. 20% fraktil tähendab, et 80% katsetulemustest on suuremad ning 50% fraktil on keskväärtus.

Tabel 3.1 Erinevate fraktilide tõrketekkeajad [6]

| Konstruksioon   | Katte-<br>materjalid    | 5% fraktil        | 20% fraktil       | 50% fraktil       |
|-----------------|-------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| <b>Sein</b>     | GtA 1/1                 | $1,8 * h_p - 4,7$ | $2,1 * h_p - 6,3$ | $2,4 * h_p - 6,5$ |
|                 | GtA 2/2<br>$h_p = 25$   | 40                | 42                | 45                |
|                 | GtF 1/1                 | $3,6 * h_p - 14$  | $4,6 * h_p - 25$  | $4,5 * h_p - 12$  |
|                 | GtF 2/2                 | $3,4 * h_p - 27$  | $4,4 * h_p - 50$  | $2,0 * h_p + 31$  |
| <b>Vahelagi</b> | GtA 1/1<br>$h_p = 12,5$ | 14                | 15                | 19                |
|                 | GtA 2/2<br>$h_p = 25$   | 28                | 29                | 30                |
|                 | GtF 1/1                 | $1,3 * h_p + 7,5$ | $1,3 * h_p + 8,6$ | $0,2 * h_p + 32$  |
|                 | GtF 2/2                 | $0,4 * h_p + 39$  | $1,5 * h_p + 15$  | $4,0 * h_p - 44$  |

kus,  $h_p$  – ühe kaitsekihi paksus või kahe kihi kogupaksus, mm

Käesolevas lõputöös on kattematerjaliks ka GtF15+WB18, mille kohta ei ole antud tõrketekkeajasid. See arvutatakse seega vastavalt valemile (5.9). [2]

$$t_{f,pr} = t_{ch} = \sum t_{prot} \quad (5.9)$$

kus,  $t_{ch}$  – söestumise algusaeg, min;

$\sum t_{prot}$  – kattematerjalide kaitseaegade summa, min.

### 3.1.6 Konsolidatsiooniaeg

Kui eelkuumenenud lamell on mõnda aega kiirelt söestunud, siis tekib peagi piisavalt paks söekiht, mil söestumiskiirus muutub aeglasemaks. Seda ajahetke nimetatakse konsolidatsiooniajaks  $t_a$ . See arvutatakse vastavalt valemile (5.5). [2]

$$t_a = \min \left\{ t_{f,pr} + \frac{2 * t_{f,pr}}{25 - (t_{f,pr} - t_{ch}) * \beta_{n,faas\ 2}} \right. \quad (5.5)$$

kus,  $t_{f,pr}$  – tõrketekkeae, min;

$t_{ch}$  – söestumise algusaeg, min;

$\beta_{n,faas\ 2}$  – söestumiskiirus faasis 2, mm/min;

$\beta_{n,faas\ 3}$  – söestumiskiirus faasis 3, mm/min.

## 3.2 Efektiivristlõike meetod

Efektiivristlõike  $h_{ef}$  saamiseks vähendatakse algristlõiget efektiivse söestumissügavuse  $d_{ef}$  võrra vastavalt valemile (7.4). [2]

$$h_{ef} = h - d_{ef} \quad (7.4)$$

kus,  $h$  – algristlõike kõrgus, mm;

$d_{ef}$  – efektiivne söestumissügavus, mm.

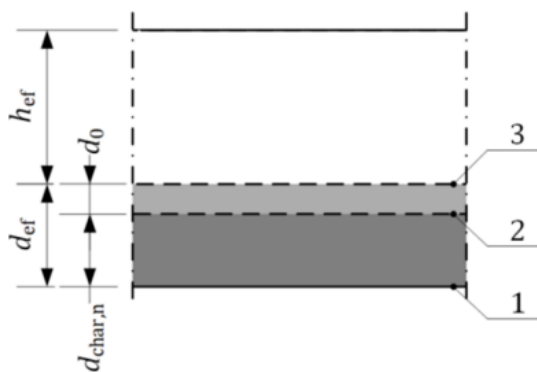
### 3.2.1 Efektiivne söestumissügavus

Efektiivne söestumissügavus  $d_{ef}$  koosneb tinglikust söestumissügavusest ja null-tugevusega kihist, mis arvutatakse vastavalt valemile (7.2). [2]

$$d_{ef} = d_{char,n} + d_0 \quad (7.2)$$

kus,  $d_{char,n}$  – tinglik söestumissügavus, mm;

$d_0$  – null-tugevusega kiht, mm.



Joonis 3.4 Efektivrästlõige [2]

### 3.2.2 Null-tugevusega kiht

Null-tugevusega kiht  $d_0$  võtab arvesse puidu kuumenemisest tekkivat tugevuse vähenemist söekihi taga. Need väärtused on antud tabelis 3.2 ja 3.3. [2]

Tabel 3.2 Null-tugevusega kihi väärtused ristkihtpuidust vahelagedele, kui tõmbetsoon on tulele avatud, mm [2]

| VAHELAGI                                | Kaitsmata        | Kaitstud        |
|-----------------------------------------|------------------|-----------------|
| $d_{char,n}$ asub esimeses lamellis     | 7 <sup>a</sup>   | 12 <sup>a</sup> |
| $d_{char,n}$ asub mõnes teises lamellis | 12 <sup>ab</sup> |                 |

<sup>a</sup> Kui arvutatud efektiivne söestumissügavus  $d_{ef}$  jääb mittekandvasse lamelli, siis tuleb lõplikku  $d_{ef}$  suurendada veel mittekandva lamelli paksuse ja 2 mm võrra järgnevas kandvas lamellis. Vaata joonis 3.4.

<sup>b</sup> Kui arvutatud efektiivne söestumissügavus  $d_{ef}$  jääb kandvasse lamelli, siis peab lõplik  $d_{ef}$  ulatuma sinna lamelli vähemalt 2 mm. Vaata joonis 3.5.

Tabel 3.3 Null-tugevusega kihi arvutusvalemid ristkihtpuidust seintele [2].

| SEIN                                                 | Kaitsmata                                                                  | Kaitstud                      |
|------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| $d_{char,n}$ asub esimeses lamellis                  | $d_0 = \max \left\{ \frac{4}{5} * h_1 - 14 \right.$                        | $d_0 = \frac{2}{5} * h_1 + 8$ |
| $d_{char,n}$ asub mõnes teises mittekandvas lamellis | $d_0 = h_{res,i} + (8 + \frac{h}{10}) * (1 - 0,9 * \frac{h_{res,i}}{h_i})$ | (7.18) <sup>ab</sup>          |
| $d_{char,n}$ asub mõnes teises kandvas lamellis      | $d_0 = (8 + \frac{h}{10}) * (0,1 - 0,9 * \frac{h_{res,i}}{h_i})$           | (7.19) <sup>ab</sup>          |

kus,  $h_{res,i}$  – lamelli põlemata osa paksus, mm;

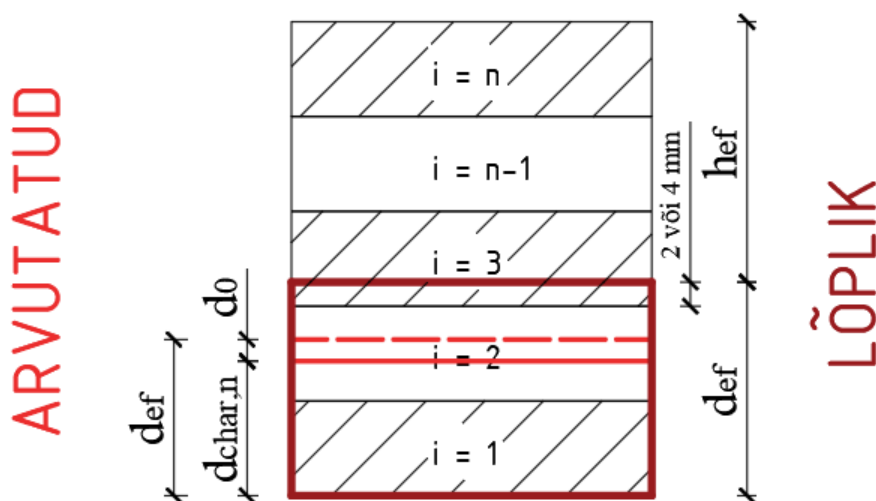
$h_1$  – esimese lamelli paksus, mm;

$h_i$  – vaadeldava lamelli paksus, mm;

$h$  – ristlõike kogupaksus paksus, mm

<sup>a</sup> Kui arvatatud efektiivne söestumissügavus  $d_{ef}$  jääb mittekandvasse lamelli, siis tuleb lõplikku  $d_{ef}$  suurendada veel mittekandva lamelli paksuse ja 4 mm võrra järgnevas kandvas lamellis. Vaata joonis 3.4.

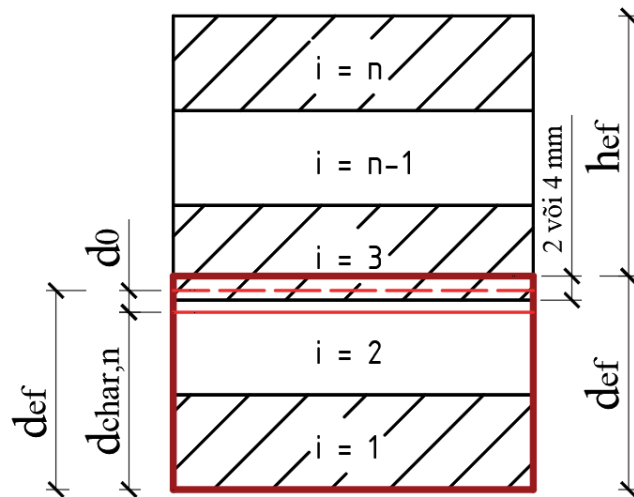
<sup>b</sup> Kui efektiivne söestumissügavus  $d_{ef}$  jääb kandvasse lamelli, siis peab lõplik  $d_{ef}$  ulatuma sinna lamelli vähemalt 4 mm. Vaata joonis 3.5.



Joonis 3.5 Lõpliku efektiivse söestumissügavuse leidmise skeem juhul, kui arvutuslik efektiivne söestumissügavus jääb mittekandvasse lamelli [2]



ARVUTATUD



LÕPLIK

Joonis 3.6 Lõpliku efektiivse sөestumissügavuse leidmise skeem juhul, kui arvutuslik efektiivne sөestumissügavus jääb kandvasse lamelli vahelagede korral vähem kui 2mm ja seinte korral vähem kui 4mm [2]

## 4. KANDEVÕIME ARVUTUS

### 4.1 Puidu arvutustugevus

Puidu arvutustugevus arvutatakse vastavalt EN 1995-1-2 valemitele. Valemeid tähistatakse vastavalt seal antud valemi numbritele.

Puidu arvutustugevus tulepüsivuse arvutustel on leitav vastavalt valemile (4.1). [2]

$$f_{d,fi} = k_{\theta} * \frac{k_{fi} * f_k}{\gamma_{M,fi}} \quad (4.1)$$

kus,  $k_{\theta}$  – temperatuurist sõltuv vähendustegur;

Efektiivristlõike meetodi puhul  $k_{\theta} = 1$  [2].

$\gamma_{M,fi}$  – puidu osavarutegur tulepüsivusarvutusel;

Soovitavaks osavaruteguri väärtuseks tulepüsivusarvutustes on  $\gamma_{M,fi} = 1$  [2].

$k_{fi}$  – teisendustegur, mis arvestab tulekahjuolukorras suurema arvutustugevusega. Kuna antud töös on tegemist ristkihtpuiduga, siis  $k_{fi} = 1,15$  [2].

$f_k$  – puidu tugevuse normväärtus,  $N/mm^2$ .

Antud töös on puidu klassiks C24, seega  $f_{m,k} = 24 N/mm^2$ ;

$$f_{c,0,k} = 21 N/mm^2. [1]$$

### 4.2 Puidu efektiivristlõike karakteristikud

Arvutused tehakse vastavalt Rootsi ristkihtpuidu käsiraamatule „KL-trähandbok“. [4]. Seal kasutatakse nn gamma-meetodit, kus gamma tegurid võtavad inertsimomendi arvutamisel arvesse ristlõike ebasümmeetrilisust ja vahekihi järeleandvust. Ebasümmeetria tekib ristlõike söestumisest.

Valemite numbrid on tähistatud vastavalt käsiraamatu valemite numbritele.

Ristlõike netopindala arvutatakse vastavalt valemile (3.29). [4]

$$A_{x,net} = \sum b_x * t_i \quad (3.29)$$

kus,  $b_x$  – ristlõike laius, mm;

$t_i$  – lamelli paksus, mm.

Ristlõike massikeskme asukoht arvutatakse vastavalt valemile (3.28). [4]

$$z = \frac{\sum b_x * t_i * z_i}{\sum b_x * t_i} \quad (3.28)$$

kus,  $b_x$  – ristlõike laius, mm;

$t_i$  – lamelli paksus, mm;

$z_i$  – lamelli massikeskme kaugus mittetulepoolsest küljest, mm.

Kui efektiivne ristlõige koosneb kolmest või neljast lamelist (esimene ja kolmas lamell on kandvad lamellid), siis gamma väärtused arvutatakse kandvatele lamellidele valemite (3.32) ja (3.33) järgi. [4]

$$\gamma_1 = 1 \quad (3.32)$$

$$\gamma_3 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 * E_{0,05} * t_3 * t_2}{L_c^2 * G_{9090}}} \quad (3.33)$$

kus,  $t_2$  – teise lamelli paksus, mm;

$t_3$  – kolmanda lamelli paksus, mm;

$L_c$  – seina kõrgus/vahelae pikkus, mm;

Antud töös on igal juhul võetud  $L_c = 3 \text{ m}$ .

$E_{0,05}$  – elastsusmoodul, N/mm<sup>2</sup>;

$G_{9090}$  – nihkemoodul, N/mm<sup>2</sup>.

Kui efektiivne ristlõige koosneb viiest lamelist (esimene, kolmas ja viies lamell on kandvad lamellid), siis gamma väärtused arvutatakse kandvatele lamellidele valemite (3.36), (3.37) ja (3.38) järgi. [4]

$$\gamma_1 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 * E_{0,05} * t_1 * t_2}{L_c^2 * G_{9090}}} \quad (3.36)$$

$$(3.37)$$

$$\gamma_3 = 1$$

$$\gamma_5 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 * E_{0,05} * t_5 * t_4}{L_c^2 * G_{9090}}} \quad (3.38)$$

kus,  $t_2$  – teise lamelli paksus, mm;  
 $t_3$  – kolmanda lamelli paksus, mm;  
 $L_c$  – seina kõrgus/vahelae pikkus, mm;  
 Antud töös on igal juhul võetud  $L_c = 3 \text{ m}$ .  
 $E_{0,05}$  – elastsusmoodul, N/mm<sup>2</sup>;  
 $G_{9090}$  – nihkemoodul, N/mm<sup>2</sup>.

Efektiivne inertsimoment arvutatakse vastavalt valemile (3.34) [4]. Selgitav joonis 4.1.

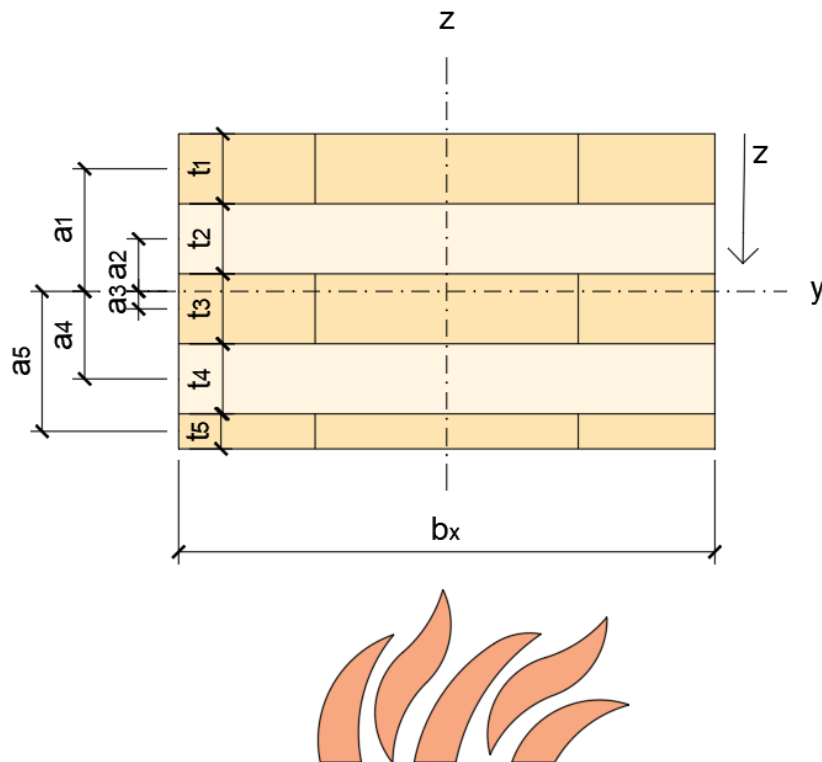
$$I_{x,ef} = \sum b_x * (\frac{t_i^3}{12} + \gamma_i * t_i * a_i^2) \quad (3.34)$$

kus,  $b_x$  – ristlõike laius, mm;  
 $t_i$  – lamelli paksus, mm;  
 $a_i$  – lamelli raskuskeskme kaugus kogu ristlõike raskuskeskmest, mm;  
 $\gamma_i$  – gamma-tegur.

Efektiivne vastupanumoment arvutatakse vastavalt valemile (3.31) [4]. Selgitav joonis 4.1.

$$W_{x,ef} = \frac{I_{x,ef}}{\max\{z; h_{ef} - z\}} \quad (3.31)$$

kus,  $I_{x,ef}$  – ristlõike efektiivne inertsimoment, mm<sup>4</sup>;  
 $z$  – ristlõike massikeskme kaugus, mm;  
 $h_{ef}$  – efektiivse ristlõike kogukõrgus, mm.



Joonis 4.1 Asümmeetriline ristlõige [4]

## 4.3 Kandeõimed

Seinte ja vahelagede kandeõimed arvutatakse üldtuntud põhimõtete järgi [7]. Valemite numbrid on antud vastavalt antud lõputöö peatüki numbritele.

### 4.3.1 Vahelae paindekandeõime

Vahelagede puhul arvutatakse paindekandeõime vastavalt valemile (4.3.1).

$$M_{Rd,fi} = W_{x,ef} * f_{m,d,fi} \quad (4.3.1)$$

kus,  $W_{x,ef}$  – ristlõike efektiivne vastupanumoment, mm<sup>3</sup>;

$f_{m,d,fi}$  – puidu arvutuslik paindetugevus tulekahjuolukorras, N/mm<sup>2</sup>.

### 4.3.2 Seina kandeõime

Seinte puhul arvutatakse kandeõime vastavalt valemile (4.3.2).

$$N_{Rd,fi} = \sigma_{c,0,Rd,fi} * A_{x,net} \quad (4.3.2)$$

kus,  $A_{x,net}$  – ristlõike netopindala, mm<sup>2</sup>;  
 $\sigma_{c,0,Rd,fi}$  – arvutuslik survepinge, N/mm<sup>2</sup>.

Arvutuslik survepinge on arvutatav valemiga (4.3.3). [8]

$$\sigma_{c,0,Rd,fi} = k_{c,z} * f_{c,0,d,fi} \quad (4.3.3)$$

kus,  $f_{c,0,d,fi}$  – arvutuslik survetugevus, N/mm<sup>2</sup>;  
 $k_{c,z}$  – nõtketegur.

### 4.3.3 Seinastabiilsus

Nõtketegur on arvutatav valemiga (4.3.4). [8]

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} \quad (4.3.4)$$

kus,  $\lambda_{rel,z}$  – suhteline saledus .

Tegur  $k_z$  arvutatakse valemiga (4.3.5). [8]

$$k_z = 0,5 * (1 + \beta_c * (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) \quad (4.3.5)$$

kus,  $\lambda_{rel,z}$  – suhteline saledus;  
 $\beta_c$  – elemendi tegur, antud töös  $\beta_c = 0,2$  [8].

Suhteline saledus on arvutatav valemiga (4.3.6). [8]

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} * \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} > 0,3 \quad (4.3.6)$$

kus,  $\lambda_z$  – saledus;

$f_{c,0,k}$  – puidu normatiivne survetugevus, N/mm<sup>2</sup>;

$E_{0,05}$  – elastsusmoodul, N/mm<sup>2</sup>.

Saledus on arvutatav valemiga (4.3.7). [8]

$$\lambda_z = \frac{L_c}{i_z} \quad (4.3.7)$$

kus,  $i_z$  – inertsiraadius, mm;

$L_c$  – seina kõrgus, mm.

Antud töös on võetud  $L_c = 3 \text{ m}$ .

Inertsiraadius on arvutatav valemiga (4.3.8). [8]

$$i_z = \sqrt{\frac{I_{x,ef}}{A}} \quad (4.3.8)$$

kus,  $I_{x,ef}$  – ristlõike efektiivne inertsimoment, mm<sup>4</sup>;

$A$  – ristlõike efektiivne pindala, mm<sup>2</sup>.

## 5. UURITUD KONSTRUKTSIOONID

Arvutatavateks konstruktsioonideks on riskihtpuidust:

- vahelaepaneelid lamellidega 20-20-20-20-20, 40-20-40-20-40, 40-40-40-40-40
- seinapaneelid lamellidega 20-20-20-20-20, 40-20-40-20-40, 40-40-40

,kus numbrid näitavad lamellide paksuseid millimeetrites.

Arvutused tehakse läbi erinevate kattematerjalidega:

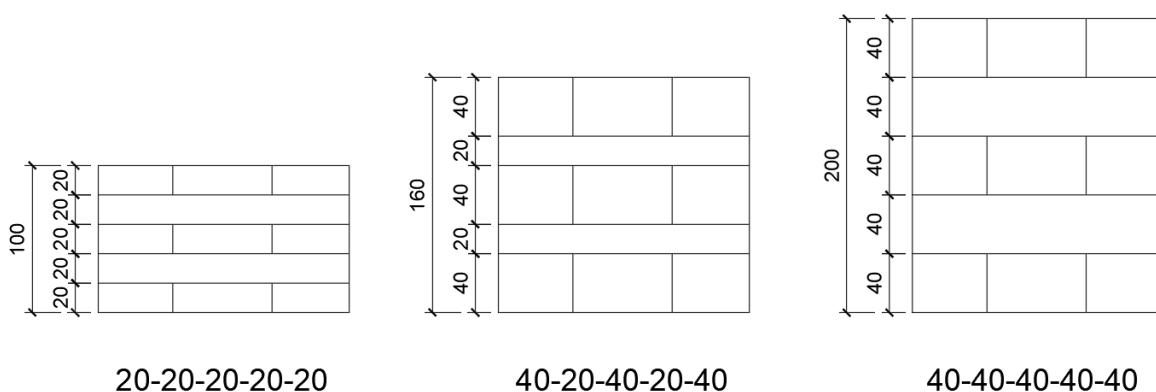
- kattematerjal puudub,
- üks kiht kipsplaati, tüüp A paksusega 12,5 mm (GtA12,5);
- kaks kihti kipsplaati, tüüp A, mõlemad paksusega 12,5 mm (2xGtA12,5);
- üks kiht tuletõkkekipsplaati, tüüp F, paksusega 15 mm (GtF15);
- kaks kihti tuletõkkekipsplaati, tüüp F, paksusega 15 mm (2xGtF15);
- kombinatsioon tuletõkkekipsplaadist, tüüp F, paksusega 15 mm ning puitlaastplaadist paksusega 18 mm (GtF15+WB18)
- üks kiht tuletõkkekipsplaati, tüüp F, paksusega 20 mm (GtF20)

Arvutused tehakse ka erinevate tõrketekkeageadega: 5%, 20% ja 50% fraktsioonidega. Lisaks arvestatakse ka lamellide vahel oleva liimvuugi terviklikkusega: terviklikkus kas on tagatud või ei ole tagatud.

Puidu liimide standard EN301 ei käsitle liimide käitumist tulekahjuolukorras ega ka liimvuugi terviklikkust. Katsemeetodit alles töötatakse välja.

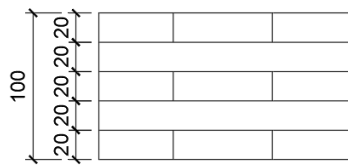
Vahelaeelementide puhul on leitud 1 meetri laiuse riba paindekandevõime.

Seinaelementide puhul on leitud 1 m laiuse riba survekandevõime, arvestades nõtkumist seinatasandist välja. Nõtkepikkuseks on arvestatud 3 m.

