

Sisekaitseakadeemia

Päästekolledž

Roman Abubikirov

**KAHEKORRUSELISE PUITHOONE  
KONSTRUKTSIOONIDE VASTAVUS TP2 NÕUETELE  
KOLMEKORRUSELISEKS REKONSTRUEERIMISEL,  
TARTUS LEPIKU 14 ASUVA HOONE NÄITEL**

Lõputöö

Juhendaja:  
Alar Just, PhD

Kaasjuhendaja:  
Raido Jalas

Tallinn 2015

# SISEKAITSEAKADEEMIA LÕPUTÖÖ ANNOTATSIOON

Päästekolledž	Kaitsmine: Juuni 2015	
Töö pealkiri eesti keeles: Kahekorruselise puithoone konstruktsioonide vastavus TP2 nõuetele kolmekorruseliseks rekonstrueerimisel, Tartus Lepiku 14 asuva hoone näitel Töö pealkiri võõrkeeles: <i>Conformity of the structures of a two-storey wooden building with TP2 requirements upon its reconstruction into a three-storey building by the example of a building located at 14 Lepiku in Tartu</i> Lühikokkuvõte: Käesolev lõputöö on kirjutatud teemal „Kahekorruselise puithoone konstruktsioonide vastavus TP2 nõuetele kolmekorruseliseks rekonstrueerimisel, Tartus Lepiku 14 asuva hoone näitel.“ Töö põhiosa pikkus on 40 lehekülge ja üks lisa. Töös on kasutatud 21 allikat, millele on töös viidatud. Eesmärgiks on arvutuslikult analüüsida, kas olemasoleva kahekorruselise puithoone konstruktsioonid tagavad kolme- kuni neljakorruselise puithoone nõutava tulepüsivuse või on vajalik konstruktsioonide täiendav kaitsmine tule eest. Eesmärgi saavutamiseks on autor püstitanud järgmised uurimisülesanded: <ul style="list-style-type: none"><li>• Välja uurida kolme- kuni neljakorruseliste puithoonete tuleohutusnõuded ning nõuete täitmise hindamise võimalused.</li><li>• Olemasoleva hoone konstruktsioonide hindamine ning tulepüsivusaegade määramine arvutusmeetodite abil.</li><li>• Konstruktsioonide mittevastavuse puhul välja pakkuda võimalikud lahendusvariandid.</li></ul> Eesmärkide saavutamiseks viis autor läbi õigusaktide ja erialase kirjanduse analüüsi. Töös on välja toodud Eestis kehtivad tuleohutusnõuded puitkonstruktsioonide projekteerimisel, nende tõendamiseks arvutuslikud meetodid ja olemasoleva hoone konstruktsioonide arvutuslik analüüs.		
Võttesõnad: tuleohutus, puitkonstruktsioonid, tuleohutusnõuded, tulepüsivus, tulekindlus, süttivus. <a href="https://ems.elnet.ee/">https://ems.elnet.ee/</a>		
Võõrkeelsed võttesõnad: <i>fire-safety, timber building construction, fire-safety requirements, fire resistance, fire integrity, inflammability.</i> <a href="https://ems.elnet.ee/">https://ems.elnet.ee/</a>		
Lõputöö seos riiklike arengukavade ja prioriteetidega: Siseturvalisuse arengukava aastateks 2015-2020 2.5. Ennetustegevus ja ohutu elukeskkonna loomine		
Säilitamise koht: SKA raamatukogu		
Töö autor: Roman Abubikirov Olen koostanud lõputöö iseseisvalt. Kõik lõputöö koostamisel kasutatud teiste tööde autorite tööd, seisukohad, kirjalikest allikatest ja mujal allikates saadud info on nõuetekohaselt viidatud. Olen nõus oma lõputöö avaldamisega elektroonilises keskkonnas. Allkiri:		
Vastab lõputöö nõuetele Juhendaja: Alar Just	Allkiri:	
Vastab lõputöö nõuetele Kaasjuhendaja: Raido Jalas	Allkiri:	
Kaitsmisele lubatud Kolledži direktor: Ain Karafin		Allkiri:

# SISUKORD

SISEKAITSEAKADEEMIA LÕPUTÖÖ ANNOTATSIOON.....	2
MÕISTETE JA LÜHENDITE LOETELU.....	5
SISSEJUHATUS .....	7
1. PUITEHITISTE TULEOHUTUSNÕUDED.....	9
1.1. Ehitiste rekonstrueerimine .....	9
1.2. Ehitiste tuleohutus.....	9
1.3. Kolme- kuni neljakorruselistele puiteluhoonetele esitatavad nõuded.....	11
2. PUIDU KÄITUMINE TULEKAHJUS .....	14
2.1. Söestumise arvutamine.....	15
2.1.1. Ühemõõtmeline söestumine .....	15
2.1.2. Kahemõõtmeline söestumine.....	16
2.1.3. Kattekihtide mõju .....	18
2.2. Tuletõkestus- ja kandevõime arvutusmeetodid.....	19
2.2.1. Täiustatud meetod tuletõkestusvõime määramiseks .....	19
2.2.2. Efektiivristlõike meetod .....	21
3. HOONE KIRJELDUS JA TULEPÜSIVUSE HINDAMINE .....	23
3.1. Hoone konstruktsioonide mõõdetud tulemused.....	23
3.1.1. Hoone siseseinad .....	23
3.1.2. Hoone vahelagi.....	24

3.2. Hoone tuletõkkekonstruktsioonide tuletõkestusvõime arvutused .....	25
3.2.1. Seinä tuletõkestusvõime .....	25
3.2.2. Vahelae tuletõkestusvõime .....	26
3.3. Hoone kandekonstruktsioonide tulepüsivuse arvutused .....	30
3.3.1. Seinä jääkristlõige .....	30
3.3.2. Laetala jääkristlõige.....	31
3.3.3. Kandeõime kontroll .....	32
3.4 Järeldused ja ettepanekud.....	35
3.4.1. Järeldused .....	35
3.4.2. Ettepanekud .....	35
Kokkuvõte.....	37
SUMMARY.....	38
VIIDATUD ALLIKAD .....	39
LISA 1 3-4 KORRUSELISTE I KASUTUSVIISI TP2 HOONETE TULEOHUTUS REKONSTRUEERIMISEL JA PEALEEHITUSEL (EESTI STANDARDIKESKUS, 2008, P. 11).....	41

# MÕISTETE JA LÜHENDITE LOETELU

VV315 – Vabariigi Valitsuse määrus nr 315

KOV – Kohalik omavalitsus

ATS – Automaatne tulekahjusignalisatsioon

AKS – Automaatne tulekustutussüsteem

$d_{char,0}$  – söestumissügavus lineaarsel söestumisel

$\beta_0$  – ühemõõtmeline söestumiskiirus

$t$  – tulekahju kestvus

$d_{char,n}$  – eeldatav söestumissügavus

$\beta_n$  – tinglik söestumiskiirus riskülikulise ristlõike jaoks

$t_{ch}$  – söestumise algusaeg

$t_f$  – tõrketekkeaeg

$\sum_{i=1}^{i=n-1} t_{prot,i}$  – enne konstruktsiooni viimast kihti olevate kihtide kaitseaegade summa

$t_{ins,n}$  – konstruktsiooni viimase kihi isolatsiooniaeg

$t_{prot,0,i}$  – kihi  $i$  kaitseaja baasväärtus

$t_{ins,0,n}$  – konstruktsiooni viimase kihi isolatsiooniaja baasväärtus tulele mitteavatud poolel

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

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

$\Delta t_i / \Delta t_n$  – lisakaitseaeg, F-tüüpi kipsplaadi või kipskiudplaadiga kaitstud kihtide puhul

$k_{j,i} / k_{j,n}$  – liitetegurid

$d_{ef}$  – efektiivne söestumissügavus

$k_0$  – tegur, mis sõltub tulekahju kestvusest

$d_0$  – kihi sügavus eeldusel, et tugevus ja jäikus on null

## SISSEJUHATUS

Umbes kaks kolmandikku (62 %) Eestis olevatest hoonetest on puithooned, millest valdav enamus (96 %) on eluhooned (Jalas, 2015, pp. 5-10). Peamiselt on nende hoonete puhul tegemist kuni kahekorruseliste puidust kortermajadega. Paljud sellised hooned asuvad linnade sellistes piirkondades, kuhu inimesed soovivad endale kodu luua (nt Kalamaja ja Kadriorg Tallinnas ning Kesklinn, Supilinn, Karlova Tartus). Teisalt ei ole võimalik sellistes piirkondades ehitada uut hoonet, krundid on juba tihedalt täis ehitatud. Seetõttu on parimaks lahenduseks ehitada välja pööningualune ruum või ehitada olemasolevale hoonele lisa korrus(ed). Lisaks teostatakse selliste juurdeehituste puhul kogu hoone kapitaalremont ja rekonstrueerimine. Sellise ehitustegevuse käigus tuleb hoone viia vastavusse kehtivate ehituslike tuleohutusnõuetega. Ehituslikud tuleohutusnõuded sätestavad, et puidust eluhoone, mis kuulub TP3 tuleohutusklassi, tohib olla kuni kahekorruseline. Juhul kui puidust eluhoonet soovitakse ehitada kolme kuni neljakorruseliseks, peab hoone vastama TP2 tuleohutusklassi nõuetele.

2014 aasta hoonete tulekahjude statistikast selgub, et umbes kolmandik (33 %) kasutusel olevate hoonete tulekahjudest leidis aset hoonetes, mille kandekonstruktsioon oli tehtud puidust. Sellest väga suur osa (88 %) leidis aset I kasutusviisiga ehk eluhoonetes. Suur osa (58 %) puithoonete tulekahjudest levis mitmesse ruumi ja keskmiselt hävis ühes puithoone tulekahjus peaaegu pool (46 %) hoonest. Samuti oli 2014. aastal kõige rohkem ehk 39 % tulekahjus hukkunudest puithoonetes. (Jalas, 2015, pp. 5-21) Need numbrid näitavad, et kolme- ja neljakorruselised puithooned vajavad erilist tähelepanu ja teadmist nende hoonete konstruktsioonide kohta.

