



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

**UUE PÕLVKONNA EUROKOODEKS 5-1-2 JAOKS
ESITATUD ISOLATSIOONIGA PUITKARKASS-
SEINTE JA -VAHELAGEDE
TULEPÜSIVUSE ARVUTUSMEETODITE
TUNDLIKKUSE ANALÜÜS**

**SENSITIVITY ANALYSIS OF THE DESIGN METHODS OF
TIMBER FRAME ASSEMBLIES PROPOSED FOR NEW
GENERATION OF EUROCODE 5-1-2**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Kadri Eskla

Üliõpilaskood: 153967EAEI

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.

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

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

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

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Kadri Eskla (sünnikuupäev: 30.12.1995)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Uue põlvkonna Eurokoodeks 5-1-2 jaoks esitatud isolatsiooniga puitkarkass-seinte ja -vahelagede 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.

¹*Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil.*

_____ (allkiri)

_____ (kuupäev)

TTÜ Ehituse ja arhitektuuri instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Kadri Eskla, 153967EAEI
Õppekava, peeriala: EAEI02/15 - Ehitiste projekteerimine ja ehitusjuhtimine
Juhendaja(d): Professor Alar Just

Lõputöö teema:

Uue põlvkonna Eurokoodeks 5-1-2 jaoks esitatud isolatsiooniga puitkarkass-seinte ja -vahelagede tulepüsivuse arvutusmeetodite tundlikkuse analüüs.

Sensitivity analysis of the design methods of timber frame assemblies 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, tõrketekkeage, söestumise tegurid, nulltugevusega kiht);
3. Arvutustulemuste võrdlus katsetulemustega;
4. 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	7.12.20
2.	Puitkarkass-seinte ja vahelagede arvutused uute arvutusmeetodite järgi erinevate valitud parameetritega	1.03.21
3.	Tulemuste võrdlus katseandmetega	1.04.21
4.	Analüüs ja järeldused	28.04.21
5.	Töö vormistamine	15.05.21

Töö keel: eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: 24. mai 2021. a

Üliõpilane: Kadri Eskla

..... ".....".....2021. a
/allkiri/

Juhendaja: Alar Just

..... ".....".....2021. a
/allkiri/

SISUKORD

EESSÕNA.....	8
Lühendite ja tähiste loetelu	9
SISSEJUHATUS	12
1 ARVUTUSTE LÄHTEANDMED.....	14
2 ARVUTUSED VASTAVALT STANDARDILE EN 1995-1-2:2020.....	17
2.1 Puidu arvutustugevus tulekahju olukorras.....	18
2.2 Puidu söestusmissügavus.....	18
2.2.1 Söestusmissügavus ja söestumäär.....	18
2.2.2 Söestumisfaasid.....	19
2.2.3 Modifikatsioonitegurid	22
2.2.4 Tõrketekkeage.....	24
2.2.5 Söestumise algusaeg.....	25
2.3 Efektiivristlõikemeetod	28
3 KONSTRUKTSIOONIDE KANDEVÕIME ARVUTUSED	32
3.1 Arvutuslikud koormused.....	32
3.2 Vahelaetala kandevõime	32
3.3 Seinaposti kandevõime.....	33
3.4 Posti stabiilsus.....	33
3.5 Seinaposti kandevõime arvestades stabiilsust.....	36
4 TÕRKETEKKEAJA MÕJU ARVUTUSLIKULE TULEPÜSIVUSELE	38
4.1 Puikarkass-seinad katteplaadiga GtA 12,5	38
4.2 Puikarkass-vahelaed katteplaadiga GtA 12,5	40
4.3 Puikarkass-seinad kahekordse kipsplaadiga GtA 12,5.....	41
4.4 Puikarkass-vahelaed kahekordse kipsplaadiga GtA 12,5.....	43
4.5 Puikarkass-seinad katteplaadiga GtF 15.....	44
4.6 Puikarkass-vahelaed katteplaadiga GtF 15.....	46
4.7 Puikarkass-seinad kahekordse kipsplaadiga GtF 15	47
4.8 Puikarkass-vahelaed kahekordse kipsplaadiga GtF 15	49
4.9 Puikarkass-seinad katteplaatidega GtF 15 ja WB 18.....	50

4.10	Puikarkass-vahelaed katteplaatidega GtF 15 ja WB 18	52
4.11	Puikarkass-seinad katteplaadiga GtF 20	53
4.12	Puikarkass-vahelaed katteplaadiga GtF 20	55
5	NULL-TUGEVUSEGA KIHII MÕJU ARVUTUSLIKULE TULEPÜSIVUSELE ...	57
5.1	Puikarkass-seinad katteplaadiga GtA 12,5	57
5.2	Puikarkass-vahelaed katteplaadiga GtA 12,5	58
5.3	Puikarkass-seinad kahekordse kipsplaadiga GtA 12,5	58
5.4	Puikarkass-vahelaed kahekordse kipsplaadiga GtA 12,5	59
5.5	Puikarkass-seinad katteplaadiga GtF 15	60
5.6	Puikarkass-vahelaed katteplaadiga GtF 15	61
5.7	Puikarkass-seinad kahekordse kipsplaadiga GtF 15	62
5.8	Puikarkass-vahelaed kahekordse kipsplaadiga GtF 15	63
5.9	Puikarkass-seinad katteplaadiga GtF 15 ja WB 18	64
5.10	Puikarkass-vahelaed katteplaadiga GtF 15 ja WB 18	65
5.11	Puikarkass-seinad katteplaadiga GtF 20	66
5.12	Puikarkass-vahelaed katteplaadiga GtF 20	67
6	ISOLATSIOONI MÕJU ARVUTUSLIKULE TULEPÜSIVUSELE	69
6.1	Isolatsiooni mõju puikarkass-seinte arvutuslikule tulepüsivusele	69
6.2	Isolatsiooni mõju puikarkass-vahelagede arvutuslikule	
	tulepüsivusele	70
7	ARVUTUSLIKU TULEPÜSIVUSE KONTROLLIMINE TULEKATSETEGA	73
7.1	Puikarkass-vahelagede katsetel põhinevad tulepüsivusarvutused	73
7.2	Puikarkass-seinte katsetel põhinevad tulepüsivusarvutused	76
8	JÄRELDUSED	80
9	UUE STANDARDI KASUTAJAKOGEMUS	81
9.1	Standardi EN 1995-1-2:2020 positiivsed uuendused	81
9.2	Standardi EN 1995-1-2:2020 puudujäägid	82
	KOKKUVÕTE	83
	SUMMARY	85
	KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	87

LISAD.....	88
Lisa 1 Tulepüsivusaja leidmine vahelaekonstrukstioonile: GtF15 2x + 45x145 mm C24 + kivivill EN 1995-1-2:2020 (E) alusel	89
Lisa 2 Tulepüsivusaja leidmine vahelaekonstrukstioonile: GtF15 + WB18 + 45x295 mm C24 + kivivill EN 1995-1-2:2020 (E) alusel	91
Lisa 3 Tulepüsivusaja leidmine vahelaekonstrukstioonile: GtF15 + 140x240 mm C24 + klaasvill EN 1995-1-2:2020 (E) alusel	94
Lisa 4 Tulepüsivusaja leidmine seinakonstrukstioonile: GtF15 2x + 45x145 mm C24 + kivivill EN 1995-1-2:2020 (E) alusel	97
Lisa 5 Tulepüsivusaja leidmine seinakonstrukstioonile: GtF15 +WB18 + 160x180 mm GL24c + klaasvill EN 1995-1-2:2020 (E) alusel.....	101
Lisa 6 Isolatsiooni mõju puikarkass-seinte arvutuslikule tulepüsivusele	105
Lisa 7 Isolatsiooni mõju puikarkass-vahelagede arvutuslikule tulepüsivusele	108

EESSÕNA

Avaldan tänu kõigile, kes on toetanud viiel aastal minu õpinguid TalTechis ja tänu kellele valmis käesolev lõputöö. Eriti tahan tänada oma juhendajat, professorit Alar Justi, kes pakkus välja huvitava lõputöö teema ja aitas igakülgselt kaasa selle valmimisele. Jäin juhendaja valikuga igati rahule – probleemide ja küsimuste korral sain temalt alati kiirelt vastused ning tagasiside.

Lisaks avaldan tänu oma perekonnale ja sõpradele, kelle toetus läbi ülikooli aastate on mind väga palju edasi aidanud.

Magistritöös arutati isolatsiooniga puitkarkass-seinte ja -vahelagede tulepüsivusaeg vastavalt standardi EN 1995-1-2:2020 3. mustandile, mis anti välja 31. oktoobril aastal 2020. Töö põhiliseks eesmärgiks oli võrrelda erinevate tõrketekkeageade $t_{f,pr}$ ja nulltugevusega kihi d_0 väärtuste ning isolatsiooni mõju puitkarkass-konstruktsiooni tulepüsivusele. Lisaks arutati varasemalt tehtud katsete andmete põhjal vastavate konstruktsioonide maksimaalsed tulepüsivusajad ja võrreldi saadud tulemusi katsetulemustega ning analüüsiti erinevate tõrketekkeageade mõju tulepüsivusele. Viimaseks hinnati uue Eurokoodeksi 5-1-2 kasutajakogemust.

Võtmesõnad: tulepüsivus, tõrketekkeagea, null-tugevusega kiht, Eurokoodeks 5, magistritöö

Lühendite ja tähiste loetelu

Ladina suurtähed

A_{ef} – efektiivristlõike pindala, mm^2

$E_{0,05}$ – elastsusmooduli 5-protsentiili väärtus, N/mm^2

H – seina kõrgus, m

I_z – inertsimoment z-telje suhtes, mm^4

I_y – inertsimoment y-telje suhtes, mm^4

$M_{max,fi}$ – maksimaalne paindemoment tulekahjuolukorras, kNm

$N_{max,fi}$ – maksimaalne seinaposti survekandevõime, kN

$R_{d,t,fi}$ – konstruktsiooni vastupidavus tuleolukorras, min

W_{ef} – efektiivristlõike vastupanumoment

$X_{c,0,g,k}$ – puidu normatiivne survetugevus tavatemperatuuril, N/mm^2

$X_{d,fi}$ – puidu arvutuslik tugevus tulekahjuolukorras, N/mm^2

$X_{m,g,k}$ – puidu normatiivne paindetugevus tavatemperatuuril, N/mm^2

Ladina väiketähed

b – ristlõike laius, mm

b_{ef} – efektiivristlõike laius, mm

d_0 – tegelik null-tugevusega kiht, mm

$d_{0,max}$ – maksimaalne null-tugevusega kiht, mm

$d_{char,n,t}$ – tinglik söestumissügavus, mm

$d_{ef,b}$ – tegelik söestumissügavus isolatsioonipoolsel küljel, mm

$d_{ef,h}$ – tegelik söestumissügavus tulele avatud küljel, mm

g_k – konstruktsiooni omakaal, kN/m^2

h – ristlõike kõrgus, mm

h_{ef} – efektiivristlõike kõrgus, mm

h_p – kattematerjali paksus, mm

i_z – inertsiraadius z-telje suhtes, mm

i_y – inertsiraadius y-telje suhtes, mm

k_2 – kaitsetegur (faas 2)

$k_{3,1}$ – järelkaitsetegur tulepoolsele küljele (faas 3)

$k_{3,2}$ – järelkaitsetegur isolatsioonipoolsel küljele (faas 3)

$k_{c,y}$; $k_{c,z}$ – ebastabiilsust arvestav tegur

k_{fi} – modifikatsioonitegur tulepüsivusarvutusel

k_h – paksustegur

$k_{j,i}$ – liitetegur

$k_{pos,exp,i}$ – vaadeldavale kihile eelneva kihi mõju arvestav positisoonikoefitsient

$k_{pos,unexp,i}$ – vaadeldavale kihile järgneva kihi mõju arvestav positisoonikoefitsient

k_{side} – tulele avatud vastaskülgede arv

$k_{s,n,1}$ – ristlõiketegur tulepoolsele küljele

$k_{s,n,2}$ – ristlõiketegur isolatsioonipoolsele küljele

$k_y; k_z$ – nõtketegur

k_θ – temperatuurist sõltuv vähendustegur

k_p – tihedustegur

l – vahelaetalade sildeava, m

l_{ef} – posti efektiivne pikkus, mm

$q_{d,fi}$ – arvutuslik koormus tulekahjuolukorras, kN/m^2

q_k – normatiivne koormus, kN/m^2

s – talade/postide samm, mm

t_{ch} – söestumise algusaeg, min

$t_{ch,2}$ – söestumise algusaeg isolatsioonipoolsetel külgedel, min

$t_{f,gypsum}$ – kipsplaadi tõrketekkeage, min

$t_{f,pr}$ – tõrketekkeage, min

t_{peak} – maksimaalne aeg, mis vastab d_0 -le, min

t_{prot} – kaitseaeg kokku, min

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

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

Kreeka väiketähed

β_0 – algsöestumismäär

β_n – tinglik söestumismäär riskülikulise ristlõike jaoks

β_c – sirgsustegur

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

Δt_i – täiendav kaitseaeg, mis rakendatakse tulekindlate plaatide puhul (nt. GtF), min

$\Delta t_{max,i}$ – täiendav maksimaalne kaitseaeg, mis rakendatakse tulekindlate plaatide puhul (nt. GtF), min

λ_z – saledus, mis vastab paindele z-telje suhtes

λ_y – saledus, mis vastab paindele y-telje suhtes

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

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

μ – varda pikkuse taandamistegur

$\rho_{max,fi}$ – maksimaalne lauskoormus seinale, kN/m

$\sigma_{c,0,d}$ – arvutussurvepinge pikikiudu, N/mm²

v_{rec} – klaasvilla taandumiskiirus, mm/min

SISSEJUHATUS

Puit on läbi aegade olnud üks hinnatuim materjal oma kerge kasutusviisi, kaalu ning kättesaadavuse tõttu. Puidu kasutusvaldkonnad on laialdased – seda kasutatakse nii mööbli tootmiseks kui ka ehitustegevuseks. See on jätkusuutlik, keskkonnasõbralik ning üsna soodne materjal. Seega sellest tuleneb ka puidu üha laialdasem populaarsus tänapäevasel ehitusmaastikul. [1]

Puit on kergesti süttiv ehitusmaterjal, seega mõningad riigid on sätestanud piirangud puidu kasutamisele ehituses. Tuleohutuse ning turvalisuse tagamiseks on kehtestatud riiklikud tuleohutusnormid. Samuti on Euroopas välja antud tuleohutuse käsiraamat, mis aitab minimaliseerida tulekahju tekke võimalusi ning tule tagajärgedega lihtsamini toime tulla. [1]

Eurokoodeksiteks nimetatakse Euroopa ehituskonstruksioonide projekteerimisreeglite kogumikke. Eurokoodeksid koosnevad kümnest osast ning viies neist keskendub puitkonstruktsioonide projekteerimisele – EN 1995. Kõik eurokoodeksid jagunevad omakorda mitmeks osaks. Eurokoodeks 5 osadest käsitleb EN 1995-1-1 puitkonstruktsioonide üldreegleid ja reegleid hoonete projekteerimiseks. EN 1995-1-2 keskendub puidu tulepüsivusarvutustele. [1]

Eurokoodeks 5-1-2 töörühm (CEN TC250 SC5 WG4) loob uue põlvkonna puidu tulepüsivusarvutuste standardit EN 1995-1-2. Selle kallal alustati tööd juba aastal 2015 ning uue versiooni valmimist on oodata aastaks 2023. Uue standardi eesmärkideks on parandada standardi kasutusmugavust tavakasutaja jaoks, vähendada arvutusparameetreid ning ühtlustada ja täiustada hetkel kehtivat standardit. Hetkel on eurokoodeksi töörühmale ülevaatamiseks esitatud 4 uue standardi mustandit. Lõplik kavand esitati 3. mail 2021. Uue standardi põhieesmärgiks on luua tulepüsivusarvutuste alused, mis aitavad projekteerida võimalikult turvaliselt ja säästlikult puitkonstruktsioone vastupidavaks ka tulekahju korral. Uues standardi versioonis sisaldub palju uut infot ja mitmeid uusi arvutusmeetodeid ning -parameetreid võrreldes praegu kehtiva standardiga. [2]

Magistritöös on isolatsiooniga puitkarkass-seinte ja vahelagede tulepüsivusaeg arvutatud vastavalt standardi EN 1995-1-2:2020 3. mustandile, mis anti välja 31. oktoobril aastal 2020. Töös võrreldi erinevate tõrketekkeageade $t_{f,pr}$ ja null-tugevusega kihi d_0 väärtuste ning isolatsiooni mõju konstruktsiooni tulepüsivusele. Lisaks tehti arvutused varasemalt tehtud katsete andmetele põhinedes ja võrreldi saadud tulemusi

katsetulemustega ning erinevate tõrketekkeageade mõju tulepüsivusele. Viimaseks hinnati uue Eurokoodeksi 5-1-2 kasutajakogemust.

Magistritöö teema pakkus välja professor Alar Just. Teema valik tulenes selle praktilisest väärtusest Eurokoodeksi 5-1-2 töörühmale, aidates arvutustes kasutatavate parameetrite osas lõplikke otsuseid vastu võtta.

Töö annab ülevaate, kuidas kavandatud muudatused Eurokoodeksi 5 osas 1-2 mõjutavad isolatsiooniga puitkarkass-seinte ja -vahelagede tulepüsivuse arvutusi. Arvutustulemuste võrdlus katsetulemustega hindab uue Eurokoodeksi 5-1-2 realistlikkust ja vastavust tegelikele olukordadele. Kasutajakogemuse hindamine ja ettepanekud annavad kasulikku tagasisidet edaspidiseks tööks Eurokoodeksi 5-1-2 töörühmale (CEN TC250 SC5 WG4).

Käesolevas magistritöös kasutati tulepüsivusaja leidmiseks efektiivristlõikemeetodit. Niisuguse arvutuse puhul vähendatakse algse posti või tala ristlõike mõõtmeid vastavate nulltugevusega kihi d_0 ja söestunud kihi $d_{char,n}$ paksuste võrra. Arvutuste tarbeks koostati Excelisse arvutustabelid.

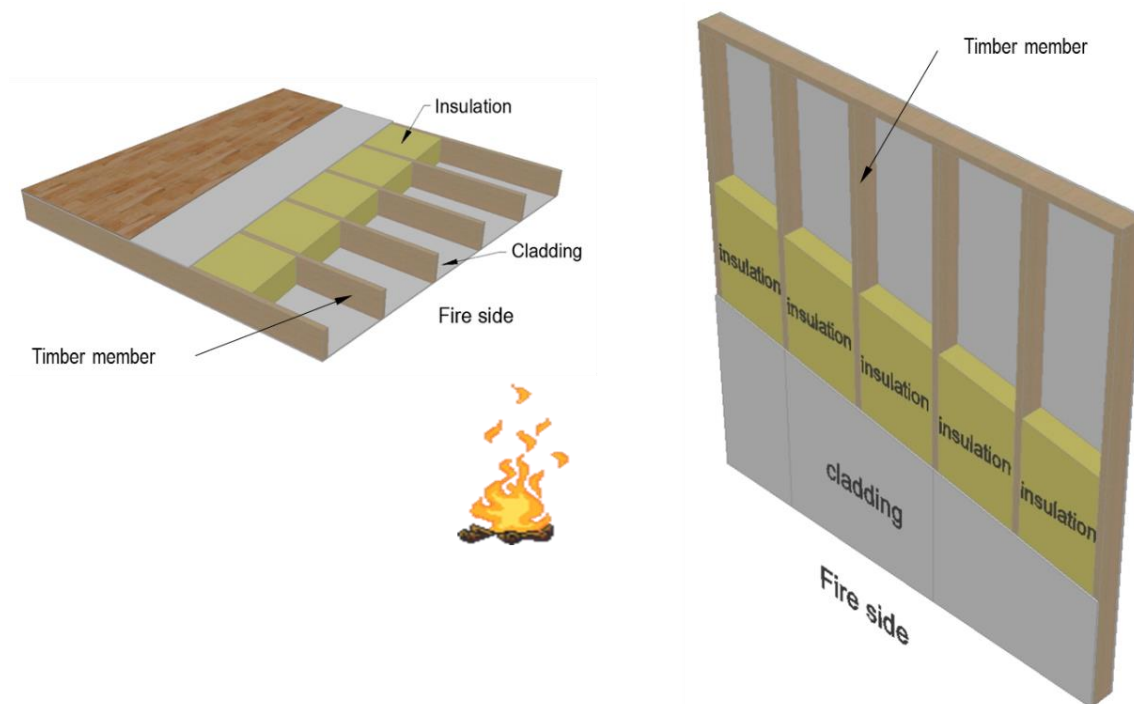
Töö on ülesehitatud kahele põhiosale – ülevaade arvutusmeetoditest ning saadud tulemuste analüüs.

Esimeses peatükis on välja toodud arvutustes kasutatud lähteandmed. Teine peatükk annab ülevaate uue Eurokoodeksi EN 1995-1-2:2020 põhistest arvutuskäikudest. Kuna uus standard põhineb puidu tulepüsivusarvutustel, siis konstruktsioonide ülejäänud kandevõime arvutusskeemid on esitatud peatükis 3. Peatükkides 4, 5 ja 6 on analüüsitud vastavalt tõrketekkeaja, null-tugevusega kihi ning isolatsiooni mõju konstruktsiooni arvutuslikule tulepüsivusele. Peatükis 7 kontrolliti arvutuslikku tulepüsivust varasemalt tehtud tulekatsetega. Peatükis 8 on välja toodud järeldused tehtud tööst ja pakutud välja sobivaimad parameetrid uue standardi arvutustesse. Põhiosa viimases peatükis hinnatakse uue põlvkonna standardi EN 1995-1-2:2020 kasutajakogemust.

Käesolev lõputöö sisaldab 7 lisa. Lisades 1-3 on esitatud arvutused vahelaekonstruktsioonide arvutusliku tulepüsivuse leidmisest EN 1995-1-2:2020 alusel. Lisades 4-5 on välja toodud näited seinakonstruktsioonide tulepüsivusarvutustest. Lisades 6 ja 7 on esitatud graafikud, mis kirjeldavad isolatsiooni mõju puitkarkass-seinte ja -vahelagede arvutuslikule tulepüsivusele.

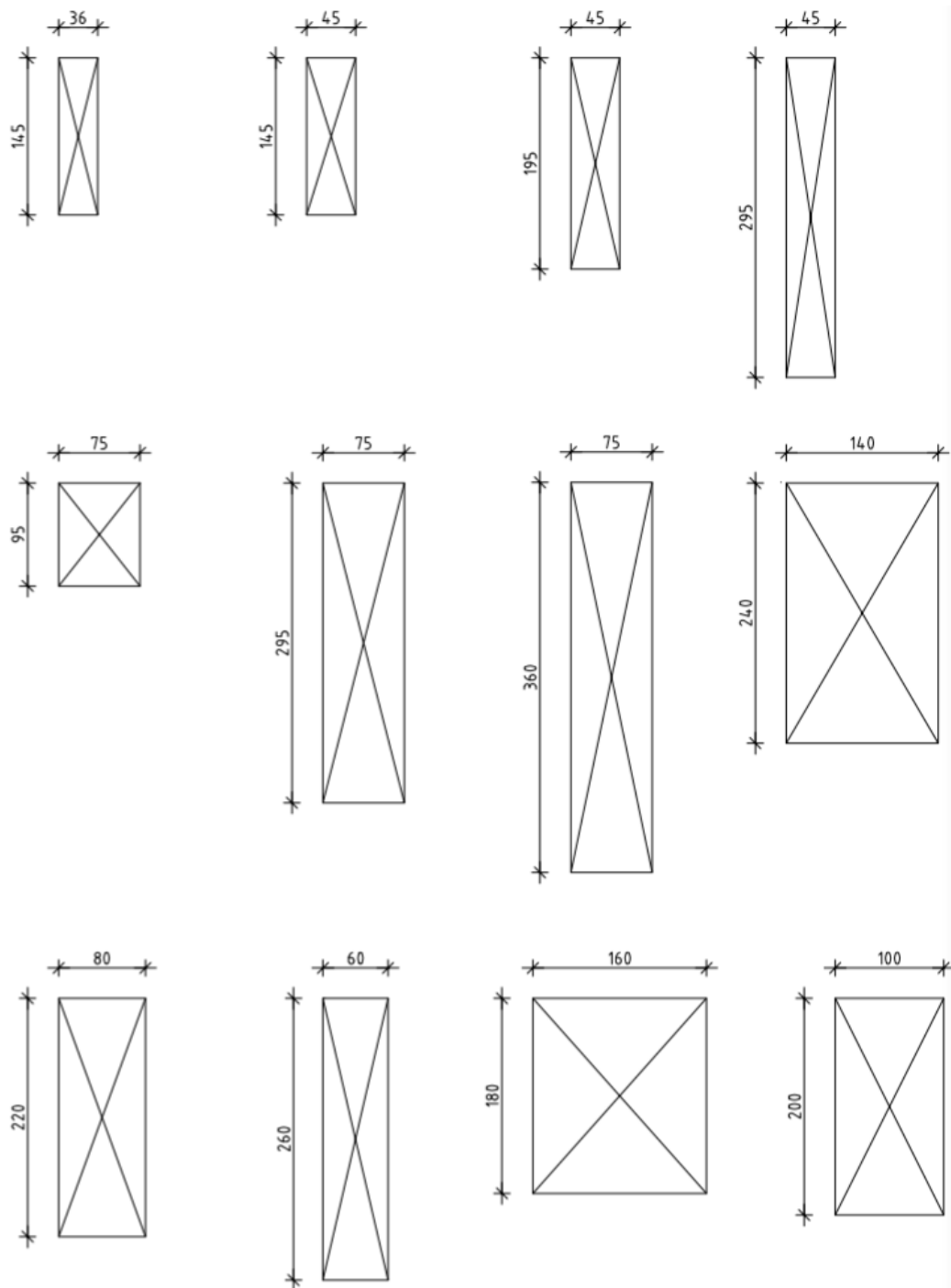
1 ARVUTUSTE LÄHTEANDMED

Käesolevas töös uuriti puitkarkass-vahelagede ja -seinte tulepüsivust. Joonisel 1.1 on kujutatud vaadeldavate konstruktsioonide ülesehitus.



Joonis 0.1 Puitkarkass-vahelagi ja -sein

Analüüsis kasutatud postide ja talade ristlõiked on välja toodud joonisel 1.1. Nii postide kui talade puhul valiti arvutusteks 12 ristlõiget, mida kasutatakse laialdaselt Põhjamaades ja Kesk-Euroopas.



Joonis 0.2 Arvutustes kasutatud postide ja talade ristlõiked

Kattematerjalidena kasutati Põhjamaades levinud A-tüüpi kipsplaate paksusega 12,5 mm (tähis GtA 12,5), F-tüüpi kipsplaate paksusega 15 mm (tähis GtF 15), puitlaastplaati paksusega 18 mm (tähis WB 18) ja Kesk-Euroopas levinud F-tüüpi kipsplaati paksusega 20 mm (tähis GtF 20). Kipsplaatide tüübid on määratletud standardis EN 520 + A1: 2010 [3]. Konstruktsioonide isolatsioonimaterjalideks valiti kivivill ja klaasvill. Arvutuste lähteandmed on esitatud tabelites 1.1 ja 1.2.

Ristlõige b x h [mm]	36 x 145	45 x 145	45 x 195	45 x 295	75 x 95	75 x 295	75 x 360	140x 240	80 x 220	60 x 260	160x 180	100x 200
Mõjuv koormus [kN/m]	20	20	50	50	20	100	100	100	50	50	50	50
Seina kõrgus [m]	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Postide samm [mm]	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600

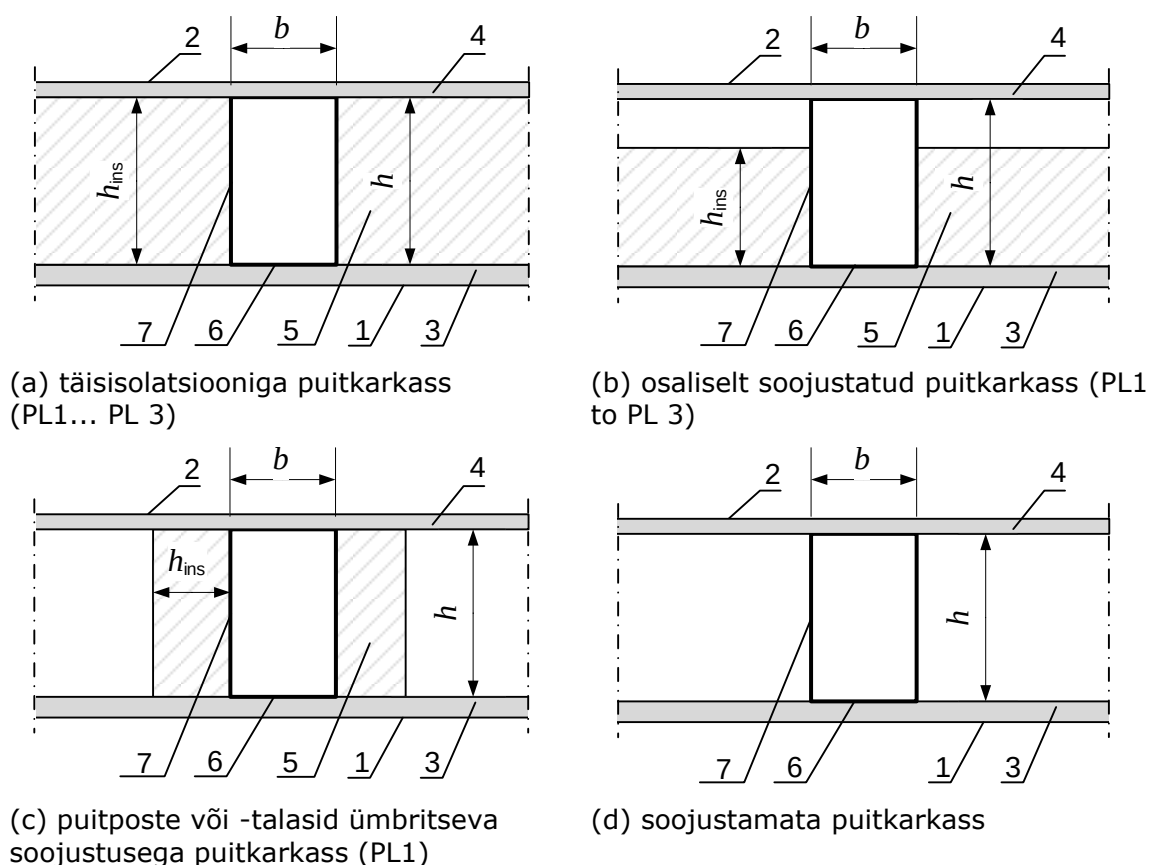
Tabel 1.1 Puitkarkass-seinte lähteandmed

Ristlõige b x h [mm]	36 x 145	45 x 145	45 x 195	45 x 295	75 x 95	75 x 295	75 x 360	140x 240	80 x 220	60 x 260	160x 180	100x 200
Alaline- koormus [kN/m ²]	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Kasus- koormus [kN/m ²]	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Sildeva [m]	3	3	3	5	3	5	5	5	5	5	5	5
Talade samm [mm]	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600

Tabel 1.1 Puitkarkass-vahelagede lähteandmed

2 ARVUTUSED VASTAVALT STANDARDILE EN 1995-1-2:2020

Käesolev magistritöö keskendub isolatsiooniga puitkarkass-seinte ja -vahelagede tulepüsivusele. Eurokoodeksis EN 1995-1-2:2020 on väljatoodud neli erinevat tüüpi karkassilahendusi, mis on esitatud joonisel 2.1 [4]. Selles töös kasutatakse nendest esimest karkassilahendust, mis on kujutatud joonisel tähisega a.



Joonis 2.1. Puitkarkass-seinte ja -vahelagede võimalikke lahendusi [4]

Joonise 2.1 tähised:

- | | |
|--|--|
| 1 puitkarkass-konstruktsiooni tulepoolne külg; | 2 puitkarkass-konstruktsiooni mitte-tulepoolne külg; |
| 3 katteplaat tulepoolisel küljel; | 4 katteplaat mitte-tulepoolisel küljel; |
| 5 puitkarkass-konstruktsiooni soojustus; | 6 puidu tulepoolne külg; |
| 7 puidu isolatsioonipoolne külg; | h_{ins} puitkarkass-konstruktsiooni soojustuse paksus. |
| b puidu esialgse ristlõike laius; | h puidu esialgse ristlõike sügavus. |

Allolevas peatükis on välja toodud põhilised valemid ja parameetrid arvutamaks isolatsiooniga puitkarkass-seinte ja -vahelagede tulepüsivust vastavalt standardile EN

1995-1-2:2020. Valemid on nummerdatud vastavalt Eurokoodeksis 5: EN 1995-1-2:2020 (E) (3. mustand, välja antud 31.10.2020) esinevatele valeminumbritele.

2.1 Puidu arvutustugevus tulekahju olukorras

Antud lõputöös on arvutustega leitud maksimaalne tulepüsivusaeg etteantud koormusolukorras. Arvutustulemus peab vastama järgmisele kriteeriumile (4.2) [4].

$$E_{d,fi} \leq R_{d,fi} , \quad (4.2)$$

kus $E_{d,fi}$ – arvutuskoormus tulekahjuolukorras, N/mm²,

$R_{d,fi}$ – konstruktisooni kandevõime tulekahjuolukorras, N/mm².

Uue põlvkonna standardis EN 1995-1-2:2020 on puidu arvutustugevus tulekahju olukorras arvutatud alltoodud valemiga (4.1) [4].

$$X_{d,fi} = \frac{k_{\theta} k_{fi} X_k}{\gamma_{M,fi}} , \quad (4.1)$$

kus $X_{d,fi}$ – puidu arvutuslik tugevus tulekahjuolukorras, N/mm²;

k_{θ} – temperatuurist sõltuv vähendustegur;

k_{fi} – modifikatsioonitegur tulepüsivusarvutusel;

X_k – puidu normatiivne tugevus tavatemperatuuril, N/mm²;

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

Arvutused on tehtud kasutades efektiivristlõikemeetodit. Sellised juhul termepatuurist sõltuv vähendustegur k_{θ} on 1. Mõju arvestab null-tugevusega kiht d_0 .

Modifikatsioonitegur tulepüsivusarvutustel monoliitpuidu puhul on 1,25 ning lamelliimpuidu puhul 1,15 [4].

2.2 Puidu söestusmissügavus

2.2.1 Söestusmissügavus ja söestumäär

Puidu puhul on tulepüsivuse projekteerimisel üheks tähtsamaks omaduseks vaadeldava ristlõike söestumise ulatus. Eristatakse ühe- ja kahemõõtmelist puidu söestumist. [5] Ristkülikuliste elementide tinglik söestusmissügavus ühes faasis leitakse valemiga (5.1) [4].

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

kus $d_{char,n}$ – tinglik söestumissügavus, mm,
 β_n – tinglik söestumismäär ristkülikulise ristlõike jaoks,
 t – tulekahju kestvus, min.

Ristlõike tulepoolse külje söestumissügavus leitakse seosest 7.25 ning isolatsioonipoolse külje söestumissügavus valemiga 7.26 [4].

$$d_{char,n,1} = \beta_n t, \quad (7.25)$$

$$d_{char,n,2} = \beta_n t, \quad (7.26)$$

Tinglikud söestumismäärad arvutatakse sõltuvalt söestumisfaasist valemitega 7.27...7.30 [4].

$$(\text{tulepoolne külg}) \text{ faas } 2 \rightarrow \beta_n = k_2 * k_{s,n,1} * \beta_0 \quad (7.27)$$

$$(\text{tulepoolne külg}) \text{ faas } 3 \rightarrow \beta_n = k_{3,1} * k_{s,n,1} * \beta_0 \quad (7.28)$$

$$(\text{isolatsioonipoolne külg}) \text{ faas } 3 \rightarrow \beta_n = k_{3,2} * k_{s,n,2} * \beta_0 \quad (7.29)$$

$$(\text{isolatsioonipoolne külg}) \text{ faas } 4 \rightarrow \beta_n = k_{s,n,2} * \beta_0 \quad (7.30)$$

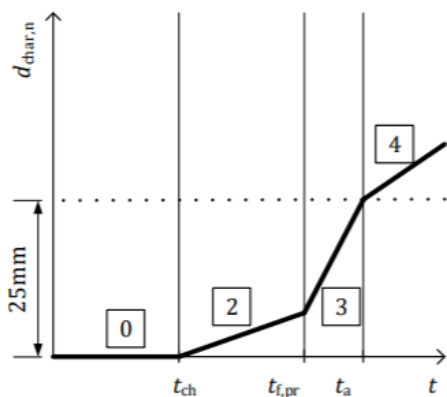
kus k_2 – kaitsetegur,
 $k_{3,1}$ – järelkaitsetegur tulepoolsele küljele,
 $k_{3,2}$ – järelkaitsetegur isolatsioonipoolsele küljele,
 β_0 – algsöestumismäär.

Algsöestumismäär β_0 okaspuust puidu puhul on 0,65 [4].

2.2.2 Söestumisfaasid

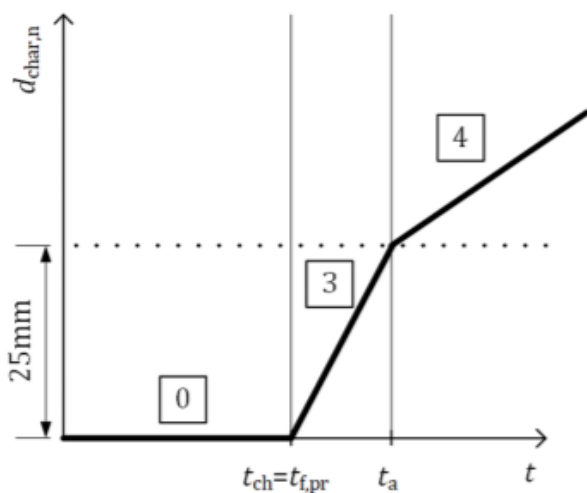
Tulepüsivuse arvutamisel eristatakse nelja söestumisfaasi. Kattematerjalidega kaitstud puidu puhul on söestumisfaasid järgmised: kapseldumisfaas (faas 0), kaitsefaas (faas 2), järelkaitsefaas (faas 3) ja konsolideeritud söestumisfaas (faas 4). Kapseldumisfaasis ei toimu puidu söestumist. Kaitsefaasis toimub aeglane söestumine katteplaadi taga. Järelkaitsefaas algab katteplaadi lagunemisest ajahetkel t_r . Selle tagajärjel hakkab

tulele avatud puit väga kiirelt söestuma. Järelkaitsefaas kestab küllaldase söekihi tekkimiseni. Kui söekihi paksus jõuab 25 millimeetrini, algab konsolideeritud söestumisfaas ning söestumine muutub taas aeglasemaks. [4]



Joonis 2.2 Puidu söestumine kui $t_{f,pr} > t_{ch}$ [4]

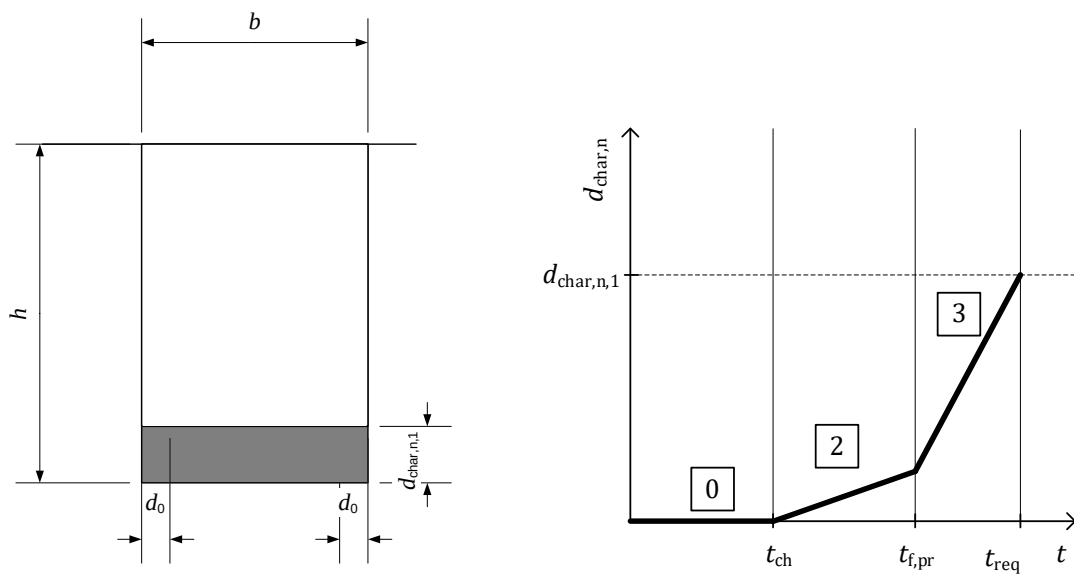
Jooniselt 2.2 on näha, et söestumise algusaeg on t_{ch} . Ajahetkel $t_{f,pr}$ katteplaat laguneb ning algab kiirem söestumine. Söestumiskihi jõudmisega 25 millimeetrini söestumine taas aeglustub.