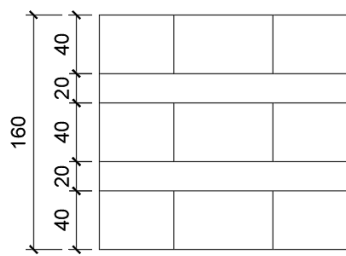


Joonis 5.1 Vahelaeelementide ristlõiked

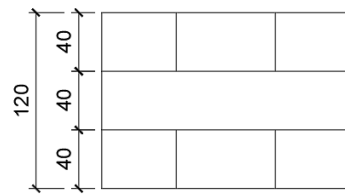




20-20-20-20-20



40-20-40-20-40



40-40-40

Joonis 5.2 Seinaelementide ristlõiked

## 6. ARVUTUSTULEMUSED JA JÄRELDUSED

### 6.1 Söestumise analüüs

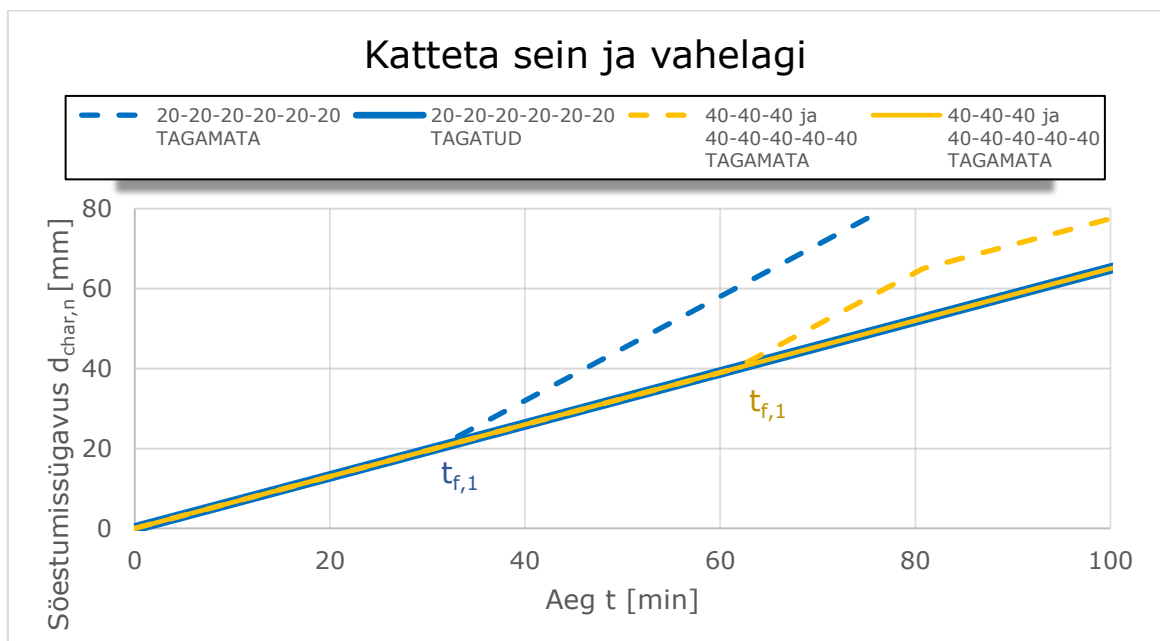
Antud alapeatükis on toodud vahelagede (20-20-20-20-20 ja 40-40-40-40) ja seinte (20-20-20-20-20 ja 40-40-40) söestumiste graafikud 20% fraktiili korral, kui kattematerjalideks on:

- katteta
- GtA12,5
- GtF15+WB18
- GtF20

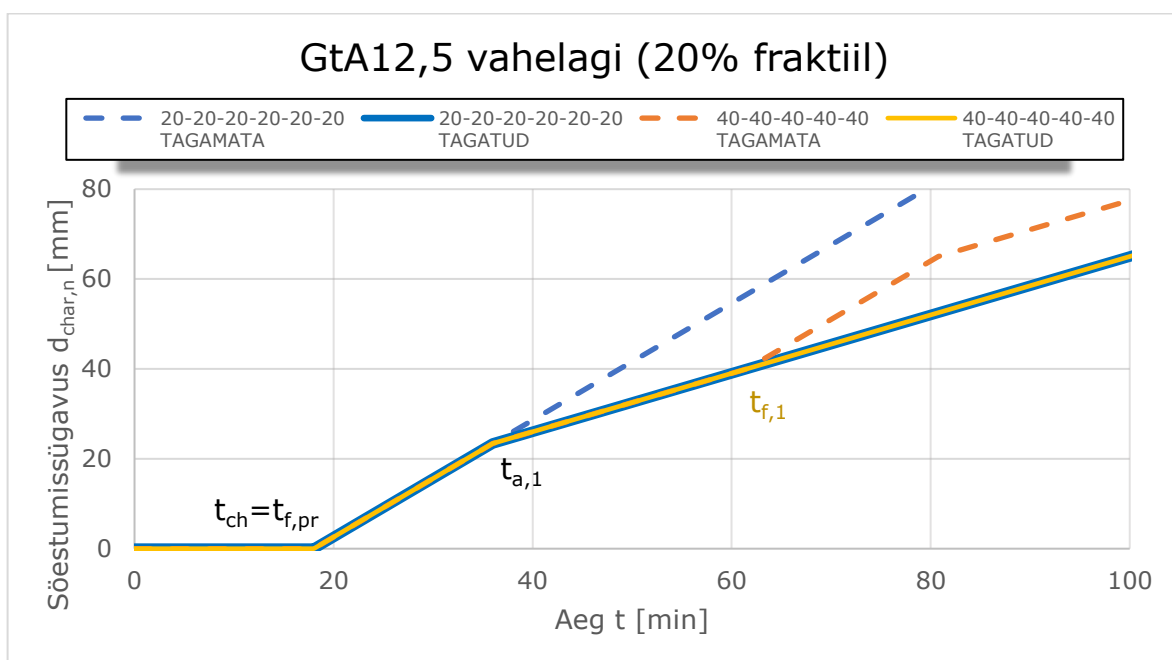
Seejärel analüüsitakse söestumise graafikuid ning selgitatakse liimvuugi terviklikkusest ja kattematerjalidest tulenevaid söestumissügavuste erinevusi. Tuuakse ka tabelitena välja söestumised mm-tes pärast 60 ja 90 minutit põlemist.

#### 6.1.1 Söestumise graafikud

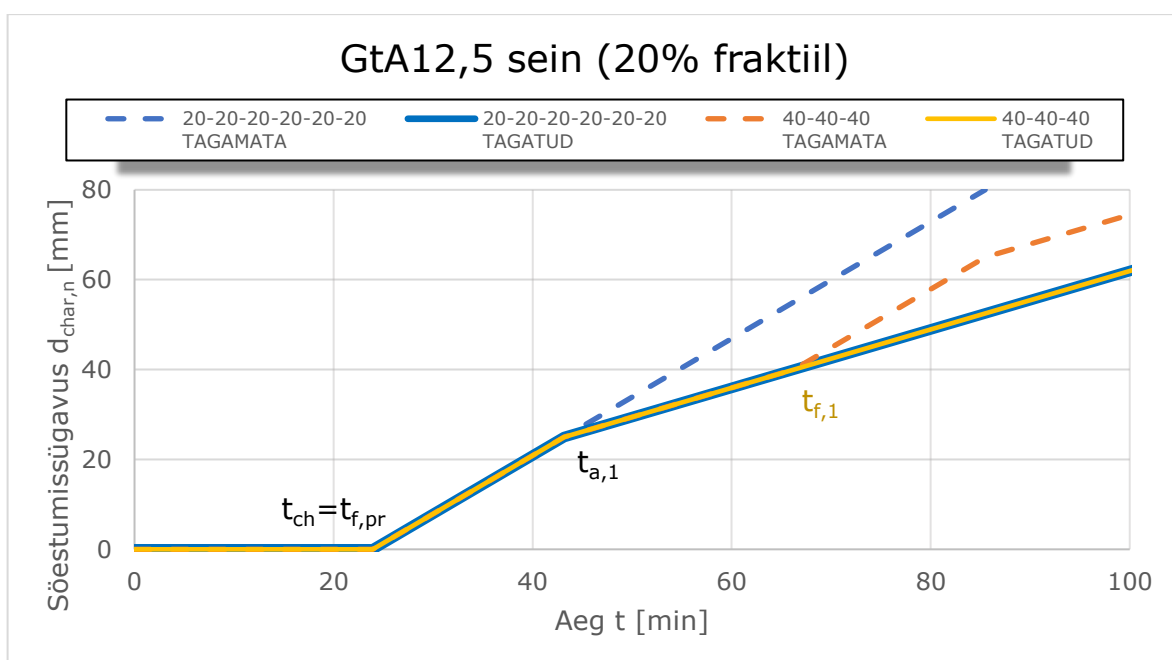
Järgnevalt on toodud vahelagede ja seinte söestumise graafikud 20% fraktiili näitel. Katkendjooned tähistavad olukorda, kus liimvuugi terviklikkus ei ole tagatud, ning pidevjoon olukorda, kus terviklikkus on tagatud. Sinine värv tähistab 20 mm lamellidega ristlõiget ja kollane värv 40 mm lamellidega ristlõiget.



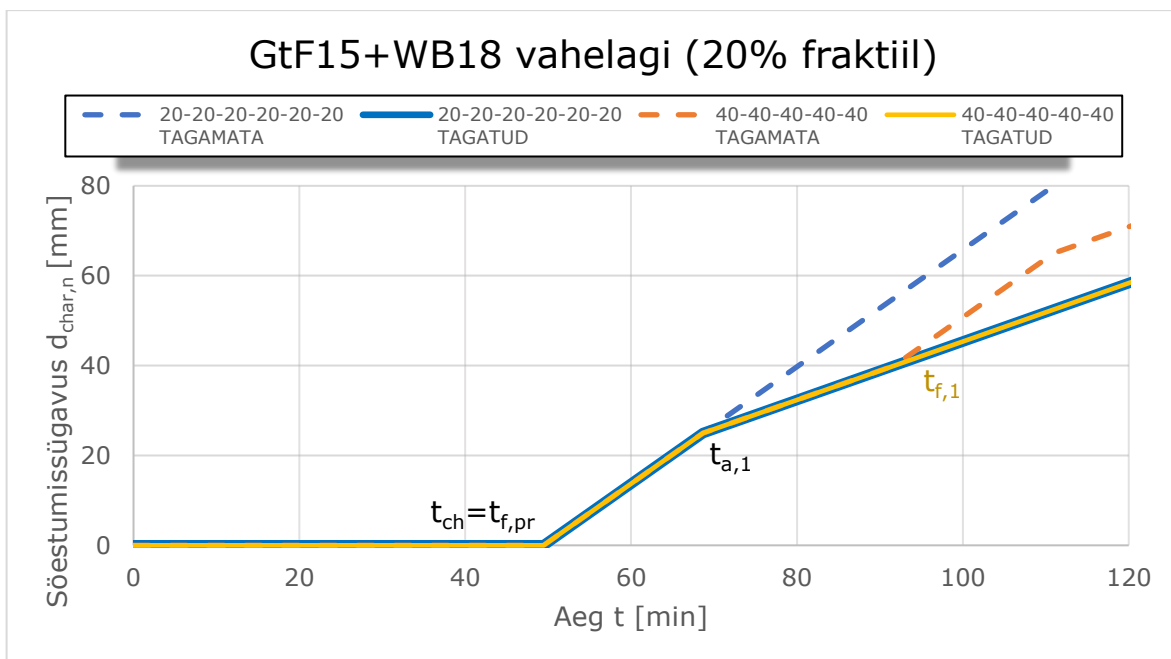
Graafik 6.1 Katteta sein ja vahelagi söestumise graafik 20% fraktiili korral



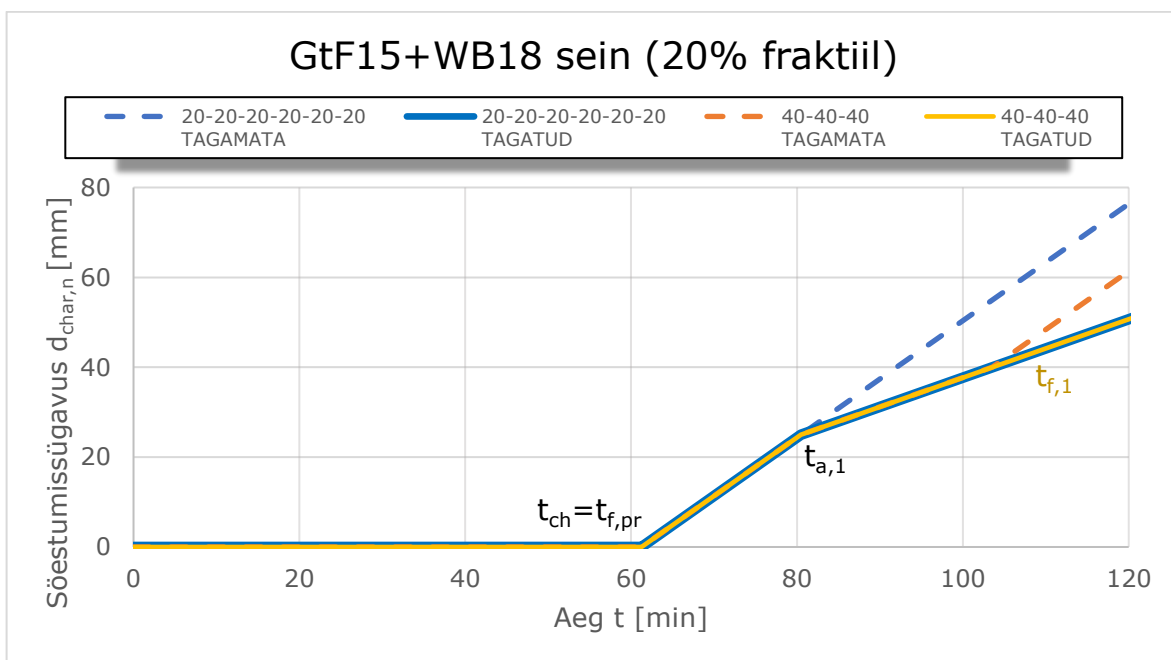
Graafik 6.2 GtA12,5 kipsplaadiga kaetud vahelae söestumise graafik 20% fraktiili korral



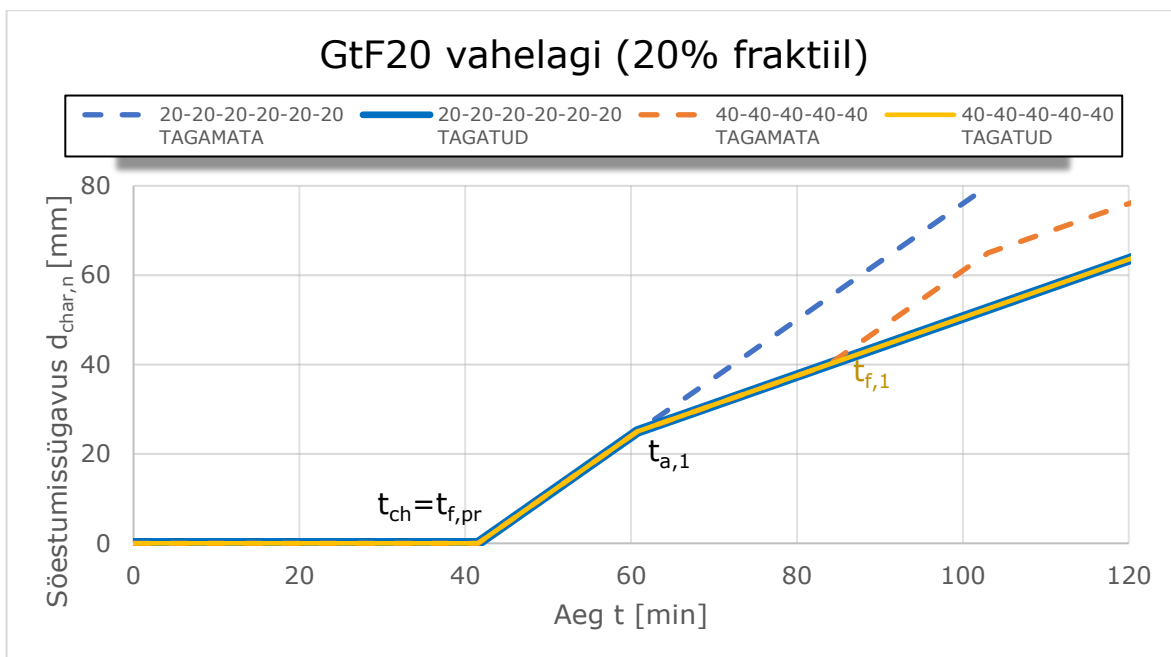
Graafik 6.3 GtA12,5 kipsplaadiga kaetud seina söestumise graafik 20% fraktiili korral



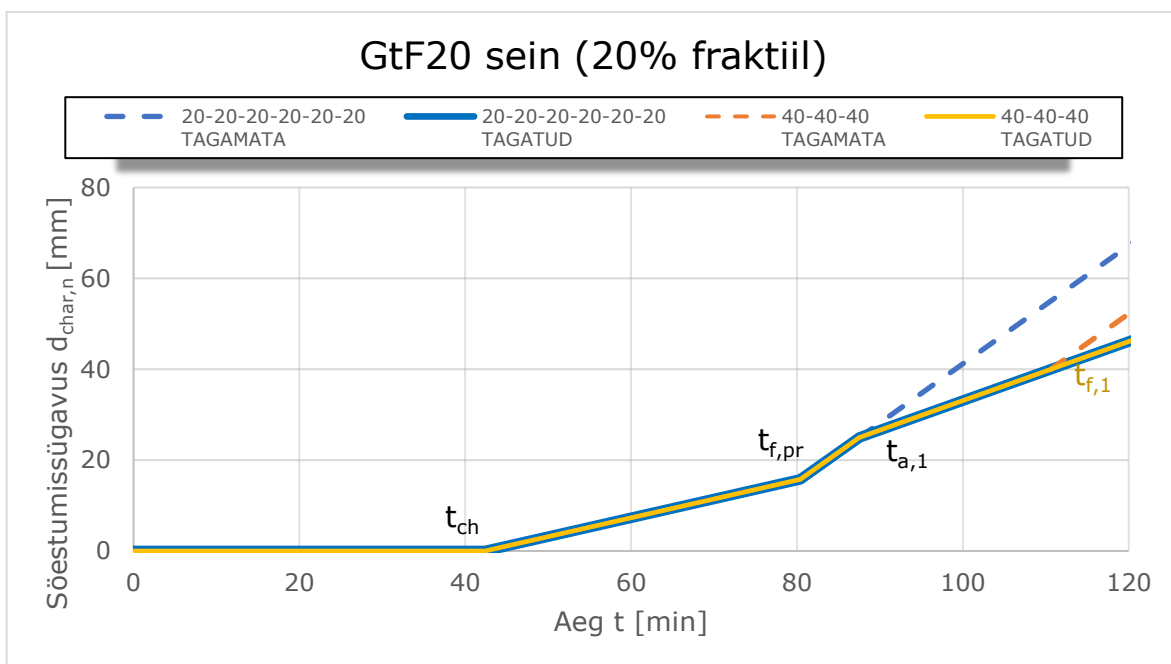
Graafik 6.4 GtF15+WB18 kaetud vahelae söestumise graafik 20% fraktili korral



Graafik 6.5 GtF15+WB18 kaetud seina söestumise graafik 20% fraktili korral



Graafik 6.6 GtF20 kipsplaadiga kaetud vahelae söestumise graafik 20% fraktili korral



Graafik 6.7 GtF20 kipsplaadiga kaetud seina söestumise graafik 20% fraktili korral

### 6.1.2 Analüüs ja järeldused

Järgnevalt tulevad tabelid, kus on toodud välja seinte ja vahelagede söestumissügavused pärast 60 ja 90 minutit põlemist. Lisaks selgitatakse täpsemalt söestumise põhimõtet sõltuvalt liimvuugi terviklikkusest ja kattematerjalidest.

#### 20 mm-ste lamellidega ristlõiked:

GtF15+WB18 ja GtF20 tõrketekkeajad on suuremad. Tabelite põhjal võib öelda, et nende kattematerjalide kasutamisel tulepüsivuse R60 korral ei muuda liimvuugi terviklikkus kandevõimet üldse. Samuti ei ole kandevõime erinevus väga suur ka tulepüsivuse R90 juures, võrreldes A-tüüpi kipsplaadi ja katmata olukorraga.

Tabel 6.1 Vahelae 20-20-20-20-20 söestumissügavused erinevate kattematerjalide korral

| Vahelagi 20-20-20-20-20 |          |         |          |         |
|-------------------------|----------|---------|----------|---------|
| TULEPÜSIVUS             | 60min    |         | 90min    |         |
| TERVIKLIKKUS            | tagamata | tagatud | tagamata | tagatud |
| Katteta                 | 58 mm    | 39 mm   | 97 mm    | 59 mm   |
| GtA12,5                 | 55 mm    | 39 mm   | 94 mm    | 59 mm   |
| GtF15+WB18              | 14 mm    | 14 mm   | 53 mm    | 39 mm   |
| GtF20                   | 24 mm    | 24 mm   | 63 mm    | 44 mm   |

Tabel 6.2 Sein 20-20-20-20-20 söestumissügavused erinevate kattematerjalide korral

| Sein 20-20-20-20-20 |          |         |          |         |
|---------------------|----------|---------|----------|---------|
| TULEPÜSIVUS         | 60min    |         | 90min    |         |
| TERVIKLIKKUS        | tagamata | tagatud | tagamata | tagatud |
| Katteta             | 58 mm    | 39 mm   | 97 mm    | 59 mm   |
| GtA12,5             | 47 mm    | 36 mm   | 86 mm    | 55 mm   |
| GtF15+WB18          | 0 mm     | 0 mm    | 37 mm    | 31 mm   |
| GtF20               | 7 mm     | 7 mm    | 28 mm    | 27 mm   |

**Katteta** – katte puudumise korral algab puidu söestumine kohe.

Kui liimvuugi terviklikkus on tagatud, siis söestumine toimub algusest lõpuni ühe kiirusega. Kui terviklikkus ei ole tagatud, siis erinevus tuleb sisse pärast esimese lamelli ära kukkumist, sest algab kuumenenud puidu kiire söestumine.

Pärast 60 minutit põlemist on olukorras, kus liimvuugi terviklikkus ei ole tagatud, esimene lamell juba ära kukkunud. See tähendab, et söestumissügavus on suurem

võrreldes olukorraga, kus liimvuugi terviklikkus on tagatud. Pärast 60 minutit on erinevus pea 20 mm ja pärast 90 minutit juba pea 40 mm.

**GtA12,5** – kipsplaadi tõttu lükkub puidu söestumise algusaeg edasi ligikaudu 20 minutit (seinal veidi rohkem kui vahelael, kuna tõrketekkeae on seinal suurem). Sellel hetkel kipsplaat laguneb ja puit hakkab kiiresti söestuma.

Kui liimvuugi terviklikkus ei ole tagatud, siis söestub puit kiiresti lõpuni välja.

Kui terviklikkus on tagatud, siis erinevus tuleb sisse pärast piisavalt paksu söekihi tekkimist, sest siis algab puidu aeglasem söestumine.

Pärast 60 minutit põlemist on olukorras, kus liimvuugi terviklikkus tagatud, piisavalt paks söekiht juba tekkinud. See tähendab, et söestumissügavus on väiksem võrreldes olukorraga, kus liimvuugi terviklikkus ei ole tagatud. Pärast 60 minutit on vahelagedel erinevus 16 mm ja seintel 11 mm. Pärast 90 minutit on erinevus vahelagedel 35 mm ja seintel 31 mm.

**GtF15+WB18** – kipsplaadi ja puitlaastplaadi tõttu lükkub puidu söestumise algusaeg edasi vahelagedel ligikaudu 50 minutit ja seintel ligikaudu 60 minutit. Sellel hetkel kipsplaat ja puitlaastplaat lagunevad ja puit hakkab kiiresti söestuma.

Kui liimvuugi terviklikkus ei ole tagatud, siis söestub puit kiiresti lõpuni välja. Kui terviklikkus on tagatud, siis erinevus tuleb sisse pärast piisavalt paksu söekihi tekkimist, sest siis algab puidu aeglasem söestumine.

Pärast 60 minutit põlemist ei ole olukorras, kus liimvuugi terviklikkus on tagatud, veel piisavalt paksu söekihti tekkinud, seega on söestumissügavused mõlemal juhul samad. Pärast 90 minutit on paksem söekiht tekkinud. Seega on vahelagedel erinevus 14 mm ja seintel 6 mm.

**GtF20** – kipsplaadi tõttu lükkub puidu söestumise algusaeg edasi ligikaudu 40 minutit. Vahelagede puhul on sellel hetkel kipsplaat lagunenu ja puit hakkab kiiresti söestuma. Seinte puhul on sellel hetkel kipsplaadi kaitseaeg on ületatud (kipsplaat ise veel ei ole lagunenu) ja puit hakkab aeglaselt söestuma. Kiire söestumine algab pärast 80 minutit põlemist, kui kipsplaat laguneb.

Kui liimvuugi terviklikkus ei ole tagatud, siis söestub puit kiiresti lõpuni välja. Kui terviklikkus on tagatud, siis erinevus tuleb sisse pärast piisavalt paksu söekihi tekkimist, sest siis algab puidu aeglasem söestumine.

Vahelagede korral on kohe pärast 60 minutit põlemist olukorras, kus liimvuugi terviklikkus on tagatud, tekkinud piisaval paks söekiht, seega söestumissügavused on veel mõlemal juhul samad. Pärast 90 minutit on erinevus pea 20 mm.

Seinte korral tekib olukorras, kus liimvuugi terviklikkus on tagatud, piisavalt paks söekiht pärast 87 minutit põlemist. Seega pärast 60 minutit põlemist ei ole erinevust ja pärast 90 minutit on erinevus vaid umbes 1 mm.

#### 40 mm-ste lamellidega ristlõiked:

Tulepüsivuse R60 korral liimvuugi terviklikkus kandevõimet ei mõjuta.

