



EESTI MAAÜLIKOOL
Metsandus- ja maaehitusinstituut

Silver Närep

**HAMMASTÜÜBLITEGA ÜHENDATUD PUIT-PUIDUGA
LIIDETE KATSED**

THE EXPERIMENTS OF TIMBER CONNECTIONS
CONNECTED WITH TOOTHED DOWELS

Ehitusinseneriõppe lõputöö
Maaehituse õppekava

Juhendaja(d): lektor Renno Reitsnik, *MSc*

Marko Teder, *PhD*

Tartu 2020

Eesti Maaülikool		Magistritöö lühikokkuvõte	
F. R. Kreutzwaldi 1, Tartu 51006			
Autor: Silver Närep		Õppekava: Maaehitus	
Pealkiri: Hammastüüblitega ühendatud puit-puiduga liidete katsed			
Lehekülgi: 52	Jooniseid: 42	Tabeleid: 8	Lisasid: 11
Osakond: Maaehituse ja veemajanduse õppetool			
ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood: Tsiviilehitus (T220)			
Juhendaja(d): lektor Renno Reitsnik, MSc; Marko Teder, PhD			
Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu 2020			
Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli katseliselt uurida hammastüüblite ning poltidega ühendatud puit-puiduga liidete maksimaalseid koormusi ning võrrelda neid arvutuslikul teel saadud tulemustega. Ühtlasi oli ka eesmärgiks leida uusi töötavaid liidete lahendusi. Katsekehade tegemiseks kasutati saematerjali ristlõikega 75×150 mm, kahte erinevat hammastüüblit, C1 ja C10 tüüpi, kummagi läbimõõt $d_c = 50$ mm ja polte pikkusega $l = 180$ mm ja diameetriga $d = 12$ mm. Katseid tehti kolme tüüpi: ühelõikeline nihkekatse; jätkatud tala paindekatse; liittala paindekatse. Iga katsetüübi jaoks valmistati 20 katsekehade komplekti, 10 kummalegi hammastüübli tüübile, mis tegi katsete koguarvuks 60. Katsed sooritati Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituudi puidulaboris universaalsel elektromehaanilisel katsemasinal INSTRON 3369 ning maaehituse ja veemajanduse õppetooli ehituskonstruksioonide laboris survepressiga Form+Test, katsesilindriga EPZ-D 400. Arvutused koostati EVS-EN 1995- 1-1:2007 EUROKOODEKS 5: Osa 1-1 lõikudes 8.5; 8.10 ja 10.4.3 toodud normidest lähtudes. Katsetulemustest selgus, et poldi kasutamine hammastüübliga puit-puiduga liites annab kogu liitele parema kandevõime. C1 tüüpi hammastüübli kandevõime oli väiksem kui arvutuslikul teel saadud kandevõime ning C10 puhul vastupidi. Poldi kasutamine lisaks hammastüüblile näitab paremat koormuse vastupanu, võrreldes 2017. aasta Villu Melgi lõputööga, kus kasutati ainult hammastüübleid.			
Märksõnad: kandevõime, paine, siire, okaspuu, hammastüübel,			

Estonian University of Life Sciences F. R. Kreutzwaldi 1, Tartu 51006		Abstract of Master's Thesis	
Author: Silver Närep		Curriculum: Rural Building	
Title: The experiments of timber connections connected with toothed dowels			
Pages: 52	Figures: 42	Tables: 8	Appendixes: 11
Department: Chair of Rural Building and Water Management Field of research and (CERC S) code: Civil Engineering (T220) Supervisors: lecturer Renno Reitsnik, <i>MSc</i> ; Marko Teder, <i>PhD</i> Place and date: Tartu 2020			
The aim of this master's thesis was to experimentally study the maximum load carrying capacity of timber connections connected with toothed-plate connectors including the bolts, and to compare these results with the calculated values. The test pieces were made using a lumber material with a cross-section of 75×150 mm, two different toothed dowels, type C1 and C10, each with a diameter $d_c = 50$ mm and bolts with a length of $l = 180$ mm and a diameter of $d = 12$ mm. The tests were performed in three types: single-section shear test; continued beam bending test; composite beam bending test. For each toothed dowel type and test type, 10 sets of test specimens were prepared, giving a total of 60 tests. Experiments were carried out at the Estonian University of Life Sciences timber laboratory on the testing system INSTRON 3369 and in Civil Engineering and Water Management laboratory with a pressure press Form + Test, using test cylinder EPZ-D 400. Test objects were compiled and calculations performed based on the norms defined in section 8.5; 8.10 and 10.4.3 of the EVS-EN 1995-1-1:2007 EUROCODE 5: Part 1-1 standard. The test results showed that the use of a bolt in a wood-wood joint with a toothed dowel gives the whole joint a better load-bearing capacity. The load capacity of the C1 tooth was lower than the calculated load, and vice versa for the C10. The use of a bolt in addition to a toothed dowel shows better load resistance compared to the 2017 master's thesis of Villu Melk, where only toothed dowels were used.			
Keywords: load capacity, bending, deformation, soft wood, toothed dowel			