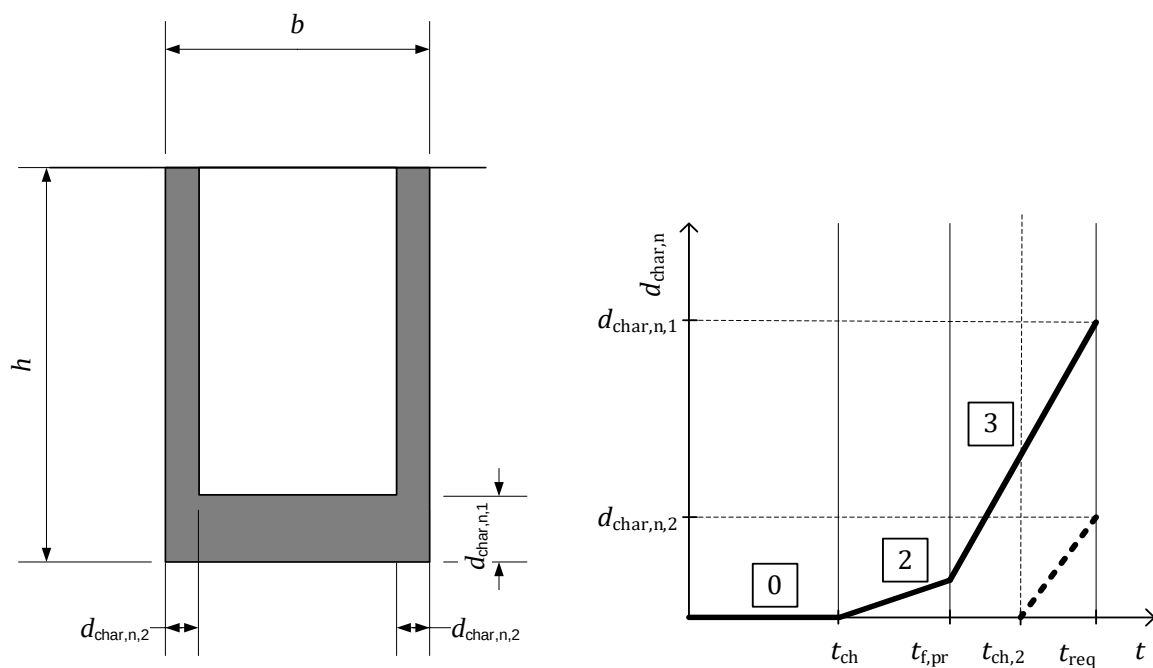
Joonis 2.3 Puidu söestumine kui $t_{ch} = t_{f,pr}$ [4]

Joonis 2.3 kirjeldab olukorda, kus söestumine algab katteplaadi lagunemisel. Sellisel juhul kaitsefaas puudub.

Käesolevas magistritöös kasutatakse isolatsioonimaterjalidena kivivilla, mis kvalifitseerub kaitsetaseme PL1 alla, ning klaasvilla, mis vastab kaitsetasemele PL2 [4].



Joonis 2.4 Puidu söestumine isolatsioonimaterjali PL1 puhul [4]



Joonis 2.5 Puidu söestumine isolatsioonimaterjali PL2 puhul [4]

Jooniste 2.4 ja 2.5 tähised:

0, 2,

söestumisfaasid;

3

— söestumine tulepoolsel küljel;

- - - söestumine külgmisel küljel;

h ristlõike esialgne sügavus;

b ristlõike esialgne laius;

d_0 null-tugevusega kiht;

$d_{char,n,1}$	tinglik sestumissugavus tulepoolsel küljel;	$d_{char,n,2}$	tinglik sestumissugavus külgmisel küljel;
t	kestvus;	t_{ch}	sestumise algusaeg;
$t_{f,pr}$	trketekkeaeg;	$t_{ch,2}$	sestumise algusaeg külgmisel küljel.

Isolatsioonimaterjali PL1 puhul sestub puit vaid tulepoolsel küljel (joonis 2.4). PL2 alla liigituv klaasvill pole aga tulekindel ning seetõttu saab puit sestuda kolmest küljest (joonis 2.5). Mõlemal juhul võib neljandat sestumisfaasi arvutustes arvesse võtta, kui tinglik sestumissugavus on 25 mm või suurem.

2.2.3 Modifikatsioonitegurid

Tingliku sestumismara arvutamiseks kasutatakse modifikatsioonitegureid.

Käesolevas magistritöös kasutatakse arvutustes katteplaadina ühe- ja kahekordsena kipsplaate GtA 12,5 ja GtF 15, kipsplaati Gt 15 koos puitlaasplaadiga WB 18 ning kipsplaati GtF 20. Kipsplaadi kaitsetegur k_2 arvestab kattematerjali mõju faasis 2 ning see arvutatakse valemiga (5.3) [4].

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

kus h_p – kipsplaadi paksus, mm.

Isolatsioonimaterjali mõju puidu sestumisele arvestavad jrelkaitsetegurid $k_{3,1}$ ja $k_{3,2}$. Isolatsioonimaterjali taseme PL1 puhul leitakse järelkaitsetegur tulepoolele küljele valemiga 7.33. Isolatsioonimaterjali taseme PL2 puhul toimub puidu sestumine kolmest küljest. Seega leitakse järelkaitsetegur nii tulepoolsele küljele (valemi 7.34) kui ka isolatsioonipoolsele küljele (valem 7.35). [4]

$$k_{3,1} = 1 + \frac{t_{f,pr}}{45}, \quad (7.33)$$

$$k_{3,1} = 1 + \frac{t_{f,pr}}{97}, \quad (7.34)$$

$$k_{3,2} = 1 \leq \frac{t_{ch,2}}{30} \leq 1,8, \quad (7.35)$$

kus $t_{f,pr}$ – trketekkeaeg, min;

$t_{ch,2}$ – sestumise algusaeg isolatsioonipoolsetel külgedel, min.

Klaasvilla puhul toimub puidu söestumine ka isolatsioonipoolsetel külgedel. Selle algusaeg arvutatakse valemiga 7.38. Niisugusel juhul sõltub söestumise algusaeg kattematerjali tõrketekkeajast, esialgse ristlõike sügavusest ning klaasvilla taandumiskiirusest. Mineraalvilla puhul on taandumiskiirus 30 mm/min. [4]

$$t_{ch,2} = t_{f,pr} + \frac{2}{3} * \frac{h}{v_{rec}}, \quad (7.33)$$

kus $t_{f,pr}$ – tõrketekkeage, min;

h – esialgse ristlõike sügavus, mm;

v_{rec} – klaasvilla taandumiskiirus, mm/min.

Puidu söestumise arvutamisel arvestavad esialgse ristlõike laiuse ja kõrguse mõju vastavalt ristlõike tegurid $k_{s,n,1}$ ja $k_{s,n,2}$. Väiksema ristlõike laiuse puhul on söestumismäär suurem kui laiematel ristlõigetel. Enamike laialtlevinud ristlõigete kõrgus on üle 90 mm. Sellisel juhul on $k_{s,n,2}$ 1,3. [4]

$$k_{s,n,1} = \begin{cases} \left(\frac{b}{65}\right)^2 - \frac{b}{23} + 3,3, & \text{kui } b \leq 90 \\ 1,3 & \text{kui } b > 90 \end{cases} \quad (7.31)$$

$$k_{s,n,2} = \begin{cases} \left(\frac{h}{65}\right)^2 - \frac{h}{23} + 3,3, & \text{kui } h \leq 90 \\ 1,3 & \text{kui } h > 90 \end{cases} \quad (7.32)$$

kus b – esialgse ristlõike laius, mm;

h – esialgse ristlõike kõrgus, mm.

Kui kattematerjaliks on puit- või puidupõhine plaat, siis tuleb leida sellele vastav paksustegur k_h valemiga 5.4.2.2 (8). See arvestab puitplaadi piiratud paksuse mõju baaskaitseaja arvutamisel. [4]

$$k_h = \begin{cases} 1 & \text{kui } h_p \geq 20 \text{ mm} \\ \sqrt{\frac{20}{h_p}} & \text{kui } h_p < 20 \text{ mm} \end{cases} \quad 5.4.2.2 (8)$$

kus h_p – katteplaadi paksus, mm.

Lisaks paksustegurile mõjutab puitplaadi baaskaitseaga tihedustegur, mis leitakse valemiga 5.4.2.2 (9) [4].

$$k_p = \sqrt{\frac{450}{\rho_k}} \quad 5.4.2.2 \text{ (9)}$$

kus ρ_k – materjali tihedus, kg/m³.

2.2.4 Tõrketekkeae

Tõrketekkeajaks loetakse hetke, mil valitud katteplaat laguneb ning puidu söestumine kiireneb. Tõrketekkeae märgib järelkaitsefaasi algushetke. See sõltub kattematerjalide tüübist ning katteplaatide arvust.

Käesoleva töö üheks põhiülesandeks oli uurida tõrketekkeaja mõju puitkarkass-konstruksiooni tulepüsivusele. Iga vaaadeldava tarindi puhul kasutati kolme tõrketekkeaja väärtust, mis on katseandmete põhinedes vastavalt 50%, 20% ja 5% fraktilid. Tõrketekkeajad on kajastatud allolevas tabelis 2.1. Töös leiti kõigi kolme tõrketekkeaja väärtusele vastav lõplik tulepüsivusaeg. [6]

Konstruksioon	Katte-materjalid	50% fraktil	20% fraktil	5% fraktil
SEINAD	GtA 1/1	$t_{f,pr} = 2,4h_p - 6,5$	$t_{f,pr} = 2,1h_p - 6,3$	$t_{f,pr} = 1,8h_p - 4,7$
	GtA 2/2 $h_p = 25$	$t_{f,pr} = 45$	$t_{f,pr} = 42$	$t_{f,pr} = 40$
	GtF 1/1	$t_{f,pr} = 4,5h_p - 12$	$t_{f,pr} = 4,6h_p - 25$	$t_{f,pr} = 3,6h_p - 14$
	GtF 2/2	$t_{f,pr} = 2,0h_p + 31$	$t_{f,pr} = 4,4h_p - 50$	$t_{f,pr} = 3,4h_p - 27$
VAHELAED	GtA 1/1 $h_p = 12,5$	$t_{f,pr} = 19$	$t_{f,pr} = 15$	$t_{f,pr} = 14$
	GtA 2/2 $h_p = 25$	$t_{f,pr} = 30$	$t_{f,pr} = 29$	$t_{f,pr} = 28$
	GtF 1/1	$t_{f,pr} = 0,2h_p + 32$	$t_{f,pr} = 1,3h_p + 8,6$	$t_{f,pr} = 1,3h_p + 7,5$
	GtF 2/2	$t_{f,pr} = 4,0h_p - 44$	$t_{f,pr} = 1,5h_p + 15$	$t_{f,pr} = 0,4h_p + 39$

Tabel 2.1 Tõrketekkeajad erinevate fraktilide puhul [6]

Kõikide olukordade jaoks pole kindlat tõrketekkeaja valemit. Sellisel juhul arvutatakse see vastavalt valemile 5.7 [4]. Käesolevas magistritöös arvutati selle järgi konstruktsioonid kattematerjalidega GtF 15+WB 18.

$$t_{f,pr} = t_{ch} = \sum t_{prot} , \quad (5.7)$$

kus $t_{f,pr}$ – tõrketekkeae, min;

$\sum t_{prot}$ – kattematerjalide erinevate kihtide kaitseaegade summa, min;

t_{ch} – söestumise algusaeg, min.

2.2.5 Söestumise algusaeg

Söestumise algusajaks loetakse hetke, mil katteplaadi taga hakkab puit aeglaselt söestuma. Sellega tähistatakse kaitsefaasi algust. Kaitsefaasis toimub puidu söestumine aeglasemalt kui tulele avatud puidu puhul. See faas kestab katteplaadi lagunemiseni. [5]

Söestumise algusaeg katteplaadi taga arvutatakse valemiga 5.6 [4].

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

kus $t_{f,pr}$ – tõrketekkeae, min;

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

Enne söestumise algusaja määramist tuleb leida iga katteplaadi materjalipõhine kaitseaeg. See arvutatakse vastavalt valemile 7.57 [4].

$$t_{prot,i} = (t_{prot,0,i} \cdot k_{pos,exp,i} \cdot k_{pos,unexp,i} + \Delta t_i) \cdot k_{j,i} , \quad (7.57)$$

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

$k_{pos,exp,i}$ – vaadeldavale kihile eelneva kihi mõju arvestav positsoonikoefitsient;

$k_{pos,unexp,i}$ – vaadeldavale kihile järgneva kihi mõju arvestav positsoonikoefitsient;

Δt_i – täiendav kaitseaeg, mis rakendatakse tulekindlate plaatide puhul (nt.

GtF), min;

$k_{j,i}$ – liitetegur.

Käesolevas töös on kaitsematerjalideks ühekordsed kipsplaadid, kahekordsed kipsplaadid ning kipsplaat koos puitlaasplaadiga.

Kui kaitseplaadiks on üks kipsplaat, siis võib positisoonikoefitsiendi $k_{pos,exp,i}$, täiendava kaitseaja Δt_i ja liiteteguri $k_{j,i}$ võtta võrdseks ühega. Katteplaadi baaskaitseaeg leitakse valemiga 7.58. Kattekihile järgneb isolatsioon, seega järgneva kihi mõju arvestav positisoonikoefitsient saadakse valemiga 7.85. Kahe kihi GtF kipsplaadi puhul võib neid käsitleda ühe kattematerjali kihina, mille paksus arvutatakse valemiga 7.67. [4]

$$t_{prot,0,i} = 30 * \left(\frac{h_i}{15}\right)^{1,2}, \quad (7.58)$$

$$h_p = h_1 + 0,8 * h_2, \quad (7.67)$$

$$k_{pos,unexp,i} = 0,5 * h_i^{0,15}, \quad (7.85)$$

kus h_i – vaadeldava kattematerjali paksus, mm.

Kui kaitseplaadiks on kaks GtA kipsplaati, siis tuleb neid vaadelda kahe eraldi kihina. Niisugusel juhul tuleb kõigepealt leida esimese kipsplaadi kaitseaeg valemiga 7.57. Kõik ülejäänud valemis esinevad tegurid võrduvad 1 (välja arvatud vaadeldava kihi baaskaitseaeg $t_{prot,0,i}$). Kuna vaadeldavale kihile järgneb kipsplaat, siis selle mõju arvestav positisoonikoefitsient on samuti 1. Mõlema kipsplaadi puhul leitakse baaskaitseaeg $t_{prot,0,i}$ valemiga 7.58. Seejärel tuleb valemiga 7.57 leida kaitseaeg teisele kipsplaadile. Siinkohal on vaadeldavale kihile eelneva katteplaadi mõju arvestav positisoonikoefitsient $k_{pos,exp,i}$ 0,5. See saadakse valemiga 7.80. Teisele kattekihile järgneb isolatsioon, seega selle mõju arvestav positisoonikoefitsient arvutatakse valemiga 7.85. Täiendav kaitseaeg Δt_i ja liiteteguri $k_{j,i}$ võetakse võrdseks ühega. [4]

$$k_{pos,exp,i} = \begin{cases} 1 - 0,6 * \frac{\sum t_{prot,i-1}}{t_{prot,0,i}} & \text{kui } \sum t_{prot,i-1} \leq \frac{t_{prot,0,i}}{2} \\ 0,5 * \sqrt{\frac{t_{prot,0,i}}{\sum t_{prot,i-1}}} & \text{kui } \sum t_{prot,i-1} > \frac{t_{prot,0,i}}{2} \end{cases} \quad (7.80)$$

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

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

Kui kattematerjali esimeseks kihiks on GtF kipsplaat ning teiseks kihiks puitlaastplaat, siis tuleb kõigepealt leida kipsplaadi kaitseaeg valemiga 7.57. Peale vaadeldava kihi baaskaitseaja $t_{prot,0,i}$ võrduvad Kõik ülejäänud valemis esinevad tegurid 1. Kuna vaadeldavale kihile järgneb puitlaastplaat, siis selle mõju arvestav positisoonitegur on

1. Kipsplaadi baaskaitseaeg $t_{prot,0,i}$ leitakse valemiga 7.58. Seejärel tuleb valemiga 7.57 leida kaitseaeg puitlaastplaadile. Selle baaskaitseaeg $t_{prot,0}$ leitakse valemiga 7.61. Kipsplaadi positisoonekoefitsient $k_{pos,exp,i}$ arvutatakse valemiga 7.80. Järgneva kihi mõju arvestav positisoonekoefitsient arvutatakse valemiga 7.87. Täiendav kaitseaeg Δt_i leitakse valemiga 7.94 ning selle tarbeks vajaminevad valemi liikmed arvutatakse valemitega 7.96 ja 7.98. [4]

$$t_{prot,0} = \frac{h_i}{k_\rho * k_h * \beta_0}, \quad (7.61)$$

$$k_{pos,unexp,i} = 0,41 * h_i^{0,18}, \quad (7.87)$$

$$\Delta t_i = \frac{(t_{f,pr} - \sum_{k=i}^{i-1} t_{prot,k}) * \Delta t_{max,i}}{t_{prot,max,i}} \leq \Delta t_{max,i} \quad (7.94)$$

$$t_{prot,max,i} = \frac{t_{prot,0,i}}{k_2}, \quad (7.96)$$

$$\Delta t_{max,i} = t_{prot,max,i} - t_{prot,0,i} * k_{pos.exp,i} * k_{pos.unexp,i} * k_{j,i} \quad (7.98)$$

kus k_ρ – tihedustegur;

k_h – paksustegur;

β_0 – algsöestumismäär;

h_i – vaadeldava kaitsekihi paksus, mm;

$t_{f,pr}$ – tõrketekkeae, min;

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

$\Delta t_{max,i}$ – maksimum parandusaeg, min;

$t_{prot,max,i}$ – vaadeldava kihi maksimum kaitseaeg, min;

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

k_2 – kaitsetegur (faas 2);

$k_{pos.exp,i}$ – vaadeldavale kihile eelneva kihi mõju arvestav positisoonekoefitsient;

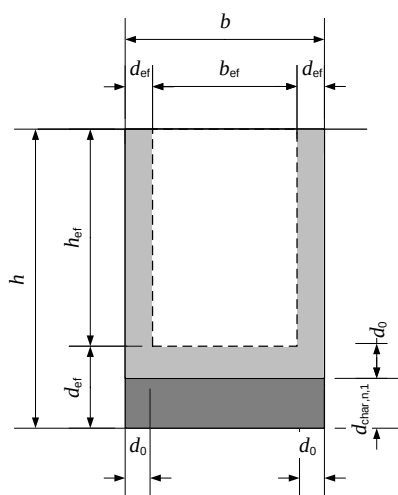
$k_{pos,unexp,i}$ – vaadeldavale kihile järgneva kihi mõju arvestav positisoonekoefitsient;

$k_{j,i}$ – liitetegur.

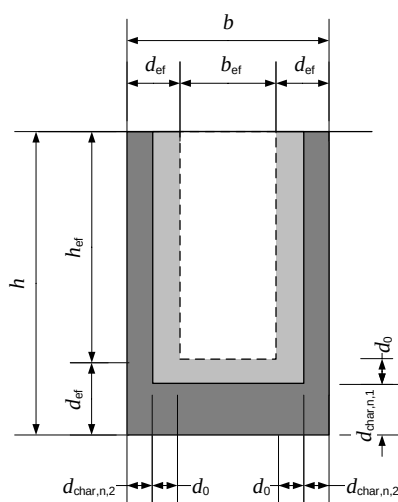
2.3 Efektiivristlõikemeetod

Efektiivristlõige saadakse vähendades puidu algristlõike mõõtmeid null-tugevusega kihi d_0 ja tingliku söestumissügavuse $d_{char,n}$ võrra. Puidu tugevus- ja jäikusomadused jäävad samaks. Ristlõike tulepoolsetel külgedel peab null-tugevusega kiht arvestama ka tugevuse vähenemist. [5]

Käesolevas töös on kasutusel isolatsioonimaterjalid tasemega PL1 ja PL2. Neist esimese korral on efektiivristlõige näidatud joonisel 2.6. Soojustuse PL2 puhul on efektiivristlõige välja toodud joonisel 2.7. [4]



Joonis 2.6 Efektiivristlõige PL1 puhul [4]



Joonis 2.7 Efektiivristlõige PL2 puhul [4]

Jooniste 2.6 ja 2.7 tähised:

h	ristlõike esialgne sügavus;	b	ristlõike esialgne laius;
h_{ef}	efektiivristlõike sügavus;	b_{ef}	efektiivristlõike laius;
d_{ef}	efektiivne söestumissügavus; tinglik söestumissügavus	d_0	null-tugevusega kiht;
$d_{char,n,1}$	tulepoolisel küljel;	$d_{char,n,2}$	tinglik söestumissügavus isolatsioonipoolisel küljel;

Soojustustaseme PL1 puhul kasutatakse tulekindlat kivivilla. Seetõttu söestub puit vaid tulepoolisel küljel (joonis 1.7). PL2 puhul on soojustusmaterjal süttiv, seega saab puit söestuda kolmest küljest (joonis 1.8).

Efektiivristlõike kõrgus sõltub tulele avatud vastaskülgede arvust ning tulepoolsest söestumissügavusest. See leitakse seostega 7.21 ja 7.22. [4]

$$h_{ef} = h - k_{side} * d_{ef}, \quad (7.21)$$

$$d_{ef} = d_{char,n,1} + d_0, \quad (7.22)$$

kus h – algristlõike kõrgus, mm;
 k_{side} – tulele avatud vastaskülgede arv;
 d_{ef} – efektiivne söestumissügavus, mm;
 $d_{char,n,1}$ – tinglik söestumissügavus tulepoolisel küljel, mm;
 d_0 – null-tugevusega kiht, mm.

Efektiivristlõike laius sõltub isolatsioonipoolsete külgede söestumissügavusest. See leitakse seostega 7.23 ja 7.24. [4]

$$b_{ef} = b - 2 * d_{ef}, \quad (7.23)$$

$$d_{ef} = d_{char,n,2} + d_0, \quad (7.24)$$

kus b – algristlõike laius, mm;
 d_{ef} – efektiivne söestumissügavus, mm;
 $d_{char,n,2}$ – tinglik söestumissügavus isolatsioonipoolisel küljel, mm;
 d_0 – null-tugevusega kiht, mm.

Null-tugevusega kihi arvutus sõltub kasutatavast isolatsioonimaterjali tasemest. Arvutades vahelaekonstruktsiooni soojustusega PL1, leitakse null-tugevusega kiht valemiga 7.39. Sama soojustustasemega seinakonstruktsiooni puhul tuleb arvestada surveelemendi nõtkumisega. Sein tasandist välja nõtkuva posti puhul kasutatakse valemit 7.41 ning sein tasandis nõtkuva posti puhul seost 7.42. [4]

$$d_0 = 10 + \frac{b}{50} + \frac{h}{100}, \quad (7.39)$$

$$d_0 = 7 + \frac{b}{50} + \frac{h}{25}, \quad (7.41)$$

$$d_0 = 6 + \frac{b}{14} + \frac{h}{100}, \quad (7.42)$$

kus b – algristlõike laius, mm;
 h – algristlõike kõrgus, mm.

Konstruktsioonide puhul soojustusmaterjaliga PL1 võib null-tugevusega kihti vähendada lineaarselt interpoleerides võttes arvesse alltoodud tingimusi [4].

- Tulekahju algushetkel $d_0 = 0 \rightarrow t = 0$;
- Valemitega 7.39...7.40 arvutatud maksimaalsele d_0' le vastab ajahetk t_{peak} ;
- Null-tugevusega kiht on 0, kui algristlõige on täielikult söestunud $\rightarrow d_0 = 0 \rightarrow d_{char,n,1} = h$.

Vahelaekonstruktsiooni puhul leitakse aeg t_{peak} valemiga 7.43. Sein tasandist välja nõtkuva posti tulepüsivuse arvutamisel leitakse see valemiga 7.45 ning sein tasandis nõtkuva posti puhul seosega 7.46. [4]

$$t_{peak} = \frac{b}{3,6} + \frac{h}{17} + \frac{t_{ch}}{1,1} + \frac{t_{f,pr}}{2,8} - 5,1, \quad (7.43)$$

$$t_{peak} = \frac{b}{12,5} + \frac{h}{8,3} + 1,51 * t_{ch} + \frac{t_{f,pr}}{20} - 25,3, \quad (7.45)$$

$$t_{peak} = \frac{b}{6,7} + \frac{h}{7,7} + \frac{t_{ch}}{1,2} + \frac{t_{f,pr}}{4,3} - 20,5, \quad (7.46)$$

kus t_{peak} – maksimaalne aeg, mis vastab d_0 -le, min;
 b – algristlõike laius, mm;
 h – algristlõike kõrgus, mm;
 t_{ch} – söestumise algusaeg, min;

$t_{f,pr}$ – tõrketekkeaeeg, min.

Isolatsioonitasemega PL1 konstruktsioonide puhul tehti lisaks tulepüsivusarvutused kasutades null-tugevusega kihi valemid 1.3.1-1.3.3. Valemiga 1.3.1 leiti null-tugevusega kiht vahelaetaladele. Seosest 1.3.2 saadi seina tasandist välja nõtkuva posti d_0 ning valemiga 1.3.3 arvutati seina tasandis nõtkuva posti d_0 . [7]

$$d_0 = 10 - \frac{b}{100} + \frac{h}{50}, \quad (1.3.1)$$

$$d_0 = 3 - \frac{b}{10} + \frac{h}{20}, \quad (1.3.2)$$

$$d_0 = 6 + \frac{b}{30} - \frac{h}{80}, \quad (1.3.3)$$

kus b – algristlõike laius, mm;

h – algristlõike kõrgus, mm.

Arvutades tulepüsivust vahelaekonstruktsioonile soojustusega PL2, leitakse null-tugevusega kiht valemiga 7.47. Seinakonstruktsiooni puhul, milles post nõtkub seina tasandist välja, kasutatakse null-tugevusega kihi leidmiseks valemit 7.49 ning seina tasandis nõtkuva posti puhul seost 7.50. [4]

$$d_0 = 3 + \frac{b}{50} + \frac{h}{100}, \quad (7.47)$$

$$d_0 = 4 + \frac{b}{17} + \frac{h}{100}, \quad (7.49)$$

$$d_0 = 4 + \frac{b}{33} + \frac{h}{100}, \quad (7.50)$$

kus b – algristlõike laius, mm;

h – algristlõike kõrgus, mm.

3 KONSTRUKTSIOONIDE KANDEVÕIME ARVUTUSED

Töö teises peatükis on välja toodud põhilised valemid ja parameetrid arvutamaks postide ja talade kandevõimeid.

3.1 Arvutuslikud koormused

Käesolevas töös valiti seinakonstruktsioonidele mõjuvaks koormuseks vastavalt ristlõike suurusele 20 kN/m, 50 kN/m ja 100 kN/m.

Vahelagede puhul valiti konstruktsiooni omakaaluks 0,5 kN/m² ning kasuskoormuseks 3 kN/m². Tulekahju puhul on kandepiiriseisundi koormuskombinatsiooniks valem 2.1 ning vahelaetala pikkusühikule mõjuv koormus leitakse seosest 2.2 [8].

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_d + \Psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \Psi_{2,i} Q_{k,i} \rightarrow q_{d,fi} = g_k + 0,5 * q_k \quad (2.1)$$

$$q = q_{d,fi} * s, \quad (2.2)$$

kus $q_{d,fi}$ – arvutuslik koormus tulekahjuolukorras, kN/m²;

g_k – alaline koormus, kN/m²;

q_k – kasuskoormus, kN/m²;

q – koormus vahelaetala pikkusühikule, kN/m;

s – vahelaetala samm, mm.

Maksimaalne paindemoment lihttala arvutusel leitakse valemiga 2.3 [9].

$$M_{max,fi} = \frac{q * l^2}{8}, \quad (2.3)$$

kus q – koormus vahelaetala pikkusühikule, kN/m;

l – vahelaetalade sildeava, m.

3.2 Vahelaetala kandevõime

Vahelaetala kandevõimet hinnatakse selle poolt vastuvõetava suurima paindemomendi abil. Paindemomendi arvutamiseks leitakse valemiga 2.4 efektiivristlõike

vastupanumoment. Seejärel arvutatakse maksimaalne paindemoment tulekahjuolukorras valemiga 2.5. [8]

$$W_{ef} = \frac{b_{ef} h_{ef}^2}{6}, \quad (2.4)$$

$$M_{max,fi} = W_{ef} X_{d,fi} 10^{-6}, \quad (2.5)$$

kus b_{ef} – efektiivristlõike laius, mm;

h_{ef} – efektiivristlõike kõrgus, mm;

$X_{d,fi}$ – puidu arvutuslik tugevus tulekahjuolukorras, N/mm².

3.3 Seinaposti kandevõime

Seinakonstruktsiooni postide tugevust hinnatakse nende suurima survekandevõime kaudu. See arvutatakse valemiga 2.6. Seejärel leitakse seina poolt vastuvõetav maksimaalne lauskoormus tulekahjuolukorras seosega 2.7. [9]

$$N_{max,fi} = \frac{A_{ef} * X_{d,fi}}{1000}, \quad (2.6)$$

$$p_{max,fi} = \frac{N_{max,fi}}{s} \quad (2.7)$$

kus A_{ef} – efektiivristlõike pindala, mm²;

$X_{d,fi}$ – puidu arvutuslik tugevus tulekahjuolukorras, N/mm²;

s – vahelaetala samm, mm.

3.4 Posti stabiilsus

Posti stabiilsuse arvutuskäik on esitatud standardis EN 1995-1-1:2005. Posti inertsimoment y- ja z-telje suhtes on arvutatud vastavalt valemitega 2.8 ja 2.9 [10]. Käesolevas töös arvutatakse sõestunud ristlõike stabiilsust, seega arvutatakse inertsimomendid efektiivristlõike mõõtmete kaudu (valemid 2.10 ja 2.11).

$$I_y = \frac{bh^3}{12}, \quad (2.8)$$

$$I_z = \frac{hb^3}{12}, \quad (2.9)$$

$$I_y = \frac{b_{ef}h_{ef}^3}{12}, \quad (2.10)$$

$$I_z = \frac{h_{ef}b_{ef}^3}{12}, \quad (2.11)$$

kus b – algristlõike laius, mm;

h – algristlõike kõrgus, mm.

b_{ef} – efektiivristlõike laius, mm;

h_{ef} – efektiivristlõike kõrgus, mm.

Efektiivristlõike pindalast ja inertsimomendist on tuletatud inertsiraadius, mis saadakse teljest sõltuvalt seostest 2.12 ja 2.13 [10].

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A_{ef}}}, \quad (2.12)$$

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A_{ef}}}, \quad (2.13)$$

kus I_y – inertsimoment y-telje suhtes, mm⁴;

I_z – inertsimoment z-telje suhtes, mm⁴;

A_{ef} – efektiivristlõike pindala, mm²;

Posti saledus sõltub posti efektiivpikkusest. Efektiivne pikkus on varda arvutuspikkus, mis sõltub selle kinnitustest. See leitakse valemiga 2.14. Seina tasandist välja nõtkuva posti puhul on varda pikkuse taandamisteguriks 0,7. [10]

$$l_{ef} = \mu * H, \quad (2.14)$$

kus μ – varda pikkuse taandamistegur;

H – seina kõrgus, mm.

Käesolevas töös on arvutused tehtud eeldusel, et mittetulepoolsel küljel on plaadid. Sellisel juhul on seina tasandis nõtkuva posti puhul külgsuunaline nõtkepikkus võrdne kruvide vahekaugusega ehk 250 mm.

Saledus, mis vastab paindele y-telje suhtes, leitakse seost 2.15. Saledus, mis vastab paindele z-telje suhtes, leitakse seost 2.16. [10]

$$\lambda_y = \frac{l_{ef}}{i_y}, \quad (2.15)$$

$$\lambda_z = \frac{l_{ef}}{i_z}, \quad (2.16)$$

kus l_{ef} – posti efektiivne pikkus, mm;
 i_y – inertsiraadius y-telje suhtes, mm;
 i_z – inertsiraadius z-telje suhtes, mm.

Saleduse kaudu leitakse selle suhteline väärtus teljele vastavalt valemitega 2.17 ja 2.18 [10]. Puidu elastsusmooduli 5-protsentiili väärtus okaspuidust saematerjalil C24 on 7400 N/mm² ning lamell-liimpuidul GL24c on 9100 N/mm² [5].

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \rightarrow \lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{X_{c,0,g,k}}{E_{0,05}}}, \quad (2.17)$$

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \rightarrow \lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{X_{c,0,g,k}}{E_{0,05}}}, \quad (2.18)$$

kus $\lambda_{rel,y}$ – suhteline saledus, mis vastab paindele y-telje suhtes;
 $\lambda_{rel,z}$ – suhteline saledus, mis vastab paindele y-telje suhtes;
 λ_y – saledus, mis vastab paindele y-telje suhtes;
 λ_z – saledus, mis vastab paindele z-telje suhtes;
 $X_{c,0,g,k}$ – puidu normatiivne survetugevus tavatemperatuuril, N/mm²;
 $E_{0,05}$ – elastsusmooduli 5-protsentiili väärtus.

Nõtketegurid k_y ja k_z leitakse vastavalt valemitega 2.19 ja 2.20. Arvutustes vajaminev sirgustegur β_c on monoliitpuidul 0,2 ning liimpuidul 0,2. [10]

$$k_y = 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2), \quad (2.19)$$

$$k_z = 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2), \quad (2.20)$$

kus β_c – sirgsustegur;

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

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

Tegurid, mis arvestavad elemendi saledust ja sirgsust, on vastavalt teljele arvutatavad seostest 2.21 ja 2.22 [10].

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}}, \quad (2.21)$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}}, \quad (2.22)$$

kus k_y, k_z – nõtketegur;

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

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

3.5 Seinaposti kandevõime arvestades stabiilsust

Seinaposti survekandevõime leidmiseks tuleb arvutada sellel mõjuvad survepinged sõltuvalt arvutatavast teljest valemitega 2.23 ja 2.24 [10].

$$\sigma_{c,0,d} \leq k_{c,y} f_{c,0,d} \rightarrow \sigma_{c,0,d} \leq k_{c,y} X_{d,fi}, \quad (2.23)$$

$$\sigma_{c,0,d} \leq k_{c,z} f_{c,0,d} \rightarrow \sigma_{c,0,d} \leq k_{c,z} X_{d,fi}, \quad (2.24)$$

kus $k_{c,y}, k_{c,z}$ – nõtketeguriid;

$X_{d,fi}$ – puidu arvutuslik tugevus tulekahjuolukorras, N/mm².

Leitud survepingest lähtuvalt arvutatakse seinakonstruktsiooni postide survekandevõime valemiga 2.25 [9].

$$N_{max,fi} = A_{ef}\sigma_{c,0,d}10^{-3}, \quad (2.25)$$

kus A_{ef} – efektiivristlõike pindala, mm²;

$\sigma_{c,0,d}$ – survepinged, N/mm².

4 TÖRKETEKKEAJA MÕJU ARVUTUSLIKULE TULEPÜSIVUSELE

Käesoleva töö üheks põhiliseks ülesandeks oli puitkarkass-seinte ja vahelagede arvutused uute arvutusmeetodite järgi erinevate valitud parameetritega. Arvutustes kasutati erinevaid valemeid tõrketekkeageade ning null-tugevusega kihi väärtuste leidmiseks.

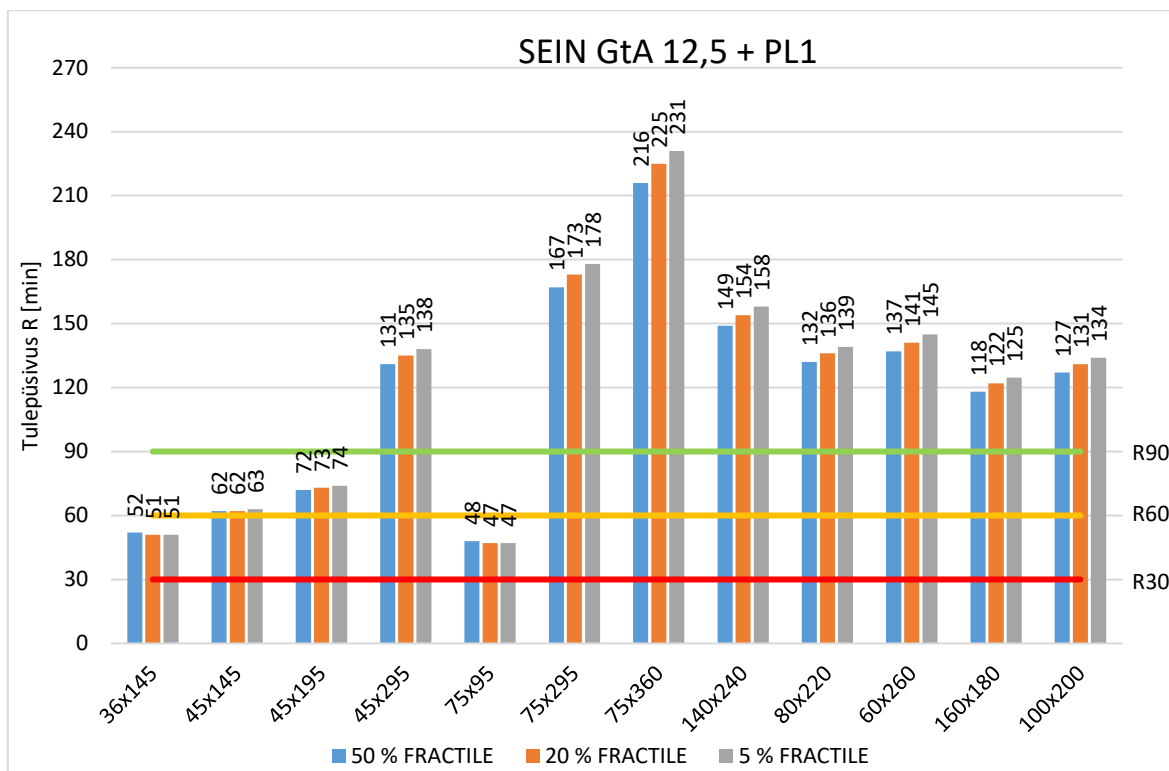
Järgnevates alapeatükkides on välja toodud erinevate katteplaatidega puitkarkass-seinte ja -vahelagede tulepüsivuse arvutusmeetodite tundlikkuse analüüs lähtuvalt kolmest kasutatud tõrketekkeajast.

4.1 Puitkarkass-seinad katteplaadiga GtA 12,5

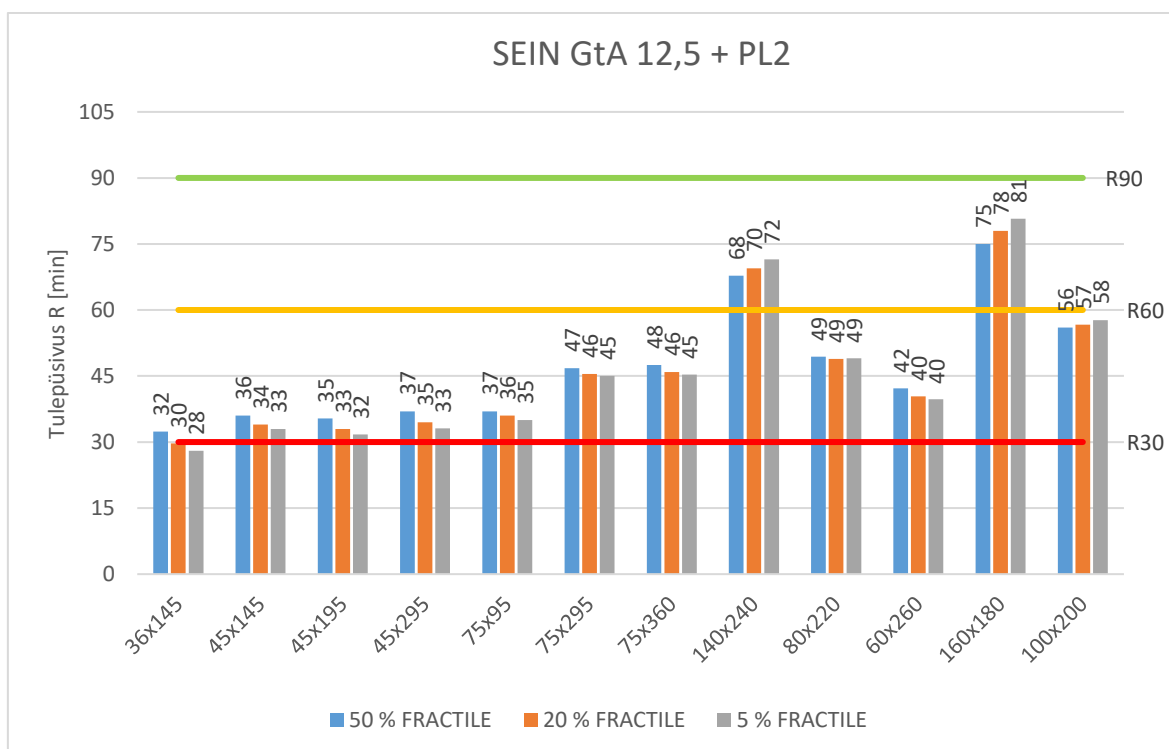
Kipsplaadiga GtA 12,5 kaetud ja kivivillaga (isolatsioonitase PL1) soojustatud puitkarkass-seinte tulepüsivusajad on välja toodud graafikul 4.1. Väikeste ristlõigete korral on tõrketekkeajast tingitud erinevused konstruktsiooni tulepüsivuse osas minimaalsed. See tuleneb väga väikestest erinevustest lõplikute põlemisaegade t_{fin} vahel. Ristlõigete 36x145 ja 75x95 arvutustulemustest järeldub, et suurema tõrketekkeaja (50% fraktsioon) puhul hävineb kipsplaat pisut hiljem, seega on ka tulepüsivus veidi parem.

Suuremate ristlõigete korral on pikema tõrketekkeaja puhul tulepüsivus väiksem kui kasutades väiksemaid tõrketekkeageasid. Sellest järeldub, et suurema tõrketekkeaja puhul katteplaat küll laguneb hiljem, kuid edasi põleb konstruktsioon kiiremini. Kasutades isolatsioonimaterjalina soojustust tasemega PL1 mõjutavad puitkarkassi tulepüsivusaega paljuskki lõplik aeg t_{fin} ning järelkaitsetegur $k_{3,1}$, mille arvutus sõltub tõrketekkeaja väärtusest.

Kipsplaadiga GtA 12,5 kaetud ja mineraalvillaga (isolatsioonitase PL2) soojustatud puitkarkass-seinte tulepüsivusajad on välja toodud graafikul 4.2. Enamike ristlõigete korral on arvutustulemus eeldustele vastav – suurema tõrketekkeaja puhul laguneb katteplaat hiljem ning seega on tulepüsivusaeg parem. Mõõtmisel laiimate ristlõigete (140x240, 160x180 ning 100x200) arvutustes on tulemused aga vastupidised. Nende puhul andis väiksem tõrketekkeage tulemuseks suurema tulepüsivusaja. See tuleneb sellest, et kui katteplaat püsib konstruktsioonis kauem, siis peale selle lagunemist hakkab puit tulele avatud kolmest küljest kiiremini põlema.