GtF15+WB18 ja GtF20 tõrketekkeajad on suuremad. Tabelite põhjal võib öelda, et nende kattematerjalide kasutamisel tulepüsivuse R90 korral liimvuugi terviklikkus kandevõimet ei mõjuta. Teiste katete puhul mõjutab.

Tabel 6.3 Vahelae 40-40-40-40-40 söestumissügavused erinevate kattematerjalide korral

| <b>Vahelagi 40-40-40-40-40</b> |                 |                |                 |                |
|--------------------------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
| <b>TULEPÜSIVUS</b>             | <b>60min</b>    |                | <b>90min</b>    |                |
| <b>TERVIKLIKKUS</b>            | <b>tagamata</b> | <b>tagatud</b> | <b>tagamata</b> | <b>tagatud</b> |
| Katteta                        | 39 mm           | 39 mm          | 71 mm           | 59 mm          |
| GtA12,5                        | 39 mm           | 39 mm          | 71 mm           | 59 mm          |
| GtF15+WB18                     | 14 mm           | 14 mm          | 39 mm           | 39 mm          |
| GtF20                          | 24 mm           | 24 mm          | 48 mm           | 44 mm          |

Tabel 6.4 Sein 40-40-40 söestumissügavused erinevate kattematerjalide korral

| <b>Sein 40-40-40</b> |                 |                |                 |                |
|----------------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
| <b>TULEPÜSIVUS</b>   | <b>60min</b>    |                | <b>90min</b>    |                |
| <b>TERVIKLIKKUS</b>  | <b>tagamata</b> | <b>tagatud</b> | <b>tagamata</b> | <b>tagatud</b> |
| Katteta              | 39 mm           | 39 mm          | 71 mm           | 59 mm          |
| GtA12,5              | 36 mm           | 36 mm          | 68 mm           | 55 mm          |
| GtF15+WB18           | 0 mm            | 0 mm           | 31 mm           | 31 mm          |
| GtF20                | 7 mm            | 7 mm           | 27 mm           | 27 mm          |

Kui liimvuugi terviklikkus on tagatud, siis söestumine on täpselt sama nagu eelnevalt kirjeldatud 20 mm-ste lamellidega ristlõigete puhul. Erinevuseks on vaid see, et olukorras, kus liimvuugi terviklikkus ei ole tagatud, võimaldab 40 mm lamell 25 mm paksuse kaitsva söekihi tekkimist ja söestumine aeglustub pärast seda. 20 mm lamelli puhul kaitsvat söekihti tekkida ei saa. Seega on pärast 60 või 90 minutit põlemist liimvuugi terviklikkusest tulenevad söestumissügavuste erinevused nendel ajahetkedel vähem erinevad.



**Katteta** – Pärast 60 minutit põlemist, ei ole veel esimene lamell ära kukkunud, seega erinevust ei ole. Pärast 90 minutit on erinevus 12 mm.

**GtA12,5** - Pärast 60 minutit põlemist, ei ole veel esimene lamell ära kukkunud, seega erinevust ei ole. Pärast 90 minutit on erinevus pea 13 mm.

**GtF15+WB18** - Pärast 60 ja 90 minutit põlemist, ei ole veel esimene lamell ära kukkunud, seega erinevust ei ole.

**GtF20** - Pärast 60 minutit põlemist, ei ole veel esimene lamell ära kukkunud, seega erinevust ei ole. Pärast 90 minutit on vahelagede korral erinevus 4 mm. Seinte korral ei ole veel esimene lamell ära kukkunud, seega erinevust ei ole.

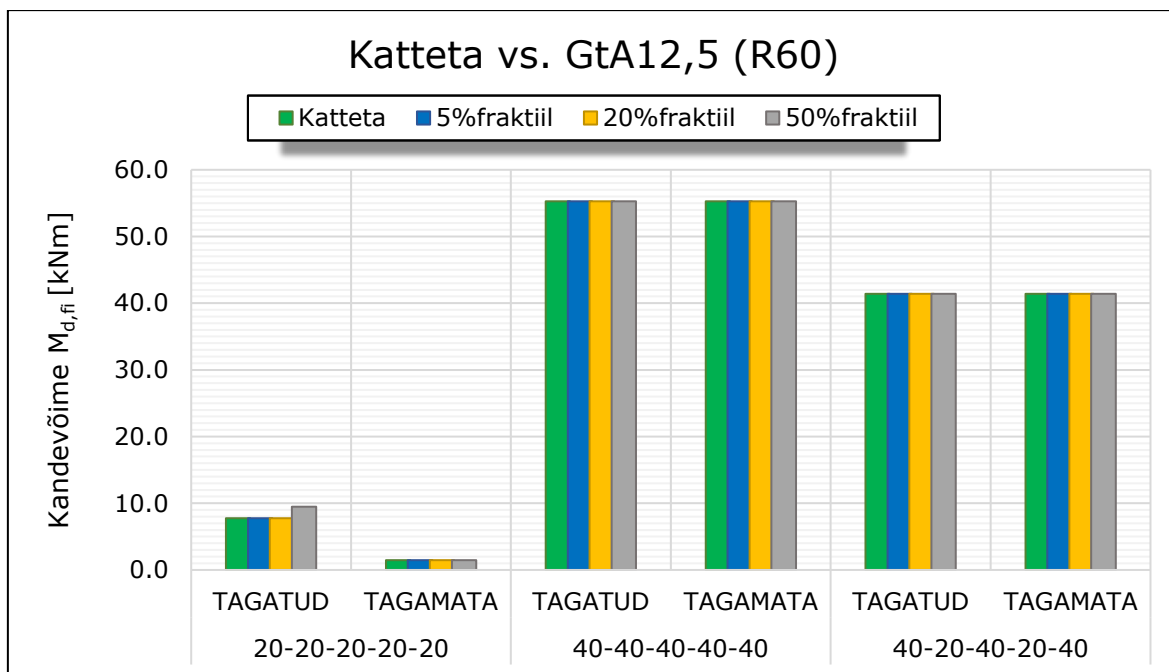
## **6.2 Katteta või 1xGtA12,5 võrdlus**

Järgnevas alapeatükis vaadatakse, kas ühekordse A-tüüpi kipsikihi lisamine suurendab ristlõike kandevõimet tulekahjuolukorras. Samuti võrreldakse, et kui palju muudab liimvuugi terviklikkus kandevõimet.

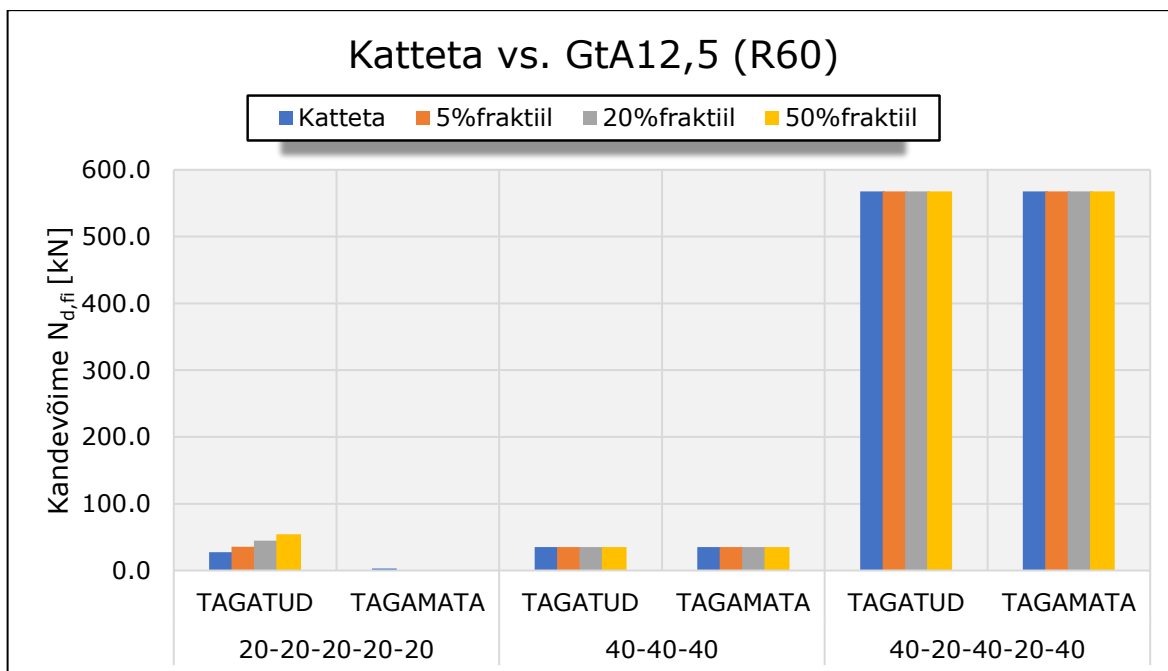
### **6.2.1 Tulepüsivuse R60 korral**

Graafikutelt 6.9 ja 6.10 selgub, et tulepüsivuse R60 korral konstruktsiooni katmine ühekordse A-tüüpi kipsplaadiga ei suurenda kandevõimet. Ka tõrketekkeaegade fraktilide erinevused ei suurenda ega vähenda kandevõimet. Ainsaks erandiks on ristlõige 20-20-20-20-20, kus liimvuugi terviklikkus on tagatud. Vahelagede korral on kipsplaadi 50% fraktili korral kandevõime veidi suurem võrreldes teiste fraktilidega. Seinte korral iga suurem fraktil suurendab veidi kandevõimet.

Ristlõigete 40-40-40-40-40 ja 40-20-40-20-40 puhul ei ole vahet, kas liimvuugi terviklikkus on tagatud või mitte, sest kandevõimed on täpselt samad. Ristlõike 20-20-20-20-20 liimvuugi terviklikkus suurendab kandevõimet.



Graafik 6.8 Vahelae kandevõimete võrdlus, kui kattematerjal puudub või kui katteks on GtA12,5



Graafik 6.9 Seina kandevõimete võrdlus, kui kattematerjal puudub või kui katteks on GtA12,5

### 6.2.2 Tulepüsivuse R90 korral

Graafikult 6.11 selgub, et vahelagede tulepüsivuse R90 korral konstruktsiooni katmine ühekordse A-tüüpi kipsplaadiga enamjaolt ei suurenda kandevõimet. Ka

tõrketekkeageade fraktilide erinevused ei suurenda ega vähenda kandevõimet. Erandiks on:

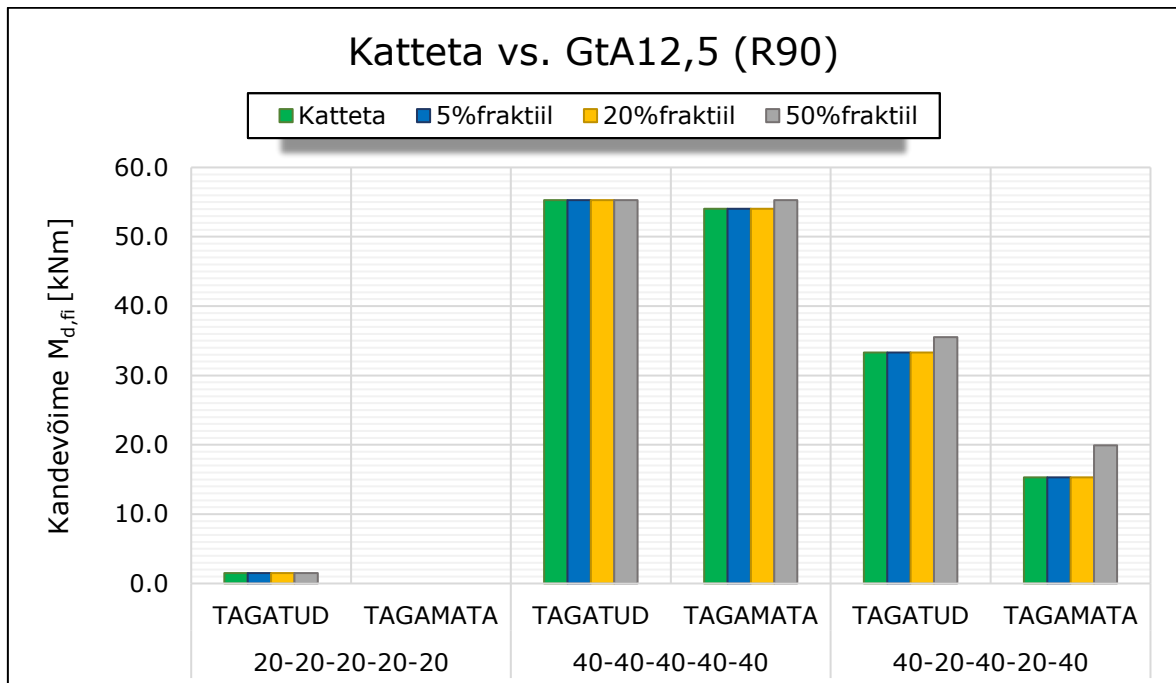
- ristlõige 40-40-40-40-40, kus liimvuugi terviklikkus on tagamata,
- ristlõige 40-20-40-20-40, kus liimvuugi terviklikkus on tagatud ja tagamata, sest seal on kipsplaadi 50% fraktili korral kandevõime veidi suurem võrreldes teiste fraktilidega

Ristlõike 40-40-40-40-40 puhul ei ole suurt erinevust selles, kas liimvuugi terviklikkus on tagatud või mitte, sest 50% fraktili puhul on kandevõimed samad ning teiste variantide puhul on erinevus umbes 1 kNm. Ristlõike 40-20-40-20-40 liimvuugi terviklikkuse tagamise korral on kandevõime umbes 2 korda suurem. Ristlõike 20-20-20-20-20 puhul, kui liimvuugi terviklikkus ei ole tagatud, kandevõime puudub. Liimvuugi terviklikkuse tagamise korral on kandevõime 1,5 kNm.

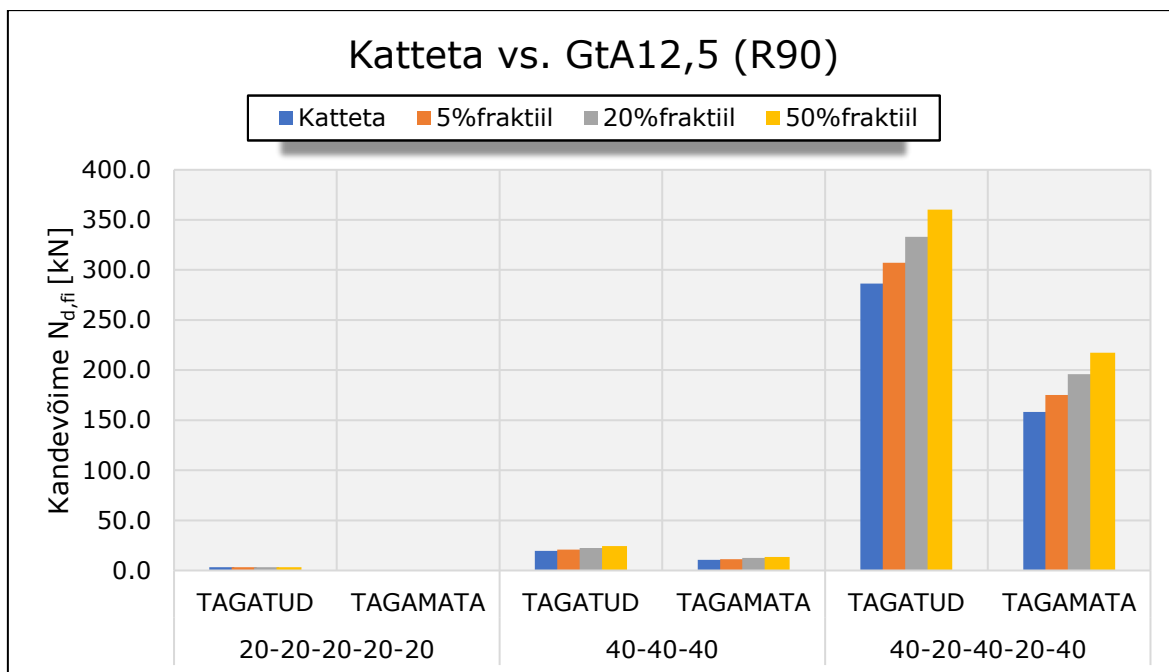
Graafikult 6.12 selgub, et seinte tulepüsivuse R90 korral ühekordne A-tüüpi kipsplaat enamasti tõstab kandevõimet.

40-20-40-20-40 puhul iga järgnev fraktil suurendab kandevõimet keskmiselt 30 kN ja 40-40-40 puhul keskmiselt 2 kN. 20-20-20-20-20 ristlõike puhul on kandevõimed ligilähedased nullile, mistõttu siin ei analüüsi.

Ka liimvuugi terviklikkus suurendab kandevõimet keskmiselt 1,7 korda.



Graafik 6.10 Vahelae kandevõimete võrdlus, kui kattematerjal puudub või kui katteks on GtA12,5

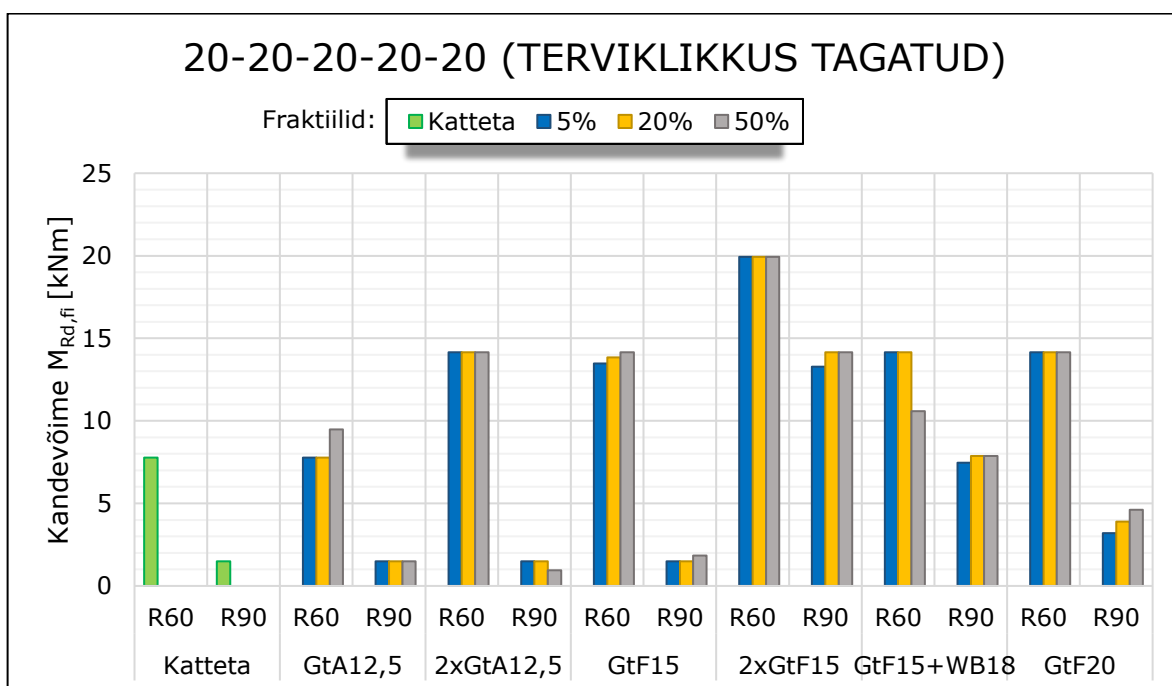


Graafik 6.11 Seina kandevõime võrdlus, kui kattematerjal puudub või kui katteks on GtA12,5

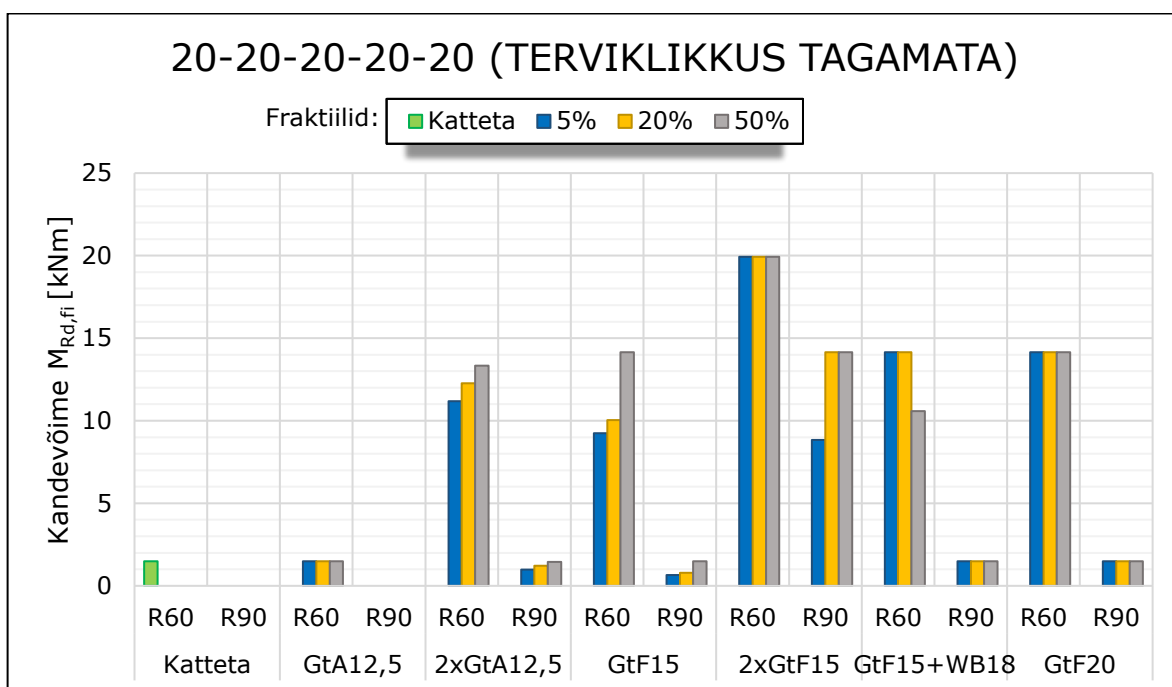
## 6.3 Kattematerjalide mõju kandevõimele

Järgnevalt on vaadeldud kattematerjalide mõju ristkihtpuidu kandevõimele, sealjuures kandevõime erinevust erinevate tõrketekkeageade fraktiilidest tulenevalt.

