



1918

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

EHITUSTEADUSKOND

Ehitiste projekteerimise instituut

PUITKONSTRUKTSIOONIDE TULEPÜSIVUS:
STANDARDIS EVS-EN 1995-1-2 NING
KÄSIRAAMATUS "TULEOHUTUD PUITMAJAD 3"
TOODUD ARVUTUSMEETODITE RAKENDAMINE JA
VÕRDLUS

FIRE RESISTANCE OF TIMBER STRUCTURES: APPLICATION AND
COMPARISON OF CALCULATION METHODS PRESENTED IN STANDARD EVS-
EN 1995-1-2 AND HANDBOOK "FIRE SAFE WOODEN BUILDINGS 3"

EEK 60LT

Üliõpilane: Prit Tohver

(allkiri)

Juhendaja: Dots. Alar Just

(allkiri)

Tallinn, 2014.a.

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

..... (töö autori allkiri ja kuupäev)

Üliõpilase kood: 083221

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

..... (juhendaja allkiri ja kuupäev)

Kaitsmisele lubatud (kuupäev)

Kaitsmiskomisjoni esimees (allkiri)

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilase kood 083221EAEI
Ehitustehnika
õppesuuna üliõpilasele
Lõputöö kood: **PRIIT TOHVER**
Lõputöö juhendaja: **EEK 60LT**
Lõputöö teema: **ALAR JUST**

PUITKONSTRUKTSIOONIDE TULEPÜSIVUS: STANDARDIS EVS-EN 1995-1-2 NING KÄSIRAAMATUS "TULEOHUTUD PUITMAJAD 3" TOODUD ARVUTUSMEETODITE RAKENDAMINE JA VÕRDLUS

*Fire Resistance of Timber Structures: Application and Comparison of
Calculation Methods Presented in Standard EVS-EN 1995-1-2 and
Handbook „Fire Safe Wooden Buildings 3“*

Lõputöö teema kehtivusaeg: 1.1.2015

Lähteandmed:

Tulepüsivusarvutuste aluseks võtta vähemalt 5-kordse puitkarkassiga hoone projekt.
Võrdlused teha standardi EVS-EN 1995-1-2:2006 ning käsiraamatu „Tuleohutud
puitmajad 3“ põhjal.

Lõputöö sisu:

Võrrelda puitkarkasshoone tüüpkonstruktsioonide teoreetilist tulepüsivust kahel erineval
arvutusmeetodil (efektiivristlõike meetod ja vähendatud tugevusomaduste meetod). Tuua
välja põhilised erinevused ning anda üldiseid suuniseid puitkarkasshoonete tulepüsivuse
projekteerimiseks.

Kokkuvõtte eesti keeles
Resümee inglise keeles

Graafiline materjal:

Pole vajalik

Lõputöö väljaandmise kuupäev: **10.01.2014**

Juhendaja: **Alar Just**

Ülesande vastu võtnud: **Priit Tohver**

Sisukord

| | | |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 | Sissejuhatus..... | 3 |
| 1.1 | Üldosa..... | 3 |
| 1.2 | Puitkorrumajadest..... | 4 |
| 1.3 | Töö eesmärk..... | 5 |
| 1.4 | Terminid..... | 6 |
| 2 | Arvutuste aluseks valitud hoone kirjeldus..... | 8 |
| 3 | Tulepüsivusarvutused..... | 9 |
| 3.1 | Tarindite tüüplõiked..... | 9 |
| 3.2 | Arvutustes tehtud eeldused..... | 11 |
| 3.3 | Konstruksioonide tuletõkestusvõime (arvutusnäited)..... | 14 |
| 3.3.1 | Korterite vaheline sein käsiraamatu ptk 4.2.5 alusel..... | 14 |
| 3.3.2 | Korterite vaheline sein Eurokoodeksi lisa E alusel..... | 19 |
| 3.4 | Elementide jääkristlõiked (arvutusnäited)..... | 22 |
| 3.4.1 | Korterite vahelisi jääkusseinu toetav tala efektiivristlõike meetodil (tulekahju kolmest küljest)..... | 22 |
| 3.4.2 | Korterite vahelisi jääkusseinu toetav tala vähendatud tugevus- ja jääkusomaduste meetodil (tulekahju kolmest küljest)..... | 25 |
| 3.4.3 | Katuslaetala käsiraamatu ptk 5.5.5.2 alusel (tulekahju altpoolt)..... | 28 |
| 3.4.4 | Katuslaetala Eurokoodeksi lisa C alusel (tulekahju altpoolt)..... | 29 |
| 3.4.5 | II korruse kandev siseseina post käsiraamatu ptk 5.5.5.2 alusel..... | 31 |
| 3.4.6 | II korruse kandev siseseina post Eurokoodeksi lisa C alusel..... | 34 |
| 3.5 | Elementide kandevõime (arvutusnäited)..... | 37 |
| 3.5.1 | II korruse kandev siseseina post käsiraamatu põhjal..... | 37 |
| 3.5.2 | II korruse kandev siseseina post Eurokoodeksi põhjal..... | 39 |
| 4 | Tulepüsivusarvutuste koondtabelid..... | 42 |

| | | |
|-------|---------------------------------------------------|----|
| 5 | Tulemuste analüüs | 52 |
| 6 | Järeldused..... | 61 |
| 6.1 | Hoone projekteerimine tulekahju olukorras..... | 61 |
| 6.2 | Kandevõime sõltuvus valitud arvutusmeetodist..... | 61 |
| 6.3 | Tulepüsivuskriteeriumide kehtestamine..... | 62 |
| 6.4 | Tähelepanekuid arvutusmeetodite kohta..... | 63 |
| 6.4.1 | Käsiraamat | 63 |
| 6.4.2 | Eurokoodeks | 64 |
| | Kokkuvõte..... | 66 |
| | Summary | 68 |
| | Kasutatud allikad | 69 |
| | Lisa A Koormused, skeemid ja tulemid..... | 71 |
| A.1 | Koormuskombinatsioonid | 71 |
| A.2 | Normatiivsed koormused | 72 |
| A.2.1 | Lumekoormus | 72 |
| A.2.2 | Kasuskoormus..... | 74 |
| A.2.3 | Omakaalu koormus | 74 |
| A.2.4 | Tuulekoormus | 79 |
| A.3 | Koormusskeemid..... | 81 |
| A.4 | Arvutuslikud koormustulemid..... | 85 |
| A.5 | Konstruksioonide dimensioneerimistabelid..... | 87 |

1 Sissejuhatus

1.1 Üldosa

Puit on ajalooliselt olnud traditsiooniline ehitusmaterjal. Seda eelkõige tema lihtsa töödeldavuse ja kättesaadavuse poolest. Teisalt on suuremate ja kõrgemate hoonete spetsiifikast tulenevalt terase ja betooni kasutusele võtuga puidu osakaal ehituses langenud. Osaliselt on see tingitud ehitistele kehtestatud nõuetest. Ehitis peab olema piisavalt tugev ja jäik, et võtta vastu temale mõjuvad koormused. Lisaks tugevusnõuetele tuleb garanteerida hoones viibivate inimeste ohutus. Üks ohutuse liike on ka tuleohutus. Kuna puit on põlev materjal kasutatakse teda oluliselt vähem kui betooni või terast. Seega on ajapikku kehtestatud ehitistele üha enam reegleid, mille tulemusel on puidu kui ehitusmaterjali kasutamine vähenenud.

Siiski on puit laialt levinud väiksemate hoonete ehitamisel, eriti Põhjamaades. Näiteks Eestis ei esitata kuni kahekorruseliste ühepereelamutele mingeid tulepüsivuse nõudeid, mis piiraksid puitmaterjali kasutamist. Lisaks eramutele, ehitatakse puidust üha enam ka kortermaju ning ühiskondlikke hooneid. Aina laialdasemat kasutust leiavad uued puidupõhised materjalid. Näiteks liimpuit, mille tugevus- ja jäikusomadused on võrreldes saepuiduga suuremad. Seetõttu on puitkonstruktsioonid tänapäeval jälle populaarsust kasvatamas. Samas piiravad puidu kasutamist tuleohutusnõuded. Siinjuures mitte nõuded iseenesest, sest ohutus on iga ehitise puhul esmatähtis, vaid nende nõuete täitmise tõendamine.

Eestis on ca 140 puitmaju tootvat ettevõtet. Põhiliselt valmistatakse puitelement-, moodul- ja palkmaju. Puitelement- ja eriti ruumilistest moodulmajadest hoone ehitamine on väga perspektiivikas ettevõtmine. Viimastel andmetel on Eesti Euroopa Liidus absoluutnumbrite alusel suurim puitmajade eksportija. Müügitulult oleme 8-ndad, kogumahas ca 200 mln €. Enamik toodangust müüakse Põhjamaadesse.[20][21]

Vastavalt hoone asukohale kehtestakse ka tulepüsivusnõuded. Tihti on nõuded riigiti erinevad, vaatamata asjaolule, et kehtib ühtne standard tulepüsivuse projekteerimiseks. Hetkel kehtib Eestis puitkonstruktsioonide tulepüsivust käsitlev standard EVS-EN 1995-1-2 (edaspidi Eurokoodeks). Kuna standard on välja antud ligi 10 aastat tagasi, ei sisalda see viimaseid teadussaavutusi puitkonstruktsioonide tulepüsivuse valdkonnast. Lisaks on kehtivas standardis mitmeid piiranguid, mis takistavad puitkonstruktsioonide kasutamist.

Alternatiivina Eurokoodeksile võib tulepüsivuse projekteerimiseks kasutada käsiraamatutes toodud meetodeid. 2014. aasta alguses ilmus eesti keeles käsiraamat „Tuleohutud puitmajad 3“ (edaspidi käsiraamat). See on tõlge rootsi keelsest originaalist „Brandsäkra Trähus 3“. Käsiraamat täiendab osaliselt EN-1995-1-2 toodud arvutusmeetodeid, kuid pakub ka täiesti uusi võimalusi Eurokoodeksis mittekäsitletud materjalide arvutamiseks (nt ristkihtpuit ja I-talad). Käsiraamatu usaldusväärsus põhineb enam kui 340-l täismõõtnes tulekatsel.[11]

Tuleohutust käsitlevates õigusnormides on tihti viidatud kolmele kriteeriumile R,E ja I. Nende tähistega kehtestatakse hoone konstruktsioonidele kandevõime, terviklikkuse ja soojusisolatsiooni nõuded. Ühtlasi viitavad R,E ja I standardtulekahju tingimustele, millele vastavust tuleb tõendada kas katseliselt või aktsepteeritud teoreetiliste arvutusmetoodikate abil. Standardis EVS-EN 1995-1-2 toodud arvutusmeetodid (edaspidi Eurokoodeksi meetod) kehtivad kuni 60 min standardtulekahju tingimustes. Seega kui normidega nõutav tulepüsivusaeg ületab 60 min tuleb konstruktsiooni vastupanu tõestada katseliselt või muid meetodeid rakendades. Katsete läbiviimine on aga kallid ning praktikas vähe kasutatavad. Seepärast on vajadus teoreetiliste tõendusmeetodite rakendamiseks. Käesolevas töös vaadeldaksegi lähemalt käsiraamatus „Tuleohutud puitmajad 3“ toodud arvutusmeetodeid (edaspidi käsiraamatu meetod), millele ei ole kehtestatud 60 min piiri.

Lisaks tulepüsivusarvutustele on mitmeid konstruktiivseid võtteid, millega tulekahju mõjusid minimiseerida. Selle kohast infot leiab samuti käsiraamatust „Tuleohutud puitmajad 3“.[10]

1.2 Puitkorrusmajadest

Puitkorrusmajade ehitamisel kasutatakse mitmesuguseid konstruktiivseid lahendusi. Enam levinud ehitusviisid on:

- elementidest ehitus (sh ka ruumilised elemendid)
- paneelidest ehitus (nt ristkihtpuidust paneelid)
- post-tala süsteemid.

Antud töös keskendutakse elementehitusele.

Elementide kandva osa moodustab sae- või liimpuidust koostatud põhikarkass. Karkassi vahelised tühemikud on enamasti kas osaliselt või täielikult mineraalvillaga täidetud. Välispiirete korral paigaldatakse põhikarkassi külge tuuletõkkeplaadid, mille materjaliks

võib olla nii min.vill, puitkiud kui ka kips. Tuuletõkkeplaadile järgnevad tuulutusroovid ning välisviimistlus. Põhikarkassi sisemisele küljele kinnitatakse jäigastusplaat, aurutõke, lisakarkass+soojustus ning olenevalt seinafunktsioonist erinevad ehitusplaadid. Siseseinte korral on kihid tihtipeale sümmeetrilised ehk põhikarkassi külge lähevad seinafunktsioonist sõltuvad ehitusplaadid. Täpsemat kirjeldust käesolevas töös kasutatavate tüüpkonstruktsioonide kohta vt ptk-s 3.1 „Tarindite tüüplõiked“.

Mitmekorruselise puitkarkasshoone kokkupanek toimub platvormmeetodil. Meetodi idee seisneb selles, et alumise korruse seintele toetatud vahelaed on tasapindseks aluseks ülemise korruse seinte püstitamiseks. Ülemise korruse seinaelemendid rihitakse ja kinnitatakse vahelaed asuvatele sidepuudele. See tagab montaaži täpsuse.

Platvormmeetodi korral on seinapostid igal korrusel vahelaetasapinnaga katkestatud. Seega nende nõtkepikkuse seinatasandist välja määrab korruse kõrgus. Seejuures seinatasandis on hoonele mõjuvate horisontaalsete koormuste vastuvõtmiseks enamasti jäigastusplaat, mis pakub postidele külgsuunalist nõtketuge. Seepärast saabki seinapõhikarkassi dimensioneerimisel tihti määravaks horisontaalsete elementide muljumine. Vastavalt Eurokoodeksile ei pea aga tulekahju olukorras muljumist kontrollima. Seega on postide kandevõimes mõningane varu.

Hoone jääkuse tagamiseks peavad vahelaed toimima diafragmana, kandes horisontaalseid koormusi jääkusseintele. Lisaks peab vahelagi võtma vastu temale mõjuva vertikaalse koormuse. Sõltuvalt vahelaemõõtmetest ja konstruktsioonist, võib talade dimensioneerimisel määravaks saada nii kandevõime, läbipaine kui ka vibratsioon. Olukordades, kus kandevõime ei saa määravaks, on tulekahju tingimustes jällegi teatav varu, kuna üldjuhul kasutuspiiriseisundit erakorralises arvutusolukorras ei kontrollita.

Seega on mitmekorruselise puitkarkasshoone konstrueerimisel normaal- ja tulekahjuolukorras mõningaid erinevusi, millest osale ka käesolevas töös viidatakse.

1.3 Töö eesmärk

Antud lõputöö eesmärk on kahel erineval meetodil teostada puitkarkasshoone tüüpkonstruktsioonide tulepüsivusarvutused. Seejärel võrrelda saadud tulemusi, tuua välja põhilised erinevused ning anda suunitlusi puitkarkasshoonete tulepüsivuse projekteerimiseks.

1.4 Terminid

$a_0; a_1$ – tugevuse modifikatsiooniteguri arvutamiseks vajalikud abitegurid

b – ristlõike laius, mm

b_{ef} – jääkristlõike laius, mm

d_0 – nulltugevusega kihi paksus, mm

d_{char} – söestumissügavus, mm

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

d_{ef} – efektiivne söestumissügavus, mm

E_{20} – puidu elastsusmooduli 20% fraktsioon, N/mm^2

f_{20} – puidu tugevuse 20% fraktsioon, N/mm^2

$f_{c,0,d,fi}$ – arvutuslik puidu survetugevus tulekahju olukorras, N/mm^2

h – ristlõike kõrgus, mm

h_{ef} – jääkristlõike kõrgus, mm

h_i – i -nda kaitsekihi paksus, mm

h_p – kaitsekihi (kattekihi) kogupaksus, mm

k_0 – nulltugevusega kihi paksuse arvutamiseks kasutatav tegur

k_2 – kaitsetegur, isolatsioonitegur

k_3 – järelkaitsetegur

k_{dens} – tihedust arvestav tegur

k_{fi} – tegur

k_h – plaadi paksust arvestav tegur

k_j – liitetegur

k_{mod} – modifikatsioonitegur normaalolukorras

$k_{mod,fi}$ – modifikatsioonitegur tulekahju olukorras

k_n – ristlõike täisnurkseks teisendamise tegur

k_p – plaadi tihedust arvestav tegur

k_{pos} – asukohategur

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

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

k_s – ristlõiketegur

$l_{a,min}$ – kinnituselemendi minimaalne süvistuspikkus põlemata puidus, mm

l_f – kinnituselemendi pikkus, mm

t_a – piiraeg, min

t_{ch} – söestumise algusaeg, min
 t_f – kaitsekihi tõrketekkeae, min
 t_k – elemendi tulele avatuse aeg kaitsefaasis, min
 t_{ins} – konstruktsiooni summaarne tuletõkestuvõimeae, min
 $t_{ins,0,i}$ – baasisolatsiooni „i“ kihi põhiväärtus, min
 $t_{ins,i}$ – i-nda kihi isolatsiooniae, min
 $t_{ins,0,n}$ – tarindi viimase kihi n isolatsiooniae baasväärtus tulele mitteavatud poolel, min
 $t_{ins,n}$ – tarindi viimase kihi n isolatsiooniae tulele mitteavatud poolel, min
 $t_{prot,0,i}$ – kihi i pakutava kaitseae baasväärtus, min
 $t_{prot,i}$ – kihi i pakutav kaitseae, min
 t_{req} – nõutav tulepüsivusaeg, min
 β_0 – arvutuslik lineaarne söestumiskiirus standardtulekahjus, mm/min
 β_n – eeldatav arvutuslik söestumiskiirus standardtulekahjus, mm/min
 $\gamma_{M,fi}$ – puidu osavarutegur tulekahju olukorras
 Δt_i – lisakaitseae kihtidele, mis on kaitstud F-tüüpi kipsplaadiga, min
 ρ_i – i-nda kaitsekihi tihedus, kg/m³
 $\Sigma t_{prot,p}$ – vaadeldavale kihile eelnevate kihtide kaitseaeade summa, min

2 Arvutuste aluseks valitud hoone kirjeldus

Arvutuste aluseks on valitud objekt, mis asub Norras Nordlandi maakonnas Mørkvedi linnas. Tegu on rannikuäärse piirkonnaga. Kavandatud on ehitada õpilaselamu, mille moodustab üks 4- ja teine 5-korruseline sektsioon, kokku 144 1-toalise korteriga. Käesolevas töös on vaadeldud ainult hoone ühte tiiba, so 5-korruselise sektsiooni. Seejuures ei käsitleta trepikodade ning hoone kahte tiiba ühendavate konstruktsioonide dimensioneerimist. Samuti ei vaadelda antud töö mahtu silmas pidades jäikusseinte dimensioneerimist vaid keskendutakse ainult tüüplõikele.

Hoone tüüplõike konstruktiivne skeem on toodud lisas A (vt Joonis 3 lk 81). Kandva süsteemi moodustavad pikisuunas telgedel A-D asetsevad välis- ja siseseinad, mis koos vahelagedega töötavad nii vertikaal- kui horisontaalsuunalistele koormustele. Põikseinad on omakaalule ja horisontaalsetele koormustele töötavad. Osaliselt tuleb telgede C ja D vaheliste põikseinte toetamiseks 1.korrusel talasid kasutada.

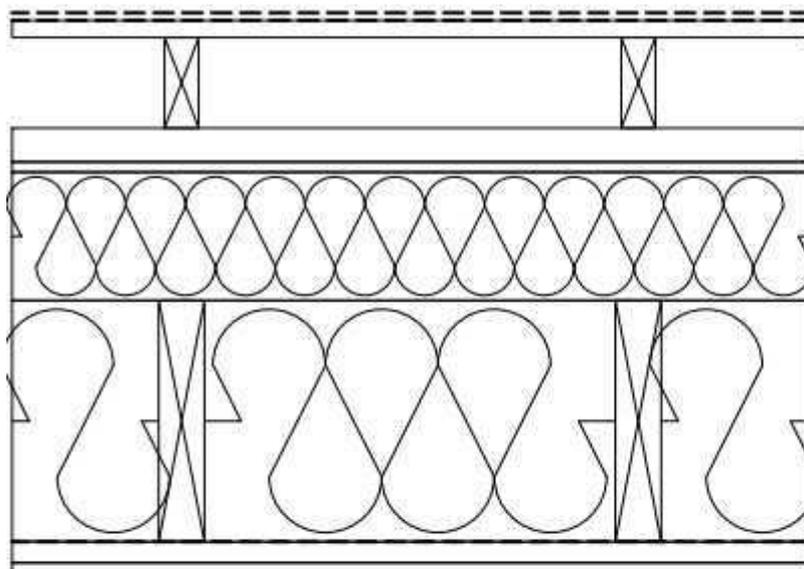
Kõik põhikandekonstruktsioonid peavad rahuldama R90 kriteeriumi. Tuletõkkesektsioone eraldavatele tarinditele on kehtestatud EI90 nõue. Vertikaalne ja horisontaalne tule levik erinevate tuletõkkesektsioonide vahel on takistatud sprinkleritega, mis on ühendatud ühtsesse süsteemi. Kõik ruumid on varustatud tulekahju signalisatsiooniga, mis on samuti omavahel ühendatud. See tähendab, et kui 2 min jooksul ei lülitata esimesena rakenduvat alarmi välja või avaneb vähemalt üks sprinkler, siis edastatakse signaal kõikidele alarmseadmetele.

Hoonele mõjuvad koormused, koormustulemid ja normaalolukorra järgne konstruktsioonide dimensioneerimine on toodud lisas A. Kogu alljärgnev tulepüsivuse osa põhineb lisal A.

3 Tulepüsivusarvutused

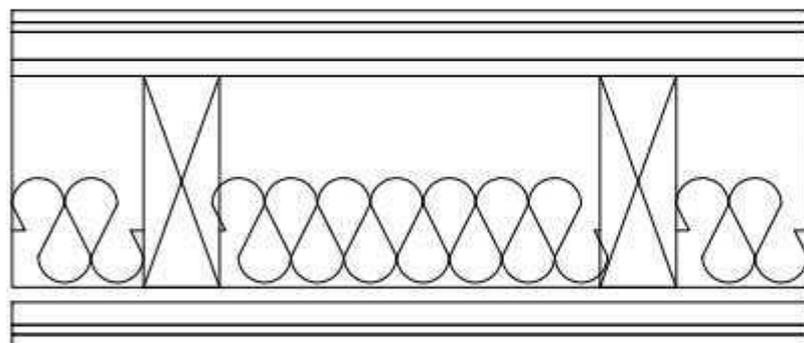
Arvutuste aluseks on valitud järgnevad tarindid, mis hõlmavad enamuse hoone tüüpkonstruktsioonidest. Nagu eelpool mainitud, ei käsitleta antud lõputöös trepikodade ning hoone kahte tiiba ühendavate konstruktsioonide tulepüsivuse projekteerimist.

3.1 Tarindite tüüplõiked



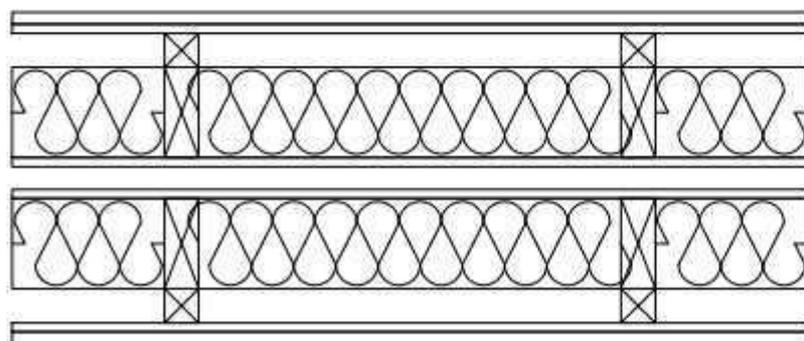
KATUSLAGI

2xSBS rullmaterjal
puitlaastplaat 22mm
kaldroov 45x120mm s600
tuulutusrööv 45x45mm s600
min. villast tuuletõkkeplaat 13mm
põiktalad 45x170mm s600
kivivill 175mm
liimpuittalad 60x320mm s600
kivivill 325mm
aurutõkkele
roov 28x70mm s400
standardkipsplaat 12,5mm



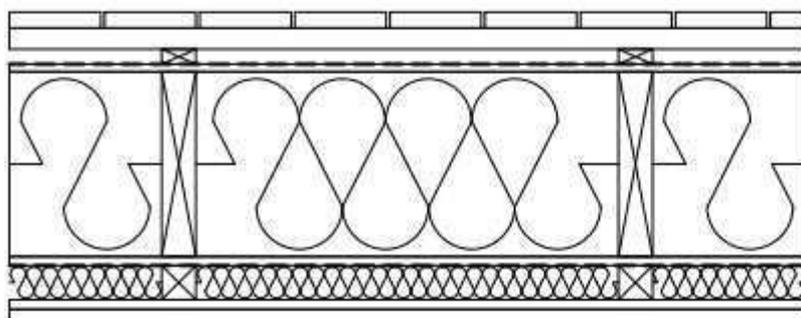
VAHELAGI

põrandakate 15mm
põrandakipsplaat 12,5mm
helisummutusplaat 36mm
puitlaastplaat 21mm
liimpuittalad 100x280mm s600
kivivill 150mm
ripplae roov 30x48mm s400
standardkipsplaat 12,5mm
tuletõkkekipsplaat 15,5mm



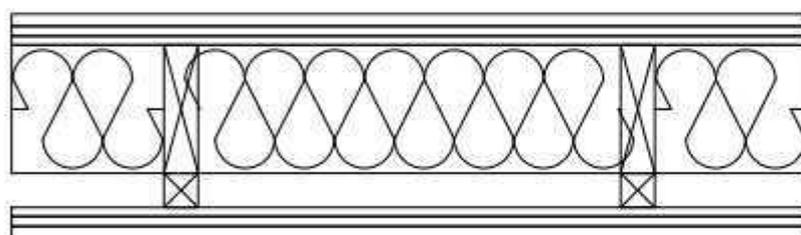
KORTERITE VAHELINE SEIN

tuletõkkekipsplaat 15,5mm
OSB/3-plaat 12mm
lisakarkass 45x45mm s600
põhikarkass 45x120mm s600
kivivill 125mm
OSB/3-plaat 12mm
õhuvahe 30mm
OSB/3-plaat 12mm
kivivill 125mm
põhikarkass 45x120mm s600
lisakarkass 45x45mm s600
OSB/3-plaat 12mm
tuletõkkekipsplaat 15,5mm



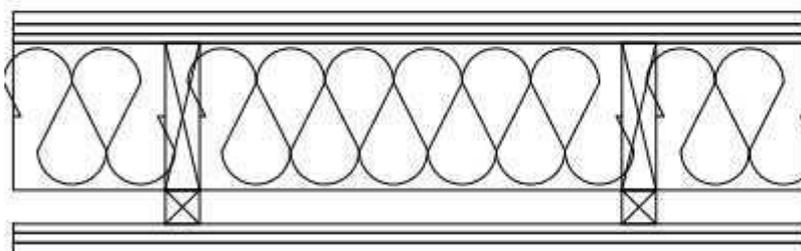
VÄLISSEIN

vert. laudis 21mm
 hor. roov 28x70mm s600
 vert.roov 20x45mm s600
 tuuletõkkekangas
 tuuletõkkekipsplaat 9,5mm
 põhikarkass 45x245mm s600
 kivivill 250mm
 OSB/3-plaat 12mm
 aurutõkkekile
 lisakarkass 45x45mm s600
 kivivill 50mm
 standardkipsplaat 12,5mm
 tuletõkkekipsplaat 15,5mm



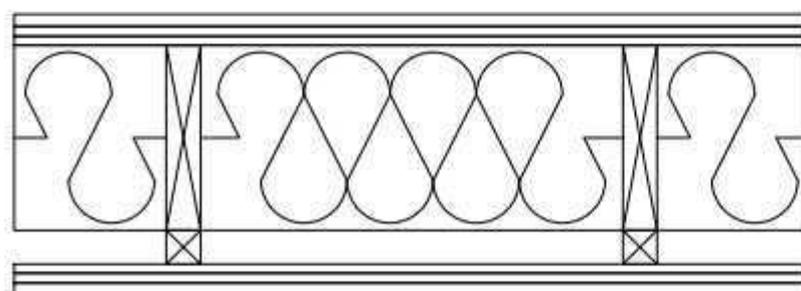
KANDEV SISESEIN 3.-5.korrus

tuletõkkekipsplaat 15,5mm
 standardkipsplaat 12,5mm
 OSB/3-plaat 12mm
 põhikarkass 45x170mm s600
 kivivill 175mm
 lisakarkass 45x45mm s600
 OSB/3-plaat 12mm
 standardkipsplaat 12,5mm
 tuletõkkekipsplaat 15,5mm