Graafik 4.1 Katteplaadiga GtA 12,5 ja soojustusega PL1 puitkarkass-seinte tulepüsimusaegade võrdlus

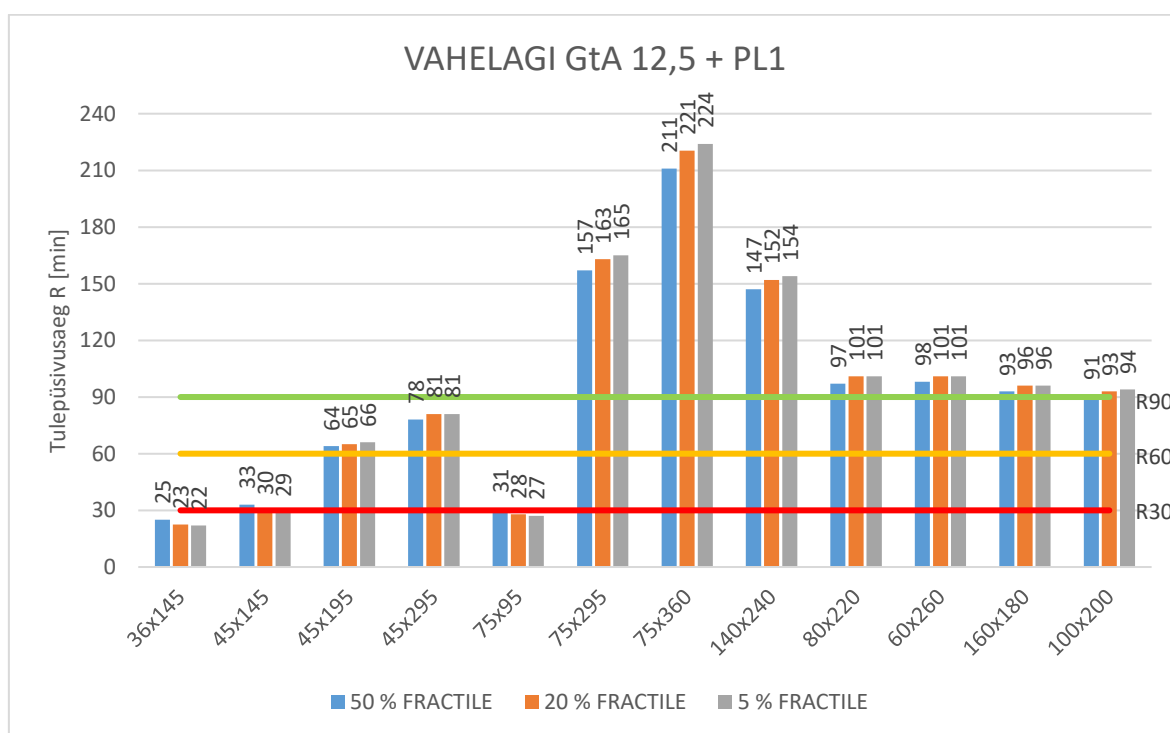


Graafik 4.2 Katteplaadiga GtA 12,5 ja soojustusega PL2 puitkarkass-seinte tulepüsimusaegade võrdlus

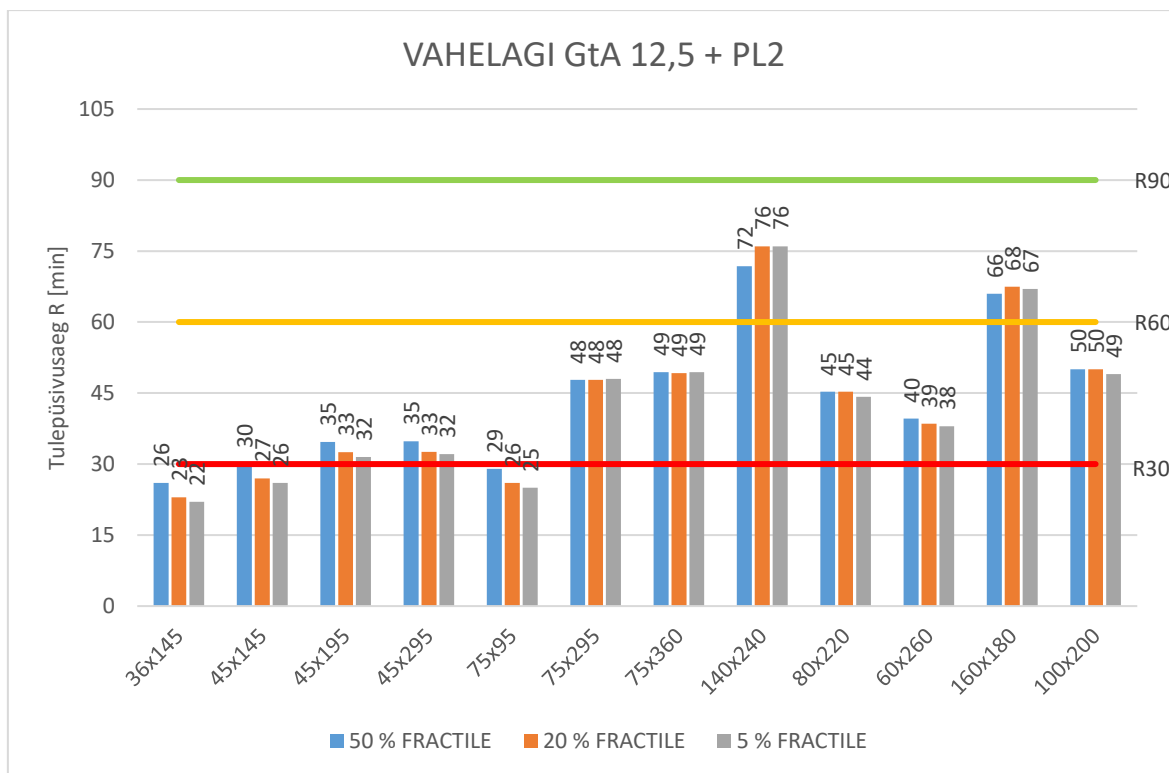
4.2 Puikarkass-vahelaed katteplaadiga GtA 12,5

Kipsplaadiga GtA 12,5 kaetud ja kivivillaga (isolatsioonitase PL1) soojustatud puitkarkass-vahelagede tulepüsivusajad on välja toodud graafikul 4.3. Sarnaselt seintele on ka vahelagede puhul väikeste ristlõigete korral parim tulemus tulepüsivuse osas suurema tõrketekkeaja (50% fraktiil) puhul. Nende puhul katteplaat püsib konstruktsioonis kauem, seega on sellevõrra ka tulepüsivusaeg suurem. Suuremate ristlõigete juures on väiksema tõrketekkeaja korral tulepüsivus parem. Seega peale plaadi konstruktsioonist ära kukkumist, põleb puit faasis 3 edasi kiiremini.

Kipsplaadiga GtA 12,5 kaetud ja mineraalvillaga (isolatsioonitase PL2) soojustatud puitkarkass-vahelagede tulepüsivusajad on välja toodud graafikul 4.4. Tulpdiaagrammilt järeldeb, et väiksemate ristlõigete korral on arvutustulemused ootuspärased – suurema tõrketekkeajaga kipsplaat laguneb hiljem ja tagab seejuures konstruktsiooni parema tulepüsivuse. Suuremate ristlõigete puhul olid tulemused vastupidised või kattematerjali tõrketekkeae konstruktsiooni tulepüsivuse juures olulist rolli ei mänginud (ristlõiked 75x295 ja 75x360). See võib tuleneda sellest, et kuigi suurema tõrketekkeaja korral püsib katteplaat esialgsel kujul kauem, siis selle ära kukkudes põleb puit sedavõrd kiiremini.



Graafik 4.3 Katteplaadiga GtA 12,5 ja soojustusega PL1 puitkarkass-vahelagede tulepüsivusaegade võrdlus

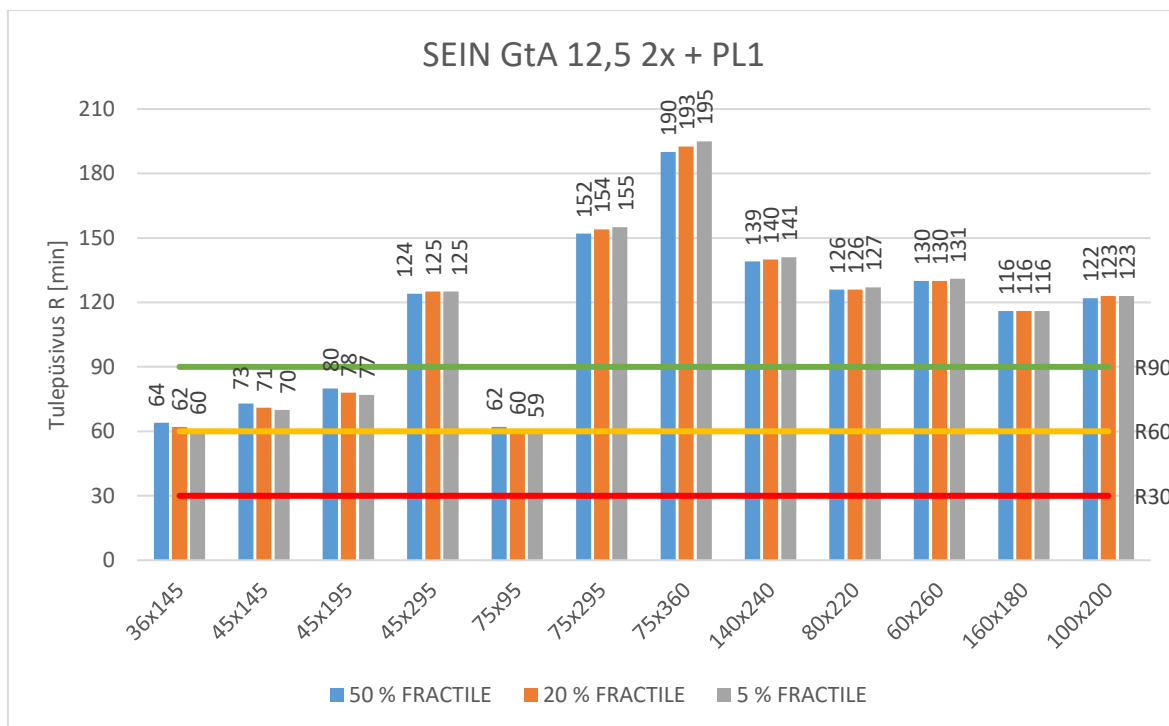


Graafik 4.4 Katteplaadiga GtA 12,5 ja soojustusega PL2 puitkarkass-vahelagede tulepüsivusaegade võrdlus

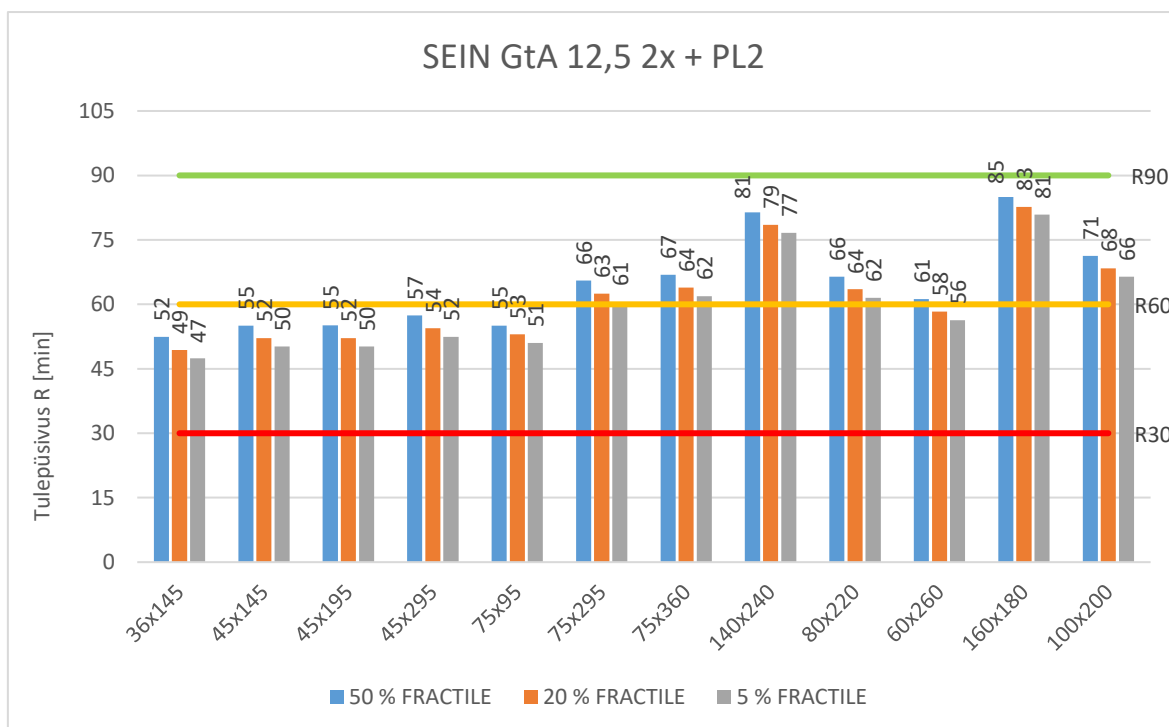
4.3 Puitkarkass-seinad kahekordse kipsplaadiga GtA 12,5

Kahekordse kipsplaadiga GtA 12,5 kaetud ja kivivillaga (isolatsioonitase PL1) soojustatud puitkarkass-seinte tulepüsivusajad on välja toodud graafikul 4.5. Sarnaselt karkassidele, mis olid kaetud ühekordse A-tüüpi kipsplaadiga, on väikeste ristlõigete korral suurema tõrketekkeajaga arvutades konstruktsiooni tulepüsivus parem. Katteplaadid püsivad konstruktsioonis kauem ja tagavad sellega karkassi parema tulepüsivuse. Suuremate ristlõigete puhul on tõrketekkeajast tingitud erinevused konstruktsiooni tulepüsivuse osas üsna minimaalsed. Graafikult järeldub, et näiteks kasutades karkassis ristlõiget 160x180 on arvutuslik tulepüsivusaeg tõrketekkeajast sõltumatu. See tuleneb väga väikestest erinevustest lõplikute põlemisaegade t_{fin} vahel. Mitme ristlõike puhul annab ajaliselt lühem tõrketekkeage tulemuseks parema tulepüsivusaja. Seega arvutustulemustest järeldub, et suurema tõrketekkeaja korral hävinevad kipsplaadid küll pisut hiljem, kuid edasi põleb puit kiiremini.

Kahekordse A-tüüpi kipsplaadiga GtA 12,5 kaetud ja mineraalvillaga (isolatsioonitase PL2) soojustatud puitkarkass-seinte tulepüsivusajad on välja toodud graafikul 4.6. Kõik esitatud arvutustulemused vastavad eeldatud seaduspärasusele. Suurema tõrketekkeaja puhul lagunevad katteplaadid hiljem ning seega peavad konstruktsioonid tules ka kauem vastu.



Graafik 4.5 Kahekorde kipspladiga GtA 12,5 ja soojustusega PL1 puitkarkass-seinte tulepüsivusaegade võrdlus

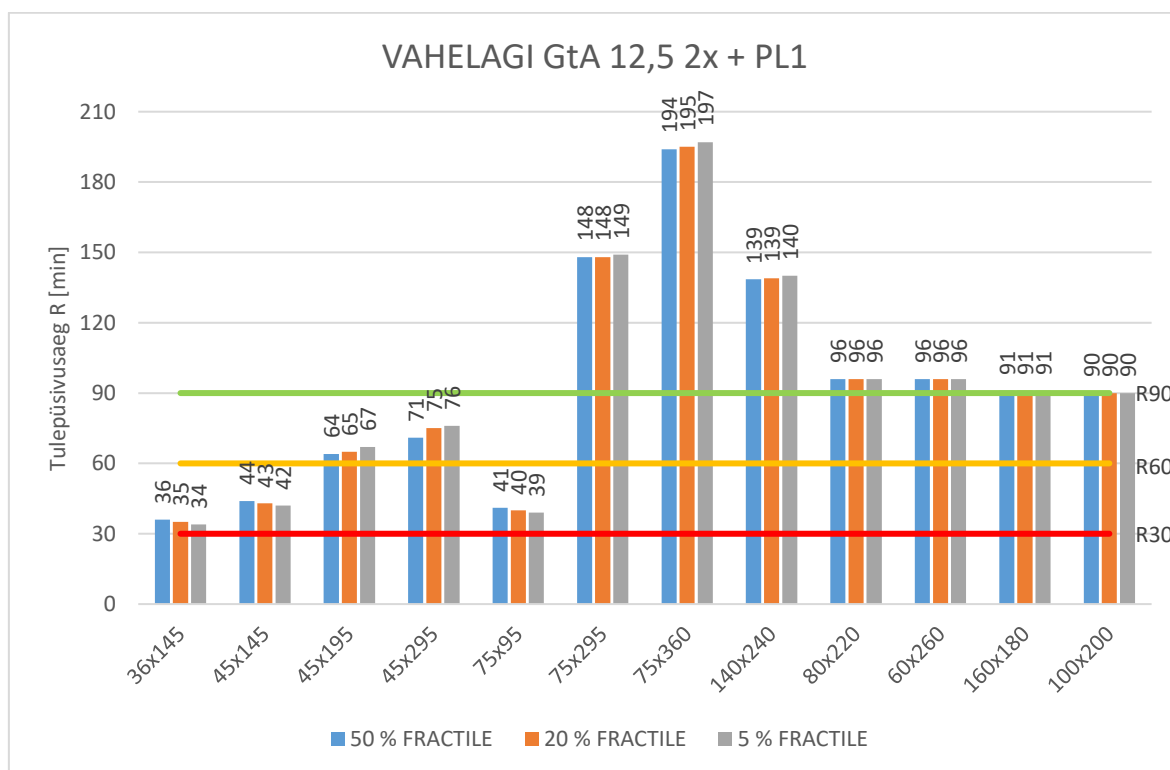


Graafik 4.6 Kahekorde kipspladiga GtA 12,5 ja soojustusega PL2 puitkarkass-seinte tulepüsivusaegade võrdlus

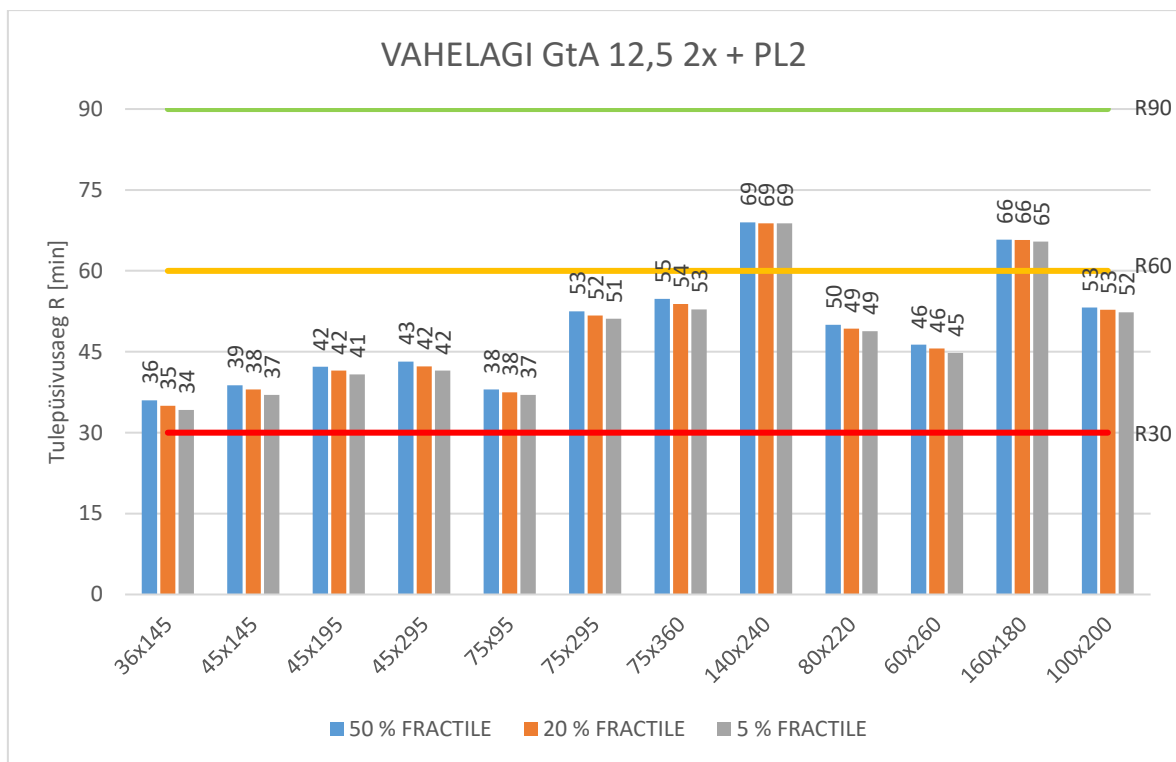
4.4 Puikarkass-vahelaed kahekordse kipsplaadiga GtA 12,5

Kahekordse A-tüüpi kipsplaadiga GtA 12,5 kaetud ja kivivillaga (isolatsioonitase PL1) soojustatud puitkarkass-vahelagede tulepüsivusajad on välja toodud graafikul 4.7. Kõnealused tulemused on sarnased võrreldes sama karkassi-süsteemiga seinte tulepüsivusaegadega. Väikeste ristlõigete puhul sõltub tulepüsivus kaitseplaatide tõrketekkeajast – suurem tõrketekkeae tagab parema tulepüsivuse. Suuremate ristlõigete puhul enamasti tõrketekkeae erinevus ei muuda oluliselt konstruktsiooni tulepüsivust. Seega võib öelda, et niisuguste puitkarkassi-vahelagede puhul suurema tõrketekkeajaga katteplaadid kestavad küll tulekahju korral kauem, kuid nende lagunemisest alates põleb konstruktsioon edasi sedavõrra kiiremini.

Kahekordse kipsplaadiga GtA 12,5 kaetud ja mineraalvillaga (isolatsioonitase PL2) soojustatud puitkarkass-vahelagede tulepüsivusajad on välja toodud graafikul 4.8. Diagrammilt järeldeb, et kõik arvutustulemused on ootuspärased – väiksema tõrketekkeajaga kipsplaat laguneb varem ja seega on konstruktsiooni tulepüsivus kehvem. Ristlõigete 140x240 ja 160x180 puhul tõrketekkeaja parameetrid leitud tulemust ei mõjutanud. Järelikult pikema tõrketekkeaja puhul on puidu söestumine faasis 3 on oluliselt kiirem.



Graafik 4.7 Kahekorde kipspladiga GtA 12,5 ja soojustusega PL1 puitkarkass-vahelagede tulepüsivusaegade võrdlus

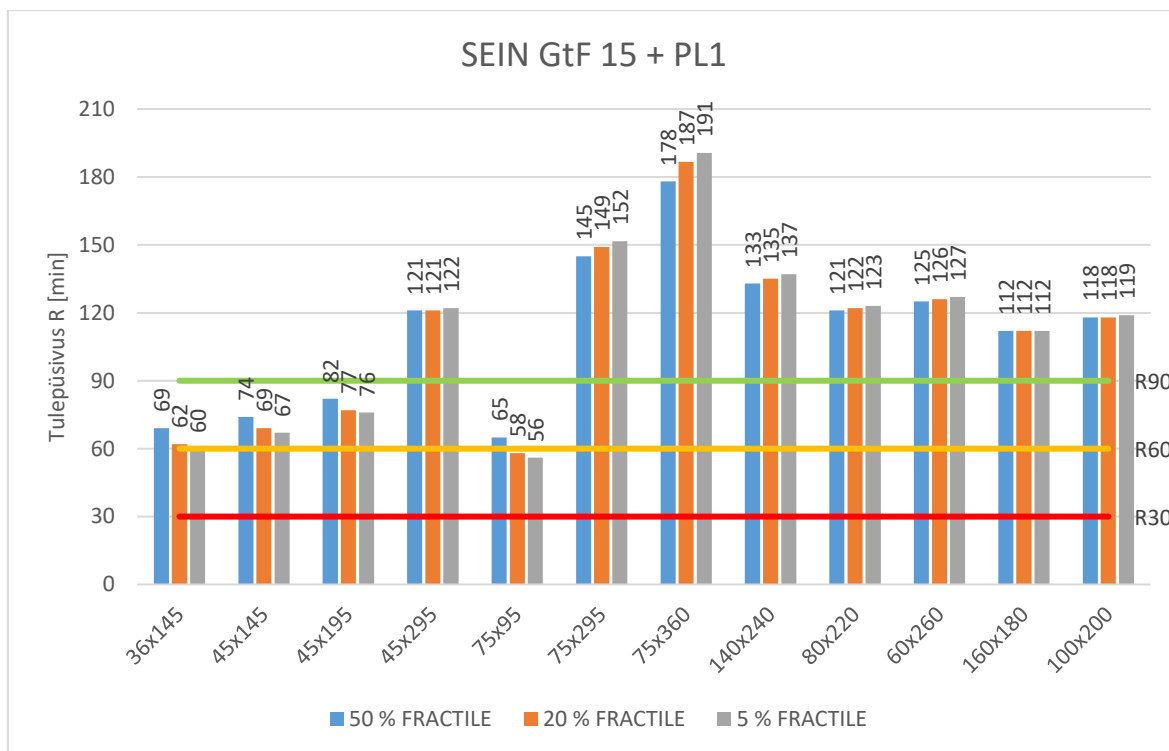


Graafik 4.8 Kahekorde kipspladiga GtA 12,5 ja soojustusega PL2 puitkarkass-vahelagede tulepüsivusaegade võrdlus

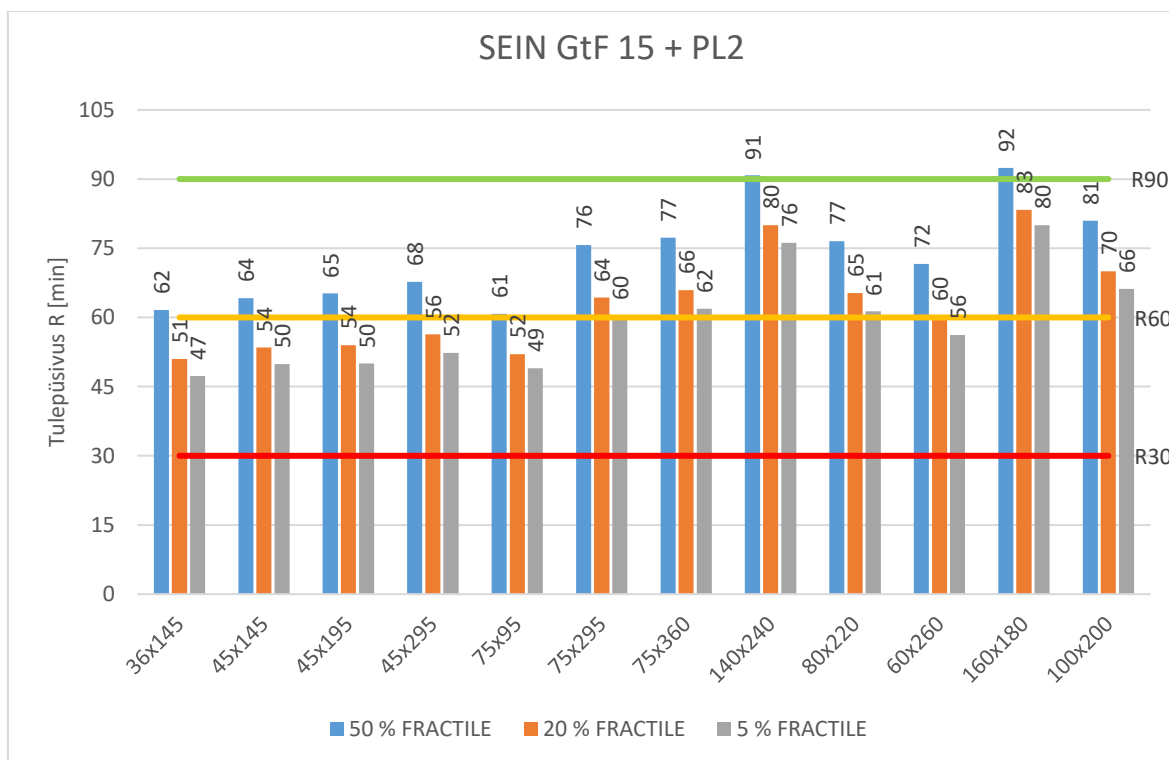
4.5 Puitkarkass-seinad kattepladiga GtF 15

F-tüüpi kipspladiga GtF 15 kaetud ja kivivillaga (isolatsioonitase PL1) soojustatud puitkarkass-seinte tulepüsivusajad on välja toodud graafikul 4.9. Eelnevatele olukordadele sarnaselt on väikeste ristlõigete puhul suurema tõrketekkeajaga arvutades karkassi tulepüsivus parem. Kui katteplaat püsib tulekahju korral puitkarkassis kauem, peab konstruktsioon tules kauem vastu. Suuremate ristlõigete puhul on tulemused mõneti vastupidised. Väiksema tõrketekkeajaga arvutades on saadud tulepüsivus parem. Seega pikema tõrketekkeajaga kattematerjali puhul põleb puit peale kattematerjali lagunemist faasis 3 niivõrd palju kiiremini.

Kipspladiga GtF 15 kaetud ja mineraalvillaga (isolatsioonitase PL2) soojustatud puitkarkass-seinte tulepüsivusajad on välja toodud graafikul 4.10. Saadud tulemused on ootuspärased. Kui kattematerjali tõrketekkeae on suurem ehk see peab tulekahju korral kauem vastu, siis on konstruktsiooni tulepüsivusaeg kokkuvõttes pikem. 50% fraktiili tõrketekkeae on oluliselt suurem kui 20% ja 5% fraktiilil. Seetõttu on ka leitud tulepüsivusajad tunduvalt pikemad.



Graafik 4.9 Katteplaadiga GtF 15 ja soojustusega PL1 puitkarkass-seinte tulepüsivusaegade võrdlus

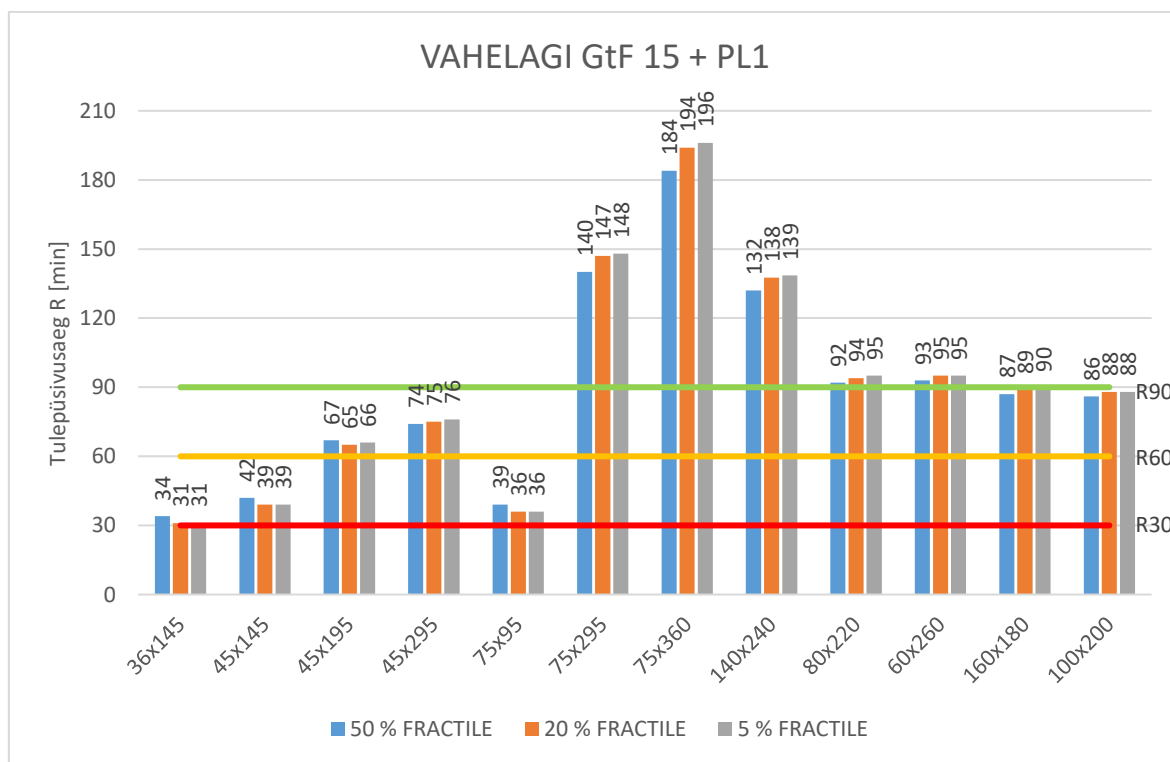


Graafik 4.10 Katteplaadiga GtF 15 ja soojustusega PL2 puitkarkass-seinte tulepüsivusaegade võrdlus

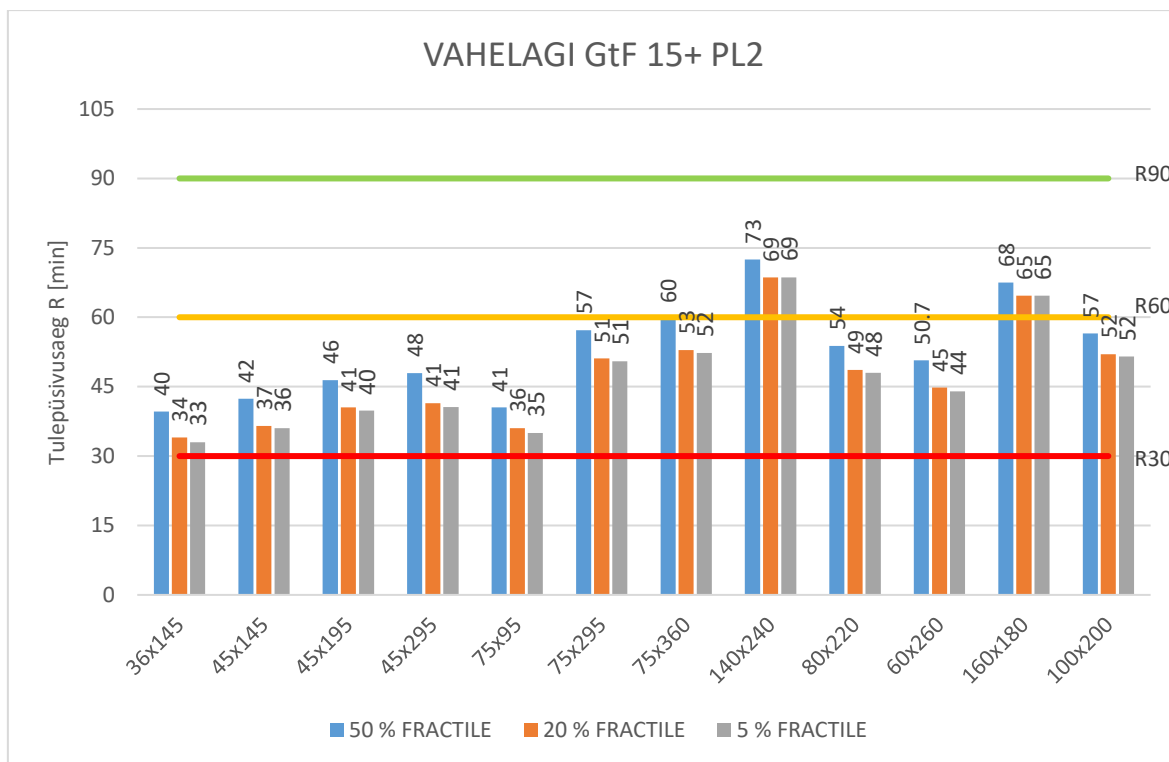
4.6 Puikarkass-vahelaed katteplaadiga GtF 15

F-tüüpi kipsplaadiga GtF 15 kaetud ja kivivillaga (isolatsioonitase PL1) soojustatud puitkarkass-vahelagede tulepüsivusajad on esitatud graafikul 4.11. Arvutustulemustest järeldub, et väikeste ristlõigetega konstruktsioonide arvutuslik tulepüsivus on parem kui kasutada katteplaadi ajalisel suuremat tõrketekkeaja. Suuremate ristlõigete korral on pikema tõrketekkeajaga katteplaadi korral tulemus kas väiksem või peaaegu sama, mis teiste tõrketekkeaja fraktilidega arvutades. Seega suurema tõrketekkeajaga katteplaadid küll püsivad tules kauem, kuid sellest tingituna põleb puit faasis 3 kiiremini.

Kipsplaadiga GtF 15 kaetud ja mineraalvillaga (isolatsioonitase PL2) soojustatud puitkarkass-vahelagede tulepüsivusajad on välja toodud graafikul 4.12. Tulpdiaagrammilt järeldub, et kõik arvutustulemused on teoreetiliselt korrektsed – kasutades kattematerjali suuremat tõrketekkeaja, on konstruktsiooni tulepüsivus parem. Tõrketekkeageade 20% ja 5% fraktilide arvutustulemused on üpris sarnased, kuna nende puhul $t_{f,pr}$ erinevus on vaid 1,1 minutit.



Graafik 4.11 Katteplaadiga GtF 15 ja soojustusega PL1 puitkarkass-vahelagede tulepüsivusaegade võrdlus

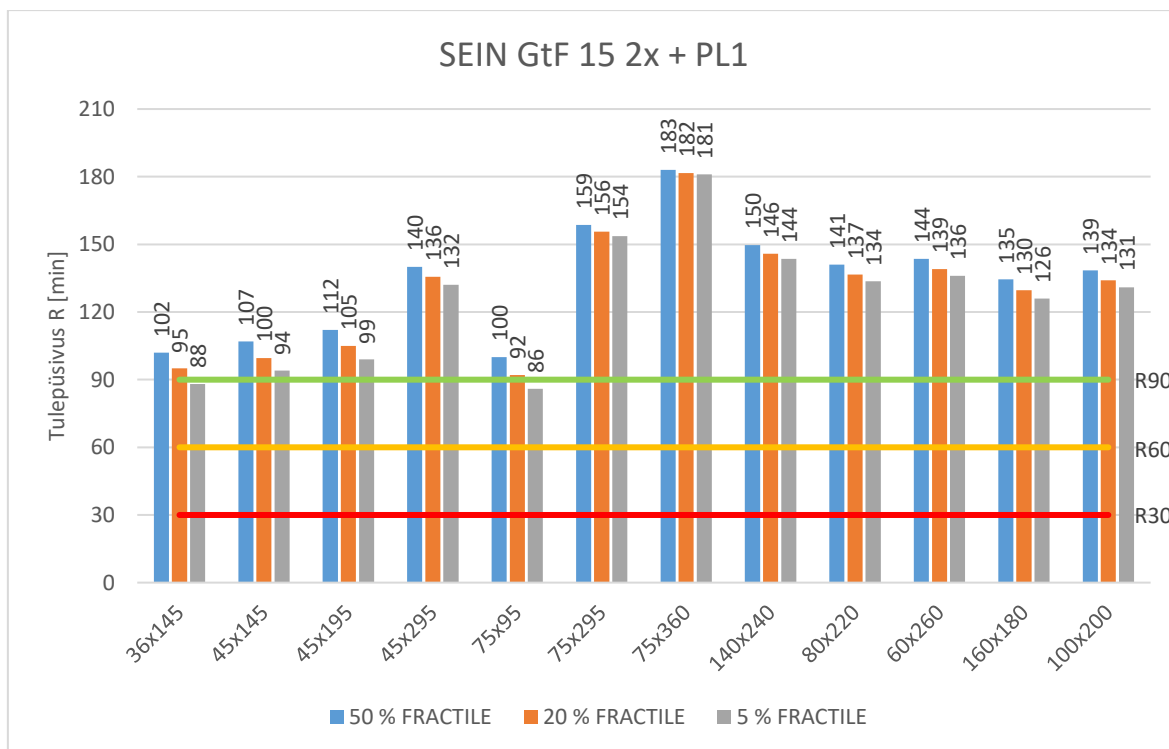


Graafik 4.12 Katteplaadiga GtF 15 ja soojustusega PL2 puitkarkass-vahelagede tulepüsivusaegade võrdlus

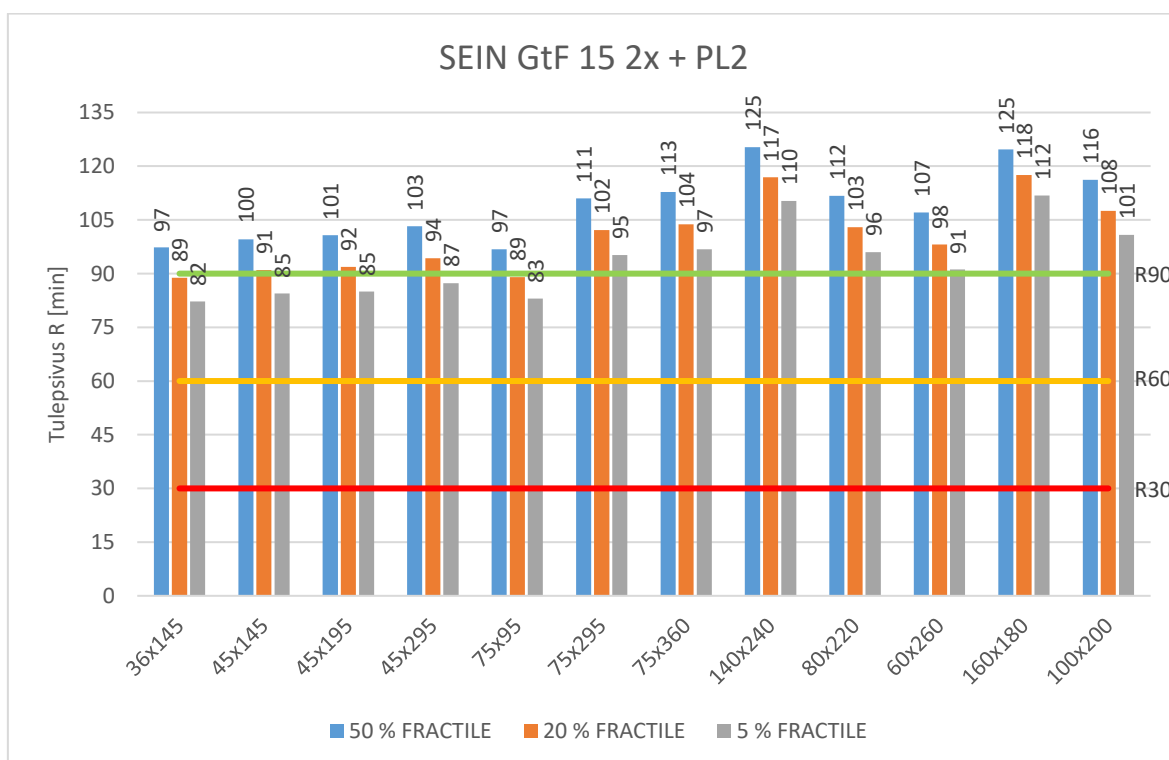
4.7 Puitkarkass-seinad kahekordse kipsplaadiga GtF 15

Kahekordse kipsplaadiga GtF 15 kaetud ja kivivillaga (isolatsioonitase PL1) soojustatud puitkarkass-seinte tulepüsivusajad on välja toodud graafikul 4.13. Arvutustulemused on ootuspärased. Suurema tõrketekkeaja korral püsib konstruktsioon tules kauem. Eelnevate katteplaatide puhul on suuremate ristlõigete arvutustulemused olnud vastupidised. Kahekordse F-tüüpi kipsplaadiga kaetud seinte korral on aga tõrketekkeaeq niivõrd suur, et selle mõju konstruktsiooni lõplikule tulepüsivusele on märgatav.