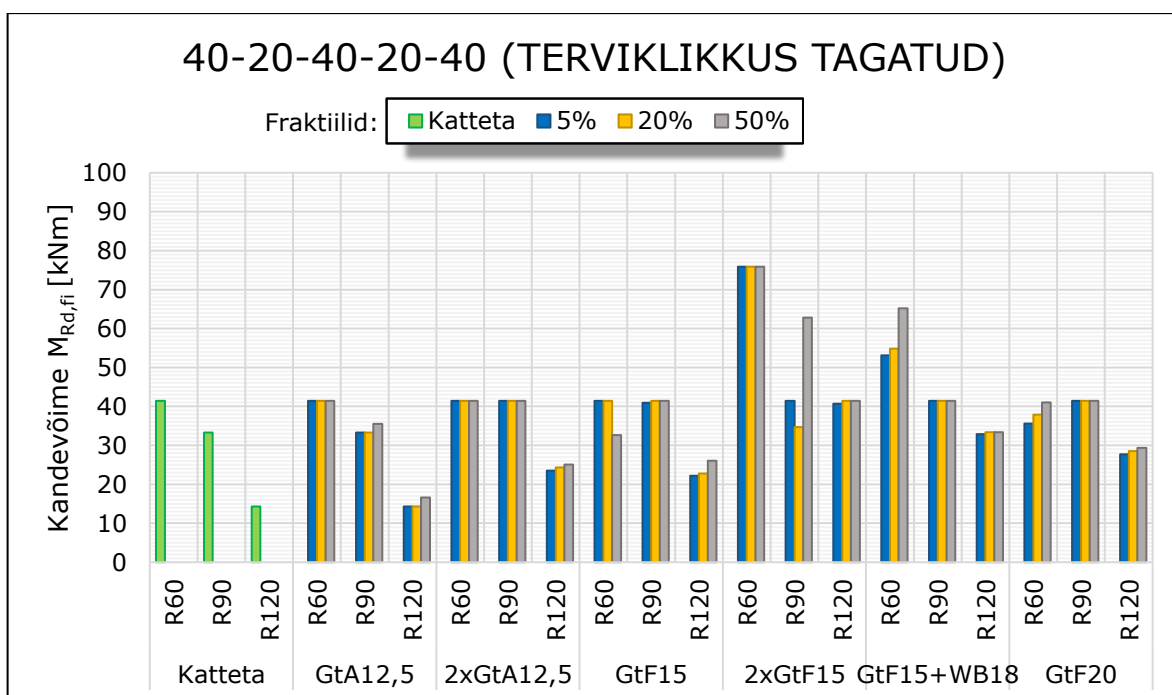
### 6.3.1 Vahelaed



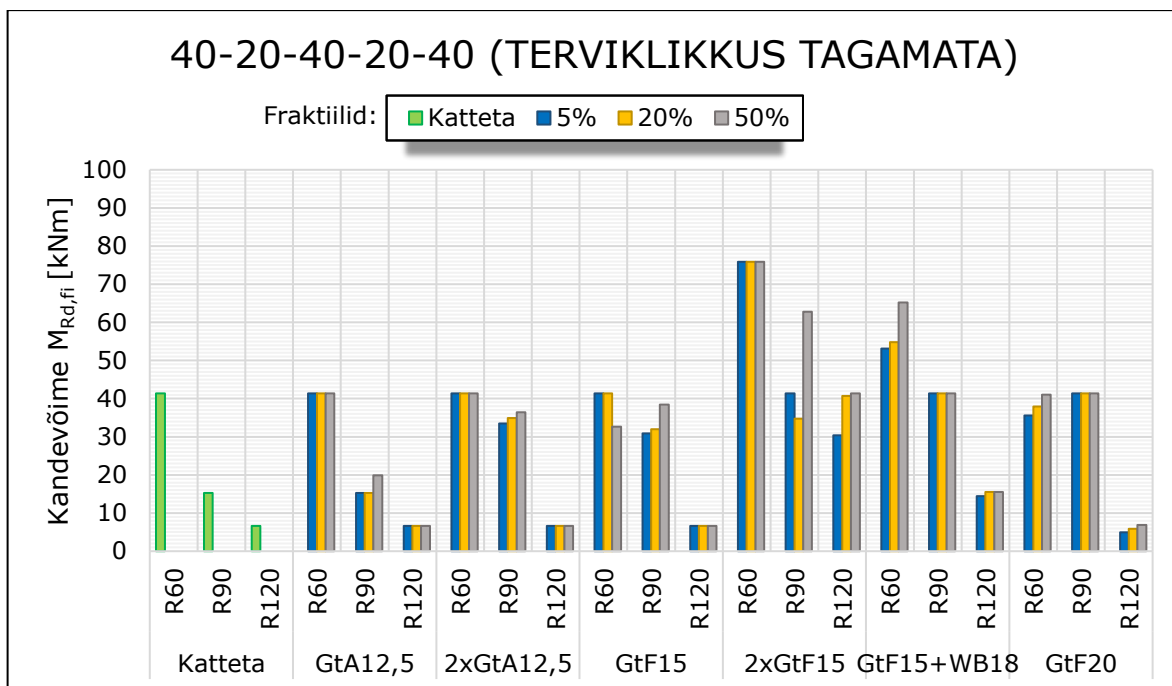
Graafik 6.12 Vahelaed 20-20-20-20-20 kandevõime, kui liimvuugi terviklikkus on tagatud



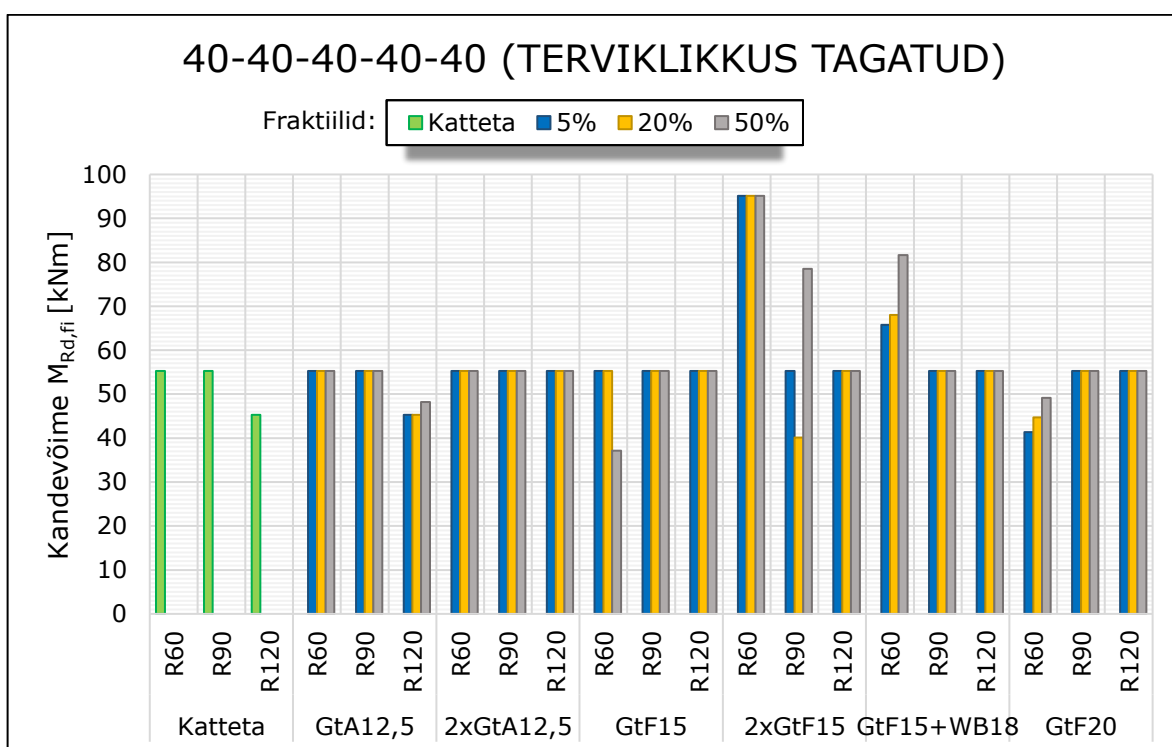
Graafik 6.13 Vahelae 20-20-20-20-20 kandevõime, kui liimvuugi terviklikkus ei ole tagatud



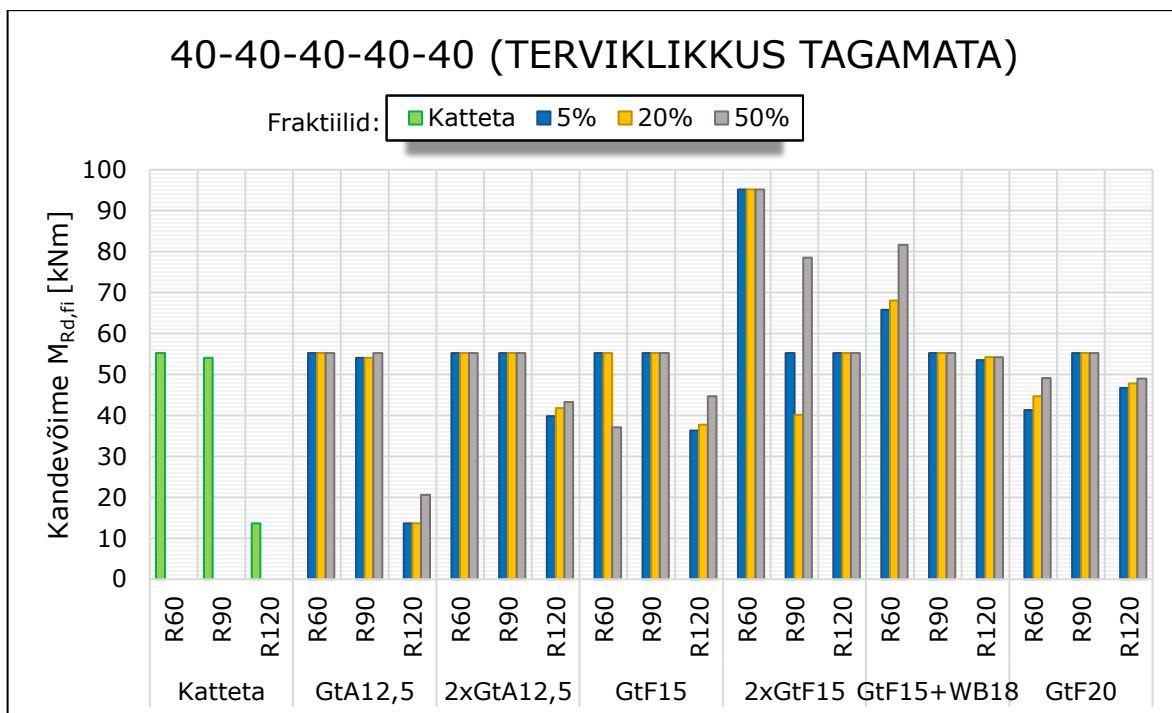
Graafik 6.14 Vahelae 40-20-40-20-40 kandevõime, kui liimvuugi terviklikkus on tagatud



Graafik 6.15 Vahelae 40-20-40-20-40 kandevõime, kui liimvuugi terviklikkus ei ole tagatud

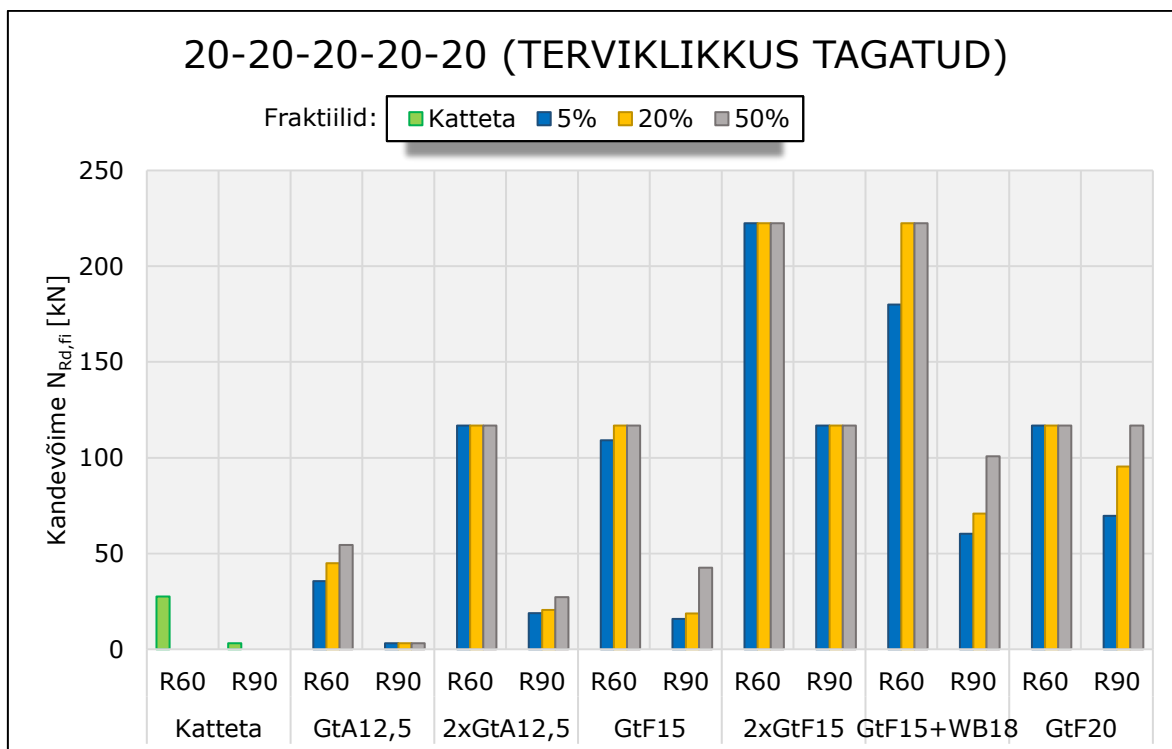


Graafik 6.16 Vahelae 40-40-40-40-40 kandevõime, kui liimvuugi terviklikkus on tagatud

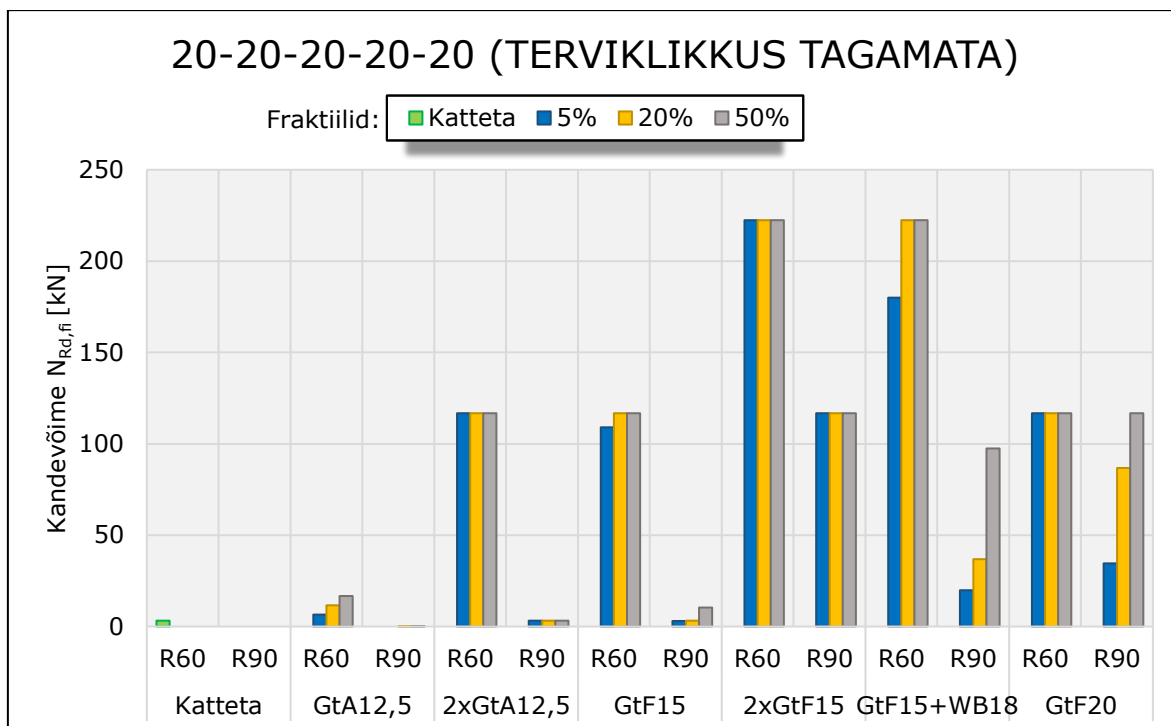


Graafik 6.17 Vahelae 40-40-40-40-40 kandevõime, kui liimvuugi terviklikkus ei ole tagatud

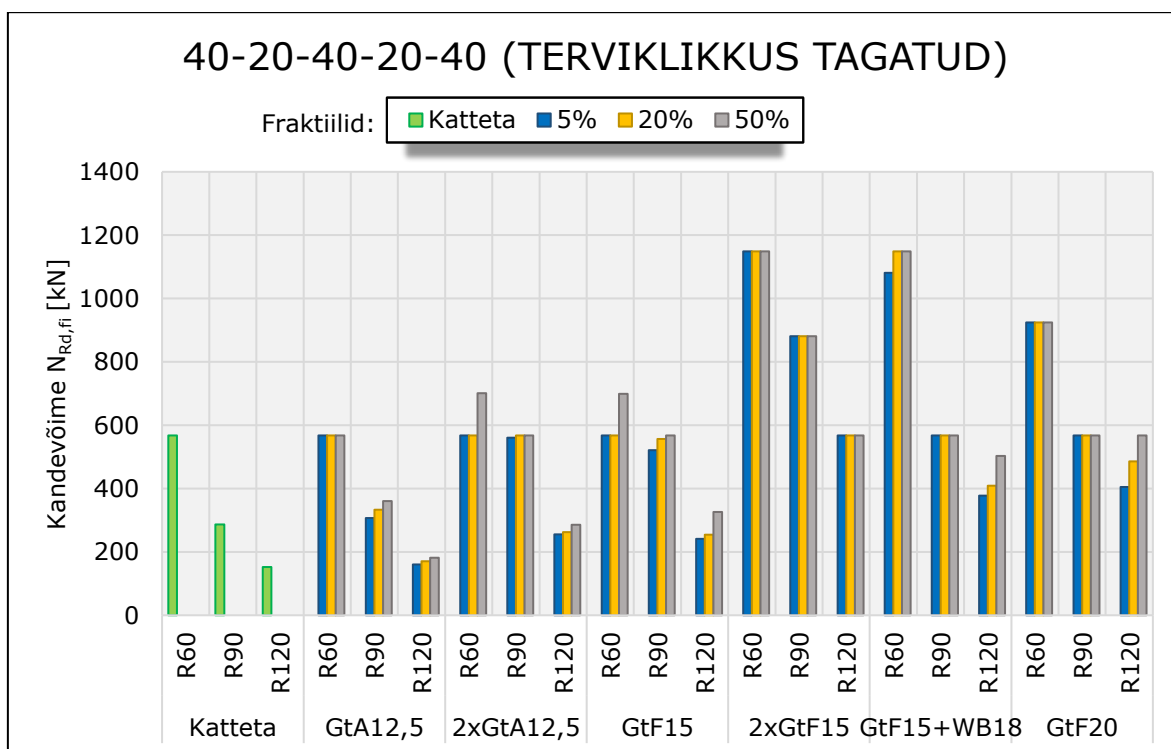
### 6.3.2 Seinad



Graafik 6.18 Seina 20-20-20-20-20 kandevõime, kui liimvuugi terviklikkus on tagatud

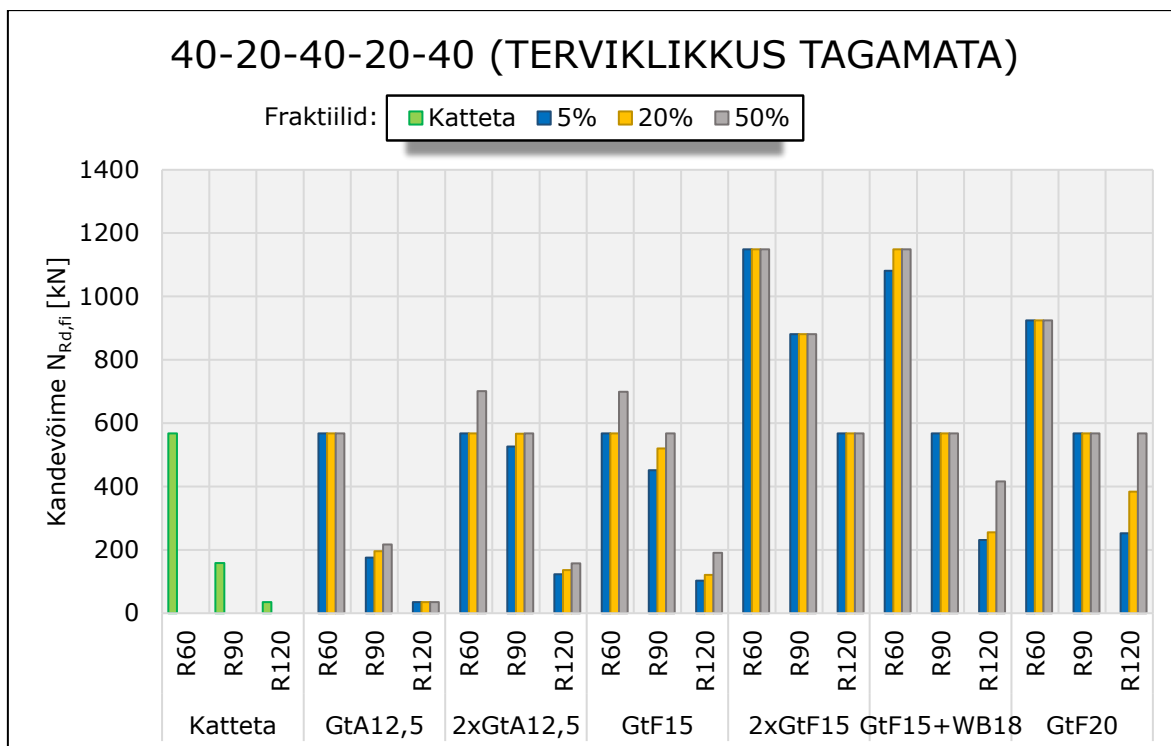


Graafik 6.19 Seina 20-20-20-20-20 kandevõime, kui liimvuugi terviklikkus ei ole tagatud

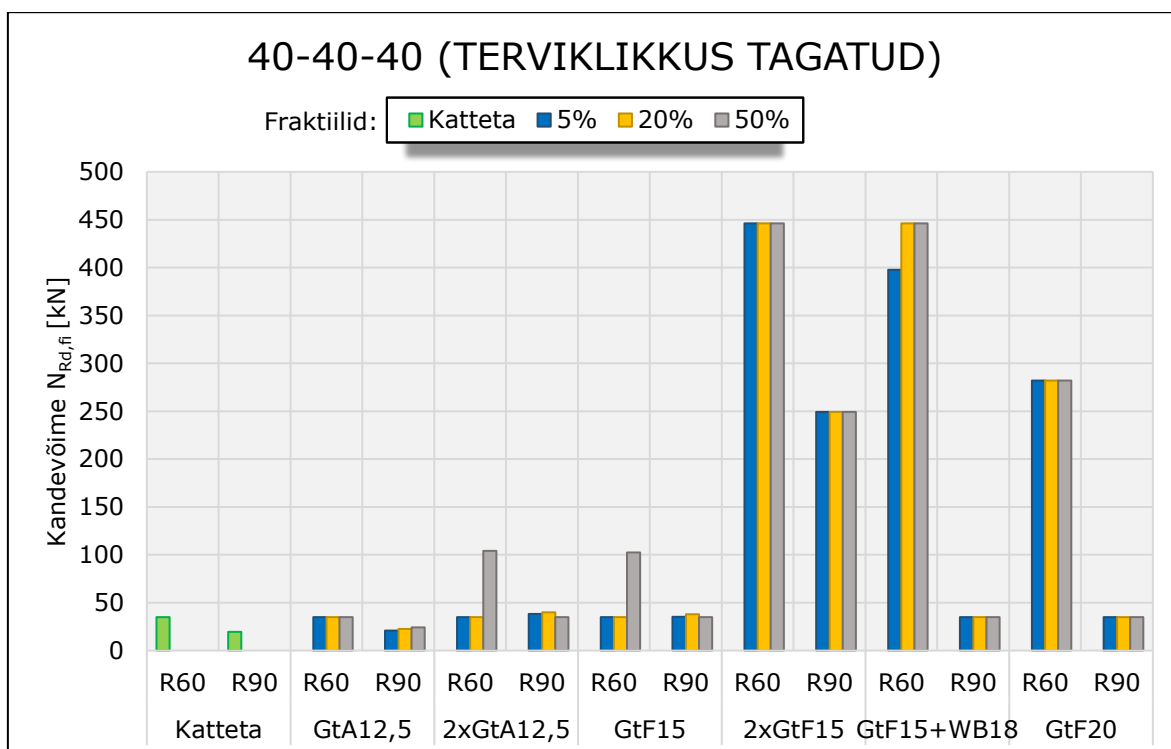


Graafik 6.20 Seina 40-20-40-20-40 kandevõime, kui liimvuugi terviklikkus on tagatud

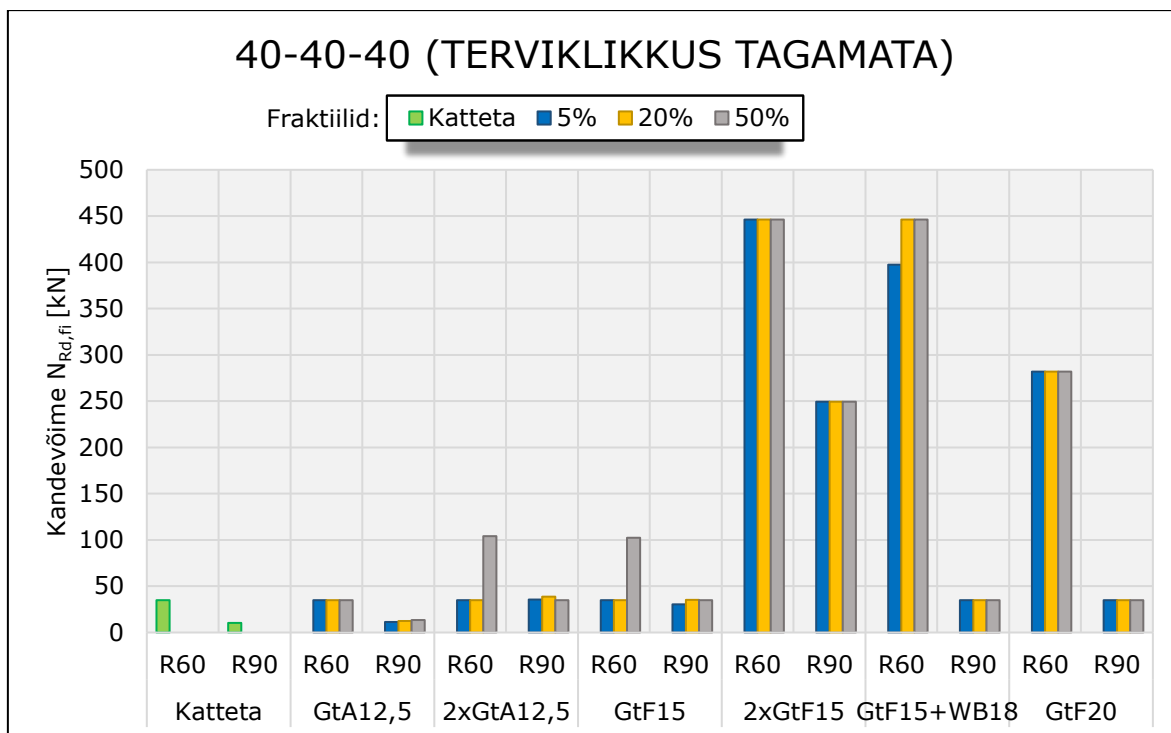




Graafik 6.21 Seinä 40-20-40-20-40 kandevõime, kui liimvuugi terviklikkus ei ole tagatud



Graafik 6.22 Seinä 40-40-40-kandevõime, kui liimvuugi terviklikkus on tagatud



Graafik 6.23 Seina 40-40-40-kandevõime, kui liimvuugi terviklikkus ei ole tagatud

### 6.3.3 Järeldused

Ristkihtpuit on materjal, mille puhul põhilised kandvad lamellid vahelduvad mittekandvatega. Vahepealse ristkihi söestumine ei avalda kandevõimele mõju. Järgnevalt on analüüsitud eelnevalt esitatud graafikute tulemusi.

