



TALLINNA TEHNICAÜLIKOO
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

LIIMIDE MÕJU INSENERIPUIDUST KONSTRUKTSIOONIDE TULEPÜSIVUSELE

EFFECT OF ADHESIVES ON FIRE RESISTANCE OF ENGINEERED WOOD STRUCTURES

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Jane Liise Nurk

Üliõpilaskood: 165226EAEI

Juhendaja: Prof. Alar Just

Tallinn 2021

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

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

"24" mai 2021

Autor: Jane Liise Nurk

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

"24" mai 2021

Juhendaja: Alar Just

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."2021

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Jane Liise Nurk (sünnikuupäev: 16.08.1996)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose
LIIMIDE MÕJU INSENERIPUIDUST KONSTRUKTSIOONIDE TULEPÜSIVUSELE,

mille juhendaja on Alar Just,

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

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

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

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

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

_____ (allkiri)

_____ (kuupäev)

TTÜ Ehituse ja arhitektuuri instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Jane Liise Nurk, 165226

Õppekava, peeriala: EAEI02/15 - Ehitiste projekteerimine ja ehitusjuhtimine

Juhendaja(d): Professor Alar Just

Lõputöö teema:

Liimide mõju inseneripuidust konstruktsioonide tulepüsivusele.

Effect of adhesives on fire resistance of engineered wood structures.

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Uurida ja võrrelda erinevate liimpuidu valmistamiseks kasutatavate liimide toimimist tulekahjuolukorras.
2. Teostada koonuskuumuti katsed projekti FIRENWOOD hammasliidetega katsekehadele (11 erineva liimiga).
3. FIRENWOOD projekti raames katsetatud liimpuidu ja ristkihtpuidu tulemuste võrdlus ning analüüs.
4. Järeldused ja ettepanekud Eurokoodeks 5-1-2 tööühmale (CEN TC250 SC5 WG4).

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Lähteandmete kogumine katsekehade kohta	24.12.20
2.	Koonuskuumuti katsed hammasliidetega katsekehadega	31.03.21
3.	FIRENWOOD liimpuidu ja ristkihtpuidu katsetulemuste analüüs	15.04.21
4.	Analüüs ja järeldused	30.04.21
5.	Töö vormistamine	24.05.21

Töö keel: Eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: "24" mai 2021.a

Üliõpilane: Jane Liise Nurk "24" mai 2021 a
/allkiri/

Juhendaja: Alar Just "24" mai 2021 a
/allkiri/

SISUKORD

EESSÕNA	7
SISSEJUHATUS	8
1 PUITKONSTRUKTSIOONIDE TULEPÜSIVUS	10
1.1 Tulepüsivuse projekteerimine tulenevalt Euroopa süsteemist	10
1.1.1 Tulekahju areng ajas ning käsitusmeetodid	11
1.2 Puitkonstruktsioonide projekteerimine EN 1995-1-2 järgi	12
2 INSENERIPUIT	17
2.1 Puit	17
2.2 Liimid	18
2.3 Liimitud konstruktsioonid	19
2.3.1 Liimitud konstruktsioonid tules	21
3 PRAKTIINE OSA	23
3.1 Varasemad uuringud/katsed	23
3.2 TalTechis läbiviidud katsed	24
3.2.1 Katsekehad	24
3.2.2 Koonuskuumuti ülesseadmine	27
3.2.3 Katsemeetod	29
3.2.4 Temperatuuride mõõtmine	32
3.3 TalTechi katsete tulemused	32
3.3.1 Katsekehade järeltöötlus	32
3.3.2 Visuaalsed tähelepanekud	33
3.4 TalTechis läbiviidud katsetulemuste analüüs	35
3.4.1 Arvutatavad parameetrid	36
3.4.2 Katsemeetodi usaldusväärsus	37
3.4.3 Katsekehade purunemisajad	38
3.4.4 Söestumissügavus	39
3.4.5 Ekstsentriline tõmme	41
3.4.6 Liimide purunenud ekstsentriline tõmme	43
3.4.7 Nihkepinged jätkupindadel	44
3.4.8 Temperatuuride mõõtmised	47
3.5 Võrdlev analüüs	50
3.5.1 Sarnased katsed kipsplaadist kattega	50
3.5.2 Võrdlus ristkihtpuidu katsetega	54
3.5.3 Võrdlus I-talade tulekatsetega	57
3.6 Järeldused/ettepanekud	61
KOKKUVÕTE	63

SUMMARY	65
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	67

EESSÕNA

Antud lõputöö teema sai valituks tänu projekti FIRENWOOD initsiatiivile ning vajadusele arendada välja parem süsteem inseneripuidus kasutatavate liimide valikuks ja katsetamiseks. Lõputöö teema sõnastamisel oli suureks abiks professor Alar Just, keda sooviksin tänada kõiksuguse abi eest, mis on olnud antud lõputöö koostamisel hindamatu väärtusega.

Suur osa algandmetest on tulnud FIRENWOOD projekti raames tehtud varasemate katsete tulemustest. Sooviksin tänada kõiki, kes on seotud projektiga FIRENWOOD ning inimesi/asutusi, kes olid seotud antud töös kasutatud katsekehade tootmisega või aitasid muud moodi neid katseid ellu viia. Sooviksin tänada Magdalena Sterleyt tema panustatud arvamuste ja jagatud teadmiste eest. Analüüsi käigus osutasid need väga abistavaks.

Kõigele lisaks soovin tänada ka oma perekonda ja sõpru, kes on mulle alati inspiratsiooniks ja toeks olnud.

SISSEJUHATUS

Puit on läbi ajaloo figureerinud olulise materjalina erinevates valdkondades, seehulgas ka ehitusvaldkonnas. Puidu näol on tegemist väga heade füüsiliste omadustega taastuva ehitusmaterjaliga ning on seetõttu leidnud palju kasutust just konstruktsioonimaterjalina. Olenemata sellest esinevad selle kasutamisel piirangud, mille tõttu mõni teine materjal sobivamaks osutub. Piiranguteks võib olla näiteks tulekahju olukord, sest puit on põlev materjal ja samuti ristlõike või elemendi pikkuse dimensioonide piiratus. Suuremates ehitistes kasutamine eeldab, et konstruktsioonid peavad tulekahju olukorras vastu piisava aja hoones viibivate inimeste evakueerimiseks või tulekahju kustutamiseks.

Aja jooksul on välja kujunenud erinevaid lahendusi puitelementide jätkamiseks. Nende seas ka sõlmelahendused liimidega. Liimide abil on võimalik väiksemad puiduelemendid siduda suuremateks elementideks ning see omakorda võimaldab suurendada ristlõikeid ning elementide pikkusi ja ka parandab puidu tulepüsivust. Liimpuitkonstruktsioonide valmistamiseks on tarvis liime, mis oleksid koormuste all võrdtugevad puiduga, peaks vastu erinevates keskkonnatingimustes ning oleks vastupidavad kogu kasutusea jooksul. Üheks kõige populaarsemaks lahenduseks puitelementide jätkamisel on sõrmjätkud. Ideaalses olukorras oleks sõrmjätku tugevus tules sama mis tavalisel puitristlõikel, paratamatult aga oleneb selle sõlme püsivus just peamiselt liimi tulepüsivusest. Samas ei saa liimi tulepüsivust vaadata eraldi puidu tulepüsivusest, sest sõrmjätkus olev liim ja puit moodustavad omaette komposiitmaterjali mille tulepüsivus erineb nende materjalide tulepüsivusest eraldivaadatuna.

Inseneripuidu valmistamisel on meil kasutusel palju erinevaid liime. Esimesena olid puitkonstruktsioonides laialdasemalt kasutusel formaldehüüdliimid (RF/PRF). Nende liimide hea vastupidavuse ning tulekindluse tõttu ei peetud oluliseks nende arvestamist tulekahju arvutustes ega eraldi kirjeldamist puidu Eurokoodeksis. Mõni aeg hiljem hakkasid turule lisanduma erinevate keemiliste koostistega liimid, mis võisid mõnes aspektis olla formaldehüüdliimidest paremad, küll aga ei olnud nende liimide käitumine tulekahjuolukorras täielikult selge ning vahel oli selgelt halvem. Mõned neist osutusid vastupidavamaks kui teised. Aastate jooksul ei ole veel välja arendatud head katsemeetodit, mis aitaks hinnata erinevate liimide käitumist sellises olukorras piisava täpsuse ning usaldusväärsusega.

Leevendamaks inimeste skeptilisust inseneripuidu tulepüsivuse osas on vaja ühtset süsteemi inseneripuidu tulepüsivuse hindamiseks. Sinna hulka kuulub ka puitmaterjali

sõlmede ja jätkude tulepüsivuse hindamine. Liimi või liimi ja puidu kombinatsiooni käitumist tules ei ole võimalik ühtselt määrata, kuna puudub süsteem liimide liigitamiseks tules käitumise järgi. Sellise süsteemi tekitamiseks on vaja esialgu leida katsemeetod, mis komposiitmaterjali tulepüsivust adekvaatselt suudab määrata. Olemasolevatest katsemeetoditest on peamiselt kasutusel ruumtulekahju katsed, mis on kulukad ja võtavad palju aega. Ruumtulekahjukatsed liimide tulepüsivuse tõestamiseks on nõutavad näiteks USA-s. Euroopas on võetud suund väiksemamahuliste katsemeetodite välja töötamiseks.

Lõputöö on seotud rahvusvahelise projektiga FIRENWOOD, mille eesmärk on võrrelda erinevaid katsemeetodeid, mille põhjal oleks võimalik liimpuidus kasutatavate liimide käitumist tulekahjuolukorras ka tulevikus piisava täpsusega prognoosida. FIRENWOOD projekti raames viiakse läbi katsed nii kõrgendatud temperatuuridel, koonuskuumutis kui ka tulekatsed ahjus. Koonuskuumuti katsed viidi läbi TalTechi Puidumaja laboris antud töö koostaja poolt.

Käesolev magistritöö koosneb teoreetilisest ning katselisest osast. Teoreetiline osa annab lugejale ülevaate varem tehtud uuringutest ja projekteerimise alustest. Lähemalt kirjeldatakse puidu ning liimide põhiomadusi ning nende üldisemat käitumist tuleolukorras. Samuti on tähelepanu all süsteem puitkonstruktsioonide projekteerimiseks tulekahjuolukorras praegu ning tulevikus. Katseline osa koosneb Taltechis tehtud katsetest ning teiste katsetega tehtud katsemeetodeid võrdlevast analüüsist.

Katselises osas käsitletavates katsetes sooritatakse viielt erinevalt tootjalt pärinevate üheteistkümne erineva liimiga (PRF, PUR, MUF, MF, EPI) tulepüsivuskatseid. Katsekehade valmistamiseks kasutatud puit on pärit ühest kohast ning on sarnaste kontrollitud omadustega. Töö raames analüüsitakse katsetest tulenevat informatsiooni ning võrreldakse seda paralleelselt või varasemalt läbiviidud katsete tulemustega. Katsete ning analüüsi põhjal pakutakse Eurokoodeksi arendusrühmale välja katsemeetod liimide tulepüsivuse hindamiseks.

1 PUITKONSTRUKTSIOONIDE TULEPÜSIVUS

1.1 Tulepüsivuse projekteerimine tulenevalt Euroopa süsteemist

Inimeste ohutuse tagamiseks on oluline tagada kasutatavates ehitistes piisav tuleohutus. Eriti oluliseks muutub tuleohutus puidust hoonetes, sest puit on süttiv materjal ja võib ka ise tulekahjus osaleda. Euroopas kehtivad liikmesriikides erinevad nõuded tuleohutuse tagamiseks. Üldises pildis kasutatakse ehitustoodete ja ehitusmaterjalide omaduste nõuete kirjeldamiseks Ehitustoodete määrust (CPR), mis määrab nõuded ka konstruktsioonide tulepüsivuse osas. Ehitusmaterjalidelt ning -toodetelt võib nõuda kandevõime säilimist tulekahjuolukorras teatud aja jooksul, samuti võib nõuda piisavat terviklikkust, isolatsiooni tule ja/või suitsu eest. Oluline on ka takistada tule levikut naaberhoonetesse, tagada hoones viibivate inimeste turvaline evakuatsioon ning kaudselt arvestada päästemeeskonna turvalisusega. Tänu Ehitustoodete määrusele on üleeuroopaliselt liikmesriikide ehitusmaterjalide turud rohkem avardunud. [10] [15]

Ehitustoodete määrust täiendavad Eurokoodeksid, mis annavad ette standardid projekteerimiseks. Projekteerimisstandardeid kasutatakse koos tootestandardite ning katsestandarditega. Eurokoodeksite eesmärk on pakkuda ühiseid kriteeriume ning arvutusmeetodeid ning luua ühised arusaamad hoonete projekteerimisest omanikele, tellijatele, kasutajatele, inseneridele ja ehitusmaterjalide tootjatele. Eesmärgiks on ka võimaldada teenuste pakkumist teistel Euroopa riikide turgudel, luua ühised alustalad teaduse arenguks ning suurendada Euroopa Liidu inseneride, arhitektide ning tootjate konkurentsivõimet. Nõuded tulepüsivusele antakse igas riigis välja rahvuslike regulatsioonidena, mis annab võimaluse tähelelisi ja numbrilisi väärtuseid tulepüsivuse kirjeldamiseks valida igas liikmesriigis eraldi. Samas omavad Eurokoodeksid pigem tehnilisi juhendeid projekteerimiseks ning tegelikku ohutust reguleerib vastava liikmesriigi seadusandlus. Tulekahjukoormuseid üldiselt käsitletakse Eurokoodeksis „Eurokoodeks 1: Ehituskonstruktsioonide koormused. Osa 1-2: Üldkoormused. Tulekahjukoormus“ (edaspidi lühendatuna EN 1991-1-2) ning puidule spetsiifilisemalt Eurokoodeksis „Eurokoodeks 5: Puitkonstruktsioonide projekteerimine. Osa 1-2: Üldreeglid. Tulepüsivusarvutus“ (edaspidi lühendatuna EN 1995-1-2). [10] [15]

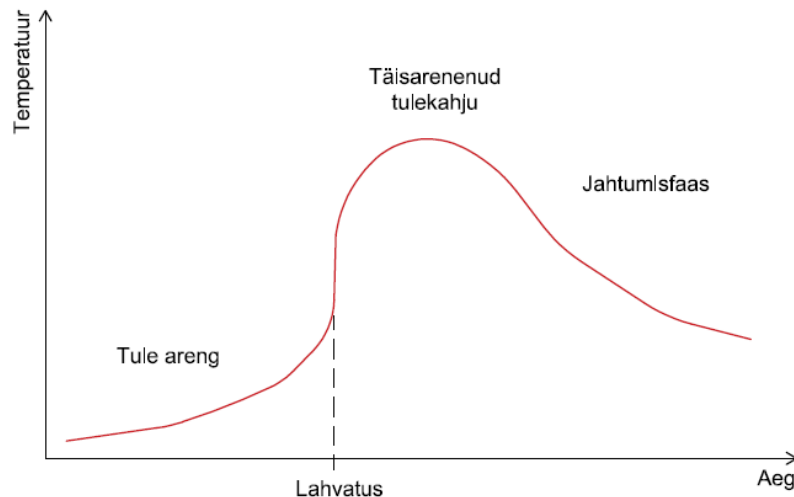
Hooneelemendi tulepüsivust on võimalik kontrollida ja tõestada kahel meetodil – katsetamise teel või arvutusmeetodite kasutamise teel. Katseandmete kasutamisel tuleb arvestada, et tulenevalt piiratud katsete arvust on tõenäoline mingisugune

statistiline kõrvalekalle. Tänapäevaste arvutusmeetodite algandmed ja parameetrid on võimalik valida nii täpselt, et konstruktsiooni käitumine on võimalikult lähedane tegelikule tulekahjuolukorrale. Sellegipoolest võib katseid olla tarvis näiteks kui vastavale olukorrale kohalduvaid arvutusmudeleid ei ole võimalik luua või kui on vaja kontrollida arvutustele eelnenud eeldusi. Mitmetes olukordades on võimalik kasutada katseandmeid ning arvutustulemusi samaaegselt üksteist täiendavalt. [10] [11]

Eelmainitud katsetena on tänapäeval peamiselt kasutusel täismõõdus katsed, mis kulutavad palju aega ning ressursse. Sellegipoolest on katsemeetodid enamasti väiksema varuga ning annavad reaalsusele täpsemaid tulemusi kui arvutusmeetodid. Nende ressursinõudlikkuse tõttu oleks efektiivne leida väikesemõõduline katsemeetod, mis võimaldab suure korduvusega katseid läbi viia võimalikult ressursisõbralikult, andes samaaegselt piisavalt täpse ja usaldusväärse tulemuse. Väikesemõõdulised katsed võimaldavad ka hõlpsasti algtingimusi muuta ning võrrelda varieeruvate tingimustega sarnaste katsete tulemusi. See sobib hästi ka arendustööks. Küll aga ei ole tänaseks päevaks veel piisava usaldusväärsusega väikesemõõdulist katsemeetodit välja arendatud. Koostöös FIREWOOD projektiga on antud lõputöös käsitletud ühte katseseeriat sõrmliidete kohta. Lisaks sellele viiakse FIREWOOD projektis läbi mitmeid katseid teiste elementidega, nii suures kui ka väikeses mõõdus, mis kokkuvõttes peaksid andma indikatsiooni katsetatud väikesemõõdulise katsemeetodi sobivusest.

1.1.1 Tulekahju areng ajas ning käsitusmeetodid

Tulekahju areng ehitises sõltub suuresti tulekahju alguspunkti läheduses olevate esemete ja materjalide süttivusest aga samuti ka ruumi geometriast, dimensioonidest ning ventilatsioonist. Süttimisel võib tuli areneda väga kiiresti, väga aeglaselt (hõõgumine) või üldse iseeneslikult ära kustuda. Tulekahju arengut ajas iseloomustab joonis 1. [10]



Joonis 1. Tulekahju areng ajas.

Tulekahju saab enamasti alguse tulepesast, selleks võib olla mõni toas asetsev ese, elektrijuhe või lahtine leek. Kui hoones olevad aknad on terved, puudub õhu pealevool ning hapnikku on vähe. Kuumuse arenedes purunevad võrreldes teiste tarinditega kõige kiiremini just aknaklaasid. Akende või muude konstruktsioonide purunemine annab võimaluse hapniku pealevooluks ning tulekahju lahvatab ning areneb täispõlengufaasi. Täispõlengufaasis võtavad tuld kõik vähegi süttivad esemed ja konstruktsioonid. Seejärel algab tulekahju jahtumine, see võib toimuda kogu põlevaine ära põlemise tõttu, päästetööde tulemusena või lisanduva hapniku puuduse tõttu. [14]

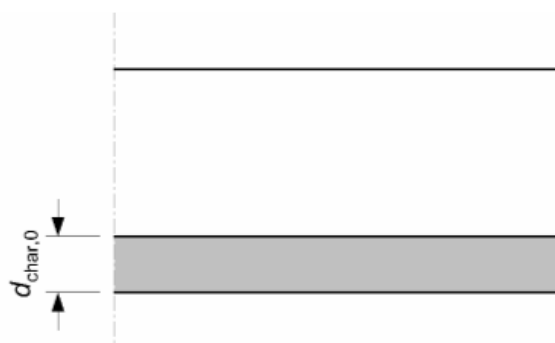
Ehitusmaterjalide puhul saab tulekahju puhul kriitiliseks enne tule arenemist juba ka kõrgenev temperatuur, sest materjalide füüsilised ja termilised omadused muutuvad temperatuuri tõustes. Seega on tulekahju arvutustes üheks kõige olulisemaks osaks just temperatuuri- ja ajagraafik. [10]

1.2 Puitkonstruktsioonide projekteerimine EN 1995-1-2 järgi

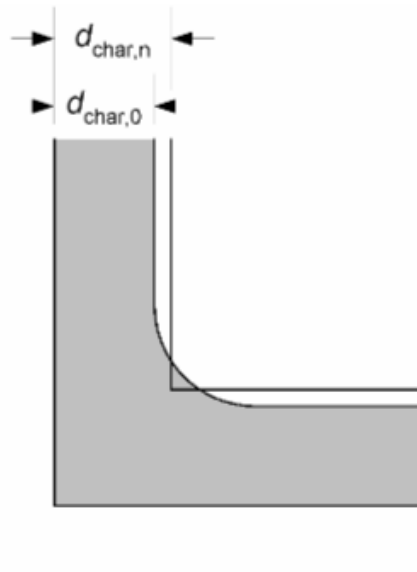
Eestis kehtivad kõik Euroopa standardid. Puitkonstruktsioonide tulepüsivuse projekteerimiseks kasutatakse Euroopas välja antud standardit Eurokoodeks 5 Osa 1.2. Lisaks põhitekstile on välja antud ka rahvuslik lisa, mis annab ette teatud osavarutegurite ning muude vajalike arvväärtuste kohalikud väärtused. Hetkel

kasutuses olevas versioonis ei ole käsitletud liimpuidus kasutatavate liimide tulepüsivust ega ka aktiivseid tulekaitsemeetmeid. [7] [15]