KANDEV SISESEIN 2.korrus

tuletõkkekipsplaat 15,5mm
 standardkipsplaat 12,5mm
 OSB/3-plaat 12mm
 põhikarkass 45x195mm s400
 kivivill 200mm
 lisakarkass 45x45mm s400
 OSB/3-plaat 12mm
 standardkipsplaat 12,5mm
 tuletõkkekipsplaat 15,5mm



KANDEV SISESEIN 1.korrus

tuletõkkekipsplaat 15,5mm
 standardkipsplaat 12,5mm
 OSB/3-plaat 12mm
 põhikarkass 45x245mm s400
 kivivill 250mm
 lisakarkass 45x45mm s400
 OSB/3-plaat 12mm
 standardkipsplaat 12,5mm
 tuletõkkekipsplaat 15,5mm

3.2 Arvutustes tehtud eeldused

Vältimaks ebaselgusi on käesolevas peatükis loetletud kriteeriume, millistel tingimustel jõuti allpool toodud arvutustulemusteni. Nendeks on:

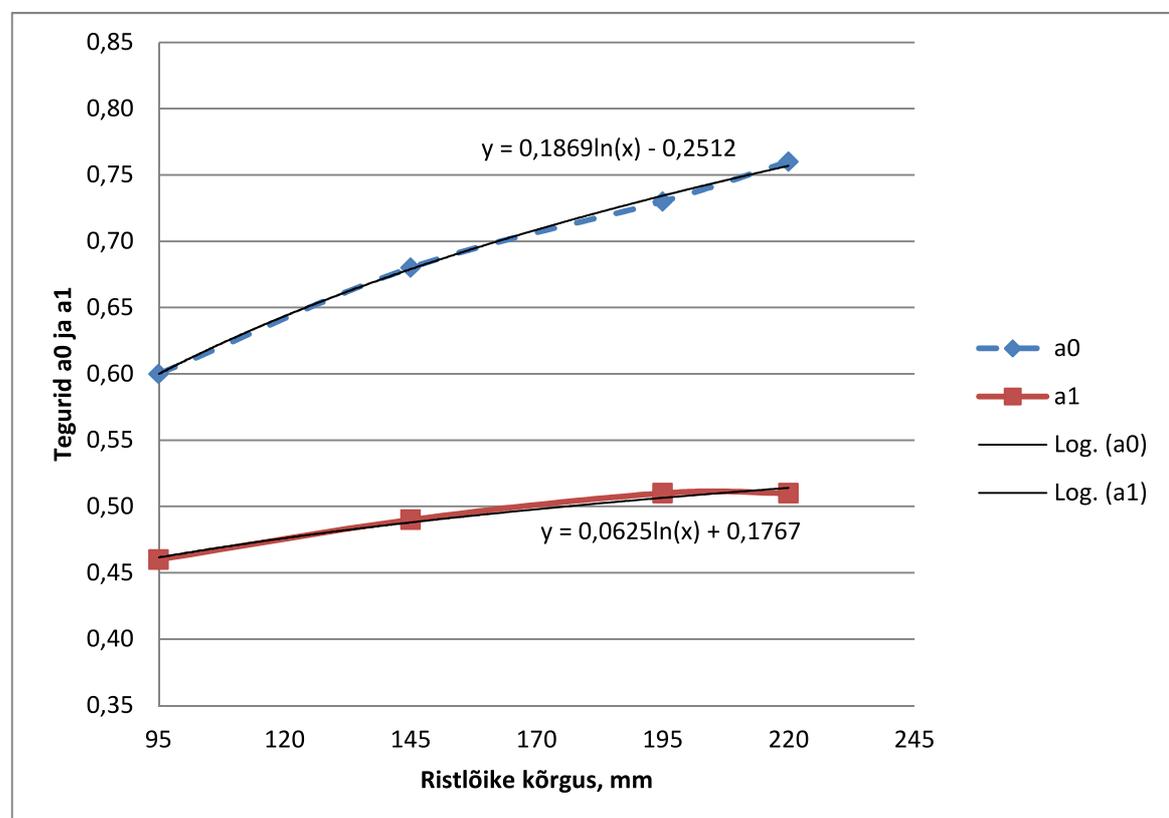
- min. villast isolatsioon püsib karkassielementide vahel ka pärast kattekihi purunemist, tagades sellega, et post või tala oleks tulele avatud ainult ühelt küljelt
- läbi soojustusekihi suurenenud soojusvoogu arvestatakse nurkade ümardumisega ning söestumise kiirust ei vähendata 25mm söekihi tekkimisel (va korterite vahelisi seinu toetaval talal)
- Eurokoodeksi järgi arvutades leitakse F+A-tüüpi kaitsekihi korral ristlõike söestumise algusaeg järgmiselt: $t_{ch} = 2,8 \cdot h_p - 14$, kus h_p – kipsplaatide summaarne paksus, mm
- käsiraamatu meetodil ei arvestata ristlõike söestumissügavuse leidmisel 2xA-tüüpi kaitsekihi korral kaitsefaasiga kuna kaitsetegurit k_2 saab määrata ainult F- või F+A-tüüpi kattekihile (selline olukord on välisseina posti jääkristlõike arvutamisel, kus kaitsefaasi pikkus 2xA-tüüpi kattekihi korral on ainult 2 min)
- konstruktsioonides, kus karkassielement jääb tulele avamata, st reaalse söestumissügavus on 0, vähendatakse elemendi tugevust kas nulltugevusega kihi võrra või rakendatakse tugevuse modifikatsioonitegurit, sõltumata tulekahju kestvusest. Näide: kahekordse karkassiga korterite vahelise seinaga kõigi postide tugevust on vähendatud isegi 30 min tulekahju kestvuse korral, mil nende pinnad jäävad tulele avamata.
- Eurokoodeksi lisa C järgi arvutuste võimaldamiseks on kipsplaatide tõrketekkeajad võetud käsiraamatu tabelist 5.2
- kandva siseseina posti jääkristlõige on eeldatud sama suureks olenemata sellest kummal pool seinaga tulekahju tekib (ehk ei ole arvestatud lisakarkassi positiivse mõjuga jääkristlõike suurusele, kui tulekahju tekib eluruumis)
- vahelae tuletõkestusvõime arvutuses ei oma helisummutusplaat ja põranda pealne viimistluskiht tulepüsivusaega, st nende arvutuslik tulepüsivusaeg võrdub 0-ga
- katuslae tuletõkestusvõime arvutuses on min. villast tuuletõkkeplaadi arvutuslik tulepüsivusaeg võrdne 0-ga
- väliskeskkonnas tekkiva tulekahju korral on esimeseks kaitsekihiks välisseinas tuuletõkkekipsplaat ning katuslaes kivivillast soojustus

- Eurokoodeksi põhjal teostatud arvutustes on eeldatud, et kõik konstruktsioonid vastavad meetodite kehtivus kriteeriumidele (nt puitlaastplaadi normtihedus peab olema $> 600 \text{ kg/m}^3$, mil tegelikult on arvutustes kasutatud OSB/3-plaati normtihedusega 550 kg/m^3)
- paksemate kui 20mm puidupõhisteplaatide söestumiskiiruse leidmisel on plaadi paksust arvestav tegur $k_h = 1$
- söestumise algusaja arvutamisel Eurokoodeksi järgi on eeldatud, et kipsplaatide külgühendused on täidetud või vuukide laius $< 2\text{mm}$
- elemendi kandevõime arvutuses määrab kaitsekihi tõrketekkeaja plaadi termiline lagunemine (ehk kinnituselemendi pikkus ei saa määravaks)

Ristlõike kõrgustele $h > 220\text{mm}$ leitakse Eurokoodeksi lisa C järgne tugevuse modifikatsioonitegur ekstrapoleerimise teel allpool toodud graafikute abil.

Graafik 1 kujutab tala tulele avatud külje paindetugevuse vähendamiseks mõeldud modifikatsiooniteguri arvutamiseks vajalikke abitegureid.

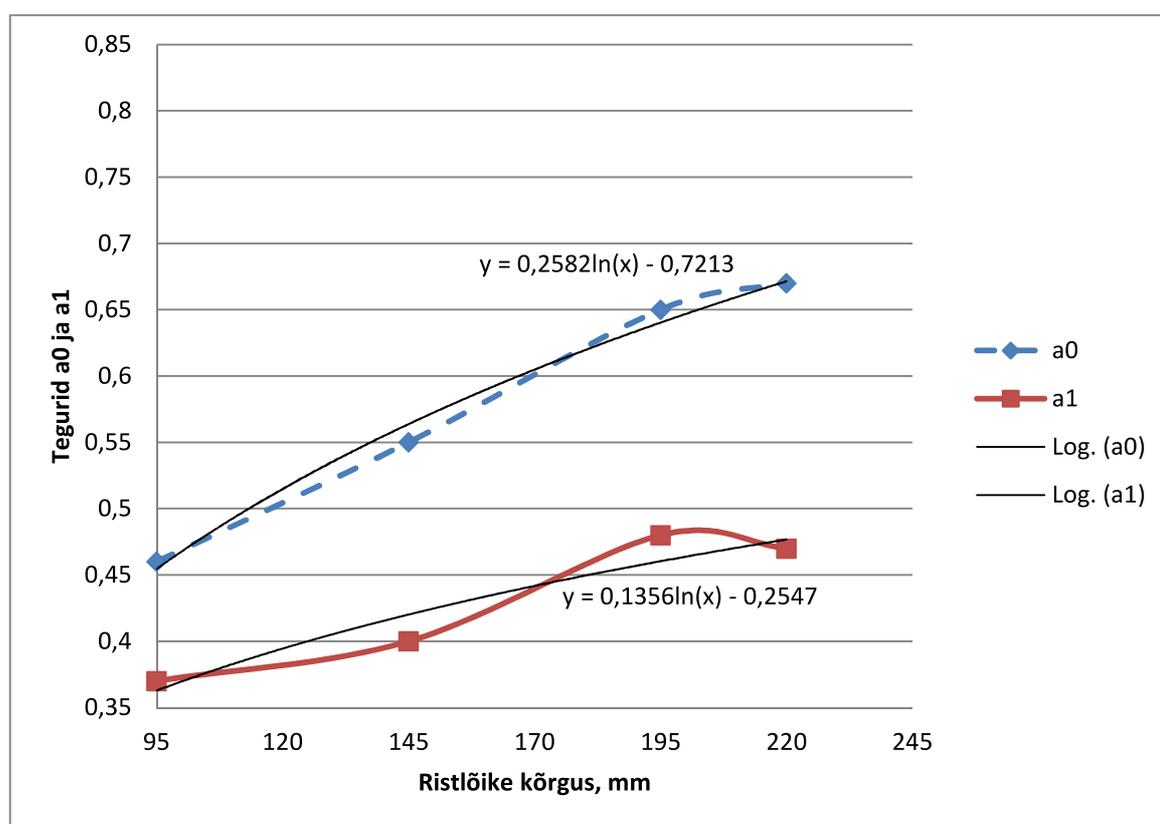
Graafik 1. Eurokoodeksi lisa C tabel C.2 põhjal koostatud graafik olukorrale 1



Vastavalt Eurokoodeksis toodud tabelandmetele on tuletatud joone võrrandid enam kui 220 mm ristlõike kõrgusega elementide tugevuse modifikatsioonitegurite arvutamiseks ekstrapoleerimise teel. Saadud valemeid on kasutatud vahelaeta- ja katuslaetade vähendatud tugevusomaduste arvutamisel, kus vahelaetala ristlõike kõrgus $h=280\text{mm}$ ning katuslaetala ristlõike kõrgus $h=320\text{mm}$.

Graafik 2 kujutab posti ja tala tulele avatud külje survetugevuse vähendamiseks mõeldud modifikatsioonitegurite arvutamiseks vajalikke abitegureid.

Graafik 2. Eurokoodeksi lisa C tabel C.2 olukord 2 ja 3



Sarnaselt paindetugevuse modifikatsiooniteguri graafikule on antud joone võrrandeid kasutatud selliste postide tugevusomaduste vähendamiseks, mille ristlõike kõrgus $h > 220\text{mm}$ ning katuslaetala arvutamisel kui tulele avatud külg on survetsoonis.

Arvutused käsiraamatu meetodil:

- elemendi söestumise algusajaks võeti täiustatud liitmismeetodiga leitud kattekihtide kaitseaegade summa (minutites)
- kui $d_{\text{char}} > 30\text{mm}$, siis ristlõiketegur $k_s = 0,00023b^2 - 0,045b + 3,19$ [11] valem 6.48

3.3 Konstruksioonide tuletõkestusvõime (arvutusnäited)

3.3.1 Korterite vaheline sein käsiraamatu ptk 4.2.5 alusel

1. kiht kipsplaat F

$$h_1 = 15,5 \text{ mm}$$

baaskaitseag

$$\begin{aligned} t_{\text{prot},0,1} &= 31,2 \text{ min} &= 30(h_1 / 15)^{1.2} \\ & &= 30(15,5 / 15)^{1.2} \end{aligned}$$

järgneva kihi mõju

$$k_{\text{pos,unexp},1} = 1,00$$

kaitseag

$$\begin{aligned} t_{\text{prot},1} &= 31,2 \text{ min} &= t_{\text{prot},0,1} k_{\text{pos,unexp},1} \\ & &= 31,2 * 1,00 \end{aligned}$$

2. kiht OSB/3 plaat

$$h_2 = 12 \text{ mm}$$

$$\rho_2 = 550 \text{ kg/m}^3$$

baaskaitseag

$$\begin{aligned} t_{\text{prot},0,2} &= 13,1 \text{ min} &= 23(h_2 / 20)^{1.1} \\ & &= 23(12 / 20)^{1.1} \\ t_{\text{prot},0,2} &= 11,4 \text{ min} &= h_2 / \beta_{0,\rho,t} \\ \beta_{0,\rho,t} &= 1,05 \text{ mm/min} &= \beta_0 k_p k_h \\ & &= 0,9 * 0,90 * 1,29 \\ \beta_0 &= 0,9 \text{ mm/min} \\ k_p &= 0,90 &= \sqrt{(450 / \rho_2)} \\ & &= \sqrt{(450 / 550)} \\ k_h &= 1,29 &= \sqrt{(20 / h_2)} \\ & &= \sqrt{(20 / 12)} \end{aligned}$$

eelneva kihi mõju

$$k_{\text{pos,exp},2} = 0,30 = 0.5\sqrt{(t_{\text{prot},0,2} / \Sigma t_{\text{prot},p})}$$
$$= 0.5\sqrt{(11,4 / 31,2)}$$

$$\Sigma t_{\text{prot},p} = 31,2 \text{ min} > 5,7 \text{ min}$$

järgneva kihi mõju

$$k_{\text{pos,unexp},2} = 0,73 = 0.5h_2^{0.15}$$
$$= 0.5 * 12^{0.15}$$

lisakaitseae

$$\Delta t_2 = 8,9 \text{ min} = 0.03t_{\text{prot},1} + 0.9t_{\text{prot},0,2} - 2.3$$
$$= 0.03 * 31,2 + 0.9 * 11,4 - 2.3$$

kaitseae

$$t_{\text{prot},2} = 11,4 \text{ min} = t_{\text{prot},0,2}k_{\text{pos,exp},2}k_{\text{pos,unexp},2} + \Delta t_2$$
$$= 11,4 * 0,30 * 0,73 + 8,9$$

õhuvähe 45mm

3. kiht kivivill

$$h_3 = 120 \text{ mm}$$

$$\rho_3 = 38 \text{ kg/m}^3$$

baaskaitseae

$$t_{\text{prot},0,3} = 50,5 \text{ min} = 0.3h_3^{0.82 + 0.0066\rho_3}$$
$$= 0.3 * 120^{0.82 + 0.0066 * 38}$$

eelneva kihi mõju

$$k_{\text{pos,exp},3} = 0,87 = 0.5\sqrt{(t_{\text{prot},0,3} / \Sigma t_{\text{prot},p})} * 1.6$$
$$= 0.5\sqrt{(50,5 / 42,6)} * 1.6$$

$$\Sigma t_{\text{prot},p} = 42,6 \text{ min} > 25,3 \text{ min}$$

järgneva kihi mõju

$$k_{\text{pos,unexp},3} = 1,00$$

kaitseae

$$t_{\text{prot},3} = 44,0 \text{ min} = t_{\text{prot},0,3}k_{\text{pos,exp},3}k_{\text{pos,unexp},3}$$
$$= 50,5 * 0,87 * 1,00$$

4. kiht OSB/3 plaat

$$h_4 = 12 \text{ mm}$$

$$\rho_4 = 550 \text{ kg/m}^3$$

baaskaitseag

$$\begin{aligned} & 13,1 \text{ min} & = 23(h_4 / 20)^{1,1} \\ & & = 23(12 / 20)^{1,1} \\ t_{\text{prot},0,4} & = 11,4 \text{ min} & = h_4 / \beta_{0,\rho,t} \\ \beta_{0,\rho,t} & = 1,05 \text{ mm/min} & = \beta_0 k_p k_h \\ & & = 0,9 * 0,90 * 1,29 \\ \beta_0 & = 0,9 \text{ mm/min} \\ k_p & = 0,90 & = \sqrt{(450 / \rho_4)} \\ & & = \sqrt{(450 / 550)} \\ k_h & = 1,29 & = \sqrt{(20 / h_4)} \\ & & = \sqrt{(20 / 12)} \end{aligned}$$

eelneva kihi mõju

$$\begin{aligned} k_{\text{pos,exp},4} & = 0,18 & = 0,5\sqrt{(t_{\text{prot},0,4} / \Sigma t_{\text{prot},p})} \\ & & = 0,5\sqrt{(11,4 / 86,6)} \\ \Sigma t_{\text{prot},p} & = 86,6 \text{ min} & > 5,7 \text{ min} \end{aligned}$$

järgneva kihi mõju

$$k_{\text{pos,unexp},4} = 1,0$$

kaitseag

$$\begin{aligned} t_{\text{prot},4} & = 2,1 \text{ min} & = t_{\text{prot},0,4} k_{\text{pos,exp},4} k_{\text{pos,unexp},4} \\ & & = 11,4 * 0,18 * 1,0 \end{aligned}$$

õhuvähe 30mm

5. kiht OSB/3 plaat

$$\begin{aligned} h_5 & = 12 \text{ mm} \\ \rho_5 & = 550 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

baaskaitseag

$$\begin{aligned} & 13,1 \text{ min} & = 23(h_5 / 20)^{1,1} \\ & & = 23(12 / 20)^{1,1} \\ t_{\text{prot},0,5} & = 11,4 \text{ min} & = h_5 / \beta_{0,\rho,t} \\ \beta_{0,\rho,t} & = 1,05 \text{ mm/min} & = \beta_0 k_p k_h \\ & & = 0,9 * 0,90 * 1,29 \\ \beta_0 & = 0,9 \text{ mm/min} \end{aligned}$$

$$k_p = 0,90 = \sqrt{(450 / \rho_5)}$$

$$= \sqrt{(450 / 550)}$$

$$k_h = 1,29 = \sqrt{(20 / h_5)}$$

$$= \sqrt{(20 / 12)}$$

eelneva kihi mõju

$$k_{\text{pos,exp},5} = 0,18 = 0,5 \sqrt{(t_{\text{prot},0,5} / \Sigma t_{\text{prot},p})}$$

$$= 0,5 \sqrt{(11,4 / 88,7)}$$

$$\Sigma t_{\text{prot},p} = 88,7 \text{ min} > 5,7 \text{ min}$$

järgneva kihi mõju

$$k_{\text{pos,unexp},5} = 0,7 = 0,5 h_5^{0,15}$$

$$= 0,5 * 12^{0,15}$$

kaitseaeg

$$t_{\text{prot},5} = 1,5 \text{ min} = t_{\text{prot},0,5} k_{\text{pos,exp},5} k_{\text{pos,unexp},5}$$

$$= 11,4 * 0,18 * 0,7$$

6. kiht kivivill

$$h_6 = 120 \text{ mm}$$

$$\rho_6 = 38 \text{ kg/m}^3$$

baaskaitseaeg

$$t_{\text{prot},0,6} = 50,5 \text{ min} = 0,3 h_6^{0,82 + 0,0066 \rho_6}$$

$$= 0,3 * 120^{0,82 + 0,0066 * 38}$$

eelneva kihi mõju

$$k_{\text{pos,exp},6} = 0,37 = 0,5 \sqrt{(t_{\text{prot},0,6} / \Sigma t_{\text{prot},p})}$$

$$= 0,5 \sqrt{(50,5 / 90,2)}$$

$$\Sigma t_{\text{prot},p} = 90,2 \text{ min} > 25,3 \text{ min}$$

järgneva kihi mõju

$$k_{\text{pos,unexp},6} = 1,00$$

liitetegur

$$k_{j,8} = 0,8$$

kaitseaeg

$$t_{\text{prot},6} = 15,1 \text{ min} = t_{\text{prot},0,6} k_{\text{pos,exp},6} k_{\text{pos,unexp},6} k_{j,8}$$

$$= 50,5 * 0,37 * 1,00 * 0,8$$

õhuvähe 45mm

7. kiht OSB/3 plaat

$$h_7 = 12 \text{ mm}$$

$$\rho_7 = 550 \text{ kg/m}^3$$

baaskaitseag

$$13,1 \text{ min} = 23(h_7 / 20)^{1.1}$$

$$= 23(12 / 20)^{1.1}$$

$$t_{\text{prot},0,7} = 11,4 \text{ min} = h_7 / \beta_{0,\rho,t}$$

$$\beta_{0,\rho,t} = 1,05 \text{ mm/min} = \beta_0 k_p k_h$$

$$= 0,9 * 0,90 * 1,29$$

$$\beta_0 = 0,9 \text{ mm/min}$$

$$k_p = 0,90 = \sqrt{(450 / \rho_7)}$$

$$= \sqrt{(450 / 550)}$$

$$k_h = 1,29 = \sqrt{(20 / h_7)}$$

$$= \sqrt{(20 / 12)}$$

eelneva kihi mõju

$$k_{\text{pos,exp},7} = 0,26 = 0,5 \sqrt{(t_{\text{prot},0,7} / \Sigma t_{\text{prot,p}})} * 1,6$$

$$= 0,5 \sqrt{(11,4 / 105,3)} * 1,6$$

$$\Sigma t_{\text{prot,p}} = 105,3 \text{ min} > 5,7 \text{ min}$$

järgneva kihi mõju

$$k_{\text{pos,unexp},7} = 1,0$$

kaitseag

$$t_{\text{prot},7} = 3,0 \text{ min} = t_{\text{prot},0,7} k_{\text{pos,exp},7} k_{\text{pos,unexp},7}$$

$$= 11,4 * 0,26 * 1,0$$

8. kiht kipsplaat F

$$h_8 = 15,5 \text{ mm}$$

baaskaitseag

$$t_{\text{ins},0,8} = 25,1 \text{ min} = 24(h_8 / 15)^{1.4}$$

$$= 24(15,5 / 15)^{1.4}$$

eelneva kihi mõju

$$k_{\text{pos,exp},8} = 0,24 = 0,5 \sqrt{(t_{\text{ins},0,8} / \Sigma t_{\text{prot,p}})}$$

$$= 0,5 \sqrt{(25,1 / 108,3)}$$

$$\Sigma t_{\text{prot,p}} = 108,3 \text{ min} > 12,6 \text{ min}$$

liitetegur

$$k_{j,8} = 0,8$$

kaitseaeg

$$\begin{aligned} t_{ins,8} &= 4,8 \text{ min} &= t_{ins,0,8} k_{pos,exp,8} k_{j,8} \\ & &= 25,1 * 0,24 * 0,8 \end{aligned}$$

Seina isolatsiooniaeg

$$\begin{aligned} t_{ins} &= 113,2 \text{ min} &= t_{prot,1} + t_{prot,2} + t_{prot,3} + t_{prot,4} + t_{prot,5} + t_{prot,6} + t_{prot,7} + t_{ins,8} \\ & &= 31,2 + 11,4 + 44,0 + 2,1 + 1,5 + 15,1 + 3,0 + 4,8 \end{aligned}$$

Seega rahuldab konstruktsioon EI 110 kriteeriumi.

3.3.2 Korterite vaheline sein Eurokoodeksi lisa E alusel

Märkus: seina sisemiste OSB-plaatide arvutuslik tulepüsivusaeg antud arvutustes on 0.

1. kiht kipsplaat F oletan selle kihi A-tüüpi plaadiks

$$h_1 = 15,5 \text{ mm}$$

baaisisolatsiooniaeg

$$\begin{aligned} t_{ins,0,1} &= 21,7 \text{ min} &= 1,4h_1 \\ & &= 1,4 * 15,5 \end{aligned}$$

asukohategur

$$k_{pos,1} = 1,00$$

isolatsiooniaeg

$$\begin{aligned} t_{ins,1} &= 21,7 \text{ min} &= t_{ins,0,1} k_{pos,1} \\ & &= 21,7 * 1,00 \end{aligned}$$

2. kiht OSB/3 plaat

$$h_2 = 12 \text{ mm}$$

$$\rho_2 = 550 \text{ kg/m}^3 \quad \text{Eurokoodeksi järgi peab tihedus olema} \geq 600 \text{ kg/m}^3$$

baaisisolatsiooniaeg

$$\begin{aligned} t_{ins,0,2} &= 13,2 \text{ min} &= 1,1h_2 \\ & &= 1,1 * 12 \end{aligned}$$

asukohategur

$$k_{pos,2} = 0,80$$

isolatsiooniaeg

$$\begin{aligned}t_{\text{ins},2} &= 10,6 \text{ min} &= t_{\text{ins},0,2}k_{\text{pos},2} \\ & &= 13,2 * 0,80\end{aligned}$$

3. kiht õhuvahe 45mm

baaisolatsiooniaeg

$$t_{\text{ins},0,3} = 5,0 \text{ min}$$

asukohategur

$$k_{\text{pos},3} = 1,00$$

isolatsiooniaeg

$$\begin{aligned}t_{\text{ins},3} &= 5,0 \text{ min} &= t_{\text{ins},0,3}k_{\text{pos},3} \\ & &= 5,0 * 1,00\end{aligned}$$

4. kiht kivivill

$$h_4 = 240 \text{ mm}$$

$$\rho_4 = 38 \text{ kg/m}^3$$

$$\begin{aligned}k_{\text{dens}} &= 1,05 &= 1 + (1.1 - 1)(\rho_4 - 26) / (50 - 26) \\ & &= 1 + (1.1 - 1)(38 - 26) / (50 - 26)\end{aligned}$$

baaisolatsiooniaeg

$$\begin{aligned}t_{\text{ins},0,4} &= 50,4 \text{ min} &= 0.2h_4k_{\text{dens}} \\ & &= 0.2 * 240 * 1,05\end{aligned}$$

asukohategur

$$k_{\text{pos},4} = 1,00$$

isolatsiooniaeg

$$\begin{aligned}t_{\text{ins},4} &= 50,4 \text{ min} &= t_{\text{ins},0,4}k_{\text{pos},4} \\ & &= 50,4 * 1,00\end{aligned}$$

5. kiht õhuvahe 45mm

baaisolatsiooniaeg

$$t_{\text{ins},0,5} = 5,0 \text{ min}$$

asukohategur

$$k_{\text{pos},5} = 1,00$$

isolatsiooniaeg

$$\begin{aligned}t_{\text{ins},5} &= 5,0 \text{ min} &= t_{\text{ins},0,5}k_{\text{pos},5} \\ & &= 5,0 * 1,00\end{aligned}$$

6. kiht OSB/3 plaat

$$h_6 = 12 \text{ mm}$$

$$\rho_6 = 550 \text{ kg/m}^3 \quad \text{Eurokoodeksi järgi peab tihedus olema } \geq 600 \text{ kg/m}^3$$

baaisolatsiooniaeg

$$t_{\text{ins},0,6} = 13,2 \text{ min} = 1.1h_6 \\ = 1.1 * 12$$

asukohategur

$$k_{\text{pos},6} = 0,80$$

isolatsiooniaeg

$$t_{\text{ins},6} = 10,6 \text{ min} = t_{\text{ins},0,6}k_{\text{pos},6} \\ = 13,2 * 0,80$$

7. kiht kipsplaat F

oletan selle kihi A-tüüpi plaadiks

$$h_5 = 15,5 \text{ mm}$$

baaisolatsiooniaeg

$$t_{\text{ins},0,7} = 21,7 \text{ min} = 1.4h_5 \\ = 1.4 * 15,5$$

asukohategur

$$k_{\text{pos},7} = 0,70$$

isolatsiooniaeg

$$t_{\text{ins},7} = 15,2 \text{ min} = t_{\text{ins},0,7}k_{\text{pos},7} \\ = 21,7 * 0,70$$

Seina isolatsiooniaeg

$$t_{\text{ins}} = 118,4 \text{ min} = t_{\text{ins},1} + t_{\text{ins},2} + t_{\text{ins},3} + t_{\text{ins},4} + t_{\text{ins},5} + t_{\text{ins},6} + t_{\text{ins},7} \\ = 21,7 + 10,6 + 5,0 + 50,4 + 5,0 + 10,6 + 15,2$$

Seega rahuldab konstruktsioon EI 120 kriteeriumi.