#### R60

Vahelagede 20-20-20-20-20 tulepüsivuse R60 korral annab kõige suurema kandevõime olukord, kus puit on kaetud kahekordse F-tüüpi kipsplaadiga. Kõige väiksem on kandevõime ühekordse A-tüüpi kipsplaaadi korral (ühtlasi võrdne katmata olukorraga). Ülejäänud kattematerjalide korral on kandevõimed üsna sarnased. Teiste ristlõigete tulepüsivuse R60 korral annab kõige suurema kandevõime kahekordne F-tüüpi kipsplaat ja võrreldes teistega on suurem kandevõime ka F-tüüpi kipsplaat+puitlaastplaat korral. Ülejäänud kattematerjalide korral on kandevõimed sarnased.

Seinte 20-20-20-20-20 tulepüsivuse R60 korral annavad kõige suurema kandevõime olukorrad, kus puit on kaetud kahekordse F-tüüpi kipsplaadiga või F-tüüpi kipsplaaadi+puitlaastplaadiga. Kõige väiksem on kandevõime ühekordse A-tüüpi kipsplaaadi korral ja ka katmata olukorras. Ülejäänud kattematerjalide korral on kandevõimed üsna sarnased. Teiste ristlõigete tulepüsivuse R60 korral annab kõige suurema kandevõime kahekordne F-tüüpi kipsplaat või F-tüüpi

kipsplaat+puitlaastplaat. Võrreldes ülejäänud kattematerjalidega on suurem kandevõime ka GtF20 korral. Teiste kattematerjalide korral on kandevõimed sarnased.

Tõrketekkeageade fraktiivväärtused ei avalda enamikul juhtudel mõju ristkihtpuidu kandevõimele. Suurem erinevus on aga näiteks GtF15+WB18 kaetud vahelaekonstruktsioonide puhul (40-20-40-20-40 ja 5x40), kus 50% fraktiiv annab oluliselt suurema kandevõime. Selle põhjuseks on see, et 50% fraktiivil põhinev tõrketekkeage on oluliselt suurem võrreldes teiste fraktiividega. Kõikide fraktiivide puhul jääb küll söestumine esimesse lamelli, kuid 50% fraktiili korral hakkab puit hiljem söestuma ja seega jääb pärast 60 minutit põlemist esimest kandvat lamelli rohkem alles.

Viiekihiliste vahelaekonstruktsioonide (40-20-40-20-40 ja 5x40) katmisel GtF15 plaatidega annab tõrketekkeaja 50% fraktiili kasutamine väiksema kandevõime kui varasemad tõrketekkeajad (5% ja 20% fraktiiv). Selle selgituseks on tõenäoliselt arvutusmeetodi tegurite erinevus 3- ja 5-kihilise konstruktsiooni jaoks. See võib viia olukorrani, kus 5-kihiline ristlõige ühe väga väikese paksusega allesjäänud lamelliga annab väiksema vastupanumomendi väärtuse, kui 3-kihiline vähendamata lamellide paksustega konstruktsioon. Sama põhjendus on näiteks ka sellel, et 5x20 vahelaekonstruktsiooni katmine GtF15+WB18 annab 50% fraktiili korral väiksema kandevõime kui varasemad tõrketekkeajad. 5% ja 20% fraktiili puhul jääb pärast söestumist alles 3 lamelli, 50% puhul 5 lamelli. Kuna viiendast lamelist jääb alles vaid 1 mm, siis tuleb vastupanumoment väike ja annab ka väiksema kandevõime.

## **R90**

Vahelagede 20-20-20-20-20 tulepüsivuse R90 korral annab kahekordne F-tüüpi kipsplaat kõige suurema kandevõime. Kõige väiksem on kandevõime olukorras, kus puudub kate. Teiste ristlõigete tulepüsivuse R90 korral annab kõige suurema kandevõime jällegi kahekordne F-tüüpi kipsplaat (50% fraktiiv). Kõige väiksem kandevõime 40-20-40-20-40 korral annab ühekordne A-tüüpi kipsplaat ning teiste puhul on kandevõimed väga sarnased. Ristlõike 40-40-40-40-40 korral on kõikide kattematerjalide puhul kandevõimed täpselt samad. Vaid 2xGtF15 50% fraktiili korral on kandevõime teistest suurem.

Seinte 20-20-20-20-20 tulepüsivuse R90 korral annab kõige suurema kandevõime kahekordne F-tüüpi kipsplaat. Kõige väiksema annab ühekordne A-tüüpi kipsplaat. Ülejäänud kattematerjalide kandevõimed jäävad nende vahele. Teiste ristlõigete tulepüsivuse R90 korral annab kõige suurema kandevõime kahekordne F-tüüpi kipsplaat. Kõige väiksema annab ühekordne A-tüüpi kipsplaat. Ülejäänud kattematerjalide korral on kandevõimed üsna sarnased.

R90 puhul on fraktilväärtuste suhted sarnased R60 juures toodud järeldustega.

Välja saab tuua vahelaekonstruktsioonid (40-20-40-20-40 ja 5x40) kaetuna kahekordse F-tüüpi kipsplaadiga. 50% fraktili korral on kandevõime suurim, kuna pärast söestumist jääb alles viis lamelli. Kuid 5% fraktili annab suurema kandevõime kui 20%. Seal on põhjuseks taaskord see, et 20% fraktili korral jääb esimesest lamellist alles väga vähe, ning seetõttu on kandevõime väike.

## **R120**

R120 puhul on enamik kattematerjalide puhul näha kandevõimete erinevused tõrketekkeageade 5%, 20% ja 50% fraktili kasutamisel. Sealjuures annab 50% fraktil kõige suurema kandevõime.

Vahelagede 40-40-40-40-40 korral, kus liimvuugi terviklikkus ei ole tagatud, annab kahekordne F-tüüpi kipsplaat ja F-tüüpi kipsplaat+puitlaastplaat kõige suurema kandevõime. Väikseim on kandevõime ühekordse A-tüüpi kipsplaadi korral. Juhul kui liimvuugi terviklikkus on tagatud, siis kõigist kattematerjalidest väikseim on kandevõime ühekordse A-tüüpi kipsplaadi korral, kuid ülejäänud katete puhul on kandevõimed täpselt samad. Vahelagede 40-20-40-20-40 katmine kahekordse F-tüüpi kipsplaadiga annab suurima kandevõime, väikseima annab ühekordne A-tüüpi kipsplaat.

Seinte 40-20-40-20-40 korral on suurim kandevõime kattematerjaliga 2xGtF15 ja väikseim 1xGtA12,5.

## **Järeldused fraktili valimiseks**

Enamikul juhtudel ei mõjuta tõrketekkeaja fraktil tulekahjuolukorra kandevõimet.

Mõned erandid on: näiteks kombinatsioon kipsplaadist ja puitplaadist.

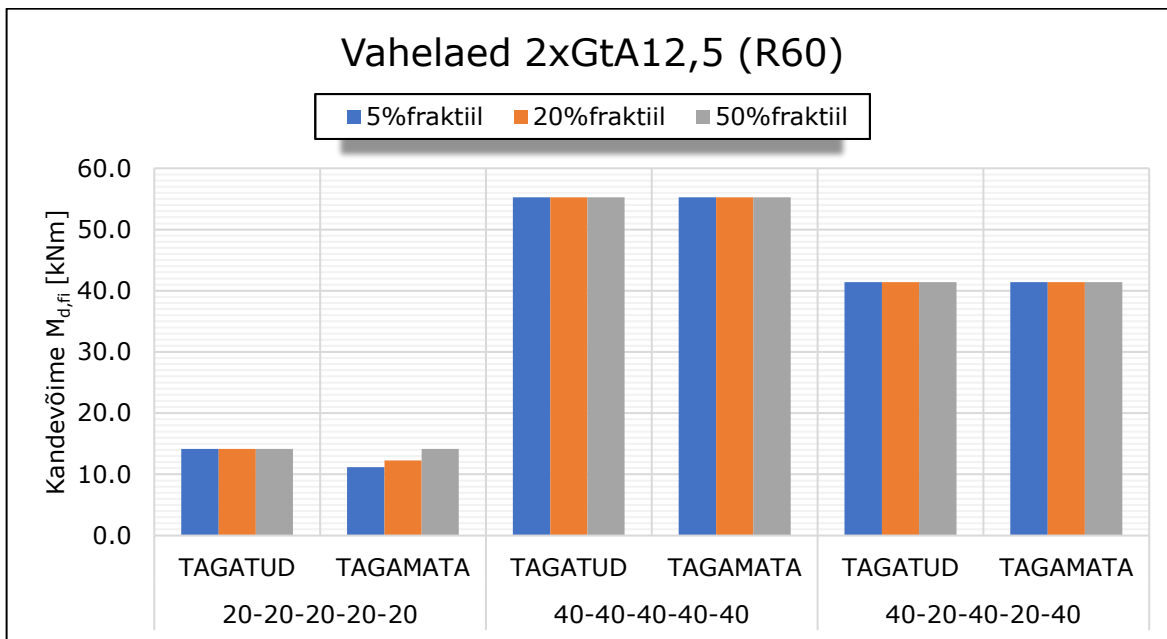
50% fraktili kasutamisel võib teatud juhtudel kandevõime oluliselt suureneda, kuid 5% ja 20% fraktili kasutamisel on kandevõimed samad või erinevad. Tuginedes sellele on töö autori arvates soovitatav kasutada 20% fraktili. See järeldus põhineb ainult teoreetilisel tundlikkuse analüüsil ning kindlasti oleks vajalik tulekatsete abil kontrollida.

## **6.4 Liimvuugi terviklikkuse mõju kandevõimele**

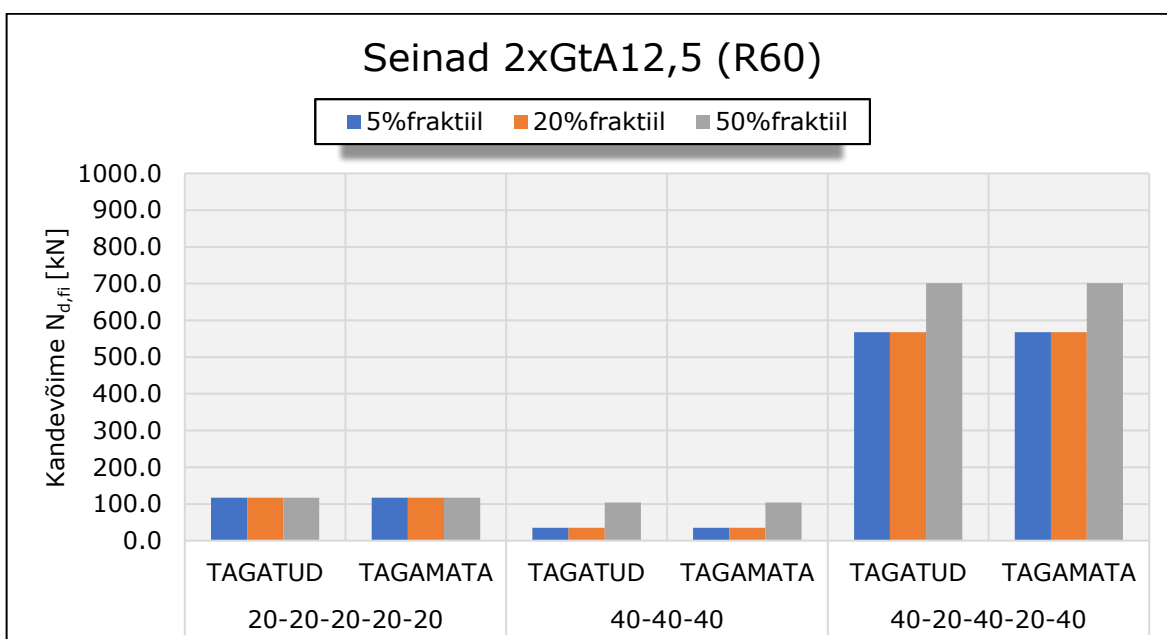
Järgnevas alapeatükis analüüsitakse, kui palju liimvuugi terviklikkus mõjutab kandevõimet. Vaadeldavateks konstruktsioonideks on kõik vahelaed ja seinad kattematerjalidega 2xGtA12,5, GtF15+WB18 ja GtF20.

### 6.4.1 Tulepüsivuse R60 korral

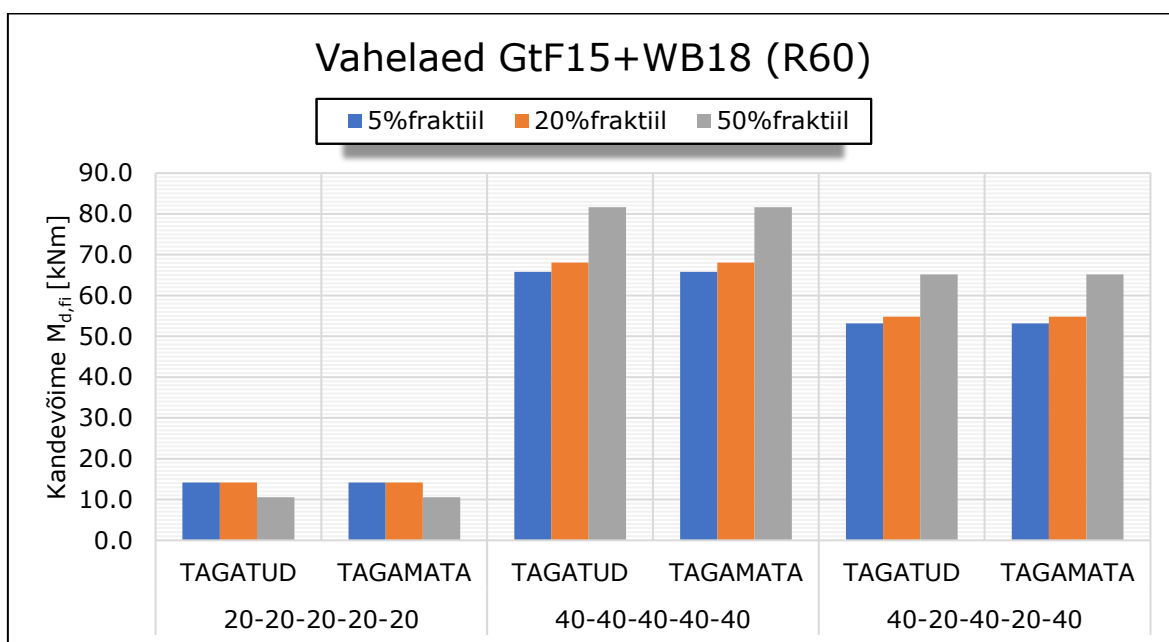
Tulepüsivuse R60 korral liimvuugi terviklikkus ei mõjuta kandevõimet ühelgi juhul. Erandiks on siinjuhul vaid vahelagi 20-20-20-20-20, mis on kaetud kahekordse A-tüüpi kipsplaadiga. 50% fraktili korral liimvuugi terviklikkus ei mõjuta kandevõimet. Kuid kui liimvuugi terviklikkus on tagamata, siis iga eelneva fraktili korral on kandevõime 1 kNm võrra väiksem.



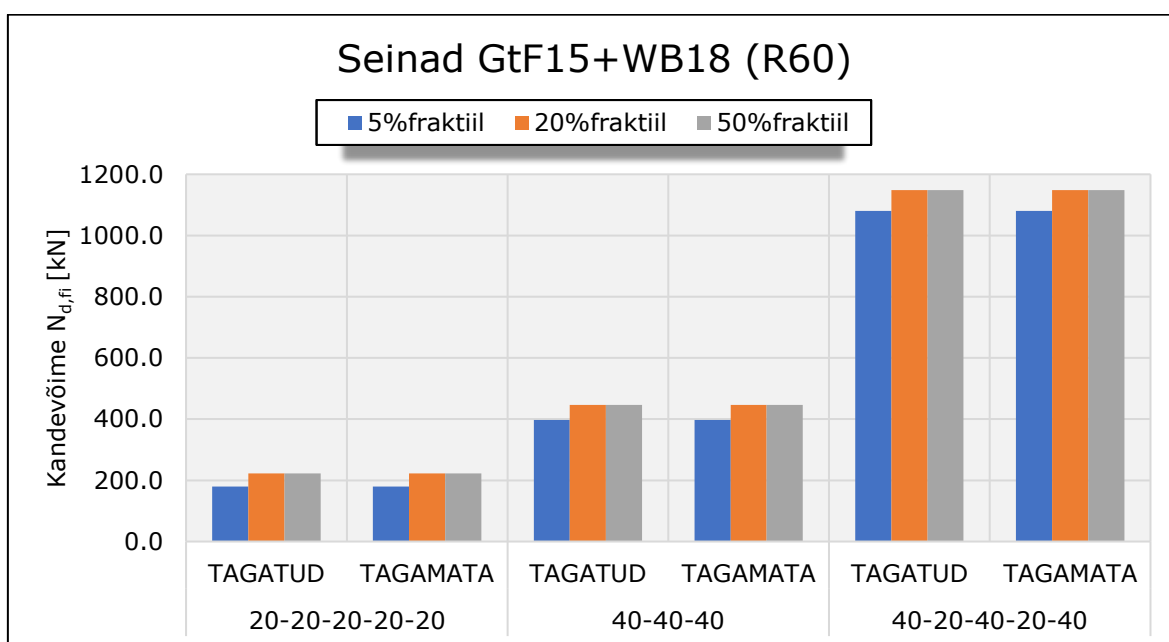
Graafik 6.24 Liimvuugi terviklikkuse mõju vahelagede kandevõimele, kui kattematerjaliks on 2xGtA12,5



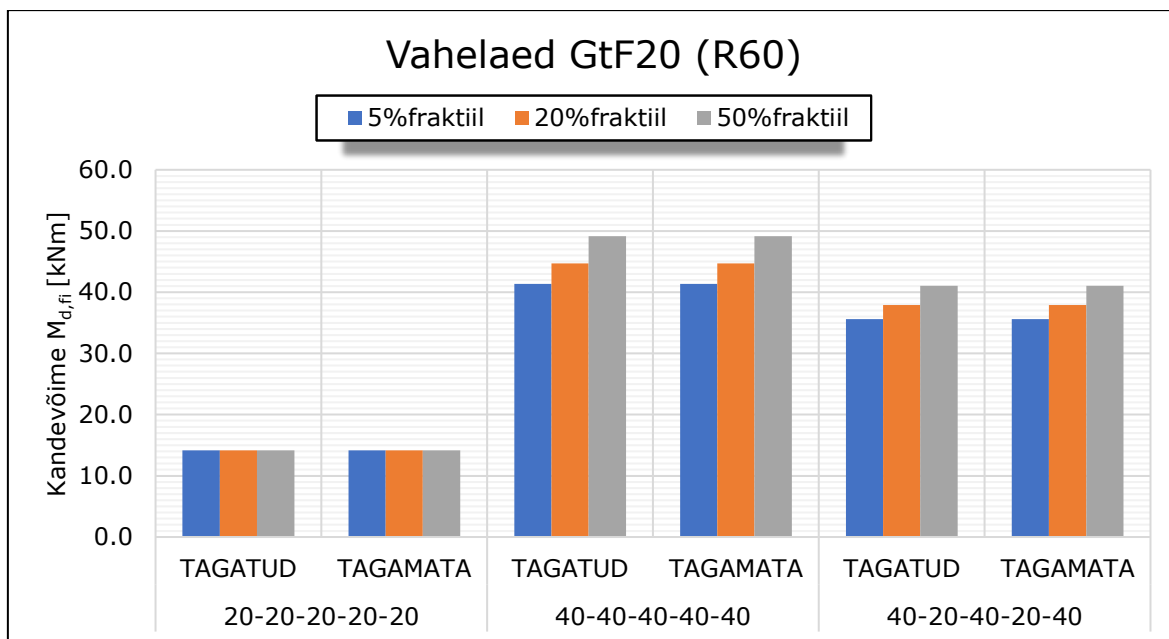
Graafik 6.25 Liimvuugi terviklikkuse mõju seinte kandevõimele, kui kattematerjaliks on 2xGtA12,5



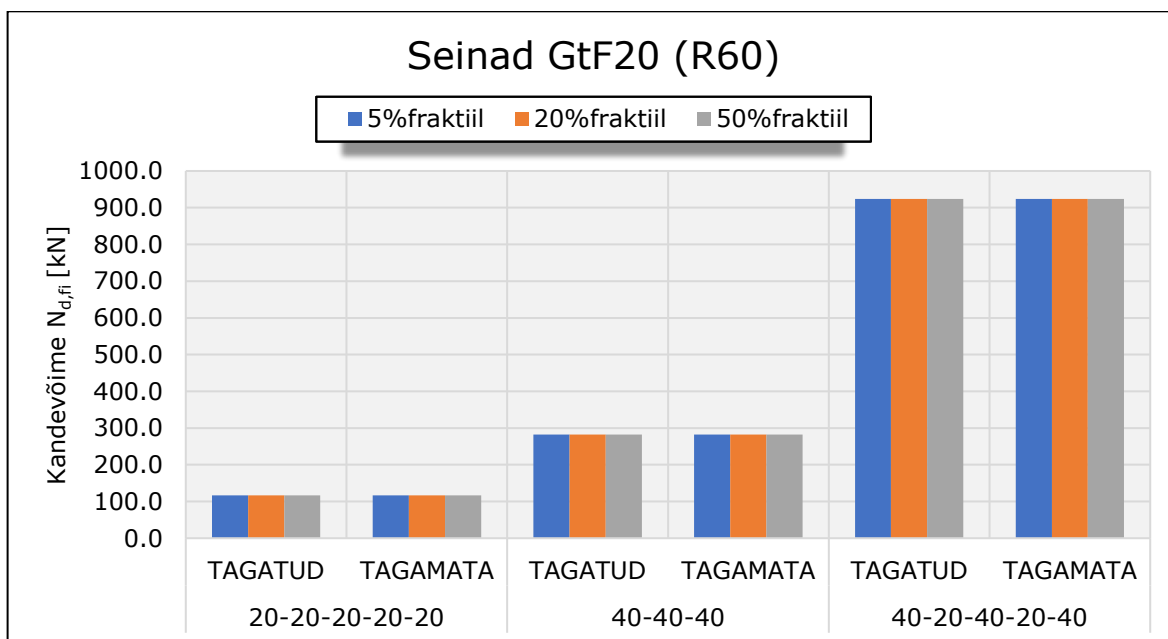
Graafik 6.26 Liimvuugi terviklikkuse mõju vahelagede kandevõimele, kui kattematerjaliks on GtF15+WB18



Graafik 6.27 Liimvuugi terviklikkuse mõju seinte kandevõimele, kui kattematerjaliks on GtF15+WB18



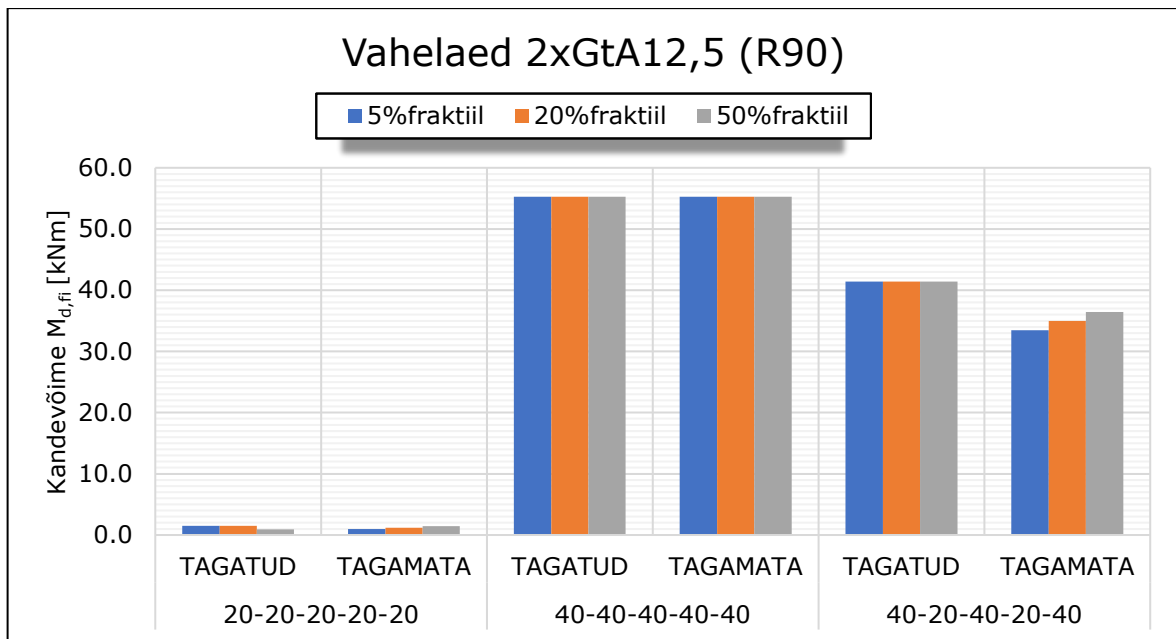
Graafik 6.28 Liimvuugi terviklikkuse mõju vahelagede kandevõimele, kui kattematerjaliks on GtF20



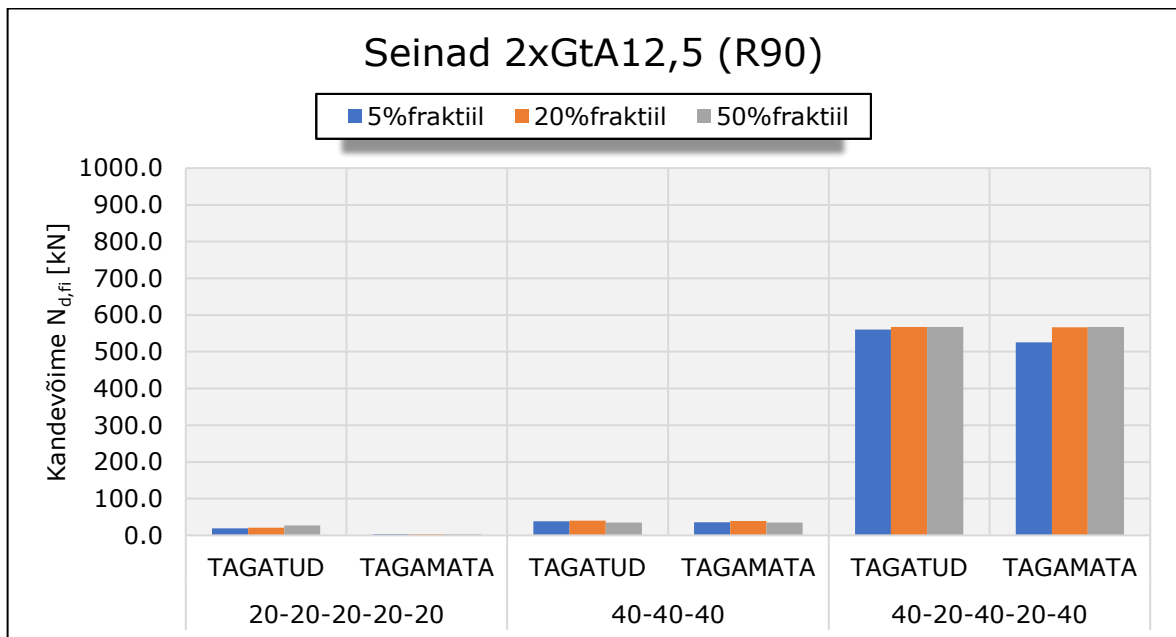
Graafik 6.29 Liimvuugi terviklikkuse mõju seinte kandevõimele, kui kattematerjaliks on GtF20

#### 6.4.2 Tulepüsivuse R90 korral

Tulepüsivuse R90 korral mõjutab liimvuugi terviklikkus kandevõimet vaid ristlõike 20-20-20-20-20 korral. Kui liimvuugi terviklikkus on tagamata, siis kandevõime on väiksem. Ka vahelae 40-20-40-20-40 korral, kui kattematerjaliks on 2xGtA12,5, siis 50% fraktili puhul tõstab liimvuugi terviklikkus kandevõimet vähemat 1,2 korda.