Puidu puhul tuleb arvutustes alati arvesse võtta söestumist ning temperatuuri mõju puidu tugevus- ning jäikusomadustele. Söestumissügavus on algse elemendi ning söestumispiiri vaheline pikkus, see sõltub puidu tihedusest, kiudude suunast, niiskusesisaldusest ning ka soojuse mõjust ning ei olene elemendi pinna suunast (horisontaalne/vertikaalne). Tegelikku söestumist ainult tulele avatud pinnal nimetatakse ühemõõtmeliseks söestumiseks (joonis 2). Söestumine kahel ristaval küljel tähendab, et nurga piirkonnas on söestumine ulatuslikum. Tekib nurkade ümardumine (joonis 3). Seehulgas võetakse söestumispiiri asetuseks 300 kraadi temperatuurijoon. Arvutusmeetodis asendatakse ümardatud nurkadega ristlõige lihtsustatud riskülikuga, millel on sama vastupanumoment. Erinevatel puidutüüpidel on leitud erinevad arvutuslikud söestumismäärad, mis arvestavad vastava puiduliigi keemilist koostist ja eripärasid. [7] [15]

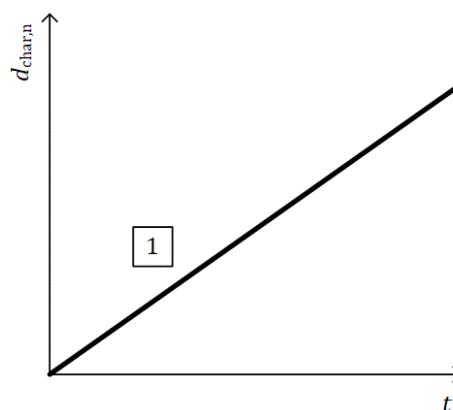


Joonis 2. Ühemõõtmeline söestumine (kui tulele on avatud vaid üks külg). [7]

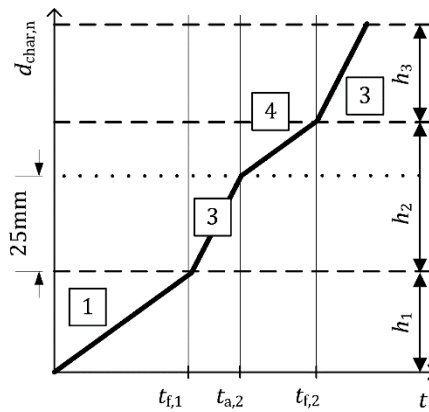


Joonis 3. Söestumissügavus $d_{char,0}$ ühemõõtlemlisel söestumisel ja kujuteldav söestumissügavus $d_{char,n}$. [7]

Hetkel kasutatavas standardis võetakse katmata puidu söestumiskiirus kogu põlemise käigus konstantseks ning eeldatakse, et kogu põlemise jooksul ei toimu söe ära kukkumist, seda iseloomustab joonis 4. Söestumiskiiruse väärtus võib sõltuda olenevalt puidutüübist (okas- või lehtpuit), tihedusest või spetsiifilisest tootest. Uues Eurokoodis (EN1995-1-2:2020) võetakse teatud juhtudel kasutusele astmemudel, mis arvestab, et lamelli söestumisel kaitseb tekkiv söekiht selle taga asuvat puitu (lamelli) kuni ära kukkumiseni, misjärel selle taga asuva puidu söestumine kiireneb. Seda protsessi iseloomustab joonis 5. [7] [13]

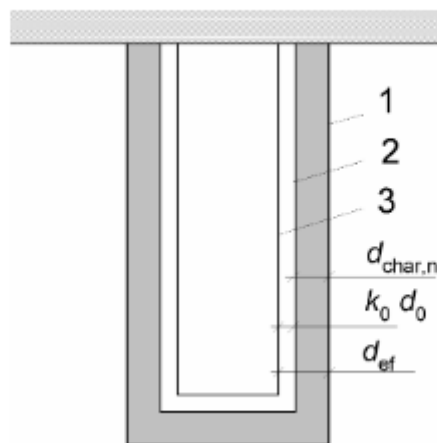


Joonis 4. Kaitsmata puidu lineaarne söestumine (lineaarne mudel). [13]



Joonis 5. Kaitsmata puidu astmeline söestumine (astmemudel). [13]

Kehtiva Eurokoodeksi alusel arvutatakse lihtsustatud meetodina puitelemendi tugevus efektiivristlõikemeetodil. Efektiivristlõikemeetod põhineb algse ristlõike vähendamisel efektiivse söestumissügavuse d_{ef} võrra. Söestussügavus koosneb kahest komponendist, tinglikust söestumissügavusest $d_{char,n}$ ja liikmest $k_0 \cdot d_0$, kus d_0 on söestunud puidu allesjäänud ristlõike nullkihi paksus ning k_0 on ajast sõltuv tegur. Selle liikmega arvestatakse, et söestumisjoone lähedal asuv materjalikiht on ilma tugevuse ja jäikuseta ning ei võeta seega ka ristlõike arvutamisel arvesse. Mainitud suurused on näidatud joonisel 6. [7]



Joonis 6. Söestunud ristlõiget iseloomustavad suurused. [7]

Teise võimalusena on praeguse Eurokoodeksi alusel võimalik ristlõiget arvutada ka vähendatud tugevus- ja jäikuseomaduste meetodil. Uues Eurokoodeksis jäetakse alles ainult efektiivristlõike meetod seetõttu, et seda meetodit on rohkem arendatud ning paralleelsed meetodid tekitavad kasutajates segadust. Samuti on efektiivristlõikemeetod kasutamiseks mugavam, sest allesjäänud ristlõikele kehtivad samad tugevus- ning jäikusomadused mis algsele ristlõikelegi. [7] [13]

Praegune standard EN 1995-1-2:2004 näeb ette, et kandekonstruktsioonides kasutatav liim võib olla standardi EN 301 kohane fenool-formaldehüüd või aminoplastne tüüp 1 liim ning peab olema sellise tugevuse ja kestvusega, et liite terviklikkus on nõuetekohase tulepüsivusaja kestel tagatud. Kusjuures tuleb kuumakindlaid liime standardi EN 301 alusel katsetada temperatuuril 90°C ning mitte otseselt tuleolukorras. Seega ei ole praeguse standardi alusel lubatud kasutada liime, mis tegelikkuses on juba aastakümneid kasutuses olnud. Uuendatud standardis (EN 1995-1-2:2020) on välja toodud kõik praegu kasutatavad asjakohased liimid. [7] [13]

Käesolevas töös tehtud ja analüüsitud katsed näitavad selgelt, et 90°C kriteerium ei iseloomusta veel liimi käitumist tulekahjuolukorras.

2 INSENERIPUIT

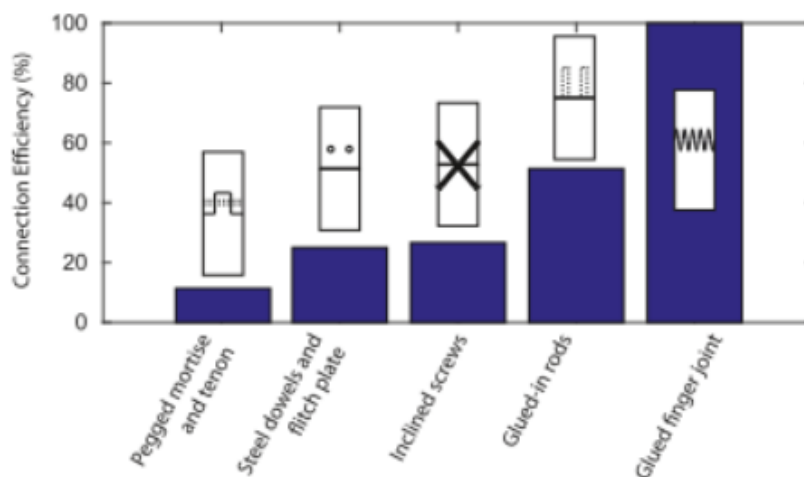
2.1 Puit

Puitmaterjal on läbi ajaloo olnud üks populaarsemaid taastuvaid materjale ning seda ka ehitusvaldkonnas. Puit konstruktsioonimaterjalina peab hoonetes vastu pidama koormustele ning keskkonnatingimustele terve ehitise eluea jooksul. Puidu kasutamine just konstruktsioonimaterjalina omab väga suurt potentsiaali, ometi on puitmaterjali kasutamisele ehituses seatud võrdlemisi karmid piirangud. Suures osas on need piirangud seotud puudulikke teadmiste ning kogemuste tõttu ja seda just tulepüsivuse osas. [15] [16]

Puidu puhul on tegemist esteetiliselt meeldiva tekstuuri ja välimusega materjaliga ning kasutatakse nii kandekonstruktsioonide materjalina kui ka viimistlusmaterjalina. Puidul on võrreldes teiste materjalidega ka hea tugevuse-kaalu suhe ja madalam soojusjuhtivus. Peamine energia puidutööstuses kuulub kuivatamisele ning liimide tootmisele, ometi on puidu keskkonnamõju ning tootmisele kuuluv energiakulu oluliselt madalam võrreldes teiste ehitusmaterjalidega ning teeb puidust jätkusuutliku (juhul, kui mets uueneb) ja keskkonnasõbraliku alternatiivi teistele ehitusmaterjalidele. [15] [16] [18]

Puiduliigid jagatakse suures pildis kaheks: lehtpuit ning okaspuit. Kõikidel puiduliikidel saab ristlõikes eristada erinevate tööülesannetega kihte. Suures pildis jaguneb ristlõige lülipuiduks ning maltspuiduks. Esimese ülesanne on peamiselt anda puule tugevus. Maltspuidu sees toimub toitainete säilitamine ning transportimine. Mõlemat kihti iseloomustavad aastarõngad, mis tekivad aastaegade vaheldumise tõttu. [18]

Puitmaterjali jäikus ning mingil määral ka tugevus on madalamad nii betoon- kui ka terasmaterjali omadest, samas on puidu eeliseks väiksem tihedus, mis annab eelise puidule olukordades, kus suurte elementide peamiseks koormuseks on elemendi omakaal. Samuti on puitkonstruktsioone kasutades kriitiliseks kohaks kandvate elementide sõlmede lahendamine. Sõlme efektiivsus on seda suurem, mida lähemal on see elemendi enda tugevusele. Nagu näha joonisel 7, on kõige efektiivsemateks jätkudeks sõlmedes liimitud sõrmjätkud (*glued finger joint*). [16]



Joonis 7. Erinevate sõlmühenduste efektiivsused. [16]

Kuna puidu puhul on tegemist looduslikult kasvanud materjaliga, varieeruvad tema omadused suuresti olenevalt kasvutingimustest, liigist jne. Anisotroopse materjalina on puidu tugevus ja jäikus kiu suunaga paralleelses suunas suuremad kui ristuvast suunas. Neid omadusi on oluline võtta arvesse puidu projekteerimisel. Seega inseneripuiduna kasutamiseks peab puit olema tugevussorteeritud, sellega tagatakse materjalil vajalik tugevus 95% tõenäosusega. [16] [18]

Ehitusmaterjalina kasutatavas puidus on veel oluline ka niiskussisaldus. Tegu on hügrokoopse materjaliga ehk puidu omadused olenevalt suuresti tema niiskussisaldusest. Puidu liigestest kuivamisest tulenev mahukahanemine võib tekitada puidus lisapingeid. Selle vältimiseks tuleks enne kasutust niiskustase saada ligilähedaseks vastavalt selle keskkonna omaga, kus antud elementi kasutama hakatakse. [18]

2.2 Liimid

Liimid on olnud kandvate puitkonstruktsioonide tootmise juures kasutusel sellest ajast, kui tekkis vajadus suuremate elementide järele. Nende kasutuselevõtu algusaastatel, 1930. aastatel, olid kasutusel peamiselt ühte sorti liimid – (fenool)-resortsinool-formaldehüüde (RF/PRF) sisaldavad liimid. Antud töö mahukusest tulenevalt jäetakse suuresti kõrvale liimide keemilised koostised. Seda ka põhjusel, et uuritavate liimide täpsed keemilised koostised on lõputöö koostajale konfidentsiaalsuslepingu tõttu

teadmata. Sellegipoolest olgu täpsustuseks öeldud, et formaldehüüdi puhul on tegemist kantserogeense inimesel ülitundlikkust põhjustava ainega. [5]

Formaldehüüde sisaldavad liimid on olnud kasutusel aastakümneid ning selle aja jooksul tehtud arvukad katsed on näidanud, et tegemist on väga vastupidavate liimidega ning seda ka kõrgemate temperatuuride korral. Need liimid olid suuresti kasutusel ajal, mil koostati olemasolevaid standardeid. Seetõttu ei ole ka praeguses standardis arvestatud liimi mõjuga tulekahjuolukorras. Alates 1970. aastatest on turule lisandunud erinevate keemiliste koostistega liime, näiteks polüuretaanliimid (PU/PUR), melamiinliimid (MUF/MF), emulsioon-polümeer-isotsüanaat-liimid (EPI) ning polüvinüülatsetaat liimid (PVA). Igal liimil on omad eelised, mõni liim on võrreldes formaldehüüdi sisaldavate liimidega näiteks odavam, kiiremini tahenev või hoopiski niiskusele vähem tundlik. Eelnevalt mainitud formaldehüüdide tervist kahjustavatest omadustest tulenevalt on need tänaseks suuresti Euroopas kasutusest eemaldatud. [5] [6] [8]

Ristkihtpuidu turule tulekuga on hakatud suuresti kasutama just PUR liime. Polüuretaanliimide (ühekomponentsete) eeliseks on kiire tahenemine ilma kuumutamisetä, lihtne kasutamine, hea vastupidavus, suurepärased tugevusomadused ning läbipaistev värv. Need värvid tahenevad kasutades ära puidu sees olevat niiskust. Erinevate ühekomponentsete polüuretaanliimide katsetamisel lõikejõule kõrgendatud temperatuuridel avastati, et ükski liimidest ei käitu ühtemoodi. Järeldati, et ainuüksi liimi tüübi järgi ei ole võimalik hinnata liimide vastupidavust kõrgematel temperatuuridel ning iga liimi kuumakindlust tuleks eraldi hinnata. Kõige efektiivsem meetod oleks seda teha katsetega, mida on võimalik läbi viia võimalikult kiiresti ja odavalt. [8]

Uute liimide turule ilmumisega on vaja üle vaadata standardis esitatud nõuded seetõttu, et osad liimid koosnevad ka ainetest, mis pole praeguses standardi versioonis kirjeldatud. Samas võivad need liimid olla konstruktsioonides kasutatuna väga efektiivsed. Küll aga on küsitav nende liimide tulepüsivus. Seetõttu on vaja arendada välja väikesemõõduline katsemeetod, mis aitaks suhteliselt odavalt, kiiresti ning lihtsasti korratavalt määrata erinevate keemiliste koostistega liimide tulekindlust. [7]

2.3 Liimitud konstruktsioonid

Suurenenud mahtude ning suuremate ambitsioonide tõttu arhitektuuri vallas on nõudmised puitmaterjalile suurenenud. Vajatakse aina suuremaid ristlõikeid ning

pikemaid elemente. Arvestades, et puitmaterjali on saepuiduna võimalik saada piiratud suuruses ja pikkuses, hakati saepuitu kokku liimima ning saadigi tulemusena lamell-liimpuit. Tänu sellele on võimalik elemente toota paljudes erinevates suurustes, nii sirgete kui kõverjooneliste elementidena ning samuti on võimalik toota muutuva ristlõikega elemente. [5]

Kuigi elementide jätkamiseks on ka muid variante, on liimide eeliseks võimalus erinevaid materjale hõlpsasti kombineerida, jagada pingeid suurema pinna peale ja ühtlasemalt (võrreldes näiteks kruvide või naeltega) ning liimide omadus heli ja vibratsioone paremini hajutada. Lisaks sellele on võimalik paljude väiksemate puidust elementide kokku liimimisel tagada homogeensem lõpp-produkt. Liimide kasutamisel ehituses tuleb aga ka arvestada nende piirangutega. Liimimise protsess on keerukas ning vajab põhjalikke teadmisi ja kogemust tagamaks kvaliteetne toode. Paljude liimide puhul tuleb arvestada kasutamisel ka niiskuse ning temperatuuri mõjudega. [6]

Samuti nagu tavapärase saepuidu puhul tugevussorteeritakse ka lamell-liimpuidus kasutatavad lamellid. Lamell-liimpuitu saab jagada lamellide tugevuse alusel kaheks – kombineeritud ning homogeenne liimpuit. Esimese puhul on tegu liimpuiduga, kus välimised lamellid on tugevamast puidust ning sisemised nõrgemast puidust. Homogeense liimpuidu korral on kõik lamellid ühe ja sama tugevusega puidust. Lamell-liimpuidu korral on lamellide kiud kõik paralleelsed. Sellist liimpuitu, mille kiudude suund erinevates kihtides erineb, nimetatakse ristkihtpuiduks. Lisaks lamell-liimpuidule kuuluvad inseneripuidu alla ka näiteks sõrmjätkatud puit, vineer, spoonliimpuit, vineerribapuit, spoonribapuit, puitkiudplaadid, puitlaastplaadid ja ka OSB plaadid. Samuti liimliitega koostatud kergkonstruktsioonimaterjalid (I-talad, karpelemendid). Arvatakse, et kuni 75% ulatuses kogu puitmaterjali toodangus kasutatakse liime. [5] [17]

Elementide pikkuse suurendamiseks on võimalik liimpuidus olevaid lamelle jätkata erinevate sõlmede abil. Populaarsemaiks neist on sõrmjätkud ehk hammasliited. Enne sõrmjätkude avastamist liimiti elemendid ots-otsaga kokku, et suurendada elementide pikkuseid, kuid peagi avastati, et antud sõlm ei olnud kuigi tugevuskindel. Ots otsaga elemente kokku liimides ei suudetud saavutada sama tugevust kui puidul. Katsetades leiti, et tugevus paraneb kui elemendid on lõigatud teatud nurga all ning seejärel kokku liimitud. Arendati sõrmjätkud ehk hammasliited, mille puhul andis liimitud sõlm tavaristlõikele sarnaseid tugevusväärtuseid. Peamised nõuded lamell-liimpuidule ning ka hammasliidetele on toodud standardis EN 14080. [2] [9]

Anisotroopse materjalina oleneb puidu puhul liimimise kvaliteet liimitava pinna kiu suunast. Erinevates kiudude suundades eksisteerivad puidul erinevad niiskus- ning mehaanilised omadused. Mehaaniliste omaduste puhul on oluliseks teguriks tihedus. Suurem tihedus tähendab kompaktsemat struktuuri ja kompaktsemat struktuuri on raskem liimida. [6]

2.3.1 Liimitud konstruktsioonid tules

Puitmaterjal koosneb 50% tselluloosist, 25% hemitselluloosist ja 25% ligniinist. Puitu kuumutades aina kõrgematel temperatuuridel hakkavad puidu struktuuris toimuma muutused, mis kiirenevad temperatuuri tõustes. Umbes 100°C ning 200°C vahel aurustub puidust suurem osa veest. Kõrgete temperatuuride juures toimuvat lagunemise protsessi nimetatakse pürolüüsiks. Eelmainitud kolm osakomponenti hakkavad lagunema süttivateks gaasideks, tõrvaks ning söeks. Esimesena laguneb hemitselluloos (180 – 350°C), seejärel tselluloos (275 - 350°C) ning viimasena ligniin (250 - 500°C). Põlevad gaasid puutuvad lendlemisel kokku hapnikuga, mille tagajärjel leiab aset süttimine ning hakkab moodustuma süsi. [12]

Puidu puhul on selle tulepüsivuse hindamiseks kindlaks tehtud erinevate puidutüüpide söestumiskiirused. Söestumiskiirus iseloomustab söekihi paksust, mis moodustub teatud ajaühiku jooksul. Selle tulemusena jääb ristlõikest alles efektiivne ristlõige, mis ei arvesta söestunud ning tugevusetu osa. Söestumiskiir võetakse 300°C kraadi juurde. Lineaarsel söestumisel võetakse söestumismäär ühtlaseks kogu aja jooksul. Uuendatud Eurokoodeksis EN 1995-1-2:2020 tuuakse sisse ka astmemudel, mida kirjeldati varasemas osas 1.2. [7] [16]

Puidu tugevus ning jäikus on otseselt sõltuvad temperatuurist ning vähenevad temperatuuri tõustes oluliselt kiiremini kui näiteks betoonil või terasel. Samas on puidul ka eelis näiteks terase ees. Nimelt kaitseb (töötab isolatsioonikihina) moodustunud söekiht veel kahjustamata puitu süttimise eest, samas kui terase suure soojusjuhtivuse tõttu kuumeneb kogu ristlõige üsna kiiresti ning ühtlaselt. Tänu erinevatele vahenditele on võimalik puit muuta raskemini süttivaks, kuid sellegipoolest mitte täielikult mittepõlevaks. [15] [16]

Nagu eelnevalt mainitud, on liimpuidu tulepüsivuse puhul peamiselt uuritud formaldehüüde sisaldavaid liime. Tänapäevaks on lisandunud palju erinevaid liime ning tulevikus tuleb juurde aina rohkem uusi liime, mida on võimalik ehituses kasutada. Kuna

PRF liime on palju uuritud ja tules vastupidavad, saab neid tulemusi kasutada nii-öelda etalonina võrdlemaks teiste liimidega. [6]

Antud lõputöö raames läbiviidud katsed uurivad katsekehi tulekahju olukorras. Tuleb arvestada, et kogu konstruktsioon (seehulgas liimid) võivad ainult kuumutamisel (süttimist ei toimu) käituda hoopis teisiti kui tules.