Praegu puudub Päästeametil kindel teadmine renoveeritavate puitkorterelamute olukorrast ja kas nende konstruktsioonid vastavad kaasaegsetele tuleohutusnõuetele. Seetõttu uuritakse lõputöös olemasolevat kahekorruselist puithoonet, mille kolmandat korrust tahetakse kasutusele võtta, selgitamaks välja hoone kandekonstruktsioonide ja tuletõkkeseptsioonide arvutuslikud tulepüsivusajad. Arvutuste tulemusi on võimalik võrrelda nõuetest tulenevate tulepüsivusaegadega. Kui arvutuslikud tulepüsivusajad on nõuetest väiksemad, siis tehakse ettepanekuid nende suurendamise või kompenseerimise võimalustest rekonstrueerimisel. See informatsioon on oluline inseneritehnilise büroo inspektoritele, kes saaks teadmisi selliste hoonete kohta ja ehitusprojektide heakskiitmisel

saaksid teha sellest tulenevaid otsuseid. Seega on töö abimaterjaliks insenertehniliste büroode inspektoritele.

Eesmärgiks on arvutuslikult analüüsida, kas olemasoleva kahekorruselise puithoone konstruktsioonide materjalid tagavad kolme- kuni neljakorruselise puithoone nõutava tulepüsivuse või on vajalik konstruktsioonide täiendav kaitsmine tule eest.

Eesmärgi saavutamiseks on autor püstitanud järgmised uurimisülesanded:

- Välja uurida kolme- kuni neljakorruseliste puithoonete tuleohutusnõuded ning nõuete täitmise hindamise võimalused.
- Olemasoleva hoone konstruktsioonide hindamine ning tulepüsivusaegade määramine arvutusmeetodite abil.
- Konstruktsioonide mittevastavuse puhul välja pakkuda võimalikud lahendusvariandid.

Lõputöö koosneb kolmest peatükist:

- Esimeses peatükis tuuakse välja, mis on rekonstrueerimine; millised on kolme kuni nelja korruseliste puithoonete tuleohutusnõuded.
- Teises peatükis tuuakse välja kuidas käitub puit tulekahjus ja kuidas on võimalik hinnata puitkonstruktsioonide tulepüsivust.
- Kolmandas peatükis antakse ülevaade uuritavast hoonest ja esitatakse analüüs hoone kande- ja eraldavate konstruktsioonide tulepüsivuse kohta ning tehakse järeldusi ja ettepanekuid.

Töös kasutas autor erialast kirjandust, Eesti Vabariigi õigusakte ja Euroopa norme. Läbi on viidud olemasoleva puithoone konstruktsioonide kõige ohtlikumate kohtade arvutuslik analüüs.

Autor tänab lõputöö juhendajat Alar Justi, kaasjuhendajat Raido Jalast ja kõiki lõputöö valmimisele kaasa aidanud inimesi.



# **1. PUITEHITISTE TULEOHUTUSNÕUDED**

## **1.1. Ehitiste rekonstrueerimine**

Ehitise rekonstrueerimiseks nimetatakse ehitise piirdekonstruktsioonide muutmist ning kande- ja jäigastavate konstruktsioonide muutmist ja asendamist (Ehitusseadus, 2002).

Ehitamine on ehitise püstitamine, laiendamine, rekonstrueerimine, lammutamine ning ehitise tehnosüsteemi või selle osa muutmine või terviklik asendamine (Ehitusseadus, 2002).

Ehitusprotsess algab kohaliku omavalitsuse (edaspidi KOV) ehitusloa väljastamisest, milleks on vaja esitada ehitusprojekt (Östman, 2014, p. 21). Ehitusprojekt peab olema heakskiidetud Päästeameti ning teiste ametiasutuste poolt (Tuleohutuse seadus, 2010). Ehitusprojekt on projekteerimise tulemus. Projekteerimine koosneb ehitise või selle osa arhitektuursest või ehituslikust kavandamisest, ehitise tehnosüsteemide ning selles kasutatava tehnoloogia kavandamisest ja nõuetele vastava kasutamise ja hooldamise tehnomajanduslikust hindamisest. (Ehitusseadus, 2002)

Ehitise kasutamiseks peab olema KOV kasutusluba ning valminud ehitist või selle osa võib kasutada ainult ettenähtud kasutamise otstarbel (Ehitusseadus, 2002). Kasutusloa võib väljastada kui Päästeamet on selle heakskiitnud (Päästeseadus, 2010).

## **1.2. Ehitiste tuleohutus**

Tuleohutust peetakse tähtsaks kriteeriumiks ehitismaterjali valikul ning turvatunde loomisel. Puidu ehituses ulatuslikuma kasutuse eeldus on piisav tuleohutus. (Östman, 2014, p. 9)

Vabariigi Valitsuse määrus nr 315 „Ehitisele ja selle osale esitatavad tuleohutusnõuded“ kehtestab olulised tuleohutusnõuded ehitistele tulekahju puhkemise korral:

1. säilib ettenähtud aja jooksul ehitise kandevõime;
2. on ehitises tule tekkimine ja levik takistatud;
3. on ehitises suitsu tekkimine ja levik takistatud;
4. on tule levik ehitisest naaberehitisele takistatud;

5. on inimestel võimalik ehitisest evakueeruda;
6. on võimalik inimesi ehitisest evakueerida;
7. on arvestatud päästemeeskondade ohutuse ja nende tegutsemisvõimalustega. (Ehitisele ja selle osale esitatavad tuleohutusnõuded, 2014)

VV315 järgselt loetakse olulised tuleohutusnõuded täidetuks, kui on arvestatud inimeste evakuatsiooni ja varakahjud ning avalikkusele kahju, sellehulgas kahju keskkonnale on minimiseeritud ning kui:

1. ehitis ja selle osa vastavad ettenähtud piirväärtustele või
2. ehitis ja selle osa vastavad asjakohasele tehnilisele normile või
3. ehitis ja selle osa vastavad asjakohasele standardile või
4. arvutuslikul, analüütilisel või muul usaldusväärsel viisil on tõestatud ehitise vastavus olulistele tuleohutusnõuetele, kusjuures on arvestatud tulekahju võimaliku puhkemise ja kustutamisega. (Ehitisele ja selle osale esitatavad tuleohutusnõuded, 2014)

Tulekahju tekkimise, leviku ja ohu vältimiseks arvestatakse ehitise ehitamise ja kasutamise korral tulekahju võimalusest. Tulepüsivusena käsitatakse ehitise konstruktsiooni või selle osa säilitada ettenähtud aja jooksul kande- ja soojusisolatsioonivõime ning terviklikkus. Tulepüsivust määratakse lähtuvalt konstruktsiooni kandevõimest (R), terviklikkusest (E) ja soojus(sooja-)isolatsiooni võimest (I) ning aega määratakse minutites. Kandekonstruktsioonide kandevõimet on võimalik tõendada katseliselt, arvutuslikult, ühendades katse- ja arvutustulemusi või kasutades tunnustatud tabelarvutust. (Ehitisele ja selle osale esitatavad tuleohutusnõuded, 2014)

Tuleohutuse tagamiseks määratakse ehitise osadele tuletundlikus, mis määrab viimaste omadused tulega kokku puutudes. Tuletundlikkuse omadused on võime süttida, eraldada soojust, levitada tuld, eraldada suitsu, mürgiseid gaase ning põlevaid (kuumi) tilku. Ehitise osade jaotamine on järgmine:

- A1 – ehitise osa, mis ei ole tuletundlik;
- A2 – ehitise osa, mis on tuletundlik, kusjuures tuletundlikkus väljendub eriti vähesel määral suitsu eraldumises;

- B – ehitise osa, mis on tuletundlik, kusjuures tuletundlikkus väljendub süttivuses ja eriti vähesel määral suitsu eraldumises ning põlevaid tilku ega tükke ei esine;
- C – ehitise osa, mis on tuletundlik, kusjuures tuletundlikkus väljendub vähesel määral suitsu eraldumises ja kiiresti kustuvates põlevates tilkades või tükkides;
- D – ehitise osa, mis on tuletundlik, kusjuures tuletundlikkus väljendub tulekahjus (põlemisprotsessis) osalemise lubatavuses;
- E – ehitise osa, mille osavõtt tulekahjust on tavapärane (lubatav);
- F – ehitise osa, millega toimuv ei ole tulekahjus määratud;
- s1 – ehitise osa, milles suitsu moodustumine (eraldumine) on eriti vähene;
- s2 – ehitise osa, milles suitsu moodustumine on vähene;
- s3 – ehitise osa, milles toimub suitsu moodustumine, mis ei täida s1 ega s2 nõudeid;
- d0 – ehitise osa, milles põlevaid tilku või tükke ei esine;
- d1 – ehitise osa, milles põlevad tilgad või tükid kustuvad kiiresti;
- d2 – ehitise osa, milles põlevate tilkade või tükkide esinemine ei täida d0 ega d1 nõudeid. (Ehitisele ja selle osale esitatavad tuleohutusnõuded, 2014)

Puidu koostis ei luba puidu immutamise või keemilise kaitsevahendiga muuta puitu mittepõlevaks materjaliks. Kuid konstruktsioonid süttivad harva esimesena ja neid on võimalik muuta raskelt süttivaks. (Just, 2014, p. 169) Tuleohutuse poolest on esmatähtis inimeste evakuatsioon, mille tagamiseks on vaja, et trepikodade seinte pealispind oleks mittepõlevast materjalist. Seda võib tagada kahel viisil, kas ehitada trepikoja seinad kivist, või katta puidust seinad mittepõleva materjaliga. Puidu immutuse või keemilised kaitsevahendid viivitavad puidu süttimist, kuid ei tee puitu mittepõlevaks materjaliks, sellepärast ei saa neid kasutada evakuatsiooniks mõeldud trepikodades. (Adamson, 2014, pp. 9-10)

### **1.3. Kolme- kuni neljakorruseliste puiteluhoonetele esitatavad nõuded**

Tegemist on eluhoonetega, milledele VV315 järgselt määratakse I kasutusviis ning sel juhul peab kolme- kuni neljakorruseline puitelamu vastama TP2 tuleohutusklassi nõuetele. Kehtestatud piirangute kohaselt ei tohi selline hoone olla kõrgem, kui neli korrust ja neliteist meetrit. (Ehitisele ja selle osale esitatavad tuleohutusnõuded, 2014)

TP2 klassi hoone karkass võib olla D klassi kuuluvatest materjalidest. Klassi eriomadusteks on ranged nõuded sisepindadele, kerge ehitusviisi vastukaaluks on nõutud kõrgem tuleundlikkuse klassi pinnakiht. Kui ehitise osa pinnakate ei vasta nõuetele tuleb sein- ja laepinnad katta kaitsekihiga. (Eesti Standardikeskus, 2008)

Kandekonstruktsioonide kriteeriumid keldrikorrustel- kandevõime peab olema R120 ja kandetarindid tuleb teha vähemalt A2-s1, d0 tuleundlikkusega materjalidest. Pealmaakorrustel- R60 ning, kui kandetarindid ei ole vähemalt A2-s1, d0 klassiga materjalidest, siis hoone soojusisolatsioon peab olema vähemalt A2-s1, d0 klassi materjalist. (Ehitisele ja selle osale esitatavad tuleohutusnõuded, 2014)