Kahekordse kipsplaadiga GtF 15 kaetud ja mineraalvillaga (isolatsioonitase PL2) soojustatud puitkarkass-seinte tulepüsivusajad on välja toodud graafikul 4.14. Arvutustulemustest järeldub, et pikema tõrketekkeaja puhul on ka seinakonstruktsiooni arvutuslik tulepüsivus suurem.



Graafik 4.13 Kahekorde kipspladiga GtF 15 ja soojustusega PL1 puitkarkass-seinte tulepüsivusaegade võrdlus

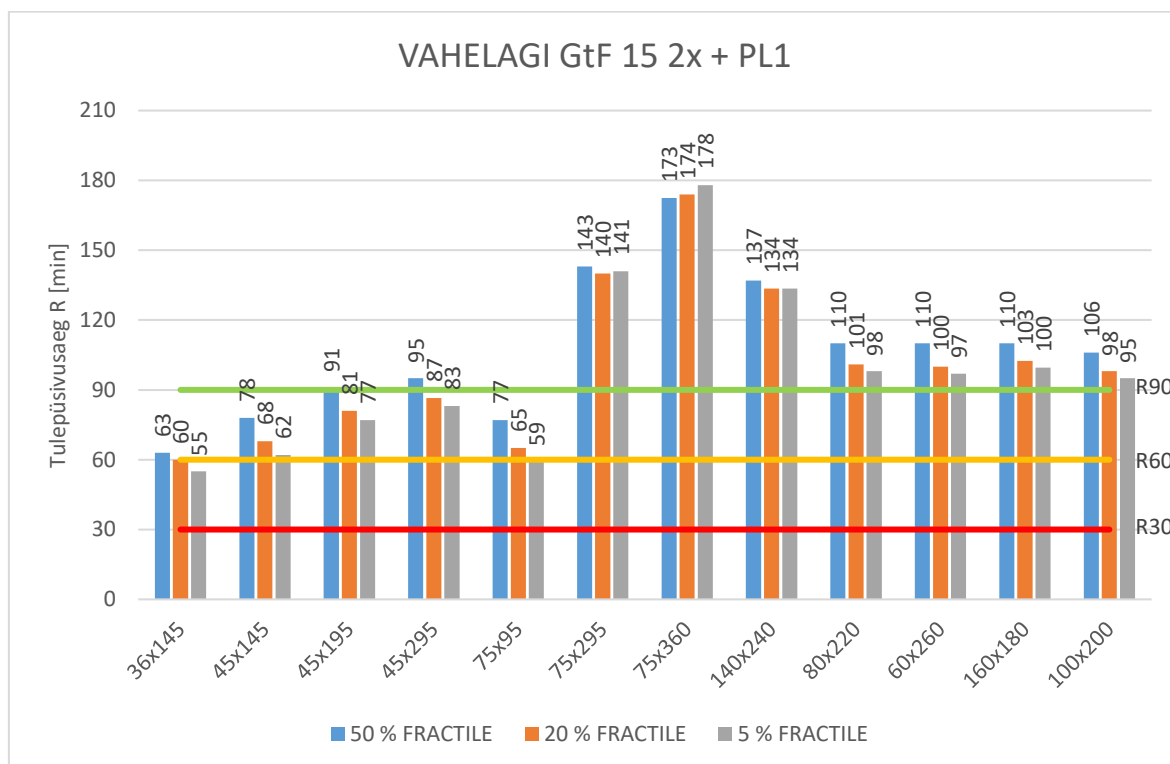


Graafik 4.14 Kahekorde kipspladiga GtF 15 ja soojustusega PL2 puitkarkass-seinte tulepüsivusaegade võrdlus

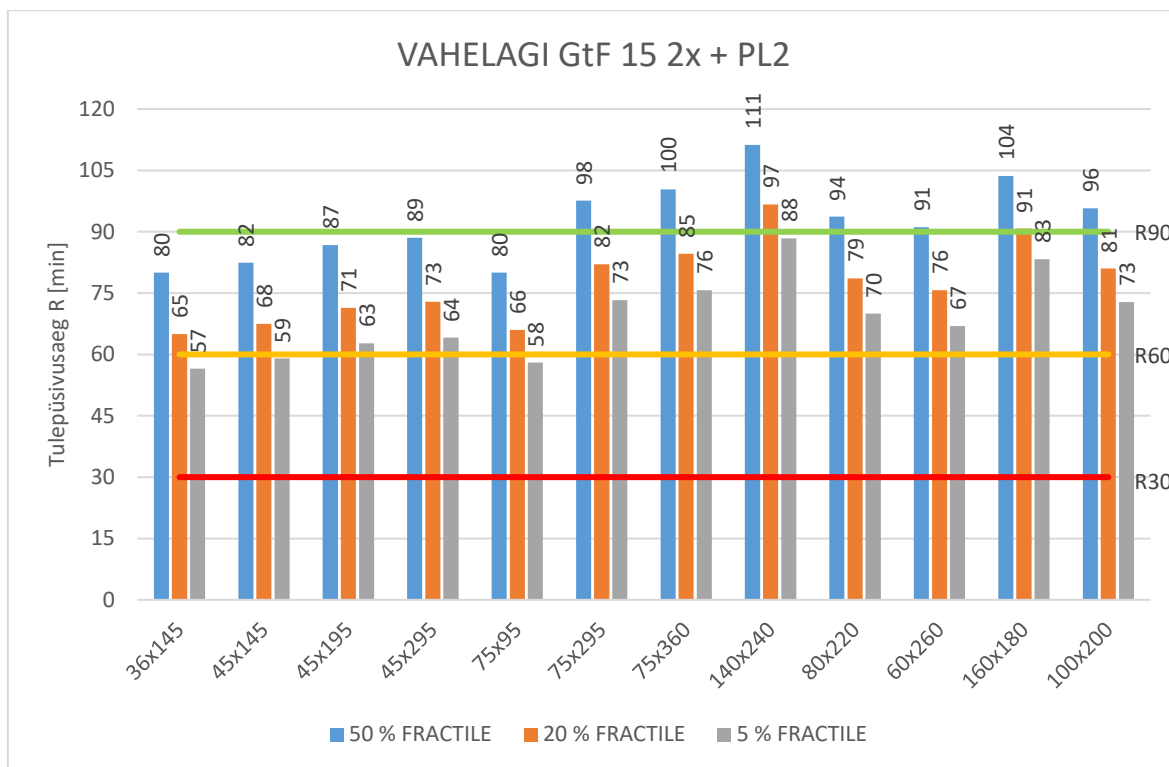
4.8 Puikarkass-vahelaed kahekordse kipsplaadiga GtF 15

Kahekordse F-tüüpi kipsplaadiga GtF 15 kaetud ja kivivillaga (isolatsioonitase PL1) soojustatud puitkarkass-vahelagede tulepüsivusajad on välja toodud graafikul 4.15. Diagrammilt jäeldub, et kasutades kattematerjali suuremat tõrketekkeaga, on enamike ristlõigete korral konstruktsiooni tulepüsivus parem. Ristlõike 75x360 puhul saavutati suurim arvutuslik tulepüsivus aga väikseima tõrketekkeajaga. Seega kui tõrketekkeae on suurem, on ka söestumine faasis 3 kiirem.

Kahe kipsplaadiga GtF 15 kaetud ja mineraalvillaga (isolatsioonitase PL2) soojustatud puitkarkass-vahelagede tulepüsivusajad on välja toodud graafikul 4.16. Arvutustulemused kinnitavad, et suurema tõrketekkeaja korral on konstruktsiooni tulepüsivus pikem.



Graafik 4.15 Kahekorde kipspladiga GtF 15 ja soojustusega PL1 puitkarkass-vahelagede tulepüsivusaegade võrdlus

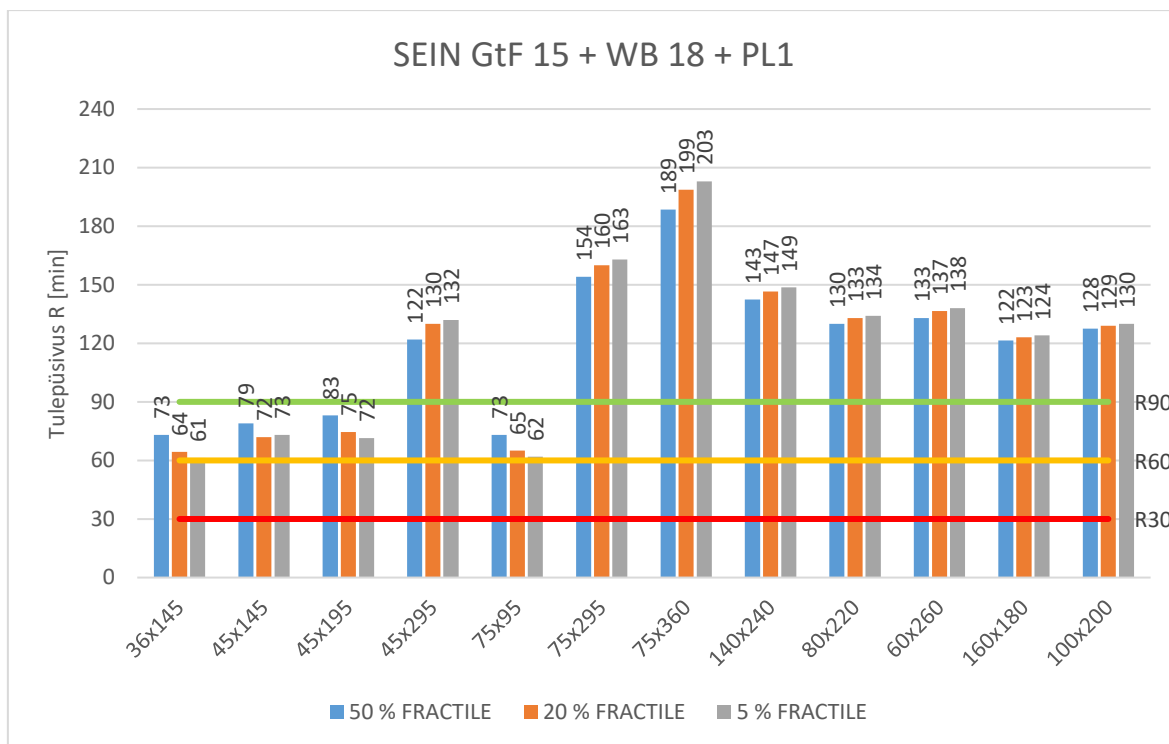


Graafik 4.16 Kahekorde kipspladiga GtF 15 ja soojustusega PL2 puitkarkass-vahelagede tulepüsivusaegade võrdlus

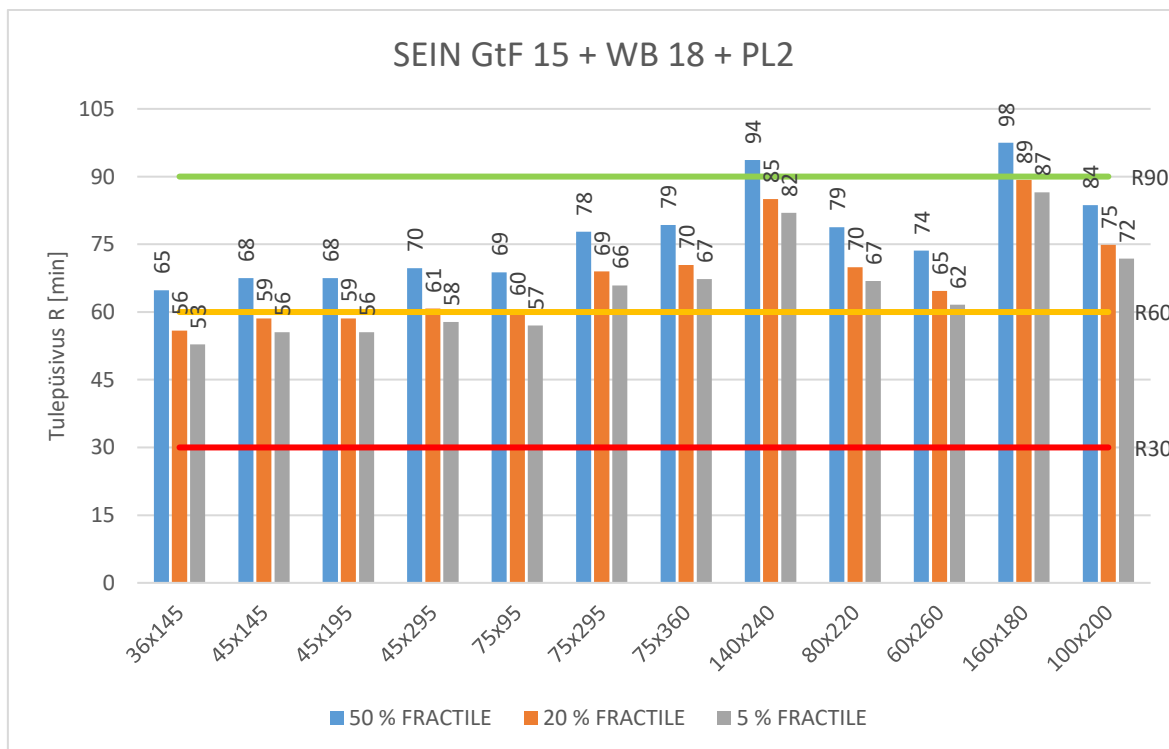
4.9 Puitkarkass-seinad katteplaatidega GtF 15 ja WB 18

F-tüüpi kipsplaadiga GtF 15 ning puitlaastplaadiga WB 18 kaetud ja PL1 isolatsioonitasemega kivivillaga soojustatud puitkarkass-seinte tulepüsivusajad on välja toodud graafikul 4.17. Väikeste ristlõigete puhul on suurema tõrketekkeajaga arvutades karkassi tulepüsivus parem. Sellisel juhul katteplaat püsib konstruktsioonis kauem ja puit peab tules pikemat aega vastu. Suuremate ristlõigete puhul on tulemused vastupidised. Väiksema tõrketekkeajaga arvutades on tulepüsivusaeg parem. Sellest järeldeb, et kuigi pikema tõrketekkeajaga püsivad katteplaadid konstruktsioonis kauem, siis peale nende lagunemist põleb puit faasis 3 edasi kiiremini.

Kipsplaadiga GtF 15 ja puitlaastplaadiga WB 18 kaetud ning isolatsioonitasemega PL2 mineraalvillaga soojustatud puitkarkass-seinte tulepüsivusajad on välja toodud graafikul 4.18. Saadud tulemused on ootuspärased. Kui kattematerjali tõrketekkeae on suurem, siis on konstruktsiooni tulepüsivusaeg kokkuvõttes pikem. Suurema tõrketekkeajaga katteplaadid peavad konstruktsioonis kauem vastu ning tagavad sellega puidu pikema püsivuse tules.



Graafik 4.17 Katteplaatidega GtF 15 ja WB 18 ning soojustusega PL1 puitkarkass-seinte tulepüsivusaegade võrdlus

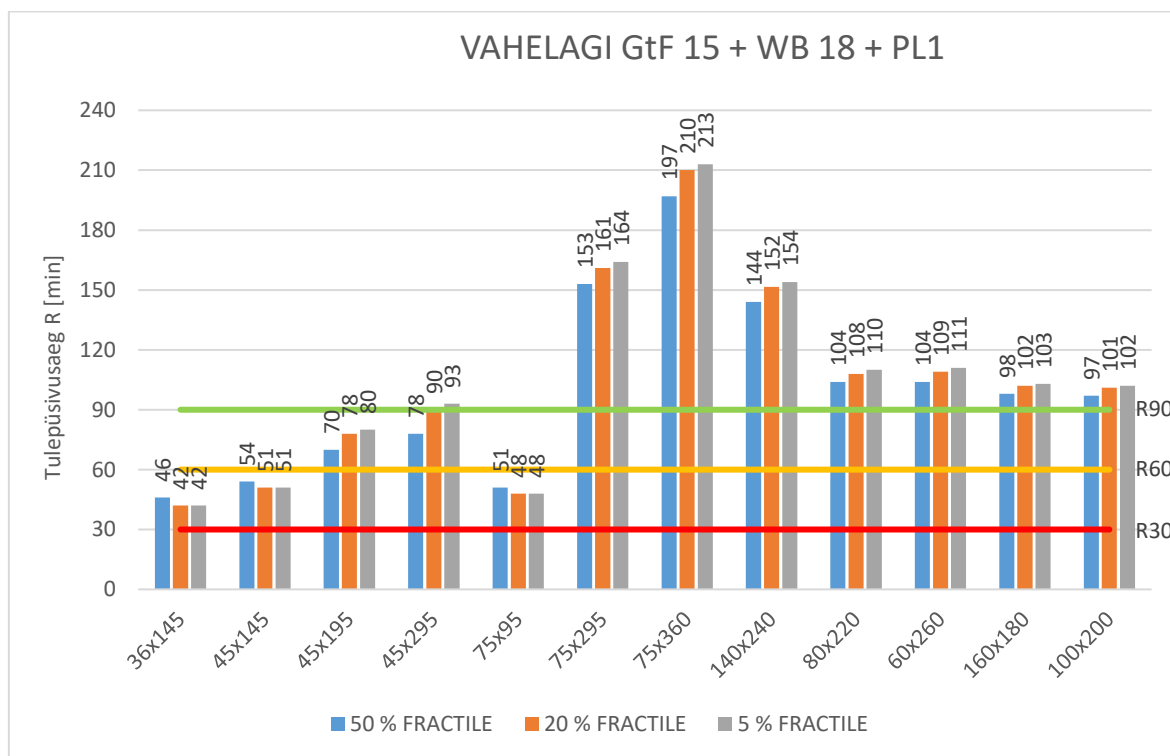


Graafik 4.18 Katteplaatidega GtF 15 ja WB 18 ning soojustusega PL2 puitkarkass-seinte tulepüsivusaegade võrdlus

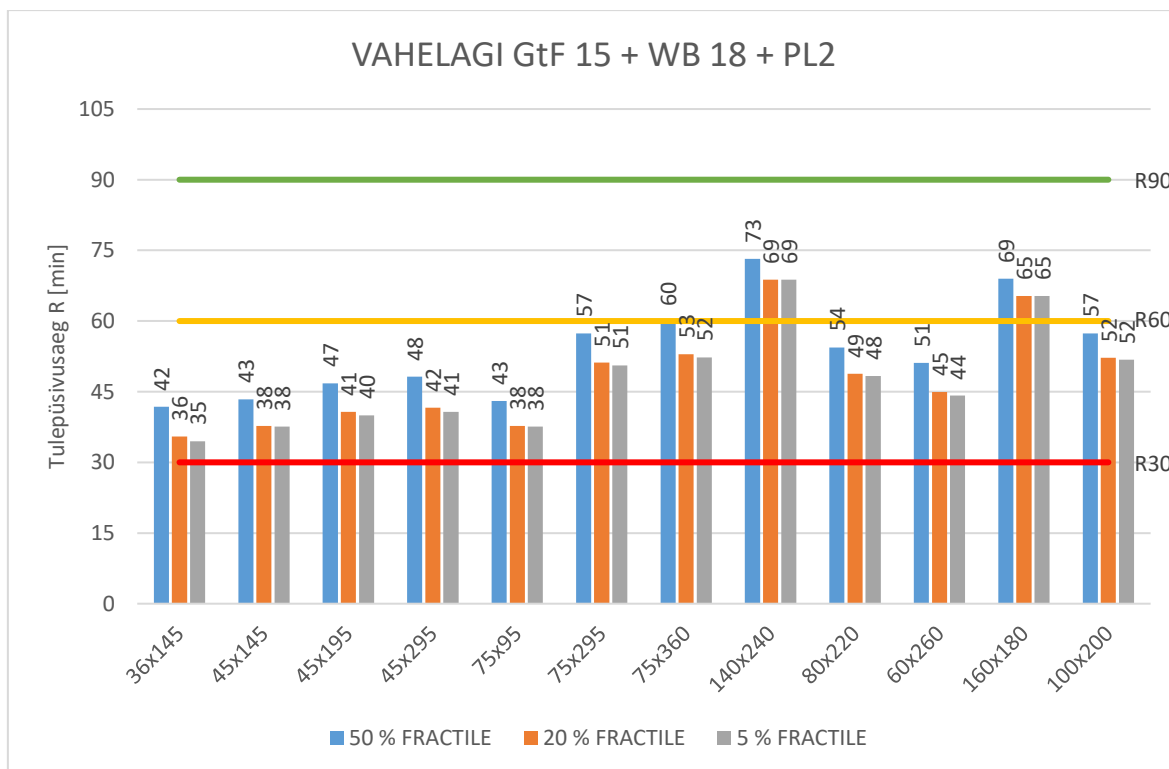
4.10 Puikarkass-vahelaed katteplaatidega GtF 15 ja WB 18

F-tüüpi kipsplaadiga GtF 15 ja puitlaastplaadiga WB 18 kaetud ning kivivillaga (isolatsioonitase PL1) soojustatud puitkarkass-vahelagede tulepüsivusajad on esitatud graafikul 4.19. Arvutustulemustest järeldub, et väikeste ristlõigetega konstruktsioonide arvutuslik tulepüsivus on parem kui kasutada kipsplaadi ajalisel pikemat tõrketekkeajaga. Suuremate ristlõigete puhul saavutatakse aga lühema tõrketekkeajaga karkassi suurem tulepüsivusaeg. See tuleneb isolatsioonimaterjali PL1 puhul arvutusi mõjutavatest lõplikust ajast t_{fin} ning järelkaitsetegurist $k_{3,1}$. Viimase arvutus sõltub tõrketekkeajast. Seega suurema tõrketekkeajaga katteplaadid küll püsivad tules kauem, kuid sellest tingituna põleb puit faasis 3 kiiremini.

Kipsplaadiga GtF 15 ning puitlaastplaadiga WB 18 kaetud ja mineraalvillaga (isolatsioonitase PL2) soojustatud puitkarkass-vahelagede tulepüsivusajad on esitatud graafikul 4.20. Tulpdiaagrammilt järeldub, et kasutades kipsplaadi GtF 15 suuremat tõrketekkeajaga, on konstruktsiooni tulepüsivus parem. Siingi juhul on 20% ja 5% fraktilide arvutustulemused on üpris sarnased. See tuleneb tule poolt esimese katteplaadi GtF 15 20% ja 5% fraktilide tõrketekkeajade vahelisest väga väiksest erinevusest. 50% fraktili puhul on tõrketekkeaja parameetrid märgatavalt suuremad.



Graafik 4.19 Katteplaatidega GtF 15 ja WB 18 ning soojustusega PL1 puitkarkass-vahelagede tulepüsivusaegade võrdlus

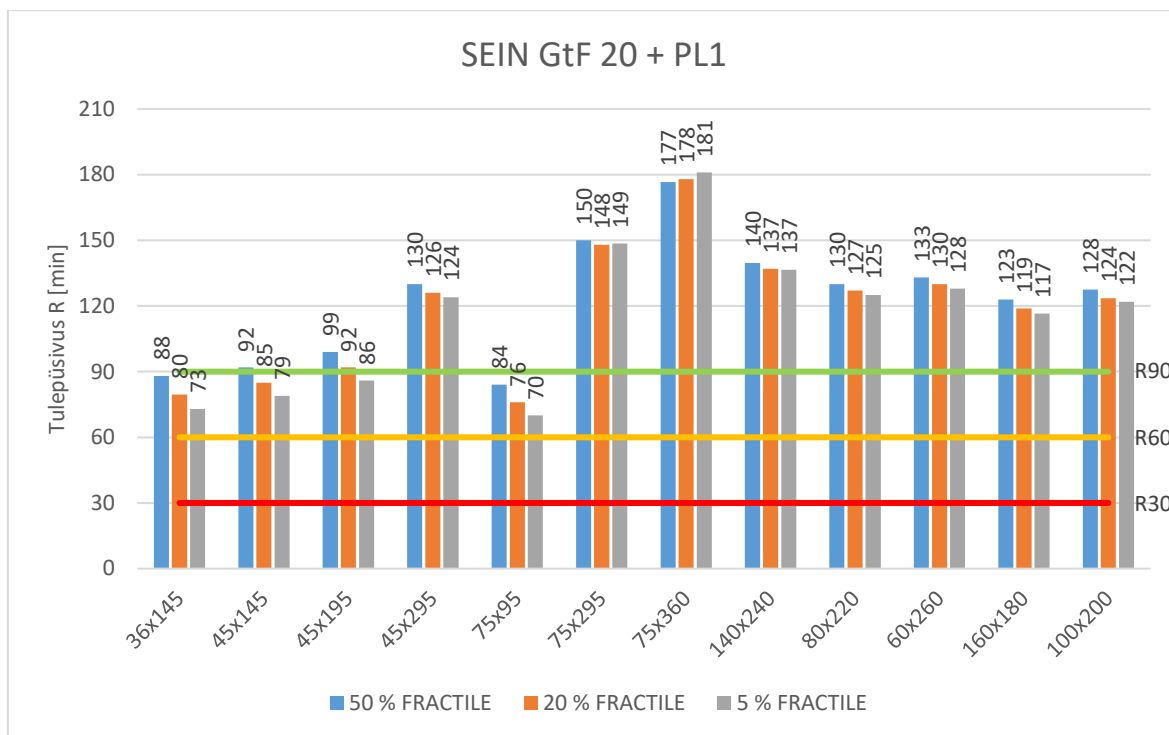


Graafik 4.20 Katteplaatidega GtF 15 ja WB 18 ning soojustusega PL2 puitkarkass-vahelagede tulepüsivusaegade võrdlus

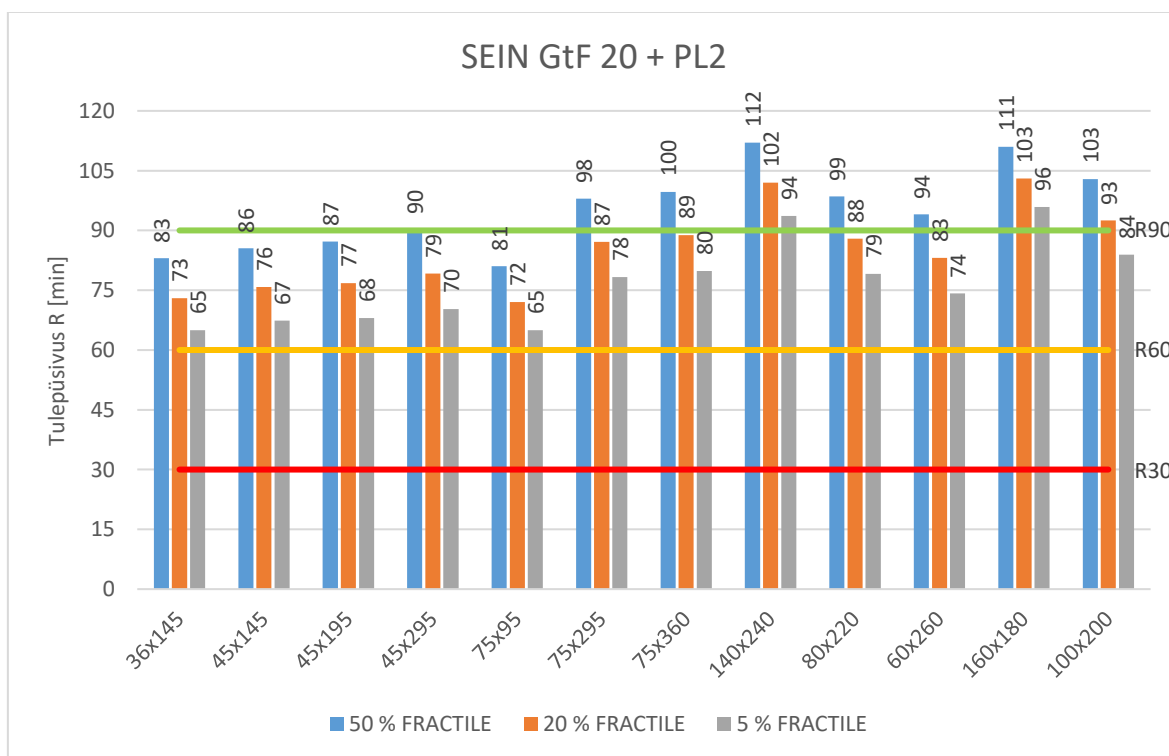
4.11 Puitkarkass-seinad katteplaadiga GtF 20

F-tüüpi kipsplaadiga GtF 20 kaetud ja kivivillaga (isolatsioonitase PL1) soojustatud puitkarkass-seinte tulepüsivusajad on välja toodud graafikul 4.21. Diagrammilt järeldeb, et kasutades kattematerjali suuremat tõrketekkeaja, on enamike ristlõigete korral konstruktsiooni tulepüsivus parem. Seega katteplaadi hilisem lagunemine tagab konstruktsiooni pikema arvutusliku tulepüsivusaja. Ristlõike 75x360 puhul saavutati aga suurim arvutuslik tulepüsivus kipsplaadi väikseima tõrketekkeajaga. See on tingitud ristlõike kõrgusest, lõplikust ajast t_{fin} ning järelkaitsetegurist $k_{3,1}$, mis sõltub otseselt tõrketekkeajast. Seega graafikult järeldeb, et ristlõike 75x360 puhul põleb puit peale katteplaadi lagunemist faasis 3 edasi kiiremini.

Kipsplaadiga GtF 20 kaetud ja mineraalvillaga (isolatsioonitase PL2) soojustatud puitkarkass-seinte tulepüsivusajad on välja toodud graafikul 4.22. Kõik esitatud arvutustulemused vastavad eeldustele. Kui kipsplaat laguneb hiljem, peab puit tules kauem vastu. Seega suurema tõrketekkeajaga kattematerjali puhul on konstruktsiooni tulepüsivusaeg suurem.



Graafik 4.21 Katteplaatidega GtF 20 ja soojustusega PL1 puitkarkass-seinte tulepüsivusaegade võrdlus

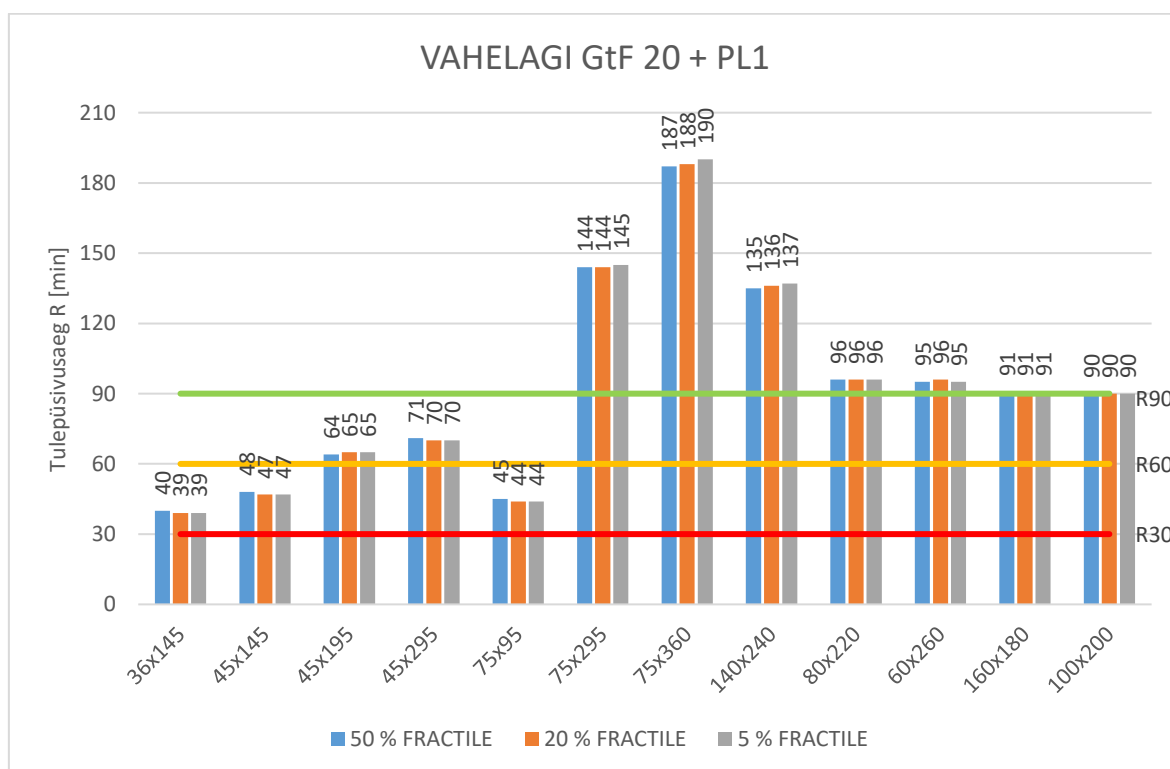


Graafik 4.22 Katteplaatidega GtF 20 ja soojustusega PL2 puitkarkass-seinte tulepüsivusaegade võrdlus

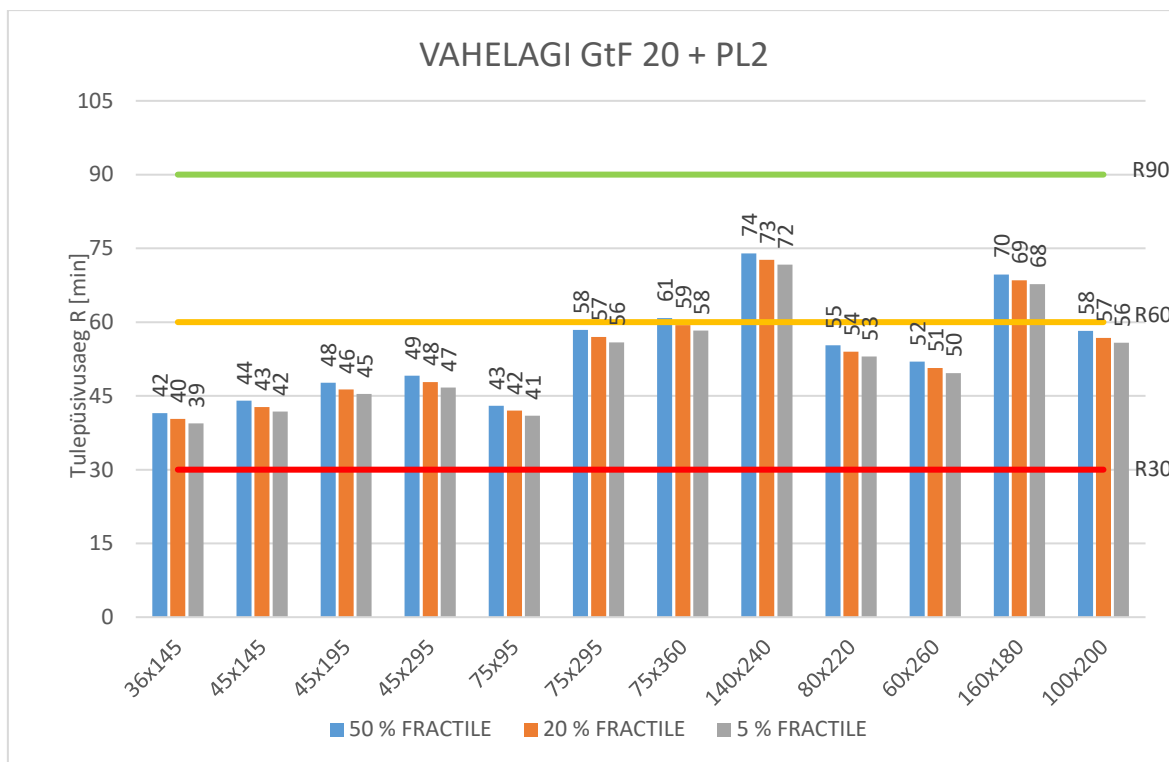
4.12 Puikarkass-vahelaed katteplaadiga GtF 20

F-tüüpi kipsplaadiga GtF 15 kaetud ja kivivillaga (isolatsioonitase PL1) soojustatud puitkarkass-vahelagede tulepüsivusajad on välja toodud graafikul 4.23. Väikeste ristlõigete puhul sõltub tulepüsivus kaitseplaadi tõrketekkeajast – suurem tõrketekkeae tagab parema tulepüsivuse. Suuremate ristlõigete puhul mõjutab tõrketekkeae erinevus puidu tulepüsivusaega minimaalselt või saavutatakse parim tulemus väikseima tõrketekkeajaga. Sellisel juhul kestavad pikema tõrketekkeajaga katteplaadid küll tulekahju korral kauem, kuid nende lagunemisest alates põleb puit faasis 3 kiiremini. Seega isolatsioonitasemega PL1 konstruktsiooni tulepüsivusaega mõjutavad lõplik aeg t_{fin} ning faasi 3 järelkaitsetegur $k_{3,1}$, mis leitakse katteplaadi tõrketekkeaja kaudu.

Kipsplaadiga GtF 20 kaetud ja isolatsiooniga PL2 soojustatud puitkarkass-vahelagede tulepüsivusajad on välja toodud graafikul 4.24. Sellelt järeldub, et kõik arvutustulemused vastavad teoreetilistele eeldustele – kasutades kattematerjali suuremat tõrketekkeaga on konstruktsiooni arvutuslik tulepüsivus parem.



Graafik 4.23 Katteplaatidega GtF 20 ja soojustusega PL1 puitkarkass-vahelagede tulepüsivusaegade võrdlus



Graafik 4.24 Katteplaatidega GtF 20 ja soojustusega PL2 puitkarkass-vahelagede tulepüsivusaegade võrdlus

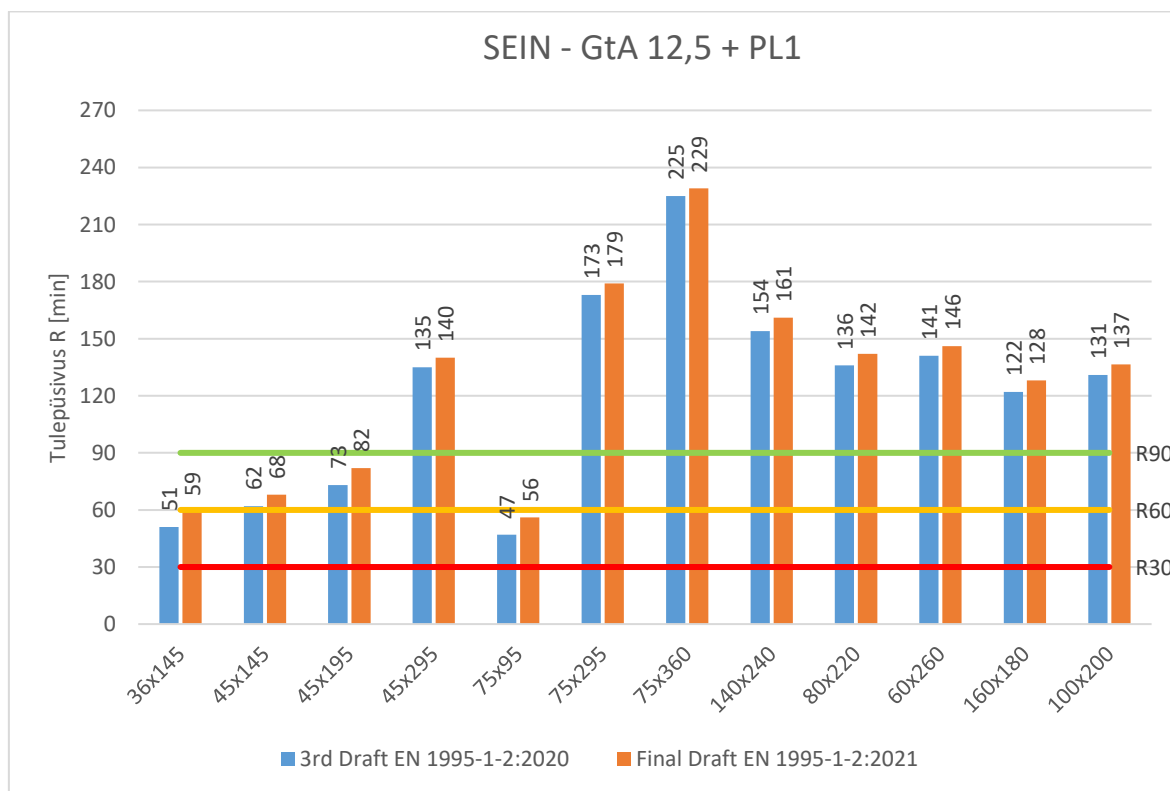
5 NULL-TUGEVUSEGA KIHHI MÕJU ARVUTUSLIKULE TULEPÜSIVUSELE

Käesolevas töös uuriti null-tugevusega kihi mõju puitkarkass-seinte ja vahelagede tulearvutustele. Võrreldi konstruktsioone isolatsioonimaterjaliga PL1. Arvutused tehti standardite EN 1995-1-2:2020 (3. Draft) ja EN 1995-1-2:2021 (Final Draft) põhjal ning mõlemal juhul kasutati tõrketekkeaja 20% fraktiili väärtuseid.