3 PRAKTILINE OSA

3.1 Varasemad uuringud/katsed

Liimide tulepüsivus on aktuaalseks teemaks saanud alles viimaste aastakümnete jooksul, kui turule tulid paljud erinevate keemiliste koostistega liimid. Varasemad katsed ning uuringud on sõrmjätküde osas viidud peamiselt läbi normaaltemperatuuri juures, kuumade temperatuuride ning tulepüsivuse osas leidub täna veel üpris vähe informatsiooni. [5]

1960. aastatel erinevate liimpuittaladega läbiviidud tulekatsetes liimide mõju elemendi tulepüsivusele ei täheldatud. Küll aga näitasid 1980. aastatel läbiviidud katsed, et temperatuuri tõusmisel osutus tundlikumaks RF liimide asemel hoopis puit. Samuti viidi läbi katsed analüüsima temperatuuri mõju sõrmjätküde tõmbetugevusele. Katsetest selgus, et 90 kraadise kuumuse juures osutus sõrmjätküde tõmbetugevus nõrgemaks kui tavalise puidu tõmbetugevus. [5]

2010. aastatel võrreldi katsetes PVA ning RF liime, tulemusena jõuti järeldusele, et RF liimid andsid tulepüsivuse kohapealt paremaid tulemusi kui PVA liimid. [5]

Praegu tegeleb selle valdkonna arendamisega Euroopa teadusrahastuse ERA-Net toel läbiviidav teadus- ja arendusprojekt FIRENWOOD, kellega koostöös on läbiviidud ka selles lõputöös kirjeldatavad katsed.

FIRENWOOD projektis valiti välja 11 erinevat liimi (PRF, PUR, MUF, MF, EPI) 5 erinevalt tootjalt. Kõigi liimidega teostatakse katsed kõrgendatud temperatuuri juures, koonuskuumutis ning tulekatsed ahjus, erineva konfiguratsiooni ning suurusega katsekehadega. Katsekehade valmistamiseks kasutatud puit on pärit ühest kohast ning on sarnaste kontrollitud omadustega. Tihedus jääb vahemikku 430 ... 480 kg/m³. Projekti eesmärk on võrrelda katsemeetodeid, mitte liime. Kuna kasutatud liimide info on konfidentsiaalne, siis liime ning nende tootjaid pole antud lõputöös võimalik avaldada. Küll aga on võimalik avaldada, et liim number kaks puhul on tegur PRF-iga. See informatsioon on vajalik, et oleks etalon, millega teisi liime võrrelda.

Projekti partneriteks on Euroopa selle ala põhilised kompetentsikeskused:

RISE Fire Research (Norra) on kompetentsikeskus tulekatsete alal. RISE (Rootsi) on välja töötanud arvutusmeetodid praegu kehtiva Eurokoodeksi EN 1995-1-2:2004 jaoks. MPA University Stuttgart (Saksamaa) on kompetentsikeskuseks liimide ja liimpuidu alal. MPA Stuttgart esindaja Dr. Simon Aicher juhib liimide standardiseerimiskomiteed CEN

TC193. Samuti on MPA Stuttgart poolt välja antud 90% Euroopa liimpuidutööstuse tootesertifikaatidest. TalTech on kompetentsikeskus puitkonstruktsioonide tulepüsivuse arvutusmeetodite arendamisel. Müncheni tehnikaülikool (TUM, Saksamaa) omab suurt tulepüsivuse alast kompetentsi. Projektis tegeleb TUM sisseliimitud terasvarraste uurimisega. ETH (Šveits) on juhtiv tehnikaülikool. ETH esindaja juhib ka uue Eurokoodeksi 5-1-2 koostamise töögruppi. Tööstuspartneriteks on FIRENWOOD projektis Moelven, Splitkon ja Masonite Beams.

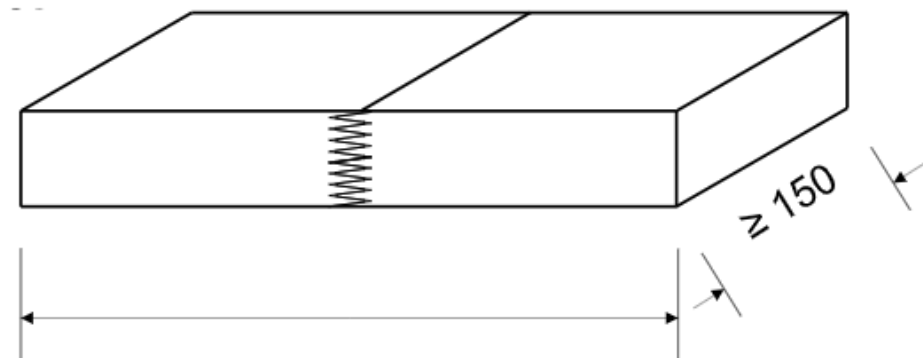
3.2 TalTechis läbiviidud katsed

3.2.1 Katsekehad

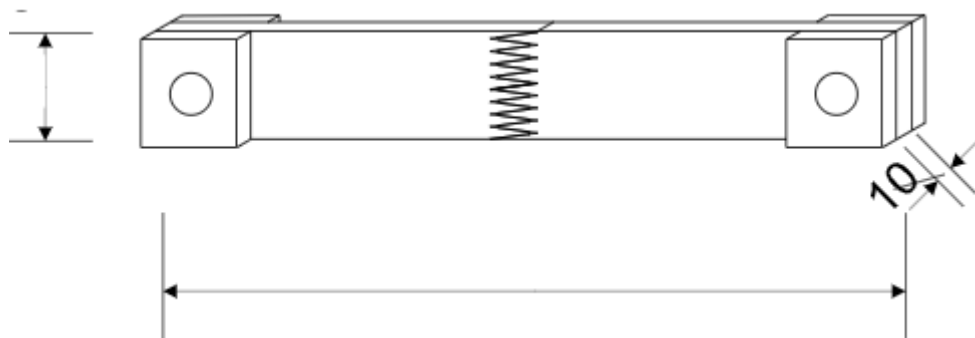
Üheteistkümne liimi katsetamiseks Eestis olid katsekehad eelnevalt ettevalmistatud liimide tootjate poolt. Liimidena läksid katsetamisele (fenool)-resortsinool-formaldehüüdid, polüuretaanliimid (PU/PUR), melamiinliimid (MUF/MF) ja emulsioon-polümeer-isotsüanaat-liimid (EPI). Liimimisprotsess oli jälgimise all FIRENWOODi poolt ning kasutatud puit tuli kõikidele erinevatele katsetele ühest ja samast kohast. Võimalike katsekehade hulgast valiti välja 55 hammasliidetega katsekeha, 3 oksakohata ja 3 oksakohata katsekeha ning 3 hammasliiteta katsekeha. 33 katsekeha said katsetamisel koormuseks 200kg, mis on umbes 10% puitmaterjali keskmisest tõmbetugevusest normaaltemperatuuril. 22 katsekeha puhul rakendati koormusena 100kg, mis on ligikaudu 5% puitmaterjalide keskmisest tõmbetugevusest. Erinevate liimide puhul kasutatud erinevad puitmaterjalid olid eelnevalt tugevusele katsetatud ning nende keskmised tihedused ja tugevused anti TalTechi katsete läbiviijatele ette (tabel 1). Tabelist nähtub, et kuigi kõikide katsekehade tihedused on sarnased, erinevad nende tõmbetugevused oluliselt. See on aspekt, mida tuleb puitmaterjali projekteerimisel alati arvesse võtta.

Katsekehad olid suurusega 300 mm x 45 mm x 10 mm. Liimimisprotsessis liimiti sõrmjätkudega kokku lauad, millest hiljem lõigati katsekehad (joonis 8 ja 9). Katsekehade hulgast valiti katsetamiseks välja võimalikult väheste oksakohtade ning defektidega katsekehad, et vältida nende võimalikku mõju katsetulemustele. Sellegipoolest oli katsekehade arv piiratud ning osade liimide puhul tuli katsetada ka väikeste oksakohtadega katsekehi. Juhul kui tulemused eelnevatest oluliselt erinesid või

katsekeha purunes varakult, neid tulemusi arvesse ei võetud ning katseid korraldati uute katsekehadega.



Joonis 8. Algne liimitav element.



Joonis 9. Katsetatav element.

Katsekehade nimetus koosneb liimi numbrist, millele järgneb puidu number ning sellele omakorda katsekeha enda number, eristamaks sama liimi ja puidutüübiga katsekehi. Katsetamisvälistel aegadel hoiti katsekehi kontrollitud temperatuuril 20°C ja suhtelise õhuniiskusega 65% ruumis ning võeti välja katsetamise hetkeks, tagades kõikide katsekehade ühtlane niiskussisaldus.

Katsekehade ettevalmistus katseteks nägi ette nende tugevdamist ottest 45 mm x 45 mm vineeriplaatidega ning aukude puurimist nende ankurdamiseks ja kinnitamiseks. Vineeritükid liimiti katsekeha külge ning vajadusel tugevdati lisakruvidega. Tugevdatavate vineeride eesmärk oli aidata vältida tõmbejõu mõjul purunemist kinnituskohades. Jõu rakendamiseks kasutati polte läbimõõduga 10 mm. Vastavad augud olid puuritud läbimõõduga 12 mm. Poldid valiti väiksemad, sest katsekeha paigutamisel koormuse alla tuleb toimetada kiiresti ja mängimisruumi on vähe. On oluline, et polt mahuks vähese vaevaga auku.

Kõikidest katsekehadest tehti pildid enne ja pärast katseid.

Tabel 1. Katsekehade keskmised tihedused ja purustavad tõmbejõud.

Liim	Puit	Jrk nr	Tihedus, kg/m ³	Purustav koormus, N	Keskmine tihedus , kg/m ³	Keskmine purustav koormus, N
1	1	1	484	17240	474.4	16908
1	1	2	484	15862		
1	1	3	484	17622		
1	2	1	460	20951		21187
1	2	2	460	21423		
2	1	1	489	22469	477.4	24421
2	1	2	489	26224		
2	1	3	489	24571		
2	2	1	460	18671		18248
2	2	2	460	17825		
3	1	1	484	18600	472	17677
3	1	2	484	15815		
3	1	3	484	18615		
3	2	1	454	17400		21126
3	2	2	454	24852		
4	4	1	489	26833	474.6	28269
4	4	2	489	33330		
4	4	3	489	24643		
4	1	1	453	16288		17098
4	1	2	453	17908		
5	3	1	471	19156	474.4	19051
5	3	2	471	17421		
5	3	3	471	20577		
5	1	1	467	19533		20366
5	1	2	467	21199		
6	3	1	480	22416	472.8	22284
6	3	2	480	21191		
6	3	3	480	23245		
6	1	1	462	19443		18869
6	1	2	462	18295		
7	2	1	473	15808	479.4	20002

Liim	Puit	Jrk nr	Tihedus, kg/m ³	Purustav koormus, N	Keskmine tihedus, kg/m ³	Keskmine purustav koormus, N
7	2	2	473	27923		19589
7	2	3	473	16275		
7	4	1	489	19520		
7	4	2	489	19657		
8	1	1	485	23054	477.8	18692
8	1	2	485	18018		
8	1	3	485	15005		
8	2	1	467	12800		14586
8	2	2	467	16372		
9	1	1	480	14277	472.8	16767
9	1	2	480	19097		
9	1	3	480	16927		
9	2	1	462	15965		15983
9	2	2	462	16000		
11	1	1	482	19475	476	20357
11	1	2	482	20069		
11	1	3	482	21526		
11	2	1	467	19587		22810
11	2	2	467	26033		
12	2	1	471	23484	481.8	21921
12	2	2	471	22265		
12	2	3	471	20015		
12	4	1	498	21450		19992
12	4	2	498	18533		

3.2.2 Koonuskuumuti ülesseadmine

Lõputöö raames viidi koonuskalorimeetriga (ISO 5660) läbi koormatud hammasliidetega katsekehade tulepüsivuskatsed TalTechi Puidumajas. Katsete eesmärk oli analüüsida sõrmjätkude tugevust ühtlase soojusvooga tõmbekatses, samuti tuli hinnata puidu tiheduse mõju katsekehade söestumiskiirusele ning purunemise põhjuseid.

Koonuskalorimeeter (joonis 10) on sagedasti kasutatav aparaat ehitusmaterjalide tulepüsivusega seotud katsetes. Koonuskalorimeeter imiteerib tulekahju olukorda andes

välja soovitud soojusvoo (tavapäraselt 50 kW/m^2). Meie katsetes ei kasutata ära koonuskalorimeetri kõiki võimalusi (näiteks põlevate gaaside koostise määramist jm), seega nimetame selle edaspidi antud katsete puhul koonuskuumutiks. [19]

Erinevatel päevadel tehtud katsete jaoks tuli koonuskuumuti iga kord uuesti kalibreerida, sest nõutud soojusvoo tagamist võivad ruumis mõjutada selle ruumi temperatuur, õhurõhk ja muud tegurid.

Kalibreerimine toimus voltmeetri abil. Koonuskuumuti alla asetati seade (joonis 11), mille temperatuuri mõõtev osa pidi jääma koonuskuumuti keskele ning mille tipp pidi olema 25 mm allpool kuumuti pinnast. Seade ühendati voltmeetriga ning sellest voolas läbi ka jahutav veejuga. Nende seadmete abil sai koonuskuumuti temperatuuri aeg-ajalt tõstes kätte antud päeva tingimustes sobiva temperatuuri, mille korral soojusvoog oli 50 kW/m^2 (ühtlasi $3,89\text{ mV} \pm 0,01\text{ mV}$). Kõikidel päevadel jäi see temperatuur ligikaudu $700\text{ }^\circ\text{C}$ juurde ($\pm 5\text{ }^\circ\text{C}$).



Joonis 10. Koonuskuumuti Tallinna Tehnikaülikooli Puidumaja laboris.

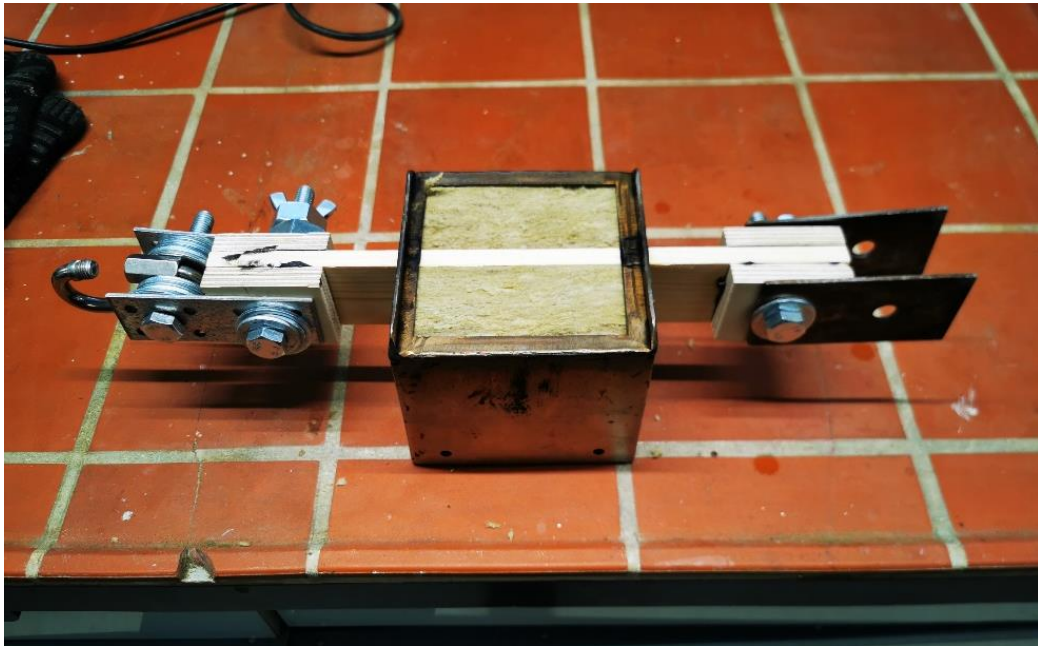


Joonis 11. Seade soojusvoo määramiseks.

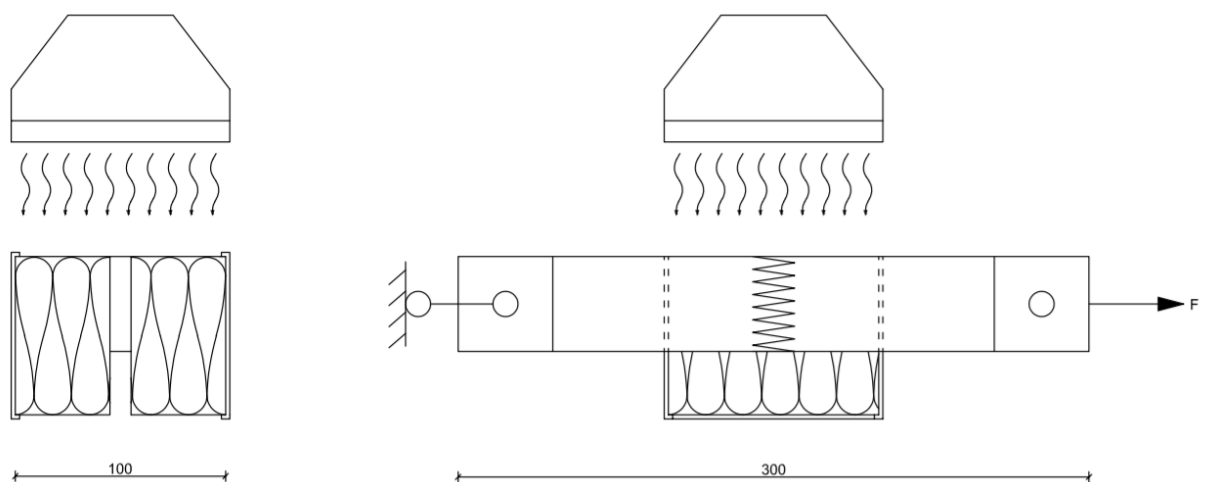
3.2.3 Katsemeetod

Enne kuumusele avamist rakendati katsekehale vajalik koormus. See koormus leiti kas kui 10% või 5% kõikide katsekehade keskmisest purustavast koormusest normaaltingimustel. Katse alguses avaldati katsekehale soojusvoog 50 kW/m^2 . Katsekeha ning seda ümbritsevat soojusisolatsiooni hoidis paigal terasest ümbris, mille abil sai katsekeha hõlpsasti asetada koonuskuumuti alla. Katsekeha ettevalmistus on näha joonisel 12. Ümbrisest väljapoole jääv puit kaeti kipsplaadi tükkidega, et takistada kuumuse jõudmist nendesse piirkondadesse. Katsekeha kinnitati ühest otsast poltide abil katsemasina seina külge ning teise otsa rakendati poltide ja trossi abil koormus. Koormuse rakendamiseks kasutati tungraua abi. Katsekeha paigaldamise ajaks paigaldati katsekeha ning koonuskuumuti vahele magneesiumsilikaatplaat, mis takistas suure kuumuse varajast jõudmist katsekehani ning samas kaitses katsetajaid kuumuse eest. Katse alguseks loeti hetke, kui plaat ära tõmmati kuumuti ning katsekeha vahelt. Joonisel 13 on näha katsekeha koormamise skeem ning joonisel 14 on näha katsekeha asend juba koormatuna koonuskuumuti all ning selle kohal asetsev magneesiumsilikaatplaat. Magneesiumsilikaatplaadi ära tõmbamise hetkel pandi käima stopper, mis peatati katsekeha purunemise hetkel. Koheselt peale elemendi

purunemist asetati magneesiumsilikaatplaat tagasi ning katsekeha osad viidi külma vee alla, et kustutada põlevad söed ja takistada edasist söestumist. Söestunud ristlõige on näha joonisel 15. Aeg purunemiseni varieerus erinevate kehade puhul 5 ja 15 minuti vahel.



Joonis 12. Koonuskuumuti jaoks ettevalmistatud katsekeha.



Joonis 13. Katsekeha koormamise skeem.



Joonis 14. Koonuskuumuti all olev keha vahetult enne katse algust.



Joonis 15. Söestunud katsekeha näidis.

3.2.4 Temperatuuride mõõtmine

Kolme erineva katsekeha korral mõõdeti katse käigus temperatuure K-tüüpi temperatuurimõõdikutega diameetriga 1 mm, mis olid omakorda ühendatud arvutiga (*data logger*). Temperatuurimõõdikud asetati 6 mm sammuga ühele küljele, traat nr 1 asetses tule poolele ning kokku oli küljel seitse traati. Lisaks sellele lisati üks traat otse tule ja kuumuse alla jäävale 10 mm laiusele otsaküljele (joonis 16). Mõõdikud fikseeriti katsekeha külge klambritega, lisaks sellele aitas neid paigal hoida ümbritsev vill. Mõõtmiste eesmärgiks oli mõõta temperatuure katsekeha ristlõike liimvuukides igal ajahetkel ning see võimaldas määrata temperatuurijaotuse purunemise hetkel.