Ehitise uuendamisel tuleb arvestada, et tihti ei vasta kandetarindid tuleohutusnõuetele. Konstruktsioonide täielik väljavahetamine ei ole alati vajalik ja põhjendatud. Raske täitematerjali vahetamine kerge mineraalvilla vastu võib põhjustada tarindite nihkeid, mis põhjustavad pragude teket. Kandvate vahe- ja välisseinte tulepüsivust võib pikendada asjakohaste kaitsekihtidega. (Eesti Standardikeskus, 2008)

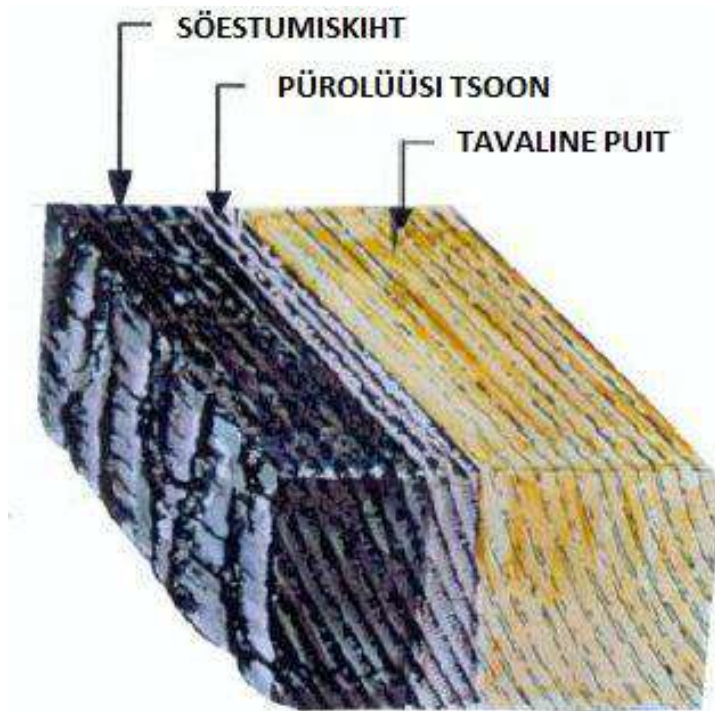
Tuletõkkeseptsioonide moodustamise eesmärgiks on isikurvalisus (eriti evakuatsioonivõimaluste turvamine suitsu ja kuumuse leviku piiramisega), pääste- ja kustutustöö hõlbustamine (tuletõkkeseptsioonide näol moodustatakse tuleleviku piire) ning varakahjude piiramine ja naabrivara kaitsmine (Eesti Standardikeskus, 2008). Tuletõkkeseptsioonideks peavad olema jaotatud eluruumid, evakuatsiooni trepikojad, keldrid kuni 800m<sup>2</sup> ja pööningud kuni 1600m<sup>2</sup>. Tulepüsivusajad peavad tagama miinimumnõudeid keldrites ja pealmaakorrustel EI60, pööningutel EI30 ning osadeks jagatavad konstruktsioonid EI15. Seinte ja lagede tuleundlikkus peab olema B-s1,d0. Kui konstruktsioon koosneb materjalidest klassiga C-s2,d1 või sellest tuleundlikum, siis peab ehitise siseseinad ja laed varustada A2-s1,d0 klassi materjali kaitsekattega. (Ehitisele ja selle osale esitatavad tuleohutusnõuded, 2014)

TP2 klassi kolme- ja neljakorruseliste hoonete puhul, mille materjalide tuleundlikkuse klass on D-s2,d2 ning ehitises mistahes põhjuse tõttu on kasutajate turvalisus vähene või päästetööde läbiviimine on ohtlik tuleb paigaldada automaatne tulekustutussüsteem (Ehitisele ja selle osale esitatavad tuleohutusnõuded, 2014).

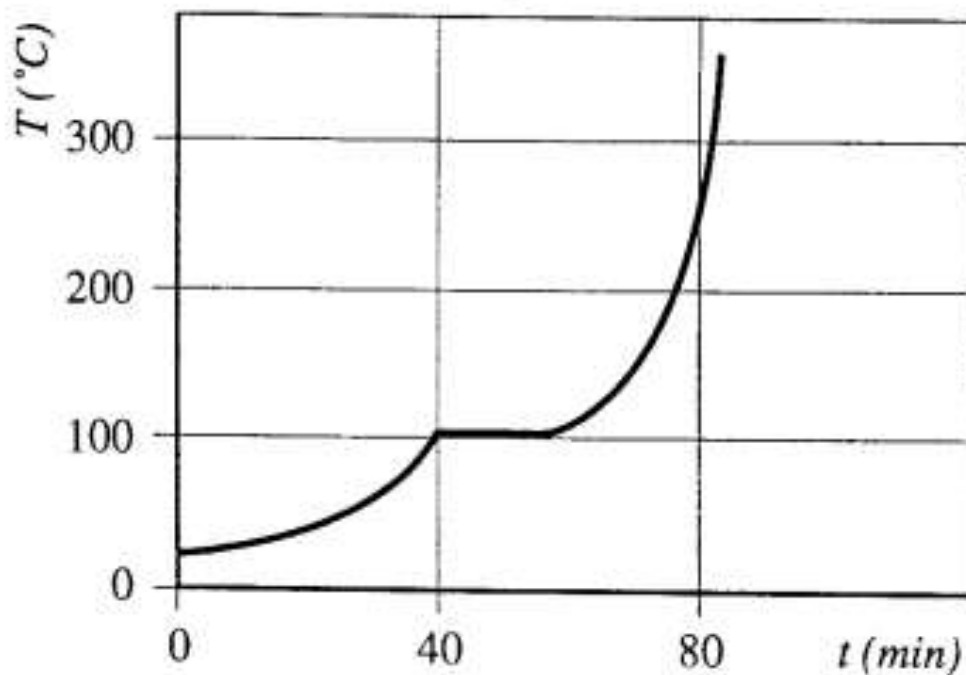
Kolme- kuni neljakorruselise I kasutusviisiga TP2 klassi hoone renoveerimisel tuleb teha ehitise ekspertiisi ning hinnang olemasolevale hooneosale. Standardis EVS-EN 812-7:2008 „Ehitiste tuleohutus. Osa 7: Ehitisele esitatava põhinõude, tuleohutusnõude tagamine projekteerimise ja ehitamise käigus“ on kolme- kuni neljakorruselise I kasutusviisiga TP2 hoonete tuleohutusnõuded rekonstrueerimisel ja pealeehitusel välja toodud tabelina (vt LISA 1).

## 2. PUIDU KÄITUMINE TULEKAHJUS

Puit on põlev materjal, mida võib iseloomustada kui poorse, söestuva tahke materjalina (Östman, 2014, p. 57). Puit võib süttida lahtisest leegist ja temperatuurist. Süttimiseks on vaja pinnatemperatuuri tõus üle 300°C. Puidu põlemine kujutab endast keerulist pürolüüsi protsessi. Põlemisel moodustub ristlõike ümber isoleeriv puusöe kiht. Selle kihi ja põlevate gaaside koosmõjul algab keemiline lagunemine. Selle protsessi tagajärjel tekib söestumiskihi ja terve puidu vahel pürolüüsikiht (Joonis 1), mis on umbes 5 millimeetriline tule poolt keemiliselt mõjutatud, kuid ei ole veel täielikult lagunenenud kiht. Pürolüüsikihi all oleva puidu sajakraadise temperatuuri juures vee aurustamise tõttu temperatuuritõus peatub seniks kuni kogu vesi on aurustunud (Joonis 2). (Just, et al., 2013, p. 57) Põlemisel tekivad söekiht, mis kaitseb selle all olevaid puidukihte, aitab tõsta puidu tulepüsivusvõimet. Seejuures tuleb arvesse võtma puidu mõõtmed- mida suurem on puitkonstruktsiooni ristlõige, seda pareminin ja kauem ta tulele vastu peab. (Piik, 2014, p. 36)



Joonis 1. Tulest mõjutatud puit (Östman, 2014, p. 57)



Joonis 2. Temperatuuri tõus puidus tulekahju ajal (Just, 2014, p. 169)

## 2.1. Söestumise arvutamine

Puidu tules käitumist mõjutavad söestumiskiirus ja tugevus ning jäikus. Puidu tugevus kogu tulekahju ajaks jääb ühesuguseks ja kandevõime vähenemine tekitab ristlõike vähenemise tõttu. Puidu süttimis- ja põlemiskiirus sõltub puidu tihedusest, seega erinevad puuliigid käituvad tules ka erinevalt. Mida tihedam puit on, seda raskemini ta süttib. Puidu söestumine võib olla ühemõõtmeline või kahemõõtmeline. Ühemõõtmeline söestumine on puidu füüsikaline omadus. Kahemõõtmeline söestumine on tinglik ja arvestab näiteks ristlõike kujuga ja suurema söestumisega nurkades. (Just, et al., 2013, pp. 57-61)

### 2.1.1. Ühemõõtmeline söestumine

Ühemõõtmelise söestumise (Joonis 3) puhul on tegemist plaadiga või ühtlase suure massiivpuidu pinnaga, mida mõjutab tulekahju kas alt või ülaltpoolt konstruktsiooni (SP Technical Research Institute of Sweden, 2010, p. 81):

$$d_{char,0} = \beta_0 \times t$$

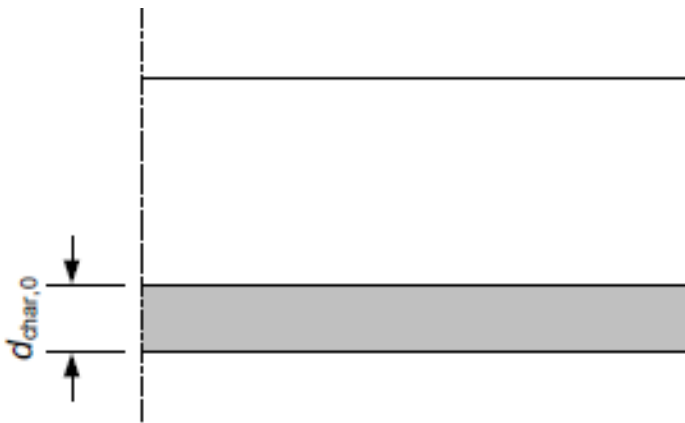
(1)

kus

$d_{char,0}$  – söestumissügavus lineaarsel söestumisel (mm);

$\beta_0$  – ühemõõtmeline söestumiskiirus (mm/min);