Järgnevates alapeatükkides on välja toodud erinevate katteplaatidega puitkarkass-seinte ja -vahelagede tulepüsivuse arvutusmeetodite tundlikkuse analüüs lähtuvalt null-tugevusega kihist.

5.1 Puikarkass-seinad katteplaadiga GtA 12,5

Graafikul 5.1 on välja toodud kipsplaadiga GtA 12,5 kaetud ja kivivillaga (isolatsioonitase PL1) soojustatud puitkarkass-seinte tulepüsivusaegade võrdlus sõltuvalt d_0 väärtusest. Standardi EN 1995-1-2:2020 (3. kavand) põhjal leitud tulepüsivusajad on kõikide ristlõigete puhul väiksemad. Uue standardi viimase kavandi järgi on seinte null-tugevusega kiht väiksem. Seetõttu on puidu efektiivristlõige suurem ning leitud tulepüsivusaeg pikem.

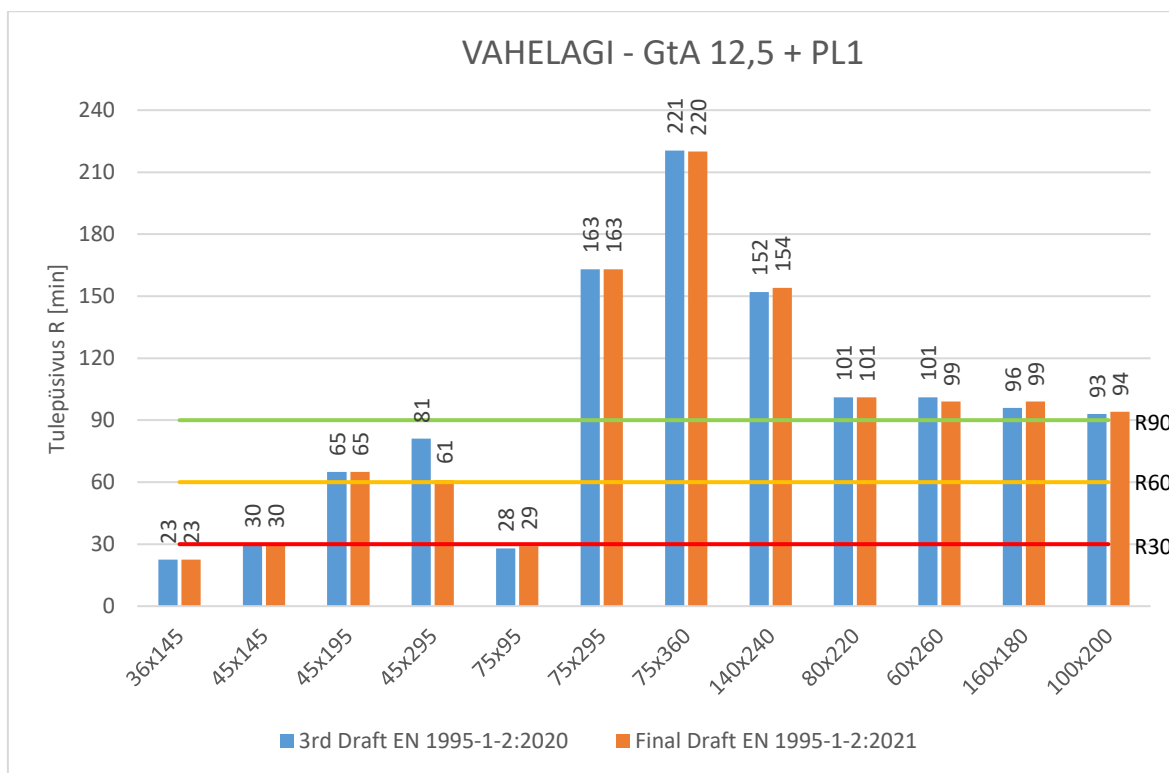


Graafik 5.1 Katteplaadiga GtA 12,5 ja soojustusega PL1 puitkarkass-seinte tulepüsivusaegade võrdlus

5.2 Puikarkass-vahelaed katteplaadiga GtA 12,5

Kipsplaadiga GtA 12,5 kaetud ja kivivillaga (isolatsioonitase PL1) soojustatud puitkarkass-vahelagede tulepüsivusajad on välja toodud graafikul 5.2. Enamike ristlõigete puhul saadud tulemused märkimisväärselt ei erine. Ristlõike 45x295 korral on tulemuste vaheks aga lausa 20 minutit. Kõnealusel juhul on null-tugevusega kihist sõltuvate lõplikute d_0 vahel tunduvalt suurem erinevus kui teiste ristlõigete puhul. Seetõttu on ka EN 1995-1-2:2021 järgi leitud ristlõike 45x295 arvutuslik tulepüsivusaega märgatavalt lühem.

Ristlõigete 75x95, 140x240, 160x180 ja 100x200 puhul on null-tugevusega kiht standardi viimase kavandi järgi veidi väiksem. Seega on nende puhul tulepüsivusaeg suurem, kuna arvutuslik efektiivristlõige on väiksem. Ristlõike 80x220 puhul on saadud tulemused võrdsed, kuna mõlema variandi null-tugevusega kihi parameetrid erinevad üksteisest 0,2 minutit.

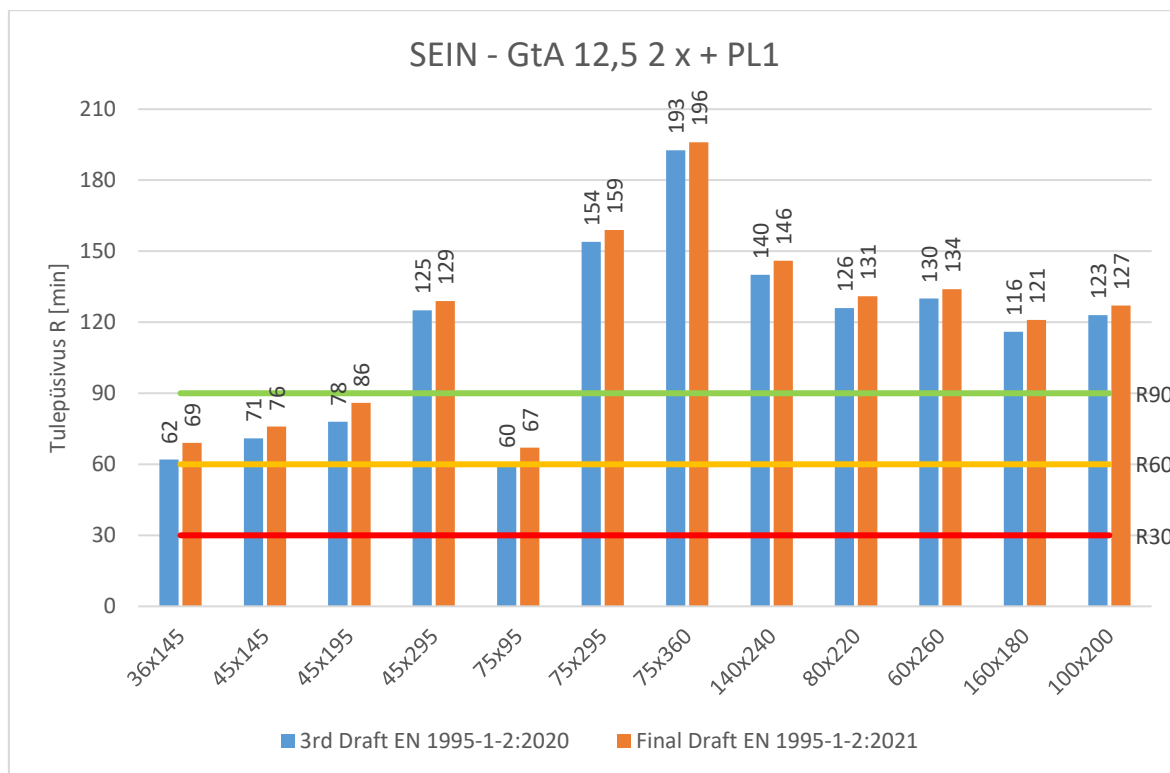


Graafik 5.2 Katteplaadiga GtA 12,5 ja soojustusega PL1 puitkarkass-vahelagede tulepüsivusaegade võrdlus

5.3 Puikarkass-seinad kahekordse kipsplaadiga GtA 12,5

Graafikul 5.3 on välja toodud kahekordse kipsplaadiga GtA 12,5 kaetud ja kivivillaga (isolatsioonitase PL1) soojustatud puitkarkass-seinte tulepüsivusaegade võrdlus sõltuvalt d_0 väärtusest. Sarnaselt ühekordse A-tüüpi kipsplaadiga arvutuste tulemustega, on ka antud juhul standardi EN 1995-1-2:2020 põhjal leitud

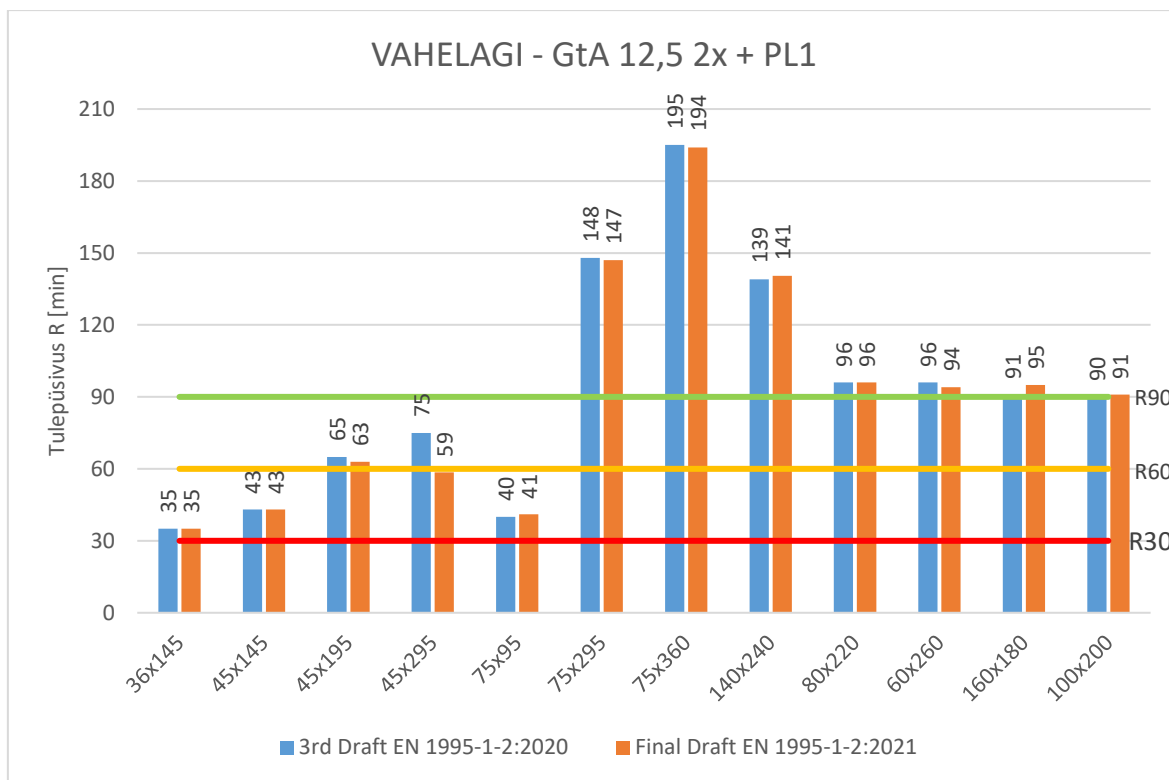
tulepüsivusajad kõikide ristlõigete puhul väiksemad. Seega on tulemused ootuspärased. Uue standardi vanema kavandi järgi on null-tugevusega kihi parameetrid seinte arvutuste puhul suuremad. Suurem null-tugevusega kiht tagab väiksema efektiivristlõike ning see omakorda lühema tulepüsivusaja.



Graafik 5.3 Kahekordse kipsplaadiga GtA 12,5 ja soojustusega PL1 puitkarkass-seinte tulepüsivusaegade võrdlus

5.4 Puitkarkass-vahelaed kahekordse kipsplaadiga GtA 12,5

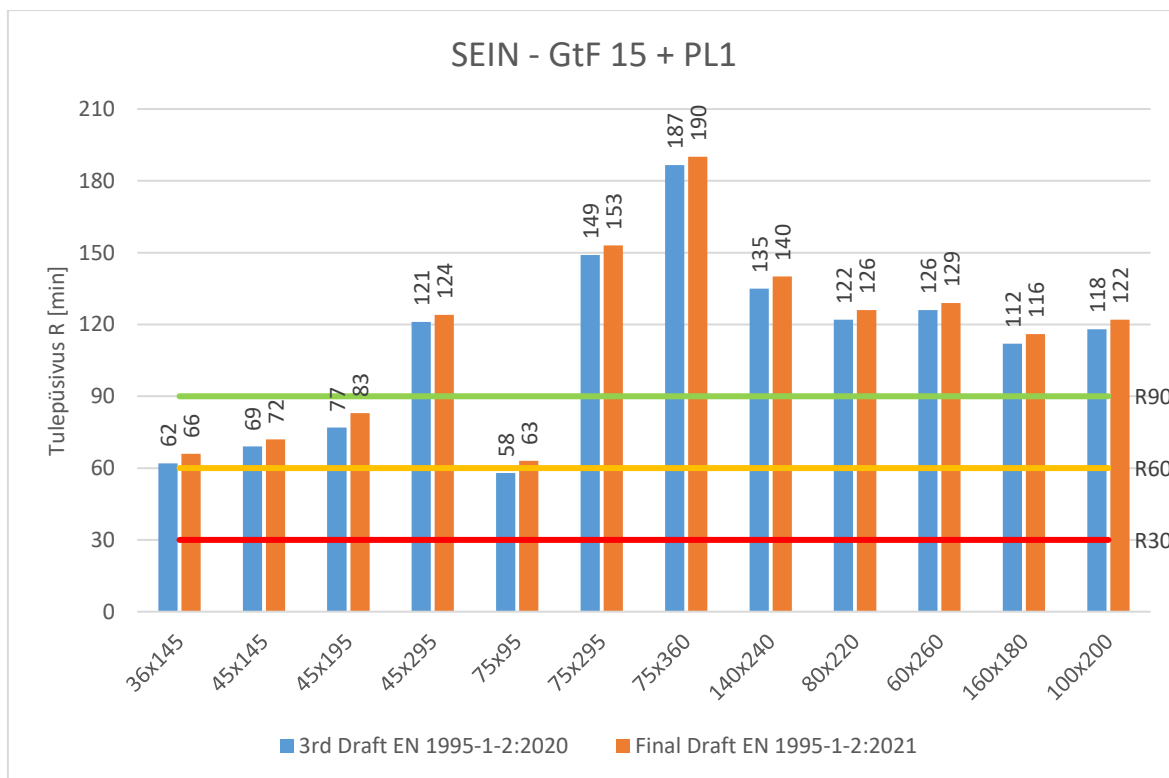
Kahekordse kipsplaadiga GtA 12,5 kaetud ja kivivillaga (isolatsioonitase PL1) soojustatud puitkarkass-vahelagede tulepüsivusajad on välja toodud graafikul 5.4. Graafikult järeldub, et enamus ristlõigete puhul saadud tulemused väga palju ei erine. Ristlõigete 75x95, 140x240, 80x220, 160x180, 100x200 korral on null-tugevusega kiht standardi viimase kavandi järgi veidi väiksem. Seega on nende puhul joonisel oranžiga märgitud tulepüsivusaeg pikem, kuna arvutuslik efektiivristlõige on suurem. Ülejäänud ristlõigete puhul on vanema kavandi järgi leitud null-tugevusega kihi parameeter väiksem ning seetõttu leitud tulepüsivusaeg suurem.



Graafik 5.4 Kahekordse kipsplaadiga GtA 12,5 ja soojustusega PL1 puitkarkass-vahelagede tulepüsivusaegade võrdlus

5.5 Puitkarkass-seinad katteplaadiga GtF 15

F-tüüpi kipsplaadiga GtF 15 kaetud ja kivivillaga (isolatsioonitase PL1) soojustatud puitkarkass-seinte tulepüsivusaegade võrdlus sõltuvalt d_0 väärtusest on esitatud alloleval graafikul 5.5. Sarnaselt eelnevatele arvutustulemustele, on tulemused eeldustekohased. Uue standardi lõpliku kavandi põhjal leitud tulepüsivusajad on kõikide ristlõigete puhul suuremad, sest null-tugevusega kihi parameetrid seinte arvutuste puhul selles on väiksemad. Väiksem null-tugevusega kiht tagab suurema efektiivristlõike ning see omakorda pikema tulepüsivusaja.

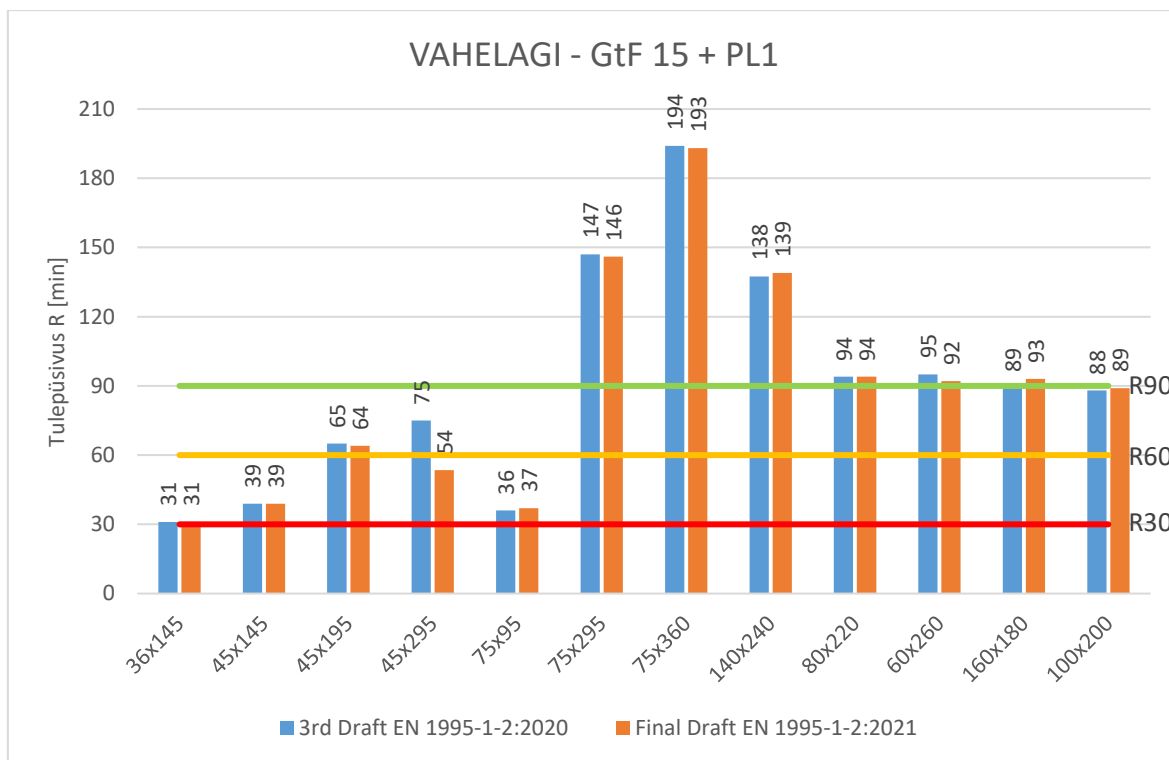


Graafik 5.5 Kipsplaadiga GtF 15 ja soojustusega PL1 puitkarkass-seinte tulepüsivusaegade võrdlus

5.6 Puitkarkass-vahelaed katteplaadiga GtF 15

Kipsplaadiga GtF 15 kaetud ja kivivillaga (isolatsioonitase PL1) soojustatud puitkarkass-vahelagede tulepüsivusajad on välja toodud graafikul 5.6. Diagrammilt järeldub, et enamus ristlõigete puhul on null-tugevusega kihi mõju konstruktsiooni tulepüsivusele minimaalne. Mõlema kavandi järgi arvutades on null-tugevusega kihtide väärtused üsna sarnased, seetõttu on tulemused ligilähedased.

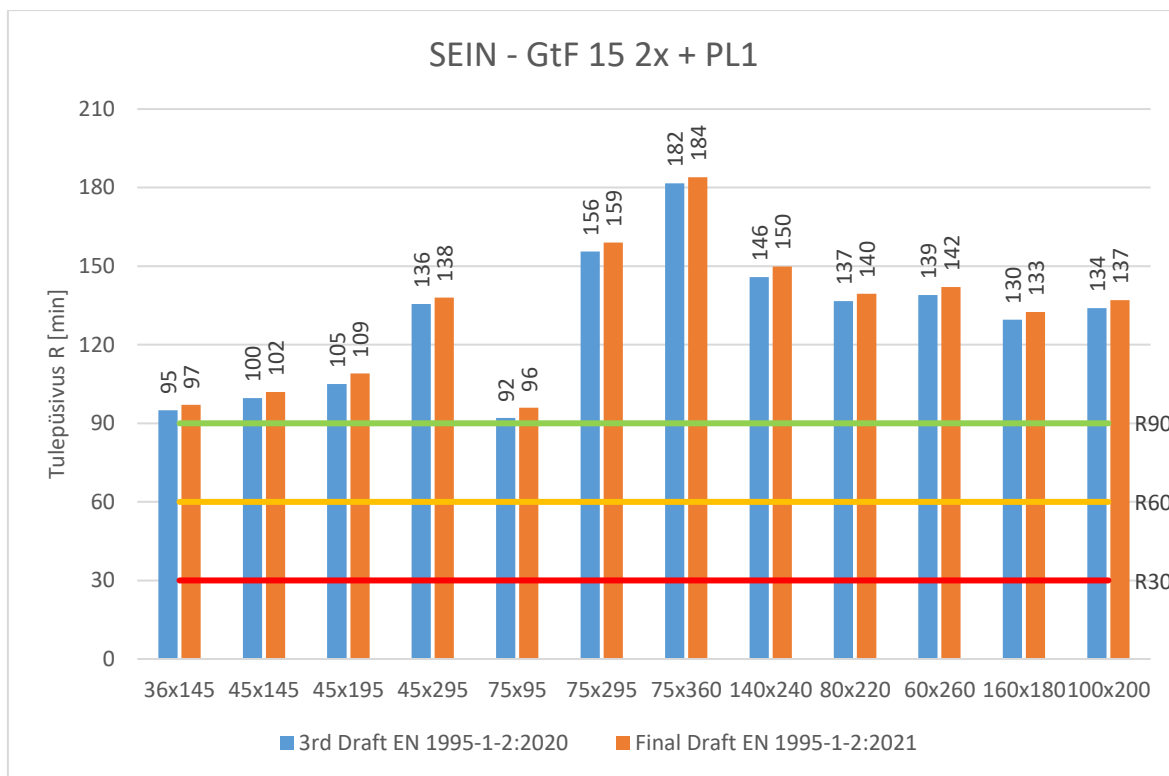
Ristlõike 45x295 puhul on saadud tulemuste erinevus aga 21 minutit. Teiste ristlõigetega võrreldes on 45x295 mm puitristlõike puhul d_0 parameetrite erinevus standardi kahe kavandi järgi arvutades suurim. Standardi lõpliku kavandi järgi on null-tugevusega kiht suurem, seetõttu on ka tulepüsivus ajaliselt lühem.



Graafik 5.6 Kipsplaadiga GtF 15 ja soojustusega PL1 puitkarkass-vahelagede tulepüsivusaegade võrdlus

5.7 Puitkarkass-seinad kahekordse kipsplaadiga GtF 15

Kahekordse F-tüüpi kipsplaadiga GtF 15 kaetud ja kivivillaga (isolatsioonitase PL1) soojustatud puitkarkass-seinte tulepüsivusaegade võrdlus sõltuvalt d_0 väärtusest on esitatud graafikul 5.7. Graafikult järeldeb, et uue standardi lõpliku kavandi põhjal leitud tulepüsivusajad on kõikide ristlõigete puhul suuremad. Null-tugevusega kihi parameetrid seinte arvutuste puhul on standardi hilisemas versioonis väiksemad. Seetõttu on selle põhjal arvutatud efektiivristlõige suurem ning leitud arvutuslik tulepüsivus parem.

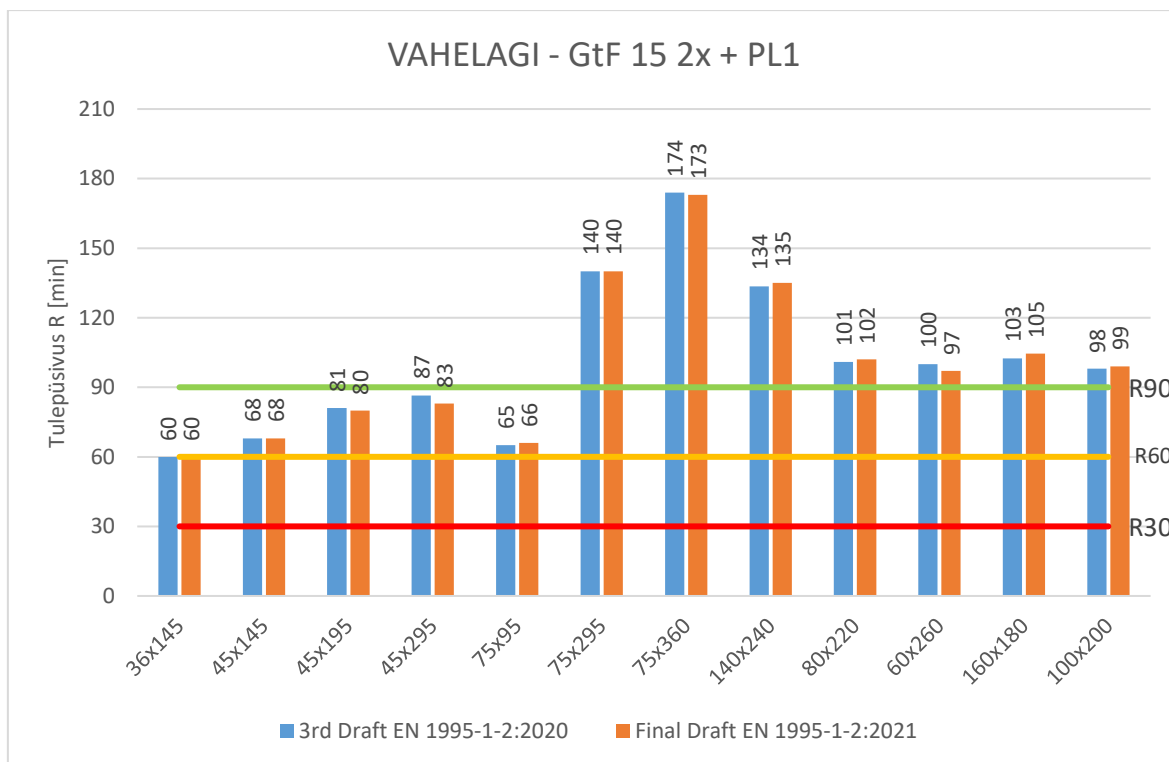


Graafik 5.7 Kahekordse kipsplaadiga GtF 15 ja soojustusega PL1 puitkarkass-seinte tulepüsivusaegade võrdlus

5.8 Puitkarkass-vahelaed kahekordse kipsplaadiga GtF 15

Kahekordse F-tüüpi kipsplaadiga GtF 15 kaetud ja kivivillaga (isolatsioonitase PL1) soojustatud puitkarkass-vahelagede tulepüsivusajad on välja toodud graafikul 5.8. Null-tugevusega kihi parameetrite mõju on enamus ristlõigete puhul minimaalne.

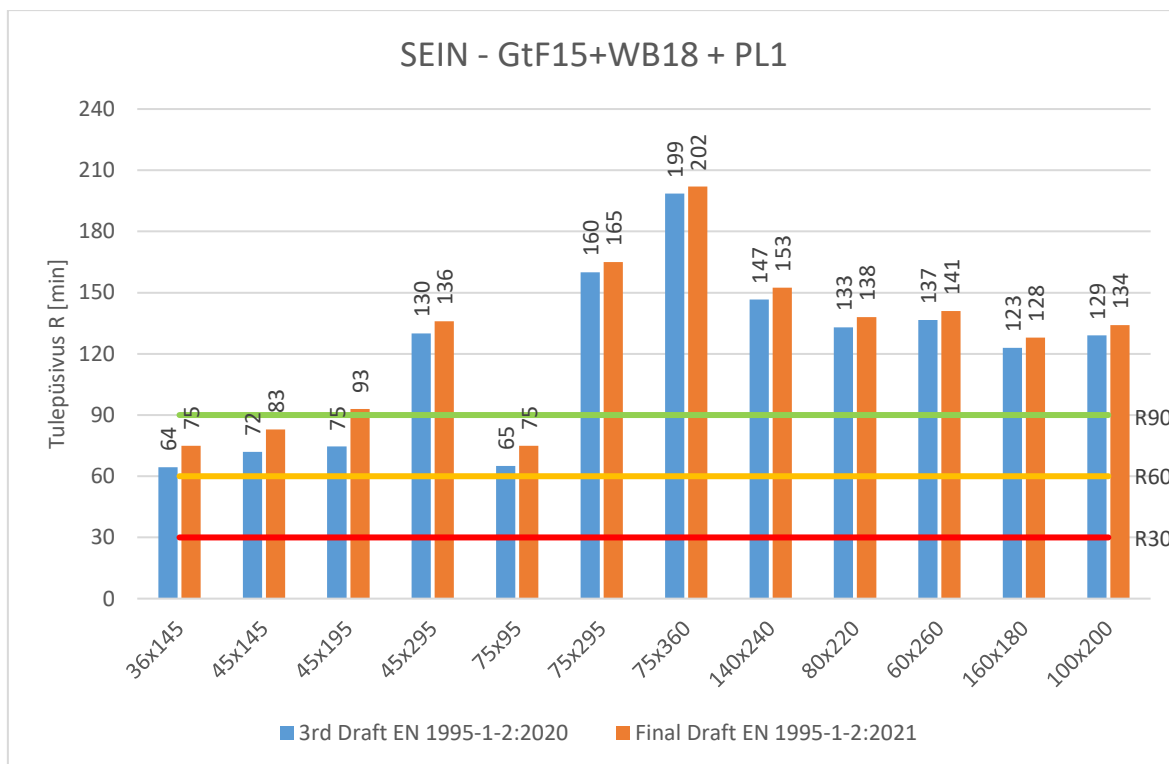
Ristlõigete 75x95, 140x240, 160x180, 100x200 puhul on standardi EN 1995-1-2:2021 do tingimuste järgi lõplik tulepüsivus veidi parem. See on tingitud nende ristlõigete väiksematest null-tugevustega kihi parameetritest. Seega on arvutatud efektiivristlõige suurem ja saadud tulepüsivusaeg pikem.



Graafik 5.8 Kahekordse kipsplaadiga GtF 15 ja soojustusega PL1 puitkarkass-vahelagede tulepüsivusaegade võrdlus

5.9 Puitkarkass-seinad katteplaadiga GtF 15 ja WB 18

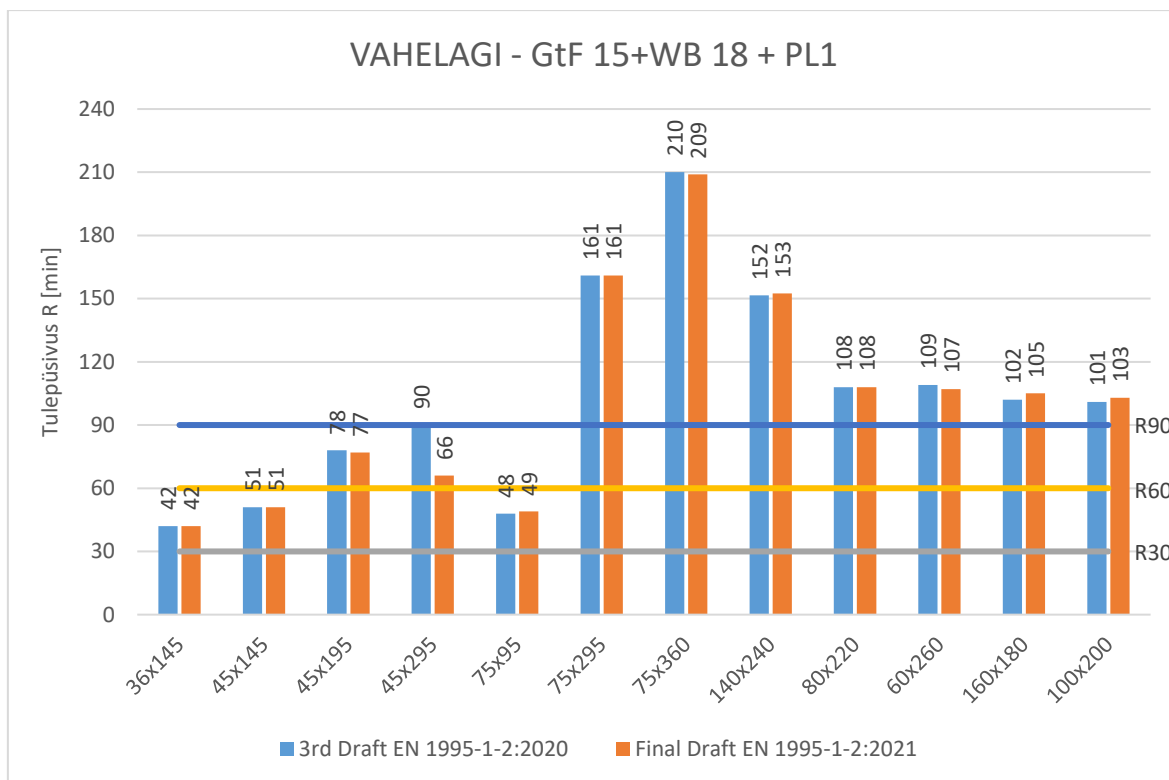
Kipsplaadiga GtF 15 ja puitlaastplaadiga WB 18 kaetud ja kivivillaga (isolatsioonitase PL1) soojustatud puitkarkass-seinte tulepüsivusaegade võrdlus sõltuvalt d_0 väärtusest on esitatud graafikul 5.9. Arvutustulemused näitavad, et uue standardi vanema kavandi põhjal leitud tulepüsivusajad on kõikide ristlõigete puhul lühemad. Null-tugevusega kihi parameetrid seinte arvutuste puhul on selles standardi versioonis suuremad. Seega on leitud efektiivristlõige väiksem ning arvutuslik tulepüsivusaeg lühem.



Graafik 5.9 Katteplaatidega GtF 15 ja WB 18 ning soojustusega PL1 puitkarkass-seinte tulepüsivusaegade võrdlus

5.10 Puikarkass-vahelaed katteplaadiga GtF 15 ja WB 18

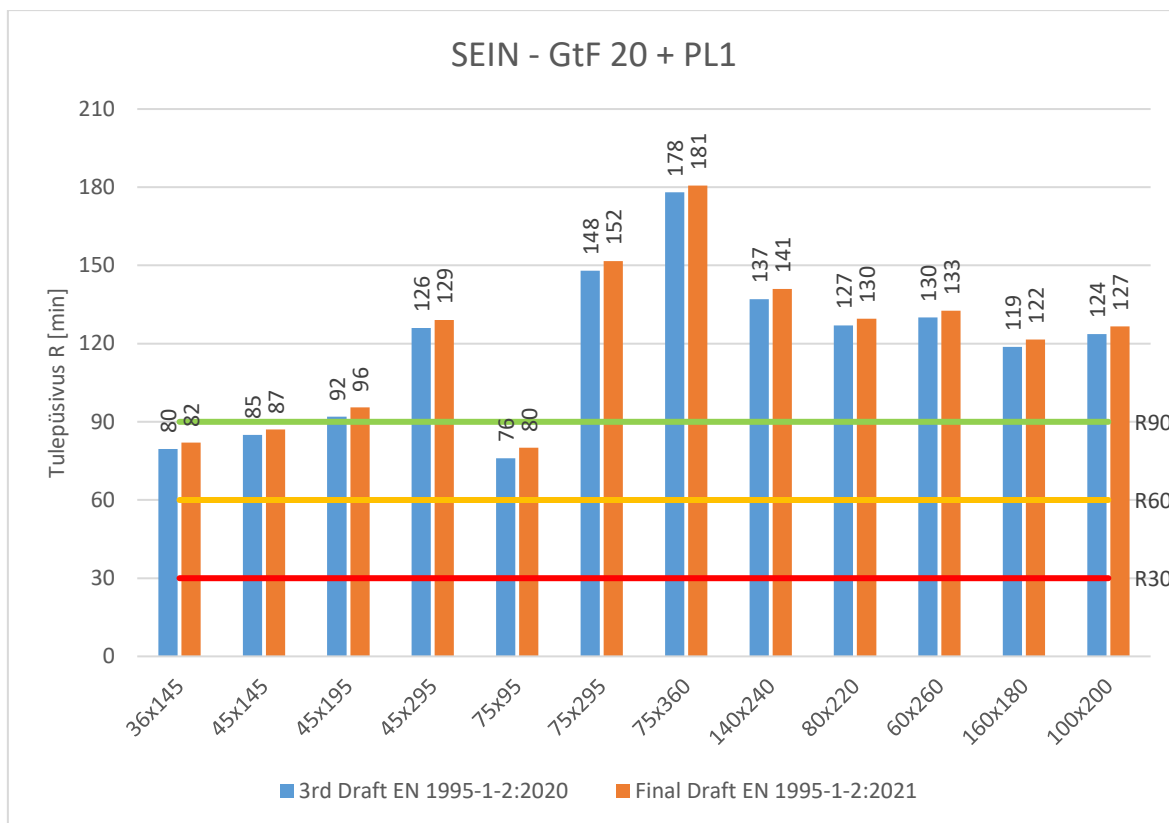
Kipsplaadiga GtF 15 ja puitlaastplaadiga WB 18 kaetud ja kivivillaga (isolatsioonitase PL1) soojustatud puitkarkass-vahelagede tulepüsivusajad sõltuvalt null-tugevusega kihist on välja toodud graafikul 5.10. Null-tugevusega kihi mõju on enamuse ristlõigete puhul minimaalne, kuna standardi mõlema kavandi järgsed d_0 parameetrite väärtused on sarnased. Väiksem null-tugevusega kiht tagab suurema efektiivristlõike, mis omakorda pikendab tulepüsivusaega. Ristlõike 45x295 puhul on aga tulemuste erinevus 24 minutit. Antud juhul on null-tugevusega kihist sõltuvate lõplikute d_0 vahel tunduvalt suurem erinevus kui teiste ristlõigete puhul. Seetõttu on ka EN 1995-1-2:2020 järgi leitud ristlõike 45x295 arvutuslik tulepüsivusaeg märgatavalt pikem.



Graafik 5.9 Katteplaatidega GtF 15 ja WB 18 ning soojustusega PL1 puitkarkass-vahelagede tulepüsivusaegade võrdlus

5.11 Puikarkass-seinad katteplaadiga GtF 20

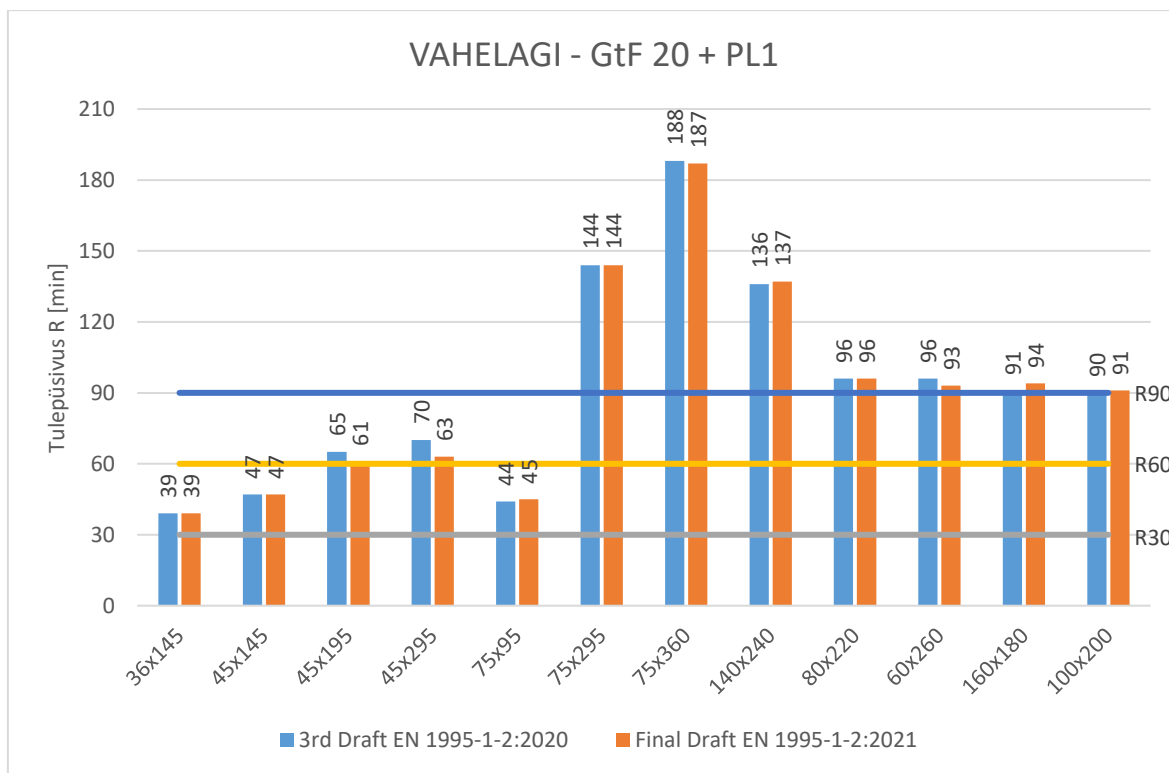
Kipsplaadiga GtF 20 kaetud ja kivivillaga isolatsioonitasemega PL1 soojustatud puitkarkass-seinte tulepüsivusaegade võrdlus sõltuvalt d_0 väärtusest on esitatud graafikul 5.11. Tulpdiagrammilt järeldeb, et uue standardi lõpliku versiooni järgi leitud arvutuslikud tulepüsivusajad on kõikide vaadeldavate ristlõigete puhul pikemad. EN 1995-1-2:2021 järgi arvutades on null-tugevusega kihid kõigi ristlõigete korral väiksemad. Seetõttu on ka nende efektiivristlõiked ning arvutuslikud tulepüsivused suuremad.