3.4 Elementide jääkristlõiked (arvutusnäited)

3.4.1 Korterite vahelisi jäikusseinu toetav tala efektiivristlõike meetodil (tulekahju kolmest küljest)

Märkus: söestumise algusaeg on leitud käsiraamatu ptk 4.2.5 järgi.

Elemendi tulele avatuse aeg

1. kiht kipsplaat F

$$h_1 = 12,5 \text{ mm}$$

baaskaitseaeg

$$\begin{aligned} t_{\text{prot},0,1} &= 24,1 \text{ min} &= 30(h_1 / 15)^{1,2} \\ & &= 30(12,5 / 15)^{1,2} \end{aligned}$$

järgneva kihi mõju

$$k_{\text{pos},\text{unexp},1} = 1,00$$

kaitseaeg

$$\begin{aligned} t_{\text{prot},1} &= 24,1 \text{ min} &= t_{\text{prot},0,1} k_{\text{pos},\text{unexp},1} \\ & &= 24,1 * 1,00 \end{aligned}$$

Söestumise algusaeg

$$t_{\text{ch}} = 24,1 \text{ min} = t_{\text{prot},1}$$

Kaitsekihi tõrketekke aeg tala alumisel pinnal

$$\begin{aligned} t_f &= 22,5 \text{ min} &= h_1 + 10 &< &24,1 \text{ min} \\ & &= 12,5 + 10 & & \end{aligned}$$

Kaitsekihi tõrketekke aeg tala külgpinnal

$$\begin{aligned} t_f &= 32,3 \text{ min} &= 4.5h_1 - 24 &> &24,1 \text{ min} \\ & &= 4.5 * 12,5 - 24 & & \end{aligned}$$

Nõutav tulepüsivusaeg

$$t_{\text{req}} = 90 \text{ min}$$

Elemendi tulele avatuse aeg külgpinnal kaitsefaasis

$$\begin{aligned} t_k &= 8,1 \text{ min} &= t_f - t_{\text{ch}} \\ & &= 32,3 - 24,1 \end{aligned}$$

Ristlõike algmõõtmed

$$b = 220 \text{ mm}$$

$$h = 360 \text{ mm}$$

Efektiivne söestumissügavus tala alumisel pinnal

Tinglik söestumiskiirus

$$\beta_n = 0,7 \text{ mm/min}$$

Järeldkaitsetegur

$$k_3 = 2,00$$

Piirae

$$\begin{aligned} t_a &= 40,4 \text{ min} &&= 25 / (k_3 \beta_n) + t_f \\ &&&= 25 / (2,00 * 0,7) + 22,5 \end{aligned}$$

Elemendi tulele avatuse aeg pärast piiraja saavutamist

$$\begin{aligned} t &= 49,6 \text{ min} &&= t_{req} - t_a \\ &&&= 90 - 40,4 \end{aligned}$$

Tinglik söestumissügavus tala alumisel pinnal

$$\begin{aligned} d_{char,n} &= 59,8 \text{ mm} &&= \beta_n (k_3 [t_a - t_f] + t) \\ &&&= 0,7 (2,00 [40,4 - 22,5] + 49,6) \end{aligned}$$

Nulltugevusega kihi paksus

$$d_0 = 7 \text{ mm}$$

Tegur

$$k_0 = 1,00$$

Efektiivne söestumissügavus tala alumisel pinnal

$$\begin{aligned} d_{ef,1} &= 66,8 \text{ mm} &&= d_{char,n} + k_0 d_0 \\ &&&= 59,8 + 1,00 * 7 \end{aligned}$$

Efektiivne söestumissügavus tala külgpinnal

Tinglik söestumiskiirus

$$\beta_n = 0,7 \text{ mm/min}$$

Kaitsetegur

$$\begin{aligned} k_2 &= 0,78 &&= 1 - 0,018 h_1 \\ &&&= 1 - 0,018 * 12,5 \end{aligned}$$

Järeldkaitsetegur

$$k_3 = 2,00$$

Piiraeeg

$$\begin{aligned}t_a &= 47,0 \text{ min} &= (25 - t_k k_2 \beta_n) / (k_3 \beta_n) + t_f \\ & &= (25 - 8,1 * 0,78 * 0,7) / (2,00 * 0,7) + 32,3\end{aligned}$$

Elemendi tulele avatuse aeg pärast piiraja saavutamist

$$\begin{aligned}t &= 43,0 \text{ min} &= t_{\text{req}} - t_a \\ & &= 90 - 47,0\end{aligned}$$

Tinglik söestumissügavus tala külgpinnal

$$\begin{aligned}d_{\text{char},n} &= 55,1 \text{ mm} &= \beta_n (k_2 t_k + k_3 [t_a - t_f] + t) \\ & &= 0,7 (0,78 * 8,1 + 2,00 [47,0 - 32,3] + 43,0)\end{aligned}$$

Nulltugevusega kihi paksus

$$d_0 = 7 \text{ mm}$$

Tegur

$$k_0 = 1,00$$

Efektiivne söestumissügavus tala külgpinnal

$$\begin{aligned}d_{\text{ef},2} &= 62,1 \text{ mm} &= d_{\text{char},n} + k_0 d_0 \\ & &= 55,1 + 1,00 * 7\end{aligned}$$

Jääkristlõike mõõtmed

R90

$$\begin{aligned}b_{\text{ef}} &= 95,7 \text{ mm} &= b - 2d_{\text{ef},2} \\ & &= 220 - 2 * 62,1\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}h_{\text{ef}} &= 293,3 \text{ mm} &= h - d_{\text{ef},1} \\ & &= 360 - 66,8\end{aligned}$$

Kaitsekihi tõrketekkeaja kontroll (kinnituselementide väljatõmme)

$$\begin{aligned}t_f &= 36,1 \text{ min} &= t_{\text{ch}} + (l_f - l_{a,\text{min}} - h_p) / (k_2 k_j \beta_n) \\ & &= 24,1 + (30 - 10 - 12,5) / (0,78 * 1,15 * 0,7)\end{aligned}$$

Kinnituselemendi pikkus

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

Katteplaatide kogupaksus

$$h_p = 12,5 \text{ mm} = h_1$$

Kinnituselemendi minimaalne süvistuspikkus põlemata puidus

$$l_{a,\text{min}} = 10 \text{ mm}$$

Kinnituselemendi süvistuspikkus

$$t = 17,5 \text{ mm} = l_f - h_p > 10 \text{ mm} \\ = 30 - 12,5$$

Plaadi liitetegur

$$k_j = 1,15$$

3.4.2 Korterite vahelisi jäikusseinu toetav tala vähendatud tugevus- ja jäikusomaduste meetodil (tulekahju kolmest küljest)

Märkus: söestumise algusaeg on leitud Eurokoodeksi ptk 3.4.3.3 järgi.

Elemendi tulele avatuse aeg

1. kiht kipsplaat F

$$h_1 = 12,5 \text{ mm}$$

Söestumise algusaeg

$$t_{ch} = 21,0 \text{ min} = 2,8h_1 - 14 \\ = 2,8 * 12,5 - 14$$

Kaitsekihi tõrketekkeaege tala alumisel pinnal

$$t_f = 22,5 \text{ min} = h_1 + 10 > 21,0 \text{ min} \\ = 12,5 + 10$$

Kaitsekihi tõrketekkeaege tala külgpinnal

$$t_f = 32,3 \text{ min} = 4,5h_1 - 24 > 21,0 \text{ min} \\ = 4,5 * 12,5 - 24$$

Nõutav tulepüsimusaeg

$$t_{req} = 90 \text{ min}$$

Elemendi tulele avatuse aeg alumisel pinnal kaitsefaasis

$$t_k = 1,5 \text{ min} = t_f - t_{ch} \\ = 22,5 - 21,0$$

Elemendi tulele avatuse aeg külgpinnal kaitsefaasis

$$t_k = 11,3 \text{ min} = t_f - t_{ch} \\ = 32,3 - 21,0$$

Ristlõike algmõõtmed

$$b = 220 \text{ mm}$$

$$h = 360 \text{ mm}$$

Söestumissügavus tala alumisel pinnal

Lineaarne söestumiskiirus

$$\beta_0 = 0,65 \text{ mm/min}$$

Kaitsetegur

$$\begin{aligned} k_2 &= 0,78 &= 1 - 0.018h_1 \\ & &= 1 - 0.018 * 12,5 \end{aligned}$$

Järelkaitsetegur

$$k_3 = 2,00$$

Piiraeg

$$\begin{aligned} t_a &= 41,1 \text{ min} &= (25 - [t_f - t_{ch}]k_2\beta_0) / (k_3\beta_0) + t_f \\ & &= (25 - [22,5 - 21,0] * 0,78 * 0,65) / (2,00 * 0,65) + 22,5 \end{aligned}$$

Elemendi tulele avatuse aeg pärast piiraja saavutamist

$$\begin{aligned} t &= 48,9 \text{ min} &= t_{req} - t_a \\ & &= 90 - 41,1 \end{aligned}$$

Lineaarne söestumissügavus tala alumisel pinnal

$$\begin{aligned} d_{char,0,1} &= 56,8 \text{ mm} &= \beta_0(k_2t_k + k_3[t_a - t_f] + t) \\ & &= 0,65(0,78 * 1,5 + 2,00[41,1 - 22,5] + 48,9) \end{aligned}$$

Kontrollin, kas saan kasutada lineaarset söestumismäära

$$\begin{aligned} b_{min} &= 193,5 \text{ mm} &= 2d_{char,0,1} + 80 &< &220 \text{ mm} \\ & &= 2 * 56,8 + 80 \end{aligned}$$

Seega saab kasutada lineaarset söestumismäära.

Söestumissügavus tala külgpinnal

Lineaarne söestumiskiirus

$$\beta_0 = 0,65 \text{ mm/min}$$

Kaitsetegur

$$\begin{aligned} k_2 &= 0,78 &= 1 - 0.018h_1 \\ & &= 1 - 0.018 * 12,5 \end{aligned}$$

Järelkaitsetegur

$$k_3 = 2,00$$

Piiraeeg

$$\begin{aligned}t_a &= 47,1 \text{ min} &= (25 - t_k k_2 \beta_0) / (k_3 \beta_0) + t_f \\ & &= (25 - 11,3 * 0,78 * 0,65) / (2,00 * 0,65) + 32,3\end{aligned}$$

Elemendi tulele avatuse aeg pärast piiraja saavutamist

$$\begin{aligned}t &= 42,9 \text{ min} &= t_{req} - t_a \\ & &= 90 - 47,1\end{aligned}$$

Lineaarne söestumissügavus tala külgpinnal

$$\begin{aligned}d_{char,0,2} &= 52,9 \text{ mm} &= \beta_0(k_2 t_k + k_3[t_a - t_f] + t) \\ & &= 0,65(0,78 * 11,3 + 2,00[47,1 - 32,3] + 42,9)\end{aligned}$$

Jääkristlõike mõõtmed

R90

$$\begin{aligned}b_{ef} &= 114,3 \text{ mm} &= b - 2d_{char,0,2} \\ & &= 220 - 2 * 52,9\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}h_{ef} &= 303,2 \text{ mm} &= h - d_{char,0,1} \\ & &= 360 - 56,8\end{aligned}$$

Kaitsekihi tõrketekkeaja kontroll (kinnituselementide väljatõmme)

$$\begin{aligned}t_f &= 33,9 \text{ min} &= t_{ch} + (l_f - l_{a,min} - h_p) / (k_2 k_j \beta_0) \\ & &= 21,0 + (30 - 10 - 12,5) / (0,78 * 1,15 * 0,65)\end{aligned}$$

Kinnituselemendi pikkus

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

Katteplaatide kogupaksus

$$h_p = 12,5 \text{ mm} = h_1$$

Kinnituselemendi minimaalne süvistuspikkus põlemata puidus

$$l_{a,min} = 10 \text{ mm}$$

Kinnituselemendi süvistuspikkus

$$\begin{aligned}t &= 17,5 \text{ mm} &= l_f - h_p &> & 10 \text{ mm} \\ & &= 30 - 12,5\end{aligned}$$

Plaadi liitetegur

$$k_j = 1,15$$

Modifikatsioonitegur

$$p = 0,721 \text{ m} \quad \text{tulele avatud jääkristlõike perimeeter}$$

$$A_r = 0,035 \text{ m}^2 \quad \text{jääkristlõike pindala}$$

Paindetugevusele

$$k_{\text{mod,fi}} = 0,90 = 1 - 1 / 200p / A_r \\ = 1 - 1 / 200 * 0,721 / 0,035$$

3.4.3 Katuslaetala käsiraamatu ptk 5.5.5.2 alusel (tulekahju altpoolt)

Elemendi tulele avatuse aeg

1. kiht kipsplaat A

$$h_1 = 12,5 \text{ mm}$$

baaskaitseaeg

$$t_{\text{prot},0,1} = 24,1 \text{ min} = 30(h_1 / 15)^{1,2} \\ = 30(12,5 / 15)^{1,2}$$

järgneva kihi mõju

$$k_{\text{pos,unexp},1} = 0,73 = 0,5h_1^{0,15} \\ = 0,5 * 12,5^{0,15}$$

kaitseaeg

$$t_{\text{prot},1} = 17,6 \text{ min} = t_{\text{prot},0,1}k_{\text{pos,unexp},1} \\ = 24,1 * 0,73$$

Söestumise algusaeg

$$t_{\text{ch}} = 17,6 \text{ min} = t_{\text{prot},1}$$

Kaitsekihi tõrketekkeag

$$t_f = 15,5 \text{ min} = 1,8h_1 - 7 < 17,6 \text{ min} \\ = 1,8 * 12,5 - 7$$

Nõutav tulepüsivusaeg

$$t_{\text{req}} = 90 \text{ min} > 15,5 \text{ min}$$

Ristlõike algmõõtmed

$$b = 60 \text{ mm}$$

$$h = 320 \text{ mm}$$

Efektiivne söestumissügavus

Ühemõõtmeline söestumiskiirus

$$\beta_0 = 0,65 \text{ mm/min}$$

Ristlõiketegur

$$k_s = 1,32 = 0.00023b^2 - 0.045b + 3.19$$
$$= 0.00023 * 60^2 - 0.045 * 60 + 3.19$$

Ristlõike täisnurkseks teisendamise tegur

$$k_n = 1,25$$

Järeldaitsetegur

$$k_3 = 1,56 = 0.036t_f + 1$$
$$= 0.036 * 15,5 + 1$$

Tinglik söestumissügavus

$$d_{char,n} = 124,3 \text{ mm} = \beta_0 k_s k_n k_3 (t_{req} - t_f)$$
$$= 0,65 * 1,32 * 1,25 * 1,56(90-15,5)$$

Nulltugevusega kihi paksus

$$d_0 = 45,5 \text{ mm} = 13.5 + 0.1h$$
$$= 13.5 + 0.1 * 320$$

Efektiivne söestumissügavus

$$d_{ef} = 169,8 \text{ mm} = d_{char,n} + d_0$$
$$= 124,3 + 45,5$$

Jääkristlõike mõõtmed

R90

$$b_{ef} = 60 \text{ mm}$$

$$h_{ef} = 150,2 \text{ mm} = h - d_{ef}$$
$$= 320 - 169,8$$

3.4.4 Katuslaetala Eurokoodeksi lisa C alusel (tulekahju altpoolt)

Elemendi tulele avatuse aeg

1. kiht kipsplaat A

$$h_1 = 12,5 \text{ mm}$$

Söestumise algusaeg

$$t_{ch} = 21,0 \text{ min} = 2.8h_1 - 14$$
$$= 2.8 * 12,5 - 14$$

Kaitsekihi tõrketekkeae

$$t_f = 21,0 \text{ min} = 2.8h_1 - 14 \\ = 2.8 * 12,5 - 14$$

Nõutav tulepüsivusaeg

$$t_{req} = 90 \text{ min} > 21,0 \text{ min}$$

Ristlõike algmõõtmed

$$b = 60 \text{ mm}$$

$$h = 320 \text{ mm}$$

Söestumissügavus

Ühemõõtmeline söestumiskiirus

$$\beta_0 = 0,65 \text{ mm/min}$$

Ristlõiketegur

$$k_s = 1,10$$

Ristlõike täisnurkseks teisendamise tegur

$$k_n = 1,5$$

Järelkaitsetegur

$$k_3 = 1,76 = 0.036t_f + 1 \\ = 0.036 * 21,0 + 1$$

Tinglik söestumissügavus

$$d_{char,n} = 129,9 \text{ mm} = \beta_0 k_s k_n k_3 (t_{req} - t_f) \\ = 0,65 * 1,10 * 1,5 * 1,76(90-21,0)$$

Jääkristlõike mõõtmed

R90

$$b_{ef} = 60 \text{ mm}$$

$$h_{ef} = 190,1 \text{ mm} = h - d_{char,n} \\ = 320 - 129,9$$

Modifikatsioonitegur

Paindetugevuse modifikatsioonitegur

$$k_{mod,fi} = 0,61 = a_0 - a_1 d_{char,n} / h \\ = 0,83 - 0,54 * 129,9 / 320$$

$$a_0 = 0,83$$

$$a_1 = 0,54$$

3.4.5 II korruse kandev siseseina post käsiraamatu ptk 5.5.5.2 alusel

Elemendi tulele avatuse aeg

1. kiht kipsplaat F

$$h_1 = 15,5 \text{ mm}$$

baaskaitseaeg

$$\begin{aligned} t_{\text{prot},0,1} &= 31,2 \text{ min} &= 30(h_1 / 15)^{1,2} \\ & &= 30(15,5 / 15)^{1,2} \end{aligned}$$

järgneva kihi mõju

$$k_{\text{pos},\text{unexp},1} = 1,00$$

kaitseaeg

$$\begin{aligned} t_{\text{prot},1} &= 31,2 \text{ min} &= t_{\text{prot},0,1} k_{\text{pos},\text{unexp},1} \\ & &= 31,2 * 1,00 \end{aligned}$$

2. kiht kipsplaat A

$$h_2 = 12,5 \text{ mm}$$

baaskaitseaeg

$$\begin{aligned} t_{\text{prot},0,2} &= 24,1 \text{ min} &= 30(h_2 / 15)^{1,2} \\ & &= 30(12,5 / 15)^{1,2} \end{aligned}$$

eelneva kihi mõju

$$\begin{aligned} k_{\text{pos},\text{exp},2} &= 0,44 &= 0,5\sqrt{(t_{\text{prot},0,2} / \Sigma t_{\text{prot},p})} \\ & &= 0,5\sqrt{(24,1 / 31,2)} \end{aligned}$$

$$\Sigma t_{\text{prot},p} = 31,2 \text{ min} > 12,1 \text{ min}$$

järgneva kihi mõju

$$k_{\text{pos},\text{unexp},2} = 1,00$$

lisakaitseaeg

$$\begin{aligned} \Delta t_2 &= 9,2 \text{ min} &= 0,22 t_{\text{prot},1} - 0,1 t_{\text{prot},0,2} + 4,7 \\ & &= 0,22 * 31,2 - 0,1 * 24,1 + 4,7 \end{aligned}$$

kaitseaeg

$$\begin{aligned} t_{\text{prot},2} &= 19,7 \text{ min} &= t_{\text{prot},0,2} k_{\text{pos},\text{exp},2} k_{\text{pos},\text{unexp},2} + \Delta t_2 \\ & &= 24,1 * 0,44 * 1,00 + 9,2 \end{aligned}$$

3. kiht OSB/3 plaat

$$h_3 = 12 \text{ mm}$$

$$\rho_3 = 550 \text{ kg/m}^3$$

baaskaitseaeg

$$\begin{aligned} &13,1 \text{ min} &= 23(h_3 / 20)^{1,1} \\ & &= 23(12 / 20)^{1,1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
t_{\text{prot},0,3} &= 11,4 \text{ min} &= h_3 / \beta_{0,p,t} \\
\beta_{0,p,t} &= 1,05 \text{ mm/min} &= \beta_0 k_p k_h \\
&&= 0,9 * 0,90 * 1,29 \\
\beta_0 &= 0,9 \text{ mm/min} \\
k_p &= 0,90 &= \sqrt{(450 / \rho_3)} \\
&&= \sqrt{(450 / 550)} \\
k_h &= 1,29 &= \sqrt{(20 / h_3)} \\
&&= \sqrt{(20 / 12)}
\end{aligned}$$

eelneva kihi mõju

$$\begin{aligned}
k_{\text{pos,exp},3} &= 0,24 &= 0,5 \sqrt{(t_{\text{prot},0,3} / \Sigma t_{\text{prot},p})} \\
&&= 0,5 \sqrt{(11,4 / 51,0)}
\end{aligned}$$

$$\Sigma t_{\text{prot},p} = 51,0 \text{ min} > 5,7 \text{ min}$$

järgneva kihi mõju

$$k_{\text{pos,unexp},3} = 1,00$$

kaitseaeg

$$\begin{aligned}
t_{\text{prot},3} &= 2,7 \text{ min} &= t_{\text{prot},0,3} k_{\text{pos,exp},3} k_{\text{pos,unexp},3} \\
&&= 11,4 * 0,24 * 1,00
\end{aligned}$$

Söestumise algusaeg

$$\begin{aligned}
t_{\text{ch}} &= 53,7 \text{ min} &= t_{\text{prot},1} + t_{\text{prot},2} + t_{\text{prot},3} \\
&&= 31,2 + 19,7 + 2,7
\end{aligned}$$

F+A-tüüpi kipsplaadi tõrketekkeae

$$t_f = 81,0 \text{ min} > 53,7 \text{ min}$$

Nõutav tulepüsivusaeg

$$t_{\text{req}} = 90 \text{ min} > 81,0 \text{ min}$$

Ristlõike algmõõtmed

$$b = 45 \text{ mm}$$

$$h = 195 \text{ mm}$$

Efekttiivne söestumissügavus

Ühemõõtmeline söestumiskiirus

$$\beta_0 = 0,65 \text{ mm/min}$$

Ristlõiketegur

$$\begin{aligned}
k_s &= 1,63 &= 0,00023b^2 - 0,045b + 3,19 \\
&&= 0,00023 * 45^2 - 0,045 * 45 + 3,19
\end{aligned}$$

Ristlõike täisnurkseks teisendamise tegur

$$k_n = 1,5$$

Kaitsetegur

$$k_2 = 0,85 = 1,05 - 0,0073(h_1 + h_2) \\ = 1,05 - 0,0073(15,5 + 12,5)$$

Järelkaitsetegur

$$k_3 = 3,92 = 0,036t_f + 1 \\ = 0,036 * 81,0 + 1$$

Tinglik söestumissügavus

$$d_{char,n} = 92,8 \text{ mm} = \beta_0 k_s k_n (k_2 [t_f - t_{ch}] + k_3 [t_{req} - t_f]) \\ = 0,65 * 1,63 * 1,5 (0,85 [81,0 - 53,7] + 3,92 [90 - 81,0])$$

Nulltugevusega kihi paksus nõtkumisel seina tasandist välja

$$d_{0,1} = 33,0 \text{ mm} = 13,5 + 0,1h \\ = 13,5 + 0,1 * 195$$

Nulltugevusega kihi paksus nõtkumisel seina tasandis

$$d_{0,2} = 65,8 \text{ mm} = 17 + 0,25h \\ = 17 + 0,25 * 195$$

Efektiivne söestumissügavus nõtkumisel seina tasandist välja

$$d_{ef,1} = 125,8 \text{ mm} = d_{char,n} + d_{0,1} \\ = 92,8 + 33,0$$

Efektiivne söestumissügavus nõtkumisel seina tasandis

$$d_{ef,2} = 158,6 \text{ mm} = d_{char,n} + d_{0,2} \\ = 92,8 + 65,8$$

Jääkristlõike mõõtmed

R90

Nõtkumisel seina tasandist välja

$$b_{ef,1} = 45 \text{ mm} \\ h_{ef,1} = 69,2 \text{ mm} = h - d_{ef,1} \\ = 195 - 125,8$$

Nõtkumisel seina tasandis

$$b_{ef,2} = 45 \text{ mm} \\ h_{ef,2} = 36,4 \text{ mm} = h - d_{ef,2} \\ = 195 - 158,6$$

Kaitsekihi tõrketekkeaja kontroll (kinnituselementide väljatõmme)

$$t_f = 82,0 \text{ min} = (t_{prot,1} + t_{prot,2}) + (l_f - l_{a,min} - h_p) / (k_s k_2 k_j \beta_0) \\ = (31,2 + 19,7) + (70 - 10 - 28) / (1,63 * 0,85 * 1,15 * 0,65)$$

Kinnituselemendi pikkus

$$l_f = 70 \text{ mm}$$

Katteplaatide kogupaksus

$$\begin{aligned}h_p &= 28 \text{ mm} &= h_1 + h_2 \\ & &= 15,5 + 12,5\end{aligned}$$

Kinnituselemendi minimaalne süvistuspikkus põlemata puidus

$$l_{a,\min} = 10 \text{ mm}$$

Kinnituselemendi süvistuspikkus

$$\begin{aligned}t &= 42 \text{ mm} &= l_f - h_p &> 10 \text{ mm} \\ & &= 70 - 28\end{aligned}$$

Plaadi liitetegur

$$k_j = 1,15$$

3.4.6 II korruse kandev siseseina post Eurokoodeksi lisa C alusel

Elemendi tulele avatuse aeg

1. kiht kipsplaat F

$$h_1 = 15,5 \text{ mm}$$

2. kiht kipsplaat A

$$h_2 = 12,5 \text{ mm}$$

3. kiht OSB/3 plaat

$$h_3 = 12 \text{ mm}$$

$$\rho_3 = 550 \text{ kg/m}^3$$

$$\begin{aligned}\beta_{0,p,t} &= 1,05 \text{ mm/min} &= \beta_0 k_p k_h \\ & &= 0,9 * 0,90 * 1,29\end{aligned}$$

$$\beta_0 = 0,9 \text{ mm/min}$$

$$\begin{aligned}k_p &= 0,90 &= \sqrt{(450 / \rho_3)} \\ & &= \sqrt{(450 / 550)}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}k_h &= 1,29 &= \sqrt{(20 / h_3)} \\ & &= \sqrt{(20 / 12)}\end{aligned}$$

OSB plaadi söestumise algusaeg

$$\begin{aligned}t_{ch} &= 64,4 \text{ min} &= 2,8(h_1 + h_2) - 14 \\ & &= 2,8(15,5 + 12,5) - 14\end{aligned}$$

Karkassiposti söestumise algusaeg

$$\begin{aligned}t_{ch} &= 77,9 \text{ min} &= t_{ch} + h_3 / (\beta_{0,p,t} k_2) \\ & &= 64,4 + 12 / (1,05 * 0,85)\end{aligned}$$

F+A-tüüpi kipsplaadi tõrketekkeae

$$t_f = 81,0 \text{ min} > 77,9 \text{ min}$$

Nõutav tulepüsivusaeg

$$t_{req} = 90 \text{ min} > 81,0 \text{ min}$$

Ristlõike algmõõdmed

$$b = 45 \text{ mm}$$

$$h = 195 \text{ mm}$$

Söestumissügavus

Ühemõõtmeline söestumiskiirus

$$\beta_0 = 0,65 \text{ mm/min}$$

Ristlõiketegur

$$k_s = 1,30$$

Ristlõike täisnurkseks teisendamise tegur

$$k_n = 1,5$$

Kaitsetegur

$$\begin{aligned} k_2 &= 0,85 &&= 1,05 - 0,0073(h_1 + h_2) \\ &&&= 1,05 - 0,0073(15,5 + 12,5) \end{aligned}$$

Järekaitsetegur

$$\begin{aligned} k_3 &= 3,92 &&= 0,036t_f + 1 \\ &&&= 0,036 * 81,0 + 1 \end{aligned}$$

Tinglik söestumissügavus

$$\begin{aligned} d_{char,n} &= 48,0 \text{ mm} &&= \beta_0 k_s k_n (k_2 [t_f - t_{ch}] + k_3 [t_{req} - t_f]) \\ &&&= 0,65 * 1,30 * 1,5 (0,85 [81,0 - 77,9] + 3,92 [90 - 81,0]) \end{aligned}$$