$t$  – tulekahju kestvus (min). (Just, et al., 2013, p. 61)



Joonis 3. Ühemõõtmeline söestumine (Just, et al., 2013, p. 61)

Söestumiskiirusteks ( $\beta_0$ ) puitkonstruktsiooni ühemõõtmelisel söestumisel loetakse (Eesti Standardikeskus, 2008):

- 0,65 mm/min – okas-, lehtpuu- või liimpuidust  $\geq 290 \text{ kg/m}^3$  valmistatud konstruktsiooni elemendi puhul
- 0,9 mm/min – puidust ja puidu jääkidest valmistatud plaadid ja puitpaneelid
- 1,0 mm/min – vineer

### 2.1.2. Kahemõõtmeline söestumine

Kahemõõtmelise söestumise puhul on tegemist riskülikulise ristlõikega elemendiga, mille põlemisel tekib nurkades soojavoogude liitumine ja nurgad söestumisel lähevad ümmargusteks (SP Technical Research Institute of Sweden, 2010, p. 82):

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



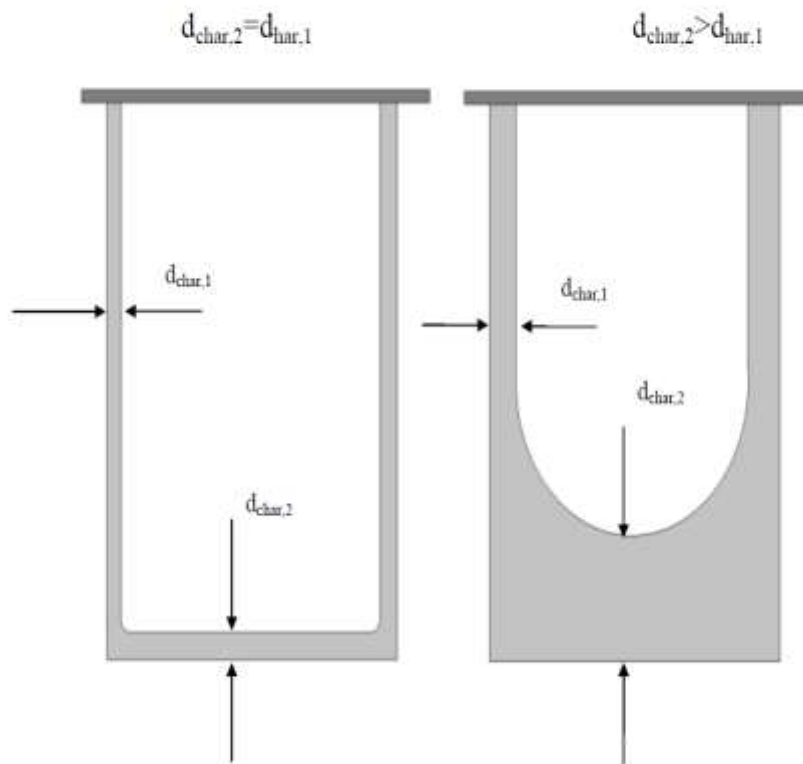
kus

$d_{char,n}$  – eeldatav söestumissügavus (mm);

$\beta_n$  – tinglik söestumiskiirus ristkülikulise ristlõike jaoks (mm/min);

$t$  – tulekahju kestvus (min). (Just, et al., 2013, p. 62)

Kahemõõtmelisel söestumisel (Joonis 4) suureneb söestumissügavus vastastikuste nurkade ümardamise tõttu kitsal küljel rohkem kui laial küljel (SP Technical Research Institute of Sweden, 2010, p. 82).



Joonis 4. Söestumine ümardatud nurkadega ristlõike laial ja kitsal küljel (Östman, 2014, p. 81)

Söestumiskiirusteks ( $\beta_n$ ) puitkonstruktsiooni kahemõõtmelisel söestumisel loetakse (Eesti Standardikeskus, 2008):

1. Okaspuit:

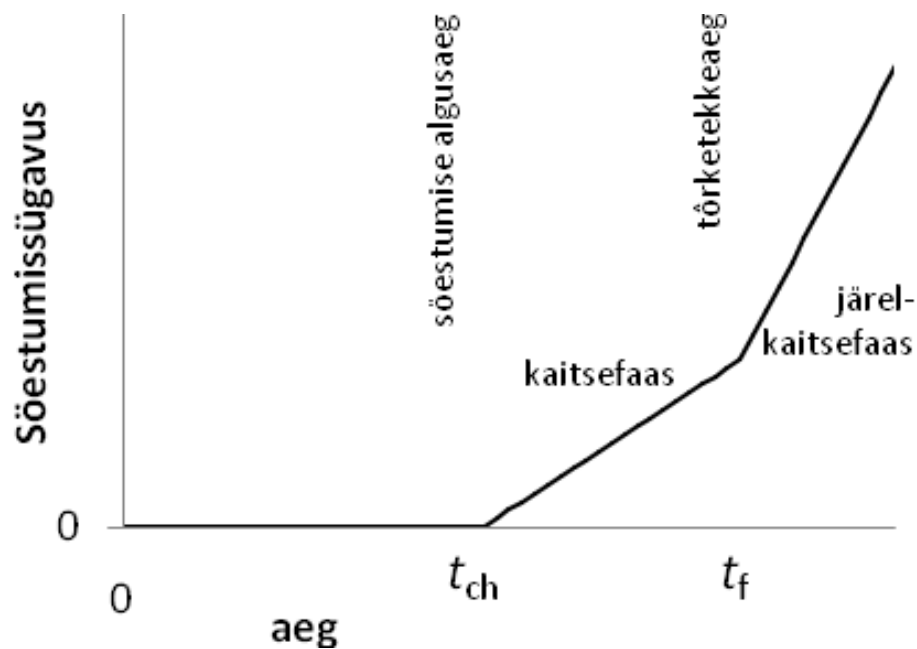
- 0,8 mm/min – ehituspuit
- 0,7 mm/min – liimpuit

2. Lehtpuit:

- 0,7 mm/min – lehtpuu tihedusega  $\geq 290 \text{ kg/m}^3$
- 0,55 mm/min – lehtpuu tihedusega  $\geq 450 \text{ kg/m}^3$

### 2.1.3. Kattekihtide mõju

Kaitstud ristlõige puhul algab ristlõike söestumine hiljem, kuna kattekiht kaitseb puitu. Ajahetkel  $t_{ch}$  algab söestumine katteplaadi taga, kuid see söestumine on aeglane kuna katteplaat ise püsib veel. Jõudes ajahetkeni  $t_f$  katteplaat laguneb ning tulele avatud puit hakkab söestuma väga kiirelt. Piisavalt paksu söekihi puhul (umbes 25 mm) söestumiskiirus jälle aeglustub. (Just, et al., 2013, p. 62)



Joonis 5. Kaitstud elementide söestumine. (Just, et al., 2013, p. 63)

$t_{ch}$  – söestumise algusaeg (min)

$t_f$  – tõrketekkeageg (min)

## **2.2. Tuletõkestus- ja kandevõime arvutusmeetodid**

Tulepüsivust on võimalik tõestada kahel viisil: katsemeetodil või arvutusmeetodil. On võimalik ka kombineeritud lähenemine. (Just, et al., 2013, p. 60)

Lõputöö eesmärgi saavutamiseks viiakse läbi kvantitatiivne uuring, mille eesmärk on uurida tuletõkkesektsioonide ja kandekonstruktsioonide tulepüsivust. Selleks kasutatakse erinevaid arvutusmeetodeid.

### **2.2.1. Täiustatud meetod tuletõkestusvõime määramiseks**

Võimalikest arvutusmeetoditest üks täpsematest on Birgit Östman'i käsiraamatus „Tuleohutud puitmajad 3“ täiustatud meetod tuletõkestusvõime määramiseks. Käsiraamatus välja pakutud meetod on Eurokoodeksis 5: „Puitkonstruktsioonide projekteerimine“ kehtestatuga võrreldes oluline edasiminekuks, ning seal pakutakse ka võimalikud konstruktiivsed võtted tule leviku takistamiseks. (Tohver, 2014, p. 66) Seetõttu otsustas autor kasutada oma töös seda meetodit konstruktsioonide tuletõkestusvõime arvutamiseks.

Täiustatud arvutusmeetodi aluseks on mahukate katsete tulemused ja lõplike elementide meetodi arvutused. Meetodit saab kasutada piiramatult arvu materjalikihtidega ning karkasselementide vahed võivad olla nii täidetud, kui ka täitmata. Meetod suudab arvestada erinevate materjalidega (Östman, 2014, p. 61):

- täispuit;
- ristkihtpuit;
- vineerpuit (LVL);
- OSB-plaat;
- puitlaastplaadid;
- puitkiudplaadid;
- vineer;
- kipsplaadid;
- kipskiudplaadid;
- mineraalvillsoojustus.

Meetod põhineb standardis EN1995-1-2 kirjeldatud liitmismeetodil. Kasutatava meetodi põhimõte seisneb selles, et iga üksiku kihi kaitseaeg arvutatakse eraldi ja siis saadud tulemused liidetakse kokku ning saadakse kogu konstruktsiooni tuletõkestusvõime. Seejuures võetakse arvesse soojusülekanne suund, kihtide funktsiooni ja vastastikust mõju. (Östman, 2014, pp. 61-62)

$$t_{ins} = \sum_{i=1}^{i=n-1} t_{prot,i} + t_{ins,n} \quad (3)$$

kus

$\sum_{i=1}^{i=n-1} t_{prot,i}$  – enne konstruktsiooni viimast kihti olevate kihtide kaitseaegade summa;

$t_{ins,n}$  – konstruktsiooni viimase kihi isolatsiooniaeg. (Östman, 2014, pp. 61-62)

$$t_{prot,i} = (t_{prot,0,i} \times k_{pos,exp,i} \times k_{pos,unexp,i} + \Delta t_i) \times k_{j,i} \quad (4)$$

$$t_{ins,n} = (t_{ins,0,n} \times k_{pos,exp,n} + \Delta t_n) \times k_{j,n} \quad (5)$$

kus

$t_{prot,0,i}$  – kihi  $i$  kaitseaja baasväärtus;

$t_{ins,0,n}$  – konstruktsiooni viimase kihi isolatsiooniaja baasväärtus tulele mitteavatud poolel;

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

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

$\Delta t_i / \Delta t_n$  – lisakaitseaeg, F-tüüpi kipsplaadi või kipskiudplaadiga kaitstud kihtide puhul;

$k_{j,i} / k_{j,n}$  – liitetegurid. (Östman, 2014, pp. 61-62)

### 2.2.2. Efektiivristlõike meetod

2001. aasta märtsis Eesti Vabariigi standardina ilmunud EVS 1995-1-2:2003 „Puitkonstruktsioonid. Tulepüsivus“ (mida praegu asendab Eurokoodeks 5: Puitkonstruktsioonide projekteerimine. Osa 1-2: Üldist. Tulepüsivusarvutus.) annab juhiseid puitkonstruktsioonide tulepüsivuse arvutamiseks, mille järgi võib tulekahju mõju puitkonstruktsioonidele arvestada kolmel viisil (Just, 2005, p. 24):

- Lihtsustatud efektiivristlõike meetod, mille põhimõte seisneb selles, et kandekonstruktsiooni elementide ristlõigete mõõtmeid vähendatakse söestunud kihi ja nulltugevusega kihi võrra. Peale seda arvutatakse vähendatud ristlõike mõõtmetega elementide kandevõime.
- Vähendatud tugevuse ja jäikuse meetodiga arvutatakse jääkristlõikega elemendi kandevõime vähendatud tugevus- ja jäikusomadustega.
- Üldmeetodiga võetakse arvesse jääk-ristlõike iga punkti temperatuuri ja niiskusesisaldust, samuti materjali tugevus- ja jäikusomaduste vahetõrka ühelt poolt ning temperatuuri ja niiskusesisaldust teiselt poolt.