Joonis 16. Katsekeha temperatuurimõõdikute kinnitamine.

3.3 TalTechi katsete tulemused

3.3.1 Katsekehade järeltöötlus

Analüüsi ettevalmistuseks puhastati kõik katsekehad lahtisest söest ja tuhast (joonis 17), mõõdeti allesjäänud ristlõike kõrgus mõlemal poolel sõrmjätku ning purunemiseks kulunud aja põhjal arvutati ühemõõtmeline söestumiskiirus.



Joonis 17. Söest puhastatud katsekeha.

3.3.2 Visuaalsed tähelepanekud

Katsete läbiviimise ajal täheldati puidu põlemisel osade katsekehade puhul mõningast prõksumist, katsetulemustele see mõju ei avaldanud. Katse ulatuses märgati ka katsekeha vertikaalset tõusmist katse eskaleerudes, see oli põhjustatud põlemisest tekkinud ekstsentrilisusest ning selle põhjustatud lisamomendist.

Kõikide katsekehade puhul hinnati purunemisviisi, mis võis olla kas purunemine liimist, puidust või nende kombinatsioonist. Kombinatsioonide puhul eristati kahte varianti – kas purunemine toimus peamiselt liimist aga puidul oli oma osa purunemises või vastupidi. Esimese puhul on näha kuumusele lähemal olnud allesjäänud ristlõike osas puhtaid ning siledaid jätke, mis on indikatsiooniks liimi ära sulamisele. Kui ülejäänud ristlõike osas on siiski näha ka puidu osalust purunemispildis, nimetati purunemispilt liim/puit tüüpi purunemiseks. Kui kogu allesjäänud ristlõike ulatuses on näha sõrmjätkudel nii siledaid pindasid kui ka fiibri purunemist, sai purunemispildi nimeks puit/liim tüüpi purunemine. Liimist purunenud katsekehade puhul loeti üle ka allesjäänud jätkude pinnad.

Peamised purunemispildid on toodud joonistel 18, 19, 20 ja 21.



Joonis 18. Liimist purunenud katsekeha.



Joonis 19. Puidust purunenud katsekeha.



Joonis 20. Katsekeha purunemispildiga liim/puidukiud.



Joonis 21. Katsekeha purunemispildiga puit/liim.

3.4 TalTechis läbiviidud katsetulemuste analüüs

Selleks, et katsetest saadud tulemusi paremini hinnata, on loodud mõned lihtsakoelisemad hüpoteesid. Varasemate katsete tulemuste põhjal võib teha eelduse, et liim 2, mis on ühtlasi formaldehüüdi sisaldav liim, annab liimi tulepüsivuse ja tugevuse osas häid tulemusi. Eeldame, et sõrmjätkust piisavalt kaugel asuvad piisavalt väikesed oksakohad ei mõjuta katsetulemusi.

Katsete käigus täheldati katsekeha painumist katse lõpuosas, sellest tulenevalt on tehtud eeldus, et katsekehale mõjub paindemoment ja kokkuvõttes tuleb leida ekstsentriline tõmbetugevus.

3.4.1 Arvutatavad parameetrid

Analüüsi läbiviimiseks arvutati katsekehadele ekstsentriline tõmme. Ekstsentriline seetõttu, et keha põlemisel tema ristlõige väheneb ning kuna jõud on rakendatud algse ristlõike keskossa, tekib sellest tulenevalt uue ristlõike puhul ekstsentrilisus ning ekstsentrilisusega leitav lisamoment, mida tuleb pinge arvutamisel arvestada (joonis 22). Üldine tsentriline tõmbepinge leiti valemiga

$$\sigma = \frac{N}{A},$$

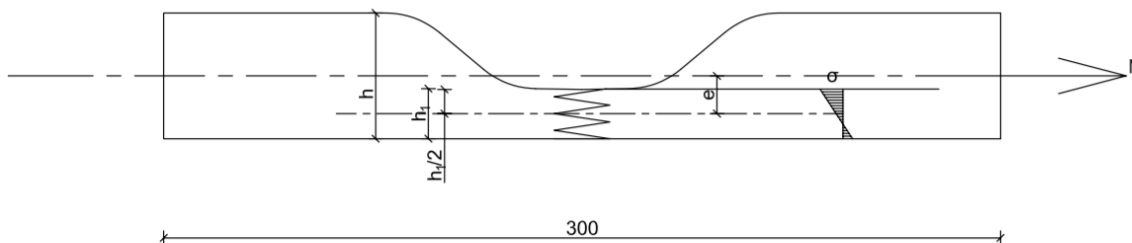
kus N on mõjuv normaaljõud ja A on allesjäänud ristlõike ristlõikepindala.

Ekstsentrilise tõmbepinge puhul lisandub ekstsentrilisusest tuleneva momendi tekitatud jõud. Suurima ekstsentrilise tõmbepinge leidmiseks kasutati valemit

$$\sigma_x = \frac{N}{A} + \frac{N \times e}{W},$$

kus e on ekstsentrilisus ja W on allesjäänud ristlõike vastupanumoment.

Ekstsentrilisus arvutati algse ristlõike telje ning allesjäänud ristlõike telje vahelise kaugusena.

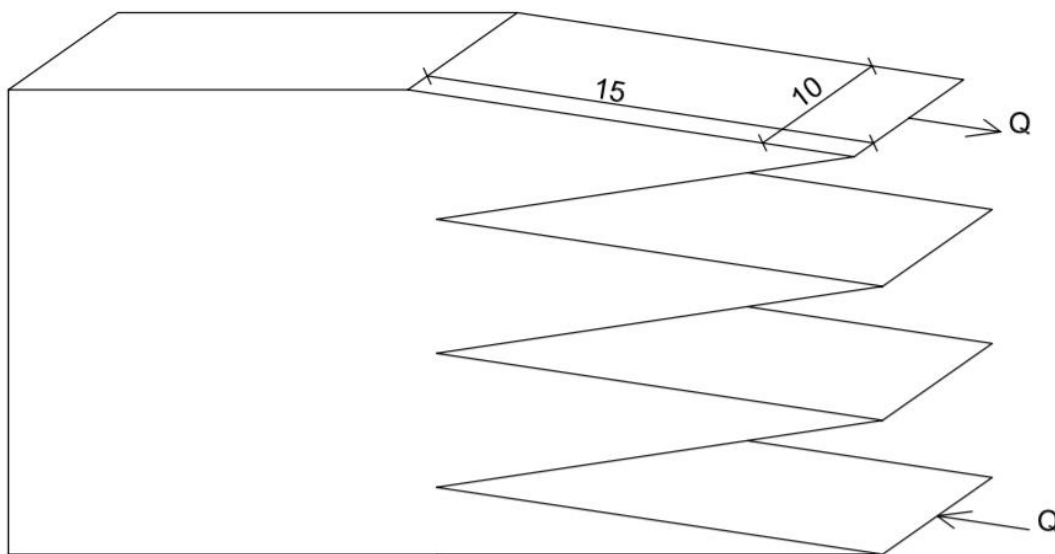


Joonis 22. Allesjäänud ristlõikele mõjuv jõud ning iseloomustavad suurused.

Liimist purunenud katsekehadele leiti ühele sõrmjätku pinnale mõjuv nihkepinge valemiga

$$\tau = \frac{Q}{A},$$

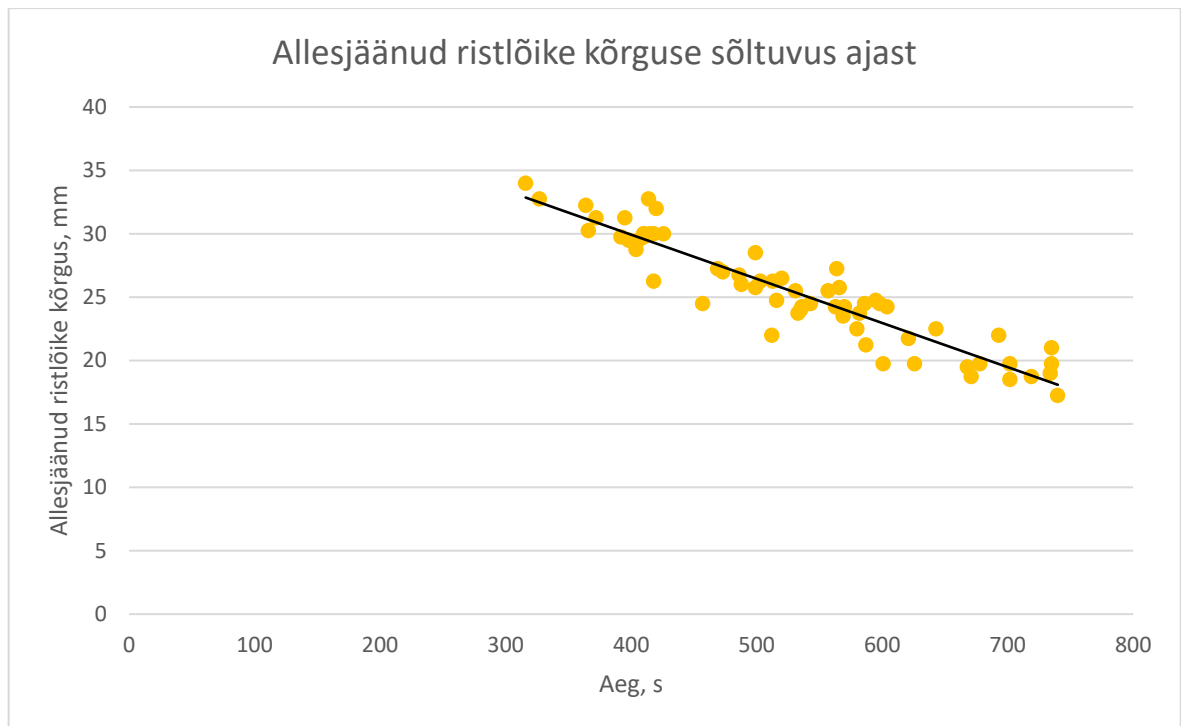
kus A on ühe jätku pind mõõtudega 15 mm x 10 mm, Q on ühele pinnale mõjuv jõud (joonis 23).



Joonis 23. Sõrmjätku pinnale mõjuv jõud.

3.4.2 Katsemeetodi usaldusväärsus

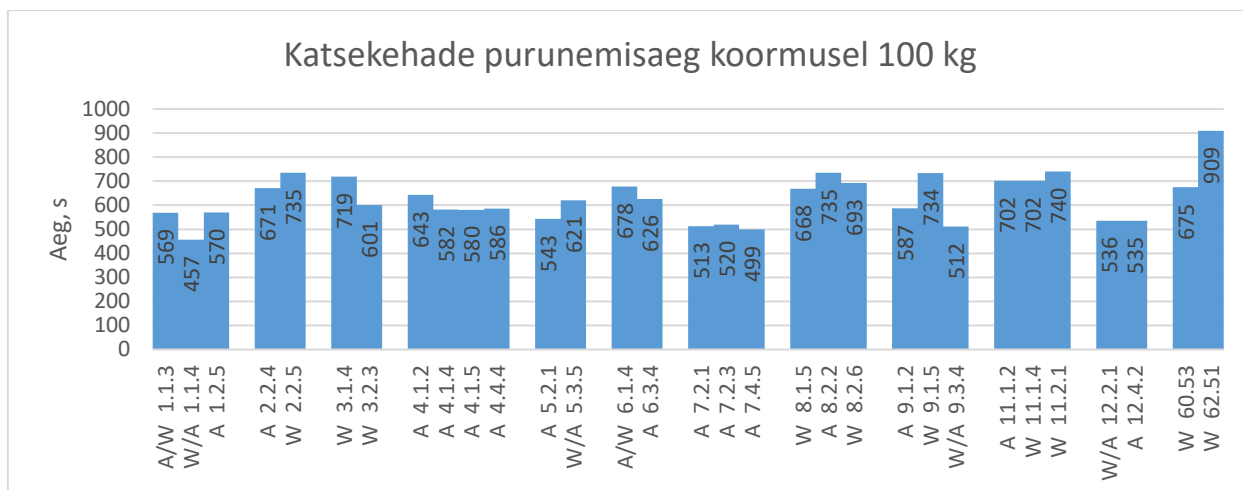
Üks olulisemaid katsemeetodi usaldusväärsuse näitajaid on sarnaste katsekehade piisavalt väike varieeruvus sarnaste katsetingimuste puhul. On oluline, et piisavalt paljude katsete sooritamisel hakkavad katsete tulemused punktidena aina enam langema ühe sirge peale. Graafikul 1 on näha head korrelatsiooni aja ning allesjäänud ristlõike kõrguse vahel. Graafik ilmestab, et olenevalt katse kestvuse ajast (purunemisajast) on võimalik üsna väikese eksimusega hinnata allesjäänud ristlõike kõrgust. See tuleneb kasutatud puidu ühtlasest tihedusest. Graafik on indikatsiooniks, et katsemeetod on usaldusväärne.



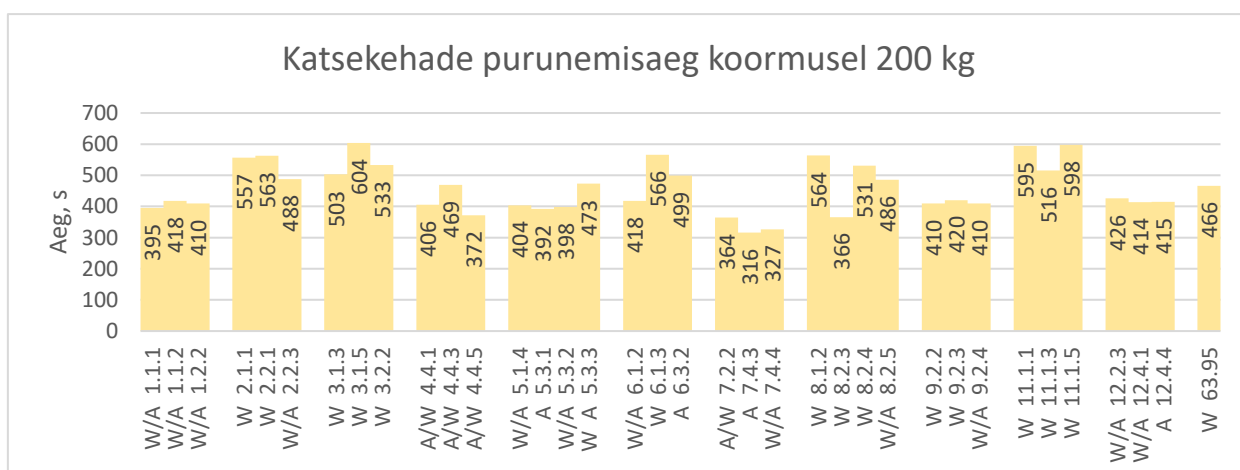
Graafik 1. Allesjäänud ristlõike kõrguse sõltuvus ajast.

3.4.3 Katsekehade purunemisajad

Erinevate katsekehade purunemisajad on toodud graafikutel 2 ja 3. On näha, et 100 kg koormusega katsekehadel on purunemisaja varieeruvus väiksem kui 200 kg koormusega katsetatud kehadel. Otsest seost purunemisaja ning purunemisviisi vahel tuua ei saa. Küll aga on näha, et lühema ajaga purunenud katsekehade purunemisviis on sageli kas otseselt või osaliselt seotud liimidega. Pikema purunemisajaga katsekehade puhul on näha suures osas puidu seost purunemisega.



Graafik 2. Katsekehade purunemisaeg koormusel 100 kg.



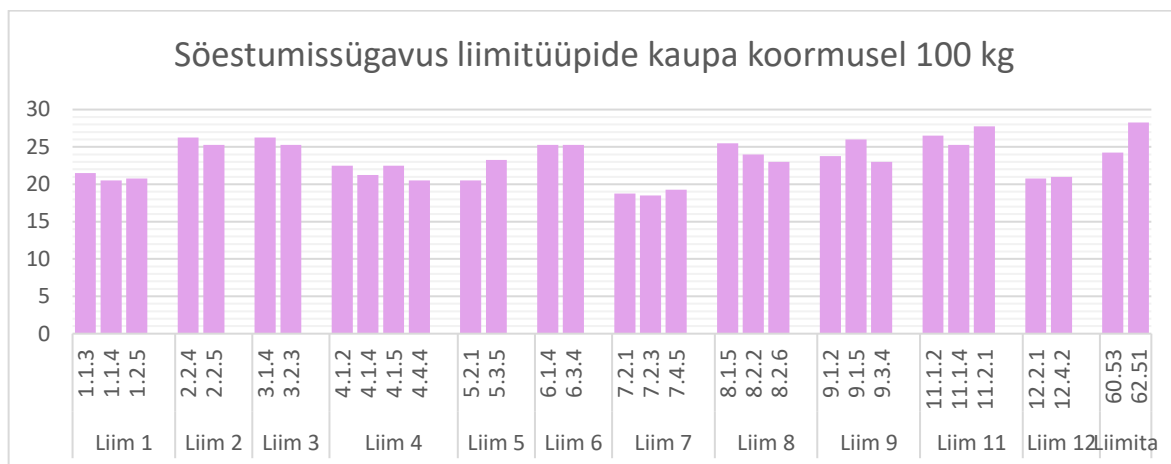
Graafik 3. Katsekehade purunemisaeg koormusel 200 kg.

3.4.4 Söestumissügavus

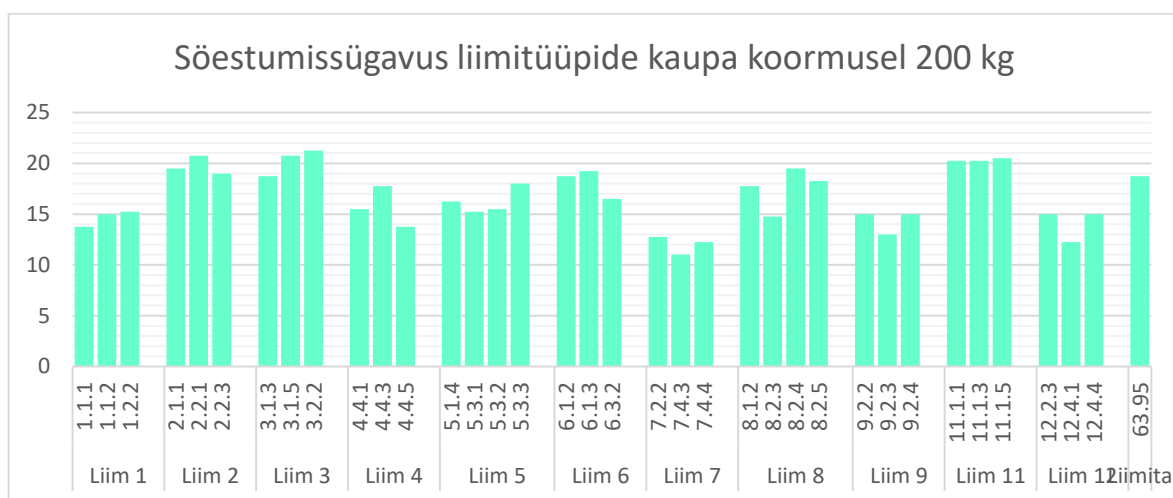
Söestumissügavuse varieeruvus sõltuvalt liimitüüpidest ja rakendatud koormusest on toodud graafikutel 4 ja 5. Suur söestumissügavus näitab, et põlemine on saanud toimuda pikema aja vältel ning alles on jäänud vähem ristlõiget, eelduste kohaselt on sellistel katsekehade liimvuukidel ka suurem tugevus. Selle eelduse põhjal peaksid paremaid tugevusnäitajaid omama liimid 2, 3, 6, 8 ja 11. Teistest kehvemaid tulemusi peaksid näitama liimid 1, 7 ja 12.

Antud katsete puhul on samuti näha, et 100 kg koormusega katsetel on väike varieeruvus, suurim varieeruvus ühe liimi puhul on kolm millimeetrit. 200 kg

koormusega katsetel on mõnevõrra suurem varieeruvus, kuni viis millimeetrit. Kuna väiksema koormusega on katsetulemuste erinevus vähem varieeruv, tuleks eelistada katsetamisel väiksemaid koormuseid.



Graafik 4. Söestunud osa kõrgus koormusel 100 kg.



Graafik 5. Söestunud osa kõrgus koormusel 200 kg.

Katsete üks eesmärk hinnata oksakohtade mõju purunemisajale ning purunemispildile. Selleks võeti katsekehade hulka kolm katsekeha (joonis 24), millel eksisteeris oksakoht potentsiaalselt ebasoodsas asukohas. Kahel katsekehast kolmest (katsekehad 5.3.5 ning 11.2.1) oksakoht otsest mõju katsetulemustele ei avaldanud. Purunemispilt oli sarnane tavapärastele katsekehadele ning ka purunemisajas ei kajastunud nende mõju. Katsekehal 1.1.4 oli mõnevõrra kiirem purunemisaeg kui teistel liim ühega tehtud katsekehadel, purunemispildil otseselt pole võimalik tuvastada oksakoha seotust purunemisega. Kuid kuna tegemist oli puit/liim purunemispildiga, ei saa mõju kindlalt

ka välistada. Üldisemas pildis esines väiksemaid oksakohti ka teistel katsekehadel, kuid katsetulemusi ükski neist ei mõjutanud. Samas tuleb mainida, et ükski oksakoht ei asetsenud sõrmjätku läheduses. Selliseid katsekehasid tuleks kas vältida või nende mõju katsetulemustele eraldi hinnata.