Jääkristlõike mõõdmed

R90

$$b_{ef} = 45 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} h_{ef} &= 147,0 \text{ mm} &&= h - d_{char,n} \\ &&&= 195 - 48,0 \end{aligned}$$

Kaitsekihi tõrketekkeaja kontroll (kinnituselementide väljatõmme)

$$\begin{aligned} t_f &= 86,0 \text{ min} &&= t_{ch} + (l_f - l_{a,min} - h_p) / (k_s k_2 k_n k_j \beta_0) \\ &&&= 77,9 + (60 - 10 - 40) / (1,30 * 0,85 * 1,5 * 1,15 * 0,65) \end{aligned}$$

Kinnituselemendi pikkus

$$l_f = 60 \text{ mm}$$

Katteplaatide kogupaksus

$$\begin{aligned} h_p &= 40 \text{ mm} &&= h_1 + h_2 + h_3 \\ &&&= 15,5 + 12,5 + 12 \end{aligned}$$

Kinnituselemendi minimaalne süvistuspikkus põlemata puidus

$$l_{a,\min} = 10 \text{ mm}$$

Kinnituselemendi süvistuspikkus

$$t = 20 \text{ mm} = l_f - h_p > 10 \text{ mm} \\ = 60-40$$

Plaadi liitetegur

$$k_j = 1,15$$

Modifikatsioonitegur

Survetugevuse modifikatsioonitegur

$$k_{\text{mod},fc,fi} = 0,53 = a_0 - a_1 d_{\text{char},n} / h \\ = 0,65 - 0,48 * 48,0 / 195$$

$$a_0 = 0,65$$

$$a_1 = 0,48$$

3.5 Elementide kandevõime (arvutusnäited)

3.5.1 II korruse kandev siseseina post käsiraamatu põhjal

Jääkristlõike parameetrid 60 min tulekahju korral

Nõtkumine seina tasandist välja

$$\begin{aligned}b_{fi,1} &= 45 \text{ mm} \\h_{fi,1} &= 153,5 \text{ mm} \\A_{fi,1} &= 6908 \text{ mm}^2 \\I_{y,fi,1} &= 13563020 \text{ mm}^4 \\i_{y,fi,1} &= 44,3 \text{ mm}\end{aligned}$$

Nõtkumine seina tasandis

$$\begin{aligned}b_{fi,2} &= 45 \text{ mm} \\h_{fi,2} &= 120,7 \text{ mm} \\A_{fi,2} &= 5432 \text{ mm}^2 \\I_{z,fi,2} &= 916566 \text{ mm}^4 \\i_{z,fi,2} &= 13,0 \text{ mm}\end{aligned}$$

Arvutusliku survetugevuse määramine

Puidu tugevusklass C24

$$\begin{aligned}f_{c,0,d,fi} &= 26,3 \text{ MPa} &= f_{c,0,k}k_{mod,fi}k_{fi} / \gamma_{M,fi} \\& &= 21 * 1 * 1,25 / 1 \\f_{c,0,k} &= 21 \text{ MPa} \\k_{mod,fi} &= 1 \\k_{fi} &= 1,25 \\ \gamma_{M,fi} &= 1\end{aligned}$$

Survetugevuse 20% fraktil

$$\begin{aligned}f_{20} &= 26,3 \text{ MPa} &= k_{fi}f_{05} \\& &= 1,25 * 21 \\f_{05} &= 21 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Elastsusmooduli 20% fraktil

$$\begin{aligned}E_{20} &= 9250 \text{ MPa} &= k_{fi}E_{05} \\& &= 1,25 * 7400\end{aligned}$$

$$E_{05} = 7400 \text{ MPa}$$

Nõtketegur (nõtkumine seina tasandist välja)

$$k_{c,y} = 0,87 = 1 / (k_y + \sqrt{[k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2]})$$

$$= 1 / (0,79 + \sqrt{[0,79^2 - 0,71^2]})$$

$$k_y = 0,79 = 0,5(1 + \beta_c[\lambda_{rel,y} - 0,3] + \lambda_{rel,y}^2)$$

$$= 0,5(1 + 0,2[0,71 - 0,3] + 0,71^2)$$

$$\beta_c = 0,2$$

$$\lambda_{rel,y} = 0,71 = \lambda_y / \pi \sqrt{(f_{20} / E_{20})}$$

$$= 41,9 / \pi \sqrt{(26,3 / 9250)}$$

$$\lambda_y = 41,9 = l_{ef,y} / i_{y,fi,1}$$

$$= 1858 / 44,3$$

$$l_{ef,y} = 1858 \text{ mm} = l\mu$$

$$= 2654 * 0,7$$

$$l = 2654 \text{ mm}$$

$$\mu = 0,7$$

Nõtketegur (nõtkumine seina tasandis)

$$k_{c,z} = 0,31 = 1 / (k_z + \sqrt{[k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2]})$$

$$= 1 / (2,04 + \sqrt{[2,04^2 - 1,67^2]})$$

$$k_z = 2,04 = 0,5(1 + \beta_c[\lambda_{rel,z} - 0,3] + \lambda_{rel,z}^2)$$

$$= 0,5(1 + 0,2[1,67 - 0,3] + 1,67^2)$$

$$\beta_c = 0,2$$

$$\lambda_{rel,z} = 1,67 = \lambda_z / \pi \sqrt{(f_{20} / E_{20})}$$

$$= 98,7 / \pi \sqrt{(26,3 / 9250)}$$

$$\lambda_z = 98,7 = l_{ef,z} / i_{z,fi,2}$$

$$= 1282 / 13,0$$

$$l_{ef,z} = 1282 \text{ mm} = l\mu$$

$$= 1282 * 1$$

$$l = 1282 \text{ mm} = (2654 - 2 * 45) / 2$$

$$\mu = 1$$

Arvutuslik survekandevõime

$$\begin{aligned} N_{c,0,d,fi} &= 142,6 \text{ kN} &= A_{fi,2} f_{c,0,d,fi} / 1000 \\ & &= 5432 * 26,3 / 1000 \end{aligned}$$

Arvutuslik nõtkekandevõime z-telje sihis (seina tasandist välja)

$$\begin{aligned} N_{b,y,d,fi} &= 158,1 \text{ kN} &= A_{fi,1} k_{c,y} f_{c,0,d,fi} / 1000 \\ & &= 6908 * 0,87 * 26,3 / 1000 \end{aligned}$$

Arvutuslik nõtkekandevõime y-telje sihis (seina tasandis)

$$\begin{aligned} N_{b,z,d,fi} &= 44,6 \text{ kN} &= A_{fi,2} k_{c,z} f_{c,0,d,fi} / 1000 \\ & &= 5432 * 0,31 * 26,3 / 1000 \end{aligned}$$

Seega kriteeriumile R60 vastav seinaposti arvutuslik nõtkekandevõime on 44,6 kN.

3.5.2 II korruse kandev siseseina post Eurokoodeksi põhjal

Jääkristlõike parameetrid 60 min tulekahju korral

$$\begin{aligned} b_{ef} &= 45 \text{ mm} \\ h_{ef} &= 195 \text{ mm} \\ A_{fi} &= 8775 \text{ mm}^2 \\ I_{y,fi} &= 27805781 \text{ mm}^4 \\ I_{z,fi} &= 1480781 \text{ mm}^4 \\ i_{y,fi} &= 56,3 \text{ mm} \\ i_{z,fi} &= 13,0 \text{ mm} \end{aligned}$$

Arvutusliku survetugevuse määramine

Puidu tugevusklass C24

$$\begin{aligned} f_{c,0,d,fi} &= 17,1 \text{ MPa} &= f_{c,0,k} k_{mod,fc,fi} k_{fi} / \gamma_{M,fi} \\ & &= 21 * 0,65 * 1,25 / 1 \\ f_{c,0,k} &= 21 \text{ MPa} \\ k_{mod,fc,fi} &= 0,65 \\ k_{fi} &= 1,25 \\ \gamma_{M,fi} &= 1 \end{aligned}$$

Survetugevuse 20% fraktil

$$f_{20} = 26,3 \text{ MPa} = k_{fi} f_{05} \\ = 1,25 * 21$$

$$f_{05} = 21 \text{ MPa}$$

Elastusmooduli 20% fraktil

$$E_{20} = 9250 \text{ MPa} = k_{fi} E_{05} \\ = 1,25 * 7400$$

$$E_{05} = 7400 \text{ MPa}$$

Nõtketegur (nõtkumine seina tasandist välja)

$$k_{c,y} = 0,84 = 1 / (k_y + \sqrt{[k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2]}) \\ = 1 / (0,85 + \sqrt{[0,85^2 - 0,77^2]})$$

$$k_y = 0,85 = 0,5(1 + \beta_c[\lambda_{rel,y} - 0,3] + \lambda_{rel,y}^2) \\ = 0,5(1 + 0,2[0,77 - 0,3] + 0,77^2)$$

$$\beta_c = 0,2$$

$$\lambda_{rel,y} = 0,77 = \lambda_y / \pi \sqrt{(f_{20} / E_{20})} \\ = 45,5 / \pi \sqrt{(26,3 / 9250)}$$

$$\lambda_y = 45,5 = l_{ef,y} / i_{y,fi} \\ = 2564 / 56,3$$

$$l_{ef,y} = 2564 \text{ mm} = l \mu \\ = 2564 * 1$$

$$l = 2564 \text{ mm}$$

$$\mu = 1$$

Nõtketegur (nõtkumine seina tasandis)

$$k_{c,z} = 0,31 = 1 / (k_z + \sqrt{[k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2]}) \\ = 1 / (2,04 + \sqrt{[2,04^2 - 1,67^2]})$$

$$k_z = 2,04 = 0,5(1 + \beta_c[\lambda_{rel,z} - 0,3] + \lambda_{rel,z}^2) \\ = 0,5(1 + 0,2[1,67 - 0,3] + 1,67^2)$$

$$\beta_c = 0,2$$

$$\lambda_{rel,z} = 1,67 = \lambda_z / \pi \sqrt{(f_{20} / E_{20})} \\ = 98,7 / \pi \sqrt{(26,3 / 9250)}$$

$$\lambda_z = 98,7 = l_{ef,z} / i_{z,fi}$$

$$= 1282 / 13,0$$

$$l_{ef,z} = 1282 \text{ mm} = l\mu$$

$$= 1282 * 1$$

$$l = 1282 \text{ mm} = 2564 / 2$$

$$\mu = 1$$

Arvutuslik survekandevõime

$$N_{c,0,d,fi} = 149,7 \text{ kN} = A_{fi}f_{c,0,d,fi} / 1000$$

$$= 8775 * 17,1 / 1000$$

Arvutuslik nõtkekandevõime z-telje sihis (seina tasandist välja)

$$N_{b,y,d,fi} = 125,9 \text{ kN} = A_{fi}k_{c,y}f_{c,0,d,fi} / 1000$$

$$= 8775 * 0,84 * 17,1 / 1000$$

Arvutuslik nõtkekandevõime y-telje sihis (seina tasandis)

$$N_{b,z,d,fi} = 46,8 \text{ kN} = A_{fi}k_{c,z}f_{c,0,d,fi} / 1000$$

$$= 8775 * 0,31 * 17,1 / 1000$$

Seega kriteeriumile R60 vastav seinaposti arvutuslik nõtkekandevõime on 46,8 kN.

NB! Eurokoodeksi meetoditega üle 60 min standardtulekahju tingimustes teostatud arvutusnäited toodi käsiraamatu meetoditele ainult võrdluseks, see tähendab, et projekteerimisel neid kasutada ei tohi.

Kõik hoone tüüpkonstruktsioonide arvutustulemused on kokkuvõtlikult esitatud järgnevas ptk-s „Tulepüsivusarvutuste koondtabelid“.

4 Tulepüsivusarvutuste koondtabelid

Selles peatükis on esitatud kõikide tüüpkonstruktsioonide põhikarkassi elementide arvutuslikud jääkristlõiked ja kandevõimed 30, 60 ja 90 min standardtulekahju korral. Lisaks on võrdluseks toodud elementide esialgsed ristlõiked ja kandevõimed normaalolukorras. Saadud tulemusi võrdlevad graafikud on esitatud ptk-s 5.

Tabel 1. Postide jääkristlõiked (efektiivristlõike meetod)

| Konstruktsioon | Tulekahju kestvus, min | Kaitsekiht | Esialgne ristlõige, mm | | Jääkristlõige, mm | | | | |
|----------------------------------------------|------------------------|-------------------------------|------------------------|-----|-----------------------------|-------------------|----------------------|-------------------|-------|
| | | | b | h | Nõtke seina tasandist välja | | Nõtke seina tasandis | | |
| | | | | | b _{ef,1} | h _{ef,1} | b _{ef,2} | h _{ef,2} | |
| Välissein (tuli sees) | 90 | F+A ^a 15,5+12,5 | 45 | 245 | 45 | 167,6 | 45 | 127,3 | |
| | 60 | | | | | 207 | | 166,8 | |
| | 30 | | | | | 207 | | 166,8 | |
| | 90 | 2xA ^a 2x12,5 | | | 45 | 59,7 | 45 | 19,5 | |
| | 60 | | | | | 173,5 | | 133,3 | |
| | 30 | | | | | 207 | | 166,8 | |
| Välissein (tuli väljas) | 90 | A 9,5 | 45 | 45 | 31,5 | 45 | -8,7 | | |
| | 60 | | | | 98,2 | | 58 | | |
| | 30 | | | | 164,9 | | 124,6 | | |
| Kandev sisesein 1.korrus (tuli koridoris) | 90 | F+OSB 15,5+12 | 45 | 245 | 45 | 17,5 | 45 | -22,7 | |
| | 60 | | | | | 143,8 | | 103,5 | |
| | 30 | | | | | 207 | | 166,8 | |
| | 90 | F+A+OSB 15,5+12,5 +12 | | | 45 | 45 | 114,2 | 45 | 73,9 |
| | 60 | | | | | | 198,5 | | 158,2 |
| | 30 | | | | | | 207 | | 166,8 |
| | 90 | 2xF+OSB 2x15,5+12 | | | 45 | 45 | 145,7 | 45 | 105,5 |
| | 60 | | | | | | 207 | | 166,8 |
| | 30 | | | | | | 207 | | 166,8 |
| Kandev sisesein 2.korrus (tuli koridoris) | 90 | F+OSB 15,5+12 | 45 | 195 | 45 | -27,5 | 45 | -60,2 | |
| | 60 | | | | | 98,8 | | 66 | |
| | 30 | | | | | 162 | | 129,3 | |
| | 90 | F+A+OSB 15,5+12,5 +12 | | | 45 | 45 | 69,2 | 45 | 36,4 |
| | 60 | | | | | | 153,5 | | 120,7 |
| | 30 | | | | | | 162 | | 129,3 |
| | 90 | 2xF+OSB 2x15,5+12 | | | 45 | 45 | 100,7 | 45 | 68 |
| | 60 | | | | | | 162 | | 129,3 |
| | 30 | | | | | | 162 | | 129,3 |

| Konstruktsioon | Tulekahju kestvus, min | Kaitsekiht | Esialgne ristlõige, mm | | Jääkristlõige, mm | | | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|-----------------------------|------------------------|-----|------------------------|-------------------|----------------------|-------------------|----|-------|
| | | | b | h | Nõtke seinatase väljas | | Nõtke seinatase sees | | | |
| | | | | | b _{ef,1} | h _{ef,1} | b _{ef,2} | h _{ef,2} | | |
| Kandev sisesein 3.-5.korrus (tuli koridoris) | 90 | F+OSB 15,5+12 | 45 | 170 | 45 | -50 | 45 | -79 | | |
| | 60 | | | | | 76,3 | | 47,3 | | |
| | 30 | | | | | 139,5 | | 110,5 | | |
| | 90 | F+A+OSB 15,5+12,5 +12 | | | 45 | 170 | 45 | 46,7 | 45 | 17,7 |
| | 60 | | | | | | | 131 | | 102 |
| | 30 | | | | | | | 139,5 | | 110,5 |
| | 90 | 2xF+OSB 2x15,5+12 | | | 45 | 170 | 45 | 78,2 | 45 | 49,2 |
| | 60 | | | | | | | 139,5 | | 110,5 |
| | 30 | | | | | | | 139,5 | | 110,5 |
| Korterite vaheline kahekordse karkassiga jääkusein (tuli ühel pool sein) | 90 | Pool sein ^b | 45 | 120 | 45 | 94,5 | 45 | 73 | | |
| | 60 | F+OSB | 45 | 120 | 45 | 29,9 | 45 | 8,4 | | |
| | 30 | 15,5+12 | 45 | 120 | 45 | 94,5 | | 73 | | |
| ^a lisaks kipsplaatidele kaitses seinaposti 45mm lisakarkass + OSB-plaat 12mm | | | | | | | | | | |
| ^b kahekordsest karkassist põles ära üks pool ning teine pool karkassist jäi tulele avamata | | | | | | | | | | |

Tabel 2. Talade jääkristlõiked (efektiivristlõike meetod)

| Konstruktsioon | Tulekahju kestvus, min | Kaitsekiht | Esialgne ristlõige, mm | | Jääkristlõige, mm | | | |
|---------------------------|------------------------|-------------------|------------------------|-----|-------------------|-----------------|----|-------|
| | | | b | h | b _{ef} | h _{ef} | | |
| Katuslagi (tuli altpoolt) | 90 | A 12,5 | 60 | 320 | 60 | 150,2 | | |
| | 60 | | | | | 200,3 | | |
| | 30 | | | | | 253,7 | | |
| | 90 | F 15,5 | | | 60 | 320 | 60 | 140,1 |
| | 60 | | | | | | | 201,7 |
| | 30 | | | | | | | 264,9 |
| | 90 | F+A 15,5+12,5 | | | 60 | 320 | 60 | 147,7 |
| | 60 | | | | | | | 237,6 |
| | 30 | | | | | | | 274,5 |
| Katuslagi (tuli ülevalt) | 90 | Kivivill 170mm | 60 | 320 | 60 | 201,6 | | |
| | 60 | | | | | 266,5 | | |
| | 30 | | | | | 266,5 | | |
| Vahelagi (tuli altpoolt) | 90 | F+A 15,5+12,5 | 100 | 280 | 100 | 142,3 | | |
| | 60 | | | | | 210,5 | | |
| | 30 | | | | | 238,5 | | |

| Konstruktsioon | Tulekahju kestvus, min | Kaitsekiht | Esiolgne ristlõige, mm | | Jääkristlõige, mm | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|----------------------------|------------------------|-----|-------------------|-----------------|
| | | | b | h | b _{ef} | h _{ef} |
| Korterite vahelist jääkuseina toetav tala (tuli kolmest küljest) | 90 | F ^a 15,5 | 220 | 360 | 95,7 | 293,3 |
| | 60 | | | | 137,7 | 314,3 |
| | 30 | | | | 199,6 | 342,5 |
| | 90 | F ^b 15,5 | 220 | 360 | 91,1 | 291,4 |
| | 60 | | | | 133,1 | 312,4 |
| | 30 | | | | 190,3 | 338,7 |
| | 90 | 2xF ^b 2x15,5 | 220 | 360 | 131,1 | 307,4 |
| | 60 | | | | 190,3 | 328,8 |
| | 30 | | | | 213,8 | 356,1 |
| ^a tala söestumise algusaeg arvutati kattekihi kaitseaegade summeerimise meetodiga ^b tala söestumise algusaeg arvutati käsiraamatu tabelis 5.1 toodud valemitega | | | | | | |

Tabel 3. Postide kandevõime (efektiivristlõike meetod)

| Konstruktsioon, materjali tugevusklass | Tulekahju kestvus, min | Kaitsekiht | Nõtke seina tasandist välja ^a | | Nõtke seina tasandis ^b | |
|-----------------------------------------------------|------------------------|-----------------------------|------------------------------------------|--------------------|-----------------------------------|--------------------|
| | | | N _{c,1} | N _{b,c,1} | N _{c,2} | N _{b,c,2} |
| Välissein (tuli sees) C24 | 90 | F+A 15,5+12,5 | 198 | 178 | 150,4 | 47 |
| | 60 | | 244,5 | 230 | 197 | 61,9 |
| | 30 | | 244,5 | 230 | 197 | 61,9 |
| | 90 | 2xA 2x12,5 | 70,5 | 18,8 | 23 | 7,2 |
| | 60 | | 204,9 | 186 | 157,5 | 49,2 |
| | 30 | | 244,5 | 230 | 197 | 61,9 |
| Välissein (tuli väljas) C24 | 90 | A 9,5 | 37,2 | 2,9 | - | - |
| | 60 | | 116 | 70,4 | 68,5 | 21,4 |
| | 30 | | 194,8 | 174 | 147,2 | 46 |
| | 0 ^c | 142,5 | 130 | 142,5 | 44,5 | |
| Kandev sisesein 1.korrus (tuli koridoris) C24 | 90 | F+OSB 15,5+12 | 20,7 | 0,5 | - | - |
| | 60 | | 169,9 | 144 | 122,3 | 38,2 |
| | 30 | | 244,5 | 230 | 197 | 61,6 |
| | 90 | F+A+OSB 15,5+12,5 +12 | 134,9 | 97,4 | 87,3 | 27,3 |
| | 60 | | 234,5 | 219 | 186,9 | 58,4 |
| | 30 | | 244,5 | 230 | 197 | 61,6 |
| | 90 | 2xF+OSB 2x15,5+12 | 172,1 | 147 | 124,6 | 38,9 |
| | 60 | | 244,5 | 230 | 197 | 61,6 |
| | 30 | | 244,5 | 230 | 197 | 61,6 |
| | 0 ^c | | 142,5 | 130 | 142,5 | 44,5 |

| Konstruktsioon, materjali tugevusklass | Tulekahju kestvus, min | Kaitsekiht | Nõtke seinatase väljal ^a | | Nõtke seinatase tasandil ^b | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|--------------------|---------------------------------------|--------------------|
| | | | N _{c,1} | N _{b,c,1} | N _{c,2} | N _{b,c,2} |
| Kandev sisesein 2.korrus (tuli koridoris) C24 | 90 | F+OSB 15,5+12 | - | - | - | - |
| | 60 | | 116,7 | 71,4 | 78 | 24,4 |
| | 30 | | 191,4 | 170 | 152,7 | 47,7 |
| | 90 | F+A+OSB 15,5+12,5 +12 | 81,7 | 28,4 | 43 | 13,4 |
| | 60 | | 181,3 | 158 | 142,6 | 44,6 |
| | 30 | | 191,4 | 170 | 152,7 | 47,7 |
| | 90 | 2xF+OSB 2x15,5+12 | 119 | 74,6 | 80,3 | 25,1 |
| | 60 | | 191,4 | 170 | 152,7 | 47,7 |
| | 30 | | 191,4 | 170 | 152,7 | 47,7 |
| | 0 ^c | | 113,4 | 95,3 | 113,4 | 35,4 |
| Kandev sisesein 3.-5.korrus (tuli koridoris) C24 | 90 | F+OSB 15,5+12 | - | - | - | - |
| | 60 | | 90,1 | 37,1 | 55,9 | 17,5 |
| | 30 | | 164,8 | 138 | 130,5 | 40,8 |
| | 90 | F+A+OSB 15,5+12,5 +12 | 55,2 | 9,3 | 20,9 | 6,5 |
| | 60 | | 154,7 | 125 | 120,5 | 37,7 |
| | 30 | | 164,8 | 138 | 130,5 | 40,8 |
| | 90 | 2xF+OSB 2x15,5+12 | 92,4 | 39,6 | 58,1 | 18,2 |
| | 60 | | 164,8 | 138 | 130,5 | 40,8 |
| | 30 | | 164,8 | 138 | 130,5 | 40,8 |
| | 0 ^c | | 98,9 | 76,2 | 98,9 | 30,9 |
| Korterite vaheline kahekordse karkassiga jääkussein (tuli ühel pool sein) C24 | 90 | Pool sein | 111,6 | 64,3 | 86,2 | 26,9 |
| | 60 | F+OSB | 146,9 | 66,8 | 96,1 | 30 |
| | 30 | 15,5+12 | 223,2 | 129 | 172,4 | 53,8 |
| | 0 ^c | | 139,6 | 71 | 139,6 | 43,6 |
| ^a posti nõtkepikkus seinatase väljal $L_{ef} = 2654 \cdot 0,7 = 1858$ mm | | | | | | |
| ^b posti nõtkepikkus seinatase tasandil $L_{ef} = (2654 - 2 \cdot 45) / 2 \cdot 1,0 = 1282$ mm | | | | | | |
| ^c ajahetkel $t = 0$ ehk normaalolukorras on posti nõtkepikkus seinatase väljal $L_{ef} = 2564 \cdot 1,0 = 2564$ mm ning seinatase tasandil $L_{ef} = 2564 / 2 \cdot 1,0 = 1282$ mm; $k_{mod} = 0,8$ | | | | | | |

Kuna jääkristlõike parameetrid sõltuvad efektiivristlõike meetodi järgi arvutades nõtkesuunast, tähistavad posti survekandevõimet $N_{c,1}$ ja $N_{c,2}$ ning nõtkekandevõimet $N_{b,c,1}$ ja $N_{b,c,2}$.