SISUKORD

SISSEJUHATUS.....	6
1. ÜLEVAADE KIRJANDUSEST	8
1.1. Hammastüüblite olemus	8
1.2. Hammastüüblite tööpõhimõte.....	9
1.3. Hammastüüblite liigid.....	10
1.4. Hammastüübel ühenduste arvutused	11
1.5. Varasemate tööde kokkuvõtted.....	14
1.5.1. Erinevate hammastüüblitega ühendatud puit-puiduga liidete katsed	14
1.5.2 Liimpuittaladesse tehtud ekstsentriliste või gruppides paiknevate aukude tugevdamine	15
1.6. Kokkuvõtvad järeldused kirjandusest	16
2. UURIMISMATERJAL JA METOODIKA.....	17
2.1. Metoodika.....	17
2.2. Uurimismaterjal	17
2.3. Katsekehad	18
2.3.1 Ühelõikeline nihkekatse	18
2.3.2 Jätkatud tala paindekatse	21
2.3.3. Liittala paindekatse	22
2.3.4 Katsekehade niiskusesisaldus.....	24
2.3.5 Katsekehade märgistus.....	24
2.4. Katsekehade valmistamine	26
2.4.1. Ühelõikelise nihkekatse katsekehade valmistamine	26
2.4.2. Jätkatud tala katsekehade valmistamine.....	27
2.4.3. Liittala katsekehade valmistamine	30
2.5. Katsete tegemine ja andmesalvestus	30
2.6. Statistiline andmetöötlus	33
3. KATSETULEMUSED JA ANALÜÜS.....	34
3.1. Esimene katseseeria.....	34
3.2. Teine katseseeria.....	35
3.3. Kolmas katseseeria	37

3.4. Neljas katseseeria	38
3.5. Viies katseseeria	40
3.6. Kuues katseseeria.....	41
3.7. Graafiline nihkekatsete võrdlus ainult poldi kasutamisel	43
3.8. Katsekehade purunemispiltide kirjeldamine.....	44
3.9. Nihkekatsete arvutuslikud normatiivsed kandevõimed	49
KOKKUVÕTE	50
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU.....	52
LISAD.....	53
Lisa 1. Katsekehade niiskusesisalduste statistilised näitajad	54
Lisa 2. Esimese katseseeria purunemispildid	56
Lisa 3. Teise katseseeria purunemispildid	61
Lisa 4. Kolmanda katseseeria purunemispildid	66
Lisa 5. Neljanda katseseeria purunemispildid	71
Lisa 6. Viienda katseseeria purunemispildid	76
Lisa 7. Kuuenda katseseeria purunemispildid	81
Lisa 8. Kahepoolsete hammastüüblite puit-puiduga liidete parameetrid	86
Lisa 9. Poltide parameetrid hammastüübel-liites	88
Lisa 10. Kahepoolsete hammastüüblite ja poltide normatiivne kandevõime	89
Lisa 11. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendajate kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta	91

SISSEJUHATUS

Puit on taastuv ning vanimaid ehituses kasutatavaid loodusvarasid ja see leiab kasutust väga laialdastes valdkondades. Taani uurija Christian Jürgensen Thomsen mõtles 1836. aastal välja ehitusmaterjalide kasutamiste ajastud, milleks oli kivi-, pronksi- ja rauaaeg. Tänapäeva teadlased on välja selgitanud, et tegelikult oli ajastuid neli, ehk siis enne kiviea valitses veel ka puuaeg. Puit oli meie kaugete esivanemate üks põhilisi ehitusmaterjale. Puidu kerge kaal, töödeldavus ja tugevus annavad ehitusel mitmeid eeliseid. Näiteks moodustab puu tüvi ise juba valmis kandekonstruktsiooni (Saarman jt 2006).

Puidu õige kasutamise eelduseks on põhjalikud teadmised selle struktuurist ja omadustest ning mõjust teistele toodetele. Kui pidada silmas taaskasutust ning keskkonna säästmist, siis puitu saab ka suures osas ära kasutada näiteks madalakvaliteedilisest saematerjalist kaubaaluseid tehes või kütteks, võimalusi on palju.

Tänapäeval kasutatakse puitkonstruktsioone alates lihtsatest kõrvalhoonetest kuni unikaalsete ehitiste kandekonstruktsioonideni välja. Puidu ringlussevõtt on populaarseks saanud tänu oma mainele kui keskkonnasõbralikule tootele. Tarbijate seas on levinud arvamus, et ringlussevõetud puidu ostmisel väheneb nõudlus roheline puidu järele ja toob sellest lõppkokkuvõttes kasu keskkonnale. Küll aga tuleb vana puidu taaskasutamisel olla ettevaatlikum, kui uue puidu kasutamisel, kuna vanast hoonest või rajatisest võetud puit võib olla juba kahjustunud ja ei pruugi anda vajalikke tugevusnõudeid.

Puidu tugevus sõltub järgmistest teguritest:

- Puuliik;
- Tihedus;
- Kiudude ja koormuse suund;
- Niiskusesisaldus;
- Struktuurierinevused ja rikked, nt oksad jne.

Samuti on puit ka parema tulepüsivusastmega, mille uuringud näitavad, et tulekahjude korral suudab puidust kandekonstruktsioon vastu pidada umbes kaks tundi, aga betoonist konstruktsioon vaid pool tundi. (Saarman jt 2006).

Seda seepärast, et kõrge temperatuuri puhul puidu poorid paisuvad ja sealt eraldub õhk, mistõttu ei ole tulel põlemiseks niipalju hapnikku. Samuti kaitseb põlemise käigus tekkinud söekiht tule levikut sügavamale puidu sisse.

Puidust ehitamine on saanud järjest hoogu juurde, näiteks Norras asuv Mjösa torni nime kandev ehitis on 85,4 m kõrgune ja sellel on koguni 18 korrust, mis tõestab, et ka puidust saab ehitada kõrghooneid. Kuna puidust ehitisi ja sisekujundust on visuaalselt ilus vaadata ning puit annab interjööris sooja ja hubase tunde, on nõudlus puidu järele järjest kasvamas.

Peamiselt kasutatakse ehituskonstruktsioonides männi- ja kuusepuitu ning kuna nende omadused on suhteliselt lähedased, siis on konstruktsioonide koormuste arvutusjuhendid harilikult samad. Kuna puitmaterjal on anisotroopne (omadused sõltuvad puidukiudude suunast), peab märkima, et praktilise kasutuse seisukohast on kõige parem puidu pikikiudude suund, millel on suurim tugevus ning puidu niiskusest sõltuv paisumine ja kahanemine on kõige väiksemad (Saarman jt 2006).