Kandekonstruktsioonide tulepüsivusarvutuste jaoks otsustas autor kasutada nendest kolmest kõige kergemat ja enimkasutatavat efektiivristlõike meetodit. Selle meetodi puhul võetakse normaaltemperatuurijärgsest tugevusarvutustest väikseimad koormused, suuremad puitkonstruktsioonide tugevused vähendatud ristlõige puhul. Koormused võetakse avariikoormusega, millel ei rakendata ülemkoormustegureid ning kasutatakse vähendustegureid. Kandevõimekontrollimiseks suurendatakse normatiivset tugevust ja vähendatakse materjali osavarutegurit. Ristlõiget vähendatakse tulele avatud külgedest söestumissügavuse ja lisaks 7 mm lisakihi võrra ning leitakse allesjääv ehk efektiivristlõige. (Just, 2005, p. 24)

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 \times d_0 \quad (6)$$

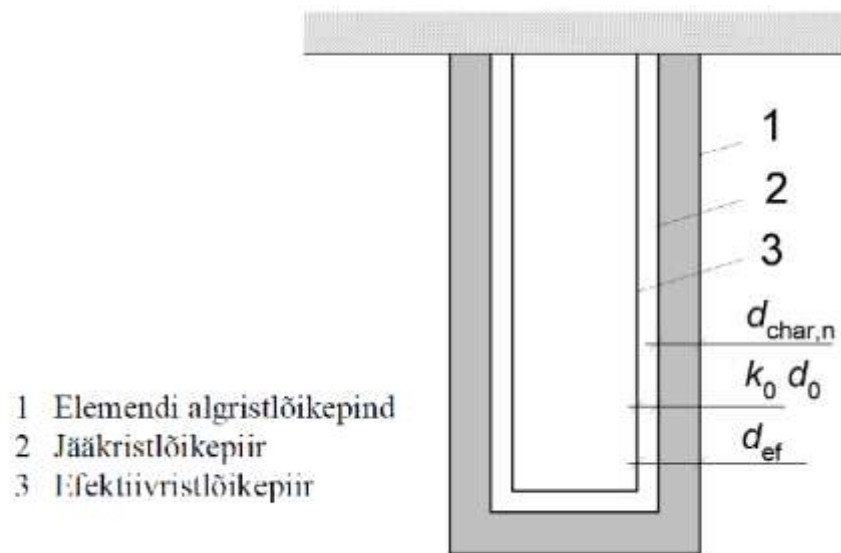
kus

$d_{ef}$  – efektiivne söestumissügavus (mm);

$d_{char,n}$  – eeldatav söestumissügavus (mm);

$k_0$  – tegur, mis sõltub tulekahju kestvusest;

$d_0$  – kihi sügavus eeldusel, et tugevus ja jäikus on null (7 mm). (Eesti Standardikeskus, 2007, pp. 34-35)



Joonis 6. Jääkristlõike ja efektiivrisklõike määratlus. (Eesti Standardikeskus, 2007, p. 35)

### **3. HOONE KIRJELDUS JA TULEPÜSIVUSE HINDAMINE**

Elamu Lepiku 14 on 1907-1914 aastal ehitatud juugendelementidega historitsistlik puitelamu, mis on iseloomulik näide 20 sajandi alguse ürielamust, mis moodustub kõrvalasuvate majadega ühtse ansambli. Hoone on 16.09.1997.a Kultuurimälestiste riiklikusse registrisse arvele võetud kultuurimälestis reg. Nr. 7049. (Muinsuskaitseamet, 2008) Puitelamu asub Tartus Supilinna miljööväärtuslikul hoonestusalal. Lepiku tänava majad on üksteisega väga sarnased, kuid siiski erinevate projektidega, välja arvatud tänava lõpus asuvad kaksikmajad Lepiku 9 ja 14. (Artes Terrae OÜ, 2010, pp. 49-50)

Hoone on kahekorruseline ristkülikulise põhiplaaniga elamu, millel on maakivisokkel ja väljaehitised hooviküljel. Olemasoleva hoone sise-ja välisseinad, vahelaed ning katusekonstruktsiooni on puidust. (Muinsuskaitseamet, 2008) Sissepääsud on hoovist ja tänavalt. Keldrisse pääsud on tänavapoolsest trepikojast ning kaks pääsu väljast. Esimesel korrusel paikneb neli korterit, teisel korrusel kolm korterit ning kolmandale korrusele planeeritakse ehitada kaks korterit. Keldris paiknevad kolme korteri juurde kuuluvad abiruumid, tehnilised ruumid ning üldkasutatavad ruumid. (Lõhmus, 2011, pp. 3-5)

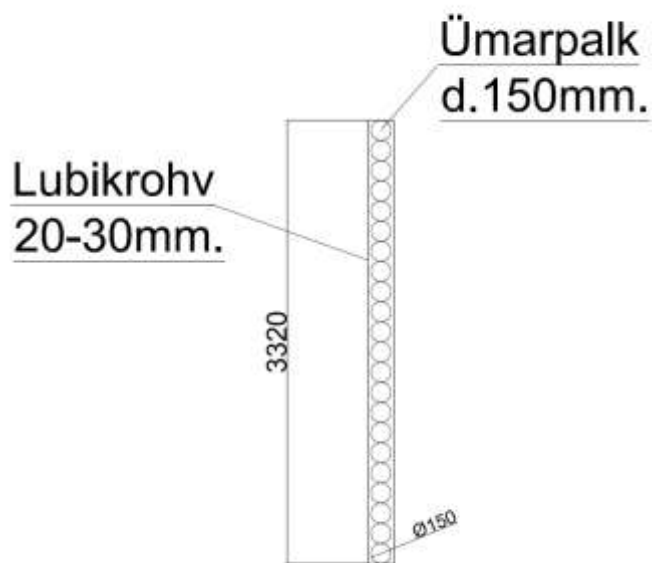
Hoone siseruume soovitakse restaureerida ja remontida ning katusekorrust soovitakse kasutusele võtta. Kuna hoonel puudub rekonstrueerimise projekt, siis otsustati kasutada ehituslikke lahenduste arvutamiseks selle hoone kaksikmaja Lepiku 9 rekonstrueerimisprojekti, millel sai väljastatud kasutusluba ehitise rekonstrueerimisel nr. 1171/13 21.05.2013. (Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium, 2015)

Hoone sobib lõputöös uurimiseks, kuna tegemist on olemasoleva kahekorruselise puidust eluhoonega, mida soovitakse rekonstrueerimise käigus muuta kolme korruseliseks eluhooneks. Seetõttu tuleb hoone kande- ja tuletõkkekonstruktsioonide viia vastavusse TP2 tuleohutusklassi nõuetega.

#### **3.1. Hoone konstruktsioonide mõõdetud tulemused**

##### **3.1.1. Hoone siseseinad**

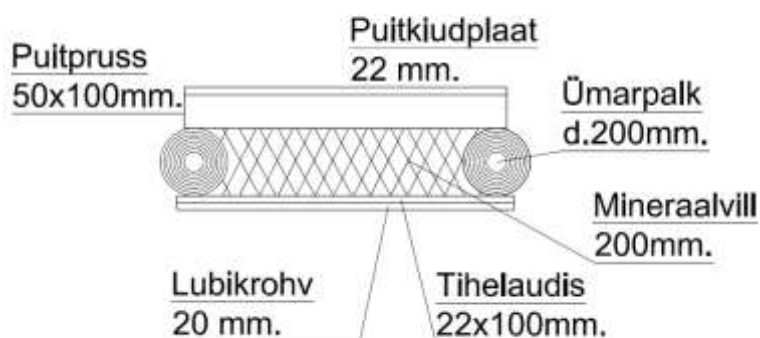
Hoone siseseinad on ehituse poolest kõik ühesugused. Seinte materjal on ristpalk paksusega 150 mm. Seinad on kahelt poolt kaetud 20-30mm lubikrohviga (Joonis 7).



Joonis 7. Sisesein (Autori joonis)

### 3.1.2. Hoone vahelagi

Hoone vahelae konstruktsiooni kandelemendiks on 200mm ristlõikega ümarpalk, mille vaheline samm on 900mm ja suurim sildeava on 5600mm. Taladele paigaldatud puitpruss 50x100mm, mis on kaetud 22mm paksusega puitkiudplaadiga ning selle peal on põrandakate. Alt on talad kaetud tihelaudisega 22x100mm ning on krohvitud lubikrohviga paksusega 20mm. Tühimikud on täidetud „šlakkiga“, mida planeeritakse asendada klaasvillaga (Joonis 8).



Joonis 8. Vahelagi (Autori joonis)



## 3.2. Hoone tuletõkkekonstruktsioonide tuletõkestusvõime arvutused

Järgnevalt on arvutatud sein ja vahelae tuletõkestusvõime käsiraamatu „Tuleohutus puitmajad 3“.