Tabel 4. Talade kandevõime (efektiivristlõike meetod)

| Konstruksioon, materjali tugevusklass | Tulekahju kestvus, min | Kaitsekiht | Paindekandevõime, kNm | Vastupanu põikumisele ^a , kNm |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|----------------------------|-----------------------|------------------------------------------|
| Katuslagi (tuli altpoolt) GL24c | 90 | A 12,5 | 6,23 | - |
| | 60 | | 11,07 | |
| | 30 | | 17,76 | |
| | 90 | F 15,5 | 5,42 | |
| | 60 | | 11,23 | |
| | 30 | | 19,37 | |
| | 90 | F+A 15,5+12,5 | 6,02 | |
| | 60 | | 15,58 | |
| | 30 | | 20,8 | |
| Katuslagi (tuli ülevalt) GL24c | 90 | Kivivill 170mm | 11,22 | 8,83 |
| | 60 | | 19,6 | 13,4 |
| | 30 | | 19,6 | 13,4 |
| | 0 | | 15,73 ^c | - |
| Vahelagi (tuli altpoolt) GL24c | 90 | F+A 15,5+12,5 | 9,31 | - |
| | 60 | | 20,38 | |
| | 30 | | 26,17 | |
| | 0 | | 20,07 ^c | |
| Korterite vahelist jäikusseina toetav tala (tuli kolmest küljest) GL24h | 90 | F 15,5 | 37,87 | - |
| | 60 | | 62,57 | |
| | 30 | | 107,71 | |
| | 90 | F ^b 15,5 | 35,58 | |
| | 60 | | 59,75 | |
| | 30 | | 100,42 | |
| | 90 | 2xF ^b 2x15,5 | 56,99 | |
| | 60 | | 94,64 | |
| | 30 | | 124,71 | |
| | 0 | | 54,74 ^d | |
| ^a tala sildeava $l_a = 5500\text{mm}$ ning $l_{ef}/l_a = 0,9$ ^b tala söestumise algusaeg arvutati käsiraamatu tabelis 5.1 toodud valemitega ^c normaalolukorras $k_{mod} = 0,8$ ^d normaalolukorras $k_{mod} = 0,6$ | | | | |

Tabel 5. Postide jääkristlõiked (vähendatud tugevus- ja jäikusomaduste meetod)

| Konstruktsioon | Tulekahju kestvus, min | Kaitsekiht | Esialgne ristlõige, mm | | Jääkristlõige, mm | | | |
|--------------------------------------------------|------------------------|-------------------------------|------------------------|-----|-------------------|-----------------|----|-------|
| | | | b | h | b _{ef} | h _{ef} | | |
| Välissein (tuli sees) | 90 | F+A ^a 15,5+12,5 | 45 | 245 | 45 | 239,5 | | |
| | 60 | | | | | 245 | | |
| | 30 | | | | | 245 | | |
| | 90 | 2xA ^a 2x12,5 | | | 45 | 146,3 | | |
| | 60 | | | | | 237 | | |
| | 30 | | | | | 245 | | |
| Välissein (tuli väljas) | 90 | A 9,5 | | | 45 | 91,2 | | |
| | 60 | | | | | 146,5 | | |
| | 30 | | | | | 201,8 | | |
| Kandev sisesein 1.korrus (tuli koridoris) | 90 | F+OSB 15,5+12 | 45 | 245 | 45 | 91,6 | | |
| | 60 | | | | | 192,2 | | |
| | 30 | | | | | 245 | | |
| | 90 | F+A+OSB 15,5+12,5 +12 | | | 45 | 245 | 45 | 197 |
| | 60 | | | | | | | 245 |
| | 30 | | | | | | | 245 |
| | 90 | 2xF+OSB 2x15,5+12 | | | 45 | 245 | 45 | 208,1 |
| | 60 | | | | | | | 245 |
| | 30 | | | | | | | 245 |
| Kandev sisesein 2.korrus (tuli koridoris) | 90 | F+OSB 15,5+12 | 45 | 195 | 45 | 41,6 | | |
| | 60 | | | | | 142,2 | | |
| | 30 | | | | | 195 | | |
| | 90 | F+A+OSB 15,5+12,5 +12 | | | 45 | 195 | 45 | 147 |
| | 60 | | | | | | | 195 |
| | 30 | | | | | | | 195 |
| | 90 | 2xF+OSB 2x15,5+12 | | | 45 | 195 | 45 | 158,1 |
| | 60 | | | | | | | 195 |
| | 30 | | | | | | | 195 |
| Kandev sisesein 3.- 5.korrus (tuli koridoris) | 90 | F+OSB 15,5+12 | 45 | 170 | 45 | 16,6 | | |
| | 60 | | | | | 117,2 | | |
| | 30 | | | | | 170 | | |
| | 90 | F+A+OSB 15,5+12,5 +12 | | | 45 | 170 | 45 | 122 |
| | 60 | | | | | | | 170 |
| | 30 | | | | | | | 170 |
| | 90 | 2xF+OSB 2x15,5+12 | | | 45 | 170 | 45 | 133,1 |
| | 60 | | | | | | | 170 |
| | 30 | | | | | | | 170 |

| Konstruktsioon | Tulekahju kestvus, min | Kaitsekiht | Esialgne ristlõige, mm | | Jääkristlõige, mm | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|------------------------|---------------------------|-----|-------------------|-----------------|
| | | | b | h | b _{ef} | h _{ef} |
| Korterite vaheline kahekordse karkassiga jäikussein (tuli ühel pool sein) | 90 | Pool sein ^b | 45 | 120 | 45 | 86,6 |
| | 60 | F+OSB | 45 | 120 | 45 | 67,2 |
| | 30 | 15,5+12 | | | | 120 |
| ^a lisaks kipsplaatidele kaitse seinaposti 45mm lisakarkass + OSB-plaat 12mm ^b kahekordsest karkassist põles täielikult ära üks pool | | | | | | |

Tabel 6. Talade jääkristlõiked (vähendatud tugevus- ja jäikusomaduste meetod)

| Konstruktsioon | Tulekahju kestvus, min | Kaitsekiht | Esialgne ristlõige, mm | | Jääkristlõige, mm | | | |
|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------|-------------------|---------------------------|-----|-------------------|-----------------|----|-------|
| | | | b | h | b _{ef} | h _{ef} | | |
| Katuslagi (tuli altpoolt) | 90 | A 12,5 | 60 | 320 | 60 | 190,1 | | |
| | 60 | | | | | 246,6 | | |
| | 30 | | | | | 303,1 | | |
| | 90 | F 15,5 | | | 60 | 320 | 60 | 187,3 |
| | 60 | | | | | | | 249 |
| | 30 | | | | | | | 310,7 |
| | 90 | F+A 15,5+12,5 | | | 60 | 320 | 60 | 199,9 |
| | 60 | | | | | | | 290 |
| | 30 | | | | | | | 320 |
| Katuslagi (tuli ülevalt) | 90 | Kivivill 170mm | 60 | 320 | 60 | 229,7 | | |
| | 60 | | | | | 320 | | |
| | 30 | | | | | 320 | | |
| Vahelagi (tuli altpoolt) | 90 | F+A 15,5+12,5 | 100 | 280 | 100 | 172,9 | | |
| | 60 | | | | | 263 | | |
| | 30 | | | | | 280 | | |
| Korterite vahelist jäikusseina toetav tala (tuli kolmest küljest) | 90 | F 15,5 | 220 | 360 | 114,3 | 303,2 | | |
| | 60 | | | | | 153,3 | | |
| | 30 | | | | | 210,9 | | |

Tabel 7. Postide kandevõime (vähendatud tugevus- ja jäikusomaduste meetod)

| Konstruktsioon, materjali tugevusklass | Tulekahju kestvus, min | Kaitsekiht | Survekandevõime, kN | Nõtke seinatasandist välja ^a | Nõtke seinatasandis ^b |
|-----------------------------------------------------|------------------------|-----------------------------|---------------------|-----------------------------------------|----------------------------------|
| | | | N _c | N _{b,c,1} | N _{b,c,2} |
| Välissein (tuli sees) C24 | 90 | F+A 15,5+12,5 | 195,2 | 177,1 | 61 |
| | 60 | | 202,6 | 184,8 | 63,3 |
| | 30 | | 202,6 | 184,8 | 63,3 |
| | 90 | 2xA 2x12,5 | 86,4 | 57,7 | 27 |
| | 60 | | 190,4 | 172,2 | 59,5 |
| | 30 | | 202,6 | 184,8 | 63,3 |
| Välissein (tuli väljas) C24 | 90 | A 9,5 | 42 | 13,4 | 13,1 |
| | 60 | | 86,5 | 57,8 | 27 |
| | 30 | | 145,4 | 124,2 | 45,4 |
| | 0 ^c | | 142,5 | 130 | 44,5 |
| Kandev sisesein 1.korrus (tuli koridoris) C24 | 90 | F+OSB 15,5+12 | 42,2 | 13,6 | 13,2 |
| | 60 | | 134 | 111,8 | 41,9 |
| | 30 | | 202,6 | 184,8 | 63,3 |
| | 90 | F+A+OSB 15,5+12,5 +12 | 139,6 | 118 | 43,6 |
| | 60 | | 202,6 | 184,8 | 63,3 |
| | 30 | | 202,6 | 184,8 | 63,3 |
| | 90 | 2xF+OSB 2x15,5+12 | 154,9 | 134,1 | 48,4 |
| | 60 | | 202,6 | 184,8 | 63,3 |
| | 30 | | 202,6 | 184,8 | 63,3 |
| | 0 ^c | | 142,5 | 130 | 44,5 |
| Kandev sisesein 2.korrus (tuli koridoris) C24 | 90 | F+OSB 15,5+12 | 13,3 | 1 | 4,1 |
| | 60 | | 87,3 | 56,4 | 27,3 |
| | 30 | | 149,7 | 125,9 | 46,8 |
| | 90 | F+A+OSB 15,5+12,5 +12 | 92 | 61,8 | 28,8 |
| | 60 | | 149,7 | 125,9 | 46,8 |
| | 30 | | 149,7 | 125,9 | 46,8 |
| | 90 | 2xF+OSB 2x15,5+12 | 104,6 | 75,7 | 32,7 |
| | 60 | | 149,7 | 125,9 | 46,8 |
| | 30 | | 149,7 | 125,9 | 46,8 |
| | 0 ^c | | 113,4 | 95,3 | 35,4 |

| Konstruktsioon, materjali tugevusklass | Tulekahju kestvus, min | Kaitsekiht | Survekandevõime, kN | Nõtke seinatasandist välja ^a | Nõtke seinatasandis ^b |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|-----------------------------|---------------------|-----------------------------------------|----------------------------------|
| | | | N _c | N _{b,c,1} | N _{b,c,2} |
| Kandev sisesein 3.-5.korrus (tuli koridoris) C24 | 90 | F+OSB 15,5+12 | 3,9 | 0,05 | 1,2 |
| | 60 | | 63,7 | 31,2 | 19,9 |
| | 30 | | 120,5 | 92,9 | 37,7 |
| | 90 | F+A+OSB 15,5+12,5 +12 | 69,2 | 36,1 | 21,6 |
| | 60 | | 120,5 | 92,9 | 37,7 |
| | 30 | | 120,5 | 92,9 | 37,7 |
| | 90 | 2xF+OSB 2x15,5+12 | 78,6 | 46,6 | 24,6 |
| | 60 | | 120,5 | 92,9 | 37,7 |
| | 30 | | 120,5 | 92,9 | 37,7 |
| | 0 ^c | | 98,9 | 76,2 | 30,9 |
| Korterite vaheline kahekordse karkassiga jäikussein (tuli ühel pool sein) C24 | 90 | Pool sein | 40,9 | 11,9 | 12,8 |
| | 60 | F+OSB | 99,3 | 41,7 | 31 |
| | 30 | 15,5+12 | 144,6 | 73,6 | 45,2 |
| | 0 ^c | | 139,6 | 71 | 43,6 |
| ^a posti nõtkepikkus seinatasandist välja $L_{ef} = 2564 * 1,0 = 2564$ mm ^b posti nõtkepikkus seinatasandis $L_{ef} = 2564 / 2 * 1,0 = 1282$ mm ^c ajahetkel $t = 0$ ehk normaalolukorras on posti nõtkepikkus seinatasandist välja $L_{ef} = 2564 * 1,0 = 2564$ mm ning seinatasandis $L_{ef} = 2564 / 2 * 1,0 = 1282$ mm; $k_{mod} = 0,8$ | | | | | |

Tabel 8. Talade kandevõime (vähendatud tugevus- ja jäikusomaduste meetod)

| Konstruktsioon, materjali tugevusklass | Tulekahju kestvus, min | Kaitsekiht | Paindekandevõime, kNm | Vastupanu põikumisele ^a , kNm |
|----------------------------------------|------------------------|-------------------|-----------------------|------------------------------------------|
| Katuslagi (tuli altpoolt) GL24c | 90 | A 12,5 | 6,08 | - |
| | 60 | | 11,92 | |
| | 30 | | 20,28 | |
| | 90 | F 15,5 | 5,91 | |
| | 60 | | 12,15 | |
| | 30 | | 21,58 | |
| | 90 | F+A 15,5+12,5 | 6,95 | |
| | 60 | | 18,11 | |
| | 30 | | 23,46 | |
| Katuslagi (tuli ülevalt) GL24c | 90 | Kivivill 170mm | 9,03 | 6,69 |
| | 60 | | 21,76 | 13,19 |
| | 30 | | 21,76 | 13,19 |
| | 0 | | 15,73 ^b | - |

| Konstruksioon, materjali tugevusklass | Tulekahju kestvus, min | Kaitsekiht | Paindekandevõime, kNm | Vastupanu põikumisele ^a , kNm |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|--------------------|-----------------------|------------------------------------------|
| Vahelagi (tuli altpoolt) GL24c | 90 | F+A 15,5+12,5 | 8,25 | - |
| | 60 | | 24,5 | |
| | 30 | | 28,85 | |
| | 0 | 20,07 ^b | | |
| Korterite vahelist jääkuseina toetav tala (tuli kolmest küljest) GL24h | 90 | F 15,5 | 43,5 | - |
| | 60 | | 67,56 | |
| | 30 | | 111,39 | |
| | 0 | 54,74 ^c | | |
| ^a tala sildeava $l_a = 5500\text{mm}$ ning $l_{ef}/l_a = 0,9$ ^b normaalolukorras $k_{\text{mod}} = 0,8$ ^c normaalolukorras $k_{\text{mod}} = 0,6$ | | | | |

Tabel 9. Tuletõkestusvõime koondtabel

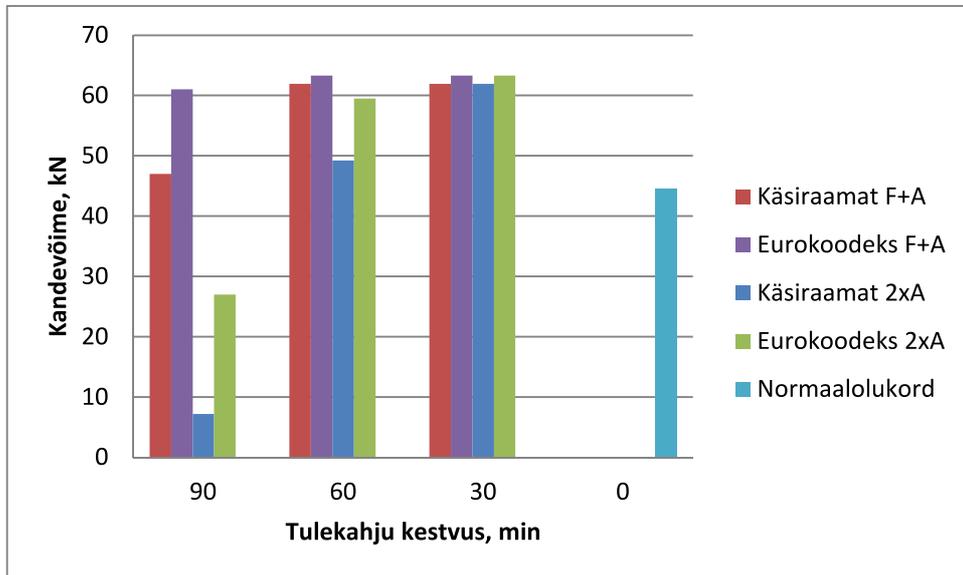
| Konstruksioon | Tuletõkestusvõime käsiraamatu järgi | Tuletõkestusvõime Eurokoodeksi järgi |
|------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| katuslagi | EI 100 | EI 115 |
| vahelagi | EI 120 | EI 90 |
| välissein | EI 130 | EI 95 |
| korterite vaheline sein | EI 110 | EI 120 |
| kandev sisesein 3.-5. korrus | EI 100 | EI 100 |
| kandev sisesein 2. korrus | EI 110 | EI 105 |
| kandev sisesein 1. korrus | EI 130 | EI 115 |

Märkusena tuleb öelda, et Eurokoodeksi lisa E arvutusmeetod kehtib kuni 60 min standardtulekahju korral. Seega Tabel 9-s toodud väärtused on vaid võrdluseks käsiraamatu täiustatud liitmismeetodiga leitud tulemustele.

Hoone tuletõkkeseksioone eraldavalt konstruktsioonilt nõuti vastavust EI90-le. Selgub, et see on tagatud piisava varuga. Sellest võib järeldada, et kandvat funktsiooni täitva tarindi korral on karkassielementide kaitseks mõeldud kipsplaadid ning kivivillaga täidetud tühimikud piisavad, et tagada ka vajalik tuletõkestusvõime.

5 Tulemuste analüüs

Graafik 3. Välisseina posti nõtkekandevõime (tulekahju sisekeskkonnas)



Ajahetkel $t=0$ on kujutatud posti kandevõimet normaalolukorras. Selgub, et erakorralises arvutusolukorras võib materjali tugevuse 20% fraktiili kasutamine ning varutegurite vähendamine anda piisavalt suure jääkristlõike korral suurema kandevõime kui normaalolukorras.

30 minutilise tulekahju jooksul ei hakka post kaitsekihi taga söestuma ning kandevõime erinevuse tingib vähenenud tugevusomaduste arvesse võtmine. Eurokoodeksi järgi tuleb leida tugevuse modifikatsioonitegur ristlõikele kõrgusega $h = 245\text{mm}$, mis nõuab abitegurite ekstrapoleerimist. See võibki olla põhjuseks, miks kandevõime vähendatud tugevus- ja jäikusomaduste meetodi kohaselt on 2% suurem.

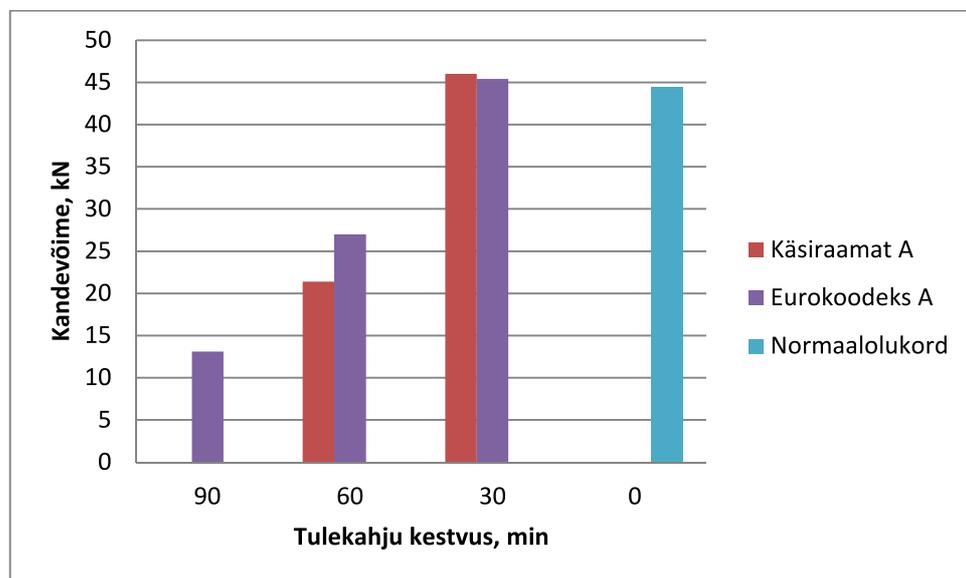
Tulekahju 60 min kestvusel on F+A-tüüpi kaitse piisav, et post ei hakkaks söestuma. Seega kandevõime on sama kui 30 min korral. 2xA-tüüpi kipsplaatidest kaitsekihi taga algab aga söestumine ning seetõttu väheneb ka kandevõime, kusjuures käsiraamatu järgi arvutades on erinevus suurem kui Eurokoodeksi põhjal. See on tingitud põhiliselt tegurist, mis võtab söestumiskiiruse arvutamisel arvesse ristlõike laiuse mõju. Eurokoodeksis on toodud tabelid vastava teguri määramiseks, kuid käsiraamat pakub arvutusteks valemeid. Seejuures diferentseeritakse, kas söestumissügavus $d_{\text{char}} > 30\text{mm}$ või $< 30\text{mm}$. Antud juhul on $d_{\text{char}} > 30\text{mm}$ ning seepärast on Eurokoodeksil põhinev söestumissügavuse arvutus, võrreldes käsiraamatuga, tagavara kahjuks kuna tabeli järgsed suurused on leitud valemiga, mis eeldavad, et $d_{\text{char}} < 30\text{mm}$.

Ristlõiketeguri olulisust iseloomustab ka kandevõimete erinevus 60 ja 90 min tulekahju korral kui kaitsekihi moodustab 2xA-tüüpi kipsplaat. Mõlema meetodi korral on söestumise algusajad põhimõtteliselt võrdsed (tegelik vahe 2 min). Kuna söestumise kiiruste erinevus põhjustab kauem kestvate tulekahjude korral jääkristlõike mõõtmes suuremaid erinevusi, on oluline täheldada, et söestumise ja aja vaheline seos ei ole lineaarne.[10] Seda võtabki arvesse käsiraamatu valem ristlõiketeguri arvutamiseks, mil $d_{char} > 30\text{mm}$.

Eurokoodeksi järgi on 90 min tulekahjus, F+A-tüüpi kaitsekihi korral, kandevõime peaaegu sama suur kui 60 min tulekahjus ning 30% suurem kui käsiraamatuga arvatud tulemus. See vahe tuleneb lisaks eelmainitud ristlõiketegurile ka söestumise algusaegade erinevusest (käsiraamatu järgi algab söestumine 13 min varem).

F-tüüpi kipsplaadi mõju posti kandevõimele iseloomustab hästi 90 min tulekahjus (käsiraamat F+A) ja 60 min tulekahjus (käsiraamat 2xA) saadud tulemused. Kandevõimete vahe on ainult 2,2 kN ehk sisuliselt annab A-tüüpi kipsplaadi asendamine F-tüüpi plaadiga lisa 30 min tulepüsivusaega.

Graafik 4. Välisseina posti nõtkekandevõime (tulekahju väliskeskkonnas)

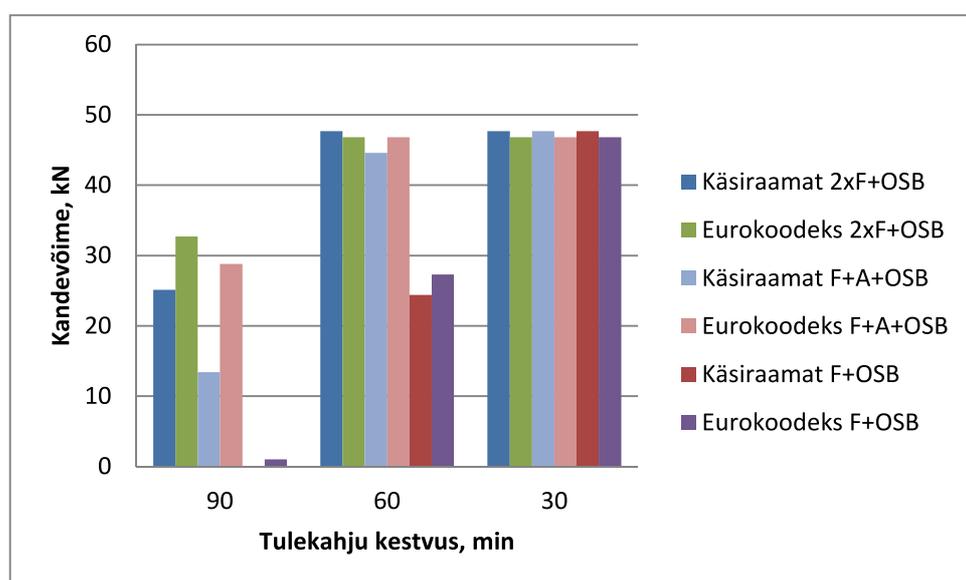


90 min tulekahju kestvuse juures ilmneb, et posti kandevõime efektiivristlõike meetodi kohaselt arvutades on 0. Selline olukord on tingitud eelkõige ebapiisavast tulekaitsekihist (ühekihtiline A-tüüpi kipsplaat paksusega 9,5mm), mille tõttu algab elemendi söestumine juba 11. minutil ning arvutuslik jääkristlõike tuleb negatiivne. Kuna efektiivristlõike meetod arvestab jääkristlõike leidmisel ka nulltugevusega kihi paksusega, siis reaalne söestumine on väiksem. Näiteks, kasutades vähendatud tugevus- ja jäikusomaduste

meetodit, on kandevõimeks ca 13 kN. Seega kahe meetodi põhimõtteline erinevus elemendi tugevusomaduste vähendamisel tingib olukorra, kus ühtpidi kandevõime puudub, kuid teisalt mitte.

Lisaks sellele võib järeldada, et hoone välisseina vastupidavus väliskeskkonnas tekkinud tulekahjule on palju väiksem kui sisemise tulekahju korral, kus kaitsekihi moodustavad enamjaolt kahes kihis kipsplaadid, lisakarkass ning jäigastusplaat. Seega on oluline mõista, et välise tulekahju korral on optimaalne arvestada ca 60 min tulepüsivusajaga või veelgi vähemaga.

Graafik 5. II korruse kandva siseseina posti nõtkekandevõime



Käesolevas peatükis vaatleme just II korruse posti kandevõimet, sest sel juhul ei pea Eurokoodeksi järgi vähendatud tugevus- ja jäikusomaduste arvestamiseks abitegureid interpoleerima ega ekstrapoleerima.

Vastavalt kattekihi kaitseaegadele selgub, et ühegi kombinatsiooni korral posti söestumist 30 min jooksul ei toimu. 2xF-tüüpi kipsplaatidest kaitse korral ei toimu söestumist ka 60 min jooksul ning F+A-tüüpi kaitse puhul on söestumine käsiraamatu järgi ainult 9 mm. Sellest tuleneb ka peaaegu võrdne kandevõime kuni 60 min tulekahjus. Sõltuvalt söestumise algusajast ning kaitsekihi tõrketekkeajast on F- ja 2xF-tüüpi kipsplaadiga kaitstud elemendi kandevõime erinevus 60 min tulekahju korral ca 2 kordne.

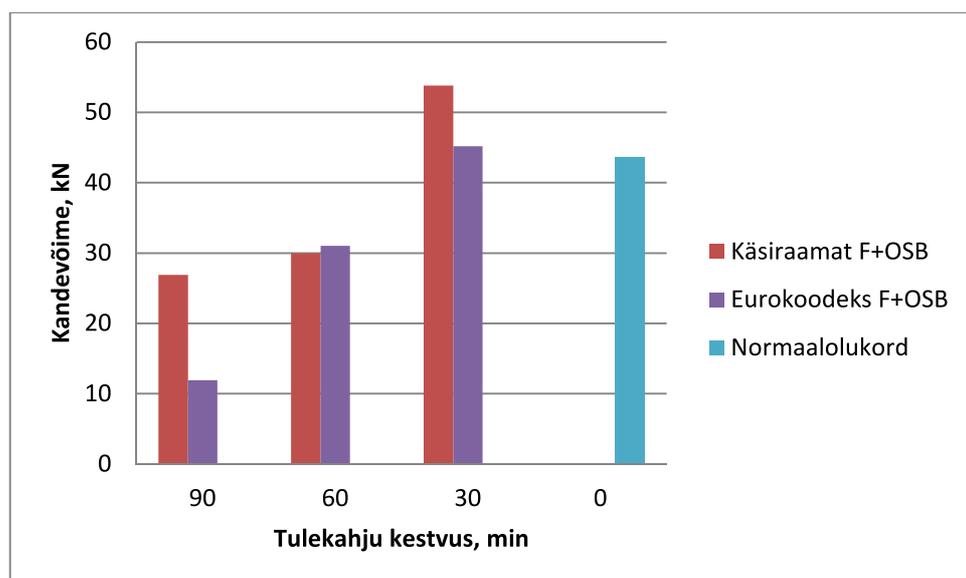
Efektivrastlõike meetodi ning vähendatud tugevus- ja jäikusomaduste meetodi põhimõttelist erinevust ilmestab kõige paremini F+OSB-tüüpi kattekiht 90 min tulekahjus. Arvutuslik jääkrastlõike on efektivrastlõike meetodi järgi negatiivne, mille

tulemusel on kandevõime 0. Samas Eurokoodeksi järgi on jääkristlõige positiivne ning sellele on võimalik arvutada tugevuse vähendustegur ning teoreetiline kandevõime.

Peale selle on näha, et käsiraamatu järgi erinevad posti kandevõimed 2xF- ja F+A-tüüpi kaitse korral märgatavalt enam kui Eurokoodeksiga arvutades. Käsiraamatu põhjal tuleneb erinevus kaitse- ja järelkaitsefaasi kestustest (2xF-tüüpi kattekihi söestumine algab 13 min hiljem ning tõrketekkeae on 3 min pikem võrreldes F+A-tüüpi kattekihiga). Eurokoodeksi järgi on aga mõlema kattekihi korral posti söestumise algusajaks 64. minut. Seega erinevus tuleneb ainult 2xF-tüüpi kattekihi 3 minuti võrra hilisemast tõrketekkeajast.

F-tüüpi kipsplaadi mõju, sarnaselt välisseinale, iseloomustab käsiraamatu järgi arvutatud kandevõime suurus 90 min tulekahjus (2xF+OSB) ja 60 min tulekahjus (F+OSB). Kandevõimete vahe on ainult 0,7 kN ehk ühe F-tüüpi plaadikihi lisamine tagab täiendavad 30 min tulepüsivust.

Graafik 6. Korterite vahelise seina posti nõtkekandevõime

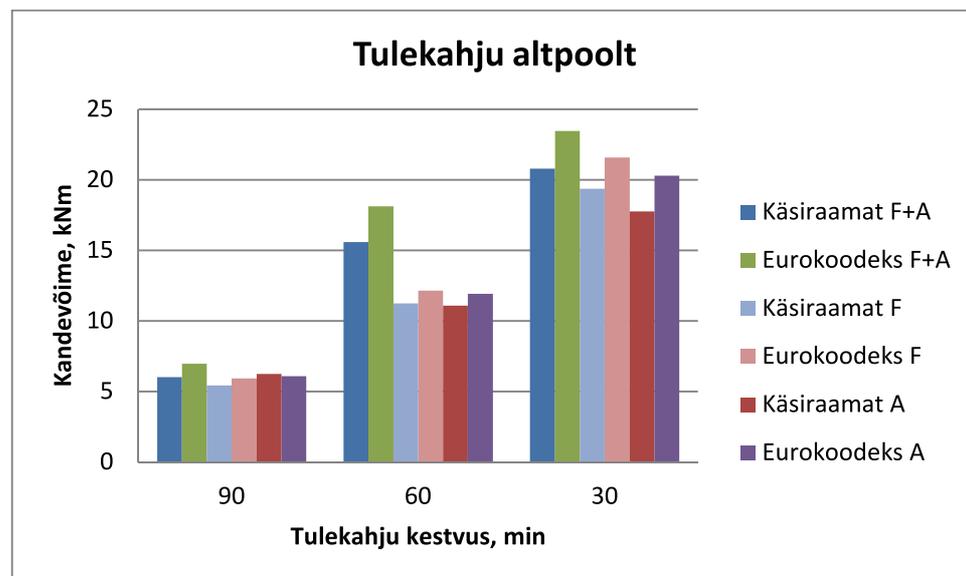


Käsiraamatu järgi arvutatud nõtkekandevõimed 60 ja 90 min tulekahjus on peaaegu samad. Kuna 90 min tulekahju korral põleb kahekordsest karkassist ära täpselt üks pool + teise karkassipoolle sisemine OSB-plaat, jääb tagumine põhikarkass tulele avamata. Seega määrab alles jäänud posti kandevõime nulltugevusega kihi paksus. 60 min tulekahju korral on efektiivse jääkristlõike kõrgus tulele avatud karkassipoolel ainult 8,4mm. Seepärast on ka tema panus kandevõimesse väga väike, mistõttu kahekordse karkassi summaarne kandevõime muutub vähe.