Autorile pakkus hammastüüblite kasutamine puit-puiduga liidetes huvi, kuna hammastüüblitega katseid ja uurimisi pole teadaolevalt palju. Puidus tekivad aja jooksul kuivamisest praod ning bioloogilised ja muud kahjustused, mis vähendavad konstruktsiooni vastupidavust. Puit konstruktsioonimaterjalina töötab paremini survele kui tõmbele, mistõttu tuleks tõmbetugevust suurendada, kasutades näiteks hammastüübleid. Tüübelliidete tegemine on küll praeguseks vähenenud, kuna palju efektiivsemaks on osutunud liimpuittalade ning ogaplaatide kasutamine sõrestikes. Sellegipoolest võiks leida alternatiivi hammastüüblite kasutamiseks näiteks puitmaju tootvates ettevõtetes ülejäänud kasutamata puidu kokkuliitmiseks, et luua töötav konstruktsioonielement.

1. ÜLEVAADE KIRJANDUSEST

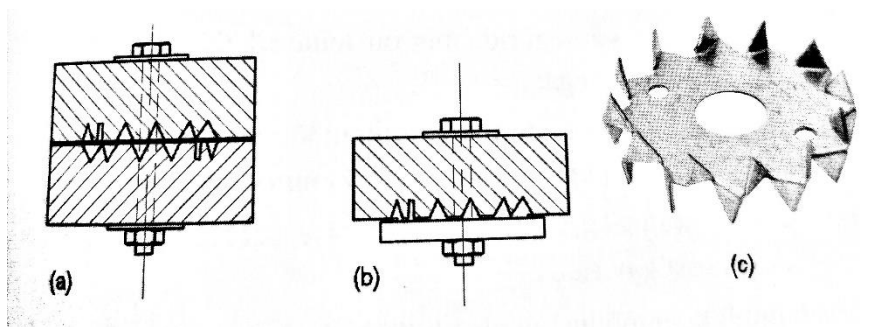
1.1. Hammastüüblite olemus

Sõltuvalt ühenduse tüübist tehakse hammastüüblid külmaltsitud pinnakatteta madala süsinikusisaldusega terasest, pidevast kuumtsingitud pehmest terasest või tempermalmist (Porteous ja Kermani 2013). Hambad on kolmnurkse või koonuse kujulised, mis painutatakse ühendusplaadi pinnaga risti. Hammastüübleid on mitmete erinevate kujudega: ümmargused, nelinurksed, kaheksanurksed ja muud kujundid. Hammastüüblite suurus jääb vahemikku 38 kuni 165 mm. Hammastüübleid on kas ühepoolsete või kahepoolsete hammastega (joonis 1.1), kus siis ühepoolseid kasutatakse puit-metalliga ühendustes ja kahepoolseid puit-puiduga ühendustes. Hammastüübleid tuntakse ka ralvade nime all, kuid see on vähe levinud sõnakasutus.

Hammastüüblite puuduseks on:

- nende omapärane, kuju mille tõttu on valmistamine ning liite koostamine keeruline;
- liite kandevõime langus puidu kuivamisel;
- paigaldatud tüübli ebamugav kontrollimine;
- spetsiaalse surveeadme vajalikkus ühenduse tegemisel (Just jt 2015).

Olenevalt hammastüübli tüübist tehakse neid kõrgusega 6,5...33 mm ja osade hammastüüblite puhul, näiteks ristkülikukujulisel, võib hamba kõrgus olla kuni 15,6 mm.



Joonis 1.1. a) kahepoolne hammastüübel puit-puiduga liites, b) ühepoolne hammastüübel puit-terasega liites, c) kahepoolne hammastüübel. (Just jt 2015)

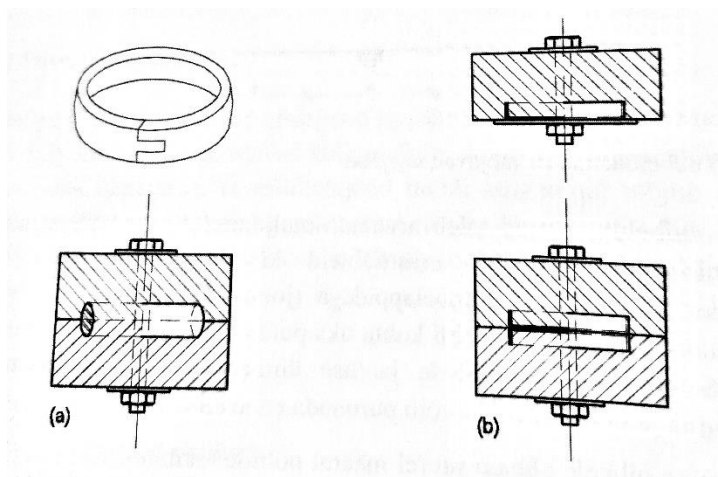
Puidu kõvadus on selle võime avaldada vastupanu temasse surutavat keha, mistõttu ei sobi hammastüüblit suruda puitu, mille tihedus on suurem kui 500 kg/m^3 (Porteus ja Kermani 2013). Liidete purunemise põhjus on tavaliselt puidu muljumispurunemine, mille tulemusel hammastüübel muljutakse puidu sees kõveraks ja see kaotab oma ühenduse puiduga. Kuna hammastüübel on küllaltki järeleandev tüübelliide, siis ei ole ühenduste deformatsioonid kuigi suured.

1.2. Hammastüüblite tööpõhimõte

Kõik materjalid avaldavad välistele jõududele vastupanu, mis püüavad muuta nende kuju ja mõõtmeid ning samal ajal ka purustada. Konstruktsiooni tugevuse määrab tavaliselt ära tema ühenduste tugevus ja nende asukoht, mistõttu tuleb ka tüüblite asukoht ja suurus täpselt ära määrata.