Graafik 5.11 Katteplaadiga GtF 20 ning soojustusega PL1 puitkarkass-seinte tulepüsivusaegade võrdlus

5.12 Puikarkass-vahelaed katteplaadiga GtF 20

Kipsplaadiga GtF 20 kaetud ja kivivillaga isolatsioonitasemega PL1 soojustatud puitkarkass-vahelagede tulepüsivusajad sõltuvalt null-tugevusega kihist on välja toodud graafikul 5.12. Sellelt järeldub, et null-tugevusega kihi mõju antud konstruktsioonide puhul on väike. Minimaalne erinevus tuleneb sellest, et nii EN 1995-1-2:2020 kui EN 1995-1-2:2021 järgi arvutades tulevad d_0 parameetrid sarnased. Kui arvutuslik null-tugevusega kiht on suurem, siis efektiivristlõige on väiksem ja selle kaudu leitav tulepüsivusaeg lühem.



Graafik 5.12 Katteplaadiga GtF 20 ning soojustusega PL1 puitkarkass-vahelagede tulepüsivusaegade võrdlus

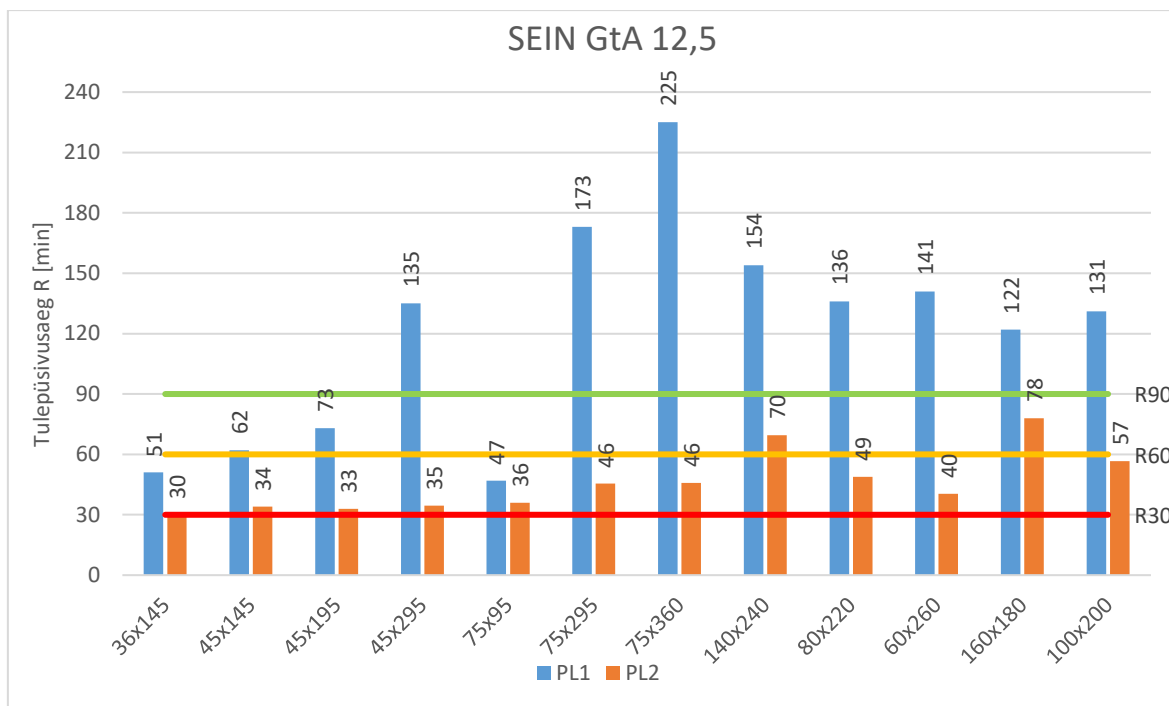
6 ISOLATSIOONI MÕJU ARVUTUSLIKULE TULEPÜSIVUSELE

Lisaks tõrketekkeaja ja null-tugevusega kihi parameetritele vaadeldi käesolevas töös ka isolatsiooni mõju puitkarkass-konstruktsioonide arvutuslikule tulepüsivusele. Kõik arvutused tehti läbi kasutades puitkarkassi isolatsioonimaterjalina nii kivivilla kui klaasvilla. Neist esimene kvalifitseerub kaitsetaseme PL1 alla ning teine vastab kaitsetasemele PL2 [4]. Kivivill on tulekindel materjal, seega PL1 puhul söestub puit vaid tulepoolsel küljel. Klaasvillaga karkassi puhul saab puit tulekahjukorral söestuda kolmest küljest.

Järgnevates alapeatükkides on välja toodud isolatsiooni mõju puitkarkass-seinte ja -vahelagede tulepüsivuse arvutustulemustele. Võrreldi erineva isolatsioonimaterjaliga puitkarkass-konstruktsioonide EN 1995-1-2:2020 järgseid tulepüsivusarvutusi, milles kasutati tõrketekkeaja 20% fraktiili.

6.1 Isolatsiooni mõju puitkarkass-seinte arvutuslikule tulepüsivusele

Kõikide vaadeldavate katematerjalidega puitkarkass-seinte puhul on kivivillaga soojustatud konstruktsioonide arvutuslik tulepüsivus kordades suurem. PL2 kaitsetasemega soojustusmaterjali puhul saab puit söestuda kolmest küljest, seega väheneb efektiivristlõige kiiremini ning puit-karkass peab tules lühemat aega vastu. Väiksemate ristlõigete puhul on mõjutab isolatsioonimaterjali valik konstruktsiooni tulepüsivust vähem kui suuremate ristlõigete korral.



Graafik 6.1 Kipsplaadiga GtA 12,5 kaetud puitkarkass-seinte tulepüsivusaegade võrdlus sõltuvalt isolatsioonitüübist

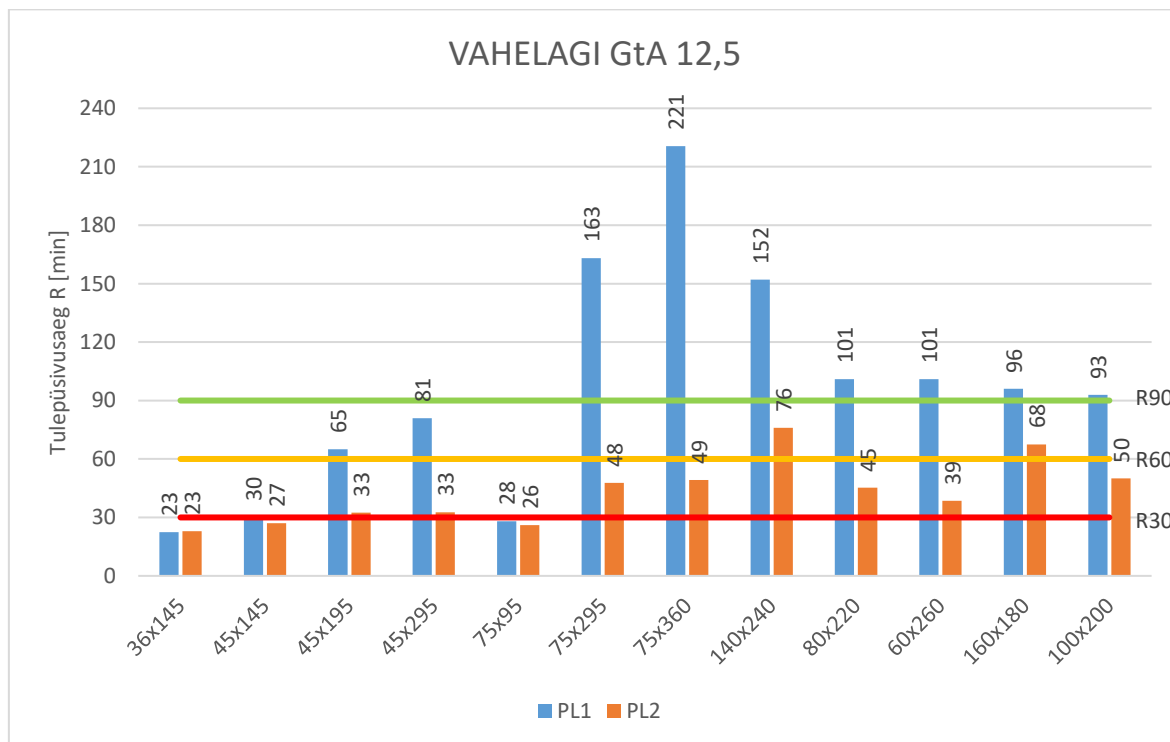
Graafikul 6.1 on kujutatud A-tüüpi kipsplaadiga GtA 12,5 kaetud puitkarkass-seinte tulepüsivusaegade võrdlus sõltuvalt isolatsioonimaterjali tüübist. Diagrammil esitatud tulemustest järeldub, et klaasvilla puhul on saadud tulepüsivusajad 23-79% väiksemad kui kivivillaga soojustatud puitkarkass-seinte arvutustulemused. Väikseim erinevus (23%) on 75x95 mm ristlõike puhul. Siinkohal on tegemist mõõtmetelt väiksema ristlõikega, mille laiuse ja kõrguse suhe on teiste ristlõikega võrreldes suurem. Suurim tulemustevaheline erinevus (79%) on 75x360 mm puitristlõikega karkassil. Kivivilla puhul sõestub puit ühelt poolt ning kõnealuse ristlõike kõrgusest tulenevalt on sõestumise lõplik aeg t_{fin} võrdlemisi pikk. Lõplik aeg leitakse interpoleerimise teel tingimustel, et sõestumissügavus on saavutanud ristlõike kõrguse ($d_{char,n,1} = h$). Klaasvilla puhul sõestub puit kolmest küljest. Antud juhul on tegemist väikse laiusega ristlõikega, seega isolatsioonipoolsete külgede sõestumine faasis 3 on üsna kiire.

Ülejäänud arvutustes kasutatud kattematerjalide puhul on soojustusmaterjali põhised võrdlusgraafikud puitkarkass-seinte tulepüsivuses välja toodud lisas 6.

6.2 Isolatsiooni mõju puikarkass-vahelagede arvutuslikule tulepüsivusele

Sarnaselt seinte arvutustulemustele on ka kõikide vaadeldavate vahelagede arvutuslik tulepüsivus kivivillaga karkasside puhul suurem kui kasutades soojustusena klaasvilla. Kivivill on tulekindel materjal, seega saab puit sõestuda vaid ühest küljest. Seetõttu on

puut isolatsioonipoolsetest külgedest rohkem kaitstud ja arvutuslik tulepüsivus on suurem.



Graafik 6.2 Kipsplaadiga GtA 12,5 kaetud puitkarkass-vahelagede tulepüsivusaegade võrdlus sõltuvalt isolatsioonitüübist

Graafikul 6.2 on esitatud A-tüüpi kipsplaadiga GtA 12,5 kaetud puitkarkass-vahelagede tulepüsivusaegade võrdlus sõltuvalt isolatsioonimaterjali tüübist. Arvutustulemustest järeldub, et kivivillaga karkasside tulepüsivusajad on enamike ristlõigete puhul suuremad kui klaasvillaga soojustatud vahelagede korral. Väikseima kasutatud ristlõikega (36x145 mm) karkassil on mõlema isolatsioonitaseme juures saadud tulemused võrdsed. Mõlemal vaadeldaval juhul on $d_{char,n,1}$ võrdne ja PL2 puhul isolatsioonipoolse külje söestumissügavus ligilähedane kivivillaga konstruktsiooni arvutusliku null-tugevusega kihi paksusele. Seetõttu on leitud efektiivristlõiked sarnased ja sellest tulenevalt ka tulepüsivusajad.

Ristlõike 75x360 mm puhul on tulemustevaheline erinevus suurim – klaasvillaga vahelaekarkassi arvutuslik tulepüsivus on 78% väiksem kivivillaga soojustatud konstruktsiooni arvutustulemusest. See tuleneb ristlõike laiuse ja kõrguse ligi 5 kordsest erinevusest. Kivivillaga vahelaekonstruktsiooni puhul on söestumise lõplik aeg t_{fin} üsna pikk. See leitakse interpoleerimise teel tingimustel, et söestumissügavus on saavutanud ristlõike kõrguse ($d_{char,n,1} = h$). PL2 puhul algab söestumine isolatsioonipoolsetel

külgedel küll 8 minutit hiljem tulepoolsekülje söestumise algusajast, kuid kuna tegemist on kitsa ristlõikega, jõuab söestumine üsna kiirelt kandevõime piirini.

Ülejäänud arvutustes kasutatud kattematerjalide puhul on soojustusmaterjali põhised võrdlusgraafikud puitkarkass-vahelagede tulepüsivuses välja toodud lisa 7.

7 ARVUTUSLIKU TULEPÜSIVUSE KONTROLLIMINE TULEKATSETEGA

Üheks käesoleva töö ülesandeks oli võrrelda varasemalt tehtud tulekatseid uue standardi järgsete arvutustulemustega. Vaadeldi 10 puitkarkass-vahelae ning 10 puitkarkass-seinte tulekatset. Katseandmed ja tulemused on võetud varasemalt tehtud tulekatsete andmebaasist [11]. Katsete andmetele põhinedes arvutati uue Eurokoodeksi kavandi EN 1995-1-2:2020 alusel samade konstruktsioonide maksimaalsed tulepüsivusajad etteantud koormuste korral. Iga katse kohta tehti kolm arvutust kasutades erinevaid tõrketekkeageade väärtuseid vastavalt kipsplaatidega kaetud puitkarkass-konstruktsioonide tulekatsete andmebaasile [6].

Uuritud tulekatsete andmebaasis oli küll puitkarkass-seinte ja -vahelagede katseid rohkem, kuid töös sai kasutada neist vaid 20. Ülejäänud katsetel puudusid arvutuste lähteandmetena vajalikud parameetrid nagu tugevus ja tulepüsivusaeg, kuna paljud tulekatsed lõpetati enne konstruktsiooni täielikku purunemist.

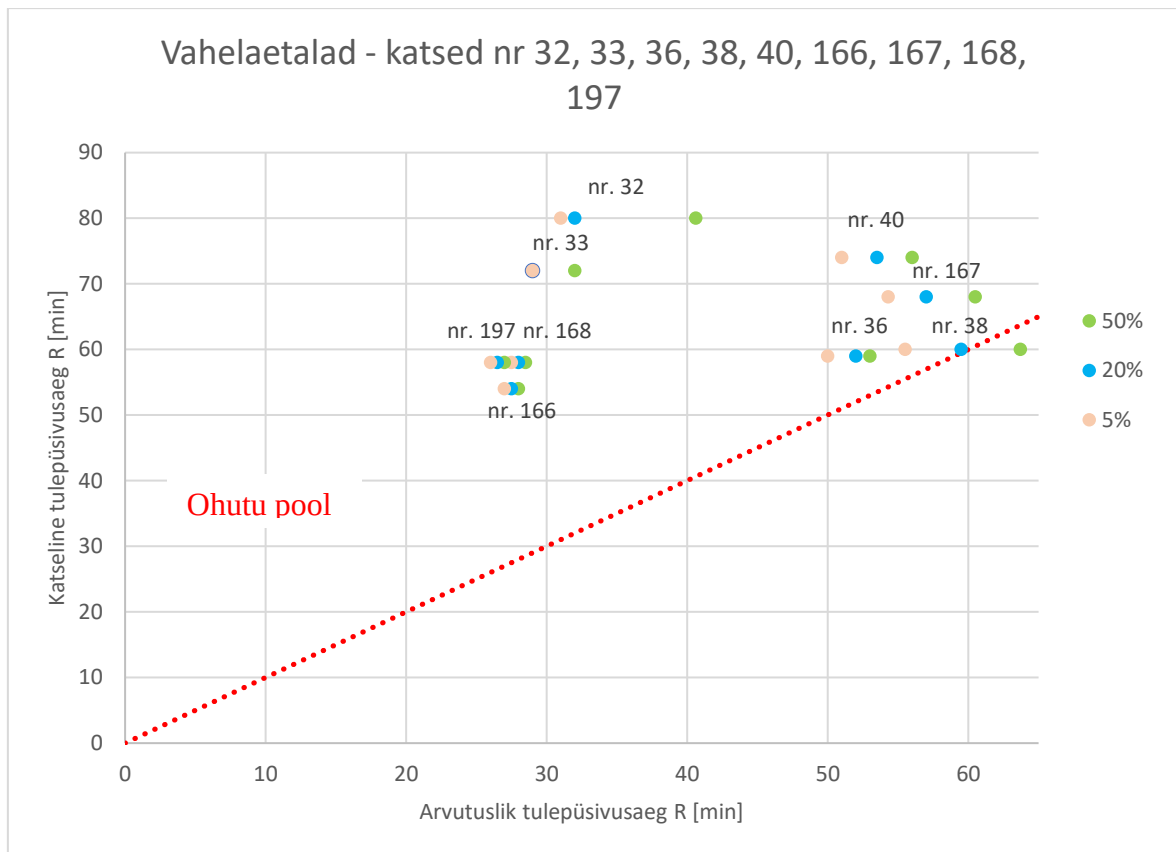
7.1 Puikarkass-vahelagede katsetel põhinevad tulepüsivusarvutused

Puitkarkass-vahelagede puhul vaadeldi kokku 10 eelnevalt tehtud tulekatset. Uue standardi põhjal tehtud arvutustest jäi üks katse välja, kuna kirjeldatud konstruktsiooni arvutuslik kandevõime ei olnud rakendatud koormuse jaoks tavaolukorras piisav. Allolevas tabelis 7.1 on välja toodud katsetatud vahelaetalade esialgsed ristlõiked, karkassides kasutatud isolatsiooni- ja kattematerjalid, rakendatud koormused ning tulekatsetega saadud tulepüsivusajad.

Katse nr.	32	33	36	38	40	166	167	168	197
Ristlõike Kõrgus [mm]	235	235	235	235	235	235	235	235	235
Ristlõike laius [mm]	38	38	38	38	38	38	38	38	38
Katteplaat	GtF 12,7	GtF 12,7	2x GtF 12,7	2x GtF 12,7	2x GtF 12,7	GtF 15,9	2x GtF 12,7	2x GtF 12,7	GtF 15,9
Maksimaalne paindemoment [kNm]	4,5	4,5	4,5	4,5	6,0	6,0	5,5	5,9	6,2
Tulele avatud külgi	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Soojustus	PL2 (GW)	PL1 (RW)	PL1 (RW)	PL2 (GW)	PL2 (GW)	PL1 (RW)	PL2 (GW)	PL1 (RW)	PL1 (RW)
Katse tulepüsivusaeg	EI 80	EI 72	EI 59	EI 60	R 74	R 54	R 68	R 58	R 58

Tabel 7.1 Puitkarkass-vahelagede tulekatsete andmed [11]

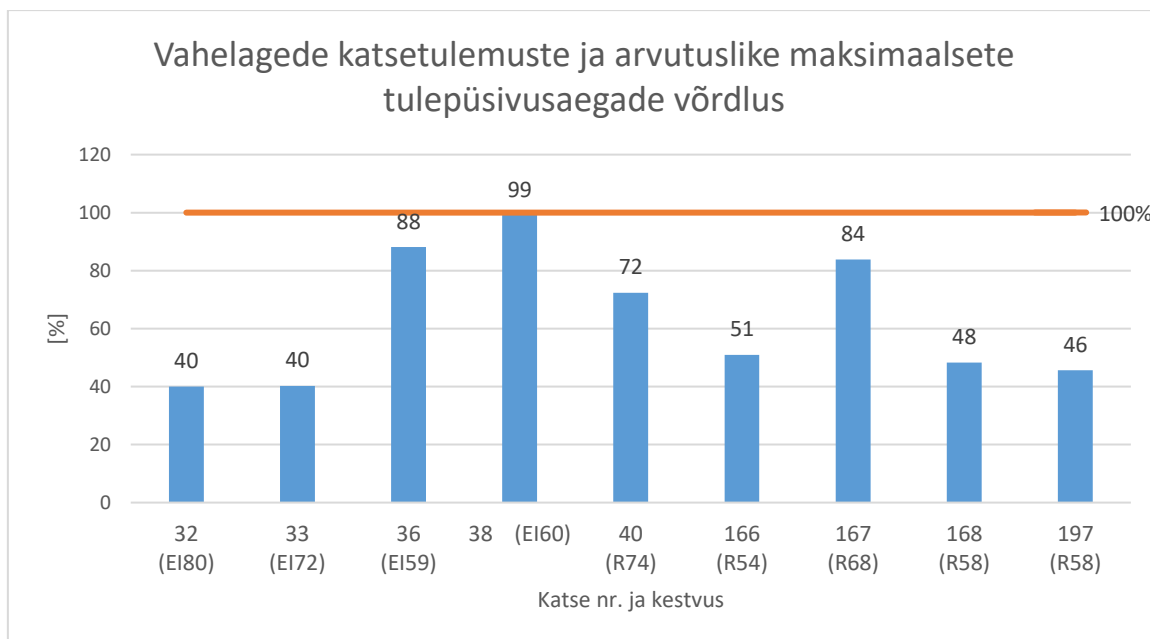
Tabeli 7.1 katseandmete põhjal tehti vahelae-karkassidele tulepüsivusarvutused tuginedes standardile EN 1995-1-2:2020. Arvutuste eesmärgiks oli leida maksimaalne tulepüsivusaeg konstruktsioonile rakendatud koormuse juures. Kõik arvutused tehti läbi kolm korda kasutades erinevaid tõrketekkeageade väärtuseid vastavalt kipsplaatidega kaetud puitkarkass-konstruktsioonide tulekatsete andmebaasile [6]. Arvutustulemused on näidatud graafikul 7.1. Sellelt järeldub, et arvutuslikult jäid kõik katsed niiõelda ohutule poolele ehk katseline tulepüsivusaeg oli suurem kui arvutuslik tulepüsivus (väljaarvatud katse nr 38, t_f 50%).



Graafik 7.1 Puitkarkass-vahelagede tulekatse tulemuste ja arvutuslike tulepüsivusaegade võrdlus

Tulemuste põhjal arvutati, kui palju moodustas protsendiliselt konstruktsiooni arvutuslik tulepüsivus katsetulemusest. See leiti seosest 7.1. Katsetulemusi võrreldi arvutustega, milles kasutati tõrketekkeaja 20 % fraktiili. Saadud tulemused on kajastatud graafikul 7.2.

$$\frac{\text{arvutuslik tulemus}}{\text{katsetulemus}} \cdot 100\%, \quad (7.1)$$



Graafik 7.2 Puitkarkass-vahelagede tulekatse tulemuste ja arvutuslike maksimaalsete tulepüsivusaegade võrdlus

Märkus: Katsete kestvuse tähises tähendab EI, et kriteerium EI saavutati, aga R mitte (varingut ei toimunud).

Graafikult 7.2 on näha, et vaadeldud katsete arvutuslikud tulepüsivusajad ei ületa konstruktsioonide katselisi tulepüsivusi, mis on joonisel kujutatud 100% joonega. Seega on saadud tulemused tagavara kasuks.

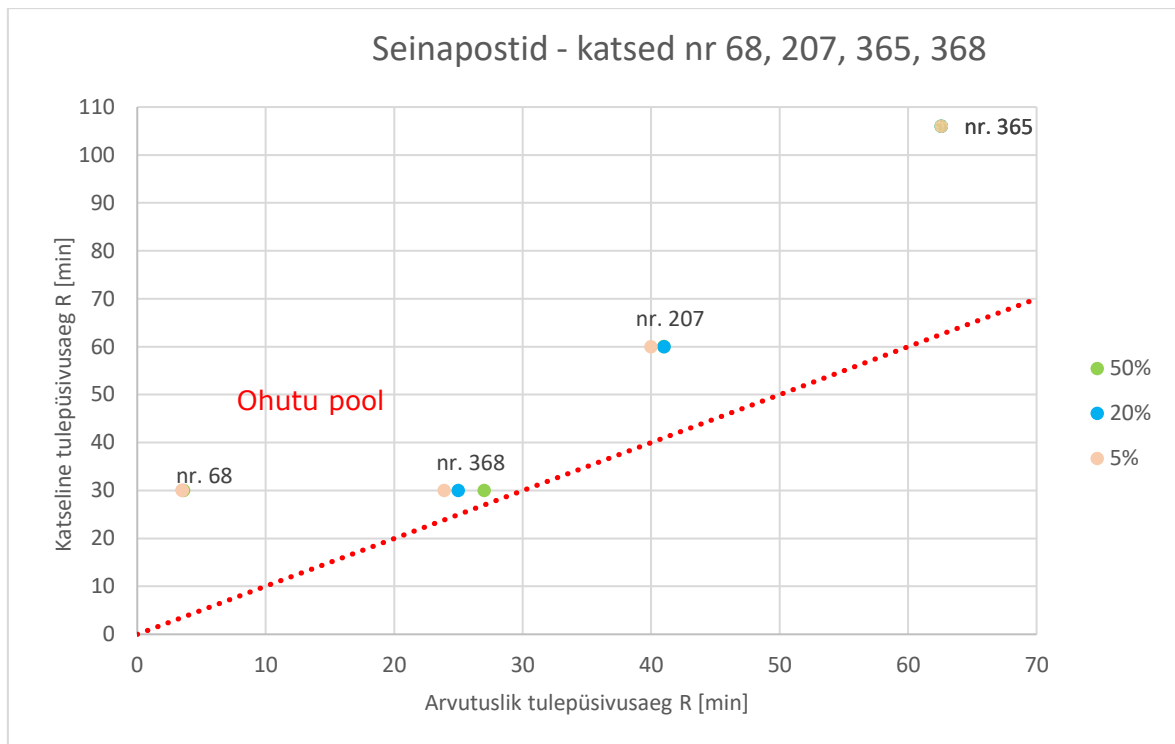
7.2 Puikarkass-seinte katsetel põhinevad tulepüsivusarvutused

Puitkarkass-seinte puhul vaadeldi 10 eelnevalt tehtud tulekatset. Neist 4 katse andmetele tuginedes tehti uue põlvkonna standardi EN 1995-1-2:2020 järgsed tulepüsivusarvutused. 3 katse puhul oli konstruktsiooni arvutuslik kandevõime tavaolukorras väiksem kui rakendatud koormus. Seega jäid need katsed võrdlusest välja. Kümnest katsest 4 olid samade algandmetega, erinevus seisnes vaid kasutatud isolatsioonimaterjali tiheduses. Nende puhul valiti arvutustesse 1 katse. Tabelis 7.2 on välja toodud katsetatud puitkarkass-seinte postide esialgsed ristlõiked, konstruktsioonides kasutatud isolatsiooni- ja kattematerjalid, rakendatud koormused ning tulekatsetega saadud tulepüsivusajad.

Katse nr.	68	207	365	368
Ristlõike Kõrgus [mm]	95	98	95	95
Ristlõike Laius [mm]	45	47	45	45
Katteplaat	GtA 12,6	2x GtA 12,5	2x GtF 15	GtA 12,6
Maksimaalne lauskoormus [kN/m]	83,3	33,3	26,6	16,6
Tulele avatud külgi	2	1	2	2
Soojustus	PL1 (GWF)	PL1 (RW)	PL2 (GW)	PL2 (GW)
Katse tulepüsivusaeg	> 30	> 60	R 106	> 30

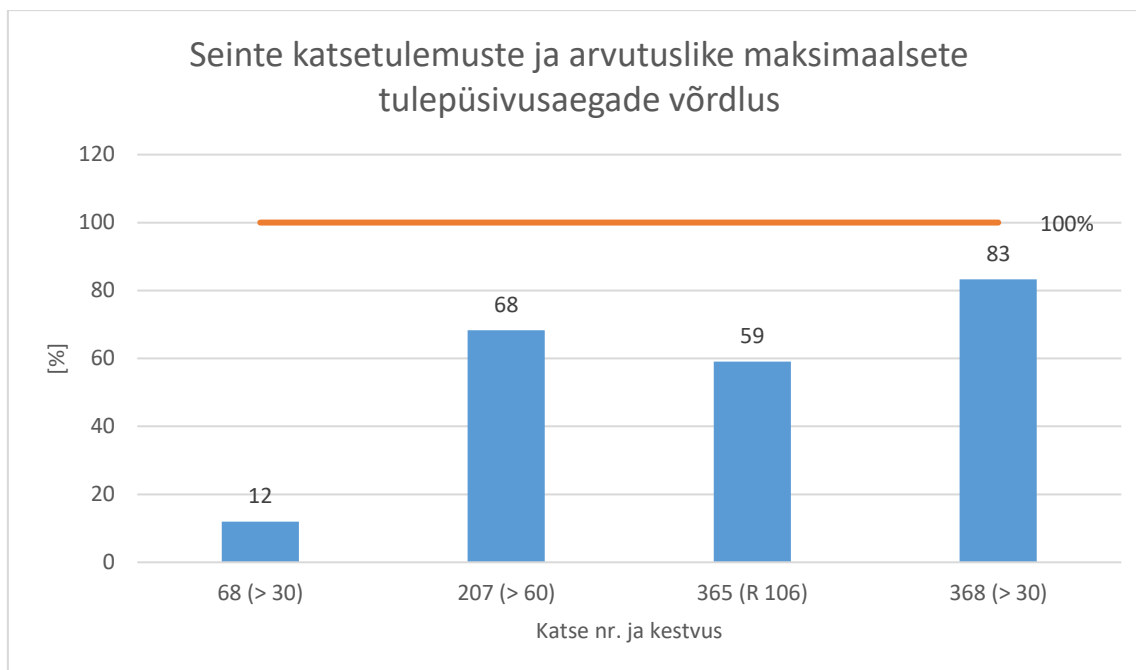
Tabel 7.2 Puitkarkass-seinte tulekatsete andmed [11]

Ülaltoodud tabeli 7.2 andmete põhjal arvutati vaadeldavate seinakonstruktsioonide maksimaalsed tulepüsivusajad etteantud koormuste juures tuginedes standardile EN 1995-1-2:2020. Kõik arvutused tehti läbi kolm korda – kasutades erinevaid tõrketekkeageade väärtuseid vastavalt kipsplaatidega kaetud täiemahuliste puitkarkass-konstruktsioonide tulekatsete andmebaasile [6]. Arvutustulemused on kujutatud graafikul 7.3.



Graafik 7.3 Puitkarkass-seinte tulekatse tulemuste ja arvutuslike tulepüsivusaegade võrdlus

Graafikult 7.3 järeldub, et arvutuslikud tulemused on väiksemad kui katselised tulepüsivusajad. Seega annavad arvutused tulepüsivuse osas teatava varu. Ülaltoodud valemiga 7.1 leiti, kui suure protsendi moodustab arvutuslik tulepüsivusaeg katselisest tulepüsivusest ning saadud tulemused on esitatud graafikul 7.4. Katsetulemustega võrreldi arvutuslikke maksimaalseid tulepüsivusaegasid, mis saadi kasutades tõrketekkeaja 20 % fraktiili.



Graafik 7.4 Puitkarkass-seinte tulekatse tulemuste ja arvutuslike maksimaalsete tulepüsivusaegade võrdlus

Märkus: Katse nr. 207 tulekatse kestis 60 minutit ja REI kriteeriumeid ei ületatud ehk varingut ei toimunud. Katsed 68 ja 368 kestsid 30 minutit ning samuti REI kriteeriumeid ei ületatud.

Graafikult 7.4 on näha, et uuritud puitkarkass-seinte tulekatsete arvutuslikud tulepüsivusajad on selgelt väiksemad vaadeldavate konstruktsioonide katselistest tulepüsivustest, mis on joonisel kujutatud 100% joonega. Seega on saadud tulemused tagavara kasuks.

8 JÄRELDUSED

Käesolevas töös uuriti erinevate katteplaatidega puitkarkass-seinte ja -vahelagede tulepüsivuse arvutusmeetodite tundlikkust lähtuvalt tõrketekkeaja ja null-tugevusega kihi mõjust. Arvutuste eesmärgiks oli aidata Eurokoodeks 5-1-2 tööühmal uue generatsiooni puidu tulepüsivusarvutuste standardis kasutatavate parameetrite osas lõplikele otsustele jõuda.

Arvutustulemustele tuginedes sobiks uue põlvkonna puidu standardisse EN 1995-1-2 tõrketekkeaja keskväärtused ehk arvutustes kasutatud 50% fraktiili väärtused. Väikeste ristlõigete korral, suure kogupaksusega katteplaatide puhul ning klaasvillaga isoleeritud seinakarkasside arvutustes tagas enamasti suurim tõrketekkeae parema tulepüsivuse. Suuremate ristlõigetega karkasside puhul saadi paljudel juhtudel tõrketekkeaja 50% fraktiili juures arvutuslik tulepüsivus väiksem. Seega tagab keskväärtuse kasutamine tulepüsivusarvutustes teatava varu.

Analüüsides null-tugevusega kihi mõju puitkarkass-konstruktsioonide arvutuslikule tulepüsivusele selgus, et mõlema standardi kavandi korral on null-tugevusega kihtide väärtused sarnased, seega on arvutustulemuste erinevus minimaalne. Väiksem null-tugevusega kiht tagab suurema efektiivristlõike ning pikema tulepüsivusaja.

Vaadeldes tulemusi, mis toovad välja isolatsiooni mõju puitkarkass-konstruktsioonide arvutuslikule tulepüsivusele jõeldub, et kõikide töös arvutatud puitkarkass-konstruktsioonide puhul on kivivillaga soojustatud tarindite arvutuslik tulepüsivus tunduvalt parem. Suuremate ristlõigete korral on klaasvillaga soojustatud karkasside arvutuslik tulepüsivus ligi 80% väiksem kui kivivillaga konstruktsioonide puhul. Tehtud arvutused kinnitavad, et kivivilla kasutamine puitkonstruktsioonides tagab tarindi tulepüsivuse seisukohalt kindla eelise.

Võrreldes arvutustulemusi katsetulemustega jõeldub, et uue põlvkonna standardi EN 1995-1-2:2020 arvutusmeetodid on turvalised ja tagavad arvutustulemustes teatava varu. Kõikide vaadeldud katsete puhul saadi arvutuslik tulepüsivus väiksem võrreldes katselise tulepüsivusajaga.

9 UUE STANDARDI KASUTAJAKOGEMUS

9.1 Standardi EN 1995-1-2:2020 positiivsed uuendused

Puidu tulepüsivusarvutuste uues Eurokoodeks 5-1-2 versioonis sisaldub palju uut infot ja mitmeid uusi arvutusmeetodeid ning -parameetreid võrreldes praegu kehtiva standardiga.

Käesoleva töö arvutused põhinesid puitkarkass-seintel ja -vahelagedel. Uues Eurokoodeks 5-1-2 versioonis on puitkarkass-konstruksioonide jaoks loodud eraldi peatükk, millesse on vajalikud arvutuskäigud kokku koondatud. Arvutused põhinevad efektiivristlõikemeetodil ja arvestavad karkassis kasutatavat isolatsiooni mõju. Uues standardis on soojustused jaotatud kaitsetaseme järgi 3 gruppi, millele vastavalt arvutuseosed on loodud.

Töö üheks põhiliseks osaks oli tõrketekkeaja mõju hindamine arvutuslikule tulepüsivusele. Vanas standardis EN 1995-1-2:2004 F-tüüpi kipsplaadi tõrketekkeajaga välja toodud ei ole. Arvutustes vajaminev t_f tuli kasutajal mujalt otsida. Uus standard annab tõrketekkeageade väärtused nii A- kui ka F-tüüpi ühe- ja kahekordsete kipsplaatidega puitkarkasside tulepüsivuse arvutusteks. Seega on kasutaja jaoks tõrketekkeaja valemid nüüd kiirelt ühest kohast leitavad.

Arvutuste lihtsustamiseks ja sõestumise paremaks kirjeldamiseks on uude standardisse EN 1995-1-2:2020 lisatud sõestumisfaasid. Vana standardi järgi kirjeldati sõestumist sõestumise algusajaga t_{ch} , tõrketekkeajaga t_f ning konsolideeritud sõestumise faasi jõudmise ajaga t_a . Välja toodud aegade vahelist sõestumist kirjeldati modifikatsiooniteguri ja sõestumismäära β_n korrutisega. Uues standardis on aga eelnevalt mainitud aegade vahelised alad kirjeldatud sõestumisfaasidega. Need muudavad sõestumise tavakasutajale arusaadavamaks.

Lisaks muudavad uue standardi kasutamise lihtsamaks viidete olemasolu. Valemite juures on välja toodud viited, millisest alapeatükist või tabelist valemiliikmete parameetreid leida. See muudab arvutuste tegemiste süstemaatilisemaks ja kiiremaks. Võrreldes vanema standardiga EN 1995-1-2:2004 on uus standardi versioon EN 1995-1-2:2020 struktuurilt parem ja ülesehituselt kasutajale mugav.

Varasem standard EN 1995-1-2:2004 annab puitkarkass-seinte ja -vahelagede arvutamiseks kaks meetodit: efektiivristlõikemeetod ning vähendatud tugevus- ja jäikusomaduste meetod. Uues standardis EN 1995-1-2:2020 on lihtsustatud

projekteerimismeetodina kasutatud vaid efektiivristlõikemeetodit, mille kasutus on laiendatud kõikidele tavalistele puitkonstruktsioonidele. Kõnealune muudatus teeb kasutaja jaoks tulepüsivusarvutused konkreetsemaks ja lihtsustatumaks.

Uude standardisse on lisatud arvutuste lihtsustamiseks ja täiustamiseks modifikatsioonitegureid, nt. järelkaitsetegurid $k_{3,1}$ ja $k_{3,2}$. Samuti on mõned valemid kasutajale lihtsamaks ja kasutajasõbralikumaks tehtud. Näiteks kaitseteguri k_2 varasemat väärtust pole küll muudetud, kuid selles sisalduv koefitsient on standardi uues versioonis esitatud murdarvuna.

9.2 Standardi EN 1995-1-2:2020 puudujäägid

Kuigi puidu tulepüsivusarvutuste uus standard on võrreldes selle vanema versiooniga EN 1995-1-2:2004 palju kasutajasõbralikum, siis ilmneseid töö käigus arvutusi tehes ka mõned puudujäägid.

Uus standard EN 1995-1-2:2020 on väga põhjalik ning sisaldab palju uusi valemiteid ning seoseid. Seetõttu võib selle esmakordne kasutamine keeruline näida. Siiski võib öelda, et peale standardi läbitöötamist ja mitmekordset kasutamist on selle ülesehitus loogilisem ja kasutaja seisukohalt lihtsam kui selle vanem versioon EN 1995-1-2:2004.

Standardi esmakordsel kasutamisel võib kasutaja jaoks ebaselgeks jääda kaitsetaseme PL1 soojustusmaterjaliga karkasside lõpliku null-tugevusega kihi arvutamine. Konstruktsioonide puhul soojustusmaterjaliga PL1 võib valemitega määratud null-tugevusega kihti vähendada etteantud tingimustel lineaarselt interpoleerides. Kasutaja seisukohalt võiks alajaotus 7.2.4 (17) anda veidi täpsemaid juhiseid lõpliku aja t_{fin} leidmiseks.

Lisaks oli esmakordse kasutaja seisukohalt alguses veidi segadust tekitav katteplaatide kaitseaegade arvutamine. Kõikide olukordade jaoks on kattematerjalide kaitseaegade leidmiseks seos 7.57, mis hõlmab tegureid eelnevate ja järgnevate kihtide mõjust. Kui kaitseaega arvutatakse esimesele katteplaadile, siis jäävad mitmed tegurid valemist 7.57 välja. Seetõttu võiks kasutajamugavuselt lähtudes esimese katteplaadi kaitseaaja arvutamise valemi eraldi välja tuua.

KOKKUVÕTE

Hetkel on käimas ettevalmistused EN 1995 osa 1-2st uue versiooni välja andmiseks. Käesolev töö aitab Eurokoodeks 5-1-2 tööühmal arvutustes kasutatavate parameetrite osas lõplikele otsustele jõuda.

Töös on arvatud 6 erineva kattega ja 12 ristlõikega puitkarkass-seinte ja -vahelagede tulepüsivusajad. Arvutustes kasutati erinevaid tõrketekkeage $t_{f,pr}$ ja nulltugevusega kihi d_0 väärtuseid ning hinnati nende mõju puitkonstruktsioonide tulepüsivusele. Lisaks analüüsiti kasutatud isolatsioonide mõju arvutustulemustele. Töö käigus uuriti ka varasemalt tehtud puitkarkass-konstruktsioonide tulekatseid ning võrreldi nende tulemusi arvutuslike tulepüsivusaegadega. Kuna arvutused tehti veel lõplikult välja andmata standardi põhjal, hinnati selle kasutajakogemust ja tehti tagasisideks ettepanekuid Eurokoodeks 5-1-2 tööühmale edaspidiseks tööks.

Analüüsides tõrketekkeaja mõju puitkarkass-seinte ja -vahelagede arvutuslikule tulepüsivusele selgus järgnev:

- Väikeste ristlõigete korral on tõrketekkeajast tingitud tulemustevahelised erinevused minimaalsed või tagab suurem tõrketekkeage pikema tulepüsivuse. (karkassid isolatsiooniga PL1)
- Suuremate ristlõigetega karkasside puhul saadakse suurim arvutuslik tulepüsivus kasutades väikseimat tõrketekkeage või on leitud tulepüsivus kõikide $t_{f,pr}$ fraktiilide puhul sarnane. (karkassid isolatsiooniga PL1)
- Suure kogupaksusega katteplaatide puhul on tõrketekkeage piisavalt suur. Sellisel juhul tagab kõikide vaadeldavate ristlõigete korral suurem tõrketekkeage ka pikema tulepüsivuse. (2xGtF 15 kaetud karkassid)
- Klaasvillaga isoleeritud seinakarkasside puhul tagab enamasti kõikidel juhtudel suurim tõrketekkeage pikema arvutusliku tulepüsivusaja.