### 3.2.1. Sein tuletõkestusvõime

Kuna käsiraamatu „Tuleohutud puitmajad 3“ arvutusmeetod ei oska arvestada lubikrohvi panust tuletõkestusvõimele, siis on arvestatud ainult puidu (150 mm palk) isolatsiooniajaga, seega on sein tuletõkestusvõime järgmine (Östman, 2014, pp. 61-70):

$$t_{ins} = t_{ins,1}$$

kus

$t_{ins}$  – sein isolatsiooniaeg (min)

$t_{ins,1}$  – puidu isolatsiooniaeg (min)

$$t_{ins,1} = (t_{ins,0,1} \times k_{pos,exp,1}) \times k_{j,1}$$

kus

$t_{ins,0,1}$  – puidu isolatsiooniaja baasväärtus (min)

$$t_{ins,0,1} = 19 \times \left(\frac{h_n}{20}\right)^{1,4} = 19 \times \left(\frac{150}{20}\right)^{1,4} = 319 \text{ min}$$

kus

$h_n$  – puidu paksus (mm), antud juhul  $h_n=150$  mm

$k_{pos,exp,1}$  – arvestab eelmise kihi mõju, kuna seda pole, siis  $k_{pos,exp,1} = 1$

$k_{j,1}$  – liitetegur, kuna liitekohti pole, siis  $k_{j,1}=1$

$$t_{ins,1} = (319 \times 1) \times 1 = 319 \text{ min} > 60 \text{ min, järelikult on EI60 tagatud.}$$

### 3.2.2. Vahelae tuletõkestusvõime

Vahelae puhul on arvestatud laudise ja klaasvilla kaitseajaga ning puitkiudplaadi isolatsiooniajaga, seega on vahelae tuletõkestusvõime järgmine (Östman, 2014, pp. 61-70):

$$t_{ins} = t_{prot,1} + t_{prot,2} + t_{ins,3}$$

kus

$t_{ins}$  – vahelae isolatsiooniaeg (min)

$t_{prot,1}$  – laudise kaitseag (min)

$t_{prot,2}$  – klaasvilla kaitseag (min)

$t_{ins,3}$  – puitkiudplaadi isolatsiooniaeg (min)

#### 1. Kiht, laudise kaitseag

$$t_{prot,1} = (t_{prot,0,1} \times k_{pos,exp,1} \times k_{pos,unexp,1}) \times k_{j,1}$$

kus

$t_{prot,0,1}$  – laudise kaitseaja baasväärtus (min)

$$t_{prot,0,1} = 30 \times \left(\frac{h_1}{20}\right)^{1,1} = 30 \times \left(\frac{22}{20}\right)^{1,1} = 33,3 \text{ min}$$

kus

$h_1$  – laudise paksus (mm), 22 mm

$k_{pos,exp,1}$  – arvestab eelmise kihi mõju, kuna seda pole, siis  $k_{pos,exp,1} = 1$

$k_{pos,unexp,1}$  – arvestab järgmise kihi mõju, kuna laudisele järgneb klaasvill, siis

$$k_{pos,unexp,1} = 0,35 \times h_1^{0,21} = 0,35 \times 22^{0,21} = 0,67$$

$k_{j,1}$  – liitetegur, kuna laudisele järgneb klaasvill, siis  $k_{j,1} = 1$

$$t_{prot,1} = (33,3 \times 1 \times 0,67) \times 1 = 22,3 \text{ min}$$

## 2. Kiht, klaasvilla kaitseaeg

Eeldatakse, et klaasvill on tõhusalt kinnitatud.

$$t_{prot,2} = (t_{prot,0,2} \times k_{pos,exp,2} \times k_{pos,unexp,2}) \times k_{j,2}$$

kus

$t_{prot,0,2}$  – klaasvilla kaitseaja baasväärtus (min)

$$t_{prot,0,2} = 0,056 \times h_2 + 13 = 0,056 \times 300 + 13 = 29,8 \text{ min}$$

kus

$h_2$  – klaasvilla paksus (mm), 300 mm

$k_{pos,exp,2}$  – arvestab eelmise kihi mõju, kuna klaasvillale eelneb laudis, siis

$$k_{pos,exp,2} = 0,5 \times \sqrt{\frac{t_{prot,0,2}}{t_{prot,1}}} = 0,5 \times \sqrt{\frac{29,8}{22,3}} = 0,57$$

$k_{pos,unexp,2}$  – arvestab järgmise kihi mõju, kuna klaasvillale järgneb puitkiudplaat, siis

$$k_{pos,unexp,2}=1$$

$k_{j,2}$  – liitetegur, kuna klaasvillale järgneb puitkiudplaat, siis  $k_{j,2}=1$

$$t_{prot,2} = (29,8 \times 0,57 \times 1) \times 1 = 17 \text{ min}$$

## 3. Kiht, puitkiudplaadi isolatsiooniaeg

$$t_{ins,3} = (t_{ins,0,3} \times k_{pos,exp,3}) \times k_{j,3}$$

kus

$t_{ins,0,3}$  – puitkiudplaadi isolatsiooniaja baasväärtus (min)

$$t_{prot,0,1} = 22 \times \left(\frac{h_3}{20}\right)^{1,4} = 22 \times \left(\frac{22}{20}\right)^{1,4} = 25 \text{ min}$$

kus

$h_3$  – puitkiudplaadi paksus (mm), 22 mm

$k_{pos,exp,2}$  – arvestab eelmise kihi mõju, kuna puitkiudplaadile eelneb klaasvill, siis

$$k_{pos,exp,3} = 0,3 \times \left(\frac{t_{ins,0,3}}{\sum t_{prot,2}}\right)^{0,7} = 0,3 \times \left(\frac{25}{39,3}\right)^{0,7} = 0,22$$

kus

$\sum t_{prot,2}$  – kahe eelmise kihi kaitseagade summa (min),  $\sum t_{prot,2} = 22,3 + 17 = 39,3$  min

$k_{j,3}$  – liitetegur, kuna puitkiudplaadile järgneb põrandakate, siis  $k_{j,3} = 1$

$$t_{ins,3} = (25 \times 0,22) \times 1 = 5,5 \text{ min}$$

$$t_{ins} = 22,3 + 17 + 5,5 = 44,8 \text{ min} < 60 \text{ min, järelikult ei ole EI60 tagatud.}$$

Kuna vahelae nõutav tuletõkestusvõime (EI60) ei ole tagatud ja hoonele on tehtud Muinsuskaitse ameti poolt rekonstrueerimisel materjalide kasutamise kitsendusi (kipsplaadi kasutamine on piiratud), siis teeb autor ettepaneku kasutada vahelae klaasvilla asemel kivivilla (tihedusega 30 kg/m<sup>3</sup>). Sellisel juhul oleks vahelae tuletõkestusvõime järgmine:

$$t_{ins} = t_{prot,1} + t_{prot,2} + t_{ins,3}$$

#### 1. Kiht, laudise kaitseag

$$t_{prot,1} = (t_{prot,0,1} \times k_{pos,exp,1} \times k_{pos,unexp,1}) \times k_{j,1}$$

$$t_{prot,0,1} = 30 \times \left(\frac{h_1}{20}\right)^{1,1} = 30 \times \left(\frac{22}{20}\right)^{1,1} = 33,3 \text{ min}$$

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

$$k_{pos,unexp,1} = 0,35 \times h_1^{0,21} = 0,35 \times 22^{0,21} = 0,67$$

$$k_{j,1}=1$$

$$t_{prot,1} = (33,3 \times 1 \times 0,67) \times 1 = 22,3 \text{ min}$$

## 2. Kiht, kivivilla kaitseaeg

$$t_{prot,2} = (t_{prot,0,2} \times k_{pos,exp,2} \times k_{pos,unexp,2}) \times k_{j,2}$$

$$t_{prot,0,2} = 0,3 \times h_2^{0,82+0,0066 \times \rho_2} = 0,3 \times 300^{0,82+0,0066 \times 30} = 99,7 \text{ min}$$

kus

$h_2$  – kivivilla paksus (mm), 300 mm

$\rho_2$  – kivivilla tihedus ( $\text{kg/m}^3$ ), 30  $\text{kg/m}^3$

$$k_{pos,exp,2} = 1 - 0,6 \times \frac{t_{prot,1}}{t_{prot,0,2}} = 1 - 0,6 \times \frac{22,3}{99,7} = 0,87$$

$$k_{pos,unexp,2}=1$$

$$k_{j,2}=1$$

$$t_{prot,2} = (99,7 \times 0,87 \times 1) \times 1 = 86,7 \text{ min}$$

## 3. Kiht, puitkiudplaadi isolatsiooniaeg

$$t_{ins,3} = (t_{ins,0,3} \times k_{pos,exp,3}) \times k_{j,3}$$

$$t_{prot,0,1} = 22 \times \left(\frac{h_3}{20}\right)^{1,4} = 22 \times \left(\frac{22}{20}\right)^{1,4} = 25 \text{ min}$$

$$k_{pos,exp,3} = 0,5 \times \sqrt{\frac{t_{ins,0,3}}{\sum t_{prot,2}}} = 0,5 \times \sqrt{\frac{25}{109}} = 0,24$$

kus

$\sum t_{\text{prot},2}$  – kahe eelmise kihi kaitseaegade summa (min),  $\sum t_{\text{prot},2} = 22,3 + 86,7 = 109$  min

$$k_{j,3} = 1$$

$$t_{\text{ins},3} = (25 \times 0,24) \times 1 = 6 \text{ min}$$

$$t_{\text{ins}} = 22,3 + 86,7 + 6 = 115 \text{ min} > 60 \text{ min, järelikult on EI60 tagatud.}$$

Väga oluline, et kivivill oleks tõhusalt kinnitatud, näiteks terasvõrguga. Kui kivivill ei ole kinnitatud, siis pärast laudise põlemist variseb kivivill alla ja kivivilla kaitseajaks on 0 minutit.

### 3.3. Hoone kandekonstruktsioonide tulepüsivuse arvutused

Seina ja vahelae kandvate elementide tulepüsivusarvutused on tehtud Eurokoodeksi 1995-1-2 alusel. Esmalt arvutatakse sein ja laetala jääkristlõiked pärast 60 minutulist tulekahju. Seejärel tehakse jääkristlõigetele kandevõime kontroll.