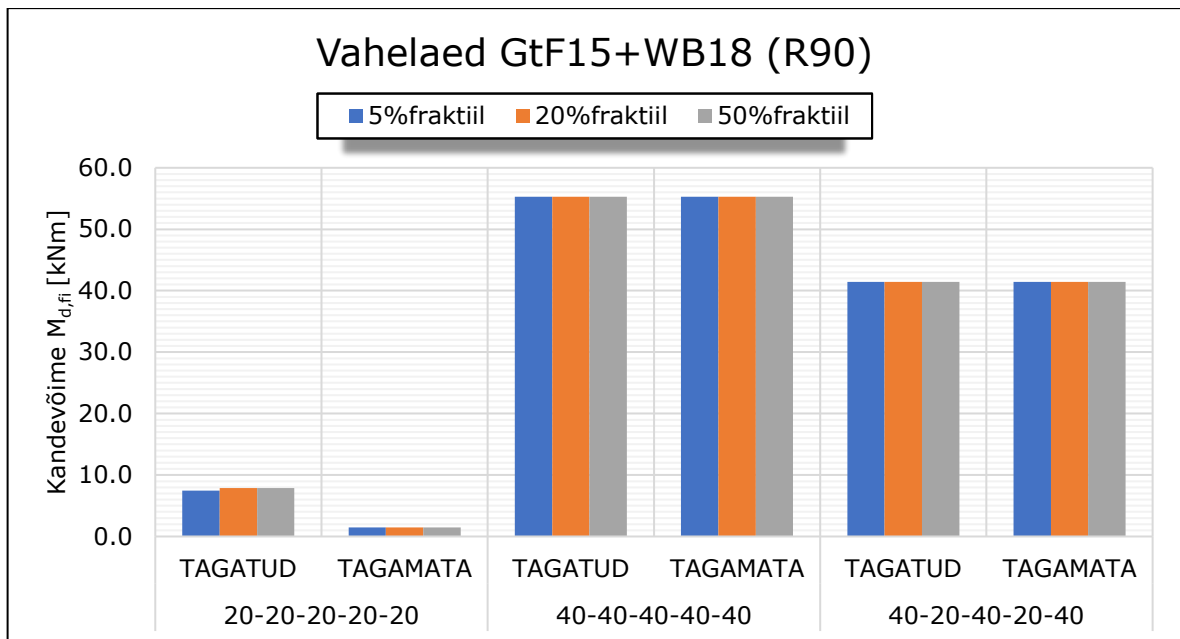


Graafik 6.30 Liimvuugi terviklikkuse mõju vahelagede kandevõimele, kui kattematerjaliks on 2xGtA12,5

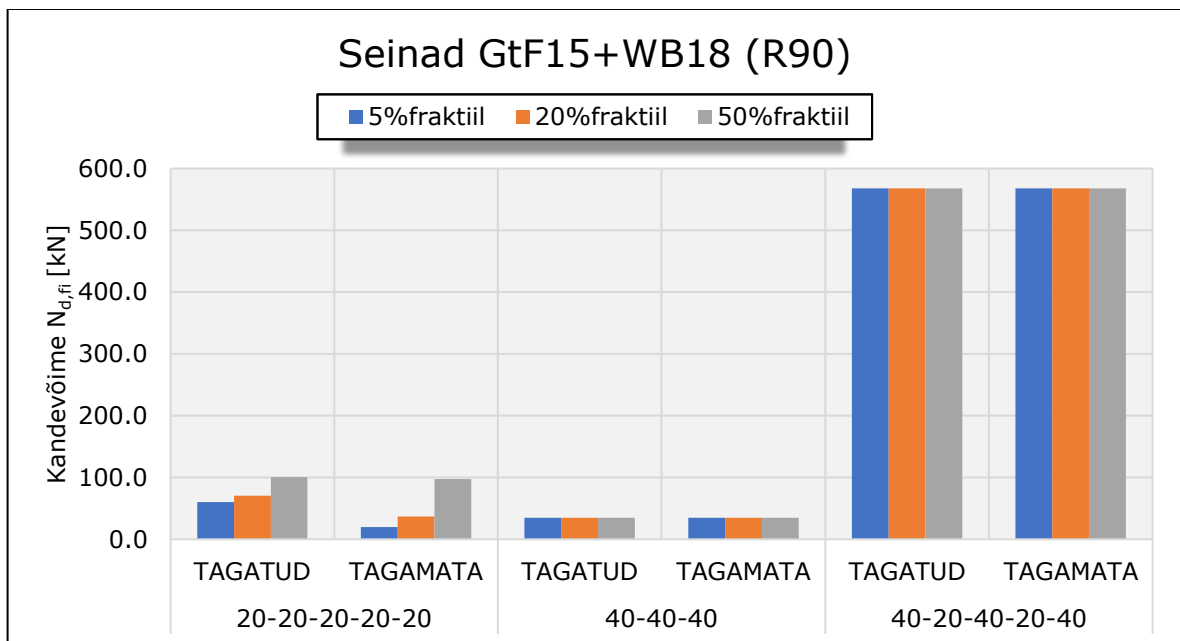


Graafik 6.31 Liimvuugi terviklikkuse mõju seinte kandevõimele, kui kattematerjaliks on 2xGtA12,5

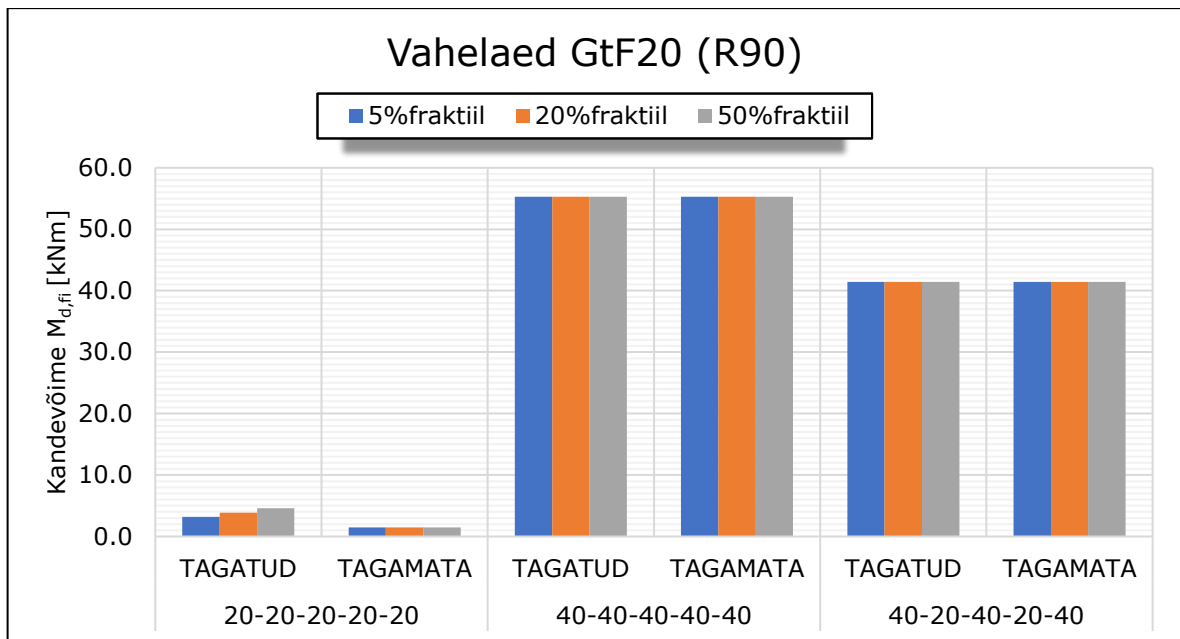




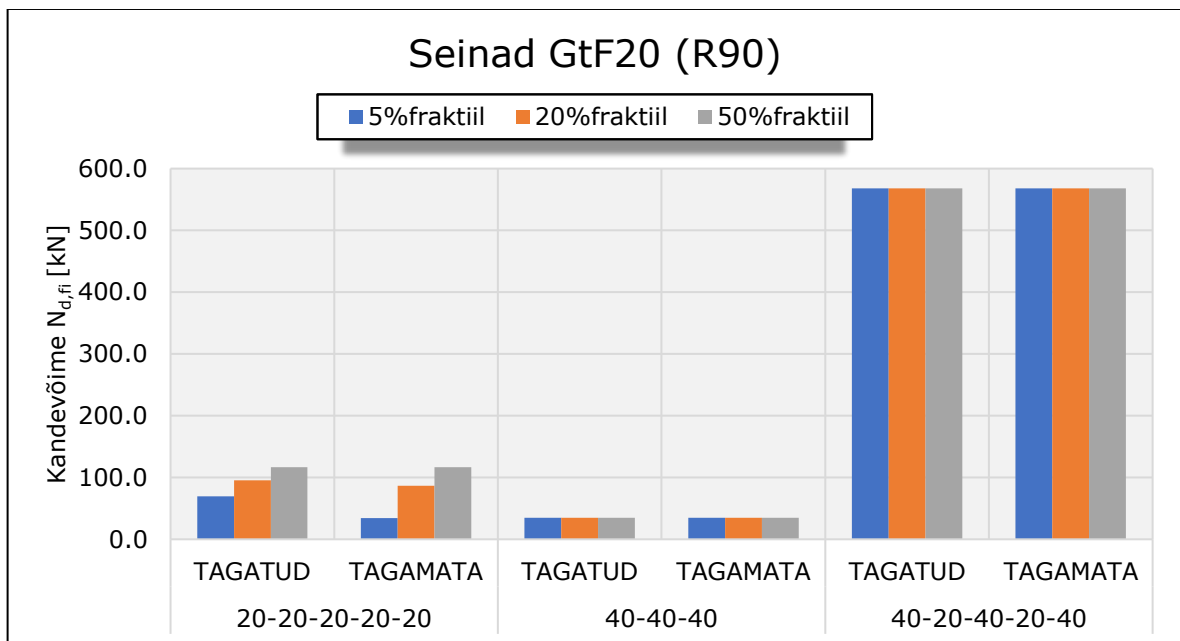
Graafik 6.32 Liimvuugi terviklikkuse mõju vahelagede kandevõimele, kui kattematerjaliks on GtF15+WB18



Graafik 6.33 Liimvuugi terviklikkuse mõju seinte kandevõimele, kui kattematerjaliks on GtF15+WB18



Graafik 6.34 Liimvuugi terviklikkuse mõju vahelagede kandevõimele, kui kattematerjaliks on GtF20



Graafik 6.35 Liimvuugi terviklikkuse mõju seinte kandevõimele, kui kattematerjaliks on GtF20

# KOKKUVÕTE

Lõputöös uuriti ristkihtpuidu tulepüsivust. Arvutati kolme erineva vahelae ja kolme erineva seina ristlõike kandevõimed 1 meetrise riba kohta tulepüsivuse R60, R90 ja R120 juures. Muutuvateks parameetriteks olid puitu kaitsvad kattematerjalid, tõrketekkeajad ja liimvuugi terviklikkus.

Söestumisarvutused on tehtud vastavalt EN 1995-1-2:2020 lõplikule mustandile. Kandevõimed on arvutatud vastavalt Rootsi ristkihtpuidu käsiraamatu „KL-trähandbok” meetodile. Arvutatud ja analüüsitud on 684 erinevat konstruktsiooni. Selleks koostati mahukas Exceli fail.

Söestumise analüüsil selgus:

- mida hiljem kaitseplaat laguneb, ehk mida suurem on kattematerjali tõrketekkeae, seda väiksem on tõenäoliselt R60 ja R90 korral liimvuugi terviklikkusest tulenev kandevõimete erinevus.

Katteta ristlõike ja kattematerjaliga GtA12,5 kaetud ristlõike võrdluses selgus:

- tulepüsivuse R60 korral ristlõike katmine GtA12,5-ga kokkuvõttes ei suurenda kandevõimet. Erandina võib kandevõimete erinevus olla ristlõike 20-20-20-20-20 korral.
- tulepüsivuse R90 korral ristlõike katmine GtA12,5-ga enamjaolt ei suurenda kandevõimet. Erandina võib tuua välja näiteks seina ristlõike 40-20-40-20-40, kus 20% fraktiliväärtusega GtA12,5 kasutamine suurendab kandevõimet umbes 1,2 korda.

Tähelepanekud kattematerjalide mõju analüüsist kandevõimele:

- puidu kaitsmine kattematerjaliga 2xGtF15 ja mõnel juhul ka GtF15+WB18 annavad enamasti kõige suurema kandevõime.
- enamjaolt 1xGtA12,5 ja katteta olukord sarnanevad kandevõimelt, andes enamasti võrreldes teiste kattematerjalidega väikseima kandevõime.
- vahelae 40-40-40-40-40 tulepüsivuse R90 korral, kui liimvuugi terviklikkus on tagatud, kattematerjali valik ei mõjuta kandevõimet. Kõikide katetega on sama kandevõime. Tulepüsivuse R120 korral ilma katteta ja 1xGtA12,5 annavad veidi väikema kandevõime, kuid teiste katete korral on jällegi kandevõime võrdne.
- enamikel juhtudel tõrketekkeaja fraktil ei mõjuta kandevõimet. 50% fraktil võib teatud juhtudel kandevõimet oluliselt suurendada, kuid 5% ja 20% fraktili kasutamisel on kandevõimed rohkem sarnased.
- töö autori arvates on soovitatav kasutada projekteerimisel 20% fraktili.

Liimvuugi terviklikkuse mõju analüüsist kandevõimele selgus, et kattematerjalide 2xGtA12,5, GtF15+WB18 ja GtF20 puhul:

- tulepüsivuse R60 korral liimvuugi terviklikkus ei mõjuta kandevõimet. Erandiks on vaid vahelagi 20-20-20-20-20, mis on kaetud kahekordse A-tüüpi kipsplaadiga, sest 5% ja 20% korral on kandevõimed veidike erinevad.
- tulepüsivuse R90 korral liimvuugi terviklikkus vahelae 40-40-40-40-40 ja seinä 40-40-40 kandevõimet ei mõjuta.

Autori hinnangul olid lõputöö tulemused ja nendest tulenevad järeldused väga huvitavad. Edaspidi oleks kindlasti põhjust võrrelda tulemusi reaalsete tulekatsetega, mille järel saaks teha rohkem ja täpsemaid hinnanguid ristkihtpuidu käitumise kohta tulekahjuolukorras.

## SUMMARY

In this thesis, the fire resistance of cross-laminated timber were analyzed. Three cross-sections were chosen for load-bearing members of walls and ceilings. Fire resistances R60, R90 and R120 were analyzed. Load-bearing capacities are given for 1 m wide ribbon of each member.

Influence of different fire protection systems with different fractile values of failure times were analyzed. Additionally the bond line integrity in fire was considered. The linear and step-models for charring were used when comparing load-bearing capacities.

Charring analysis is performed according to the Final Draft of EN 1995-1-2:2020. Calculations of load-bearing capacities are based on the method published in Swedish handbook „KL-trähandbok" (CLT-handbook).

In total, 684 different structures are analyzed in this thesis. For this purpose, the extensive Excel file was created and used.

Main conclusions of the thesis are the following:

Charring analysis showed that

- longer failure times of the fire protection systems will lead to smaller difference in the load-bearing capacities for fire resistances R60 and R90 when comparing cases with bond line integrity maintained or not maintained.

Comparison of initially unprotected structures with structures protected with GtA12,5 showed that

- for R60 there is no difference in load-bearing capacities. Exception can be the cross-section with small lamella thicknesses (20-20-20-20-20).
- for R90 the protection with GtA12,5 do not usually increase the load-bearing capacity. Exception can be the cross-section 40-20-40-20-40 that can have 1,2 times bigger load-bearing capacity with 20% fractile value of the failure time of GtA12,5.

Analysis of the influence of fire protection systems to the load-bearing capacity showed that

- biggest load-bearing capacity was achieved when protecting CLT with 2xGtF15 and sometimes GtF15+WB18.

- smallest load-bearing capacity was achieved without protection and with 1xGtA12,5.
- load-bearing capacity for R90 of floors with 40 mm lamellas (40-40-40-40-40) was the same with all fire protection systems. Load-bearing capacity for R120 was smaller with 1xGtA12,5 and initially unprotected floors compared to the other fire protection systems.
- fractile values of the failure times did not influence the load-bearing capacities of cross-laminated timber in most of the cases. Sometimes 50% fractile made a small influence by increasing the load-bearing capacity.
- author of this thesis recommends to use 20% fractile values in the design models for cross-laminated timber.

Analysis of the influence of bond line integrity showed that with fire protection systems consisting of 2xGtA12,5, GtF15+WB18 and GtF20 showed that

- load-bearing capacity is not influenced by bond-line integrity when required fire resistance is R60. Exception is the floor with 20 mm lamellas (20-20-20-20-20) protected with 2xGtA12,5, because the 5% and 20% fractile values of failure times give slightly different load-bearing capacities.
- load-bearing capacity of the floor 40-40-40-40-40 and wall 40-40-40 is not influenced by bond-line integrity when required fire resistance is R90.

Author of this thesis concludes that the results and analysis are very interesting. In the future, the verification of the calculation results shall be performed by loaded fire tests to give more detailed assesment for the behaviour of cross-laminated timber in fire.

## KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] Just, E.-J., Õiger, K., Just, A., Puit- ja puidupõhised konstruktsioonid : õpik kõrgkoolidele, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 2015.
- [2] *Eurocode 5: Design of timber structures. Part 1-2: General rules – Structural fire design : EN 1995-1-2:2020 (E). 3rd draft.*, 2020.
- [3] Karacabeyli, E.; Douglas, B., „CLT Handbook,” [Võrgumaterjal]. Available: [https://cdn2.hubspot.net/hubfs/5577290/PDFs/CLT%20Handbook/CLT\\_USA-Complete-document-Think\\_Wood.pdf](https://cdn2.hubspot.net/hubfs/5577290/PDFs/CLT%20Handbook/CLT_USA-Complete-document-Think_Wood.pdf). [Kasutatud 18 mai 2021].
- [4] Borgström, E., Fröbel, J., KL-trähandbok, Stockholm, 2017.
- [5] Klippel, M., Just, A (eds), Guidance on Fire design of CLT including best practise, COST Action FP1404, Zürich, Switzerland, 2018. DOI 10.3929/ethz-b-000319542p.
- [6] „TalTech Report SE-21-01. Analysis of the database of full-scale fire tests with gypsum boards”.
- [7] Rohusaar, J., Mägi, R., Masso, T., Talvik, I., Jaaniso, V., Otsmaa, V., Voltri, V., Loorits, K., Peipman, T., Pukk, O., Hartšuk, V., Ehituskonstruktori käsiraamat, Tallinn: Autorid ja EHITAME kirjastus, 2014.
- [8] *Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings : EVS-EN 1995-1-1:2005+NA:2007-A1:2008+NA:2009*, 2009.
- [9] *EN301:2017. Adhesives, phenolic and aminoplastic, for load-bearing timber structures - Classification and performance requirements.*

**LISAD**



## Lisa 1 Arvutusnäide - vahelagi 40-20-40-20-40, kui kattematerjal puudub ja liimvuugi terviklikkus ei ole tagatud

### Andmed

|                                                     |                                                                             |
|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| Ristlõige                                           | 40-20-40-20-40                                                              |
| Esimene kiht                                        | $h_1 = 40 \text{ mm}$                                                       |
| Teine kiht                                          | $h_2 = 20 \text{ mm}$                                                       |
| Kolmas kiht                                         | $h_3 = 40 \text{ mm}$                                                       |
| Neljas kiht                                         | $h_4 = 20 \text{ mm}$                                                       |
| Viies kiht                                          | $h_5 = 40 \text{ mm}$                                                       |
| Ristlõike paksus                                    | $h = 160 \text{ mm}$                                                        |
| Tulepüsivus                                         | 90 min                                                                      |
| Materjal                                            | C24                                                                         |
| Paindetugevus                                       | $f_{m,k} = 24 \text{ N/mm}^2$                                               |
| Elastsusmoodul                                      | $E_{0,05} = 7400 \text{ N/mm}^2$                                            |
| Nihkemoodul                                         | $G_{9090} = 50 \text{ N/mm}^2$                                              |
| Ühemõõtmeline söestumismäär                         | $\beta_0 = 0,65 \text{ mm/min}$                                             |
| Külgvuugitegur                                      | $k_g = 1$                                                                   |
| Söestumismäär faasis 1 ja 4                         | $\beta_{n,faas 1,4} = k_g * \beta_0 = 1 * 0,65 = 0,65 \text{ mm/min}$       |
| Söestumismäär faasis 3                              | $\beta_{n,faas 3} = 2 * k_g * \beta_0 = 2 * 1 * 0,65 = 1,30 \text{ mm/min}$ |
| Liimvuugi terviklikkus ei ole tagatud (astmemudel). |                                                                             |

### Efektiivristlõike arvutus

$$t_{f,1} = \frac{h_1}{\beta_{n,faas 1}} = \frac{40}{0,65} = 61,54 \text{ min}$$

$$t_{f,2} = t_{f,1} + \frac{h_2}{\beta_{n,faas 3}} = 61,54 + \frac{20}{1,30} = 76,92 \text{ min}$$

$$t_{a,3} = \min \left\{ \frac{2 * t_{f,2}}{t_{f,2} + \frac{25}{\beta_{n,faas 3}}} \right\} = \min \left\{ \frac{2 * 76,92}{76,92 + \frac{25}{1,30}} \right\} = \min \left\{ \frac{153,85}{96,15} \right\} = 96,15 \text{ min}$$

Arvutatakse jääkristlõige, kui tulekahju on kestnud 90 min. Söestumine jääb kolmandasse lamelli:

$$d_{char,n} = \beta_{n,faas 1} * t_{f,1} + \beta_{n,faas 3} * (t_{f,2} - t_{f,1}) + \beta_{n,faas 3} * (t_{90} - t_{f,2}) =$$

$$= 0,65 * 61,54 + 1,3 * (76,92 - 61,54) + 1,3 * (90 - 76,92) = 77,0 \text{ mm}$$

$$d_0 = 12 \text{ mm}$$

$$d_{ef} = d_{char,n} + d_0 = 77 + 12 = 89,0 \text{ mm}$$

Arvutuslik söestumine ulatub kolmandasse ehk kandvasse lamelli 29 mm, seega on lõplik söestumine sama.