Joonis 24. Oksakohtadega katsekehad.

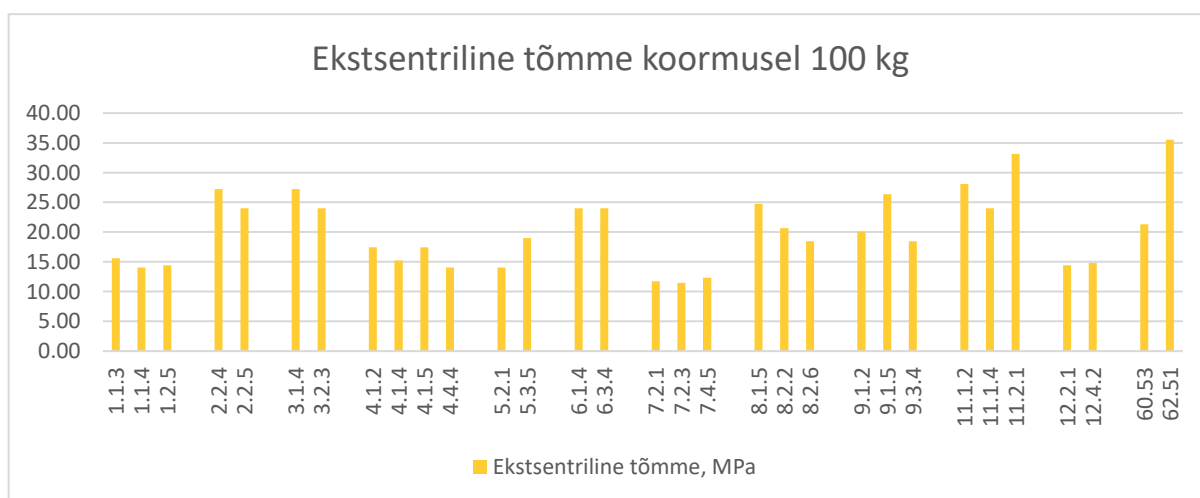
3.4.5 Ekstsentriline tõmme

Graafikutelt 6 ja 7 on näha ekstsentrilise tõmbe väärtused tulenevalt liimitüüpidest. Kuigi osade liimide puhul on näha mõningast varieeruvust (mis võib olla tulenenud mõnest anomaaliast või purunemisviisist) siis üldpildis on näha, et sama liimiga katsekehadel on purunemine toimunud üsna sarnase pinge juures. Väiksema koormuse juures on ka pinge väiksem, mis on loogiline.

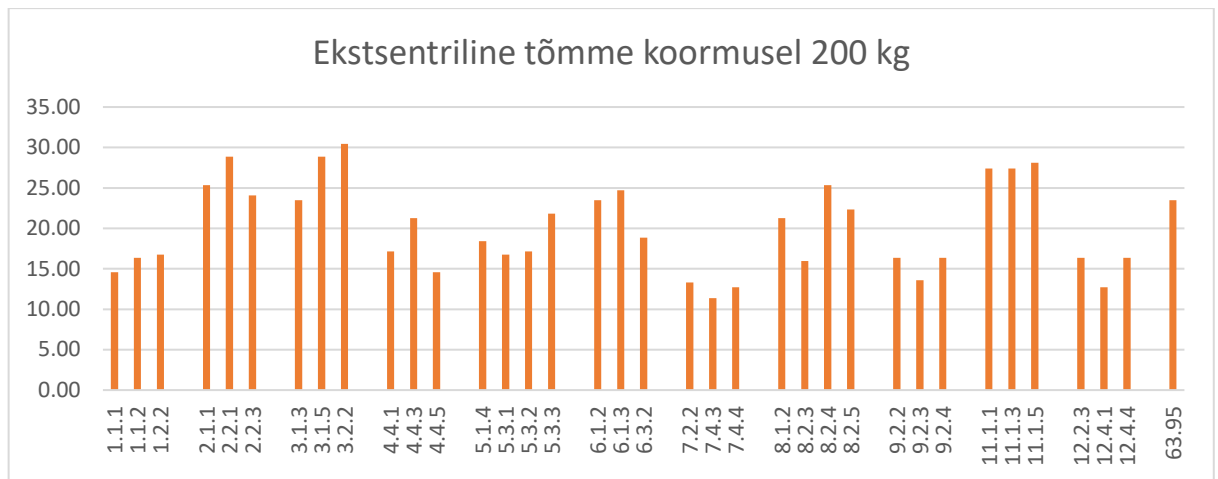
Nende graafikute juures saab sisse tuua ka võrdluse eelnevate graafikutega. Nimelt on tulemustest näha, et suurema söestunud osa kõrgustega katsekehadel oli ekstsentriline tõmbetugevus suurem kui teistel katsekehadel ning söestumissügavuste põhjal tehtud eeldus, et liimide 2, 3, 6, 8 ja 11 tugevus on suurem kui teistel katsekehadel sai kinnitust. Kinnitust sai ka eeldus, et väiksema söestumissügavustega liimid 1, 7 ja 12 omavad väiksemat ristlõike tugevust.

Sõrmjätkuta katsekehade puhul on raske anda hinnangut katsetulemuste tõesusele. Suure tõenäosusega peaks täisristlõike tugevus olema mõnevõrra suurem kui sõrmjätku oma, ainult ühe katsekeha tugevus osutus suuremaks sõrmjätkudega tehtud katsekehade tugevustest. Samas võivad need tulemused just näidata, et vastupidava liimiga tehtud sõrmjätk annab tavalisele ristlõikele ligilähedasi tulemusi. Tuleb ka arvestada puitmaterjali tugevuse varieeruvust.

Võttes etaloniks liim number kahe on näha, et samal tasemel on tugevuse mõttes liimid 3 ja 11. Seega saab väita, et nende liimide puhul on tegemist tules piisavalt püsivate liimidega. Ligilähedased on ka liim 6 ja 8.



Graafik 6. Ekstsentriline tõmme tulenevalt kasutatud liimist koormusel 100 kg.



Graafik 7. Ekstsentriline tõmme tulenevalt kasutatud liimist koormusel 200 kg.

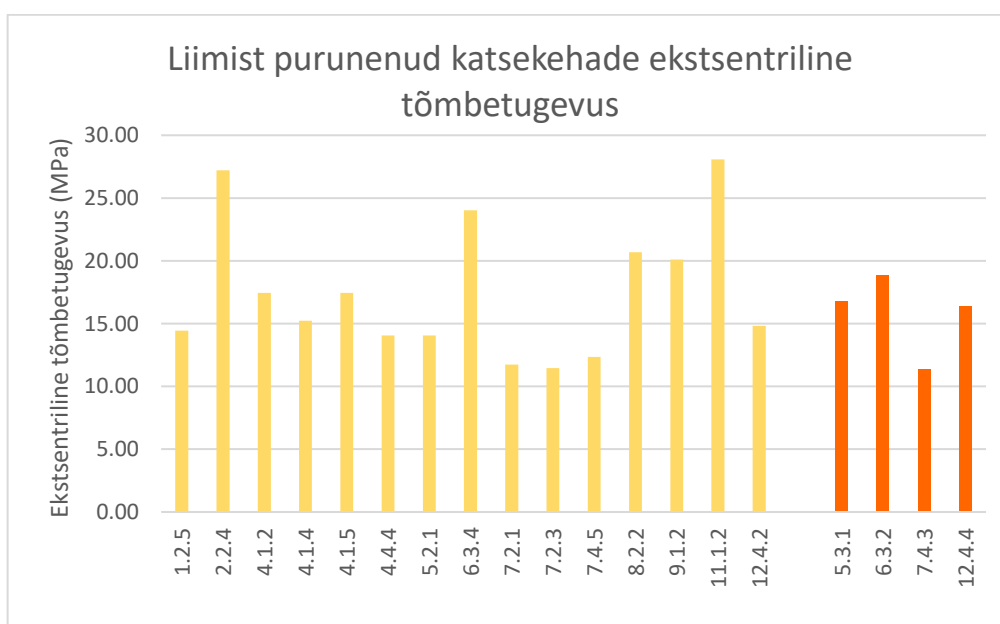
3.4.6 Liimidest purunenud ekstsentriline tõmme

Lisaks eelmistele graafikutele tasub vaadata ka ainult liimist purunenud katsekehade tõmbetugevusi. Eelduste kohaselt peaks liim 2 (PRF) olema üks tugevamaid ning liimist purunemist peaks olema selle liimi puhul minimaalselt või purunemine peaks toimuma suure pinge juures. Suure tõenäosusega peaks selle liimi puhul katsekeha purunema puidust. Graafikult 8 on näha, et üks katsekeha liimiga 2 siiski liimist purunes. Kollasega on märgitud katsekehad koormusel 100 kg ning oranžiga koormusel 200 kg. Sellegipoolest on näha, et purunemine on toimunud suure pinge juures, mis näitab nii puidu head tugevust kui ka liimi head tugevust. Teiste katsekehade puhul liim 2 kasutamisel oli purunemine seotud puidu purunemisega, see tähendab puit oli nõrgem kui liim. Lisaks sellele on näha, et lisaks liim number kahele on tugevamaks osutunud ka liim number 6 ja 11. Tasub märkida, et ükski purunemine liim kolmega ei olnud seotud liimide järeleandmisega. Teistest liimidest paremaid tulemusi on näidanud ka liim 8 ja 9. Kõige nõrgemaks liimiks osutus liim number 7. Kuna kõik liim 7 katsekehad purunesid kas osaliselt või täielikult liimist ning tulemused olid madalad, saab koheselt teha järelduse, et antud liimi tulepüsivus on võrreldes teiste liimidega oluliselt madalam. Samuti on näha liim 7 kehvemaid tulemusi ka eelnevatel graafikutel.

Tabelis 1 toodud keskmiste purunemiskoormuste põhjal on näha, et tugevamate liimide puhul ületab TalTechis tehtud katsete tõmbetugevus tavalisi tõmbekatse tulemusi. See võib olla põhjendatud sellega, et normaaltemperatuuri juures tehtud tõmbekatsete puhul võisid tulemusi mõjutada oluliselt ka oksakohad. Oksakohtade asukohti tegelikult

üldisemas tootmises ei kontrollita ning mida väikesem on katsekeha, seda suuremat mõju võivad need tulemustele avaldada. Lisaks sellele on tabelist ka näha, et puidu omadused varieeruvad juba väikeste katsekehade puhul, mis on ühest ja samast lauast lõigatud.

200 kg koormusega tehtud katsete puhul on liimist purunemist oluliselt vähem. See tähendab, et enamus katsekehade purunemine oli vähemal või rohkemal määral seotud puidu tugevuse järeleandmisega. Järelikult on liimide hindamiseks parem meetod, kus kasutatakse madalamat koormust.



Graafik 8. Liimist purunenud katsekehade ekstsentriline tõmbetugevus.

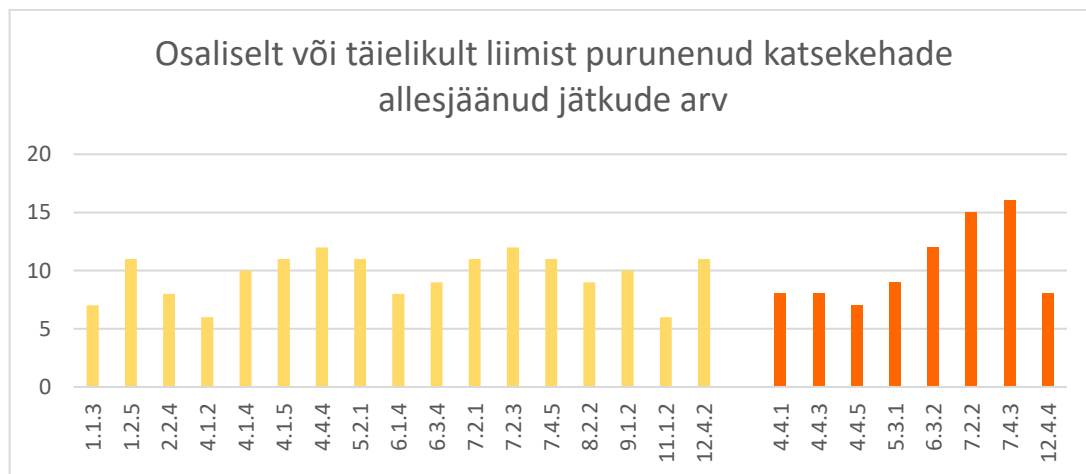
3.4.7 Nihkepinged jätkupindadel

Järgnevalt vaatleme osaliselt või täielikult liimist purunenud katsekehade allesjäänud jätkupindade seost nihkepingega, mis mõjus ühele sõrmjätku pinnale (graafikud 9 ja 10). Pinnale mõjuv nihkepinge on jätkupindadel erinev, sest lisaks tsentrilisele tõmbele mõjub ka ekstsentrilisusest tulenev paindemoment, mis tekitab algele teljele lähemas otsas täiendava tõmbe ning teises otsas surve. Hõlmates graafikule nii osaliselt kui ka täielikult liimist purunenud katsekehi, on varieeruvus suur. Liimiga seotud purunemisi

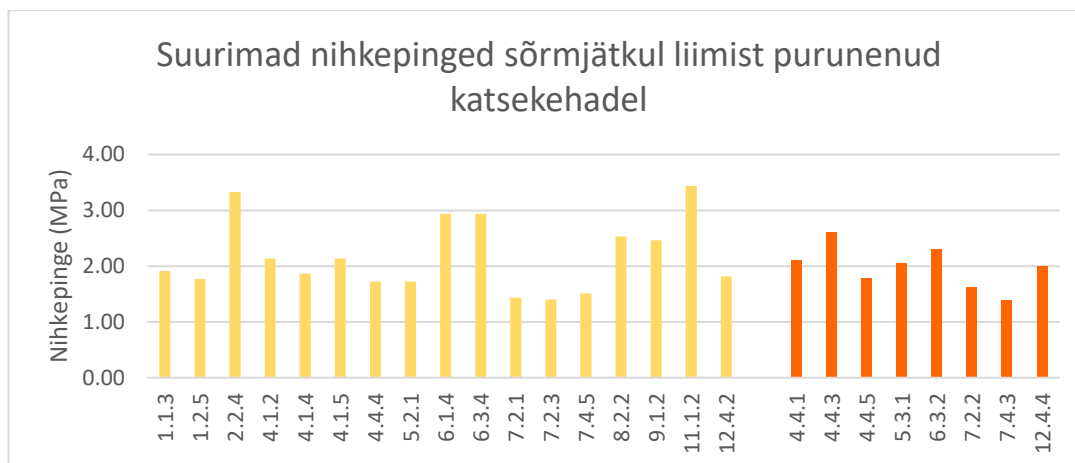
on 100 kg koormusega rohkem, kuigi katsekehasid katsetati rohkem 200 kg juures. See näitab, et 200 kg koormusel toimub rohkesti just puiduga seotud purunemisi.

Vaatame eraldi ka täielikult liimist purunenud katsekehi (graafikud 11 ja 12). On näha, et täielikult liimist purunenud katsekehade arv koormusel 200 kg on väike. Võrreldes graafikuga 9 ja 10 on näha, et nendel graafikutel toodud 100 kg juures purunenud katsekehade puhul on peamiselt tegemist täielikult liimist purunenud katsekehadega. 200 kg katsetatud katsekehade korral on enamus just ainult osaliselt liimist purunenud. Neid tulemusi arvesse võttes saab öelda, et väiksem koormus annab paremaid tulemusi. Suurema koormuse juures määrab katsetulemuse oluliselt suuremas vahekorras puidu enda tugevus, samas katsemeetodi eesmärk on hinnata liimide tugevust.

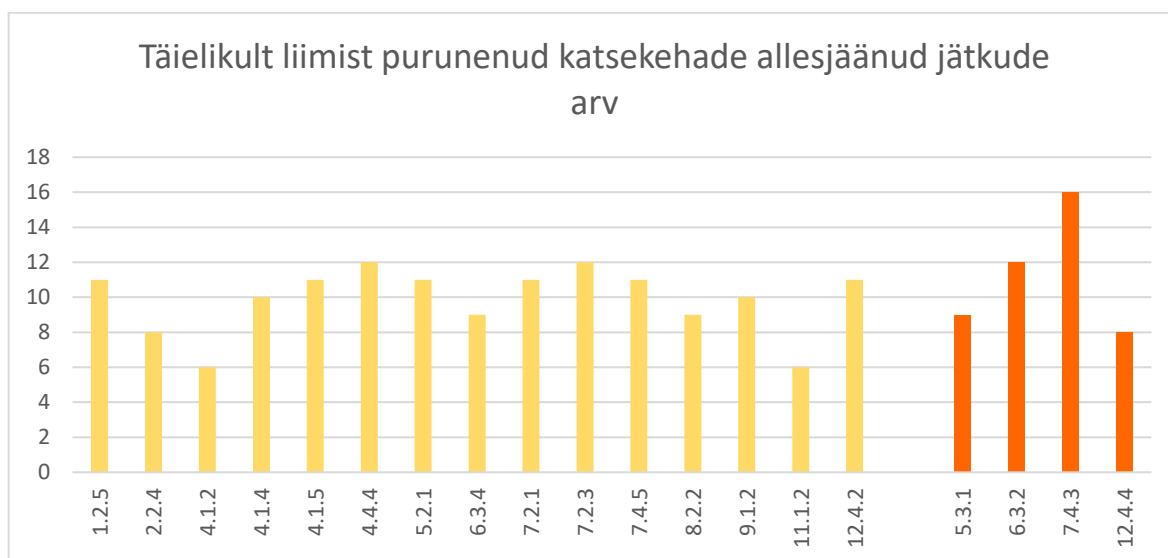
Nihkepingete uurimisel on selgelt näha sarnasusi teiste eelnevalt mainitud graafikutega. Liimid jagunevad suurema ning väiksema tugevusega gruppideks. Tugevamate hulka kuuluvad liimid 2, 6 ja 11. Lisaks sellele on tähelepanuväärne, et liim kolmega ei toimunud ühtegi liimist purunemist, mis näitab liimi head tugevust. Teistest liimidest mõnevõrra paremaks osutusid ka liim 8 ja 9. Samas kõige nõrgemaks osutus liim 7, mis on osutunud nõrgimaks kõikide parameetrite analüüsimisel.



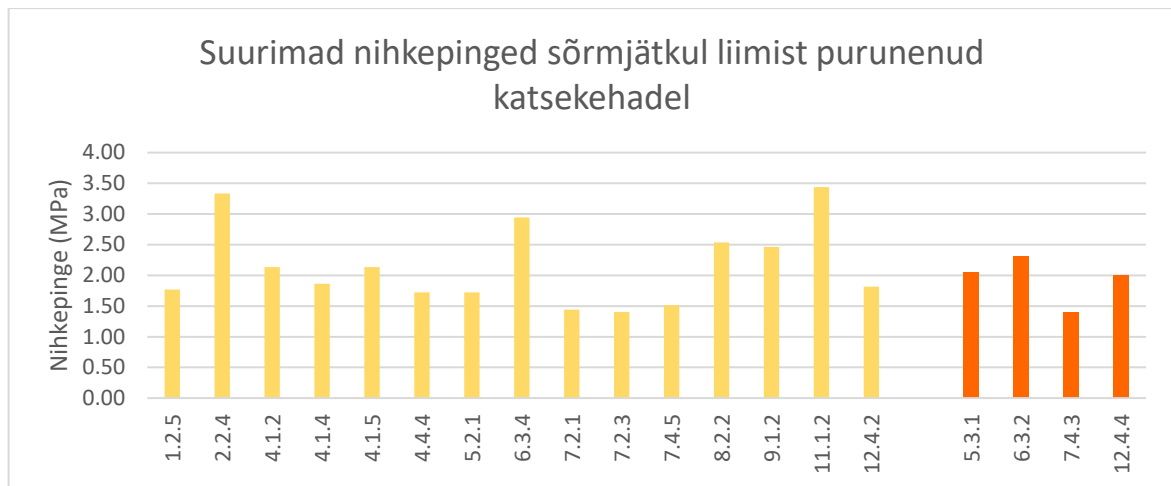
Graafik 9. Täielikult liimist purunenud katsekehade allesjäänud jätkupindade arv.



Graafik 10. Suurim nihkepinge ühel sõrmjätkul liimist purunenud katsekehadel.



Graafik 11. Täielikult liimist purunenud katsekehade allesjäänud pindade arv.