#### 3.3.1. Sein jääkristlõige

Seina puhul on tegemist ühemõõtmelise sөөstumisega, mida mõjutab tulekahju ühelt poolt, seega on sein jääkristlõige järgmine (Eesti Standardikeskus, 2007, pp. 25, 34-35):

$$d_{fi} = d - d_{ef}$$

kus

$d_{fi}$  – efektiivristlõige (mm)

$d$  – sein palgi algristlõige (mm), 150 mm

$d_{ef}$  – efektiivne sөөstumissügavus (mm)

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 \times d_0$$

$k_0 = 1$ , sest  $t = 60$  min, mis on  $t \geq 20$  min

$d_0 = 7$  mm

$$d_{char,n} = \beta_0 \times t = 0,65 \times 60 = 39 \text{ mm}$$

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

$$t = 60 \text{ min}$$

$$d_{ef} = 39 + 1 \times 7 = 46 \text{ mm}$$

$$d_{fi} = 150 - 46 = 104 \text{ mm}$$

### 3.3.2. Laetala jääkristlõige

Laetala puhul arvestatakse, et söestumine algab pärast laudise (kattekiht) põlemist (tõrketekkeae). Pärast kattekihi tõrketekkeae on laetala söestumine kaks korda kiirem. Laetalad on ümara ristlõikega, seega arvestatakse ühemõõtmelise söestumisega, kuna kahemõõtmelise söestumise puhul arvestatakse ristkülikukujulise ristlõike puhul nurkade ümardumist. Hetkel on tegemist ümara ristlõikega ning seetõttu ei ole vaja arvestada nurkade ümardumisega. Seega on laetala jääkristlõige järgmine (Eesti Standardikeskus, 2007, pp. 25-35):

$$d_{fi} = d - (2 \times \beta_0 \times (t - t_f) + d_0)$$

kus

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

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

$$t = 60 \text{ min}$$

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

$$t_f = \frac{h_p}{\beta_0} = \frac{22}{0,9} = 24,4 \text{ min}$$

kus

$h_p$  – kattekihi paksus (mm), 22 mm

$\beta_0=0,9$  mm/min, sest tegemist on laudisega

$$d_{fi} = 200 - (2 \times 0,65 \times (60 - 24,4) + 7) = 146,7 \text{ mm}$$

### 3.3.3. Kandevõime kontroll

Seina puhul on määravaks surve ristikiudu ja laetala paindemoment, seega kontrollitakse seinu survele ristikiudu ja laetala paindele. Kuna tegemist on olemasolevate konstruktsioonidega, mille puhul ei ole täpselt teada puidu tugevusklassi, siis juhendaja hinnangul on sobiv võtta puidu tugevusklassiks C24, standardi EVS-EN 338:2009 „Ehituspuit. Tugevusklassid“ järgi on puidu tugevuse normväärtused järgmised (Eesti Standardikeskus, 2012, p. 7):

$$f_{m,k}=24 \text{ N/mm}^2 - \text{paindetugevuse normväärtus}$$

$$f_{c,90,k}=2,5 \text{ N/mm}^2 - \text{survetugevus ristikiudu normväärtus}$$

#### 1. Puidu tugevused tulekahjuolukorras

Eurokoodeksi EVS-EN 1995-1-2:2005 järgi on puidu arvutuslikud tugevused tulekahjuolukorras järgmised (Eesti Standardikeskus, 2007, pp. 19-21):

$$f_{m,d,fi} = k_{mod,fi} \times k_{fi} \times \frac{f_{m,k}}{\gamma_{m,fi}} = 1 \times 1,25 \times \frac{24}{1} = 30 \text{ N/mm}^2$$

kus

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

$k_{mod,fi}$  – modifikatsioonitegur tulekahjuolukorras,  $k_{mod,fi}=1$

$k_{fi}$  – tegur, mis arvestab tugevuse 20% kvantiili normaalolukorras,  $k_{fi}=1,25$

$\gamma_{m,fi}$  – osavarutegur tulekahju olukorras,  $\gamma_{m,fi}=1$

$$f_{c,90,d,fi} = k_{mod,fi} \times k_{fi} \times \frac{f_{c,90,k}}{\gamma_{m,fi}} = 1 \times 1,25 \times \frac{2,5}{1} = 3,13 \text{ N/mm}^2$$

kus



$f_{c,90,d,fi}$  – arvutuslik survetugevus ristikiudu tulekahjuolukorras ( $N/mm^2$ )

## 2. Koormused tulekahjuolukorras

Seinale ja laetalale mõjuvad konstruktsioonide omakaal ja kasuskoormus. Standardi EVS-EN 1991-1-1:2002 järgi on tulekahjus mõjuvad koormused järgmised (Eesti Standardikeskus, 2002):

$$Q_{fi} = \gamma_G \times G_o + \gamma_{qk} \times q_k = 1 \times 0,001 + 0,3 \times 0,002 = 0,0016 N/mm^2$$

kus

$Q_{fi}$  – koormus tulekahjuolukorras ( $N/mm^2$ )

$G_o$  – alaliskoormuse (omakaalu) normväärtus ( $N/mm^2$ ),  $G_o=0,001 N/mm^2$

$q_k$  – muutuvkoormuse (kasuskoormuse) normväärtus ( $N/mm^2$ ),  $q_k=0,002 N/mm^2$

$\gamma_G$  – alaliskoormuse osavarutegur,  $\gamma_G=1$

$\gamma_{q,k}$  – muutuvkoormuse osavarutegur,  $\gamma_{q,k}=0,3$

## 3. Sein kandevõime kontroll, survele ristikiudu, pärast 60. minutist tulekahju

Tugevustingimus survele ristikiudu on järgmine (Just, 2014, pp. 66-67):

$$\sigma_{c,90,d,fi} \leq k_{c,90} \times f_{c,90,d,fi}$$

kus

$k_{c,90}$  – koormuse konfiguratsioon arvestav tegur,  $k_{c,90}=1$

$\sigma_{c,90,d,fi}$  – arvutuslik survepinge ristikiudu tulekahjuolukorras ( $N/mm^2$ )

$$\sigma_{c,90,d,fi} = \frac{F_{c,90,d,fi}}{A_{ef,fi}} = \frac{4032}{21497} = 0,19 N/mm^2$$

kus

$F_{c,90,d,fi}$  – arvutuslik survejõud ristikiudu tulekahjuolukorras (N), kuna antud juhul on talade samm (s) 900 mm ja sildeava (l) 5600 mm, siis

$$F_{c,90,d,fi} = Q_{fi} \times s \times \frac{l}{2} = 0,0016 \times 900 \times \frac{5600}{2} = 4032 \text{ N}$$

$A_{ef,fi}$  – efektiivne kontaktpind tulekahjuolukorras, kuna pärast 60 minutilist tulekahju on seina jääkristlõige (b) 104 mm ja laetala jääkristlõige (l) 146,7 mm, mida arvutuseeskirjade kohaselt võib suurendada mõlemale poole 30 mm võrra, siis

$$A_{ef,fi} = (l + 30 + 30) \times b = (146,7 + 30 + 30) \times 104 = 21497 \text{ mm}^2$$

**0,19 ≤ 1 × 3,13 järelikult on seina R60 tagatud**

#### 4. Laetala kandevõime kontroll, paindele, pärast 60. minutilist tulekahju

Tugevustingimus paindele on järgmine (Just, 2014, p. 68):

$$\frac{M_{d,fi}}{W_{fi}} \leq f_{m,d,fi}$$

kus

$M_{d,fi}$  – arvutuslik paindemoment tulekahjuolukorras (Nmm), kuna laetalade samm (s) on 900 mm ja sildeava (l) 5600 mm, siis

$$M_{d,fi} = \frac{Q_{fi} \times s \times l^2}{8} = \frac{0,0016 \times 900 \times 5600^2}{8} = 5644800 \text{ Nmm}$$

$W_{fi}$  – laetala vastupanumoment tulekahjuolukorras ( $\text{mm}^3$ ), kuna laetala jääkristlõige ( $D_{fi}$ ) on 146,7 ja tegemist on ümara ristlõikega, siis

$$W_{fi} = \frac{\pi \times D_{fi}^3}{32} = \frac{\pi \times 146,7^3}{32} = 309949 \text{ mm}^3$$

$$\frac{5644800}{309949} = 18,2 \text{ N/mm}^2 \leq 30 \text{ N/mm}^2 \text{ järelikult on laetala R60 tagatud}$$

## 3.4 Järeldused ja ettepanekud

### 3.4.1. Järeldused

Arvutused on tehtud konkreetse hoone põhjal ning tegemist on näitega puithoone tules käitumise ennustamisest arvutuslike meetoditega. Tehtud arvutuste põhjal selgub, et analüüsitud hoone siseseinad vastavad TP2 nõuetele:

- Siseseintel on tagatud tulekahju olukorras kandevõime 60 minutit (R60).
- Siseseintel on tagatud tulepüsivus, mis täidab terviklikkuse ja soojus- (sooja-) isolatsiooni võime 60 minutit (EI60).

Tehtud arvutuste põhjal selgub, et vahelae konstruktsioon vastab osaliselt TP2 nõuetele:

- Vahelae kandekonstruktsioonil on tagatud tulekahju olukorras kandevõime 60 minutit (R60).
- Kui vahelae konstruktsioonis on kasutatud tühimike täitmiseks klaasvilla, siis ei ole tagatud terviklikkuse ja soojus- (sooja-)isolatsiooni võime (EI60).
- Kui vahelae tühimike täitmiseks kasutada kivivilla tihedusega  $30 \text{ kg/m}^3$ , siis on tagatud terviklikkuse ja soojus-(sooja-)isolatsiooni võime (EI60).

Kuna tegemist on puithoonega, mille konstruktsioonid on tüüpiline näide selliste hoonete puhul, siis võib tehtud arvutuste põhjal teha tagasihoidliku üldistuse, et sarnaste olemasolevate kahekorruseliste hoonete puitkonstruktsioonid tagavad osaliselt kolme- kuni neljakorruselise puithoone nõutava tulepüsivuse. Kõik ohtlikum (nõrgem) koht on vahelagede terviklikkuse ja soojus-(sooja-)isolatsiooni võime.

### 3.4.2. Ettepanekud

Tehtud arvutustele tuginedes, teeb autor ettepaneku kasutada Tartu Lepiku 14 hoone vahelagede isolatsioonimaterjalina kivivilla tihedusega vähemalt  $30 \text{ kg/m}^3$ . Sellisel juhul vastavad hoone kande- ja tuletõkkekonstruktsioonide tulepüsivusajad TP2 hoone nõuetele ning võib lubada hoone kolme korruseliseks ehitamist. Erilist tähelepanu tuleb pöörata kivivilla kinnitamisele, see peab olema tõhusalt kinnitatud, kui isolatsioon kinnitatud ei ole, siis tuleb vahelae puhul arvestada, et isolatsioon variseb koos tulepoolse katte varisemisega. Ainult sellisel juhul annab kivivill täiendavat kaitse tulekahju eest. Seda

tuleb kindlasti nõuda juba projekteerimise etapis ja kindlasti tuleb seda kontrollida hoone kasutusloa menetlemisel.

Täiendavalt teeb autor ettepaneku tutvustada lõputöö tulemusi päästetöö valdkonna teenistujatele ja tuua välja, et selliste hoonete puhul on tulevikut arvestades kõige kriitilisem koht vahelagi. Sellest teadmisest on kasu õige kustutustööde taktika valimisel.