$$h_{ef} = h - d_{ef} = 160 - 89 = 71 \text{ mm}$$

### Kandevõime arvutus

Allesjäänud lamellide paksused:

$$t_1 = 40 \text{ mm}$$

$$t_2 = 20 \text{ mm}$$

$$t_3 = 11 \text{ mm}$$

$$t_4 = 0 \text{ mm}$$

$$t_5 = 0 \text{ mm}$$

$$b = 1000 \text{ mm}$$

$$L_c = 3000 \text{ mm}$$

Vaadatakse kui kolmekihilist ristlõiget.

$$A_{x,net} = b * (t_1 + t_3) = 1000 * (40 + 11) = 51000 \text{ mm}^2$$

$$z = \frac{\sum b * t_i * z_i}{A_{x,net}} = \frac{1000 * 40 * \frac{40}{2} + 1000 * 11 * \left(40 + 20 + \frac{11}{2}\right)}{51000} = 29,81 \text{ mm}$$

$$a_1 = z - \frac{t_1}{2} = 29,81 - \frac{40}{2} = 9,81 \text{ mm}$$

$$a_3 = t_1 + t_2 + \frac{t_3}{2} - z = 40 + 20 + \frac{11}{2} - 29,81 = 35,69 \text{ mm}$$

$$\gamma_1 = 1$$

$$\gamma_3 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 * E_{0,05} * t_3 * t_2}{L_c^2 * G_{9090}}} = \frac{1}{1 + \frac{3,14^2 * 7400 * 11 * 20}{3000^2 * 50}} = 0,97$$

$$\begin{aligned} I_{x,ef} &= \sum b * \left( \frac{t_i^3}{12} + \gamma_i * t_i * a_i^2 \right) = \\ &= 1000 * \left( \frac{40^3}{12} + 1 * 40 * 9,81^2 + \frac{11^3}{12} + 0,97 * 11 * 35,69^2 \right) = \\ &= 22884885 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

$$W_{x,net} = \frac{I_{x,ef}}{\max\{z; h_{ef} - z\}} = \frac{22884885}{71 - 29,81} = 555593 \text{ mm}^3$$

$$k_{fi} = 1,15$$

$$k_{\theta} = 1$$

$$\gamma_{M,fi} = 1$$

$$f_{m,d,fi} = k_{\theta} * \frac{k_{fi} * f_{m,k}}{\gamma_{M,fi}} = 1 * \frac{1,15 * 24}{1} = 27,6 \text{ N/mm}^2$$

$$M_{Rd} = W_{x,net} * f_{m,d,fi} = 555593 * 27,6 = 15334373 \text{ Nmm} = 15,3 \text{ kNm}$$

## **Lisa 2 Arvutusnäide - vahelagi 40-20-40-20-40, kui kattematerjal puudub ja liimvuugi terviklikkus on tagatud**

### **Andmed**

|                                                     |                                                                              |
|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Ristlõige                                           | 40-20-40-20-40                                                               |
| Esimene kiht                                        | $h_1 = 40 \text{ mm}$                                                        |
| Teine kiht                                          | $h_2 = 20 \text{ mm}$                                                        |
| Kolmas kiht                                         | $h_3 = 40 \text{ mm}$                                                        |
| Neljas kiht                                         | $h_4 = 20 \text{ mm}$                                                        |
| Viies kiht                                          | $h_5 = 40 \text{ mm}$                                                        |
| Ristlõike paksus                                    | $h = 160 \text{ mm}$                                                         |
| Tulepüsivus                                         | 90 min                                                                       |
| Materjal                                            | C24                                                                          |
| Paindetugevus                                       | $f_{m,k} = 24 \text{ N/mm}^2$                                                |
| Elastsusmoodul                                      | $E_{0,05} = 7400 \text{ N/mm}^2$                                             |
| Nihkemoodul                                         | $G_{9090} = 50 \text{ N/mm}^2$                                               |
| Ühemõõtmeline söestumismäär                         | $\beta_0 = 0,65 \text{ mm/min}$                                              |
| Külgvuugitegur                                      | $k_g = 1$                                                                    |
| Söestumismäär faasis 1 ja 4                         | $\beta_{n,faas\ 1,4} = k_g * \beta_0 = 1 * 0,65 = 0,65 \text{ mm/min}$       |
| Söestumismäär faasis 3                              | $\beta_{n,faas\ 3} = 2 * k_g * \beta_0 = 2 * 1 * 0,65 = 1,30 \text{ mm/min}$ |
| Liimvuugi terviklikkus on tagatud (lineaarne mudel) |                                                                              |

### **Efektiivristlõike arvutus**

Arvutatakse jääkristlõige pärast 90 minutit kestnud tulekahjut. Söestumine jääb teise ehk mittekandvasse lamelli:

$$d_{char,n} = \beta_{n,phase\ 1} * t_{90} = 0,65 * 90 = 58,5 \text{ mm}$$

$$d_0 = 12 \text{ mm}$$

$$d_{ef} = d_{char,n} + d_0 = 58,5 + 12 = 70 \text{ mm}$$

Arvutuslik söestumine ulatub kolmandasse ehk kandvasse lamelli 10 mm, seega on lõplik söestumine sama.

$$h_{ef} = h - d_{ef} = 160 - 70 = 90 \text{ mm}$$

### **Kandevõime arvutus**

Allesjäänud lamellide paksused:

$$t_1 = 40 \text{ mm}$$

$$t_2 = 20 \text{ mm}$$

$$t_3 = 30 \text{ mm}$$

$$t_4 = 0 \text{ mm}$$

$$t_5 = 0 \text{ mm}$$

$$b = 1000 \text{ mm}$$

$$L_c = 3000 \text{ mm}$$

Vaadatakse kui kolmekihilist ristlõiget.

$$A_{x,net} = b * (t_1 + t_3) = 1000 * (40 + 30) = 70000 \text{ mm}^2$$

$$z = \frac{\sum b * t_i * z_i}{A_{x,net}} = \frac{1000 * 40 * \frac{40}{2} + 1000 * 30 * \left(40 + 20 + \frac{30}{2}\right)}{70000} = 43,57 \text{ mm}$$

$$a_1 = z - \frac{t_1}{2} = 43,57 - \frac{40}{2} = 20,57 \text{ mm}$$

$$a_3 = t_1 + t_2 + \frac{t_3}{2} - z = 40 + 20 + \frac{30}{2} - 43,57 = 31,43 \text{ mm}$$

$$\gamma_1 = 1$$

$$\gamma_3 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 * E_{0,05} * t_3 * t_2}{L_c^2 * G_{9090}}} = \frac{1}{1 + \frac{3,14^2 * 7400 * 30 * 20}{3000^2 * 50}} = 0,91$$

$$\begin{aligned} I_{x,ef} &= \sum b * \left( \frac{t_i^3}{12} + \gamma_i * t_i * a_i^2 \right) = \\ &= 1000 * \left( \frac{40^3}{12} + 1 * 40 * 20,57^2 + \frac{30^3}{12} + 0,91 * 30 * 31,43^2 \right) = \\ &= 51476495 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

$$W_{x,net} = \frac{I_{x,ef}}{\max\{z; h_{ef} - z\}} = \frac{51476495}{90 - 43,57} = 1108690 \text{ mm}^3$$

$$k_{fi} = 1,15$$

$$k_\theta = 1$$

$$\gamma_{M,fi} = 1$$

$$f_{m,d,fi} = k_\theta * \frac{k_{fi} * f_{m,k}}{\gamma_{M,fi}} = 1 * \frac{1,15 * 24}{1} = 27,6 \text{ N/mm}^2$$

$$M_{Rd} = W_{x,net} * f_{m,d,fi} = 1108690 * 27,6 = 30599855 \text{ Nmm} = 30,5 \text{ kNm}$$

### **Lisa 3 Arvutusnäide - sein 20-20-20-20-20, kui kattematerjaliks GtF15+WB18 ja liimvuugi terviklikkus ei ole tagatud**

#### **Andmed**

|                                        |                                                                              |
|----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Ristlõige                              | 20-20-20-20-20                                                               |
| Fraktil                                | 20%                                                                          |
| Esimene kiht                           | $h_1 = 20 \text{ mm}$                                                        |
| Teine kiht                             | $h_2 = 20 \text{ mm}$                                                        |
| Kolmas kiht                            | $h_3 = 20 \text{ mm}$                                                        |
| Neljas kiht                            | $h_4 = 20 \text{ mm}$                                                        |
| Viies kiht                             | $h_5 = 20 \text{ mm}$                                                        |
| Ristlõike paksus                       | $h = 100 \text{ mm}$                                                         |
| Tulepüsivus                            | 90 min                                                                       |
| Materjal                               | C24                                                                          |
| Paindetugevus                          | $f_{c,k} = 21 \text{ N/mm}^2$                                                |
| Elastsusmoodul                         | $E_{0,05} = 7400 \text{ N/mm}^2$                                             |
| Nihkemoodul                            | $G_{9090} = 50 \text{ N/mm}^2$                                               |
| Ühemõõtmeline söestumismäär            | $\beta_0 = 0,65 \text{ mm/min}$                                              |
| Kõlgvuugitegur                         | $k_g = 1$                                                                    |
| Söestumismäär faasis 1 ja 4            | $\beta_{n,faas\ 1,4} = k_g * \beta_0 = 1 * 0,65 = 0,65 \text{ mm/min}$       |
| Söestumismäär faasis 3                 | $\beta_{n,faas\ 3} = 2 * k_g * \beta_0 = 2 * 1 * 0,65 = 1,30 \text{ mm/min}$ |
| Liimvuugi terviklikkus ei ole tagatud. |                                                                              |

#### **Efektiivristlõike arvutus**

Kipsplaadi kaitseaeg:

$$t_{f,pr} = 1,2 * (4,6 * h_p - 25) = 1,2 * (4,6 * 15 - 25) = 52,8 \text{ min}$$

$$t_{prot,0,F} = 30 * \left(\frac{h_i}{15}\right)^{1,2} = 30 * \left(\frac{15}{15}\right)^{1,2} = 30 \text{ min}$$

$$t_{prot,F} = t_{prot,0,i} * k_{pos,exp,i} * k_{pos,unexp,i} * k_{j,i} = 30 * 1 * 1 * 1 = 30 \text{ min}$$

Puitlaastplaadi kaitseaeg:

$$\rho_k = 700 \text{ kg/m}^3$$

$$k_\rho = \sqrt{\frac{450}{\rho_k}} = \sqrt{\frac{450}{700}} = 0,80$$

$$k_h = \sqrt{\frac{20}{h_p}} = \sqrt{\frac{20}{18}} = 1,05$$

$$t_{prot,0,WB} = \frac{h_i}{k_\rho * k_h * \beta_0} = \frac{18}{0,80 * 1,05 * 0,65} = 33 \text{ min}$$

$$k_2 = 1 - \frac{h_p}{55} = 1 - \frac{15}{55} = 0,73$$

$$t_{prot,max,i} = \frac{t_{prot,0,WB}}{k_2} = \frac{33}{0,73} = 45,2 \text{ min}$$

$$k_{pos,exp,i} = 0,5 * \sqrt{\frac{t_{prot,0,WB}}{t_{prot,F}}} = 0,5 * \sqrt{\frac{33}{30}} = 0,52$$

$$\Delta t_{max,i} = t_{prot,max,i} - t_{prot,0,i} * k_{pos,exp,i} * k_{pos,unexp,i} * k_{j,i} = 45,2 - 33 * 0,52 * 1 * 1 = 28,0 \text{ min}$$

$$\Delta t_i = \frac{(t_{f,pr} - t_{prot,F}) * \Delta t_{max,i}}{t_{prot,max,i}} = \frac{(52,8 - 30) * 28}{45,2} = 14,1 \text{ min}$$

$$t_{prot,WB} = (t_{prot,0,i} * k_{pos,exp,i} * k_{pos,unexp,i} + \Delta t_i) * k_{j,i} = (33 * 0,52 * 1 + 14,1) * 1 = 31,3 \text{ min}$$

Söestumise algusaeg:

$$t_{f,pr} = t_{ch} = \sum t_{prot} = t_{prot,F} + t_{prot,WB} = 30 + 31,3 = 61,3 \text{ min}$$

$$t_{f,1} = t_{ch} + \frac{h_1}{\beta_{n,faas 3}} = 61,3 + \frac{20}{1,30} = 76,68 \text{ min}$$

$$t_{f,2} = t_{f,1} + \frac{h_2}{\beta_{n,faas 3}} = 76,68 + \frac{20}{1,30} = 92,06 \text{ min}$$

Arvutatakse jääkristlõige, kui tulekahju on kestnud 90 min. Söestumine jääb teise lamelli:

$$d_{char,n} = \beta_{n,faas 3} * (t_{f,1} - t_{ch}) + \beta_{n,faas 3} * (t_{90} - t_{f,1}) = 1,3 * (76,68 - 61,3) + 1,3 * (90 - 76,68) = 37,3 \text{ mm}$$

$$d_0 = h_{res,i} + (8 + \frac{h}{10}) * (1 - 0,9 * \frac{h_{res,i}}{h_i}) = (20 - 17,3) + (8 + \frac{100}{10}) * (1 - 0,9 * \frac{(20 - 17,3)}{20}) = 18,5 \text{ mm}$$

$$d_{ef} = d_{char,n} + d_0 = 37,3 + 18,5 = 56 \text{ mm}$$

Arvutuslik söestumine ulatub kolmandasse ehk kandvasse lamelli 16 mm, seega on lõplik söestumine sama.

$$h_{ef} = h - d_{ef} = 100 - 56 = 44 \text{ mm}$$

### Kandevõime arvutus

Allesjäänud lamellide paksused:

$$t_1 = 20 \text{ mm}$$

$$t_2 = 20 \text{ mm}$$

$$t_3 = 4 \text{ mm}$$

$$t_4 = 0 \text{ mm}$$

$$t_5 = 0 \text{ mm}$$

$$b = 1000 \text{ mm}$$

$$L_c = 3000 \text{ mm}$$

Vaadatakse kui kolmekihilist ristlõiget.

$$A_{x,net} = b * (t_1 + t_3) = 1000 * (20 + 4) = 24000 \text{ mm}^2$$

$$z = \frac{\sum b * t_i * z_i}{A_{x,net}} = \frac{1000 * 20 * \frac{20}{2} + 1000 * 4 * \left(20 + 20 + \frac{4}{2}\right)}{24000} = 15,3 \text{ mm}$$

$$a_1 = z - \frac{t_1}{2} = 15,3 - \frac{20}{2} = 5,3 \text{ mm}$$

$$a_3 = t_1 + t_2 + \frac{t_3}{2} - z = 20 + 20 + \frac{4}{2} - 15,3 = 26,7 \text{ mm}$$

$$\gamma_1 = 1$$

$$\gamma_3 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 * E_{0,05} * t_3 * t_2}{L_c^2 * G_{9090}}} = \frac{1}{1 + \frac{3,14^2 * 7400 * 4 * 20}{3000^2 * 50}} = 0,99$$

$$I_{x,ef} = \sum b * \left( \frac{t_i^3}{12} + \gamma_i * t_i * a_i^2 \right) = 1000 * \left( \frac{20^3}{12} + 1 * 20 * 5,3^2 + \frac{4^3}{12} + 0,99 * 4 * 26,7^2 \right) = 4056844 \text{ mm}^4$$

$$i_z = \sqrt{\frac{I_{x,ef}}{A_{x,net}}} = \sqrt{\frac{4056844}{24000}} = 13,0 \text{ mm}$$



$$\lambda_z = \frac{L_c}{i_z} = \frac{3000}{13,0} = 230,7$$

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} * \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{230,7}{\pi} * \sqrt{\frac{21}{7400}} = 3,9 > 0,3$$

$$k_z = 0,5 * (1 + \beta_c * (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) = 0,5 * (1 + 0,2 * (3,9 - 0,3) + 3,9^2) = 8,4$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{8,4 + \sqrt{8,4^2 - 3,9^2}} = 0,06$$

$$f_{c,0,d,fi} = k_\theta * \frac{k_{fi} * f_k}{\gamma_{M,fi}} = 1 * \frac{1,15 * 21}{1} = 24,15 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{c,0,Rd,fi} = k_{c,z} * f_{c,0,d,fi} = 0,06 * 24,15 = 1,5 \text{ N/mm}^2$$

$$N_{Rd,fi} = \sigma_{c,0,Rd,fi} * A_{x,net} = 1,5 * 24000 = 34776 \text{ N} = 34,8 \text{ kN}$$

## Lisa 4 Arvutusnäide - sein 20-20-20-20-20, kui kattematerjaliks GtF15+WB18 ja liimvuugi terviklikkus on tagatud

### Andmed

|                                        |                                                                             |
|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| Ristlõige                              | 20-20-20-20-20                                                              |
| Fraktil                                | 20%                                                                         |
| Esimene kiht                           | $h_1 = 20 \text{ mm}$                                                       |
| Teine kiht                             | $h_2 = 20 \text{ mm}$                                                       |
| Kolmas kiht                            | $h_3 = 20 \text{ mm}$                                                       |
| Neljas kiht                            | $h_4 = 20 \text{ mm}$                                                       |
| Viies kiht                             | $h_5 = 20 \text{ mm}$                                                       |
| Ristlõike paksus                       | $h = 100 \text{ mm}$                                                        |
| Tulepüsivus                            | 90 min                                                                      |
| Materjal                               | C24                                                                         |
| Paindetugevus                          | $f_{c,k} = 21 \text{ N/mm}^2$                                               |
| Elastsusmoodul                         | $E_{0,05} = 7400 \text{ N/mm}^2$                                            |
| Nihkemoodul                            | $G_{9090} = 50 \text{ N/mm}^2$                                              |
| Ühemõõtmeline söestumismäär            | $\beta_0 = 0,65 \text{ mm/min}$                                             |
| Kõlgvuugitegur                         | $k_g = 1$                                                                   |
| Söestumismäär faasis 1 ja 4            | $\beta_{n,faas 1,4} = k_g * \beta_0 = 1 * 0,65 = 0,65 \text{ mm/min}$       |
| Söestumismäär faasis 3                 | $\beta_{n,faas 3} = 2 * k_g * \beta_0 = 2 * 1 * 0,65 = 1,30 \text{ mm/min}$ |
| Liimvuugi terviklikkus ei ole tagatud. |                                                                             |

### Efektiivristlõike arvutus

Kipsplaadi kaitseaeg:

$$t_{f,pr} = 1,2 * (4,6 * h_p - 25) = 1,2 * (4,6 * 15 - 25) = 52,8 \text{ min}$$

$$t_{prot,0,F} = 30 * \left(\frac{h_i}{15}\right)^{1,2} = 30 * \left(\frac{15}{15}\right)^{1,2} = 30 \text{ min}$$

$$t_{prot,F} = t_{prot,0,i} * k_{pos,exp,i} * k_{pos,unexp,i} * k_{j,i} = 30 * 1 * 1 * 1 = 30 \text{ min}$$

Puitlaastplaadi kaitseaeg:

$$\rho_k = 700 \text{ kg/m}^3$$

$$k_\rho = \sqrt{\frac{450}{\rho_k}} = \sqrt{\frac{450}{700}} = 0,80$$

$$k_h = \sqrt{\frac{20}{h_p}} = \sqrt{\frac{20}{18}} = 1,05$$

$$t_{prot,0,WB} = \frac{h_i}{k_\rho * k_h * \beta_0} = \frac{18}{0,80 * 1,05 * 0,65} = 33 \text{ min}$$

$$k_2 = 1 - \frac{h_p}{55} = 1 - \frac{15}{55} = 0,73$$

$$t_{prot,max,i} = \frac{t_{prot,0,WB}}{k_2} = \frac{33}{0,73} = 45,2 \text{ min}$$

$$k_{pos,exp,i} = 0,5 * \sqrt{\frac{t_{prot,0,WB}}{t_{prot,F}}} = 0,5 * \sqrt{\frac{33}{30}} = 0,52$$

$$\Delta t_{max,i} = t_{prot,max,i} - t_{prot,0,i} * k_{pos,exp,i} * k_{pos,unexp,i} * k_{j,i} = 45,2 - 33 * 0,52 * 1 * 1 = 28,0 \text{ min}$$

$$\Delta t_i = \frac{(t_{f,pr} - t_{prot,F}) * \Delta t_{max,i}}{t_{prot,max,i}} = \frac{(52,8 - 30) * 28}{45,2} = 14,1 \text{ min}$$

$$t_{prot,WB} = (t_{prot,0,i} * k_{pos,exp,i} * k_{pos,unexp,i} + \Delta t_i) * k_{j,i} = (33 * 0,52 * 1 + 14,1) * 1 = 31,3 \text{ min}$$

Söestumise algusaeg:

$$t_{f,pr} = t_{ch} = \sum t_{prot} = t_{prot,F} + t_{prot,WB} = 30 + 31,3 = 61,3 \text{ min}$$

$$t_{a,1} = \min \left\{ t_{f,pr} + \frac{2 * t_{f,pr}}{25 - (t_{f,pr} - t_{ch}) * \beta_{n,faas 2}} = \right. \\ \left. = \min \left\{ 61,3 + \frac{2 * 61,3}{25 - 0} = \min \left\{ \frac{122,6}{80,5} = 80,5 \text{ min} \right. \right. \right.$$

$$h_{ta,1} = \beta_{n,phase 3} * (t_{a,3} - t_{f,pr}) = 1,30 * (80,5 - 61,3) = 25,0 \text{ mm}$$

Arvutatakse jääkristlõige, kui tulekahju on kestnud 90 min. Söestumine jääb teise lamelli:

$$d_{char,n} = \beta_{n,faas 3} * (t_{a,1} - t_{ch}) + \beta_{n,faas 4} * (t_{90} - t_{a,1}) \\ = 1,3 * (80,5 - 61,3) + 0,65 * (90 - 80,5) = 31,1 \text{ mm}$$

$$d_0 = h_{res,i} + \left(8 + \frac{h}{10}\right) * \left(1 - 0,9 * \frac{h_{res,i}}{h_i}\right) = (20 - 11,1) + \left(8 + \frac{100}{10}\right) * \left(1 - 0,9 * \frac{(20 - 11,1)}{20}\right) \\ = 19,7 \text{ mm}$$

$$d_{ef} = d_{char,n} + d_0 = 31,1 + 19,7 = 51 \text{ mm}$$

Arvutuslik söestumine ulatub kolmandasse ehk kandvasse lamelli 11 mm, seega on lõplik söestumine sama.

$$h_{ef} = h - d_{ef} = 100 - 51 = 49 \text{ mm}$$

### Kandevõime arvutus

Allesjäänud lamellide paksused:

$$t_1 = 20 \text{ mm}$$

$$t_2 = 20 \text{ mm}$$

$$t_3 = 9 \text{ mm}$$

$$t_4 = 0 \text{ mm}$$

$$t_5 = 0 \text{ mm}$$

$$b = 1000 \text{ mm}$$

$$L_c = 3000 \text{ mm}$$

Vaadatakse kui kolmekihilist ristlõiget.

$$A_{x,net} = b * (t_1 + t_3) = 1000 * (20 + 9) = 29000 \text{ mm}^2$$

$$z = \frac{\sum b * t_i * z_i}{A_{x,net}} = \frac{1000 * 20 * \frac{20}{2} + 1000 * 9 * \left(20 + 20 + \frac{9}{2}\right)}{29000} = 20,7 \text{ mm}$$

$$a_1 = z - \frac{t_1}{2} = 20,7 - \frac{20}{2} = 10,7 \text{ mm}$$

$$a_3 = t_1 + t_2 + \frac{t_3}{2} - z = 20 + 20 + \frac{9}{2} - 20,7 = 23,8 \text{ mm}$$

$$\gamma_1 = 1$$

$$\gamma_3 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 * E_{0,05} * t_3 * t_2}{L_c^2 * G_{9090}}} = \frac{1}{1 + \frac{3,14^2 * 7400 * 9 * 20}{3000^2 * 50}} = 0,97$$

$$I_{x,ef} = \sum b * \left(\frac{t_i^3}{12} + \gamma_i * t_i * a_i^2\right) = 1000 * \left(\frac{20^3}{12} + 1 * 20 * 10,7^2 + \frac{9^3}{12} + 0,97 * 9 * 23,8^2\right) = \\ = 7962238 \text{ mm}^4$$

$$i_z = \sqrt{\frac{I_{x,ef}}{A_{x,net}}} = \sqrt{\frac{7962238}{29000}} = 16,6 \text{ mm}$$

$$\lambda_z = \frac{L_c}{i_z} = \frac{3000}{16,6} = 180,7$$

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} * \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{180,7}{\pi} * \sqrt{\frac{21}{7400}} = 3,1 > 0,3$$

$$k_z = 0,5 * (1 + \beta_c * (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) = 0,5 * (1 + 0,2 * (3,1 - 0,3) + 3,1^2) = 5,6$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{5,6 + \sqrt{5,6^2 - 3,1^2}} = 0,10$$

$$f_{c,0,d,fi} = k_\theta * \frac{k_{fi} * f_k}{\gamma_{M,fi}} = 1 * \frac{1,15 * 21}{1} = 24,15 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{c,0,Rd,fi} = k_{c,z} * f_{c,0,d,fi} = 0,10 * 24,15 = 2,4 \text{ N/mm}^2$$

$$N_{Rd,fi} = \sigma_{c,0,Rd,fi} * A_{x,net} = 2,4 * 29000 = 69600 \text{ N} = 69,6 \text{ kN}$$