Lisaks sellele näeme antud graafikult, et kahe erineva arvutusmeetodiga saadud tulemused ei ole korrelatsioonis, vaatamata sisuliselt samasugustele söestumise algusaegadele (vahe 1 min). 30 min tulekahju jooksul elementide söestumist ei toimu. Sel juhul sõltub kandevõime ainult tugevuse vähenemist arvesse võtvatest suurustest. 60 min tulekahjus on kandevõimed peaaegu võrdsed ning 90 min korral on vahe enam kui 2 kordne. Seejuures Eurokoodeksi järgi sai 90 min puhul määravaks posti nõtkete seinade tasandist välja.

Kahekordne kandevõime erinevus 90 min juures on tingitud eelkõige asjaolust, et käsiraamatu järgi arvutades põleb kahekordsest karkassist täielikult maha seinade tulele avatud pool kuid tagumine karkass jääb tulele avamata. Samas Eurokoodeksi järgi söestub ka tagumise karkassi post ca 35mm ulatuses.

Graafik 7. Katuslaetala paindekandevõime

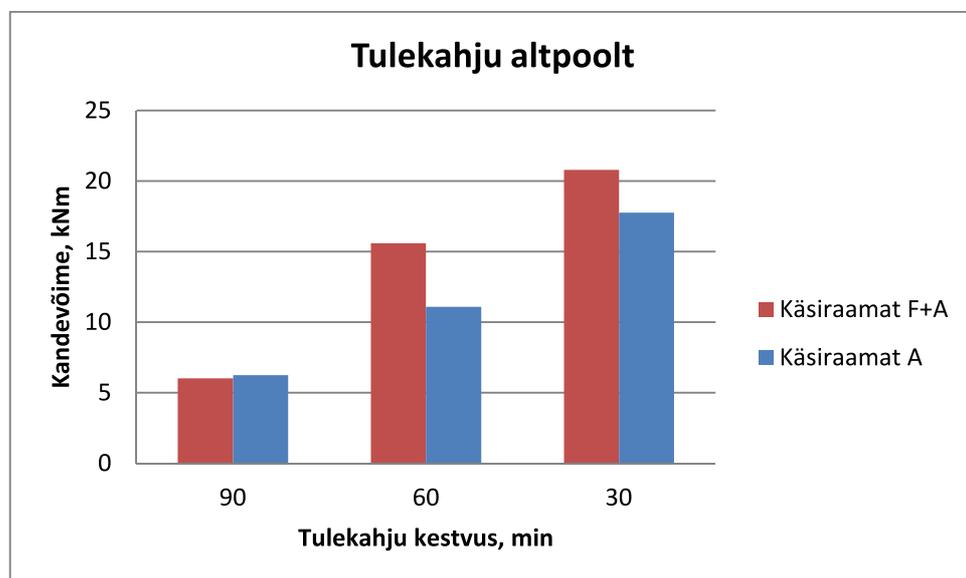


Graafikule on kantud kolme erinevat tüüpi kaitsekihtidega ning kahe erineva arvutusmeetodiga leitud tala paindekandevõimed. Kui mitte arvestada ajahetkel $t=90$ min toodud andmeid, siis keskmiselt annab Eurokoodeksi vähendatud tugevus- ja jäikusomaduste meetod 12% suurema kandevõime kui käsiraamatu järgi efektiivristlõike meetodiga arvutades. Kõiki andmeid arvestades on selleks 10%.

Tulekahju 60 min kestvusel on F+A-tüüpi kipsplaatidega kaitstud tala kandevõime erinevus A- või F-tüüpi ühekihilise kaitsega võrreldes palju suurem kui 30 või 90 minutilise tulekahju korral. See on põhjustatud eelkõige hilisemast söestumise algusajast ning kaitse- ja järelkaitsefaasi suuremast pikkusest.

Samas tekib küsimus, miks kõik tulemused 90 min tulekahjus nii sarnased on. Sellele vastamiseks on toodud alljärgnev diagramm.

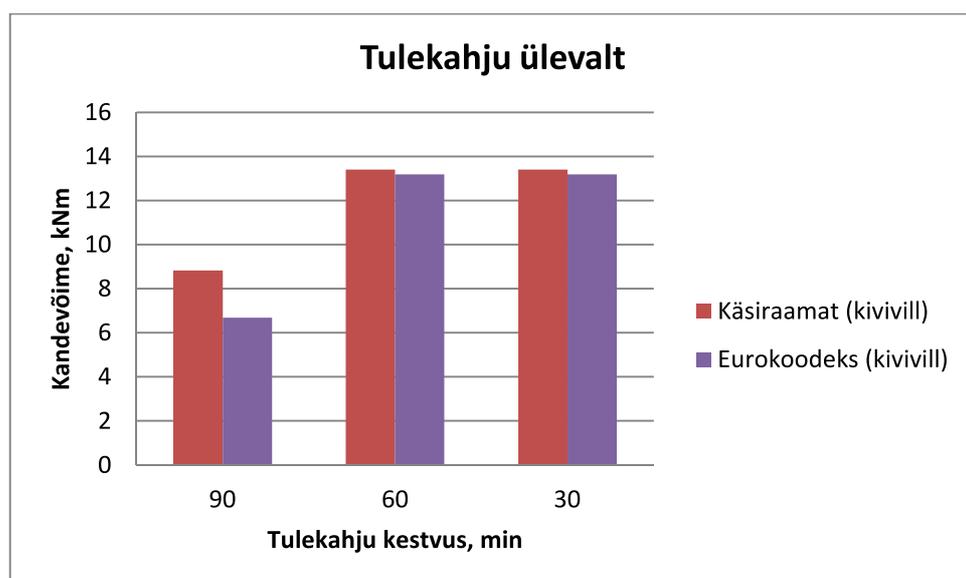
Graafik 8. Katuslaetala paindekandevõime sõltuvus kaitsekihi tõrketekkeajast



Graafikult ilmneb, et tala kandevõime 90 min tulekahjus on A-tüüpi kaitse puhul suurem kui F+A-tüüpi kaitse korral. Samas 30 ja 60 min tulekahjus on olukord vastupidine, mil suurema kandevõime tagab F+A-tüüpi kaitsekiht. Sellise nähtuse põhjuseks on nii söestumise algusaegade kui ka kaitsekihi tõrketekkeajade erinevus. Teadaolevalt sõltub söestumise kiirus järelkaitsefaasis just tõrketekkeajast. Mida hilisem on tõrketekkeae, seda suurem on söestumise kiirus järelkaitsefaasis. Seepärast on 90 min tulekahjus, F+A-tüüpi kaitse korral, söestumise kiirus järelkaitsefaasis nii suur, et see ei kompenseeri hilisemat söestumise algust ega kaitsefaasis toimuvat aeglasemat söestumist. Seetõttu on näiteks 120 min tulekahju korral F+A või ainult A-tüüpi kipsplaatidega kaitstud 60mm laiuste talade kandevõime erinevus 3-kordne (suurema kandevõime tagab A-tüüpi kipsplaadist kaitsekiht). Kuşjuures, mida väiksem on tala laius, seda suurem on kandevõime erinevus A- ja F+A-tüüpi kaitse vahel.

Samas väiksemate tulepüsivusaegade korral on söestumise järelkaitsefaas lühike või lausa olematu ning sel juhul saab määravaks söestumise algusaeg ning kaitsefaasi ajaline kestus, mille tõttu on kasulik kaitsta elemente enamate kaitsekihtidega (nt F+A-tüüpi kipsplaatidega), saavutades sel moel suurema kandevõime.

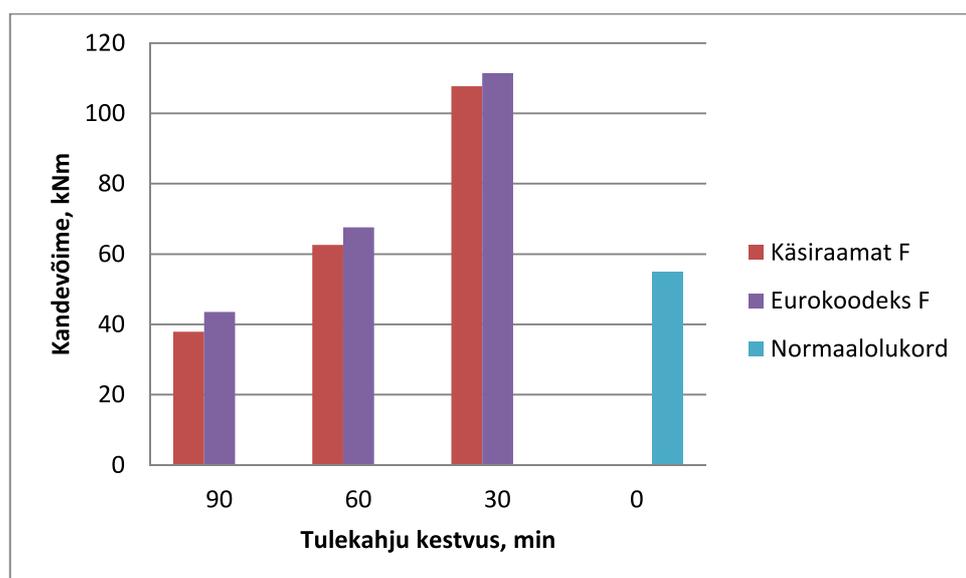
Graafik 9. Katuslaetala vastupanu põikumisele



Kuni 60 min tulekahju korral pakkus 170mm paksune kivivilla kiht mõlemal juhul piisavalt kaitset, et tala ei hakkaks söestuma. Seega tala kandevõime arvutus sõltus ainult vähenenud tugevusomaduste arvesse võtmises. Efektiivristlõike meetodi korral määrati nulltugevusega kihi paksus ning vähendatud tugevus- ja jäikusomaduste meetodi puhul tuli ekstrapoleerida talale kõrgusega $h=320\text{mm}$ tugevuse modifikatsioonitegur. Teostatud arvutused näitavad, et kandevõimete erinevus on marginaalne. Siiski usaldusväärsema tulemuse annab efektiivristlõike meetod kuna see ei hõlma ühegi suuruse ekstrapoleerimist.

Kandevõimete vahe 90 min tulekahju puhul on tõenäoliselt tingitud tala söestumise algusaegade erinevusest (Eurokoodeksi järgi algab söestumine ca 9 min varem).

Graafik 10. Korterite vahelisi jäikusseinu toetav tala



Võrreldud on kolmest küljest tulele avatud tala kandevõimet. Käsiraamatu järgi efektiivristlõike meetodiga arvutatud kandevõime on mõnevõrra väiksem kui Eurokoodeksis toodud vähendatud tugevus- ja jäikusomaduste meetodi puhul. Põhiline erinevus kahe meetodi vahel on söestumise algusaegades, jääkristlõike suuruses ning selle tugevusomadustes. Seega selgelt domineerivat faktorit kandevõime erinevuste põhjendamiseks ei ole.

Graafik 11. Korterite vahelisi jäikusseinu toetava tala kandevõime sõltuvus söestumise algusajast

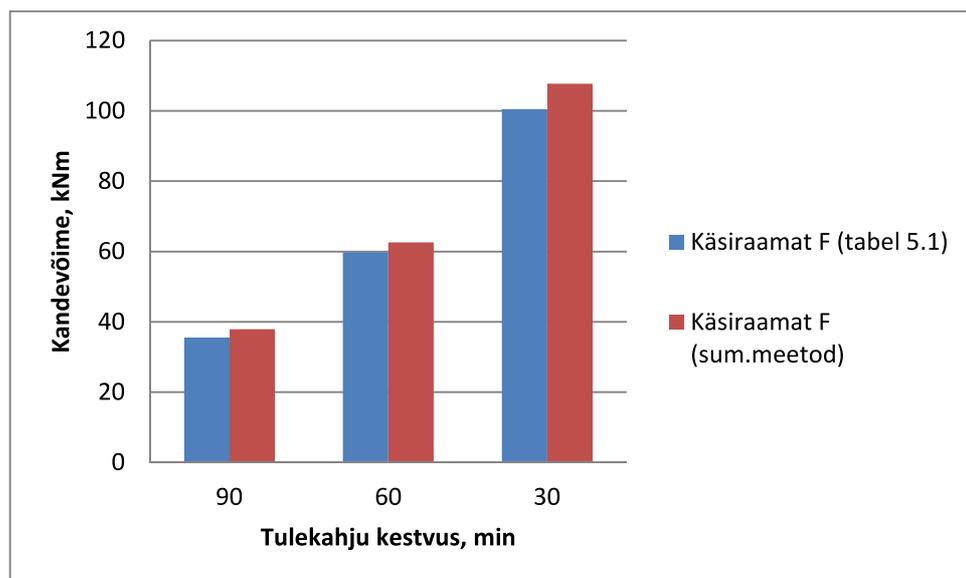


Diagramm illustreerib kandevõimete erinevust kui tala söestumise algusaeg on arvutatud käsiraamatu tabeli 5.1 alusel või kasutades kaitsekihtide summeerimismeetodit.

Tulemused on küllaltki ligilähedased. Seejuures kauem kestva tulekahju korral kandevoime erinevus väheneb.

Kui konstruktionielement kuulub tarindisse, mis omab eraldusfunktsiooni, siis söestumise algusaja leidmiseks oleks mõistlik kasutada tuletõkestusvoime arvutuses saadud kaitseaegade summat. Samas üksikute talade või postide söestumise algusaja saab hõlpsamini arvutada käsiraamatu tabeli 5.1 põhjal.

NB! Käsiraamatu tabeli 5.1 koostamisel on lähtutud kõige konservatiivsematest tulekatse andmetest. Ehk selle tabeliga leitud suurusi peaks rahuldama enamike tootjate pakutavad kipsplaadid.

6 Järeldused

6.1 Hoone projekteerimine tulekahju olukorras

Hoone projekteerimisel tuleks arvestada, et pikemate tulepüsivusaegade juures (nt 90 min tulekahjus) pole otstarbekas konstrueerida ühekordse karkassiga kandvaid seinu, mille ristlõike kõrgus on $< 170\text{mm}$, sest sel juhul söestub kogu või enamik ristlõikest. Loomulikult sõltub söestumise ulatus kaitsekihi efektiivsusest, kuid selle asemel, et lisada täiendav kiht kipsplaati, on töö- ja ajakulu arvestades mõistlikum suurendada karkassielementide ristlõike kõrgust. Suuremate ristlõigete korral võib lühikest aega kaitset pakkuv kiht osutada isegi efektiivsemaks. Seda eriti kauem kestvates tulekahjudes (alates 90 min), kus söestumissügavuse määrab suuresti söestumise kiirus järelkaitsefaasis (vt ka Graafik 8 lk 57).

Normaalolukorras saab puitkarkass elementhoonel seinapostide dimensioneerimisel määravaks alumise vöö muljumine. Samas tulekahju olukorras muljumist ei arvestata, mistõttu sõltub kandevõime nõtkumisest. Tulekahjus on märkimisväärne oht, et ebapiisava kaitsekihi tõttu põleb ära konstruktsiooni tulele avatud küljel asuv jäigastusplaat ning posti nõtkumine seinatasele ei ole takistatud. Seepärast tuleb nõtkekandevõime tagamiseks kasutada ka jäigastusplaate põhikarkassi tulele mitteavatud küljel või postide vahelisi rõhttugesid.

Efektiivsel tulekaitsekihil toimub termiline lagunemine palju hiljem kui algab tema taga oleva puitelemendi söestumine. Seega plaadi pakutava kaitse maksimaalseks ära kasutamiseks on oluline tagada, et kinnitusvahendite purunemine ebapiisava süvistussügavuse tõttu ei saaks määravaks. Seetõttu võib tulekahju tingimustes vaja minna pikemaid kinnitusvahendeid kui normaalolukorras. Kinniti pikkusest sõltub aga tema läbimõõt ning sellest omakorda minimaalsed ääre- ja vahekaugused. Seda arvesse võttes võib tulekahju olukorras tekkida vajadus karkassielementide ristlõike laiuse suurendamiseks.

6.2 Kandevõime sõltuvus valitud arvutusmeetodist

Ühekordse karkassiga täielikult kivivillaga täidetud tühemikega seinapostide nõtkekandevõime erinevus 30 ja 60 min tulekahju korral on Eurokoodeksi lisa C ning käsiraamatu meetodi vahel 2%. Seejuures suurema kandevõime annab vähendatud tugevus- ja jäikusomaduste meetod (Eurokoodeksi lisa C). Konstruktsioonielementidel,

mille ristlõike kõrgus $h = 245\text{mm}$ oli kandevõime erinevus keskmiselt 7%. Samas väiksemate ristlõike kõrguste korral vahe vähenes ning $h = 170\text{mm}$ juures oli see ainult 3% (efektiivristlõike meetodi kasuks). Seega sisuliselt on arvutuslik nõtkekandevõime mõlema meetodi puhul sama suur.

90 min tulekahjus on keskmine erinevus 2 kordne (vähendatud tugevus- ja jäikusomaduste meetodi kasuks). Seejuures ei ole arvestatud tulemusi, kus efektiivristlõike meetodi kohaselt on arvutuslik jääkristlõige negatiivne, mille tõttu on ka arvutuslik kandevõime 0.

Vahe- ja katuslaetade, mille vahelised tühemikud olid täielikult või osaliselt tule poolisel küljel kivivillaga isoleeritud, paindekandevõime erinevus 30 ja 60 min tulekahjus Eurokoodeksi lisa C ning käsiraamatu meetodi vahel on 12%. Suurema kandevõime annab vähendatud tugevus- ja jäikusomaduste meetod. Samas 90 min tulekahjus on vahe 2% efektiivristlõike meetodi kasuks. Kuna laetade suur ristlõike kõrgus nõudis ka tugevuse modifikatsioonitegurite ekstrapoleerimist võib 12% kandevõimete erinevus just sellest tingitud olla. Ühtlasi ilmneb, et kahe meetodi vaheline erinevus on seda suurem, mida suurem on elementide ristlõike kõrgus, millele tugevuse modifikatsioonitegureid ekstrapoleerida. Seega tuleks $h > 220\text{ mm}$ ristlõike kõrgusega elementide kandevõime arvutamisel kasutada käsiraamatus toodud efektiivristlõike meetodit.

Samas on oluline täheldada, et efektiivristlõike meetodi kasutamisel on kauem kestvate tulekahjude korral oht arvutuslikult negatiivse või väga väikese jääkristlõike tekkeks kuna elemendi tugevus- ja jäikusomadusi vähendatakse nulltugevusega kihi võrra. Seega võib arvutuslik kandevõime olla kas väga väike või lausa olematu. Sellistel juhtudel on tõenäolisem, et reaalsema kandevõime annab vähendatud tugevus- ja jäikusomaduste meetod. Samas kehtivad Eurokoodeksi arvutusmeetodid kuni 60 min standardtulekahju tingimustes ning ei ole selle piiri ületamisel enam usaldusväärsed.

6.3 Tulepüsivuskriteeriumide kehtestamine

Antud töös nõuti hoonete kandekonstruktsioonide vastavust R90-le ning tuletõkkeseksioone eraldavatelt konstruktsioonidelt EI90-le. EI kriteeriumi idee seisneb tule tõkestamises, et ühel pool tarindit tekkinud tulekahju ei leviks teistesse tuletõkkeseksioonidesse. Seega konkreetsel juhul peab tule levik olema takistatud 90 min jooksul. Siinkohal on oluline rõhutada, et EI peaks alati vastama või ületama konstruktsiooni kandevõimest lähtuvat tulepüsivusaega (R kriteeriumi), sest kandepiiriseisundi puhul diferentseeritakse, kas vaadeldakse konstruktsioone ühelt või

kahelt poolt tulele avatuna. Seega tarinditel, kus nõutav tuletõkestusvõime on ajaliselt lühem kui kandevõime, tuleks hinnata kandepiirseisundit tulele kahelt küljelt avatud reeglite alusel. Samas hetkel olemasolevad arvutusmeetodid võimaldavad arvutada tulele kahelt poolt avatud konstruktsioone ainult juhul kui tegu on ühekordse karkassiga, mille postide ristlõike kõrgus $h = 145\text{mm}$.

Vaadeldes välisseina vastupanu välisele tulekahjule ilmnes, et R90 kriteeriumi täitmine on tavaliste ehituslahenduste korral sisuliselt võimatu, sest 1-kihiline tuuletõkkekipsplaat või veelgi enam min.villast tuuletõkkeplaat ei paku piisavat kaitset. Antud töös oleks reaalne saavutada kuni 60 min tulepüsivusaeg. Selliste olukordadega peaks tulepüsivuskriteeriumide kehtestamisel arvestama, eriti seetõttu, et tegu on väliskeskkonnaga ning standardtulekahju mudeli järgne tulepüsivuse kontroll on tõenäoliselt liialt konservatiivne.

6.4 Tähelepanekuid arvutusmeetodite kohta

6.4.1 Käsiraamat

Tuletõkestusvõime arvutus

Põhilised muudatused võrreldes Eurokoodeksiga

- arvutust saab teostada piiramatu arvu materjalikihtidega puitkonstruktsioonidele, mille moodustavad kips- või puidupõhised plaadid ning karkassielementide vahel mineraalvillaga täidetud või täitmata tühemikud
- arvutusmeetodile ei ole kehtestatud 60 min piiri
- arvutusmudel hõlmab kaasaegsemaid materjale (nt. ristkihtpuit)
- meetod võimaldab arvutada suvalises järjestuses paiknevate materjalikihtidega tarindeid

Piirangud

Arvestada ei saa min. villast isolatsiooniga kui ta on tarindi tulele mitteavatud küljel viimane kiht (nt. pööningu vahelaed, kus soojustusele ei järgne ühtegi kihti), st isolatsioonikihi arvutuslik tulepüsivusaeg on sel juhul 0.

Kandevõime arvutus

Põhilised muudatused võrreldes Eurokoodeksiga

- saab määrata F-tüüpi kipsplaate sisaldavate kaitsekihtide tõrketekkeagea

- kaitsekihi tõrketekkeaja määramisel tehakse vahet kas tegu on lae- või seinakonstruktsiooniga
- kaitstava elemendi söestumise algusaja saab leida lähtudes tuletõkestusvõime arvutuses määratud kattekihtide kaitseaegade summast
- tuletatud on meetodid riskihtpuidu, I-talade ning klaasvillaga täidetud tühemikega karkasskonstruktsioonide söestumise arvutamiseks
- posti nõtkepikkus seina tasandist välja $L_{ef} = \mu L = 0,7 * L$, kus L – seina kõrgus koos alumise ja ülemise vööga
- ristlõiketegur k_s sõltub ristlõike alglaaiusest ja söestumissügavusest ning selle määramiseks on valemid (Eurokoodeksis on selleks tabelid vastavalt ristlõike alglaiausele)
- ebakorrapärase jääkristlõike täisnurkseks teisendamise tegur $k_n = 1,25$ kui $b > 60\text{mm}$
- konstruktsioonide vähendatud tugevus- ja jäikusomadusi arvestatakse efektiivristlõikemeetodi alusel nulltugevust omava kihina

Piirangud

- puuduvad andmed tõrketekkeaja kohta lagedes, kus kaitsekihi moodustab 2xA-tüüpi kipsplaat
- kaitsetegurit k_2 saab arvutada ainult F- või F+A-tüüpi kattekihiga kaitstud elementidele (põhineb täielikult Eurokoodeksil)
- puudub arvutusmudel osaliselt min.villaga isoleeritud elementide söestumise arvutamiseks kui tulekahju saab alguse tühemiku poolt
- täielikult min. villaga soojustatud karkasskonstruktsioonides arvestatakse efektiivristlõike meetodi korral tugevus- ja jäikusomaduste vähenemist nulltugevust omava kihina, mis sõltub ainult elemendi algristlõike kõrgusest. Seega tuleb vähendada ka selliste elementide efektiivse jääkristlõike suurust, mis jäid tulele avamata (nt. kahekordse karkassiga konstruktsioonides tulele avamata poole karkassipostid).

6.4.2 Eurokoodeks

Tuletõkestusvõime arvutuse piirangud

- meetod kehtib kuni 60 min standardtulekahju korral
- puitlaastplaadi normtihedus $\geq 600 \text{ kg/m}^3$ (antud töös kasutati OSB/3-plaati, mille normtihedus BS EN 12369-1:2001 järgi on 550 kg/m^3)

- puudub meetod vahelagede tuletõkestusvõime arvutamiseks kui vooderdis koosneb vähemalt kahest kihist
- puudub meetod seinte tuletõkestusvõime arvutamiseks kui vooderdis koosneb enam kui kahest kihist või sisaldab F-tüüpi kipsplaati

Kandevõime arvutuse piirangud

- F+A-tüüpi kipsplaatidest kaitse korral puuduvad juhised söestumise algusaja arvutamiseks
- F-tüüpi kipsplaatide või kipskuivkrohvplaatide tõrketekkeajad tuleb määrata katsetega
- lisa C kehtib kuni 60 min standardtulekahju korral
- lisa C järgi saab arvutada isolatsioonitegurit k_2 ainult F- või F+A-tüüpi kattekihiga kaitstud elementidele
- lisa C ei sätesta elementide söestumise algusaega kui kipsplaatidest vooderdis koosneb mitmest kihist
- puudub arvutusmudel osaliselt min.villaga täidetud konstruktsioonide arvutamiseks kui tulekahju saab alguse tühimiku poolt

Kokkuvõte

Antud töös käsitleti puitkonstruktsioonide tulepüsivust. Täpsemalt vaadeldi Eurokoodeks 5 Osa 1-2 ning käsiraamatus „Tuleohutud puitmajad 3“ toodud arvutusmeetodeid hoone tulepüsivuse projekteerimiseks. Töö üheks eesmärgiks oli uurida vähendatud tugevus- ja jäikusomaduste ning efektiivristlõike meetodi vahelist erinevust. Selleks teostati 5-korruselise puitkarkasshoone tüüpkonstruktsioonide tulepüsivusarvutused. Arvutustest lähtuvalt koostati kandevõimete tabelid ja graafikud, mida kasutati tulemuste analüüsimiseks. Igale koostatud graafikule järgnes detailne analüüs. Üldisem hinnang saadud tulemustele anti ptk-s 6.2 „Kandevõime sõltuvus valitud arvutusmeetodist“. Põhimõttelised erinevused Eurokoodeksis kasutatava vähendatud tugevus- ja jäikusomaduste meetodi ning käsiraamatus kasutatud efektiivristlõike meetodi vahel on toodud ptk-s 6.4 „Tähelepanekuid arvutusmeetodite kohta“. Soovitusi puitkarkasshoone projekteerimiseks leiab ptk-st 6.1 „Hoone projekteerimine tulekahju olukorras“. Seega on töö alguses sõnastatud ülesanded täidetud.

Lõputöö mahus teostatud kandevõime arvutuste põhjal ei ilmnenud, et üks meetod annaks teisega võrreldes alati paremaid tulemusi. Pigem on vahed väikesed ning sõltuvad nii söestumissügavuse arvutamisel kui ka ristlõike vähenenud tugevusomaduste arvesse võtmisel vajalikest teguritest. Samas tuletõkestusvõime arvutuse osas on käsiraamat palju konkreetsem ja mitmekülgsem kui Eurokoodeks. Ühtlasi tuleb mainida, et käsiraamatus toodud arvutusjuhised on paremini kommenteeritud ning seetõttu ka kergemini mõistetavad.

Üldiselt võib öelda, et käsiraamat „Tuleohutud puitmajad 3“ on Eurokoodeksiga võrreldes oluline edasimineku. Lahendused on toodud F-tüüpi kipsplaatide tõrketekkeaja määramiseks, täiustatud on tuletõkestusvõime arvutust. Lisaks kirjeldatakse ristkihtpuidu, puidust I-talade ja klaasvillaga isoleeritud konstruktsioonide söestumist. See kõik loob väga head võimalused puitkonstruktsioonide tulepüsivuse projekteerimiseks ning läbi selle puidu, kui ehitusmaterjali, laiemaks kasutamiseks. Lisaks arvutusjuhistele on käsiraamatus toodud mitmeid konstruktiivseid võtteid tule leviku takistamiseks.