Tüübelliite tööpõhimõtteks on koos poldiga võtta vastu löikekoormusi. Nad kannavad nihkejõu üle otseselt ühelt pinnalt teisele. Polt hoiab ka tüübelliidet tugevasti koos, tagamaks hammastüübli täielikku kinnitust puidu sisse. Tüüblid jaotatakse kahte rühma, nad kas pannakse puitu tehtud avasse, mis nõuab tehasetingimusi rõngas- ja ketastüübli puhul (vt joonis 1.2), või hammastüübli puhul pressitakse jõuga puitu sisse (Siikanen 2012).

Ühepoolse hammastüübli puhul vastab augu läbimõõt poldi läbimõõdule, pluss väike tolerant, mille tõttu võib aga esineda konstruktsiooni sõlmede järeleandmist (Just jt 2015).



Joonis 1.2. a) rõngastüübel, b) ketastüübel. (Just jt 2015)

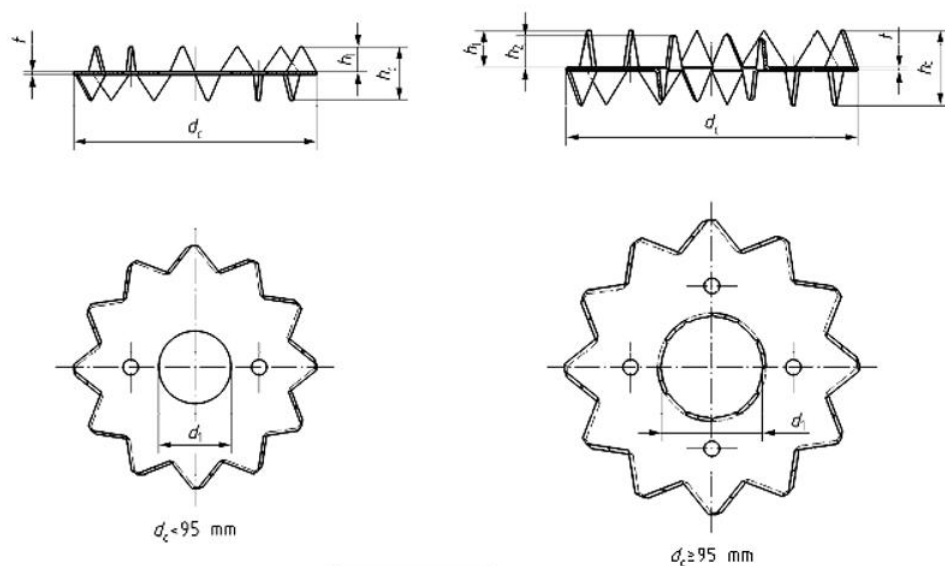
Rõngas- ja ketastüüblitel tuleb projekteerimisel arvestada nendele ette antud vahekauguste normidega, et liide käituks nii nagu ta peab.

1.3. Hammastüüblite liigid

Standardi EVS-EN 912:2011 kohaselt on hammastüübleid 11 erinevat tüüpi (C1...C11), mis on jaotatud kuju, materjali ja ühe- või kahepoolse ogalisuse järgi. Kõikidel hammastüüblitel on hambad/ogad painutatud plaadi suhtes 90-kraadise nurga all. Hammastüüblid C2, C4, C7, C9 ja C11 on ühepoolsete hammastega ja C1, C3, C5, C6, C8 ja C10 on kahepoolsete hammastega.

Enamjaolt on hambad kolmnurkse kujuga, näiteks hammastüüblite C1...C9 puhul, kuid C10 ja C11 tüüblitel on hambad koonilise kujuga. Koonilise kujuga hammastüübleid tuntakse ka kui Geka nime all ja kolmnurkseid tüübleid Bulldogi nime all. Hambad peavad ümber plaadi olema võrdselt jaotatud ja paiknema kogu ristlõike ulatuses sümmeetriliselt, et terve tüübli ulatuses oleks võrdne jõudude vastu võtmine.

Ümmargustel kolmnurksete hammastega hammastüüblitel (C1 ja C2 tüüpi), mille poldi auk on suurem kui 95 mm, on ümber poldi augu veel omakorda hambad, et tagada ühtlane jõudude vastupanu ning parem kinnitus puidu sisse (vt joonis 1.3).



Joonis 1.3. C1 tüüpi hammastüübel, millel on näidatud hammaste jaotus ümber perimeetri ja poldi augu. (EVS-EN 912)

Samuti on plaadil ka naelte augud, mis tagavad tugevama kinnituse materjali sisse.

Samas ei tohi olla poldiaukude läbimõõt suurem kui 1 mm poldi enda läbimõõdust, kuna siis tekib augus liialt liikumisruumi ja polt ei tööta nii nagu ta peaks. Poltide või mutrite all tuleb kasutada ka seibe, diameetriga vähemalt $3d$ ja paksusega $0,3d$, kus siis d on poldi diameeter. Seibid peavad toetuma kogu pinnal.

1.4. Hammastüübel ühenduste arvutused

Standardi EVS-EN 1995-1-1:2007 kohaselt tuleks hammastüüblitega liite normatiivne kandevõime määrata tüüblite oma normatiivse kandevõime ja poltide kandevõime summana.

$$R_{j,k} = R_{c,k} + R_{b,k},$$

kus

$R_{j,k}$ – on poldi ja hammastüübliga ühendatud liite iseloomulik kandevõime;

$R_{c,k}$ – on hammastüübli iseloomulik kandevõime;

$R_{b,k}$ – on poldi iseloomulik kandevõime.

Poltide ja tüüblite kandevõimed määratakse vastavalt Eurokoodeks 5 kirjeldatud tingimustest lähtuvalt.