## Lisa 5 Arvutustulemused - vahelagi 20-20-20-20-20

| Vahelagi 20-20-20-20-20 |              |         |           |       |         |            |       |
|-------------------------|--------------|---------|-----------|-------|---------|------------|-------|
| 5% fraktsioon           |              |         |           |       |         |            |       |
| Kandevõime [kNm]        |              |         |           |       |         |            |       |
|                         | ILMA KATTETA | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15 | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20 |
| Tagamata                | 1.49         | 1.49    | 11.17     | 9.24  | 19.93   | 14.16      | 14.16 |
| Tagatud                 | 7.78         | 7.78    | 14.16     | 13.47 | 19.93   | 14.16      | 14.16 |
| 20% fraktsioon          |              |         |           |       |         |            |       |
| Kandevõime [kNm]        |              |         |           |       |         |            |       |
|                         | ILMA KATTETA | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15 | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20 |
| Tagamata                | 1.49         | 1.49    | 12.27     | 10.03 | 19.93   | 14.16      | 3.00  |
| Tagatud                 | 7.78         | 7.78    | 14.16     | 13.84 | 19.93   | 14.16      | 14.16 |
| 50% fraktsioon          |              |         |           |       |         |            |       |
| Kandevõime [kNm]        |              |         |           |       |         |            |       |
|                         | ILMA KATTETA | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15 | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20 |
| Tagamata                | 1.49         | 1.49    | 13.34     | 14.16 | 19.93   | 10.59      | 14.16 |
| Tagatud                 | 7.78         | 9.49    | 14.16     | 14.16 | 19.93   | 10.59      | 14.16 |
| 5% fraktsioon           |              |         |           |       |         |            |       |
| Kandevõime [kNm]        |              |         |           |       |         |            |       |
|                         | ILMA KATTETA | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15 | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20 |
| Tagamata                | 0.00         | 0.00    | 0.99      | 0.66  | 8.83    | 1.49       | 1.49  |
| Tagatud                 | 1.49         | 1.49    | 1.49      | 1.49  | 13.28   | 7.47       | 3.20  |
| 20% fraktsioon          |              |         |           |       |         |            |       |
| Kandevõime [kNm]        |              |         |           |       |         |            |       |
|                         | ILMA KATTETA | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15 | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20 |
| Tagamata                | 0.00         | 0.00    | 1.21      | 0.79  | 14.16   | 1.49       | 1.49  |
| Tagatud                 | 1.49         | 1.49    | 1.49      | 1.49  | 14.16   | 7.87       | 3.89  |
| 50% fraktsioon          |              |         |           |       |         |            |       |
| Kandevõime [kNm]        |              |         |           |       |         |            |       |
|                         | ILMA KATTETA | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15 | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20 |
| Tagamata                | 0.00         | 0.00    | 1.46      | 1.49  | 14.16   | 1.49       | 1.49  |
| Tagatud                 | 1.49         | 1.49    | 0.95      | 1.83  | 14.16   | 7.87       | 4.62  |
| 5% fraktsioon           |              |         |           |       |         |            |       |
| Kandevõime [kNm]        |              |         |           |       |         |            |       |
|                         | ILMA KATTETA | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15 | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20 |
| Tagamata                | 0.00         | 0.00    | 0.00      | 0.00  | 0.60    | 0.00       | 0.00  |
| Tagatud                 | 0.46         | 0.46    | 1.49      | 1.49  | 1.49    | 1.49       | 1.49  |
| 20% fraktsioon          |              |         |           |       |         |            |       |
| Kandevõime [kNm]        |              |         |           |       |         |            |       |
|                         | ILMA KATTETA | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15 | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20 |
| Tagamata                | 0.00         | 0.00    | 0.00      | 0.00  | 1.49    | 0.00       | 0.00  |
| Tagatud                 | 0.46         | 0.46    | 1.49      | 1.49  | 2.79    | 1.49       | 1.49  |
| 50% fraktsioon          |              |         |           |       |         |            |       |
| Kandevõime [kNm]        |              |         |           |       |         |            |       |
|                         | ILMA KATTETA | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15 | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20 |
| Tagamata                | 0.00         | 0.00    | 0.00      | 0.00  | 1.91    | 0.00       | 0.00  |
| Tagatud                 | 0.46         | 0.70    | 1.49      | 1.49  | 10.18   | 1.49       | 1.49  |

R  
6  
0

R  
9  
0

R  
1  
2  
0

## Lisa 6 Arvutustulemused - vahelagi 40-20-40-20-40

| Vahelagi 40-20-40-20-40 |              |         |           |       |         |            |       |
|-------------------------|--------------|---------|-----------|-------|---------|------------|-------|
| 5% fraktil              |              |         |           |       |         |            |       |
| Kandevõime [kNm]        |              |         |           |       |         |            |       |
|                         | ILMA KATTETA | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15 | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20 |
| Tagamata                | 41.42        | 41.42   | 41.42     | 41.42 | 75.86   | 53.14      | 35.59 |
| Tagatud                 | 41.42        | 41.42   | 41.42     | 41.42 | 75.86   | 53.14      | 35.59 |
| 20% fraktil             |              |         |           |       |         |            |       |
| Kandevõime [kNm]        |              |         |           |       |         |            |       |
|                         | ILMA KATTETA | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15 | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20 |
| Tagamata                | 41.42        | 41.42   | 41.42     | 41.42 | 75.86   | 54.83      | 37.91 |
| Tagatud                 | 41.42        | 41.42   | 41.42     | 41.42 | 75.86   | 54.83      | 37.91 |
| 50% fraktil             |              |         |           |       |         |            |       |
| Kandevõime [kNm]        |              |         |           |       |         |            |       |
|                         | ILMA KATTETA | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15 | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20 |
| Tagamata                | 41.42        | 41.42   | 41.42     | 32.67 | 75.86   | 65.21      | 41.04 |
| Tagatud                 | 41.42        | 41.42   | 41.42     | 32.67 | 75.86   | 65.21      | 41.04 |
| 5% fraktil              |              |         |           |       |         |            |       |
| Kandevõime [kNm]        |              |         |           |       |         |            |       |
|                         | ILMA KATTETA | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15 | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20 |
| Tagamata                | 15.29        | 15.29   | 33.47     | 30.90 | 41.42   | 41.42      | 41.42 |
| Tagatud                 | 33.30        | 33.30   | 41.42     | 40.93 | 41.42   | 41.42      | 41.42 |
| 20% fraktil             |              |         |           |       |         |            |       |
| Kandevõime [kNm]        |              |         |           |       |         |            |       |
|                         | ILMA KATTETA | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15 | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20 |
| Tagamata                | 15.29        | 15.29   | 34.95     | 31.94 | 34.73   | 41.42      | 41.42 |
| Tagatud                 | 33.30        | 33.30   | 41.42     | 41.42 | 34.73   | 41.42      | 41.42 |
| 50% fraktil             |              |         |           |       |         |            |       |
| Kandevõime [kNm]        |              |         |           |       |         |            |       |
|                         | ILMA KATTETA | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15 | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20 |
| Tagamata                | 15.29        | 19.93   | 36.44     | 38.47 | 62.79   | 41.42      | 41.42 |
| Tagatud                 | 33.30        | 35.51   | 41.42     | 41.42 | 62.79   | 41.42      | 41.42 |
| 5% fraktil              |              |         |           |       |         |            |       |
| Kandevõime [kNm]        |              |         |           |       |         |            |       |
|                         | ILMA KATTETA | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15 | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20 |
| Tagamata                | 6.64         | 6.64    | 6.64      | 6.64  | 30.36   | 14.47      | 4.92  |
| Tagatud                 | 14.28        | 14.28   | 23.55     | 22.24 | 40.66   | 32.91      | 27.69 |
| 20% fraktil             |              |         |           |       |         |            |       |
| Kandevõime [kNm]        |              |         |           |       |         |            |       |
|                         | ILMA KATTETA | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15 | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20 |
| Tagamata                | 6.64         | 6.64    | 6.64      | 6.64  | 40.72   | 15.55      | 5.86  |
| Tagatud                 | 14.28        | 14.28   | 24.31     | 22.77 | 41.42   | 33.42      | 28.51 |
| 50% fraktil             |              |         |           |       |         |            |       |
| Kandevõime [kNm]        |              |         |           |       |         |            |       |
|                         | ILMA KATTETA | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15 | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20 |
| Tagamata                | 6.64         | 6.64    | 6.64      | 6.64  | 41.42   | 15.55      | 6.85  |
| Tagatud                 | 14.28        | 16.63   | 25.06     | 26.09 | 41.42   | 33.42      | 29.39 |

R  
6  
0

R  
9  
0

R  
1  
2  
0

## Lisa 7 Arvutustulemused - vahelagi 40-40-40-40

### Vahelagi 40-40-40-40

| 5% fraktil       |         |           |       |         |            |       |       | R<br>6<br>0 |
|------------------|---------|-----------|-------|---------|------------|-------|-------|-------------|
| Kandevõime [kNm] |         |           |       |         |            |       |       |             |
| ILMA KATTETA     | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15 | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20 |       |             |
| Tagamata         | 55.27   | 55.27     | 55.27 | 55.27   | 95.17      | 65.78 | 41.36 |             |
| Tagatud          | 55.27   | 55.27     | 55.27 | 55.27   | 95.17      | 65.78 | 41.36 |             |
| 20% fraktil      |         |           |       |         |            |       |       |             |
| Kandevõime [kNm] |         |           |       |         |            |       |       |             |
| ILMA KATTETA     | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15 | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20 |       |             |
| Tagamata         | 55.27   | 55.27     | 55.27 | 55.27   | 95.17      | 68.05 | 44.69 |             |
| Tagatud          | 55.27   | 55.27     | 55.27 | 55.27   | 95.17      | 68.05 | 44.69 |             |
| 50% fraktil      |         |           |       |         |            |       |       |             |
| Kandevõime [kNm] |         |           |       |         |            |       |       |             |
| ILMA KATTETA     | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15 | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20 |       |             |
| Tagamata         | 55.27   | 55.27     | 55.27 | 37.13   | 95.17      | 81.67 | 49.13 |             |
| Tagatud          | 55.27   | 55.27     | 55.27 | 37.13   | 95.17      | 81.67 | 49.13 |             |

| 5% fraktil       |         |           |       |         |            |       |       | R<br>9<br>0 |
|------------------|---------|-----------|-------|---------|------------|-------|-------|-------------|
| Kandevõime [kNm] |         |           |       |         |            |       |       |             |
| ILMA KATTETA     | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15 | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20 |       |             |
| Tagamata         | 54.05   | 54.05     | 55.27 | 55.27   | 55.27      | 55.27 | 55.27 |             |
| Tagatud          | 55.27   | 55.27     | 55.27 | 55.27   | 55.27      | 55.27 | 55.27 |             |
| 20% fraktil      |         |           |       |         |            |       |       |             |
| Kandevõime [kNm] |         |           |       |         |            |       |       |             |
| ILMA KATTETA     | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15 | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20 |       |             |
| Tagamata         | 54.05   | 54.05     | 55.27 | 55.27   | 40.12      | 55.27 | 55.27 |             |
| Tagatud          | 55.27   | 55.27     | 55.27 | 55.27   | 40.12      | 55.27 | 55.27 |             |
| 50% fraktil      |         |           |       |         |            |       |       |             |
| Kandevõime [kNm] |         |           |       |         |            |       |       |             |
| ILMA KATTETA     | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15 | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20 |       |             |
| Tagamata         | 54.05   | 55.27     | 55.27 | 55.27   | 78.54      | 55.27 | 55.27 |             |
| Tagatud          | 55.27   | 55.27     | 55.27 | 55.27   | 78.54      | 55.27 | 55.27 |             |

| 5% fraktil       |         |           |       |         |            |       |       | R<br>1<br>2<br>0 |
|------------------|---------|-----------|-------|---------|------------|-------|-------|------------------|
| Kandevõime [kNm] |         |           |       |         |            |       |       |                  |
| ILMA KATTETA     | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15 | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20 |       |                  |
| Tagamata         | 13.67   | 13.67     | 39.81 | 36.29   | 55.27      | 53.55 | 46.76 |                  |
| Tagatud          | 45.33   | 45.33     | 55.27 | 55.26   | 55.27      | 55.27 | 55.27 |                  |
| 20% fraktil      |         |           |       |         |            |       |       |                  |
| Kandevõime [kNm] |         |           |       |         |            |       |       |                  |
| ILMA KATTETA     | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15 | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20 |       |                  |
| Tagamata         | 13.67   | 13.67     | 41.82 | 37.72   | 55.27      | 54.20 | 47.83 |                  |
| Tagatud          | 45.33   | 45.33     | 55.27 | 55.27   | 55.27      | 55.27 | 55.27 |                  |
| 50% fraktil      |         |           |       |         |            |       |       |                  |
| Kandevõime [kNm] |         |           |       |         |            |       |       |                  |
| ILMA KATTETA     | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15 | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20 |       |                  |
| Tagamata         | 13.67   | 20.60     | 43.30 | 44.65   | 55.27      | 54.20 | 48.98 |                  |
| Tagatud          | 45.33   | 48.25     | 55.27 | 55.27   | 55.27      | 55.27 | 55.27 |                  |



## Lisa 8 Arvutustulemused - sein 20-20-20-20-20

| Sein 20-20-20-20-20 |              |         |           |        |         |            |        |
|---------------------|--------------|---------|-----------|--------|---------|------------|--------|
| 5% fraktil          |              |         |           |        |         |            |        |
| Kandevõime [kN]     |              |         |           |        |         |            |        |
|                     | ILMA KATTETA | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15  | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20  |
| Tagamata            | 3.13         | 6.54    | 116.81    | 109.08 | 222.40  | 180.02     | 116.81 |
| Tagatud             | 27.50        | 35.49   | 116.81    | 109.08 | 222.40  | 180.02     | 116.81 |
| 20% fraktil         |              |         |           |        |         |            |        |
| Kandevõime [kN]     |              |         |           |        |         |            |        |
|                     | ILMA KATTETA | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15  | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20  |
| Tagamata            | 3.13         | 11.62   | 116.81    | 116.81 | 222.40  | 222.40     | 116.81 |
| Tagatud             | 27.50        | 44.91   | 116.81    | 116.81 | 222.40  | 222.40     | 116.81 |
| 50% fraktil         |              |         |           |        |         |            |        |
| Kandevõime [kN]     |              |         |           |        |         |            |        |
|                     | ILMA KATTETA | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15  | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20  |
| Tagamata            | 3.13         | 16.72   | 116.81    | 116.81 | 222.40  | 222.40     | 116.81 |
| Tagatud             | 27.50        | 54.47   | 116.81    | 116.81 | 222.40  | 222.40     | 116.81 |
| 5% fraktil          |              |         |           |        |         |            |        |
| Kandevõime [kN]     |              |         |           |        |         |            |        |
|                     | ILMA KATTETA | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15  | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20  |
| Tagamata            | 0.00         | 0.00    | 3.13      | 2.95   | 116.81  | 19.82      | 34.54  |
| Tagatud             | 3.13         | 3.13    | 18.87     | 15.77  | 116.81  | 60.34      | 69.64  |
| 20% fraktil         |              |         |           |        |         |            |        |
| Kandevõime [kN]     |              |         |           |        |         |            |        |
|                     | ILMA KATTETA | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15  | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20  |
| Tagamata            | 0.00         | 0.00    | 3.13      | 3.13   | 116.81  | 36.91      | 86.74  |
| Tagatud             | 3.13         | 3.13    | 20.49     | 18.63  | 116.81  | 70.76      | 95.42  |
| 50% fraktil         |              |         |           |        |         |            |        |
| Kandevõime [kN]     |              |         |           |        |         |            |        |
|                     | ILMA KATTETA | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15  | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20  |
| Tagamata            | 0.00         | 0.00    | 3.13      | 10.35  | 116.81  | 97.39      | 116.81 |
| Tagatud             | 3.13         | 3.13    | 27.14     | 42.56  | 116.81  | 100.78     | 116.81 |
| 5% fraktil          |              |         |           |        |         |            |        |
| Kandevõime [kN]     |              |         |           |        |         |            |        |
|                     | ILMA KATTETA | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15  | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20  |
| Tagamata            | 0.00         | 0.00    | 0.00      | 0.00   | 10.47   | 0.01       | 0.08   |
| Tagatud             | 0.04         | 0.08    | 3.13      | 2.75   | 42.77   | 3.13       | 3.13   |
| 20% fraktil         |              |         |           |        |         |            |        |
| Kandevõime [kN]     |              |         |           |        |         |            |        |
|                     | ILMA KATTETA | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15  | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20  |
| Tagamata            | 0.00         | 0.00    | 0.00      | 0.00   | 26.28   | 0.09       | 1.45   |
| Tagatud             | 0.04         | 0.18    | 3.13      | 3.13   | 65.81   | 3.13       | 12.76  |
| 50% fraktil         |              |         |           |        |         |            |        |
| Kandevõime [kN]     |              |         |           |        |         |            |        |
|                     | ILMA KATTETA | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15  | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20  |
| Tagamata            | 0.00         | 0.00    | 0.00      | 0.00   | 85.94   | 2.08       | 3.13   |
| Tagatud             | 0.04         | 0.33    | 3.13      | 3.13   | 95.02   | 14.21      | 21.21  |

R  
6  
0

R  
9  
0

R  
1  
2  
0

## Lisa 9 Arvutustulemused - sein 40-20-40-20-40

| Sein 40-20-40-20-40 |              |         |           |        |         |            |        |
|---------------------|--------------|---------|-----------|--------|---------|------------|--------|
| 5% fraktil          |              |         |           |        |         |            |        |
| Kandevõime [kN]     |              |         |           |        |         |            |        |
|                     | ILMA KATTETA | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15  | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20  |
| Tagamata            | 567.83       | 567.83  | 567.83    | 567.83 | 1148.52 | 1080.85    | 924.11 |
| Tagatud             | 567.83       | 567.83  | 567.83    | 567.83 | 1148.52 | 1080.85    | 924.11 |
| 20% fraktil         |              |         |           |        |         |            |        |
| Kandevõime [kN]     |              |         |           |        |         |            |        |
|                     | ILMA KATTETA | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15  | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20  |
| Tagamata            | 567.83       | 567.83  | 567.83    | 567.83 | 1148.52 | 1148.52    | 924.11 |
| Tagatud             | 567.83       | 567.83  | 567.83    | 567.83 | 1148.52 | 1148.52    | 924.11 |
| 50% fraktil         |              |         |           |        |         |            |        |
| Kandevõime [kN]     |              |         |           |        |         |            |        |
|                     | ILMA KATTETA | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15  | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20  |
| Tagamata            | 567.83       | 567.83  | 701.41    | 699.52 | 1148.52 | 1148.52    | 924.11 |
| Tagatud             | 567.83       | 567.83  | 701.41    | 699.52 | 1148.52 | 1148.52    | 924.11 |
| 5% fraktil          |              |         |           |        |         |            |        |
| Kandevõime [kN]     |              |         |           |        |         |            |        |
|                     | ILMA KATTETA | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15  | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20  |
| Tagamata            | 158.33       | 175.32  | 526.00    | 451.41 | 881.15  | 567.83     | 567.83 |
| Tagatud             | 286.33       | 307.30  | 560.19    | 521.46 | 881.15  | 567.83     | 567.83 |
| 20% fraktil         |              |         |           |        |         |            |        |
| Kandevõime [kN]     |              |         |           |        |         |            |        |
|                     | ILMA KATTETA | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15  | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20  |
| Tagamata            | 158.33       | 195.96  | 566.95    | 519.98 | 881.15  | 567.83     | 567.83 |
| Tagatud             | 286.33       | 333.08  | 567.83    | 557.11 | 881.15  | 567.83     | 567.83 |
| 50% fraktil         |              |         |           |        |         |            |        |
| Kandevõime [kN]     |              |         |           |        |         |            |        |
|                     | ILMA KATTETA | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15  | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20  |
| Tagamata            | 158.33       | 217.50  | 567.83    | 567.83 | 881.15  | 567.83     | 567.83 |
| Tagatud             | 286.33       | 360.31  | 567.83    | 567.83 | 881.15  | 567.83     | 567.83 |
| 5% fraktil          |              |         |           |        |         |            |        |
| Kandevõime [kN]     |              |         |           |        |         |            |        |
|                     | ILMA KATTETA | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15  | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20  |
| Tagamata            | 34.89        | 34.89   | 122.72    | 102.62 | 567.83  | 230.97     | 252.61 |
| Tagatud             | 152.19       | 160.68  | 255.03    | 241.48 | 567.83  | 377.47     | 405.31 |
| 20% fraktil         |              |         |           |        |         |            |        |
| Kandevõime [kN]     |              |         |           |        |         |            |        |
|                     | ILMA KATTETA | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15  | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20  |
| Tagamata            | 34.89        | 34.89   | 136.67    | 120.63 | 567.83  | 255.24     | 383.98 |
| Tagatud             | 152.19       | 170.97  | 262.20    | 253.96 | 567.83  | 408.72     | 485.58 |
| 50% fraktil         |              |         |           |        |         |            |        |
| Kandevõime [kN]     |              |         |           |        |         |            |        |
|                     | ILMA KATTETA | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15  | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20  |
| Tagamata            | 34.89        | 34.89   | 157.55    | 190.76 | 567.83  | 415.91     | 567.83 |
| Tagatud             | 152.19       | 181.67  | 285.38    | 326.56 | 567.83  | 502.67     | 567.83 |

R  
6  
0

R  
9  
0

R  
1  
2  
0

## Lisa 10 Arvutustulemused - sein 40-40-40

| Sein 40-40-40   |              |         |           |        |         |            |        |
|-----------------|--------------|---------|-----------|--------|---------|------------|--------|
| 5% fraktil      |              |         |           |        |         |            |        |
| Kandevõime [kN] |              |         |           |        |         |            |        |
|                 | ILMA KATTETA | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15  | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20  |
| Tagamata        | 34.89        | 34.89   | 34.89     | 34.89  | 446.13  | 397.53     | 282.08 |
| Tagatud         | 34.89        | 34.89   | 34.89     | 34.89  | 446.13  | 397.53     | 282.08 |
| 20% fraktil     |              |         |           |        |         |            |        |
| Kandevõime [kN] |              |         |           |        |         |            |        |
|                 | ILMA KATTETA | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15  | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20  |
| Tagamata        | 34.89        | 34.89   | 34.89     | 34.89  | 446.13  | 446.13     | 282.08 |
| Tagatud         | 34.89        | 34.89   | 34.89     | 34.89  | 446.13  | 446.13     | 282.08 |
| 50% fraktil     |              |         |           |        |         |            |        |
| Kandevõime [kN] |              |         |           |        |         |            |        |
|                 | ILMA KATTETA | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15  | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20  |
| Tagamata        | 34.89        | 34.89   | 104.16    | 102.55 | 446.13  | 446.13     | 282.08 |
| Tagatud         | 34.89        | 34.89   | 104.16    | 102.55 | 446.13  | 446.13     | 282.08 |
| 5% fraktil      |              |         |           |        |         |            |        |
| Kandevõime [kN] |              |         |           |        |         |            |        |
|                 | ILMA KATTETA | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15  | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20  |
| Tagamata        | 10.54        | 11.37   | 35.73     | 30.37  | 249.37  | 34.89      | 34.89  |
| Tagatud         | 19.68        | 20.93   | 38.28     | 35.40  | 249.37  | 34.89      | 34.89  |
| 20% fraktil     |              |         |           |        |         |            |        |
| Kandevõime [kN] |              |         |           |        |         |            |        |
|                 | ILMA KATTETA | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15  | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20  |
| Tagamata        | 10.54        | 12.43   | 38.79     | 35.29  | 249.37  | 34.89      | 34.89  |
| Tagatud         | 19.68        | 22.51   | 39.86     | 38.05  | 249.37  | 34.89      | 34.89  |
| 50% fraktil     |              |         |           |        |         |            |        |
| Kandevõime [kN] |              |         |           |        |         |            |        |
|                 | ILMA KATTETA | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15  | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20  |
| Tagamata        | 10.54        | 13.61   | 34.89     | 34.89  | 249.37  | 34.89      | 34.89  |
| Tagatud         | 19.68        | 24.24   | 34.89     | 34.89  | 249.37  | 34.89      | 34.89  |
| 5% fraktil      |              |         |           |        |         |            |        |
| Kandevõime [kN] |              |         |           |        |         |            |        |
|                 | ILMA KATTETA | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15  | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20  |
| Tagamata        | 0.46         | 0.76    | 8.93      | 7.84   | 34.89   | 14.37      | 16.91  |
| Tagatud         | 6.94         | 7.57    | 17.22     | 15.53  | 34.89   | 25.35      | 27.20  |
| 20% fraktil     |              |         |           |        |         |            |        |
| Kandevõime [kN] |              |         |           |        |         |            |        |
|                 | ILMA KATTETA | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15  | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20  |
| Tagamata        | 0.46         | 1.27    | 9.54      | 8.84   | 34.89   | 17.24      | 25.78  |
| Tagatud         | 6.94         | 8.39    | 18.15     | 17.08  | 34.89   | 27.43      | 32.79  |
| 50% fraktil     |              |         |           |        |         |            |        |
| Kandevõime [kN] |              |         |           |        |         |            |        |
|                 | ILMA KATTETA | GtA12,5 | 2xGtA12,5 | GtF15  | 2xGtF15 | GtF15+WB18 | GtF20  |
| Tagamata        | 0.46         | 1.98    | 10.50     | 12.16  | 34.89   | 27.92      | 40.22  |
| Tagatud         | 6.94         | 9.30    | 19.62     | 22.11  | 34.89   | 34.02      | 40.58  |

R  
6  
0

R  
9  
0

R  
1  
2  
0