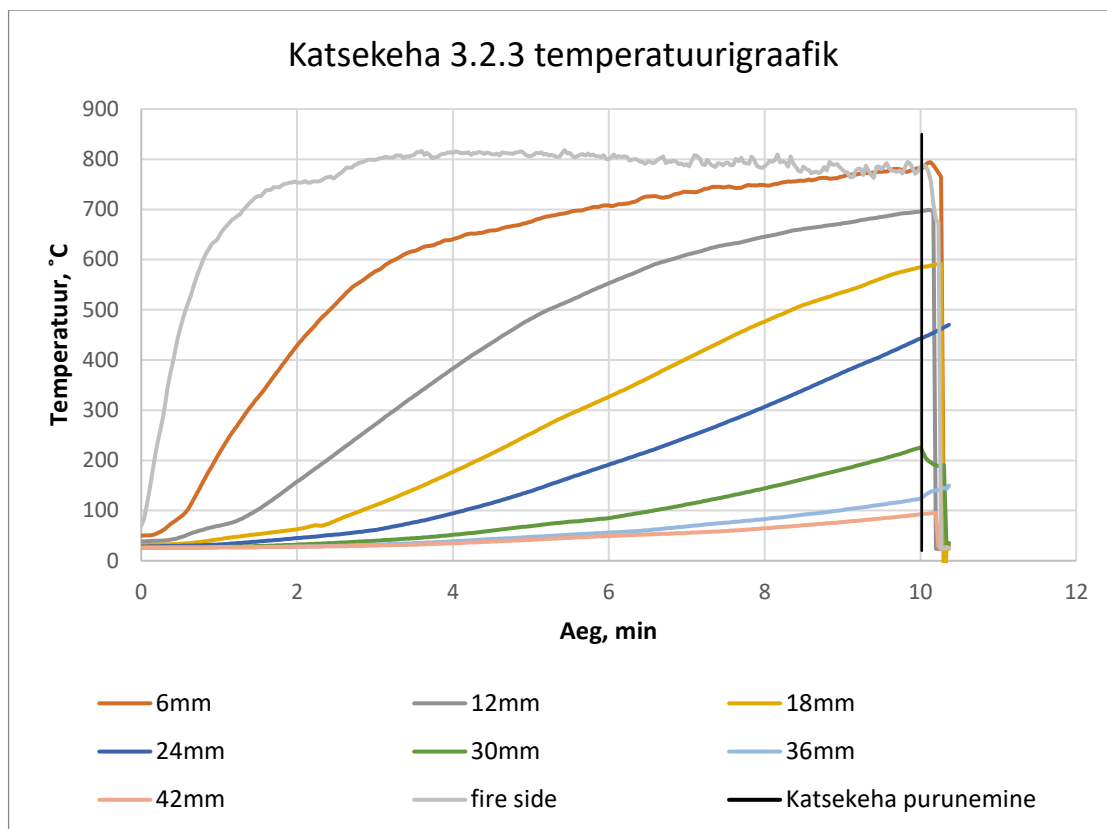
Graafik 12. Täielikult liimidest purunenud katsekehade suurim nihkepinge ühel pinnal.

3.4.8 Temperatuuride mõõtmised

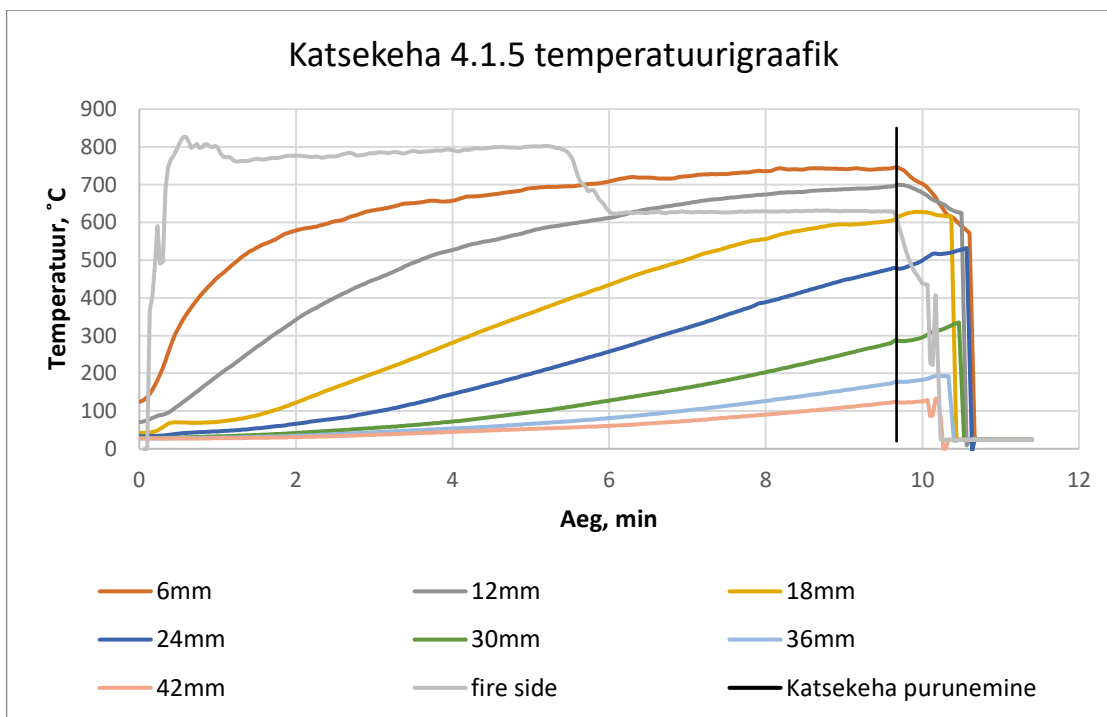
Kolmel TalTechis katsetatud katsekehal (erinevate liimidega) mõõdeti kogu katse vältel ka temperatuure erinevates ristlõike osades, vastavad graafikud on toodud graafikutel 13, 14 ja 15. Seejuures must vertikaalne joon märgib katsekeha purunemise hetke.

Teades, et puidu söestumine algab 300°C juures, on näha, et protsess algab juba vähem kui poole minuti pealt. Kuna tegemist on kaitsmata puiduga, algab põlemine ja söestumine peaaegu samal hetkel kui kaitseplaat pealt eemaldatakse, seda oli näha ka visuaalselt katsete käigus.

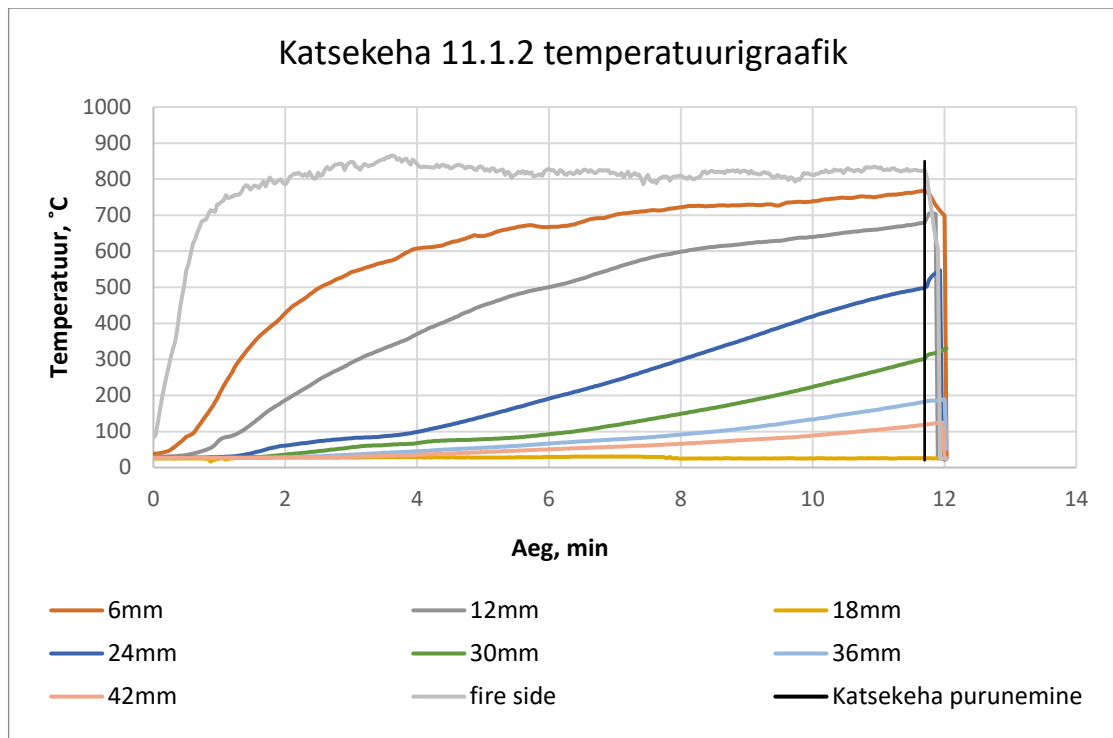
Maksimaalsed temperatuurid ulatusid katsekehadel üle 800°C. Soojusvoog oli küll 700°C, kuid tuleb arvestada, et puit ise on samuti põlev materjal ning on lisanduv põlemiskoormus. Samuti on näha, et kui esimese kahe mõõdiku ulatuses jõuab temperatuur üle 700°C, siis edasi enam mitte. Selle põhjuseks on tekkiva söekihi kaitsev ning isoleeriv iseloom. See faktor mõjutab ka temperatuuri tõusu erinevates ristlõike osades. On näha, et ülemistes kihtides on temperatuuri tõus logaritmilise ilmega, alumiste kihtide temperatuuri tõus on juba algusest lineaarsema kujuga.



Graafik 13. Katsekeha 3.2.3 temperatuurigraafik.



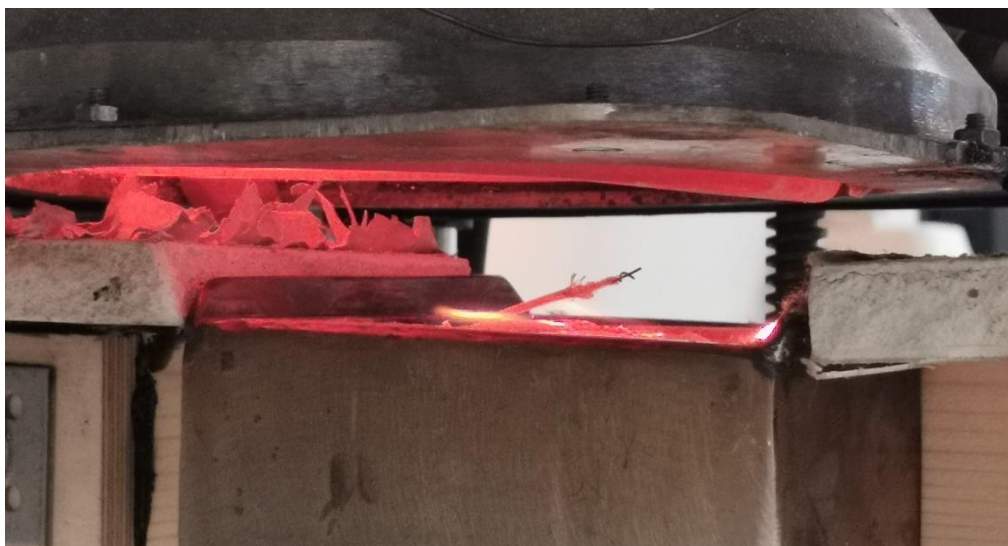
Graafik 14. Katsekeha 4.1.5 temperatuurigraafik.



Graafik 15. Katsekeha 11.1.2 temperatuurigraafik.

Katsekeha 4.1.5 temperatuurigraafikul on näha tulepoolse temperatuurimõõdiku tõrget. Olukord fikseeriti ka pildi näol. Antud traat oli katsekeha põlemisel ning söestumisel end lahti löönud katsekeha küljest ning jäi ülejäänud katse ajaks labori õhu ning koonuskuumutist tuleneva kuuma soojusvoo kätte (joonis 25). Labori jahutava õhu tõttu on selle näidiku temperatuurinäit mõnevõrra madalam koonuskuumutist tulevast soojusvoost (keskmiselt 700°C).

Katsekeha 4.1.5 oli esimene temperatuurikatse ning selle põhjal sai hinnata, et magneesiumsilikaatplaat ei kaitse katsekeha soojenemise eest kuigi kaua. Temperatuurid hakkasid tõusma juba enne plaadi eemaldamist ja katse algust. Teiste katsekehade juures kiirendati ettevalmistusprotseduure.



Joonis 25. Katsekeha küljest lahti tulnud temperatuurimõõdik.

Katsekehal 11.1.2 ei ole mõõtmisel osalenud 18mm peal asunud temperatuurimõõdik, seetõttu on graafikul antud näit nullis.

3.5 Võrdlev analüüs

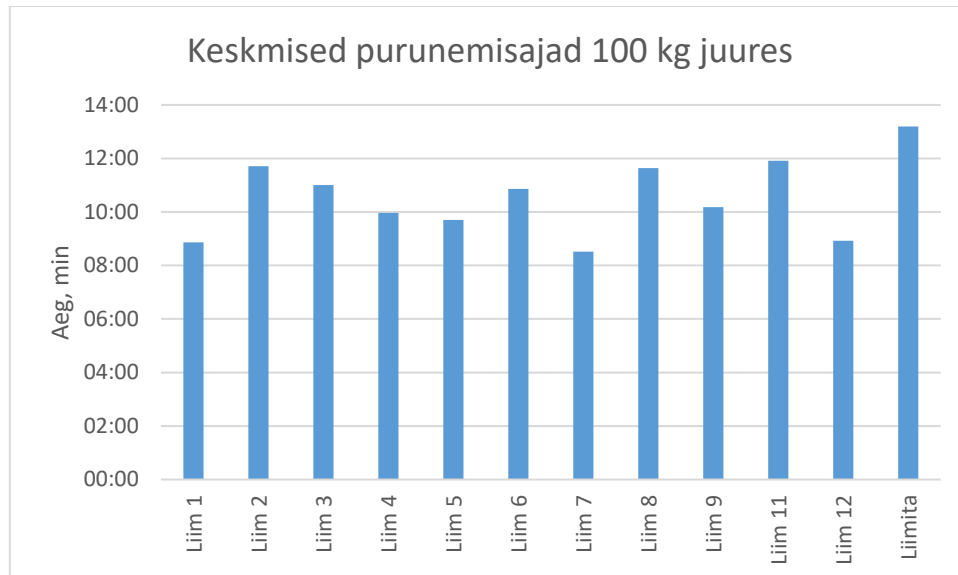
Võrdlevas analüüsis võrdleb antud töö kirjutaja enda tehtud katseid teiste sarnaste katsetega, mis on tehtud samuti FIREWOOD programmi raames. Sellest analüüsist tulenevalt on võimalik juba täpsemalt hinnata väljapakutud katsemeetodi sobivust.

3.5.1 Sarnased katsed kipsplaadist kattega

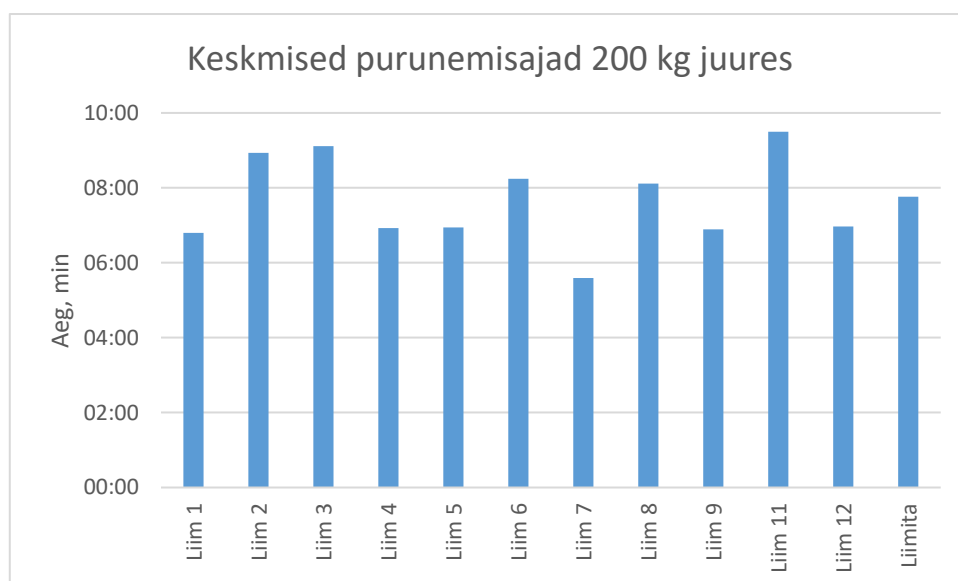
Trondheimis viidi läbi sarnaste tingimustega katsed. Erinevus antud töö käigus läbiviidud katsetega seisnes selles, et Trondheimi katsekehadel oli tulepoolsele küljele paigaldatud kipsplaat. Kipsplaadi olemasolu tähendab katse ajalist pikenemist ning puidu täiendavat kaitset tule eest kuni kipsplaadi lagunemiseni (ära kukkumiseni). Puidu esialgsel kaitsmisel tuleb arvestada, et ka söestumiskiirus on aeglasem.

Trondheimis ning Tallinnas läbiviidud katsete võrdlusest selgub, et üldine liime võrdlev pilt on sarnane. Kipsplaadiga tehtud katsetes kasutati 2210 N koormust, TalTechi katsetes kasutati 200 kg koormust ehk ca 1960 N. Seega võib eeldada, et tugevusgraafikutel on TalTechi katsetes näha mõnevõrra suuremaid numbreid. Mõlemas

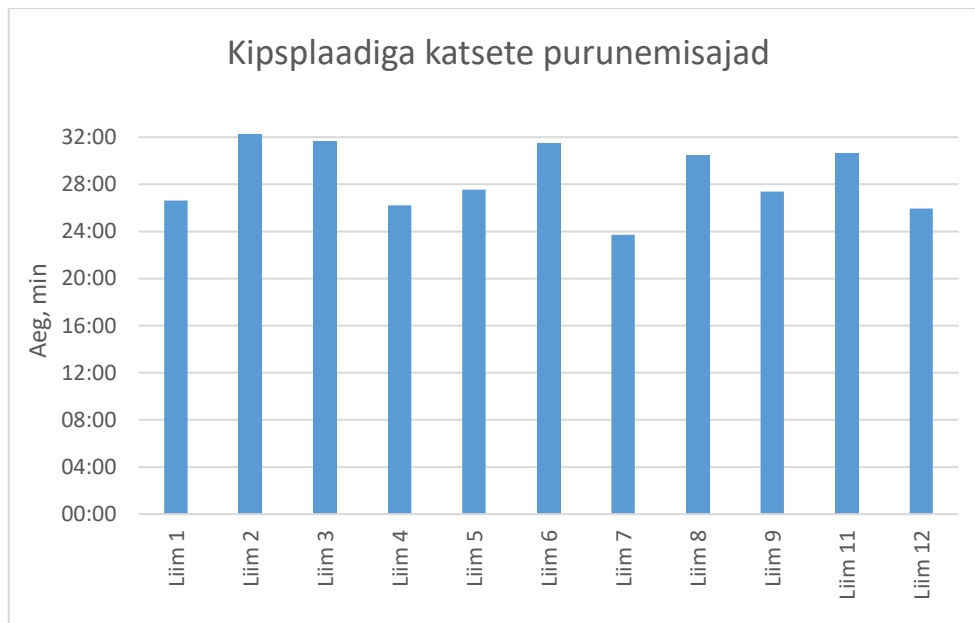
katseseerias osutusid tugevamateks liimideks 2, 3, 6, 8 ja 11 ning nõrgimaks jäi liim 7. Neid tulemusi on näha graafikutel 16, 17 ja 18.



Graafik 16. TalTechi katsete keskmised purunemisajad 100 kg juures.



Graafik 17. TalTechi katsete keskmised purunemisajad 200 kg juures.



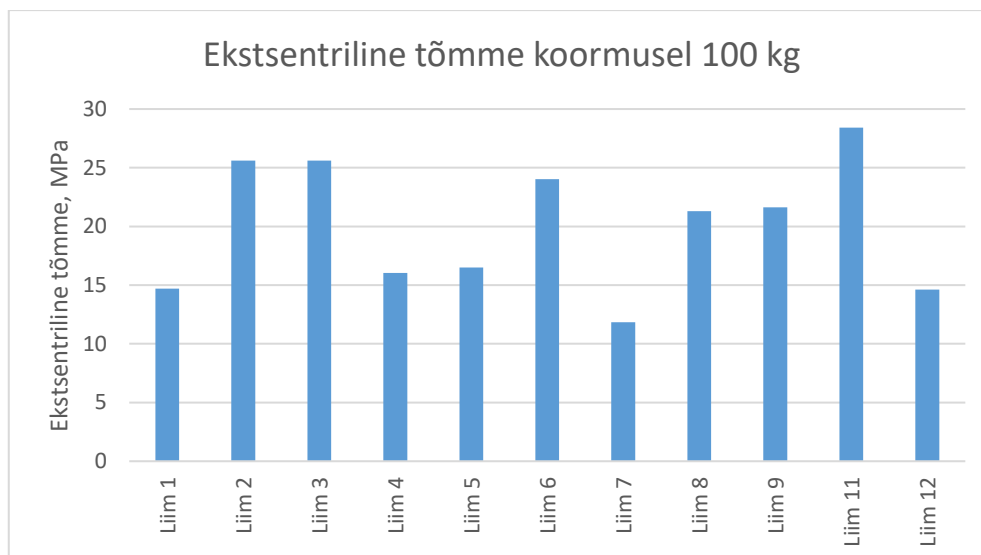
Graafik 18. Trondheimi katsete purunemisajad koormusel 2210 N.