Hamastüüblite normatiivne kandevõime $F_{v,Rk}$ tuleks vastavalt EVS-EN 1995-1-1:2007 määrata avaldisega:

$$F_{v,Rk} = \begin{cases} 18k_1k_2k_3d_c^{1,5} & \text{ühepoolsetele hamastüüblitele} \\ 25k_1k_2k_3d_c^{1,5} & \text{kahepoolsetele hamastüüblitele} \end{cases}$$

kus:

$F_{v,Rk}$ – on normatiivne kandevõime ühe hamastüübli kohta, N;

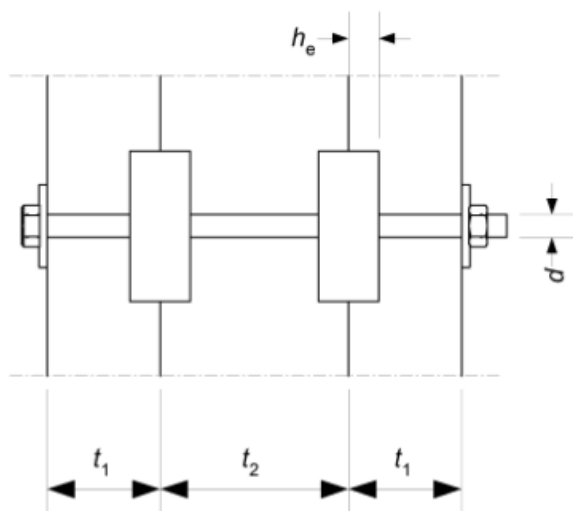
k_i – on modifikatsioonitegur, kus $i = 1$ kuni 3 on määratud allpool;

d_c – on:

- hamastüübli tüüpide C1, C2, C6, C10 ja C11 puhul läbimõõt, mm;
- hamastüübli C5, C8 ja C9 puhul tüübli külje mõõt, mm;
- hamastüübli C3 ja C4 puhul mõlema külje pikkuse korrutise ruutjuur, mm.

(Eurokoodeks 5 2007).

Välimise puitelemendi minimaalne paksuks võetakse $2,25h_e$ ning keskmisel $3,75h_e$, kus h_e on sängitussügavus, vt joonis 1.4 (Eurokoodeks 5 2007).



Joonis 1.4. Puitelementide paksused ning sängitussügavused. (Eurokoodeks 5 2007)

Joonisel 1.4 on kujutatud küll rõngastüübleid, kuid põhimõte on sama, mis hamastüüblitel.

Tegur k_1 tuleks võtta

$$k_1 = \min \left\{ \frac{1}{\frac{t_1}{3h_e}}, \frac{1}{\frac{t_2}{5h_e}} \right\}$$

kus:

t_1 – on küljeelemendi paksus;

t_2 – on keskmise elemendi paksus;

h_e – on süvistus-sügavus, mm.

Tegur k_2 tuleks määrata:

- C1 kuni C9 tüüpidele:

$$k_2 = \min \left\{ \frac{1}{\frac{a_{3,t}}{1,5 d_c}} \right\}$$

kui

$$a_{3,t} = \max \left\{ \begin{array}{l} 1,1 d_c \\ 7d \\ 80 \text{ mm} \end{array} \right.$$

kus:

d – on poldi diameeter, mm;

d_c – on toodud ülalpool.

- tüüpidele C10 ja C11

$$k_2 = \min \left\{ \frac{1}{\frac{a_{3,t}}{2,0 d_c}} \right\}$$

kui

$$a_{3,t} = \max \left\{ \begin{array}{l} 1,5 d_c \\ 7d \\ 80 \text{ mm} \end{array} \right.$$

kus:

d – on poldi diameeter, mm;

d_c – on kirjeldatud ülalpool

Tegur k_3 tuleks võtta:

$$k_3 = \min \left\{ \begin{array}{l} 1,5 \\ \frac{\rho_k}{350} \end{array} \right.$$

kus ρ_k on puidu normtihedus, kg/m³ (Eurokoodeks 5 2007).

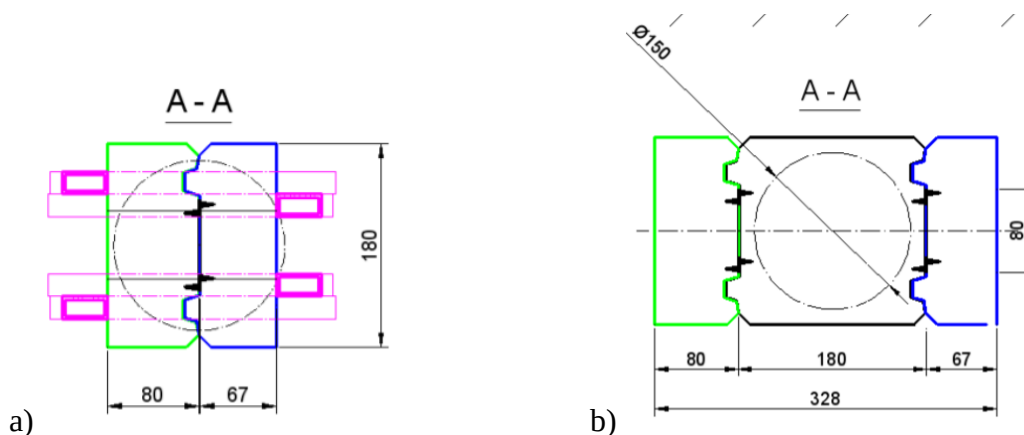
1.5. Varasemate tööde kokkuvõtted

1.5.1. Erinevate hammastüüblitega ühendatud puit-puiduga liidete katsed

Villu Melk uuris oma lõputöös erinevate hammastüüblitega ühendatud puit-puiduga liidete katsete maksimaalseid koormuste tulemusi arvutuslikul teel saadud tulemustega. Katsed teostati Maaülikooli puidulaboris katseseadeldisel INSTRON 3369.