## KOKKUVÕTE

Lõputöö eesmärgiks oli uurida olemasoleva kahekorruselise puithoone konstruktsioonide tulepüsivust – kas need tagavad kolme- kuni neljakorruselise puithoone nõutava tulepüsivuse või on vajalik konstruktsioonide täiendav kaitsmine tule eest. Eesmärgi saavutamiseks selgitas autor välja kolmekorruseliste hoonetele kehtivad tuleohutusnõuded, puitkonstruktsioonide käitumise tulekahjus, võimalused nõuete täitmise tõendamiseks. Valitud hoone konstruktsioonide arvutusliku analüüsi tulemusena jõudis autor tulemuseni, et sellise hoone konstruktsioonid vastavad osaliselt nõutavale. Järelduste ja ettepanekute osas on välja toodud, et hoone siseseinad vastavad TP2 nõuetele täielikult ja nende juures ei ole vajalik kasutada täiendavat kaitset. Vahelae kandekonstruktsioon vastab nõuetele ning tuletõkestusvõime on täidetud siis, kui isolatsiooni materjaliks kasutatakse kivivilla ja see on tõhusalt kinnitatud.

Lõputöö eesmärk on täidetud, arvutuslikult on tõendatud, et selliste kahekorruseliste hoonete rekonstrueerimisel kolmekorruselisteks on tagatud kande- ja tuletõkkekonstruktsioonide tulepüsivus ning täiendavat ei ole vaja konstruktsioone tule eest kaitsta.

## SUMMARY

There are plenty of two-storey wooden apartment houses in Estonia. Many of these buildings are located in attractive urban areas where people would like to settle. In such areas, construction of new buildings is difficult as plots have been built up. Therefore, the best solution would be to build a room similar to attic or attach a floor (floors) to the existing building. During reconstruction, a residential building must be adapted to the fire safety requirements of Class TP2. The Rescue Board has no exact data on the current situation with wooden apartment houses under renovation or on the fact whether their structures comply with the recent fire safety standards. The thesis aims at analysing computationally whether the materials of the existing two-storey wooden building's structures ensure fire resistance of a three-/four-storey wooden building or whether further protection of the structures against fire is required.

The first chapter of the thesis describes the fire safety requirements to be met by a two-storey wooden building upon its reconstruction into a three-/four-storey building. The second chapter describes the reaction of wood in the case of fire as well as the calculation methods used to prove fire resistance. The third chapter analyses computationally the fire resistance of the specific two-storey wooden building's structures.

Based on the calculations performed drawing up the thesis, it was revealed that the bearing structures of the existing wooden building ensure the required carrying capacity of a three/four-storey building in the fire situation; the bearing structure will be able to withstand within sixty minutes. The thermal capacity of internal walls in the case of fire is also ensured; overall integrity and thermal capacity are ensured for a period of sixty minutes. The intermediate ceiling is a weak spot, which means that it does not ensure thermal capacity for as long as sixty minutes, provided that glass wool is used. If stone wool with the density of  $30 \text{ kg/m}^3$  is used instead, thermal capacity is certain. Special attention should be paid to fixing stone wool, which must be done with extreme care. Should insulation not be fixed properly, it must be taken into account that it will collapse alongside fire-side coating.

## VIIDATUD ALLIKAD

Adamson, T., 2014. Millist majamaterjali valida?. *Oma maja*, 05 09, Issue 8, pp. 8-13.

Artes Terrae OÜ, 2010. *Tartu Linna kodulehekülj.* [Võrgumaterjal] Available at:  
[http://www.tartu.ee/data/Supilinna\\_ruumilise\\_kujunemise\\_analyys\\_ja\\_ettepanekud\\_teema\\_planeeringu\\_koostamiseks\\_seletuskiri.pdf](http://www.tartu.ee/data/Supilinna_ruumilise_kujunemise_analyys_ja_ettepanekud_teema_planeeringu_koostamiseks_seletuskiri.pdf)  
[Kasutatud 13 aprill 2015].

Eesti Standardikeskus, 2002. *Eurokoodeks 1: Ehituskonstruksioonide koormused. Osa 1-1: Üldkoormused . Mahukaalud, omakaalud, hoonete kasuskoormused. EVS-EN 1991-1-1:2002+NA:2002.*, Tallinn: Eesti Standardikeskus.

Eesti Standardikeskus, 2007. *Eurokoodeks 5: Puitkonstruktsioonide projekteerimine. Osa 1-2: Üldist. Tulepüsivusarvutus. EVS-EN 1995-1-2:2005+NA:2006.*, Tallinn: Eesti Standardikeskus.

Eesti Standardikeskus, 2008. *Ehitiste tuleohutus. Osa 7: Ehitisele esitatava põhinõude, tuleohutusnõude tagamine projekteerimise ja ehitamise käigus. EVS-EN 812-7:2008*, Tallinn: Eesti Standardikeskus.

Eesti Standardikeskus, 2012. *Ehituspuit. Tugevusklassid. EVS-EN 338:2009.*, Tallinn: Eesti Standardikeskus.

*Ehitisele ja selle osale esitatavad tuleohutusnõuded* (2014) Vabariigi Valitsus.

*Ehitusseadus* (2002) Riigikogu.

Jalas, R., 2015. *Hoonetetulekahjud 2014. aastal*, Tallinn: Päästeamet.

Just, A., 2005. Puidu tulepüsivus. *Puuinfo*, Issue 2, pp. 23-25.

Just, A., Just, E. & Õiger, K., 2013. *Puitkonstruktsioonide erikursus. Loengu konspekt.*, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool.

Just, E., 2014. *Puitkonstruktsioonid. Publitseerimata loengu konspekt.*, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool.

Kalamees, T. et al., 2011. *Eesti eluasemefondi puitkorterelamute ehitustehniline seisukord ning prognoositav eluiga. Uuringu lõpparuanne.*, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool.

Karner, K., 2014. Tuleohutu puitmaja on reaalsus. *Ehitus*, 02 04, Issue 3, pp. 36-42.

Lõhmus, P., 2011. *Lepiku 9, Tartu linn renoveerimisprojekti seletuskiri.*. Tartu: Voluut OÜ.

Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium, 2015. *Ehitisregister*. [Võrgumaterjal] Available at: <https://www.ehr.ee/app/w/page;jsessionid=AA98E92EA9B96390403984049C1EFDDA?2> [Kasutatud 13 aprill 2015].

Muinsuskaitseamet, 2008. *Mälestis nr. 7049 Puitelamu Tartus Lepiku 14, 1907-1914.a.* [Võrgumaterjal] Available at: <http://register.muinas.ee/public.php?menuID=monument&action=view&id=7049> [Kasutatud 13 aprill 2015].

Piik, M., 2014. Ka puidust saab tuleohutult ehitada.. *Häire 112*, Issue 1, p. 36.

*Pääteseadus* (2010) Riigikogu.

SP Technical Research Institute of Sweden, 2010. *Fire safety in timber buildings. Technical guideline for Europe.*. Stockholm: SP Trätek.

Tohver, P., 2014. *Puitkonstruktsioonide tulepüsivus standardis EVS-EN 1995-1-2 ning käsiraamatus "Tuleohutud puitmajad 3" toodud arvutusmeetodite rakendamine ja võrdlus. Publitseerimata magistritöö.*, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool.

*Tuleohutuse seadus* (2010) Riigikogu.

Östman, B., 2014. *Tuleohutud puitmajad 3. versioon*. 3. toim. Tallinn: ET INFOkeskuse AS.



**LISA 1 3-4 KORRUSELISTE I KASUTUSVIISI TP2  
HOONETE TULEOHUTUS REKONSTRUEERIMISEL JA  
PEALEEHITUSEL (EESTI STANDARDIKESKUS, 2008, P.  
11)**

<b>Korruselisus</b>	<b>Kolmekorruseline</b>	<b>Neljakorruseline</b>	<b>Neljakorruseline</b>
Tingimused	Korteri evakuatsiooni tasapind III korrus	Korteri evakuatsiooni tasapind III korrus. Korteri läbi kahe korruse	Korteri evakuatsiooni tasapind IV korrus
Eritingimused	Hädaväljapääs vertikaaltasapinnas. Kõrgus alla 8,5 m maapinnast, kohtkindel redel	Hädaväljapääs vertikaaltasapinnas. Kõrgus alla 8,5 m maapinnast, kohtkindel redel	Hädaväljapääs vertikaaltasapinnas. Kui kõrgus üle 8,5 m maapinnast, siis juurdepääs redelautoga, kohtkindel redel
Lähteandmed	Ehitise ekspertiis Hinnang olemasolevale hooneosale Kandekonstruksioonid R60 Tuletõkkesektsioonide moodustamisele vajadusel ka kütteseadmetele	Ehitise ekspertiis Hinnang olemasolevale hooneosale Kandekonstruksioonid R60 Tuletõkkesektsioonide moodustamisele vajadusel ka kütteseadmetele	Ehitise ekspertiis Hinnang olemasolevale hooneosale Kandekonstruksioonid R60 Tuletõkkesektsioonide moodustamisele vajadusel ka kütteseadmetele
Tuleohutuspaigaldised	Hoones ATS. Igas korteris min 1 süsteemis andur	Terves hoones, kõikides ruumides, sh trepikojas ATS	Terves hoones AKS+ATS keskus nuppude ja kelladega
Nõuded evakuatsioonile	Trepikoda EI60	Trepikoda EI60	Trepikoda EI60
	Trepikoja tuletundlikkus B-s1,d0	Trepikoja tuletundlikkus B-s1,d0	Trepikoja tuletundlikkus B-s1,d0
Kui hoones on puidust trepp	Sprinkler trepikojas või R30, B-s1,d0 nõuetele vastav trepp	Sprinkler trepikojas või R30, B-s1,d0 nõuetele vastav trepp	Sprinkler trepikojas või R30, B-s1,d0 nõuetele vastav trepp
Välisseinad	Soojaisolatsioonimaterjali, tuuletõkke klass A2-s1,d0	Soojaisolatsioonimaterjali, tuuletõkke klass A2	Soojaisolatsioonimaterjali, tuuletõkke klass A2
	Välisviimistlus D-s2,d2 tuulutusvahe D+B	Välisviimistlus D-s2,d2 tuulutusvahe D+B	Välisviimistlus D-s2,d2 tuulutusvahe D+B
	Fassaadi korrastamisel tuulutusvahe tõkestus	Tuulutusvahe tõkestus	
	Vajadusel pääs katusele	Pääs katusele	Pääs katusele
	Muud tingimused vastavalt VV määrusele nr 315	Muud tingimused vastavalt VV määrusele nr 315	Muud tingimused vastavalt VV määrusele nr 315