Trondheimis läbiviidud katsete tulemuste põhjal leiti katsekehadele ekstsentriline tõmbepingeline. Tulemusi on näha graafikutel 19, 20 ja 21.

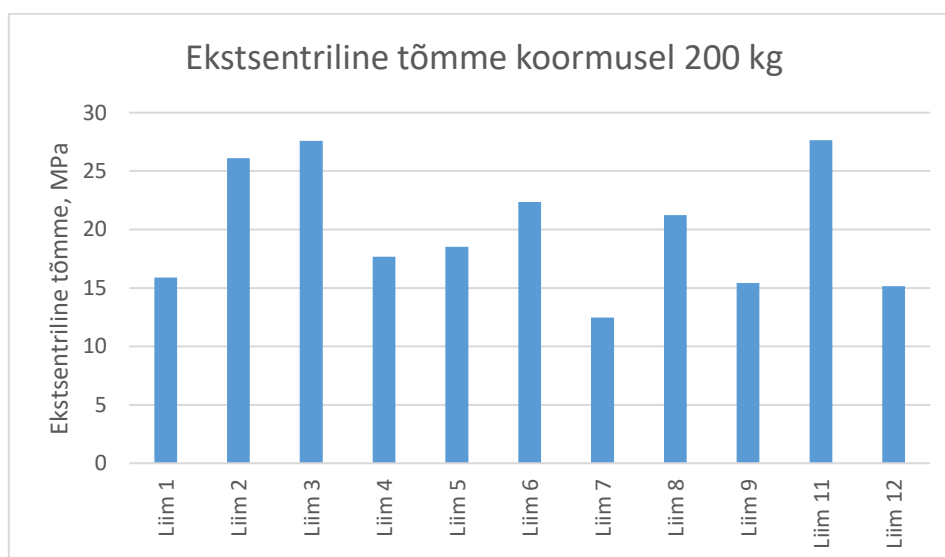
Samuti nagu purunemisaegadega on ka tõmbetugevuste võrdlemisel näha üldises pildis sarnaseid tulemusi erinevate liimide tugevuses. Kuna Trondheimi katsetes kasutati mõnevõrra suuremat koormust, on tõmbetugevused mõnevõrra väiksemad.

Nende katsete võrdlus näitab, et olenemata puidu kaitsmise meetodist töötavad liimid samamoodi. Seega saab standardikohaseid katseid viia läbi kaitsmata puiduga, sest kaitstud puiduga on tulemused sarnased.

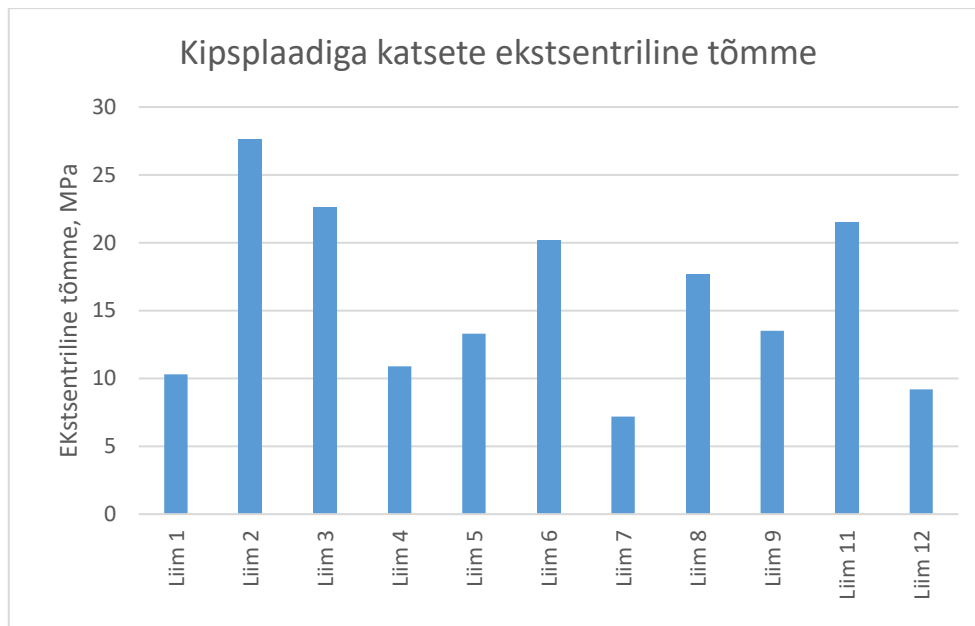
Katseid läbi viies oli selgelt näha katsekeha paindumist katse lõpuosas. Tulemustest nähtuvalt hõlmas tugevusest peamise osa just ekstsentrilisuse komponent.



Graafik 19. TalTechi katsete keskmised ekstsentrilised tõmbetugevused koormusel 100 kg.



Graafik 20. TalTechi katsete keskmised ekstsentrilised tõmbetugevused koormusel 200 kg.

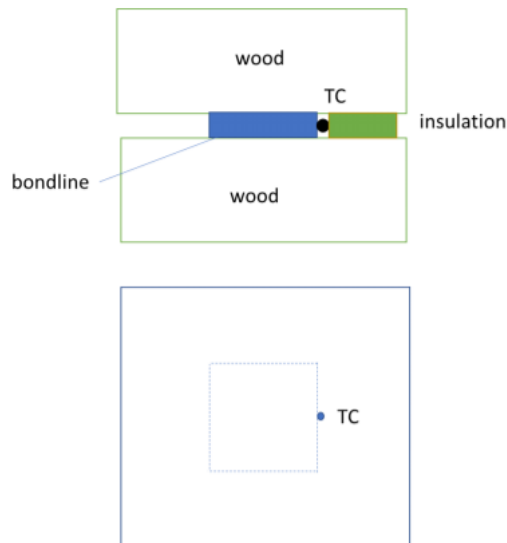


Graafik 21. Trondheimi katsete keskmised ekstsentrilised tõmbetugevused koormusel 2210 N.

3.5.2 Võrdlus ristkihtpuidu katsetega

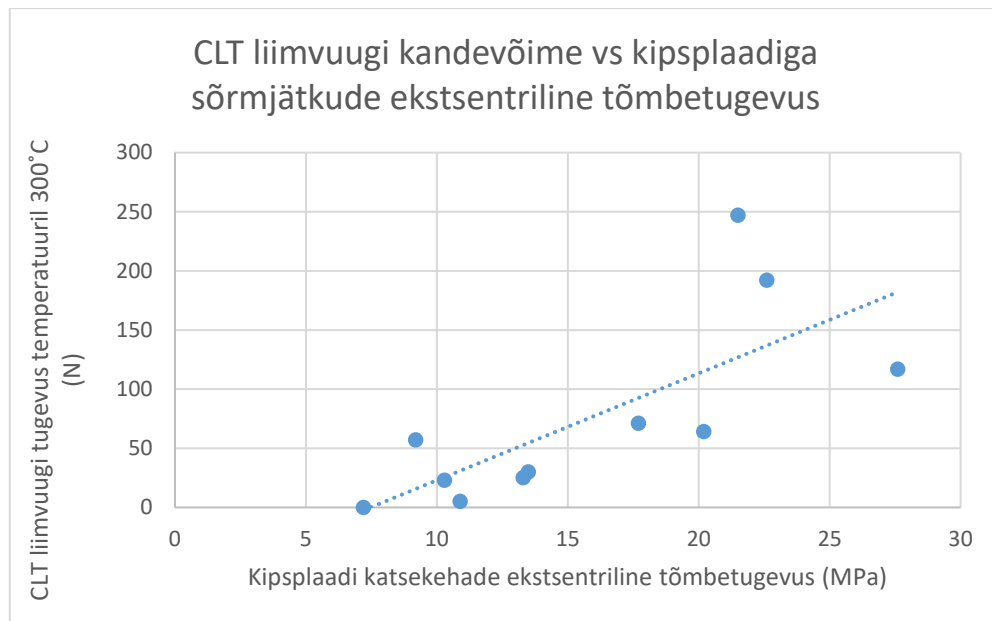
Paralleelselt eelmainitud katsetega viidi FIRENWOOD projekti raames läbi katsed koonuskuumutis CLT katsekehadega. Katseteks valmistati ette katsekehad lamellipaksustega 20 mm ja 40 mm. Lamellide vahel liimiti ala suurusega 50 mm x 50 mm (joonis 26). Katsekeha eemaldati kuumuti alt kui temperatuurimõõdik liimvuugis jõudis 300 kraadini ning seejärel katsetati allesjäänud katsekeha koheselt liimvuugi kohalt nihketugevusele. Peale purunemist hinnati katsekehade purunemispilti. Kui purunemine päädis puhta pinnaga, oli tegemist liimist purunemisega ja enamasti oli tugevus nullilähedane. Hea liimi korral andis nihketugevus märgatava tulemuse ning purunemine võis hõlmata ka puidufiibreid.

Kuumutamine kestis 29 minutit, kuid tuleb arvestada, et liimvuuk ei saavutanud kõigil juhtudel temperatuuri 300 kraadi. Mõnel katsel oli vähem ning mõnel rohkem. See võis mõjutada ka nihkekatse tulemusi.

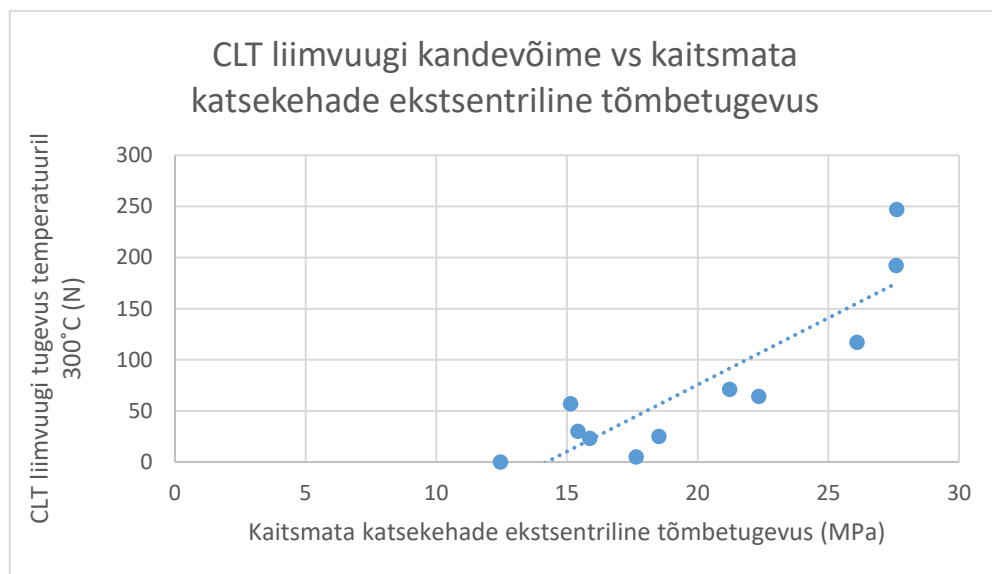


Joonis 26. Ristkihtpuidu katsekeha. [20]

Võrdlemaks kipsplaadiga ning kaitsmata puidu katsetulemusi CLT katsetega on koostatud graafikud 22 ja 23. Y-teljel on toodud CLT katsetest saadud nihkekandevõimed ning x-teljel kas kaitsmata puidu või kipsplaadiga kaetud puidu katsekehade ekstsentrilised tõmbetugevused. Graafikutelt on näha, et suures pildis on võimalik tekitada üks ühine sirge, millele katsekehad enam-vähem alluvad. On näha, et sõrmjätkuga katsekehade tugevuse suurenemisel suureneb ka CLT liimvuugi kandevoime. Seega on kaudselt võimalik öelda, et kui liim annab häid tulemusi sõrmjätkudega katsetes, annab ta tõenäoliselt häid tulemusi ka CLT liimvuugi nihkekatsetes.



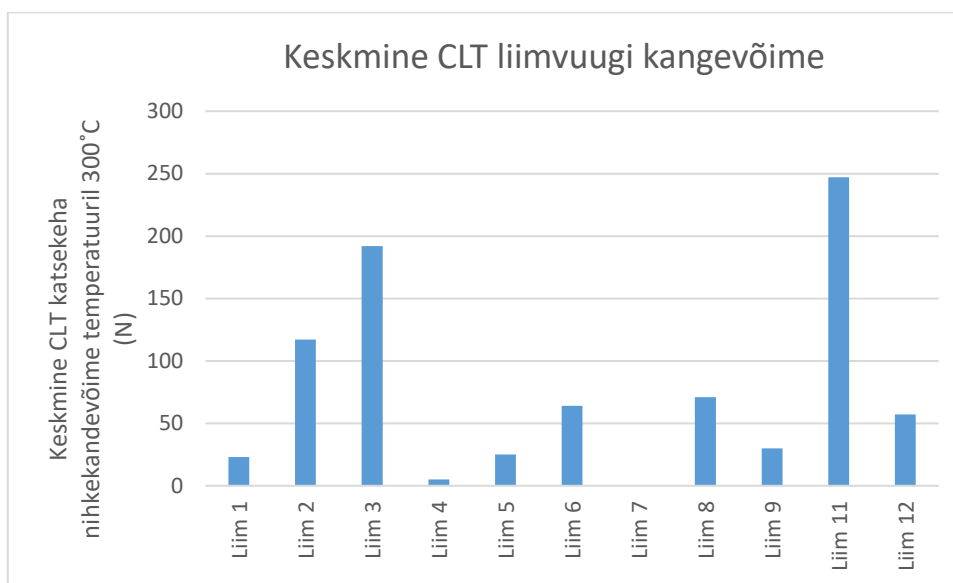
Graafik 22. CLT liimvuugi kandevõime võrreldes kipsplaadiga katsete tõmbetugevustega.



Graafik 23. CLT liimvuugi kandevõime võrreldes kaitsmata katsekehade tõmbetugevustega.

CLT katsekehade nihkekatse tulemustest tulenevalt on võimalik öelda, et tugevamad ja nõrgemad liimid joonistuvad välja sarnaselt sõrmjätokude katsetele. Eelnevalt arvestati tugevamate liimide hulka liimid 2, 3, 6, 8 ja 11 ja nõrgimaks jäi liim 7. Need tulemused kajastuvad ka CLT nihkekatsetes. Sellised tulemused ilmestavad, et antud väikesemõõdulist katsemeetodit on võimalik CLT liimvuukide katsetamiseks edukalt kasutada.

Graafikul 24 toodud väiksemate tugevustega liimid on selgelt purunenud peamiselt liimvuugist. Liim 7 puhul oli kõikide katsekehade nihketugevus 0. Teiste kehvemate liimide puhul esines nii 0 tugevust kui ka natuke suuremat tulemust, mis keskmisena ikkagi andsid väikese tulemuse.



Graafik 24. CLT katsekehade liimvuukide keskmised kandevõimed.

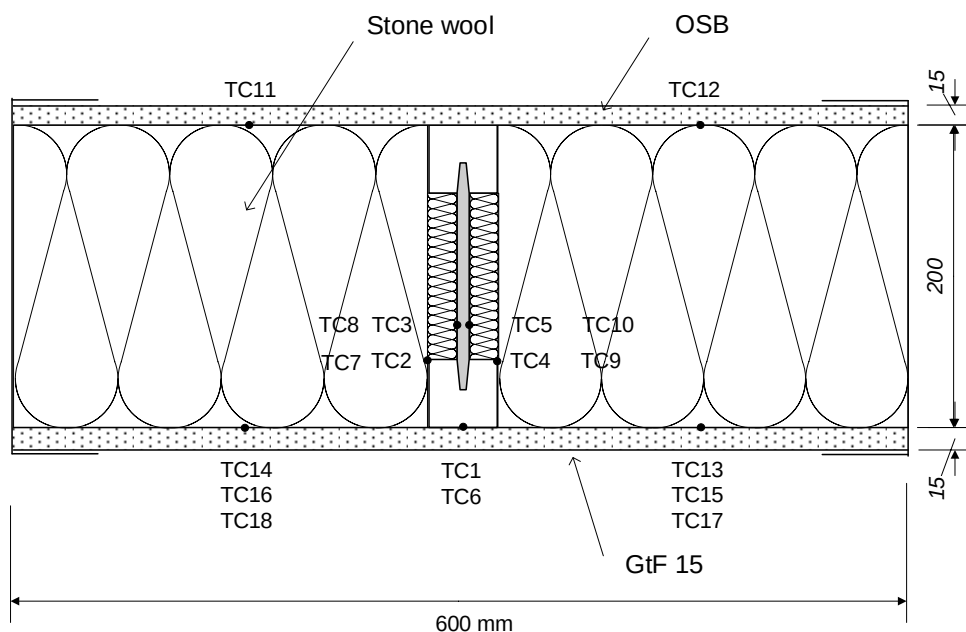
3.5.3 Võrdlus I-talade tulekatsetega

Lisaks eelnevatele katsetele viidi põletamisahjus läbi standardtulekahju katsed puidust I-taladega, mille tõmbevõos asus kolm sõrmjätku ühendust 250 mm vahekaugusega. I-talade katsetes mõõdeti talade läbipaindeid purunemise hetkeni. Katsekehadele rakendati koormus, mis oli võrdne 40%-ga katsekehade paindetugevusest. Ühest lauast lõigati vööd kahele I-talale, saadud I-talade paarist ühte katsetati tavatingimustel purunemisele ning teisega tehti tulekatse. Eeldati, et mõlemal talal oli sama tugevus. Katsekeha oli ümbritsetud kivivillaga ning kahele poole asetati peale kipsplaadid. Kõikidel katsekehadel mõõdeti ka temperatuure eri piirkondades. Eesmärgiks oli hinnata millisest sõrmjätkest purunemine toimub (või mitmest), milline on purunemispilt (joonised 29 ja 30) ning kaua aega läheb purunemiseks.

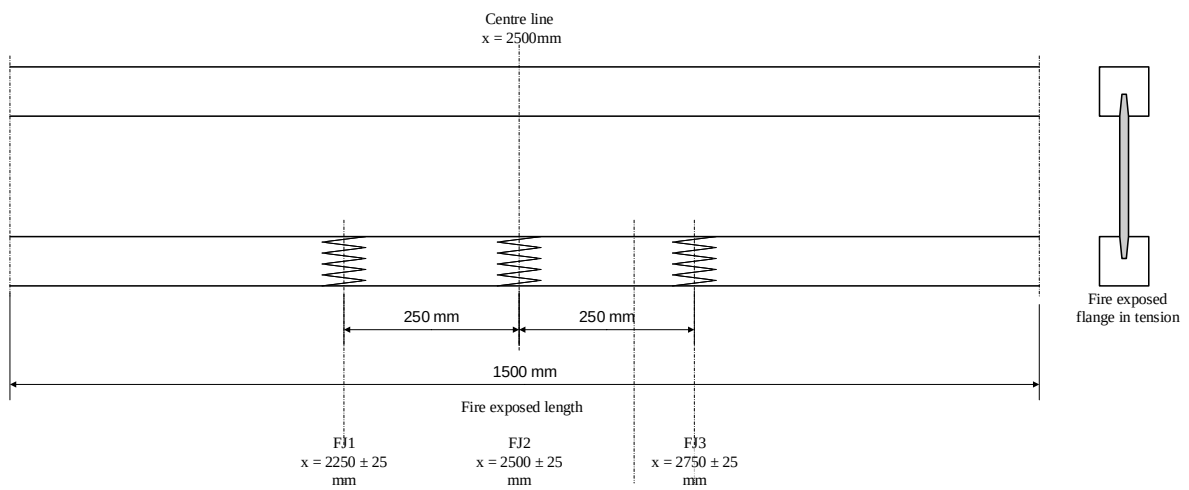
Tulemused salvestati ning on näha graafikul 25. Tuleb aga arvestada, et söestumine ei alanud ajahetkel 0 ning mõned katsekehad purunesid enne kui söestumine jõudis üldse alata.

Liim 11 esimese katsekeha purunemine oli seotud oksakohast purunemise ning mitte liimiga. Antud katsekeha puhul ei jõudnud söestumine alatagi. Samuti sai oksakohast purunemine saatuslikuks ka esimesele liim 8 katsekehale. Mõlema katsekeha puhul katset korrati ja saadi teisel korral oluliselt parem tulemus.

Muidu liimide puhul kesiste tulemusega liim 12 andis siin katsetes hea tulemuse. Tuleb arvestada, et purunemine toimus puidust. Kuna iga liimiga tehti üks tulekatse, ei ole tulemused 100% arvestatavad, sest suur tõenäosus on juhuslikkusele. Ühtlasemate ja usaldusväärsemate tulemuste saamiseks tuleks iga liimiga katseid rohkem teha. Liim 5 ja 7 on kõikides katsemeetodites näidanud kehvemaid tulemusi ning samuti ka I-talade tulekatsetes. Mõlemal juhul oli purunemine seotud liimidega ja söestumine kipsplaadi taga ei olnud jõudnud alatagi. Lisaks nendele oli purunemisviis soetud liimiga ka liimidel 1, 4 ja 9, kahel viimasel ei jõudnud söestumine purunemishetkeks alata. Liim 2, 3, 6 ning liim 8 ja 11 korratavad katsed näitasid häid tulemusi, mida oli ka oodata ja kinnitavad seda, et tegu on kõikide katsemeetodite puhul tugevamate liimidega.