Katsekehad koostati ja arvutused teostati standardis EVS-EN 1995- 1-1:2005+A1+NA+A2 EUROKOODEKS 5: Osa 1-1 lõigus 8.9 toodud juhistest lähtudes. Katseid tehti ühe- ja kahelõikelistena, kus siis omavahel oli ühendatud kaks või kolm keha (vt joonis 1.5). Kokku tehti 30 katset ühelõikelise ja 10 katset kahelõikeliste katsekehadega. Katsetes uuriti C1 ja C10 tüüpi hammastüübleid.

Joonisel 1.5 on toodud ühe- ja kahelõikelise katse põhimõtteline skeem.



Joonis 1.5. a) ühelõikelise katse põhimõtteline skeem, b) kahelõikelise katse põhimõtteline skeem. (Melk 2017)

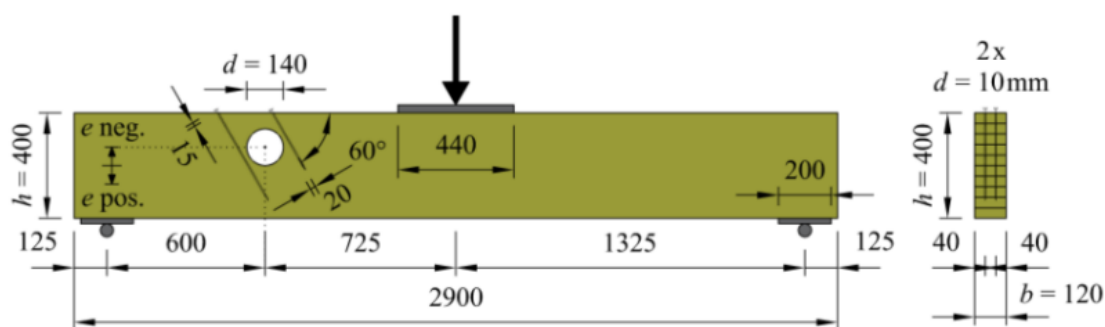
Katsete tulemusena selgus et C10 tüüpi hammastüüblite kõik kidad töötavad seinapalkidest valmistatud puit-puiduga liidetes nihkejõudude vastuvõtjana enam-vähem ühtlaselt, samas kui C1 tüüpi hammastüüblite puhul lõikuvad puidukiududega paralleelsed kidad puidukiudude vahele ja nihkuvad puidus puitu lõhestades nihkejõule väiksemat vastupanu osutades.

Magistritöö raames tehtud Villu Melk uuringu põhjal on võimalik soovitada C10 tüüpi hammastüüblite kasutamist puit-puiduga liidete moodustamiseks ehituskonstruktsioonides.

1.5.2 Liimpuittaladesse tehtud ekstsentriliste või gruppides paiknevate aukude tugevdamine

Martin Danzer, Philipp Dietsch ja Stefan Winter uurisid Müncheni Tehnikaülikoolis (*Technische Universität München*) liimpuittaladesse tehtud ümarate aukude käitumist, et laiendada praktilist kasutusala ja saada aimu konstruktsiooni käitumisest.

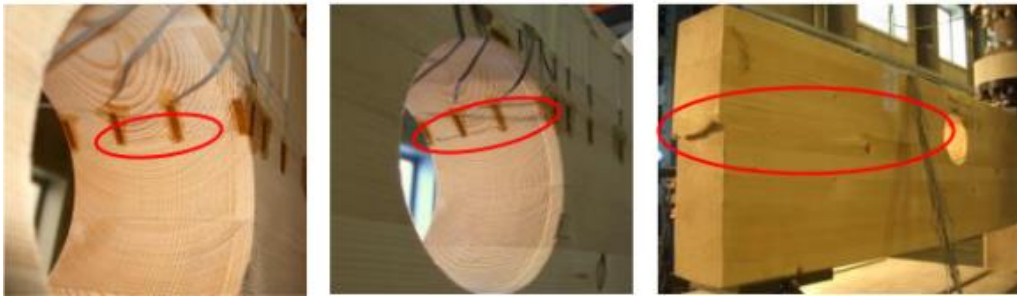
Kuna ventilatsiooni- või küttetorud asuvad enamasti arhitektuurilistel põhjustel kandekonstruktsiooniga samal tasemel, on taladest mööda minemine vältimatu ja tihtipeale tuleb nendest auk läbi puurida, mis seetõttu nõrgestab konstruktsiooni kandevõimet. Kõikide aukude läbimõõt oli 140 mm. Piki tala puuritud aukude vahesid vähendati kolmes sammus ($l_z = 1,05h; 0,70h; 0,35h$), kus l_z on aukude vaheline kaugus ja h on tala kõrgus vt joonis 1.6. Ekstsentriliste aukude vahesid vähendati neljas sammus ($e/h = \pm 0,175; \pm 0,100$), kus e on kaugus tala servast ja h on tala kõrgus.



Joonis 1.6. Ekstsentriliselt puuritud auk tala ülaservas. (Danzer jt 2016)

Joonisel 1.6 on näha, et katsetel kasutatud puidu parameetrid olid 120×400 mm, mis kuulus GL28h tugevusklassi. Tugevduseks aukude vahetus läheduses kasutati isekeermetstavaid kruve diameetriga 10 mm, mis keerati 60° nurgaga kiu suhtes materjali sisse. Kehade keskmine niiskusesisaldus oli 11,8% ja tihedus 465 kg/m^3 . Tsüklilisel koormamisel kasutati kolme punkti paindekatset kuni katsekeha purunemiseni.

Katsetulemustest selgus, et talade purunemisel esines kolm järjestikulist etappi, vt joonis 1.7. Esimeseks tunnuseks oli puidu ristlõike laius algav mõra, mis tulenes kiu suunaga risti koormatud jõust. Teiseks, jõu suurenemise tõttu arenes mõra veelgi suuremaks, ulatudes kogu ristlõike laiuses mõlematele külgedele. Kolmandaks etapiks oli mõra edasi arenemine piki tala kuni tala otsteni välja, saavutades sellega maksimaalse koormuse.