Analüüsides null-tugevusega kihi mõju puitkarkass-konstruktsioonide arvutuslikule tulepüsivusele selgus järgnev:

- Standardi EN 1995-1-2:2021 põhjal on puitkarkass-seinte kõikide ristlõigete puhul null-tugevusega kiht väiksem. Seetõttu on hilisema Eurokoodeks 5-1-2 kavandi järgi arvutades puidu efektiivristlõige suurem ning arvutuslik tulepüsivusaeg pikem.
- Puitkarkass-vahelagede puhul on mõlema standardi kavandi korral null-tugevusega kihid sarnased, seega on arvutustulemuste erinevus minimaalne.
- Puitkarkass-vahelagede puhul tagab samuti väiksem null-tugevusega kiht suurema efektiivristlõike ja pikema tulepüsivusaja.

Analüüsid isolatsiooni mõju puitkarkass-konstruktsioonide arvutuslikule tulepüsivusele selgus järgnev:

- Kõikide kattematerjalidega puitkarkass-konstruktsioonide puhul on kivivillaga soojustatud tarindite arvutuslik tulepüsivus suurem
- Suurte ristlõigete puhul on isolatsiooni mõju puitkarkass-konstruktsioonide arvutuslikule tulepüsivusele tunduvalt suurem kui väikeste ristlõigete korral.

Arvutustulemusi võrreldi katsetulemustega. Võrdluses selgus järgnev:

- Kõikide vaadeldud katsete puhul oli katseline tulepüsivusaeg suurem kui arvutuslik tulepüsivus. Seega on vaadeldud katsete puhul EN 1995-1-2:2020 põhised arvutused tagavara kasuks. Arvutustega sai kontrollida vaid 4 puitkarkass-seinte ja 9 -vahelagede tulekatset, seega lõplike järelduste jaoks pole need vaatlused siiski piisavad.

Hinnates uue põlvkonna standardi EN 1995-1-2:2020 kasutajakogemust, toodi põhilisena välja selle kasutajasõbralik struktuur.

Käesolevas töös on arvutused tehtud eeldusel, et puitkarkass-konstruktsioonide mittetulepoolisel küljel on plaadid. Sellisel juhul on seina tasandis nõtkuva posti puhul külgsuunaline nõtkepikkus võrdne kruvide vahekaugusega. Edasise uurimustöö jaoks oleks vajalik teha arvutused eeldusel, et karkasside mittetulepoolisel küljel pole midagi.

SUMMARY

The thesis was written during the revision of the new version of Eurocode 5 part 1-2. This work will help the Eurocode 5-1-2 project team to reach final decisions on the parameters to be used in the calculations.

In this thesis, the fire resistance of timber frame assemblies were calculated according to EN 1995-1-2:2020. 12 cross-sections were chosen both for beams and for columns. All the members were examined with 6 different protective layers. The calculations were made with different values of failure times $t_{f,pr}$ of the fire protection system and zero-strength layer depth d_0 evaluating their effect on the fire resistance of timber frame assemblies. In addition, the effect of the cavity insulation materials on the calculations results was analyzed. Also in this thesis, the previously performed fire tests of timber frame assemblies were also looked through and their results were compared with calculations based on EN 1995-1-2:2020. Finally, the user experience of EN 1995-1-2:2020 was evaluated.

From analysis of the effect of the failure time on the fire resistance of timber frame assemblies, the following conclusions could be drawn:

- In the case of small cross-sections, the differences between the results due to the failure time are minimal or using the bigger failure time will ensure the longer fire resistance. (protection level PL1)
- Calculating timber assemblies with larger cross-sections, the highest calculated fire resistance is obtained using the smallest failure time, or all the fractiles of the failure time will give the similar result. (protection level PL1)
- For a fire protection system consisting of 2 layers of F-type gypsum boards, a bigger failure time for all the observed cross-sections ensures a longer fire resistance.
- Calculating timber assemblies with insulation PL2, the maximum failure time in most cases ensures better fire resistance.

From analysis of the effect of the zero-strength layer depth on the fire resistance of timber frame assemblies, the following conclusions could be drawn:

- According to EN 1995-1-2:2021, the zero-strength layer is smaller for all the observed cross-sections of timber frame walls. Therefore, the effective cross-section is larger and the calculated fire resistance longer.

- In the case of timber frame floors, the zero-strength layers according to both drafts are similar, so the difference in calculation results is minimal.
- In the case of timber frame floors, a smaller zero-strength layer ensures a larger effective cross-section and a longer fire resistance.

From analysis of the effect of the cavity insulation material on the fire resistance of timber frame assemblies, the following conclusions could be drawn:

- For all observed timber frame assemblies, the calculated fire resistance is higher when using the stone wool (PL1) as the insulation.
- In the case of large cross-sections, the effect of the cavity insulation on the calculated fire resistance of timber frame assemblies is considerably higher than in case of small cross-sections.

The comparison of fire resistance in tests and calculation models gave the following results:

- For all fire tests observed, the test result was greater than the result of calculation. Therefore, for the tests observed, calculations based on EN 1995-1-2: 2020 have some reserve in results. Only 4 timber frame wall and 9 timber frame floor tests could be examined by calculations. So, it is not sufficient for a definitive conclusion.

EN 1995-1-2:2020 was evaluated to be more user-friendly than the current standard of fire design of timber structures.

In this work, the calculations have been made supposing that there are boards on the unexposed side of the timber frame assembly. Therefore, in case of in-plane buckling of compression member, the lateral effective length is equal to the spacing of screws. For further research, it is necessary to make calculations on the assumption that there is nothing on the unexposed side of the timber frame assembly.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] Östman, B., Just, A., Tuleohutud puitmajad. 3. : Põhja- ja Baltimaade teadmisi koondav juhendmaterjal, Tallinn: ET INFOkeskuse AS, 2014.
- [2] A. Frangi, *Eurocode 5 Revision - Fire design of timber structures*, 2. *Forum Wood Building Baltic*, 2021.
- [3] *EN 520+A1:2010 Gypsum plasterboards. Definitions, requirements and test methods*, 2010.
- [4] *Eurocode 5 – Design of timber structures. Part 1-2: General rules – Structural fire design : EN 1995-1-2:2020 (E). 3rd draft.*, 2020.
- [5] Just, E-J., Öiger, K., Just, A., Puit- ja puidupõhised konstruktsioonid : õpik kõrgkoolidele. 2nd edition, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 2018.
- [6] Kraudok, K., Just, A., *Analysis of the database of full-scale fire tests with gypsum boards*, *TalTech Report SE-21-01.*, Tallinn.
- [7] M. Tiso, *The contribution of cavity insulations to the load-bearing capacity of timber frame assemblies exposed to fire (Isolatsioonimaterjalide panus puitkarkass-seinte ja vahelagede kandevõimele tules). PhD thesis of Tallinn University of Technology.*, TUT Press, 2018.
- [8] Rohusaar, J., Mägi, R., Masso, T., Talvik, I., Jaaniso, V., Otsmaa, V., Voltri, V., Loorits, K., Peipman, T., Pukk, O., Hartšuk, V., *Ehituskonstruktori käsiraamat*. 2nd edition ., Tallinn: Autorid ja EHITAME kirjastus, 2010.
- [9] Klauson, A., Põdra, P., Metsaveer, J., Raukas, U., *Tugevusõpetus : õpik kõrgkoolidele*. 2nd edition, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 2017.
- [10] *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*, Tallinn: Estonian Centre for Standardisation, 2009.
- [11] Just, A., Schmid, J., König, J., *Gypsum plasterboards used as fire protection - Analysis of a database*, *SP Report 2010:29.*, Stockholm.

LISAD

**Lisa 1 Tulepüsivusaja leidmine vahelaekonstruktsioonile: GtF15 2x + 45x145
mm C24 + kivivill EN 1995-1-2:2020 (E) alusel**

Märkused:

1. Maksimaalne tulepüsivusaeg valitud koormuse juures saadi excelis katsemeetodil;
2. Valemite numbrid vastavalt Eurokoodeksile 5: EN 1995-1-2:2020 (E), 3. mustand (31.10.2020).

Ristlõike laius:	$b = 45 \text{ mm}$	
Ristlõike kõrgus:	$h = 145 \text{ mm}$	
Materjal:	C24	
Isolatsioonimaterjal:	Kivivill -> PL1	
Kattematerjal:	2x GtF 15; $h_{p,1} = 15 \text{ mm}$; $h_{p,2} = 15 \text{ mm}$	
Tulepüsivusaeg:	$R_{d,fi} = 68 \text{ min}$	
Tulele avatud küljed:	$k_{side} = 1$	
Koormused		
Sildeava:	$l = 3 \text{ m}$	
Talade samm:	$s = 600 \text{ mm}$	
Omakaal:	$g_k = 0,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$	
Normatiivne koormus:	$q_k = 3 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$	
Arvutuslik koormus tulekahjuolukorras: $q_{d,fi} = g_k + 0,5 * q_k$	$q_{d,fi} = 2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$	
Koormus tala pikkusühikule: $q = q_{d,fi} * s$	$q = 1,2 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$	
Maksimaalne paindemoment: $M_{max,fi} = \frac{q * l^2}{8}$	$M_{max,fi} = 1,35 \text{ kNm} \rightarrow$	
Puidu osavarutegur tulepüsivusarvutusel:	$\gamma_{M,fi} = 1$	(4.1)
Modifikatsioonitegur tulepüsivusarvutusel:	$k_{fi} = 1,25$ (monoliitpuit)	
C24 normatiivne paindetugevus: [5]	$X_{m,g,k} = 24 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	
Temperatuurist sõltuv vähendustegur:	$k_{\theta} = 1$ (efektiivristlõike meetod)	
Arvutuslik paindetugevus: $X_{d,fi} = k_{\theta} * k_{fi} * X_{m,g,k} / \gamma_{M,fi}$	$X_{d,fi} = 30 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	(4.1)
Efektiivristlõike meetod		
Söestumismäär:	$\beta_0 = 0,65 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$	
Kattermaterjali arvutuslik kogupaksus: $h_{p,red} = h_{p,1} + 0,8 * h_{p,2}$	$h_{p,red} = 27 \text{ mm}$	(7.67)
Tõrketekkeae: $t_{f,pr} = 1,5 * (h_{p,1} + h_{p,2}) + 15$ 20 % fraktil [6]	$t_{f,pr} = 60 \text{ min}$	
Kaitsetegur (Faas 2): $k_2 = 1 - \frac{h_p}{55} = 1 - \frac{h_{p,1} + h_{p,2}}{55}$	$k_2 = 0,455$	(5.3)
Ristlõiketegur: $b \leq 90 \text{ mm} \rightarrow k_{s,n,1} = \left(\frac{b}{65}\right)^2 - \frac{b}{21} + 3,6$	$k_{s,n,1} = 1,82$	(7.31)

Järelkaitsetegur (Faas 3): $k_{3,1} = 1 + \frac{t_{f,pr}}{45}$	$k_{3,1} = 2,33$	(7.33)
Positisoonekoefitsient: $k_{pos.unexp,i} = 0,5 * h_i^{0,15} = 0,5 * h_{p,red}^{0,15}$	$k_{pos.unexp,i} = 0,82$	(7.85)
Kipsplaadi kaitseaeg: $t_{prot,0,i} = 30 * \left(\frac{h_i}{15}\right)^{1,2}$	$t_{prot,0,i} = 60,7 \text{ min}$	(7.58)
Kaitseaeg kokku: $t_{prot,i} = (t_{prot,0,i} * k_{pos.exp,i} * k_{pos.unexp,i} + \Delta t_i) * k_{j,i}$ $k_{pos.exp,i} = 1; \Delta t_i = 0; k_{j,i} = 1$	$t_{prot} = 49,8 \text{ min}$	(7.57)
Söestumise algusaeg: $t_{ch} = \min \left\{ \sum t_{prot}, t_{f,pr} \right\}$	$t_{ch} = 49,8 \text{ min}$	(5.6)
Söestumismäär teises faasis: $\beta_n = k_2 * k_{s,n,1} * \beta_0$	$\beta_n = 0,539 \frac{mm}{min}$ (Faas 2)	(7.27)
Söestumismäär kolmandas faasis: $\beta_n = k_{3,1} * k_{s,n,1} * \beta_0$	$\beta_n = 2,76 \frac{mm}{min}$ (Faas 3)	(7.28)
Maksimaalne null-tugevusega kiht: $d_{0,max} = 10 + \frac{b}{50} + \frac{h}{100}$	$d_{0,max} = 12,35 \text{ mm}$	(7.39)
Maksimaalne aeg, mis vastab $d_{0,max}$ -le: $t_{peak} = \frac{b}{3,6} + \frac{h}{17} + \frac{t_{ch}}{1,1} + \frac{t_{f,pr}}{2,8} - 5,1$	$t_{peak} = 82,6 \text{ min}$	(7.43)
Lõplik aeg: $t_{fin} \rightarrow d_{char,n,1} = h$	$t_{fin} = 110 \text{ min}$	
Tegelik null-tugevusega kiht: $d_0 = \frac{R_{d,t,fi} * d_{0,max}}{t_{peak}}$	$d_0 = 10,2 \text{ mm}$	
Tinglik söestumissügavus (faas 2): $d_{char,n} = \beta_n * t$ $d_{char,n,t,f} = (t_{f,pr} - t_{ch}) * \beta_n$ (Phase 2)	$d_{char,n,t,f} = 5,5 \text{ mm}$	(5.1)
Tinglik söestumissügavus (faas 3): $d_{char,n} = \beta_n * t$ $d_{char,n,t} = d_{char,n,t,f} + (R_{d,t,fi} - t_{f,pr}) * \beta_n$ (Phase 3)	$d_{char,n,t} = 27,6 \text{ mm}$	(5.1)
Tegelik söestumissügavus tulele avatud küljel: $d_{ef,h} = d_{char,n,1} + d_0$	$d_{ef,h} = 37,8 \text{ mm}$	(7.22)
Tegelik söestumissügavus isolatsioonipoolsel küljel: $d_{ef,b} = d_{char,n,2} + d_0; PL1 \rightarrow d_{ef,b} = d_0$	$d_{ef,b} = 10,2 \text{ mm}$	(7.24)
Efektiivristlõike laius: $b_{ef} = b - 2 * d_{ef,b}$	$b_{ef} = 24,7 \text{ mm}$	(7.23)
Efektiivristlõike kõrgus: $h_{ef} = h - k_{side} * d_{ef,h}$	$h_{ef} = 107,2 \text{ mm}$	(7.21)
Efektiivristlõike pindala: $A_{ef} = b_{ef} * h_{ef}$	$A_{ef} = 2645 \text{ mm}^2$	
Efektiivristlõike vastupanumoment: $W_{ef} = \frac{b_{ef} h_{ef}^2}{6}$	$W_{ef} = 47269 \text{ mm}^3$	
Maksimalne paindemoment tulekahjuolukorras: $M_{max,fi} = W_{ef} X_{d,fi} 10^{-6}$	$M_{max,fi} = 1,4 \text{ kNm}$	

**Lisa 2 Tulepüsivusaja leidmine vahelaekonstruktsioonile: GtF15 + WB18 +
45x295 mm C24 + kivivill EN 1995-1-2:2020 (E) alusel**

Märkused:

1. Maksimaalne tulepüsivusaeg valitud koormuse juures saadi excelis katsemeetodil;
2. Valemite numbrid vastavalt Eurokoodeksile 5: EN 1995-1-2:2020 (E), 3. mustand (31.10.2020).

Ristlõike laius:	$b = 45 \text{ mm}$	
Ristlõike kõrgus:	$h = 295 \text{ mm}$	
Materjal:	C24	
Isolatsioonimaterjal:	Kivivill -> PL1	
Kattematerjal:	GtF 15 + WB 18; $h_{p,1} = 15 \text{ mm};$ $h_{p,2} = 18 \text{ mm}$	
Tulepüsivusaeg:	$R_{d,tfi} = 90 \text{ min}$	
Tulele avatud küljed:	$k_{side} = 1$	
Koormused		
Sildeava:	$l = 5 \text{ m}$	
Talade samm:	$s = 600 \text{ mm}$	
Omakaal:	$g_k = 0,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$	
Normatiivne koormus:	$q_k = 3 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$	
Arvutuslik koormus tulekahjuolukorras: $q_{d,fi} = g_k + 0,5 * q_k$	$q_{d,fi} = 2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$	
Koormus tala pikkusühikule: $q = q_{d,fi} * s$	$q = 1,2 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$	
Maksimaalne paindemoment: $M_{max,fi} = \frac{q * l^2}{8}$	$M_{max,fi} = 3,75 \text{ kNm}$	
Puidu osavarutegur tulepüsivusarvutusel:	$\gamma_{M,fi} = 1$	(4.1)
Modifikatsioonitegur tulepüsivusarvutusel:	$k_{fi} = 1,25$ (monoliitpuit)	
C24 normatiivne paindetugevus: [5]	$X_{m,g,k} = 24 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	
Temperatuurist sõltuv vähendustegur	$k_{\theta} = 1$ (efektiivristlõike meetod)	
Arvutuslik paindetugevus: $X_{d,fi} = k_{\theta} * k_{fi} * X_{m,g,k} / \gamma_{M,fi}$	$X_{d,fi} = 30 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	(4.1)
Efektiivristlõike meetod		
Söestumismäär:	$\beta_0 = 0,65 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$	
Kipsplaadi tõrketekkeaeg: $t_{f,gypsum} = 1,3 * h_p + 8,6$ 20 % fraktil [6]	$t_{f,gypsum} = 28,1 \text{ min}$	
Kaitsetegur (Faas 2) $k_2 = 1 - \frac{h_p}{55}$	$k_2 = 0,727$	(5.3)
Ristlõiketegur: $b \leq 90 \text{ mm} \rightarrow k_{s,n,1} = \left(\frac{b}{65}\right)^2 - \frac{b}{21} + 3,6$	$k_{s,n,1} = 1,82$	(7.31)
Järelkaitsetegur (Faas 3): $k_{3,1} = 1 + \frac{t_{f,pr}}{45}$	$k_{3,1} = 1,62$	(7.33)

Kipsplaadi kaitseaeg: $t_{prot,GtF15} = 30 * \left(\frac{h_i}{15}\right)^{1,2} * k_{j,i}$ $k_{j,i} = 1$	$t_{prot,GtF15} = 30 \text{ min}$	(7.58)
Puitlaastplaadi kaitseaeg: $t_{prot,WB18} = t_{prot,0} * k_{pos.exp} * k_{pos.unexp} + \Delta t$	$t_{prot,WB18} = 7,6 \text{ min}$	(7.57)
Baaskaitseaeg: $t_{prot,0} = \frac{h_i}{k_{\rho} * k_h * \beta_0}$	$t_{prot,0} = 24,4 \text{ min}$	(7.61)
Positiseerimiskoeffitsient: $k_{pos.exp} = 0,5 * \sqrt{\frac{t_{prot,0}}{\sum t_{prot,GtF15}}}$	$k_{pos.exp} = 0,45$	(7.80)
Positiseerimiskoeffitsient: $k_{pos.unexp} = 0,41 * h_i^{0,18}$	$k_{pos.unexp,i} = 0,69$	(7.87)
Maksimaalne kaitseaeg: $t_{prot,max,i} = \frac{t_{prot,0}}{k_2}$	$t_{prot,max,i} = 33,6 \text{ min}$	(7.96)
Maksimaalne täiendav kaitseaeg: $\Delta t_{max,i} = t_{prot,max,i} - t_{prot,0,i} * k_{pos.exp,i} * k_{pos.unexp,i} * k_{j,i}$	$\Delta t_{max,i} = 26,0 \text{ min}$	(7.98)
Täiendav kaitseaeg: $\Delta t_i = \frac{(t_{f,pr} - \sum_{k=1}^{i-1} t_{prot,k}) * \Delta t_{max,i}}{t_{prot,max,i}} \leq \Delta t_{max,i}$	$\Delta t_i = -1,47 = 0 \text{ min}$	(7.94)
Kaitseaeg kokku: $\sum t_{prot} = t_{prot,GtF15} + t_{prot,WB18}$	$\sum t_{prot} = 37,6 \text{ min}$	
Söestumise algusaeg: $t_{ch} = \sum t_{prot}$	$t_{ch} = 37,6 \text{ min}$	(5.7)
Tõrketekkeae (GtF15+WB18) $t_{f,pr} = \max \left\{ \begin{matrix} t_{prot} \\ t_{f,gypsum} \end{matrix} \right.$	$t_{f,pr} = 37,6 \text{ min}$	
Söestumismäär teises faasis: $\beta_n = k_2 * k_{s,n,1} * \beta_0$	$\beta_n = 0,826 \frac{mm}{min}$ (Faas 2)	(7.27)
Söestumismäär kolmandas faasis: $\beta_n = k_{3,1} * k_{s,n,1} * \beta_0$	$\beta_n = 1,92 \frac{mm}{min}$ (Faas 3)	(7.28)
Maksimaalne null-tugevusega kiht: $d_{0,max} = 10 + \frac{b}{50} + \frac{h}{100}$	$d_{0,max} = 13,9 \text{ mm}$	(7.39)
Maksimaalne aeg, mis vastab $d_{0,max}$ -le: $t_{peak} = \frac{b}{3,6} + \frac{h}{17} + \frac{t_{ch}}{1,1} + \frac{t_{f,pr}}{2,8} - 5,1$	$t_{peak} = 69,0 \text{ min}$	(7.43)
Lõplik aeg: $t_{fin} \rightarrow d_{char,n,1} = h$	$t_{fin} = 172 \text{ min}$	
Tegelik null-tugevusega kiht: $d_0 = \frac{(t_{fin} - R_{d,t,fi}) * d_{0,max}}{(t_{fin} - t_{peak})}$	$d_0 = 11,0 \text{ mm}$	
Tinglik söestumissügavus (faas 2): $d_{char,n} = \beta_n * t$ $d_{char,n,t_f} = (t_{f,pr} - t_{ch}) * \beta_n$ (Phase 2)	$d_{char,n,t_f} = 0 \text{ mm}$	(5.1)
Tinglik söestumissügavus (faas 3): $d_{char,n} = \beta_n * t$ $d_{char,n,t} = d_{char,n,t_f} + (R_{d,t,fi} - t_{f,pr}) * \beta_n$ (Phase 3)	$d_{char,n,t} = 100,9 \text{ mm}$	(5.1)
Tegelik söestumissügavus tulele avatud küljel: $d_{ef,h} = d_{char,n,1} + d_0$	$d_{ef,h} = 111,9 \text{ mm}$	(7.22)

Tegelik söestumissügavus isolatsioonipoolisel küljel: $d_{ef,b} = d_{char,n,2} + d_0$; $PL1 \rightarrow d_{ef,b} = d_0$	$d_{ef,b} = 11,0 \text{ mm}$	(7.24)
Efektiivristlõike laius: $b_{ef} = b - 2 * d_{ef,b}$	$b_{ef} = 23,0 \text{ mm}$	(7.23)
Efektiivristlõike kõrgus: $h_{ef} = h - k_{side} * d_{ef,h}$	$h_{ef} = 183,1 \text{ mm}$	(7.21)
Efektiivristlõike pindala: $A_{ef} = b_{ef} * h_{ef}$	$A_{ef} = 4203 \text{ mm}^2$	
Efektiivristlõike vastupanumoment: $W_{ef} = \frac{b_{ef} h_{ef}^2}{6}$	$W_{ef} = 128294 \text{ mm}^3$	
Maksimalne paindemoment tulekahjuolukorras: $M_{max,fi} = W_{ef} X_{d,fi} 10^{-6}$	$M_{max,fi} = 3,8 \text{ kNm}$	

**Lisa 3 Tulepüsivusaja leidmine vahelaekonstruktsioonile: GtF15 + 140x240
mm C24 + klaasvill EN 1995-1-2:2020 (E) alusel**

Märkused:

1. Maksimaalne tulepüsivusaeg valitud koormuse juures saadi excelis katsemeetodil;
2. Valemite numbrid vastavalt Eurokoodeksile 5: EN 1995-1-2:2020 (E), 3. mustand (31.10.2020).

Ristlõike laius:	$b = 140 \text{ mm}$	
Ristlõike kõrgus:	$h = 240 \text{ mm}$	
Materjal:	C24	
Isolatsioonimaterjal:	klaasvill -> PL2	
Kattmaterjal:	GtF 15; $h_p = 15 \text{ mm}$	
Tulepüsivusaeg:	$R_{d,t,fi} = 68,6 \text{ min}$	
Tulele avatud küljed:	$k_{side} = 1$	
Koormused		
Sildeaava:	$l = 5 \text{ m}$	
Talade samm:	$s = 600 \text{ mm}$	
Omakaal:	$g_k = 0,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$	
Normatiivne koormus:	$q_k = 3 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$	
Arvutuslik koormus tulekahjuolukorras: $q_{d,fi} = g_k + 0,5 * q_k$	$q_{d,fi} = 2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$	
Koormus tala pikkusühikule: $q = q_{d,fi} * s$	$q = 1,2 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$	
Maksimaalne paindemoment: $M_{max,fi} = \frac{q * l^2}{8}$	$M_{max,fi} = 3,75 \text{ kNm}$	
Puidu osavarutegur tulepüsivusarvutusel:	$\gamma_{M,fi} = 1$	(4.1)
Modifikatsioonitegur tulepüsivusarvutusel:	$k_{fi} = 1,25$ (monoliitpuit)	
C24 normatiivne paindetugevus: [5]	$X_{m,g,k} = 24 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	
Temperatuurist sõltuv vähendustegur	$k_{\theta} = 1$ (efektiivristlõike meetod)	
Arvutuslik paindetugevus: $X_{d,fi} = k_{\theta} * k_{fi} * X_{m,g,k} / \gamma_{M,fi}$	$X_{d,fi} = 30 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	(4.1)
Efektiivristlõike meetod		
Söestumismäär:	$\beta_0 = 0,65 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$	
Törketekkeae: $t_{f,pr} = 1,3 * h_p + 8,6$ 20 % fraktil [6]	$t_{f,pr} = 28,1 \text{ min}$	
Kaitsetegur (Faas 2) $k_2 = 1 - \frac{h_p}{55}$	$k_2 = 0,727$	(5.3)
Ristlõiketegur: $b > 90 \text{ mm} \rightarrow k_{s,n,1} = 1,3$	$k_{s,n,1} = 1,3$	(7.31)
Ristlõiketegur: $h > 90 \text{ mm} \rightarrow k_{s,n,2} = 1,3$	$k_{s,n,2} = 1,3$	(7.32)

Järelkaitsetegur tule poolsele küljele (Faas 3): $k_{3,1} = 1 + \frac{t_{f,pr}}{58}$	$k_{3,1} = 1,48$	(7.36)
Järelkaitsetegur külgmisele küljele (Faas 3): $k_{3,2} = 1 \leq \frac{t_{ch,2}}{20} \leq 1,8$	$k_{3,2} = 1,67$	(7.37)
Söestumise algusaeg külgmistel külgedel: $t_{ch,2} = t_{f,pr} + \frac{2}{3} * \frac{h}{v_{rec}}$	$t_{ch,2} = 33,4 \text{ min}$	(7.38)
Klaasvilla taandumiskiirus:	$v_{rec} = 30 \text{ mm/min}$	
Positisoonekoefitsient: $k_{pos.unexp,i} = 0,5 * h_i^{0,15} = 0,5 * h_p^{0,15}$	$k_{pos.unexp,i} = 0,75$	(7.85)
Kipsplaadi kaitseaeg: $t_{prot,0,i} = 30 * \left(\frac{h_i}{15}\right)^{1,2}$	$t_{prot,0,i} = 30 \text{ min}$	(7.58)
Kaitseaeg kokku: $t_{prot,i} = (t_{prot,0,i} * k_{pos.exp,i} * k_{pos.unexp,i} + \Delta t_i) * k_{j,i}$ $k_{pos.exp,i} = 1; \Delta t_i = 0; k_{j,i} = 1$	$t_{prot} = 22,5 \text{ min}$	(7.57)
Söestumise algusaeg: $t_{ch} = \min \left\{ \begin{matrix} \sum t_{prot} \\ t_{f,pr} \end{matrix} \right.$	$t_{ch} = 22,5 \text{ min}$	(5.6)
Söestumismäär teises faasis: $\beta_n = k_2 * k_{s,n,1} * \beta_0$	$\beta_n = 0,615 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ (Faas 2)	(7.27)
Söestumismäär tulele avatud küljel kolmandas faasis: $\beta_n = k_{3,1} * k_{s,n,1} * \beta_0$	$\beta_n = 1,25 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ (Faas 3)	(7.28)
Söestumismäär isolatsioonipoolsel küljel kolmandas faasis: $\beta_n = k_{3,2} * k_{s,n,2} * \beta_0$	$\beta_n = 1,41 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ (Faas 3)	(7.29)
Söestumismäär külgmisel küljel neljandas faasis: $\beta_n = k_{s,n,2} * \beta_0$	$\beta_n = 0,85 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ (Faas 4)	(7.30)
Null-tugevusega kiht: $d_{0,max} = 3 + \frac{b}{50} + \frac{h}{100}$	$d_0 = 8,20 \text{ mm}$	(7.47)
Tinglik söestumissügavus (faas 2): $d_{char,n} = \beta_n * t$ $d_{char,n,tf} = (t_{f,pr} - t_{ch}) * \beta_n (\text{Phase 2})$	$d_{char,n,tf} = 3,4 \text{ mm}$	(5.1)
Tinglik söestumissügavus tule avatud küljel (faas 3): $d_{char,n,1} = \beta_n * t$ $d_{char,n,1} = d_{char,n,tf} + (R_{d,tf,i} - t_{f,pr}) * \beta_n (\text{Phase 3})$	$d_{char,n,1} = 54,2 \text{ mm}$	(7.25)
Tinglik söestumissügavus isolatsioonipoolsel küljel (faas 3): $d_{char,n,2} = \beta_n * t$ $d_{char,n,2} = (R_{d,tf,i} - t_{ch,2}) * \beta_n (\text{Phase 3})$	$d_{char,n,2} = 49,7 \text{ mm}$	(7.26)
Tegelik söestumissügavus tulele avatud küljel: $d_{ef,h} = d_{char,n,1} + d_0$	$d_{ef,h} = 62,4 \text{ mm}$	(7.22)
Tegelik söestumissügavus isolatsioonipoolsel küljel: $d_{ef,b} = d_{char,n,2} + d_0$	$d_{ef,b} = 57,9 \text{ mm}$	(7.24)
Efektiivristlõike laius:	$b_{ef} = 24,3 \text{ mm}$	(7.23)

$b_{ef} = b - 2 * d_{ef,b}$		
Efektiivristlõike kõrgus: $h_{ef} = h - k_{side} * d_{ef,h}$	$h_{ef} = 177,6 \text{ mm}$	(7.21)
Efektiivristlõike pindala: $A_{ef} = b_{ef} * h_{ef}$	$A_{ef} = 4306 \text{ mm}^2$	
Efektiivristlõike vastupanumoment: $W_{ef} = \frac{b_{ef} h_{ef}^2}{6}$	$W_{ef} = 127433 \text{ mm}^3$	
Maksimalne paindemoment tulekahjuolukorras: $M_{max,fi} = W_{ef} X_{d,fi} 10^{-6}$	$M_{max,fi} = 3,8 \text{ kNm}$	

**Lisa 4 Tulepüsivusaja leidmine seinakonstruktsioonile: GtF15 2x + 45x145
mm C24 + kivivill EN 1995-1-2:2020 (E) alusel**

Märkused:

1. Maksimaalne tulepüsivusaeg valitud koormuse juures saadi excelis katsemeetodil;
2. Valemite numbrid vastavalt Eurokoodeksile 5: EN 1995-1-2:2020 (E), 3. mustand (31.10.2020).

Ristlõike laius:	$b = 45 \text{ mm}$	
Ristlõike kõrgus:	$h = 145 \text{ mm}$	
Materjal:	C24	
Isolatsioonimaterjal:	Kivivill -> PL1	
Kattematerjal:	2x GtF 15; $h_{p,1} = 15 \text{ mm}$; $h_{p,2} = 15 \text{ mm}$	
Tulepüsivusaeg:	$R_{d,fi} = 99,6 \text{ min}$	
Tulele avatud küljed:	$k_{side} = 1$	
Koormused		
Seina kõrgus:	$H = 3 \text{ m}$	
Postide samm:	$s = 600 \text{ mm}$	
Valitud koormus:	$q_d = 20 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$	
Puidu osavarutegur tulepüsivusarvutusel:	$\gamma_{M,fi} = 1$	(4.1)
Modifikatsioonitegur tulepüsivusarvutusel:	$k_{fi} = 1,25$ (monoliitpuut)	
C24 normatiivne survetugevus: [5]	$X_{c0,g,k} = 21 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	
Temperatuurist sõltuv vähendustegur:	$k_{\theta} = 1$ (efektiivristlõike meetod)	
Arvutuslik survetugevus: $X_{d,fi} = k_{\theta} * k_{fi} * X_{c0,g,k} / \gamma_{M,fi}$	$X_{d,fi} = 26,3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	(4.1)
Efektiivristlõike meetod		
Sõestumismäär:	$\beta_0 = 0,65 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$	
Kattermaterjali arvutuslik kogupaksus: $h_{p,red} = h_{p,1} + 0,8 * h_{p,2}$	$h_{p,red} = 27 \text{ mm}$	(7.67)
Törketekkeaeg: $t_{f,pr} = 4,4 * (h_{p,1} + h_{p,2}) - 50$ 20 % fraktil [6]	$t_{f,pr} = 82 \text{ min}$	
Kaitsetegur (Faas 2) $k_2 = 1 - \frac{h_p}{55} = 1 - \frac{h_{p,1} + h_{p,2}}{55}$	$k_2 = 0,455$	(5.3)
Ristlõiketegur: $b \leq 90 \text{ mm} \rightarrow k_{s,n,1} = \left(\frac{b}{65}\right)^2 - \frac{b}{21} + 3,6$	$k_{s,n,1} = 1,82$	(7.31)
Järelkaitsetegur (Faas 3): $k_{3,1} = 1 + \frac{t_{f,pr}}{45}$	$k_{3,1} = 2,82$	(7.33)
Positioonikoefitsient: $k_{pos.unexp,i} = 0,5 * h_i^{0,15} = 0,5 * h_{p,red}^{0,15}$	$k_{pos.unexp,i} = 0,82$	(7.85)
Kipsplaadi kaitseaeg: $t_{prot,0,i} = 30 * \left(\frac{h_i}{15}\right)^{1,2} = 30 * \left(\frac{h_{p,red}}{15}\right)^{1,2}$	$t_{prot,0} = 60,7 \text{ min}$	(7.58)
Kaitseaeg kokku:	$t_{prot} = 49,8 \text{ min}$	(7.57)

$t_{prot,i} = (t_{prot,0,i} * k_{pos.exp,i} * k_{pos.unexp,i} + \Delta t_i) * k_{j,i}$ $k_{pos.exp,i} = 1; \Delta t_i = 0; k_{j,i} = 1$		
Söestumise algusaeg: $t_{ch} = \min \left\{ \sum t_{prot} \right.$ $\left. t_{f,pr}$	$t_{ch} = 49,8 \text{ min}$	(5.6)
Söestumismäär teises faasis: $\beta_n = k_2 * k_{s,n,1} * \beta_0$	$\beta_n = 0,539 \frac{mm}{min}$ (Faas 2)	(7.27)
Söestumismäär kolmandas faasis: $\beta_n = k_{3,1} * k_{s,n,1} * \beta_0$	$\beta_n = 3,34 \frac{mm}{min}$ (Faas 3)	(7.28)
NÕTKUMINE SEINA TASANDIST VÄLJA:		
Maksimaalne null-tugevusega kiht (nõtkumisel seina tasandist välja): $d_{0,max} = 7 + \frac{b}{50} + \frac{h}{25}$	$d_{0,max} = 13,7 \text{ mm}$	(7.41)
Maksimaalne aeg, mis vastab $d_{0,max}$ -le (nõtkumisel seina tasandist välja): $t_{peak} = \frac{b}{12,5} + \frac{h}{8,3} + 1,51 * t_{ch} + \frac{t_{f,pr}}{20} - 25,3$	$t_{peak} = 75,0 \text{ min}$	(7.45)
Lõplik aeg: $t_{fin} \rightarrow d_{char,n,1} = h$	$t_{fin} = 120 \text{ min}$	
Tegelik null-tugevusega kiht: $d_0 = \frac{(t_{fin} - R_{d,t,fi}) * d_{0,max}}{(t_{fin} - t_{peak})}$	$d_0 = 6,2 \text{ mm}$	
Tinglik söestumissügavus (faas 2): $d_{char,n} = \beta_n * t$ $d_{char,n,t_f} = (t_{f,pr} - t_{ch}) * \beta_n (\text{Phase 2})$	$d_{char,n,t_f} = 17,3 \text{ mm}$	(5.1)
Tinglik söestumissügavus (faas 3): $d_{char,n} = \beta_n * t$ $d_{char,n,t} = d_{char,n,t_f} + (R_{d,t,fi} - t_{f,pr}) * \beta_n (\text{Phase 3})$	$d_{char,n,t} = 76,2 \text{ mm}$	(5.1)
Tegelik söestumissügavus tulele avatud küljel: $d_{ef,h} = d_{char,n,1} + d_0$	$d_{ef,h} = 82,4 \text{ mm}$	(7.22)
Tegelik söestumissügavus isolatsioonipoolsel küljel: $d_{ef,b} = d_{char,n,2} + d_0; PL1 \rightarrow d_{ef,b} = d_0$	$d_{ef,b} = 6,2 \text{ mm}$	(7.24)
Efektiivristlõike laius: $b_{ef} = b - 2 * d_{ef,b}$	$b_{ef} = 32,6 \text{ mm}$	(7.23)
Efektiivristlõike kõrgus: $h_{ef} = h - k_{side} * d_{ef,h}$	$h_{ef} = 62,6 \text{ mm}$	(7.21)
Efektiivristlõike pindala: $A_{ef} = b_{ef} * h_{ef}$	$A_{ef} = 2038 \text{ mm}^2$	
Ühe seinaposti survekandevõime: $N_{max,fi} = \frac{A_{fi} * X_{d,fi}}{1000}$	$N_{max,fi} = 53,4 \text{ kN}$	
Maksimalne lauskoormus seinale: $p_{max,fi} = \frac{N_{max,fi}}{s}$	$p_{max,fi} = 89 \text{ kNm}$	
Inertsimoment: $I_y = \frac{bh^3}{12} \rightarrow I_y = \frac{b_{ef}h_{ef}^3}{12}$	$I_y = 665227 \text{ mm}^4$	
Inertsiraadius: $i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}}$	$i_y = 18,1 \text{ mm}$	
Posti efektiivnepikkus: $l_{ef} = \mu * H ; \mu = 0,7$	$l_{ef} = 2100 \text{ mm}$	

Saledus, mis vastab paindele y-telje suhtes: $\lambda_y = \frac{l_{ef}}{i_y}$	$\lambda_y = 116,2$	
Elastusmooduli 5-protsentiili väärtus:	$E_{0,05} = 7400 \text{ N/mm}^2$	
Suhteline saledus, mis vastab paindele y-telje suhtes: $\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \rightarrow \lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{X_{c,0,k}}{E_{0,05}}}$	$\lambda_{rel,y} = 1,97$	
Sirgsustegur:	$\beta_c = 0,2$	
Nõtketegur: $k_y = 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2)$	$k_y = 2,61$	
Nõtketegur: $k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}}$	$k_{c,y} = 0,231$	
Survepinged: $\sigma_{c,0,d} \leq k_{c,y} f_{c,0,d} \rightarrow \sigma_{c,0,d} \leq k_{c,y} X_{d,fi}$	$\sigma_{c,0,d} = 6,1 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	
Seinaposti survekandevõime: $N_{max,fi} = A_{fi} \sigma_{c,0,d} 10^{-3}$	$N_{max,fi} = 12,4 \text{ kN}$	
Maksimaalne lauskoormus seinale: $p_{max,fi} = \frac{N_{max,fi}}{s}$	$p_{max,fi} = 20,6 \text{ kNm}$	
NÕTKUMINE SEINA TASANDIS:		
Maksimaalne null-tugevusega kiht (nõtkumisel seina tasandis): $d_{0,max} = 6 + \frac{b}{14} + \frac{h}{100}$	$d_{0,max} = 10,7 \text{ mm}$	(7.42)
Maksimaalne aeg, mis vastab $d_{0,max}$ -le (nõtkumisel seina tasandis): $t_{peak} = \frac{b}{6,7} + \frac{h}{7,7} + \frac{t_{ch}}{1,2} + \frac{t_{f,pr}}{4,3} - 20,5$	$t_{peak} = 65,6 \text{ min}$	(7.46)
Lõplik aeg: $t_{fin} \rightarrow d_{char,n,1} = h$	$t_{fin} = 120 \text{ min}$	
Tegelik null-tugevusega kiht: $d_0 = \frac{(t_{fin} - R_{d,t,fi}) * d_{0,max}}{(t_{fin} - t_{peak})}$	$d_0 = 4,0 \text{ mm}$	
Tinglik söestumissügavus (faas 2): $d_{char,n} = \beta_n * t$ $d_{char,n,t,f} = (t_{f,pr} - t_{ch}) * \beta_n (\text{Phase 2})$	$d_{char,n,t,f} = 17,3 \text{ mm}$	(5.1)
Tinglik söestumissügavus (faas 3): $d_{char,n} = \beta_n * t$ $d_{char,n,t} = d_{char,n,t,f} + (R_{d,t,fi} - t_{f,pr}) * \beta_n (\text{Phase 3})$	$d_{char,n,t} = 76,2 \text{ mm}$	(5.1)
Tegelik söestumissügavus tulele avatud küljel: $d_{ef,h} = d_{char,n,1} + d_0$	$d_{ef,h} = 80,2 \text{ mm}$	(7.22)
Tegelik söestumissügavus isolatsioonipoolsel küljel: $d_{ef,b} = d_{char,n,2} + d_0; PL1 \rightarrow d_{ef,b} = d_0$	$d_{ef,b} = 4,0 \text{ mm}$	(7.24)
Efektiivristlõike laius: $b_{ef} = b - 2 * d_{ef,b}$	$b_{ef} = 37 \text{ mm}$	(7.23)
Efektiivristlõike kõrgus: $h_{ef} = h - k_{side} * d_{ef,h}$	$h_{ef} = 64,8 \text{ mm}$	(7.21)
Efektiivristlõike pindala: $A_{ef} = b_{ef} * h_{ef}$	$A_{ef} = 2398 \text{ mm}^2$	
Ühe seinaposti survekandevõime: $N_{max,fi} = \frac{A_{fi} * X_{d,fi}}{1000}$	$N_{max,fi} = 62,9 \text{ kN}$	

Maksimalne lauskoormus seinale: $p_{max,fi} = \frac{N_{max,fi}}{s}$	$p_{max,fi} = 104,8 \text{ kNm}$	
Inertsimoment: $I_z = \frac{hb^3}{12} \rightarrow I_y = \frac{h_{ef}b_{ef}^3}{12}$	$I_z = 273552 \text{ mm}^4$	
Inertsiraadius: $i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}}$	$i_z = 10,7 \text{ mm}$	
Külgsuunalise nõtkepikkus:	$l_{ef} = 250 \text{ mm}$	
Saledus, mis vastab paindele z-telje suhtes: $\lambda_z = \frac{l_{ef}}{i_z}$	$\lambda_z = 23,4$	
Elastusmooduli 5-protsentiili väärtus:	$E_{0,05} = 7400 \text{ N/mm}^2$	
Suhteline saledus, mis vastab paindele z-telje suhtes: $\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \rightarrow \lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{X_{c,0,k}}{E_{0,05}}}$	$\lambda_{rel,z} = 0,4$	
Sirgsustegur:	$\beta_c = 0,2$	
Nõtketegur: $k_z = 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2)$	$k_z = 0,59$	
Nõtketegur: $k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}}$	$k_{c,z} = 0,978$	
Survepinged: $\sigma_{c,0,d} \leq k_{c,z}f_{c,0,d} \rightarrow \sigma_{c,0,d} \leq k_{c,z}X_{d,fi}$	$\sigma_{c,0,d} = 25,7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	
Seinaposti survekandevõime: $N_{max,fi} = A_{fi}\sigma_{c,0,d}10^{-3}$	$N_{max,fi} = 61,5 \text{ kN}$	
Maksimalne lauskoormus seinale: $p_{max,fi} = \frac{N_{max,fi}}{s}$	$p_{max,fi} = 102,6 \text{ kNm}$	

**Lisa 5 Tulepüsivusaja leidmine seinakonstruktsioonile: GtF15 +WB18 +
160x180 mm GL24c + klaasvill EN 1995-1-2:2020 (E) alusel**

Märkused:

1. Maksimaalne tulepüsivusaeg valitud koormuse juures saadi excelis katsemeetodil;
2. Valemite numbrid vastavalt Eurokoodeksile 5: EN 1995-1-2:2020 (E), 3. mustand (31.10.2020).