Joonis 27. I-tala katsekeha ning temperatuurmõõdikute asukohad. [20]



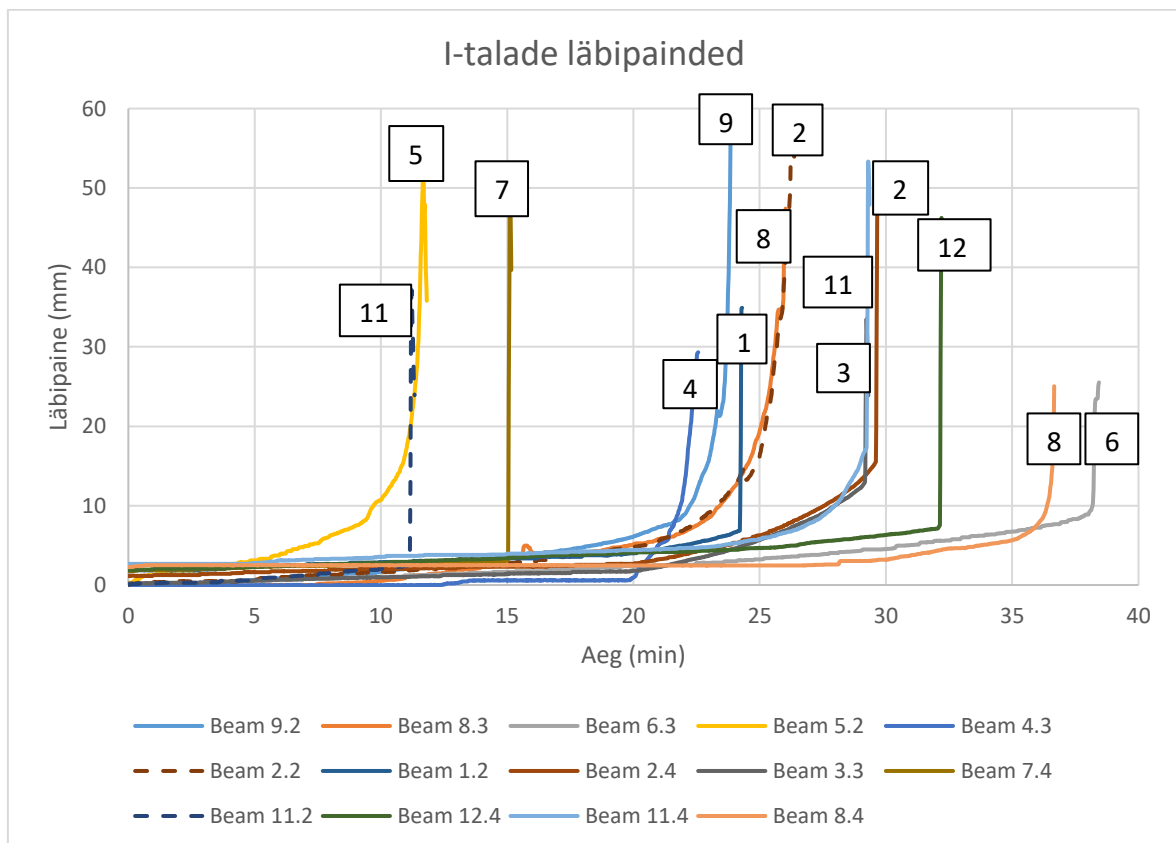
Joonis 28. I-tala katsekeha ning temperatuurimõõdikute ja sõrmjätikude asukohad.
[20]



Joonis 29. Liimist purunenud vöö. [20]



Joonis 30. Puidust purunenud vöö. [20]



Graafik 25. I-talade läbipained tulekahju olukorras.

3.6 Järeldused/ettepanekud

Käesoleva töö raames läbi viidud ning FIREWOOD projekti koonuskuumuti katsetulemuste võrdluse põhjal on võimalik öelda, et enamasti on väiksema koormusega tehtud katsete tulemused ühtlasemad. Suurema koormusega võivad katsetulemusi mõjutada erinevad asjaolud, näiteks puidu varieeruv tugevus, liimimise kvaliteet, kasutatud tugevdavate vineeride kinnituse kvaliteet, liiga järsk koormamine jne.

Trondheimis läbiviidud kipsplaadiga sarnaste katsete võrdlusest selgus, et suures pildis on katsetulemused sarnased. Kaitsmata puidu katsetulemused olid aga ühtlasemad, seega ka usaldusväärsemad. Katsetest selgus, et kui katsetatud puidu tihedus jääb etteantud piiridesse, on võimalik väga täpselt ennustada söestumiskiirust ning seoses sellega ka allesjäänud ristlõike kõrgust igal ajahetkel. See tähendab, et katsemeetodi saab arendada välja väiksemat materjalikulu nõudvaks ning vähem ajakulukaks.

Katsetulemuste analüüsiga ilmnas, et tõmbekatsetel tekib arvestatav ekstsentrilisus ning sellest tulenev paindemoment. Oli näha, et ekstsentrilisuse komponent valemis andis peamise osa tugevusest. Selline tähelepanek tehti esimesena selle lõputöö autori poolt tehtud katsete käigus ning on videosalvestusena ülesse võetud.

Kuna ekstsentrilise tõmbe ning purunemisaja graafikud on välimuselt sarnased, saab öelda, et mida kauem peab katsekeha tules vastu, seda tugevam ta on. Katsekeha söestumisel ristlõige väheneb, mõjuv jõud rakendub aina väiksemale pindalale ning samas ekstsentrilisus suureneb, ehk lisandub veel lisaks mõjuv paindemoment.

Liimide võrdlemise aluseks oli teada liim 2 tüüp – PRF. Teiste liimide tulemuste analüüsiks võrreldi neid liim 2 tulemustega. Paljudes katsetes andis liim 11 mõnevõrra paremaid tulemusi kui liim 2. Selle põhjal võib öelda, et liim 11 on samuti hea tulepüsivus- ning tugevusnäitajatega. Ligilähedale jäi ka liim 3.

Analüüsist teiste katsemeetoditega oli näha, et tugevamad ja nõrgemad liimid jagunevad sarnastesse gruppidesse nagu ka sõrmjätku väikesemõõduliste katsete korral.

Töö kokkuvõtteks võib öelda, et inseneripuidus kasutatavate liimide tulepüsivuse hindamiseks saab kasutada selles töös uuritud koonuskuumuti katsemeetodit. Väljapakutud meetodiga saaks liimid jagada kas kahte või kolme gruppi. Esimese variandi puhul eristataks tugevaid (liim 2, 3, 6, 8, 11) ja nõrkasid (1, 4, 5, 7, 9, 12) liime. Teise variandi puhul oleksid nõrgad (1, 4, 5, 7, 12), keskmised (8, 9) ja tugevad (2, 3, 6, 11) liimid.

Gruppidesse jagamine on vajalik ka selleks, et hinnata kas konstruktsiooni tulepüsivust on vaja arvutada lineaarse mudeliga või astmemudeliga. Heade liimide puhul saab teha juba eelduse, et söestunud lamell ei kuku ära. Kehvamate liimide puhul tuleb arvutustes arvestada söestunud lamellide ära kukkumisega ning kiirema söestumisega pärast seda.

Täpsemaks hindamiseks on vaja seada piirid, mille alusel jagada liimid gruppidesse. Antud töö raames pakutakse välja kolme gruppi jagamine ja jagamise aluseks peaks olema purunemise aeg ning purunemisviis. Esimesse gruppi (tugevad) kuuluvad liimid, mis püsivad tules 700 sekundit või enam, olenemata purunemisviisist. Selliste katsekehade puhul on purunemise korral näha head liimi vastupidavust. Teise gruppi (keskmised) kuuluvad katsekehad, mis pidasid tules vastu 600 või rohkem sekundit ning purunesid puidust. Kolmandasse gruppi (nõrgad) kuuluvad katsekehad, mis püsisid tules kauem kui 550 sekundit ning purunesid liimist või puidust. Sellise jagunemise korral tuleks liimide puhul, mille püsivus tules on vähem kui 550 sekundit ning purunesid liimist, kaaluda nende mitte kasutamist olulistest konstruktsioonides või kasutada neid liime kasutatavate konstruktsioonide tulepüsivuse arvutamisel astmemudelit. Kui purunemine on toimunud puidust, tuleks katset korrata. Olenevalt gruppidesse jagamise süsteemist tuleks ette anda piir, millest alates on tarvis arvutustes rakendada astmemudelit. Antud töös soovitatakse astmemudelit kasutada grupp 3 (nõrgad liimid) liimide puhul.

KOKKUVÕTE

Käesoleva töö eesmärk oli võrrelda erinevate inseneripuidus kasutatavate liimide tulepüsivust. Inseneripuidus kasutatakse liime nii sõlmedes kui ka elementide konstrueerimisel. Liimid on tavaolukorras näidanud puidule sarnaseid tugevusomadusi ning nende omadusi kandevõime arvutamisel eraldi käsitlema ei pea. Liimidest esimesena ja pikalt kasutusel olnud formaldehüüdi sisaldavad liimid (PRF) näitasid lisaks tavaolukorrale häid tugevusomadusi ka kõrgendatud temperatuuridel ja tules. Nende toksilisuse tõttu kasutatakse neid tänapäeval vähe ning asemele on tekkinud palju alternatiive, mille tugevusomadusi kõrgendatud temperatuuridel ja tules pole siiani kuigi palju uuritud. Samuti ei käsitle seda väga põhjalikult olemasolev Eurokoodeks 5.

Siiani on Eurokoodeksis eeldatud, et söestumine toimub teatud liimide korral lineaarselt ning tekkiv söekiht kaitseb allesjäänud ristlõiget tule eest. Katseliselt on täheldatud, et sellist eeldust ei ole kõikide liimidega võimalik teha. Selleks on uues Eurokoodeksi versioonis kasutusele võetud astmemudel, mis arvestab söestunud lamelli ära kukkumisega ning sellele järgneva kiirenenud söestumisega. Astmemudel kirjeldab ligilähedaselt inseneripuidu käitumist tulekahjus väikese tulepüsivusega liimide kasutamisel. Samas ei ole astmemudeli kasutamine kõikide liimide puhul põhjendatud, sest heade tulepüsivusomadustega liimide puhul söekihi eemaldumist ei toimu. Seega on tarvis luua süsteem, mille alusel hinnata vajadust astmemudeli kasutamiseks.

Käesoleva töö raames on pakutud välja katsemeetod liimide tulepüsivuse hindamiseks. Katsemeetodi loomiseks viidi töö koostaja poolt läbi TalTechi Puidumajas väikesemõõdulised koonuskuumuti katsed ning neid tulemusi võrreldi teiste FIREWOOD projekti käigus Trondheimis läbiviidud koonuskuumuti ja ahjukatsete tulemustega.

Katsed viidi läbi koonuskuumutiga (ISO 5660) ja katsekehasid koormati staatiliselt tõmbele. Katse kestis kuni katsekeha purunemiseni, misjärel fikseeriti purunemiseks kulunud aeg. Selle töö raames kasutati puiduliigina ainult kuuske. Tulevikus tuleks uurida ka teiste puiduliikide käitumist analoogsetes katsetes.

Käesoleva töö raames katsetati 64 katsekeha, mille mõõdud olid 10 x 45 x 300 mm. Katsetulemused saadi nii visuaalsete vaatluste kui ka mõõdetavate suuruste järgi. Nende alusel arvutati analüüsiks vajalikud parameetrid.

Lisaks võrreldi tulemusi teiste FIRENWOOD projekti raames läbiviidud katsete tulemustega.

Tulenevalt analüüsist leiti, et TalTechis läbiviidud katsed annavad objektiivse ülevaate liimide käitumisest, kuna mõjutavaid tegureid on vähem kui teistes katsemeetodites. TalTechi katsemeetod on kõikidest uuritud katsemeetoditest ka kõige lihtsam ja odavam. Kõikides katsemeetodites osutusid tugevamateks ning nõrgemateks samad liimid.

Sõrmjätaku tõmbekatsetes hinnatakse katsekehade tugevust ning purunemisaega ja -viisi (kas liimist või puidust). Tugevuse puhul võetakse arvesse ka puidu ristlõike söestumise tõttu tekkiv ekstsentrilisus.

Kirjeldatud meetodi alusel jagatakse liimid kolme gruppi: tugevad, keskmised ja nõrgad. Gruppidesse jagamise aluseks on purunemisaja ning purunemisviisi kombinatsioon. Tugevateks liimideks liigitatakse liimid, mis mistahes purunemispildi puhul püsivad tuleolukorras 700 või rohkem sekundit. Keskmisteks liimideks liigitatakse liimid, mille ajaline vastupidavus jääb 600 ja 700 sekundi vahele ning mille purunemine on seotud puidust purunemisega. Nõrkade liimide alla liigitatakse liimid, mis mistahes purunemisel kestavad 550 kuni 600 sekundit. Enne 550 sekundit purunevate katsekehade puhul tuleb vaadata purunemisviisi. Puidust purunenud katsekehade puhul on vajalik katsete kordamine. Liimist purunemisel tuleks kaaluda liimi mitte kasutamist olulistes konstruktsioonides või astmemudeli kasutamist.

Liimide gruppidesse jagamise eesmärgiks on ühtlasi ka vajadus hinnata astmemudeli kasutamise vajadust tulepüsivuse arvutustes. Antud töös soovitatakse astmemudelit kasutada grupp 3 (nõrgad liimid) liimide korral.

Antud töös välja pakutud liimide grupeerimine on välja pakutud FIRENWOOD projekti raames siiani saadud katseandmete põhjal ning ei välista seda, et tulevikus teiste meetoditega saadud tulemused annavad sellest meetodist erinevaid tulemusi. Samas on FIRENWOOD projekti raames tehtud katsed piisavalt erinevad, kuid liimide gruppidesse jaotumine sarnane. Antud magistritöö koostamise ajaks ei jõutud projekti raames lõpuni suuremamõõtmeliste katsetega, mistõttu on oluline tulevikus neid tulemusi väikesemõõduliste katsete tulemustega võrrelda kinnitamaks tulemuste adekvaatsust.

SUMMARY

The goal of this thesis was to investigate the effect of adhesives on fire resistance of engineered wood structures, specifically looking at finger joints. Adhesives are frequently used in wood structures because they have similar strength properties at room temperature. The first and most common adhesives to be used in the past were phenol-resorcinol-formaldehydes (PRF), which in addition to room temperatures were also very effective at higher temperatures and even in fire. They have however been removed from widespread use because of their toxicity. Numerous alternatives have entered the market in the last decades, but their resistance to heat and fire has yet to be thoroughly investigated. The current Eurocode 5 (EN 1995-1-2:2004) does not involve much information about the topic.

Until now, the Eurocode implied that the charring of wood takes place linearly and the formed char layer protects the rest of the cross section from fire. Studies have shown that this does not apply to some of the new adhesives that are being used. This led to the development of the stepmodel, which indicates that the char layer may fall off at some point and the charring of the then unprotected cross section will be sped up. The stepmodel helps to take the real outcome of the fire situation into consideration. At the same time the use of the stepmodel is not always justified, because adhesives with good fire resistance do keep the char layer intact. So a system is needed to evaluate the need of using the stepmodel in calculations.

This thesis offers a testing method for evaluating the fire resistance of adhesives. Small-scale cone heater tests were performed by the author of this thesis and the results were then compared with the other FIRENWOOD project test results.

A cone heater (ISO 5660) was used for testing and the specimens were loaded. The test concluded with the failure of the specimen. For this thesis the specimens were produced of spruce, however potential future testing should involve tests with other wood species. 64 specimens with the size of 10 x 45 x 300 mm were tested at TalTech. Visual observations were made before and after testing and char depth after the test was measured.

In addition to analyzing the tests on their own they were also compared to the results of other tests that were part of the FIRENWOOD project.

The testing method used in this thesis is the most effective of all the methods, as there are least factors influencing the outcome. The testing method is the easiest to carry out and also the cheapest. The weakest and strongest adhesives turned out to be the same in all the tests.

The failure time and failure modes (failure from wood or adhesive) were determined and tensile strength was calculated. Due to charring of wood eccentricity must be taken into consideration when calculating tensile strength.

The adhesives are divided into three groups: strong, moderate and weak adhesives. Distribution is based on the combination of failure time and failure mode. Adhesives are considered strong when the average failure time is 700 seconds or more, the failure mode is irrelevant. Moderate adhesives have a failure time between 600 and 700 seconds and the failure occurred in wood. Weak adhesives have a failure time between 550 and 600 seconds irrespective of failure mode. Adhesives that had a failure time of less than 550 seconds should not be used in important constructions or the stepmodel should be used in calculations.

The division into groups evaluates the need of using the stepmodel in calculations. In this thesis it is suggested that the stepmodel be used for group three (weak adhesives) and for adhesives with a failure time of less than 550 seconds.

The nature of the FIRENWOOD project tests were different, however the results were similar. This indicates that it is possible to divide the adhesives into general groups based on their behavior in fire. However it is necessary to conduct full-scale tests in the future and compare the results to verify the adequacy of the test method.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] C. Petterson, Fire safety in Timber buildings – a review of existing knowledge, 2020. Loetud aadressil: https://www.brandforsk.se/wp-content/uploads/2020/11/Brandforsk_Report_Fire-Safety-in-Timber-Buildings-1.pdf Kasutatud: 10.01.2021
- [2] H. W. Reinhardt, "Condensed review of research on glued timber at the University of Stuttgart", loetud: 25.03.2021
- [3] M. Klippel, A. Frangi, "Fire safety of glued-laminated timber beams in bending," *Journal of Structural Engineering*, vol. 143, issue 7, July 2017. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001781](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001781)
- [4] C. B. Ong, W. S. Chang, M. P. Ansell, D. Brandon, M. Sterley, P. Walker, "Bench-scale fire tests of Dark Red Meranti and Spruce finger joints in tension," *Construction and Building Materials*, vol. 168, pp. 257-265, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.041>
- [5] M. Klippel, "Fire safety of bonded structural timber elements", [Doktoridissertatsioon], ETH Zürich, Germany, 2014. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-010171655>
- [6] M. Sterley, loeng "Gluing of wood", 23.05.2021
- [7] *Eurokoodeks 5: Puitkonstruktsioonide projekteerimine Osa 1-2: Üldist. Tulepüsisivusarvutus*, EVS-EN 1995-1-2:2005. [Online] <https://www.evs.ee/en/evs-en-1995-1-2-2005+na-2006>
- [8] A. Frangi, M. Fontana, A. Mischler, "Shear behaviour of bond lines in glued laminated timber beams at high temperatures," *Wood Science and Technology*, vol. 38, pp. 119-126, 2004. <https://doi.org/10.1007/s00226-004-0223-y>
- [9] M. Vrazel, T. Sellers Jr, "The effects of species, adhesive type, and cure temperature on the strength and durability of a structural finger-joint," *Forest*

- Products Journal*, vol. 54, no. 3, pp. 66-76, 2004. Loetud aadressil:
<https://www.fwrc.msstate.edu/pubs/9540.pdf>
- [10] B. Östman, (Ed.), *Fire safety in timber buildings – technical guideline for Europe*, Stockholm, Sweden, 2010:19.
- [11] *Eurokoodeks 1: Ehituskonstruksioonide koormused Osa 1-2: Üldkoormused. Tulekahjukoormus*, EVS-EN 1991-1-2:2004. [Online]
<https://www.evs.ee/en/evs-en-1991-1-2-2004+na-2007>
- [12] L. A. Lowden, T. R. Hull, "Flammability behaviour of wood and a review of the methods for its reduction," *Fire Science Reviews*, vol. 2, issue 4, 2013.
<https://doi.org/10.1186/2193-0414-2-4>
- [13] *Eurokoodeks 5: Puitkonstruktsioonide projekteerimine Osa 1-2: Üldist. Tulepüsivusarvutus*, EVS-EN 1995-1-2:2020
- [14] I. Šarin, M. Soontalu, *Suitsu ja põlemisgaaside eemaldamine tulekahjudel*, Sisekaitseakadeemia, 2015.
- [15] R. Schmeimann, "Kõrgemate kui neljakorruseliste puitmajade ehitamine Eestis" [Magistritöö], Sisekaitseakadeemia, Tallinn, Eesti, 2014. [Online].
 Loetud aadressil:
[https://digiriul.sisekaitse.ee/bitstream/handle/123456789/655/2014_SCME IMANN.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://digiriul.sisekaitse.ee/bitstream/handle/123456789/655/2014_SCME%20IMANN.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [16] M. H. Ramage et al, "The wood from the trees: The use of timber in construction," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 68, part 1, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.107>
- [17] *Structural timber – Strength classes*, EVS-EN 338:2016. [Online].
<https://www.evs.ee/en/evs-en-338-2016>
- [18] A. M. Harte, "Introduction to timber as an engineering material," in *ICE Manual of Construction Materials*, 1st ed., 2009. [Online] Loetud aadressil:
https://www.researchgate.net/publication/260976792_Introduction_to_Timber_as_an_Engineering_Material

- [19] X. Yang, W. Zhang, "Flame Retardancy of Wood-Polymeric Composites" in *Polymer-based multifunctional nanocomposites and their applications*, 1st ed., Elsevier, 2019. [Online]. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-01215-6>
- [20] A. Just, M. Sterley, R. Olofsson, FIRENWOOD raport D3.2 "Loaded tests with I-joists", 2021