Joonis 1.7. Tala purunemise kolm etappi (vasakul: ristlõike laiuses algav mõra; keskel: mõra ulatus kogu ristlõike laiusesse; paremal: mõra edasi levimine piki tala kuni otsteni). (Danzer jt 2016)

Katsete tulemustest selgus, et puuritud aukude tugevdamiseks kruvide kasutamine võimalikult lähedal maksimaalse koormuse asukohas risti puiduga näitab positiivset mõju. Kuna kruvid olid 60° nurga all puidu kiu suhtes, annab kruvide pikisuunaline jäikus suuremat koormuse vastupanu kogu talale, eeskätt nõrgestatud kohale.

1.6. Kokkuvõtvad järeldused kirjandusest

Kuna hammastüüblite kasutusvaldkond on suhteliselt väike ja nendega tehtud uuringuid pole palju, pidas magistritöö autor katseliselt uurida hammastüüblitega ühendatud puit-puiduga liidete kasutamist koos poltidega.

Käesoleva töö autor on uurinud kõiki kättesaadavaid standardeid tüübel- ja poltliidete kohta. Kuna poldi auk nõrgestab puitu hammastüübli vahetus-läheduses pidas autor mõistlikuks panna poldid väljapoole hammastüübleid ja uurida katsetulemusi standardites kirjeldatud arvutuslike meetoditega. Hammastüüblid kuuluvad järeleandvate mehaaniliste kinnitite hulka, mistõttu ei esine konstruktsioonis kohest purunemist. Polt peaks suurendama oluliselt liite kandevõimet ja tagama selle, et hammastüüblid ei hakkaks koormuse käigus kehast eemalduma, vaid oleksid tihedalt teineteise vastu.

2. UURIMISMATERJAL JA METOODIKA

2.1. Metoodika

Kõikide katsete teostamisel võeti EVS-EN 14545:2008 „Puittarindid. Liitmikud. Nõuded” kirjeldatud juhiseid.

Hammastüüblid C1 ja C10 peavad vastama standardis EVS-EN 912:2011 „*Timber fasteners – Specifications for connectors for timbers*” kirjeldatud nõuetele. Kuna hammastüüblite katsemeetodeid pole enamasti üheski standardis kirjeldatud, on andmete salvestuseks ja katsete eeskujuks võetud erinevate metallkinnitustele tuginevad järgmised standardid: EVS-EN 26891:1999 „Puittarindid. Mehaaniliste kinnitusdetailidega liited. Tugevus- ja deformatsiooninäitajate määramise põhialused” ja EVS-EN 383:2007 „*Timber Structures – Test methods – Determination of embedment strength and foundation values for dowel type fasteners*”. Nendes standardites käsitletakse mehaaniliste kinnitusdetailide tugevus- ja deformatsiooninäitajaid.

2.2. Uurimismaterjal

Katsekehade valmistamisel võeti aluseks EVS-EN 1995-1-1:2007 „*Puitkonstruktsioonide projekteerimine Osa 1-1: Üldist. Üldreeglid ja reeglid hoonete projekteerimiseks*” standardis kirjeldatud miinimumnõudeid.

Kõikide katsekehade jaoks kasutati ühesuguse ristlõikega materjali 75×150 mm, mis andis piisava varu ka C10 tüüblitele mõeldud mõõtude jaoks. Katsekehade pikkused lõigati samuti mõõtu OÜ Varola tootmisruumides seadmega Auer BL100, mis lõikab arvutisse etteantud mõõdu ja arvu järgi täispikast talast vajaliku pikkusega kehad.

2.3. Katsekehad

Katsekehade valmistamiseks saadi hõõveldamata, visuaalselt tugevussorteeritud tugevusklassi C24 puitmaterjal OÜ Varolast.

Katseid tehti 3 erinevat tüüpi:

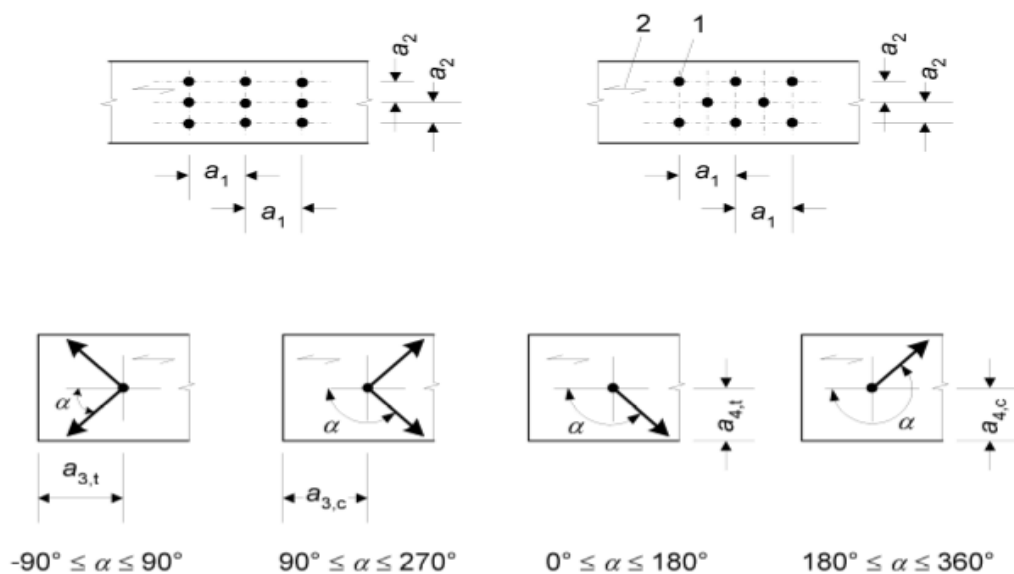
- Ühelõikeline nihkekatse
- Jätkatud tala paindekatse
- Liittala paindekatse

Igal katsetüübil kasutati kahte erinevat hammastüüblit C1 ja C10, mõlemad läbimõõduga 50 mm.