Vaatamata sellele, et puithoonete tuleohutuse valdkonnas on tehtud suuri edusamme, tuleks antud suunal tööd jätkata. Üks olulisemaid küsimusi on siiani F-tüüpi kipsplaatide tuletehnoloogiliste omaduste määramine. Seni, mil ehitusmaterjalide tootjad ei ole kohustatud tegema vastavaid kaitseid, tuleb kipsplaatide tõrketekkeaja määramisel kasutada

käsiraamatus toodud konservatiivseid väärtusi, mille tõttu on konstruktsioonid üledimensioneeritud.

Lisaks kipsplaatide tuletehnilistele omadustele vajaks täiendavat uurimist:

- nulltugevusega kihi paksuse sõltuvus isotermidest
- osaliselt min.villaga isoleeritud elementide söestumine kui tulekahju saab alguse tühemiku poolt
- enamate materjalide tuletehnilised omadused (nt suurema kui 50 kg/m^3 tihedusega min.villad)
- konstruktsioonide projekteerimine välisele tulekahjule.

Lõputöö kokkuvõtteks arvab autor, et Eurokoodeksi järgne tulepüsivuse projekteerimine on mõneti ajale jalgu jäänud ning kaasaegsem käsiraamat loob palju mitmekesisemaid võimalusi ja eeldusi puithoonete tuleohutuse tõendamiseks. Kindlasti tuleb täiendada ka sealseid arvutusmeetodeid, kuid enamike puitkarkasshoonete tüüpkonstruktsioonide arvutamiseks on juhised piisavad, mida antud lõputöös ka tõestati.

Summary

The aim of this work was to study fire safety in wooden buildings. Therefore fire resistance calculations were made to a typical multi-story timber frame house by using two different methods: one presented in Eurocode 5 part 1-2 and the other in handbook „Fire Safe Wooden Buildings 3“. To analyse the results, graphs and tables were used. Finally, main differences between the calculation methods were presented and some guidelines were given to design the fire safety of a timber frame structure.

The numerical differences between the results are given in chapter 6.2. In short, for mechanical resistance neither of the methods should be preferred in favour of the other, because results were almost the same. However, if the initial cross-section height of a structural member $h > 220\text{mm}$, then handbook ought to be used in order to avoid extrapolation of the residual cross-sections strength parameters. For structures' separating function, guidelines in handbook are much more diverse and clearly explained, therefore easier to follow and should be preferred.

The variation in calculation principles between Eurocode and handbook are presented in chapter 6.4. Some of the most important differences are in: strength reduction of a structural member, fire exposure time limitations and failure times of type F gypsum boards.

In general, handbook „Fire Safe Wooden Buildings 3“ is a big improvement compared to Eurocode 5 part 1-2. There is new material, which creates a good foundation for the fire design of a timber structure. In addition to calculation guidances, some principles are also described to prevent fire spread in buildings generally.

Significant steps have been made in the field of fire safety of timber buildings, nevertheless, research has to be continued. Additional studies should be carried out in the following: failure times of type F gypsum boards; zero strength layer's thickness depending on isotherms; charring of a structural member in partially insulated assembly when fire starts from the cavity side; structural fire design against external fire scenarios etc.

In conclusion, the author of this thesis would like to say that Eurocode is a little outdated. More contemporary handbook creates various options and premises to prove the fire safety of a timber structure. Although the instructions in handbook are sufficient in most cases, it could be improved.

Kasutatud allikad

- [1] EN 1990:2002 Eurokoodeks. Ehituskonstruksioonide projekteerimise alused
- [2] EN 1991-1-3:2003 Eurokoodeks 1: Ehituskonstruksioonide koormused. Osa 1-3: Üldkoormused. Lumekoormus
- [3] EN 1991-1-4:2005 Eurokoodeks 1: Ehituskonstruksioonide koormused. Osa 1-4: Üldkoormused. Tuulekoormus
- [4] Norra normdokument lumekoormuse määramiseks: „Snølast på tak. Dimensjonerende laster. *Byggforsk, Byggforskserien*, 471.041 (1) – 2003“
- [5] Norra normdokument tuulekoormuse määramiseks: „Vindlaster på bygninger. *Byggforsk, Byggforskserien*, 471.043 (1) – 2003“
- [6] „Ehituskonstrukturi käsiraamat“. Koormused. *Ehitame*: Tallinn, 2012
- [7] EVS-EN 1995-1-1:2007 Eurokoodeks 5: Puitkonstruksioonide projekteerimine. Osa 1-1: Üldist. Üldreeglid ja reeglid hoonete projekteerimiseks
- [8] EVS-EN 1995-1-2:2006 Eurokoodeks 5: Puitkonstruksioonide projekteerimine. Osa 1-2: Üldist. Tulepüsivusarvutus
- [9] EVS-EN 1995-1-2:2005/AC:2009 Eurokoodeks 5: Puitkonstruksioonide projekteerimine. Osa 1-2: Üldreeglid. Tulepüsivusarvutus
- [10] Käsiraamat „Tuleohutud puitmajad 3“. *ET INFOkeskuse AS*: Tallinn, 2014
- [11] Fire Safety in Timber Buildings. Technical guideline for Europe. *SP Trätek, SP Report 2010:19* (5,6)
- [12] BS EN 12369-1:2001 Wood-based panels - Characteristic values for structural design
- [13] Glasroc GHS 9 Storm tuuletõkkekipsplaadi omakaal. <http://www.gyproc.ee/tooted/43/plaadid/3187/glasroc-ghs-9-storm-tuulet%C3%B5kkeplaat> (14.05.2014)
- [14] Gyproc Protect F tuuletõkkekipsplaadi omakaal. <http://www.gyproc.ee/tooted/43/plaadid/3126/gyproc-protect-f-tuulet%C3%B5kkeplaat> (14.05.2014)
- [15] Norgips Standard kipsplaadi omakaal. <http://www.norgips.lv/ee/platestandard.php> (14.05.2014)
- [16] Norgips Floor kipsplaadi omakaal. <http://www.norgips.lv/ee/platestandard.php> (14.05.2014)

- [17] Isover toodete koondtabel. Tuuletõkkeplaadi Isover VKL omadused.
<http://www.isover.ee/Download/27111/ISOVER%20toodete%20koondtabel%20%2003-2014.pdf> (14.05.2014)
- [18] Kivivilla Rockwool Superrock omadused.
<http://www.rockwool.ee/tooted+ja+lahendused/u/6034/ehitusisolatsioon/superrock>
(14.05.2014)
- [19] Hunton Silencio 36 helisummutusplaadi omadused. Tehniline heakskiit Nr. 2330, *SINTEF Byggforsk*, (2007)
- [20] Aitsam, V. *Maaleht* – Lauri Kivil: Koju jääb iga kümnes uus puitmaja [WWW]
<http://maaleht.delfi.ee/news/mets/metsuudised/lauri-kivil-koju-jaab-iga-kumnes-uus-puitmaja.d?id=67698709> (15.05.2014)
- [21] *ärileht.ee* - Eesti on suurim puitmajade eksportöör Euroopa Liidus [WWW]
<http://arileht.delfi.ee/news/uudised/eesti-on-suurim-puitmajade-eksportoor-euroopa-liidus.d?id=68637543> (15.05.2014)

Lisa A Koormused, skeemid ja tulemid

Kõik normatiivsed ja arvutuslikud koormused on leitud vastavalt Eurokoodeksitele. Seejuures on lume- ja tuulekoormuse arvutamisel rakendatud Norra rahvulikke norme.

A.1 Koormuskombinatsioonid

Alaline arvutusolukord

Kandepiirseisund ULS

ULS1: $1,35\text{oma}+1,5\text{lumi}+1,5*(0,7\text{kasus}+0,6\text{tuul})$

ULS2: $1,35\text{oma}+1,5\text{kasus}+1,5*(0,7\text{lumi}+0,6\text{tuul})$

ULS3: $1,35\text{oma}+1,5\text{tuul}+1,5*(0,7\text{kasus}+0,7\text{lumi})$

Kasutuspiirseisund SLS

SLS1: $1,0\text{oma}+0,5\text{lumi}+0,3\text{kasus}$

SLS2: $1,0\text{oma}+0,5\text{kasus}+0,2\text{lumi}$

SLS3: $1,0\text{oma}+0,2\text{tuul}+(0,3\text{kasus}+0,2\text{lumi})$

Erakorraline arvutusolukord

Kandepiirseisund FIRE

FIRE1: $1,0\text{oma}+0,2\text{lumi}+0,3\text{kasus}$

FIRE2: $1,0\text{oma}+0,3\text{kasus}+0,2\text{lumi}$

FIRE3: $1,0\text{oma}+0,2\text{tuul}+(0,3\text{kasus}+0,2\text{lumi})$

Koormuskombinatsioonid on koostatud vastavalt Norra normidele, kus alaliskoormuse osavarutegur $\gamma_G = 1,35$ ning lumekoormuse kombinatsioonitegurid $\psi_0 = 0,7$; $\psi_1 = 0,5$; $\psi_2 = 0,2$. Tuulekoormust on vaadeldud eraldi suundades 0° ja 180° ning 90° . Kasutuspiirseisundis on arvestatud tavakombinatsiooniga. Kui erakorralises arvutusolukorras domineerib tuulekoormus on kombinatsioonitegurina kasutatud $\psi_1 = 0,2$; ülejäänud juhtudel kasutatakse tegurit ψ_2 .

A.2 Normatiivsed koormused

A.2.1 Lumekoormus

Lumekoormus maapinnal

$$s_{k,0} = 4 \text{ kN/m}^2$$

Hoone asukoha kõrgus merepinnast, mille ületamisel tuleb rakendada täiendavat lumekoormust:

$$H_g = 150 \text{ m}$$

$$\Delta s_k = 1 \text{ kN/m}^2$$

Antud objekt asub madalamal kui piirmäär H_g , seega täiendavat lumekoormust ei rakendata.

Katuse lumekoormuse kujutegur

$$\mu_1 = 0,8$$

Avatustegur

$$C_e = 1$$

Lumekoormus katusel

$$\begin{aligned} s &= 3,2 \text{ kN/m}^2 &= \mu_1 C_e s_{k,0} \\ & &= 0,8 * 1 * 4 \end{aligned}$$

Lume kuhjumine katuse külgnemisel hoone kõrgema osaga

$$h_1 = 2,1 \text{ m} \qquad b_{1,1} = 5,5 \text{ m}$$

$$h_2 = 0,8 \text{ m} \qquad b_{1,2} = 8,3 \text{ m}$$

$$h_3 = 30,5 \text{ m} \qquad b_{1,3} = 11,4 \text{ m}$$

Arvutuslik lume puistetihedus

$$\gamma = 2 \text{ kN/m}^3$$

Kujutegurid

$$\mu_{w,1} = 1,31 \qquad \mu_{2,1} = 1,31$$

$$\mu_{w,2} = 1,31 \qquad \mu_{2,2} = 1,31$$

$$\mu_{w,3} = 0,80 \qquad \mu_{2,3} = 0,80$$

Hange pikkused

$$l_{s,1} = 5 \text{ m}$$

$$l_{s,2} = 5 \text{ m}$$

$$l_{s,3} = 5 \text{ m}$$

Lumekoormus madalamal katuse osal kuhjumisest

$$s_{1,2} = 5,25 \text{ kN/m}^2$$

$$s_3 = 3,2 \text{ kN/m}^2$$

Lume kuhjumine parapeti äärde

$$h = 0,5 \text{ m}$$

$$b_1 = 13,5 \text{ m}$$

$$l_s = 2,5 \text{ m}$$

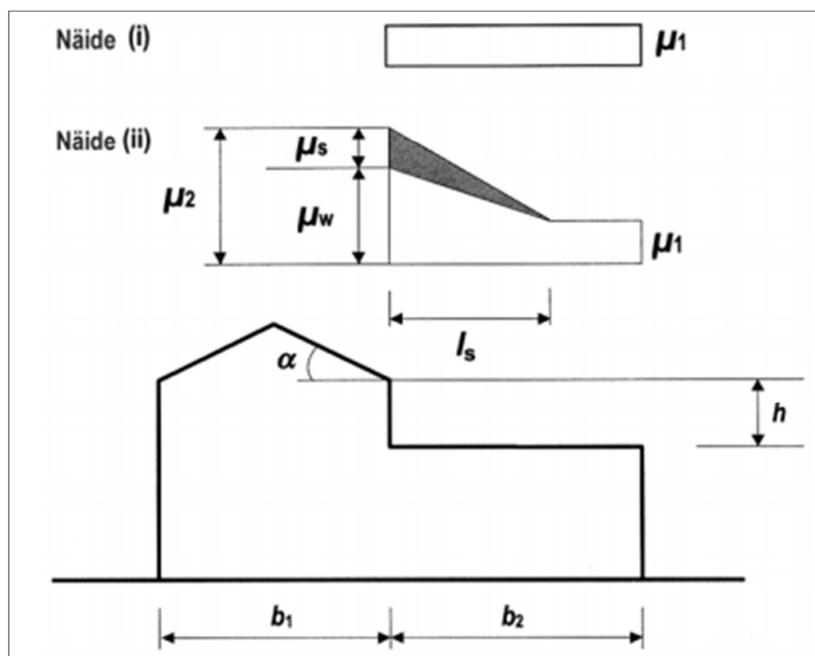
$$\mu_1 = 0,8$$

Lumekoormus parapeti ääres

$$s = 3,2 \text{ kN/m}^2$$

Lume kuhjumist seletavad skeemid ja valemid:

Joonis 1. Lume kuhjumine tuulest ja libisemisest

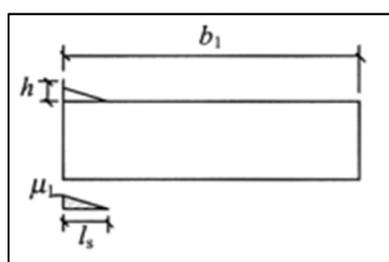


Libisemist tingitud kujutegur $\mu_s = 0$, sest kõrgemal konstruktsiooniosal on lamekatus.

Hange pikkus $l_s = 2h$, kuid $5\text{m} \leq l_s \leq 15\text{m}$.

$$\mu_w = (b_1 + b_2)/2 h \leq \gamma h/s_k$$

Joonis 2. Kuhjumine parapeti taha



Hange pikkus $l_s = \min(5h; b_1; 15\text{m})$

$$\mu_1 = \min(2h/s_k; 2b/l_s; 8) > 0,8$$

A.2.2 Kasuskoormus

Eluruumid ja trepikojad

$$q_k = 2 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_k = 2 \text{ kN}$$

$$q_{k1} = 1,7 \text{ kN/m}^2 = \alpha_n q_k = 0,85 * 2$$

Korruste arvust tulenev koormuse vähendustegur (rakendatakse seinte arvutustes, kus kasuskoormus on domineeriv muutuvkoormus)

$$\alpha_n = 0,85 = (2 + [n - 2]\psi_0) / n = (2 + [4 - 2] * 0,7) / 4$$

Vaadeldavast konstruktsioonist kõrgemal olevate korruste arv

$$n = 4$$

$$\psi_0 = 0,7$$

II korruse seinapostide kontrollimisel $n=3$; $\alpha_n = 0,9$ ja ülemiste korruste vahelagede normatiivne kasuskoormus $q_{k1} = 1,8 \text{ kN/m}^2$.

A.2.3 Omakaalu koormus

Omakaalu koormused erinevad olenevalt arvutusolukorrast. Ehk normaalolukorra järgne konstruktsioonide dimensioneerimine võeti aluseks tulekahju olukorra esialgsel tugevuskontrollil ning vastavalt vajadusele muudeti valitud lahendusi. Seejuures muudatused puudutavad ainult katuslage ning kandvaid siseseinu. Muudetud koormustega normaalolukorda uuesti läbi ei arvatatud.

Materjalide massid

| | | |
|------------------------|---------------------|---------------------|
| 500 kg/m ³ | saepuit, liimpuit | |
| 680 kg/m ³ | OSB/3-plaat | |
| 700 kg/m ³ | puitlaastplaat | |
| 120 kg/m ³ | tuuletõkkeplaat | Isover VKL |
| 250 kg/m ³ | helisummutusplaat | Hunton Silencio |
| 38 kg/m ³ | kivivill | Rockwool Superrock |
| 9 kg/m ² | tuuletõkkekipsplaat | Glasroc GHS 9 Storm |
| 9,1 kg/m ² | standardkipsplaat | Norgips Standard |
| 12,7 kg/m ² | tuletõkkekipsplaat | Gyproc Protect F |
| 14 kg/m ² | põrandakipsplaat | Norgips Floor |
| 10 kg/m ² | SBS 1 kiht | |

Normaalolukorras

Välissein (45x245mm karkass)

| | | |
|-------|-------------------------|---------------------------|
| | 0,105 kN/m ² | vert. laudis 21mm |
| | 0,016 kN/m ² | hor. roov 28x70mm s.600 |
| | 0,008 kN/m ² | vert. roov 20x45mm s.600 |
| | | tuuletõkkekangas |
| | 0,090 kN/m ² | tuuletõkkekipsplaat 9,5mm |
| | 0,092 kN/m ² | postid 45x245mm s.600 |
| | 0,095 kN/m ² | kivivill 250mm |
| | 0,082 kN/m ² | OSB/3-plaat 12mm |
| | | aurutõkkekile |
| | 0,017 kN/m ² | lisakarkass 45x45mm s.600 |
| | 0,019 kN/m ² | kivivill 50mm |
| | 0,091 kN/m ² | standardkipsplaat 12,5mm |
| | 0,127 kN/m ² | tuletõkkekipsplaat 15,5mm |
| KOKKU | 0,74 kN/m ² | 410 mm |

Kandev sisesein 3.-5.korras (45x170mm karkass)

| | | |
|-------|-------------------------|---------------------------|
| | 0,127 kN/m ² | tuletõkkekipsplaat 15,5mm |
| | 0,082 kN/m ² | OSB/3-plaat 12mm |
| | 0,064 kN/m ² | postid 45x170mm s.600 |
| | 0,067 kN/m ² | kivivill 175mm |
| | 0,017 kN/m ² | lisakarkass 45x45mm s.600 |
| | 0,082 kN/m ² | OSB/3-plaat 12mm |
| | 0,127 kN/m ² | tuletõkkekipsplaat 15,5mm |
| KOKKU | 0,56 kN/m ² | 270 mm |

Kandev sisesein 2.korras (45x195mm karkass)

| | | |
|-------|-------------------------|---------------------------|
| | 0,127 kN/m ² | tuletõkkekipsplaat 15,5mm |
| | 0,082 kN/m ² | OSB/3-plaat 12mm |
| | 0,110 kN/m ² | postid 45x195mm s.400 |
| | 0,067 kN/m ² | kivivill 175mm |
| | 0,017 kN/m ² | lisakarkass 45x45mm s.600 |
| | 0,082 kN/m ² | OSB/3-plaat 12mm |
| | 0,127 kN/m ² | tuletõkkekipsplaat 15,5mm |
| KOKKU | 0,61 kN/m ² | 295 mm |

Kandev sisesein 1.korras (45x245mm karkass)

| | | |
|--|-------------------------|---------------------------|
| | 0,127 kN/m ² | tuletõkkekipsplaat 15,5mm |
| | 0,082 kN/m ² | OSB/3-plaat 12mm |
| | 0,138 kN/m ² | postid 45x245mm s.400 |
| | 0,067 kN/m ² | kivivill 175mm |
| | 0,017 kN/m ² | lisakarkass 45x45mm s.400 |

| | | |
|-------|-------------------------|---------------------------|
| | 0,082 kN/m ² | OSB/3-plaat 12mm |
| | 0,127 kN/m ² | tuletõkkekipsplaat 15,5mm |
| KOKKU | 0,64 kN/m ² | 345 mm |

Korterite vaheline sein (2x45x120mm karkass)

| | | |
|-------|-------------------------|---------------------------|
| | 0,127 kN/m ² | tuletõkkekipsplaat 15,5mm |
| | 0,082 kN/m ² | OSB/3-plaat 12mm |
| | 0,017 kN/m ² | lisakarkass 45x45mm s.600 |
| | 0,048 kN/m ² | kivivill 125mm |
| | 0,045 kN/m ² | postid 45x120mm s.600 |
| | 0,082 kN/m ² | OSB/3-plaat 12mm |
| | | õhuvahe 30mm |
| | 0,082 kN/m ² | OSB/3-plaat 12mm |
| | 0,045 kN/m ² | postid 45x120mm s.600 |
| | 0,048 kN/m ² | kivivill 125mm |
| | 0,017 kN/m ² | lisakarkass 45x45mm s.600 |
| | 0,082 kN/m ² | OSB/3-plaat 12mm |
| | 0,127 kN/m ² | tuletõkkekipsplaat 15,5mm |
| KOKKU | 0,80 kN/m ² | 469 mm |

Katuslagi (60x320mm liimpuittalad)

| | | |
|-------|-------------------------|------------------------------|
| | 0,200 kN/m ² | SBS 2x |
| | 0,154 kN/m ² | puitlaastplaat 22mm |
| | 0,045 kN/m ² | kaldroov 45x120mm s.600 |
| | 0,017 kN/m ² | tuulutusroov 45x45mm s.600 |
| | 0,016 kN/m ² | tuuletõkkeplaat 13mm |
| | 0,064 kN/m ² | põiktalad 45x170mm s.600 |
| | 0,067 kN/m ² | kivivill 175mm |
| | 0,160 kN/m ² | liimpuittalad 60x320mm s.600 |
| | 0,124 kN/m ² | kivivill 325mm |
| | | aurutõkkekile |
| | 0,025 kN/m ² | roov 28x70mm s.400 |
| | 0,091 kN/m ² | standardkipsplaat 12,5mm |
| | 0,127 kN/m ² | tuletõkkekipsplaat 15,5mm |
| KOKKU | 1,09 kN/m ² | 762 mm |

Vahelagi (100x280mm liimpuittalad)

| | | |
|--|-------------------------|-------------------------------|
| | 0,100 kN/m ² | põrandakate 15mm |
| | 0,140 kN/m ² | põrandakipsplaat 12,5mm |
| | 0,090 kN/m ² | helisummutusplaat 36mm |
| | 0,147 kN/m ² | puitlaastplaat 21mm |
| | 0,233 kN/m ² | liimpuittalad 100x280mm s.600 |
| | 0,057 kN/m ² | kivivill 150mm |
| | 0,018 kN/m ² | ripplae roov 30x48mm s.400 |

| | | |
|-------|-------------------------|---------------------------|
| | 0,091 kN/m ² | standardkipsplaat 12,5mm |
| | 0,127 kN/m ² | tuletökkekipsplaat 15,5mm |
| KOKKU | 1,00 kN/m ² | 443 mm |

Tulekahju olukorras

Välissein (45x245mm karkass)

| | | |
|-------|-------------------------|---------------------------|
| | 0,105 kN/m ² | vert. laudis 21mm |
| | 0,016 kN/m ² | hor. roov 28x70mm s.600 |
| | 0,008 kN/m ² | vert. roov 20x45mm s.600 |
| | | tuuletökkekangas |
| | 0,090 kN/m ² | tuuletökkekipsplaat 9,5mm |
| | 0,092 kN/m ² | postid 45x245mm s.600 |
| | 0,095 kN/m ² | kivivill 250mm |
| | 0,082 kN/m ² | OSB/3-plaat 12mm |
| | | aurutökketile |
| | 0,017 kN/m ² | lisakarkass 45x45mm s.600 |
| | 0,019 kN/m ² | kivivill 50mm |
| | 0,091 kN/m ² | standardkipsplaat 12,5mm |
| | 0,127 kN/m ² | tuletökkekipsplaat 15,5mm |
| KOKKU | 0,74 kN/m ² | 410 mm |

Kandev sisesein 3.-5.korrus (45x170mm karkass)

| | | |
|-------|-------------------------|---------------------------|
| | 0,127 kN/m ² | tuletökkekipsplaat 15,5mm |
| | 0,091 kN/m ² | standardkipsplaat 12,5mm |
| | 0,082 kN/m ² | OSB/3-plaat 12mm |
| | 0,064 kN/m ² | postid 45x170mm s.600 |
| | 0,067 kN/m ² | kivivill 175mm |
| | 0,017 kN/m ² | lisakarkass 45x45mm s.600 |
| | 0,082 kN/m ² | OSB/3-plaat 12mm |
| | 0,091 kN/m ² | standardkipsplaat 12,5mm |
| | 0,127 kN/m ² | tuletökkekipsplaat 15,5mm |
| KOKKU | 0,75 kN/m ² | 295 mm |

Kandev sisesein 2.korrus (45x195mm karkass)

| | | |
|--|-------------------------|---------------------------|
| | 0,127 kN/m ² | tuletökkekipsplaat 15,5mm |
| | 0,091 kN/m ² | standardkipsplaat 12,5mm |
| | 0,082 kN/m ² | OSB/3-plaat 12mm |
| | 0,110 kN/m ² | postid 45x195mm s.400 |
| | 0,076 kN/m ² | kivivill 200mm |
| | 0,025 kN/m ² | lisakarkass 45x45mm s.400 |
| | 0,082 kN/m ² | OSB/3-plaat 12mm |
| | 0,091 kN/m ² | standardkipsplaat 12,5mm |
| | 0,127 kN/m ² | tuletökkekipsplaat 15,5mm |

| | | |
|-------|------------------------|--------|
| KOKKU | 0,81 kN/m ² | 320 mm |
|-------|------------------------|--------|

Kandev sisesein 1.korrus (45x245mm karkass)

| | | |
|-------|-------------------------|---------------------------|
| | 0,127 kN/m ² | tuletõkkekipsplaat 15,5mm |
| | 0,091 kN/m ² | standardkipsplaat 12,5mm |
| | 0,082 kN/m ² | OSB/3-plaat 12mm |
| | 0,138 kN/m ² | postid 45x245mm s.400 |
| | 0,095 kN/m ² | kivivill 250mm |
| | 0,025 kN/m ² | lisakarkass 45x45mm s.400 |
| | 0,082 kN/m ² | OSB/3-plaat 12mm |
| | 0,091 kN/m ² | standardkipsplaat 12,5mm |
| | 0,127 kN/m ² | tuletõkkekipsplaat 15,5mm |
| KOKKU | 0,86 kN/m ² | 370 mm |

Korterite vaheline sein (2x45x120mm karkass)

| | | |
|-------|-------------------------|---------------------------|
| | 0,127 kN/m ² | tuletõkkekipsplaat 15,5mm |
| | 0,082 kN/m ² | OSB/3-plaat 12mm |
| | 0,017 kN/m ² | lisakarkass 45x45mm s.600 |
| | 0,048 kN/m ² | kivivill 125mm |
| | 0,045 kN/m ² | postid 45x120mm s.600 |
| | 0,082 kN/m ² | OSB/3-plaat 12mm |
| | | õhuvahe 30mm |
| | 0,082 kN/m ² | OSB/3-plaat 12mm |
| | 0,045 kN/m ² | postid 45x120mm s.600 |
| | 0,048 kN/m ² | kivivill 125mm |
| | 0,017 kN/m ² | lisakarkass 45x45mm s.600 |
| | 0,082 kN/m ² | OSB/3-plaat 12mm |
| | 0,127 kN/m ² | tuletõkkekipsplaat 15,5mm |
| KOKKU | 0,80 kN/m ² | 469 mm |

Katuslagi (60x320mm liimpuittalad)

| | | |
|-------|-------------------------|------------------------------|
| | 0,200 kN/m ² | SBS 2x |
| | 0,154 kN/m ² | puitlaastplaat 22mm |
| | 0,045 kN/m ² | kaldroov 45x120mm s.600 |
| | 0,017 kN/m ² | tuulutusroov 45x45mm s.600 |
| | 0,016 kN/m ² | tuuletõkkeplaat 13mm |
| | 0,064 kN/m ² | põiktalad 45x170mm s.600 |
| | 0,067 kN/m ² | kivivill 175mm |
| | 0,160 kN/m ² | liimpuittalad 60x320mm s.600 |
| | 0,124 kN/m ² | kivivill 325mm |
| | | aurutõkkekile |
| | 0,025 kN/m ² | roov 28x70mm s.400 |
| | 0,091 kN/m ² | standardkipsplaat 12,5mm |
| KOKKU | 0,96 kN/m ² | 747 mm |

Vahelagi (100x280mm liimpuittalad)

| | | |
|-------|------------------------------|-------------------------------|
| | 0,100 kN/m ² | põrandakate 15mm |
| | 0,140 kN/m ² | põrandakipsplaat 12,5mm |
| | 0,090 kN/m ² | helisummutusplaat 36mm |
| | 0,147 kN/m ² | puitlaastplaat 21mm |
| | 0,233 kN/m ² | liimpuittalad 100x280mm s.600 |
| | 0,057 kN/m ² | kivivill 150mm |
| | 0,018 kN/m ² | ripplae roov 30x48mm s.400 |
| | 0,091 kN/m ² | standardkipsplaat 12,5mm |
| | 0,127 kN/m ² | tuletõkkekipsplaat 15,5mm |
| KOKKU | <hr/> 1,00 kN/m ² | 443 mm |