Ristlõike laius:	$b = 160 \text{ mm}$	
Ristlõike kõrgus:	$h = 180 \text{ mm}$	
Materjal:	GL24c	
Isolatsioonimaterjal:	klaasvill -> PL2	
Kattmaterjal:	GtF 15 + WB 18; $h_{p,1} = 15 \text{ mm}$; $h_{p,2} = 18 \text{ mm}$	
Tulepüsivusaeg:	$R_{d,t,fi} = 89,3 \text{ min}$	
Tulele avatud küljed:	$k_{side} = 1$	
Koormused		
Seina kõrgus:	$H = 3 \text{ m}$	
Postide samm:	$s = 600 \text{ mm}$	
Valitud koormus:	$q_d = 50 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$	
Puidu osavarutegur tulepüsivusarvutusel:	$\gamma_{M,fi} = 1$	(4.1)
Modifikatsioonitegur tulepüsivusarvutusel:	$k_{fi} = 1,15$ (lamell-liimpuit)	
C24 normatiivne survetugevus: [5]	$X_{c0,g,k} = 21 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	
Temperatuurist sõltuv vähendustegur:	$k_{\theta} = 1$ (efektiivristlõike meetod)	
Arvutuslik survetugevus: $X_{d,fi} = k_{\theta} * k_{fi} * X_{c0,g,k} / \gamma_{M,fi}$	$X_{d,fi} = 24,2 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	(4.1)
Efektiivristlõike meetod		
Söestumismäär:	$\beta_0 = 0,65 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$	
Tõrketekkeae: $t_{f,gypsum} = 4,6 * h_{p,1} - 25$ 20 % fraktil [6]	$t_{f,gypsum} = 44 \text{ min}$	
Kaitsetegur (Faas 2) $k_2 = 1 - \frac{h_{p,1}}{55}$	$k_2 = 0,727$	(5.3)
Ristlõiketegur: $b > 90 \text{ mm} \rightarrow k_{s,n,1} = 1,3$	$k_{s,n,1} = 1,3$	(7.31)
Ristlõiketegur: $h > 90 \text{ mm} \rightarrow k_{s,n,2} = 1,3$	$k_{s,n,2} = 1,3$	(7.32)
Järeldaitsetegur (Faas 3): $k_{3,1} = 1 + \frac{t_{f,pr}}{58} = 1 + \frac{t_{f,gypsum}}{58}$	$k_{3,1} = 1,76$	(7.36)
Järeldaitsetegur (Faas 3): $k_{3,2} = 1 \leq \frac{t_{ch,2}}{20} \leq 1,8$	$k_{3,2} = 1,80$	(7.37)
Söestumise algusaeg isolatsioonipoolsetel külgedel: $t_{ch,2} = t_{f,pr} + \frac{2}{3} * \frac{h}{v_{rec}}$	$t_{ch,2} = 52,4 \text{ min}$	(7.38)
Klaasvilla taandumiskiirus:	$v_{rec} = 30 \text{ mm/min}$	

Kipsplaadi kaitseaeg: $t_{prot,GtF15} = 30 * \left(\frac{h_i}{15}\right)^{1,2} * k_{j,i}$ $k_{j,i} = 1$	$t_{prot,GtF15} = 30 \text{ min}$	(7.58)
Puitlaastplaadi kaitseaeg: $t_{prot,WB18} = t_{prot,0} * k_{pos.exp} * k_{pos.unexp} + \Delta t$	$t_{prot,WB18} = 18,4 \text{ min}$	(7.57)
Baaskaitseaeg: $t_{prot,0} = \frac{h_i}{k_{\rho} * k_h * \beta_0}$	$t_{prot,0} = 24,4 \text{ min}$	(7.61)
Positisoonekoefitsient: $k_{pos.exp} = 0,5 * \sqrt{\frac{t_{prot,0}}{\sum t_{prot,GtF15}}}$	$k_{pos.exp} = 0,45$	(7.80)
Positisoonekoefitsient: $k_{pos.unexp} = 0,41 * h_i^{0,18}$	$k_{pos.unexp,i} = 0,69$	(7.87)
Maksimaalne kaitseaeg: $t_{prot,max,i} = \frac{t_{prot,0}}{k_2}$	$t_{prot,max,i} = 33,6 \text{ min}$	(7.96)
Maksimaalne täiendav kaitseaeg: $\Delta t_{max,i} = t_{prot,max,i} - t_{prot,0,i} * k_{pos.exp,i} * k_{pos.unexp,i} * k_{j,i}$	$\Delta t_{max,i} = 26,0 \text{ min}$	(7.98)
Täiendav kaitseaeg: $\Delta t_i = \frac{(t_{f,pr} - \sum_{k=1}^{i-1} t_{prot,k}) * \Delta t_{max,i}}{t_{prot,max,i}} \leq \Delta t_{max,i}$	$\Delta t_i = 10,8 \text{ min}$	(7.94)
Kaitseaeg kokku: $\sum t_{prot} = t_{prot,GtF15} + t_{prot,WB18}$	$\sum t_{prot} = 48,4 \text{ min}$	
Söestumise algusaeg: $t_{ch} = \sum t_{prot}$	$t_{ch} = 48,4 \text{ min}$	(5.7)
Tõrketekkeae (GtF15+WB18) $t_{f,pr} = \max \left\{ \begin{matrix} t_{prot} \\ t_{f,gypsum} \end{matrix} \right.$	$t_{f,pr} = 48,4 \text{ min}$	
Söestumismäär teises faasis: $\beta_n = k_2 * k_{s,n,1} * \beta_0$	$\beta_n = 0,615 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ (Faas 2)	(7.27)
Söestumismäär kolmandas faasis: $\beta_n = k_{3,1} * k_{s,n,1} * \beta_0$	$\beta_n = 1,49 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ (Faas 3)	(7.28)
Söestumismäär isolatsioonipoolsel küljel kolmandas faasis: $\beta_n = k_{3,2} * k_{s,n,2} * \beta_0$	$\beta_n = 1,52 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ (Faas 3)	(7.29)
Söestumismäär isolatsioonipoolsel küljel neljandas faasis: $\beta_n = k_{s,n,2} * \beta_0$	$\beta_n = 0,85 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ (Faas 4)	(7.30)
NÕTKUMINE SEINA TASANDIST VÄLJA:		
Maksimaalne null-tugevusega kiht (nõtkumisel seina tasandist välja): $d_{0,max} = 4 + \frac{b}{17} + \frac{h}{100}$	$d_{0,max} = 15,2 \text{ mm}$	(7.49)
Tinglik söestumissügavus (faas 2): $d_{char,n} = \beta_n * t$ $d_{char,n,t,f} = (t_{f,pr} - t_{ch}) * \beta_n (\text{Phase 2})$	$d_{char,n,t,f} = 0 \text{ mm}$	(5.1)
Tinglik söestumissügavus (faas 3): $d_{char,n} = \beta_n * t$ $d_{char,n,t} = d_{char,n,t,f} + (R_{d,t,fi} - t_{f,pr}) * \beta_n (\text{Phase 3})$	$d_{char,n,t} = 60,7 \text{ mm}$	(5.1)
Tinglik söestumissügavus isolatsioonipoolsel küljel (faas 3): $d_{char,n,2} = \beta_n * t$ $d_{char,n,2} = (R_{d,t,fi} - t_{ch,2}) * \beta_n (\text{Phase 3})$	$d_{char,n,2} = 56,1 \text{ mm}$	(7.26)

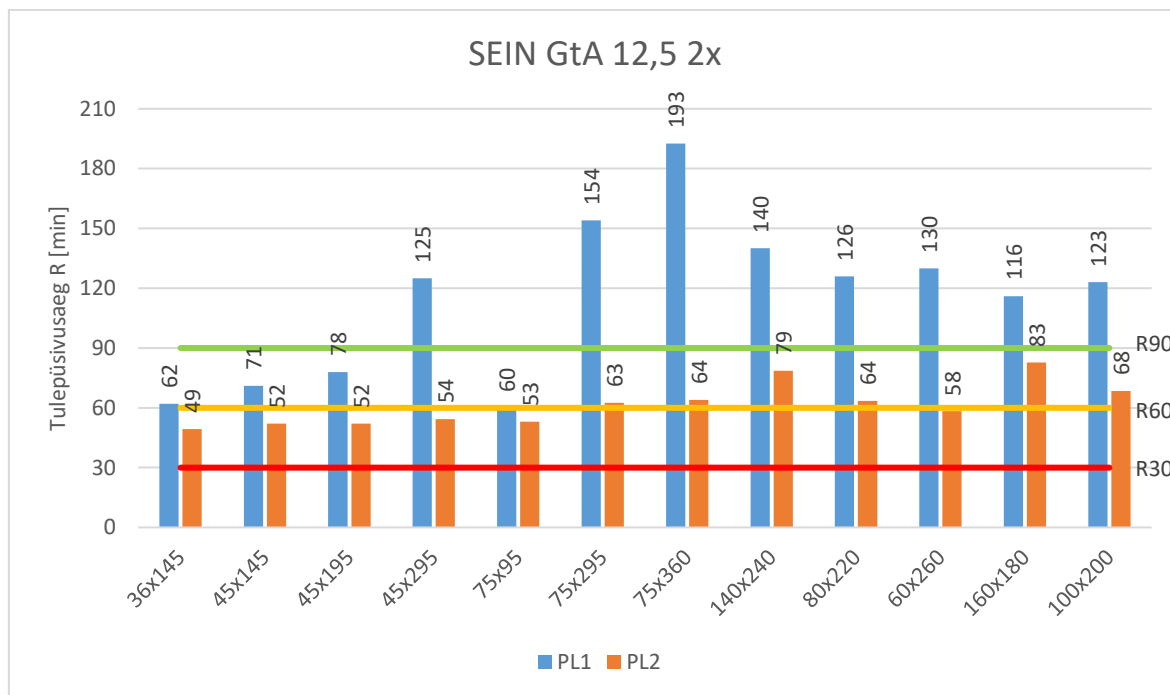
Tegelik söestumissügavus tulele avatud küljel: $d_{ef,h} = d_{char,n,1} + d_0$	$d_{ef,h} = 75,9 \text{ mm}$	(7.22)
Tegelik söestumissügavus isolatsioonipoolisel küljel: $d_{ef,b} = d_{char,n,2} + d_0$; $PL1 \rightarrow d_{ef,b} = d_0$	$d_{ef,b} = 71,3 \text{ mm}$	(7.24)
Efektiivristlõike laius: $b_{ef} = b - 2 * d_{ef,b}$	$b_{ef} = 17,4 \text{ mm}$	(7.23)
Efektiivristlõike kõrgus: $h_{ef} = h - k_{side} * d_{ef,h}$	$h_{ef} = 104,1 \text{ mm}$	(7.21)
Efektiivristlõike pindala: $A_{ef} = b_{ef} * h_{ef}$	$A_{ef} = 1813 \text{ mm}^2$	
Ühe seinaposti survekandevõime: $N_{max,fi} = \frac{A_{fi} * X_{d,fi}}{1000}$	$N_{max,fi} = 44,7 \text{ kN}$	
Maksimalne lauskoormus seinale: $p_{max,fi} = \frac{N_{max,fi}}{s}$	$p_{max,fi} = 72,8 \text{ kNm}$	
Inertsimoment: $I_y = \frac{bh^3}{12} \rightarrow I_y = \frac{b_{ef}h_{ef}^3}{12}$	$I_y = 1635849 \text{ mm}^4$	
Inertsiraadius: $i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}}$	$i_y = 30,0 \text{ mm}$	
Posti efektiivnepikkus: $l_{ef} = \mu * H$; $\mu = 0,7$	$l_{ef} = 2100 \text{ mm}$	
Saledus, mis vastab paindele y-telje suhtes: $\lambda_y = \frac{l_{ef}}{i_y}$	$\lambda_y = 69,9$	
Elastsusmooduli 5-protsentiili väärtus:	$E_{0,05} = 9100 \text{ N/mm}^2$	
Suhteline saledus, mis vastab paindele y-telje suhtes: $\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \rightarrow \lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{X_{c,0,k}}{E_{0,05}}}$	$\lambda_{rel,y} = 1,07$	
Sirgsustegur:	$\beta_c = 0,1$	
Nõtketegur: $k_y = 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2)$	$k_y = 1,11$	
Nõtketegur: $k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}}$	$k_{c,y} = 0,710$	
Survepinged: $\sigma_{c,0,d} \leq k_{c,y} f_{c,0,d} \rightarrow \sigma_{c,0,d} \leq k_{c,y} X_{d,fi}$	$\sigma_{c,0,d} = 17,2 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	
Seinaposti survekandevõime: $N_{max,fi} = A_{fi} \sigma_{c,0,d} 10^{-3}$	$N_{max,fi} = 31,1 \text{ kN}$	
Maksimalne lauskoormus seinale: $p_{max,fi} = \frac{N_{max,fi}}{s}$	$p_{max,fi} = 51,8 \text{ kNm}$	
NÕTKUMINE SEINA TASANDIS:		
Maksimaalne null-tugevusega kiht (nõtkumisel seina tasandis): $d_{0,max} = 6 + \frac{b}{14} + \frac{h}{100}$	$d_{0,max} = 10,6 \text{ mm}$	(7.42)
Tinglik söestumissügavus (faas 2): $d_{char,n} = \beta_n * t$ $d_{char,n,tf} = (t_{f,pr} - t_{ch}) * \beta_n (\text{Phase 2})$	$d_{char,n,tf} = 0 \text{ mm}$	(5.1)
Tinglik söestumissügavus (faas 3): $d_{char,n} = \beta_n * t$	$d_{char,n,t} = 60,7 \text{ mm}$	(5.1)

$d_{char,n,t} = d_{char,n,t_f} + (R_{d,t,fi} - t_{f,pr}) * \beta_n(Phase\ 3)$		
Tinglik söestumissügavus isolatsioonipoolsel küljel (faas 3): $d_{char,n,2} = \beta_n * t$ $d_{char,n,2} = (R_{d,t,fi} - t_{ch,2}) * \beta_n(Phase\ 3)$	$d_{char,n,2} = 56,1\ mm$	(7.26)
Tegelik söestumissügavus tulele avatud küljel: $d_{ef,h} = d_{char,n,1} + d_0$	$d_{ef,h} = 71,4\ mm$	(7.22)
Tegelik söestumissügavus isolatsioonipoolsel küljel: $d_{ef,b} = d_{char,n,2} + d_0; PL1 \rightarrow d_{ef,b} = d_0$	$d_{ef,b} = 66,7\ mm$	(7.24)
Efektiivristlõike laius: $b_{ef} = b - 2 * d_{ef,b}$	$b_{ef} = 26,6\ mm$	(7.23)
Efektiivristlõike kõrgus: $h_{ef} = h - k_{side} * d_{ef,h}$	$h_{ef} = 108,6\ mm$	(7.21)
Efektiivristlõike pindala: $A_{ef} = b_{ef} * h_{ef}$	$A_{ef} = 2884\ mm^2$	
Ühe seinaposti survekandevõime: $N_{max,fi} = \frac{A_{fi} * X_{d,fi}}{1000}$	$N_{max,fi} = 69,6\ kN$	
Maksimaalne lauskoormus seinale: $p_{max,fi} = \frac{N_{max,fi}}{s}$	$p_{max,fi} = 116,0\ kNm$	
Inertsimoment: $I_z = \frac{hb^3}{12} \rightarrow I_y = \frac{h_{ef}b_{ef}^3}{12}$	$I_z = 169391\ mm^4$	
Inertsiraadius: $i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}}$	$i_z = 7,7\ mm$	
Külgsuunalise nõtkepikkus:	$l_{ef} = 250\ mm$	
Saledus, mis vastab paindele z-telje suhtes: $\lambda_z = \frac{l_{ef}}{i_y}$	$\lambda_z = 32,6$	
Elastusmooduli 5-protsentiili väärtus:	$E_{0,05} = 9100\ N/mm^2$	
Suhteline saledus, mis vastab paindele z-telje suhtes: $\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \rightarrow \lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{X_{c,0,k}}{E_{0,05}}}$	$\lambda_{rel,z} = 0,50$	
Sirgustegur:	$\beta_c = 0,1$	
Nõtketegur: $k_z = 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2)$	$k_z = 0,63$	
Nõtketegur: $k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}}$	$k_{c,z} = 0,974$	
Survepinged: $\sigma_{c,0,d} \leq k_{c,z} f_{c,0,d} \rightarrow \sigma_{c,0,d} \leq k_{c,z} X_{d,fi}$	$\sigma_{c,0,d} = 23,5 \frac{N}{mm^2}$	
Seinaposti survekandevõime: $N_{max,fi} = A_{fi} \sigma_{c,0,d} 10^{-3}$	$N_{max,fi} = 67,9\ kN$	
Maksimaalne lauskoormus seinale: $p_{max,fi} = \frac{N_{max,fi}}{s}$	$p_{max,fi} = 113,1\ kNm$	

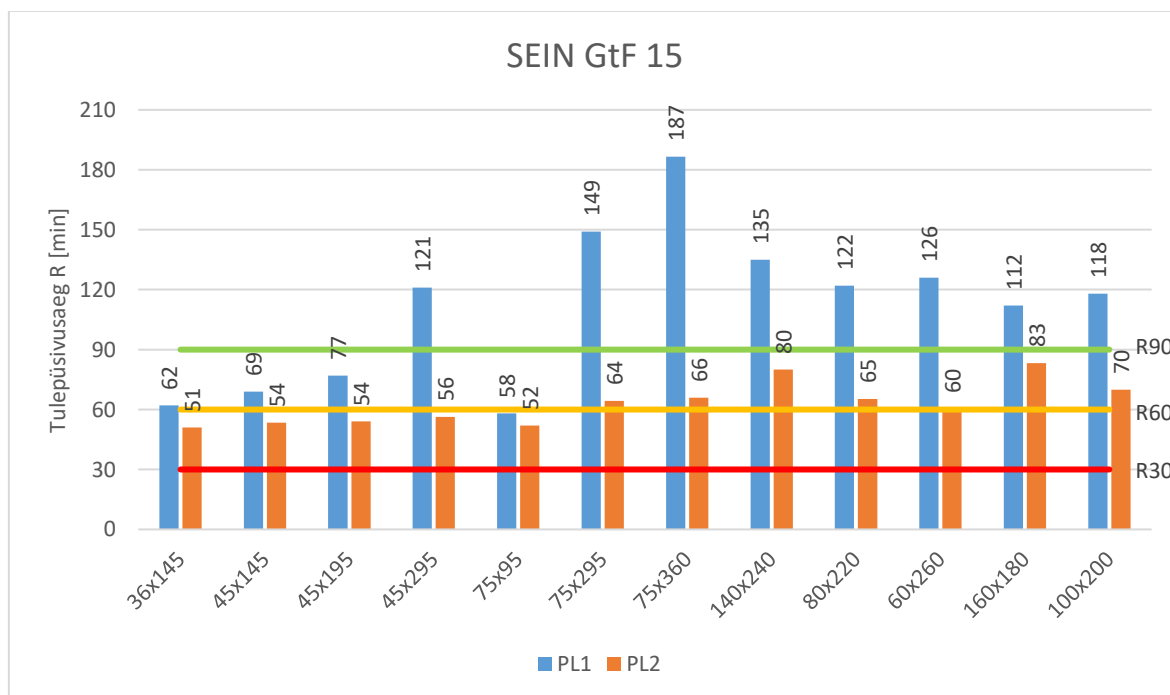
Lisa 6 Isolatsiooni mõju puikarkass-seinte arvutuslikule tulepüsivusele

Võrreldi erineva isolatsioonimaterjaliga puikarkass-seinte EN 1995-1-2:2020 järgseid tulepüsivusarvutusi, milles kasutati tõrketekkeaja 20% fraktiili.

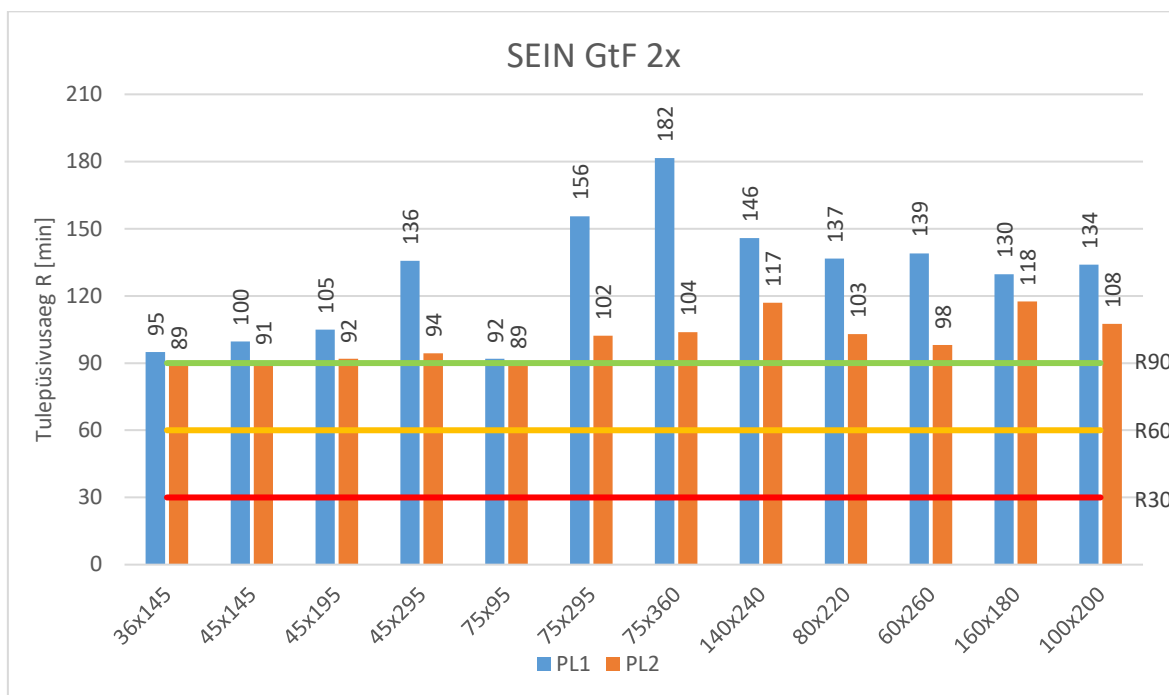
Graafik L6.1. Kahekordse kipsplaadiga GtA 12,5 kaetud puikarkass-seinte arvutuslike tulepüsivusaegade võrdlus sõltuvalt isolatsioonitüübist



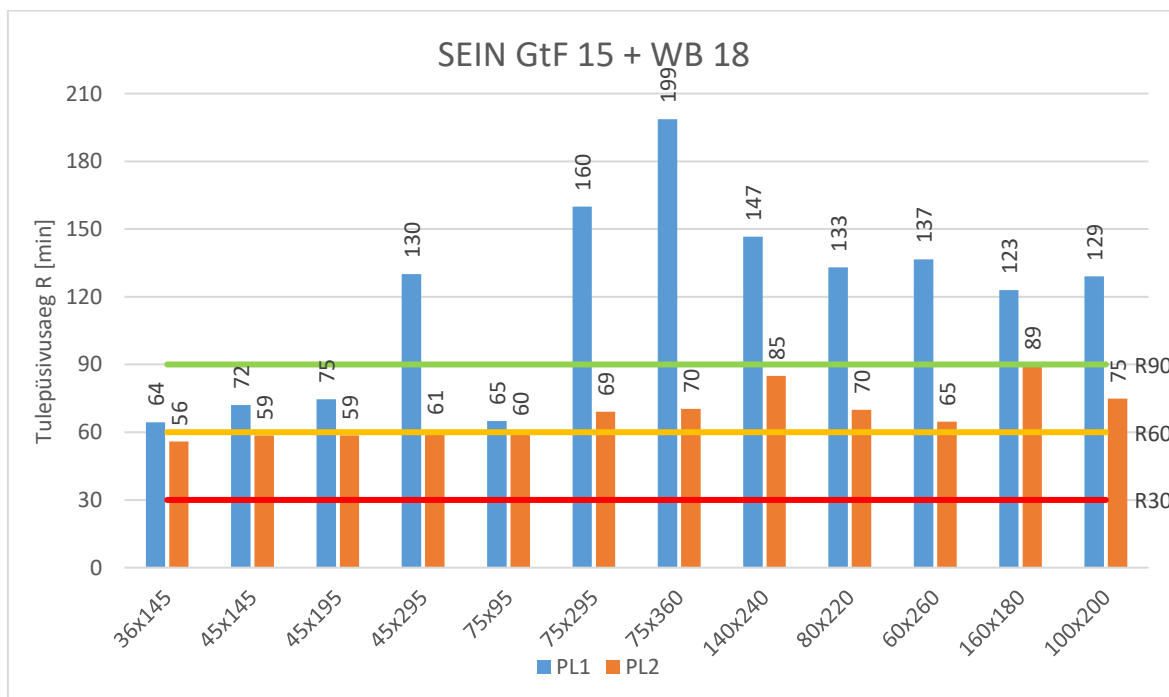
Graafik L6.2. Kipsplaadiga GtF 15 kaetud puikarkass-seinte arvutuslike tulepüsivusaegade võrdlus sõltuvalt isolatsioonitüübist



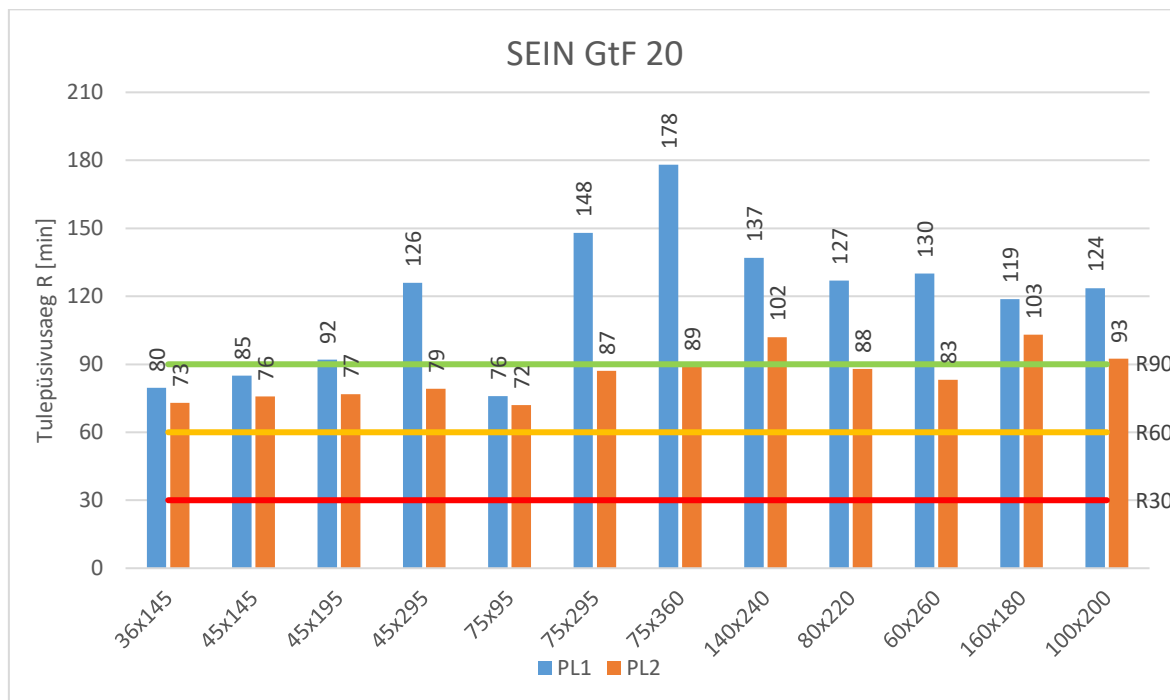
Graafik L6.3. Kahekordse kipsplaadiga GtF 15 kaetud puitkarkass-seinte arvutuslike tulepüsivusaegade võrdlus sõltuvalt isolatsioonitüübist



Graafik L6.4. Kipsplaadiga GtF 15 ja puitlaastplaadiga WB 18 kaetud puitkarkass-seinte arvutuslike tulepüsivusaegade võrdlus sõltuvalt isolatsioonitüübist



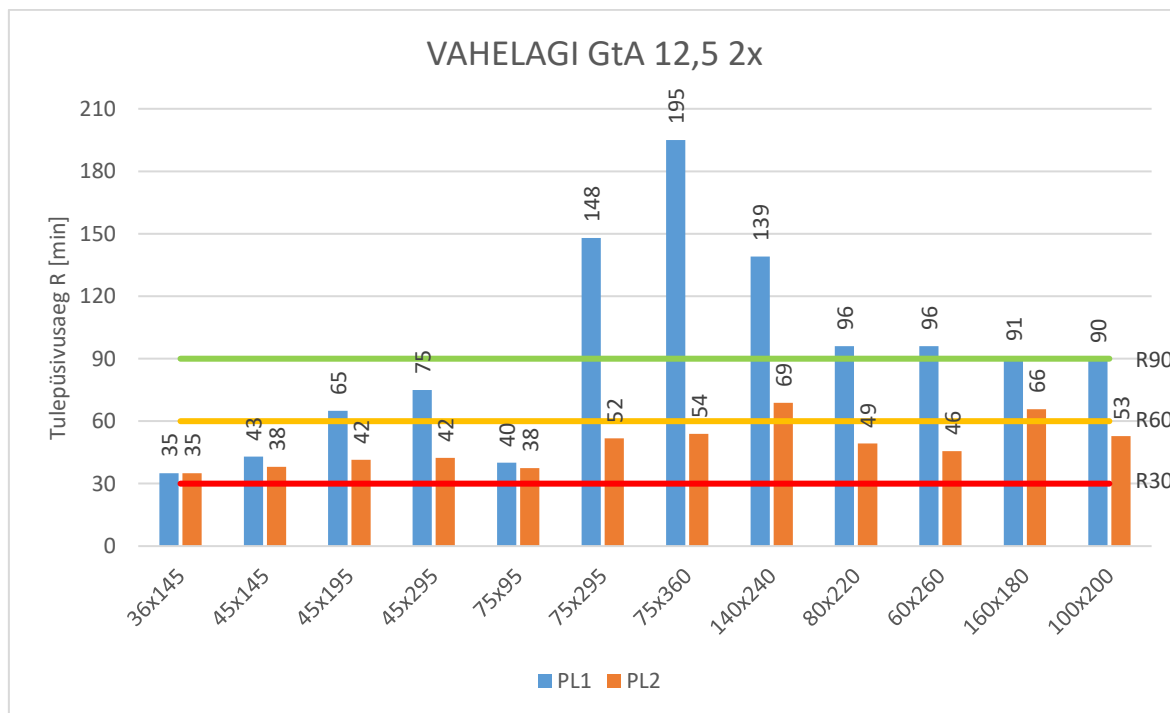
Graafik L6.5. Kipsplaadiga GtF 20 kaetud puitkarkass-seinte arvutuslike tulepüsivusaegade võrdlus sõltuvalt isolatsioonitüübist



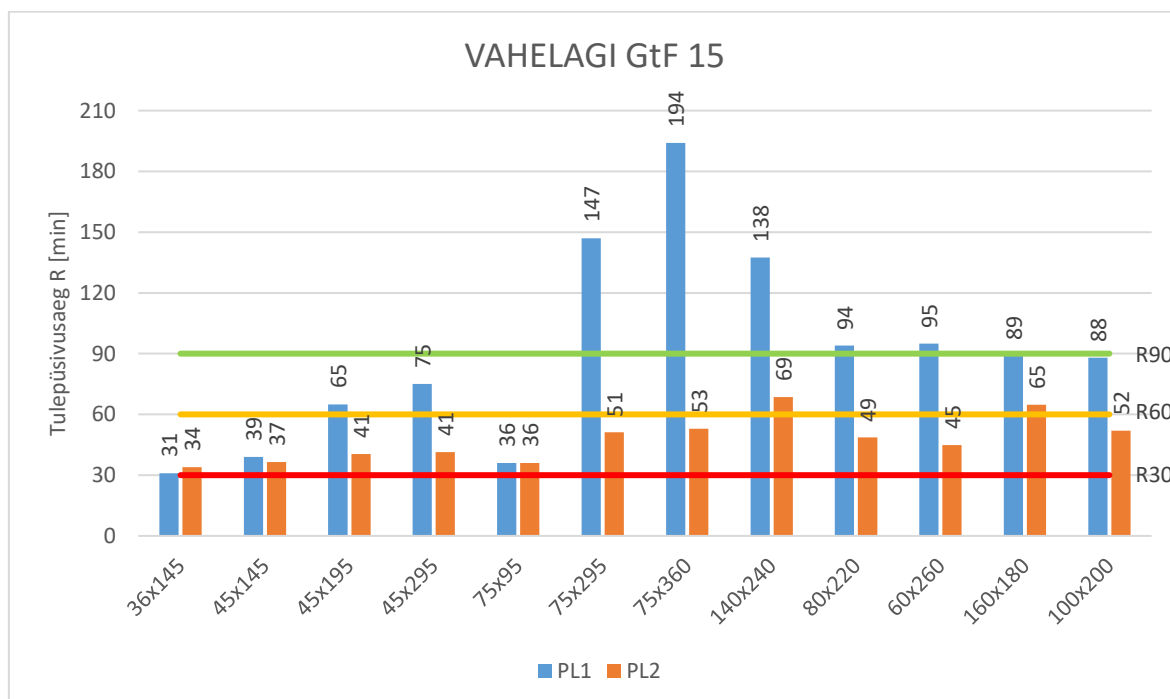
Lisa 7 Isolatsiooni mõju puikarkass-vahelagede arvutuslikule tulepüsivusele

Võrreldi erineva isolatsioonimaterjaliga puikarkass-vahelagede EN 1995-1-2:2020 järgseid tulepüsivusarvutusi, milles kasutati tõrketekkeaja 20% fraktiili.

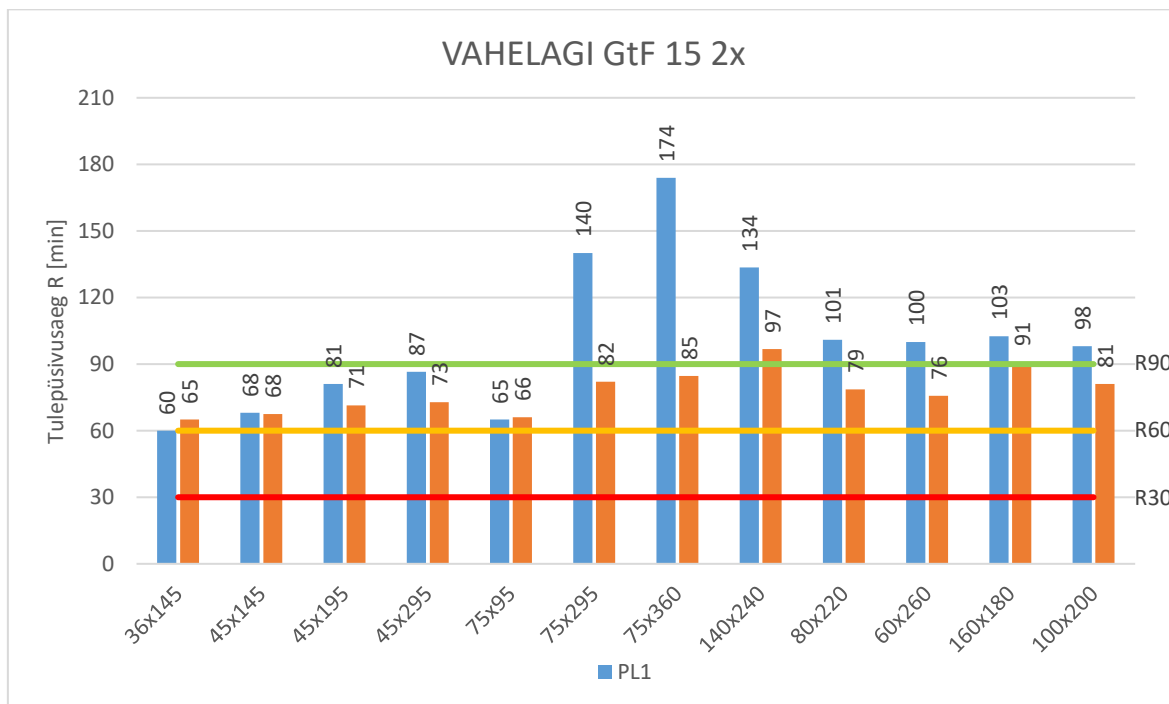
Graafik L7.1. Kahekordse kipsplaadiga GtA 12,5 kaetud puikarkass-vahelagede arvutuslike tulepüsivusaegade võrdlus sõltuvalt isolatsioonitüübist



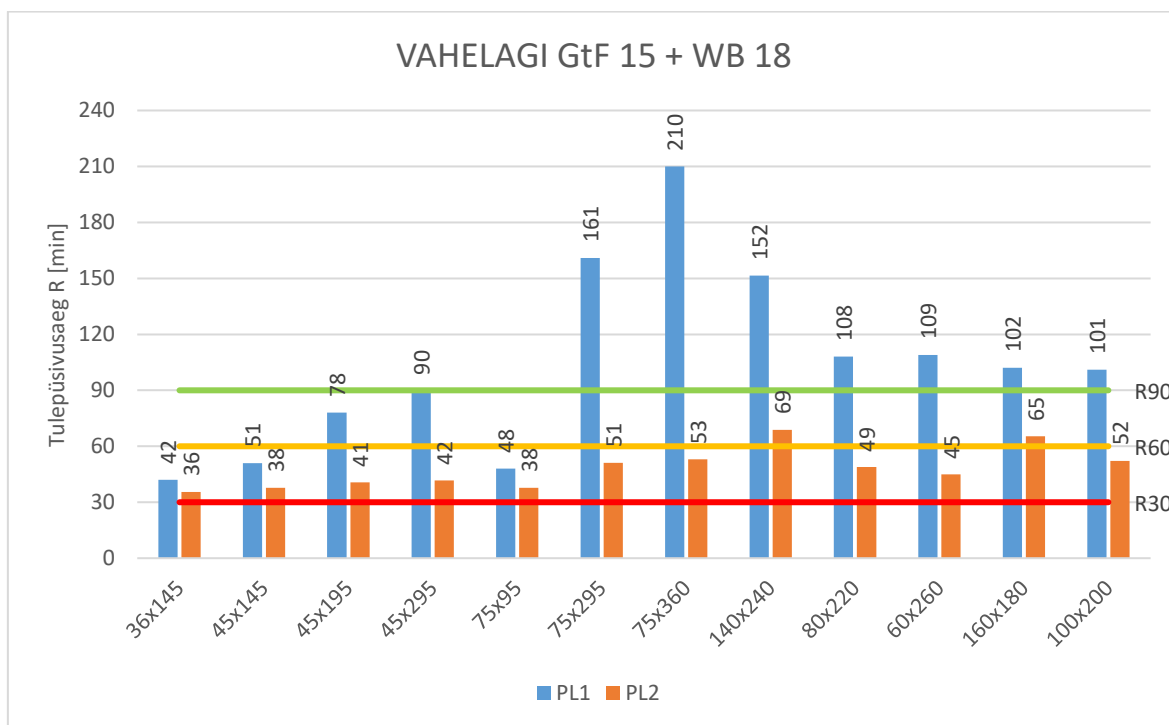
Graafik L7.2. Kipsplaadiga GtF 15 kaetud puikarkass-vahelagede arvutuslike tulepüsivusaegade võrdlus sõltuvalt isolatsioonitüübist



Graafik L7.3. Kahekordse kipsplaadiga GtF 15 kaetud puitkarkass-vahelagede arvutuslike tulepüsivusaegade võrdlus sõltuvalt isolatsioonitüübist



Graafik L7.4. Kipsplaadiga GtF 15 ja puitlaastplaadiga WB 18 kaetud puitkarkass-vahelagede arvutuslike tulepüsivusaegade võrdlus sõltuvalt isolatsioonitüübist



Graafik L7.5. Kipsplaadiga GtF 20 kaetud puitkarkass-vahelagede arvutuslike tulepüsivusaegade võrdlus sõltuvalt isolatsioonitüübist