A.2.4 Tuulekoormus

| | | |
|----------------|------------------------|---------------------------|
| $z =$ | 16 m | arvutuskõrgus |
| | 0 | maastikutüüp |
| $c_{dir} =$ | 1 | suunategur |
| $c_{season} =$ | 1 | aastaajategur |
| $c_0 =$ | 1 | pinnavormitegur |
| $c_r =$ | 1,3 | karedustegur |
| $v_b =$ | 30 m/s | tuule baaskiirus |
| $v_{b,0} =$ | 30 m/s | tuule põhiline baaskiirus |
| $v_m =$ | 40,2 m/s | keskmise tuulekiirus |
| $z_0 =$ | 0,003 m | karedusmõõt |
| $z_{min} =$ | 2 m | |
| $k_r =$ | 0,16 | |
| $I_v =$ | 0,12 | turbulentsi intensiivsus |
| $k_I =$ | 1 | |
| $\rho =$ | 1,25 kg/m ³ | õhu tihedus |
| $q_p =$ | 1831 N/m ² | tippkiirusrõhk |

Hoone välispindadele mõjuv tuulerõhk

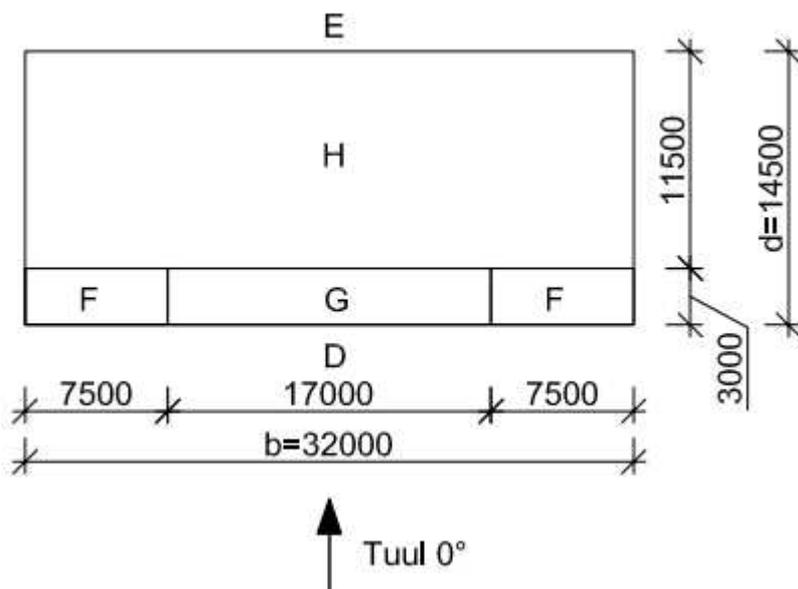
Tuule suund 0° ja 180°

| Tsoon | $c_{pe,10}$ | w_e , kPa |
|-------|-------------|-------------|
| A | -1,2 | -2,20 |
| B | -0,8 | -1,47 |
| D | 0,8 | 1,47 |
| E | -0,5 | -0,92 |
| F | -1,6 | -2,93 |
| G | -1,1 | -2,01 |
| H | -0,7 | -1,28 |

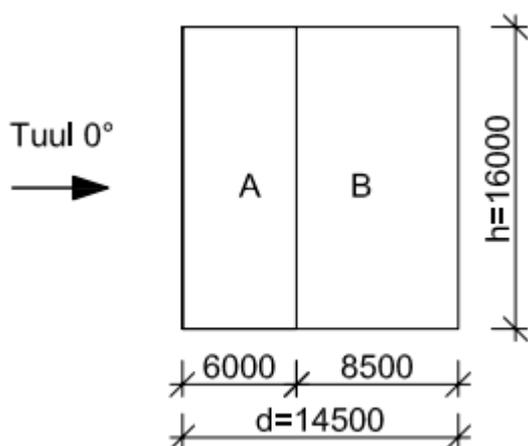
Tuule suund 90°

| Tsoon | $c_{pe,10}$ | w_e , kPa |
|-------|-------------|-------------|
| A | -1,2 | -2,20 |
| B | -0,8 | -1,47 |
| C | -0,5 | -0,92 |
| D | 0,75 | 1,37 |
| F | -1,6 | -2,93 |
| G | -1,1 | -2,01 |
| H | -0,7 | -1,28 |
| I | -0,2 | -0,37 |
| | 0,2 | 0,37 |

Katuse ja külgsainte tuuletsoonide skeem



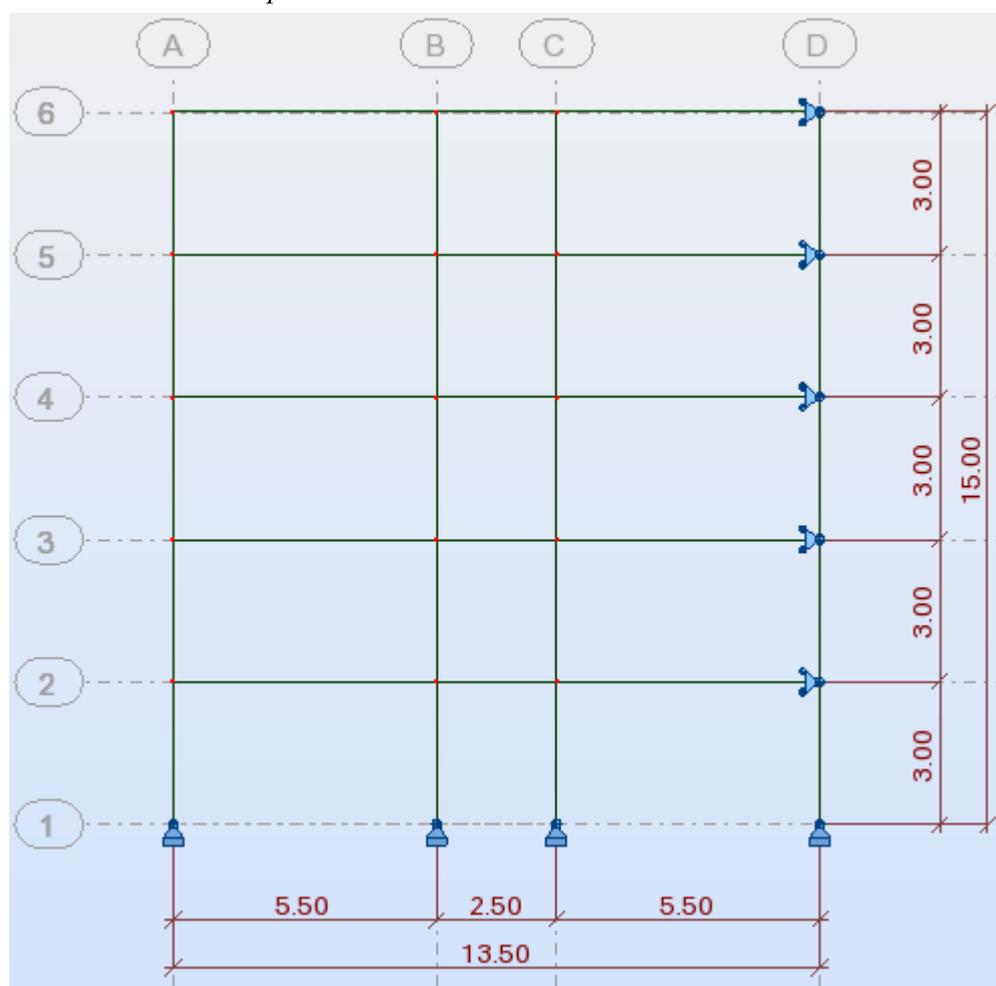
Otsaseina tuuletsoonide skeem



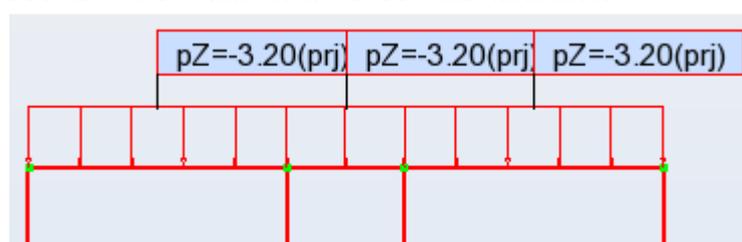
A.3 Koormusskeemid

Hoone konstruktsioonide dimensioneerimiseks on sisejõudude leidmiseks koostatud kaks põiklõiget. Üks neist maksimaalse lumekoormuse kohalt (so trepiahallist 0,5m kauguselt) ning teine hoone keskelt (nõ tüüplõige). Antud töö raames on esitatud ainult hoone tüüplõike kohta teostatud arvutused (sh ka töö põhiosas sisalduvad tulepüsivusarvutused). Samuti ei vaadelda käesolevas töös jäikusseinte tugevusarvutusi.

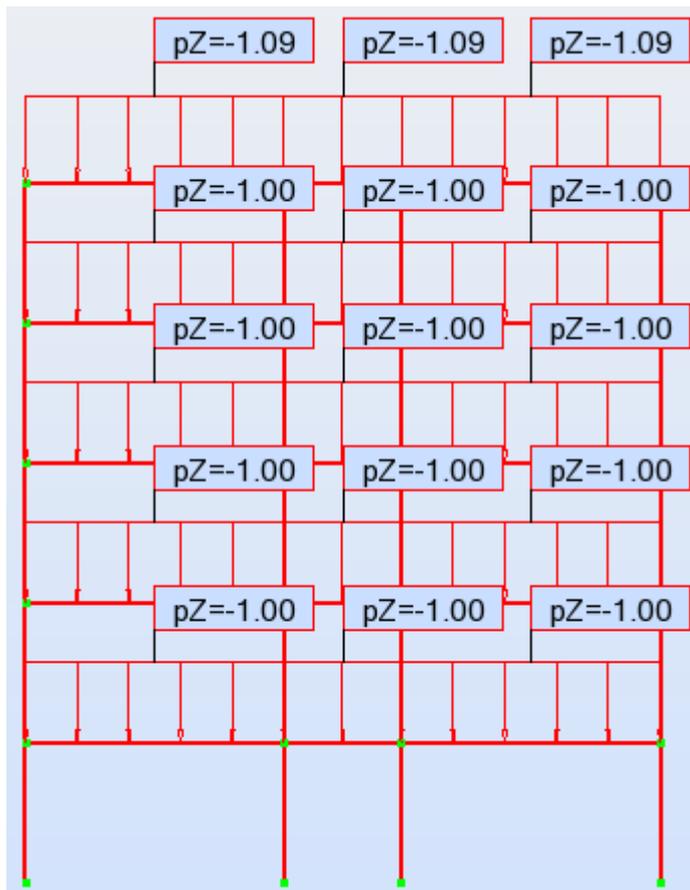
Joonis 3. Hoone tüüplõike konstruktiivne skeem



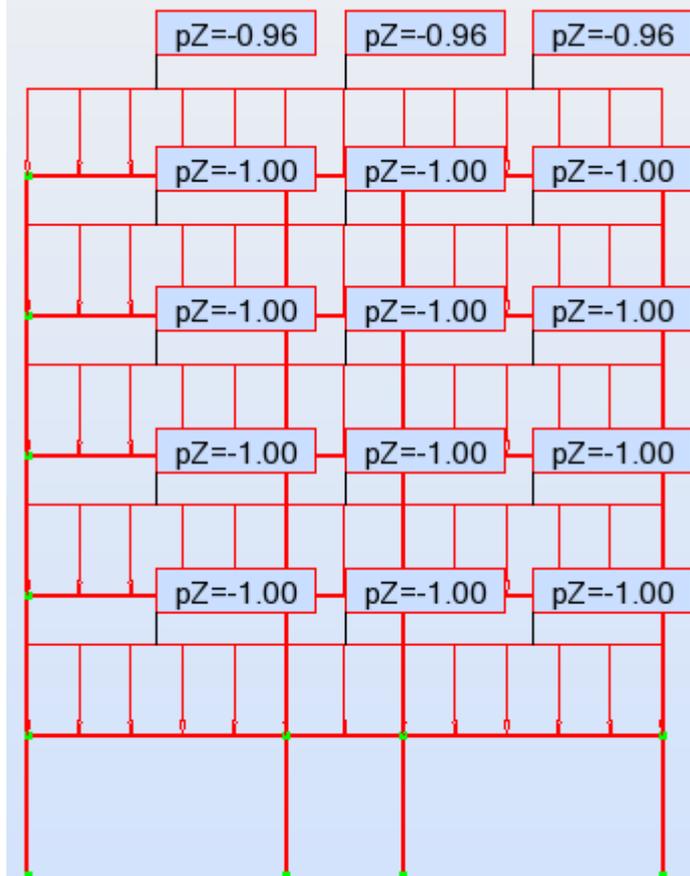
Joonis 4. Normatiivne lumekoormus katuslaele



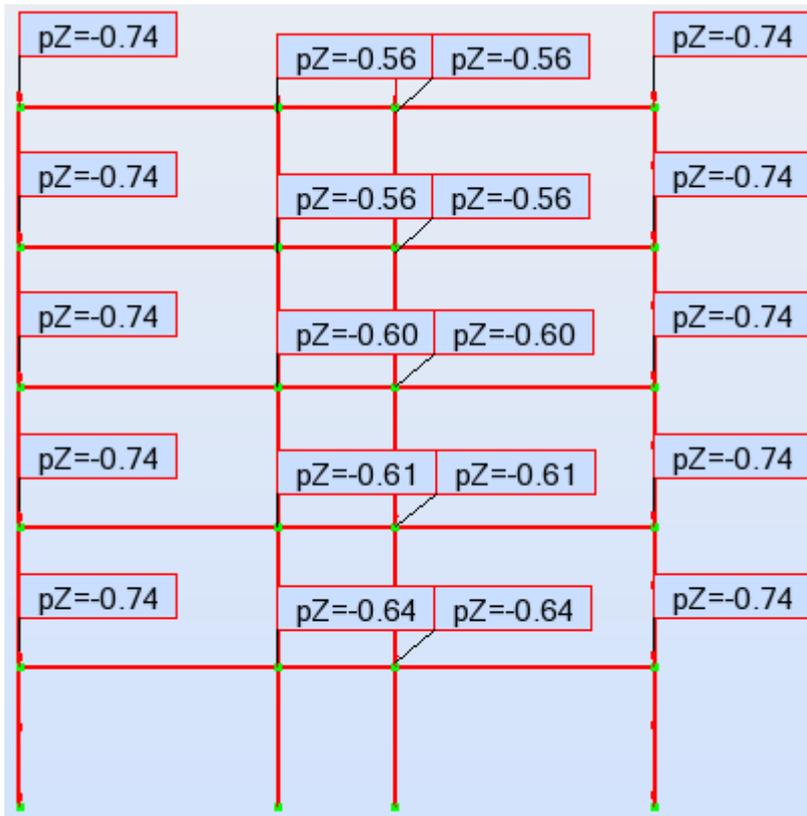
Joonis 5. Normatiivne katuslae ja vahelae omakaalu koormus (normaalolukorras)



Joonis 6. Normatiivne katuslae ja vahelae omakaalu koormus (tulekahju olukorras)



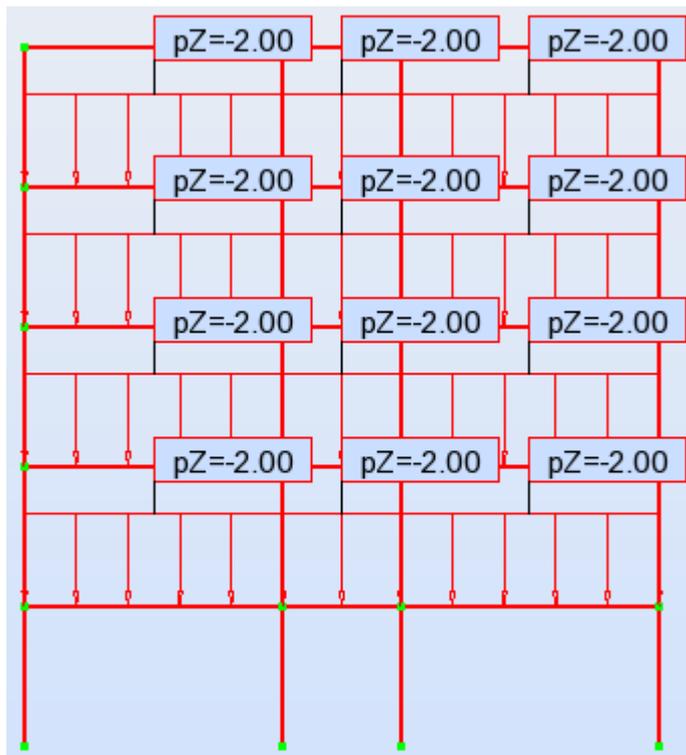
Joonis 7. Normatiivne seinte omakaalu koormus (normaalolukorras)



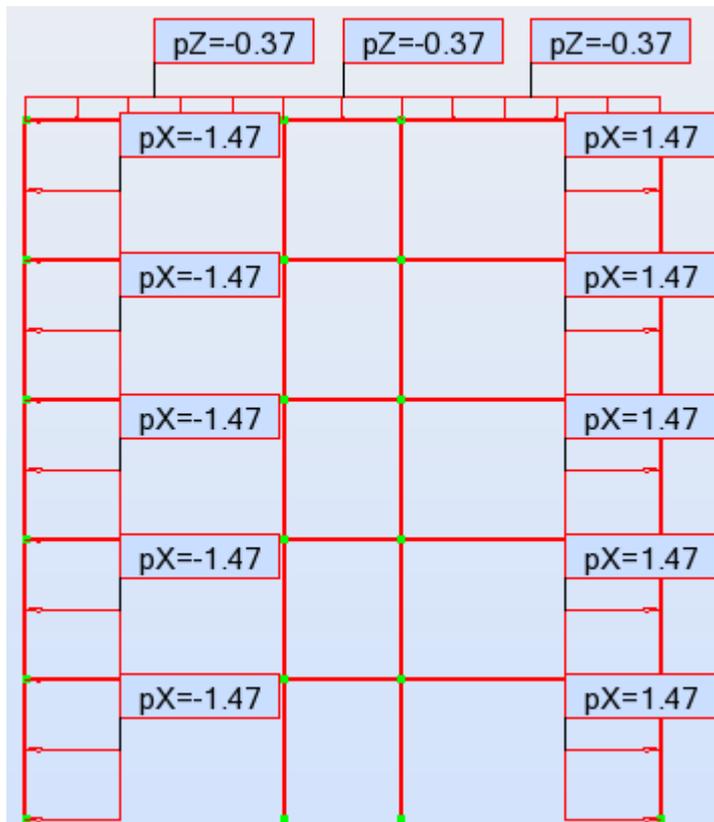
Joonis 8. Normatiivne seinte omakaalu koormus (tulekahju olukorras)



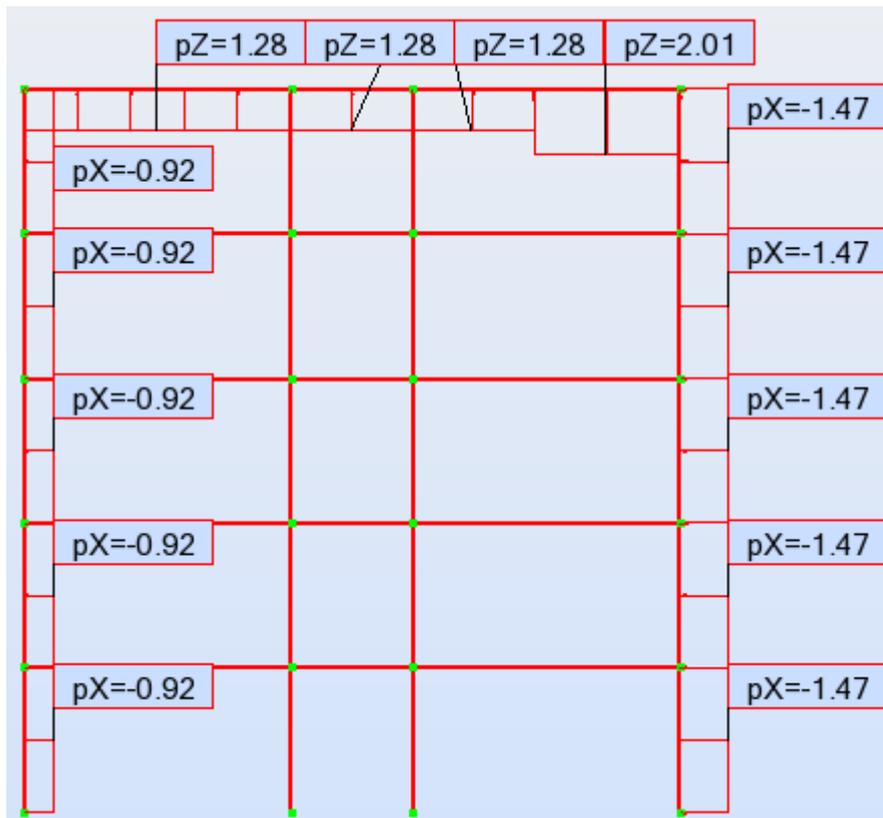
Joonis 9. Normatiivne kasuskoormus



Joonis 10. Normatiivne tuulekoormus (tuul suunas 90°)



Joonis 11. Normatiivne tuulekoormus (tuul suunas 0°)



A.4 Arvutuslikud koormustulemid

Tabel 10. Konstruksiooniosade koormustulemid normaalolukorras

| Konstruktsioon | N | M_y | V_z | Koormuskombi- natsioon | Tuule suund |
|-------------------------------|-------|-------|-------|---------------------------|----------------|
| | kN/m | kNm/m | kN/m | | |
| katuslagi | -1,98 | 25,0 | 18,2 | ULS 1 | 90° |
| vahelagi | -2,48 | 16,5 | 12,0 | ULS 2 | |
| 5. korruse välissein | 21,0 | 1,49 | 1,98 | ULS 1 | |
| 4. korruse välissein | 33,5 | 1,49 | 1,98 | ULS 1 | |
| 3. korruse välissein | 47,0 | 1,49 | 1,98 | ULS 2 | |
| 2. korruse välissein | 59,5 | 1,49 | 1,98 | ULS 2 | |
| 1. korruse välissein | 72,1 | 1,49 | 1,98 | ULS 2 | |
| 5. korruse kandev sisesein | 28,5 | - | - | ULS 1 | |
| 4. korruse kandev sisesein | 44,5 | - | - | ULS 1 | |
| 3. korruse kandev sisesein | 62,2 | - | - | ULS 2 | |
| 2. korruse kandev sisesein | 78,5 | - | - | ULS 2 | |
| 1. korruse kandev sisesein | 95,0 | - | - | ULS 2 | |

| Konstruktsioon | N | M _y | V _z | Koormus- kombinatsioon | Tuule suund |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------|----------------|----------------|---------------------------|----------------|
| | kN/m | kNm/m | kN/m | | |
| 2. korruse korterite vaheline sein | 6,48 | - | - | | |
| 1. korruse korterite vaheline sein | 8,10 | - | - | | |
| 1. korruse mittekandev välissein | 15,0 | 3,71 | 4,95 | ULS 3 | 0° |
| Korterite vahelisi seinu toetav tala ^a | - | 51,0 | 37,1 | | |
| ^a paindemomendi M _y ühikuks on kNm ning põikjõud V _z on kN-tes | | | | | |

Tabel 11. Konstruktsiooniosade koormustulemid tulekahju olukorras

| Konstruktsioon | N | M _y | Koormus- kombinatsioon | Tuule suund |
|----------------------------------------------------------|-------|----------------|---------------------------|----------------|
| | kN/m | kNm/m | | |
| katuslagi | -0,44 | 6,33 | FIRE 3 | 90° |
| vahelagi | -0,88 | 6,05 | | |
| 1. korruse välissein | 33,3 | 0,33 | | |
| 5. korruse kandev sisesein | 8,95 | - | | |
| 4. korruse kandev sisesein | 17,6 | - | | |
| 3. korruse kandev sisesein | 26,4 | - | | |
| 2. korruse kandev sisesein | 35,2 | - | | |
| 1. korruse kandev sisesein | 44,2 | - | | |
| 2. korruse korterite vaheline sein | 4,80 | - | | |
| 1. korruse korterite vaheline sein | 6,00 | - | | |
| 1. korruse mittekandev välissein | 11,1 | 0,50 | FIRE 3 | 0° |
| Korterite vahelisi seinu toetav tala ^a | - | 37,8 | | |
| ^a paindemomendi M _y ühikuks on kNm | | | | |

Konstruktsioonidele, millele ei ole määratud domineerivat koormuskombinatsiooni ja tuule suunda, mõjub ainult omakaalu koormus. See kehtib ka Tabel 10 kohta.

A.5 Konstruksioonide dimensioneerimistabelid

Tabel 12. Normaalolukorda rahuldavate kandvate elementide (talade ja postide) mõõtmed ning tugevusnäitajad

| Konstruktsioon | b | h | s | Tugevus klass | Kandevõime kasutusaste | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-------|-----|---------------|------------------------|-----|
| | mm | mm | mm | | | |
| katuslagi | 60 | 320 | 600 | GL24c | 96% | |
| vahelagi ^a | 100 | 280 | | GL24c | 50% | |
| 5. korruse välissein | 45 | 245 | 600 | C24 | 30% | |
| 4. korruse välissein | | | | | 47% | |
| 3. korruse välissein | | | | | 67% | |
| 2. korruse välissein | | | | | 84% | |
| 1. korruse välissein | | | | | 102% | |
| 5. korruse kandev sisesein | 45 | 170 | 600 | | 58% | |
| 4. korruse kandev sisesein | | 91% | | | | |
| 3. korruse kandev sisesein | | 170 | 400 | | 85% | |
| 2. korruse kandev sisesein | | 195 | | | 93% | |
| 1. korruse kandev sisesein | | 245 | | | 90% | |
| 2. korruse korterite vaheline sein | 45 | 2x120 | 600 | | 31% | |
| 1. korruse korterite vaheline sein | | | | | 39% | |
| 1. korruse mittekandev välissein | 45 | 245 | 600 | | 36% | |
| Korterite vahelisi seinu toetav tala ^b | 220 | 360 | - | | GL24h | 93% |
| ^a määravaks sai vibratsioonide kontroll ^b määravaks sai läbivajumine postide kandevõime kasutusaste määrab muljumine sein alumises vöös | | | | | | |

Konstruksioonides, kus sai määravaks ULS 1 ja ULS 2: $k_{\text{mod}} = 0,8$ (omakaalule töötavatel konstruktsioonidel $k_{\text{mod}} = 0,6$). Kui määravaks sai ULS 3: $k_{\text{mod}} = 0,9$
Materjalide osavarutegurid: $\gamma_M = 1,3$ – saepuidule; $\gamma_M = 1,25$ – liimpuidule.

Tulekahju olukorras ei pea tugevuskontrollil arvestama muljumise ning täisristlõike korral ka nihkejõududega.[8] Seega taladel saab määravaks paindekandevõime ning postidel nõtkekandevõime.

Tabel 13. Tulekahjus R90 kriteeriumi rahuldavate kandvate elementide (talade ja postide) mõõtmed ning tugevusnäitajad

| Konstruktsioon | b | h | s | Tugevus klass | Kandevõime kasutusaste | |
|--------------------------------------|-----|-----|-----|---------------|------------------------|-----|
| | mm | mm | mm | | | |
| katuslagi | 60 | 320 | 600 | GL24c | 61% | |
| vahelagi | 100 | 280 | | GL24c | 39% | |
| 1. korruse välissein | 45 | 245 | 600 | C24 | 46% | |
| 5. korruse kandev sisesein | 45 | 170 | 600 | | 58% | |
| 4. korruse kandev sisesein | | | 400 | | 76% | |
| 3. korruse kandev sisesein | | | 300 | | 85% | |
| 2. korruse kandev sisesein | | | 195 | | 400 | 50% |
| 1. korruse kandev sisesein | | | 245 | | 600 | 27% |
| 1. korruse korterite vaheline sein | | | 45 | | 2x120 | 600 |
| 1. korruse mittekandev välissein | 45 | 245 | 600 | | 23% | |
| Korterite vahelisi seinu toetav tala | 220 | 360 | - | GL24h | 100% | |

Tabelis toodud tulemused põhinevad käsiraamatu järgsetel arvutustel, kus efektiivristlõike meetodi kohaselt $k_{mod,fi} = 1$ ja $\gamma_{M,fi} = 1$ ning $k_{fi} = 1,25$ – saepuidule; $k_{fi} = 1,15$ – liimpuidule.