2.3.1 Ühelõikeline nihkekatse

Ühelõikelise nihkekatse ning muude katsekehade jaoks vajalike mõõtude leidmiseks lähtuti EVS-EN 1995-1-1:2007 standardist, kust leiti tabelitest C1 ja C10 hammastüüblite jaoks minimaalsed vahe- serva- ja otsakaugused, vt joonis 2.1. Nurk kiu suhtes nihkekatse puhul on 0° .

Nihkekatse eesmärgiks on teada saada kui palju võtab hammastüübel koos poldiga vastu põikjõudu, kus siis põikjõud on võrdne poldi ja hammastüübli vastupanu jõudude summana.



Joonis 2.1. a_1 -vahekaugused, $a_{3,t}$ -otsakaugus koormatud otsa puhul, $a_{4,c}$ - serva kaugus koormamata serva puhul (Eurokoodeks 5 2007)

Kõikide katsete puhul võeti kasutusele koormatud otsa ja koormamata serva kauguse valemid. Kuigi nihkekatsel on ühel klotsil ots koormatud ja teisel koormamata, siis arvutused tehti nii, nagu oleks mõlemad otsad koormatud, et oleks suurem varu ja ei peaks nii palju erinevate mõõtudega materjale lõikama.

Tüübi C1 minimaalsed vahe-, otsa- ja servakaugused:

$$a_{3,t} = 2,0d_c$$

$$a_{4,c} = 0,6d_c,$$

kus:

d_c – on hammastüübli diameter

Tüübi C10 minimaalsed vahe-, serva- ja otsakaugused:

$$a_{3,t} = 2,0d_c$$

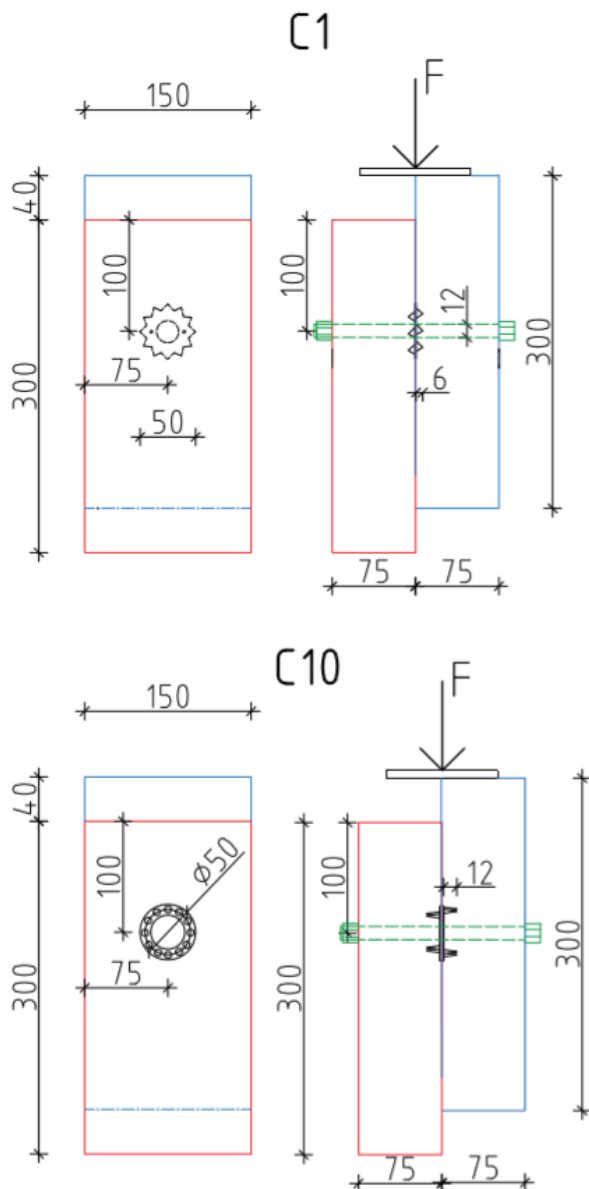
$$a_{4,c} = 0,6d_c,$$

kus:

$a_{3,t}$ – on kaugus puitplangu otsast;

$a_{4,c}$ – on kaugus puitplangu servast (Eurokoodeks 5 2007)

Saadud serva- ja otsakaugused on toodud joonisel 2.2. Kõikides katsetes kasutati polte pikkusega 180 mm, läbimõõduga 12 mm ning seibe paksusega 4 mm ja läbimõõduga 36 mm. Poltide keermestatud osa oli 36 mm.



Joonis 2.2. Serva- ja otsakaugused nihkekatse puhul, eest- ja küljeltvaate põhimõtteline katseskeem. Üleval C1 tüüpi ja all C10 tüüpi skeem.

Joonistel kujutatud mõõdud on tehtud u 20% arvutatud minimaalsetest mõõtudest suuremad ning selle järgi, mis standardmaterjal oli hetkel saadaval.

2.3.2 Jätkatud tala paindekatse

Jätkatud tala paindekatsel on kasutatud kaht hammastüüblit diameetriga $d_c = 50$ mm ning kaht polti diameetriga $d = 12$ mm, mis seovad kaks otsapidi kokku pandud planku jätkatud talaks. Poltide alla pandi seibid paksusega 4 mm ja diameetriga 36 mm. Kahe plangu jätkamiseks on paigutatud üks plank teiste peale (vt joonis 2.3).

Jätkatud tala minimaalsed vahe-, serva- ja otsakaugused hammastüüblitele C1 ja C10:

Tüüp C1:

$$a_1 = (1,2 + 0,3|\cos \alpha|)d_c$$

$$a_{3,t} = 2,0d_c$$

$$a_{4,c} = 0,6d_c$$

Tüüp C10:

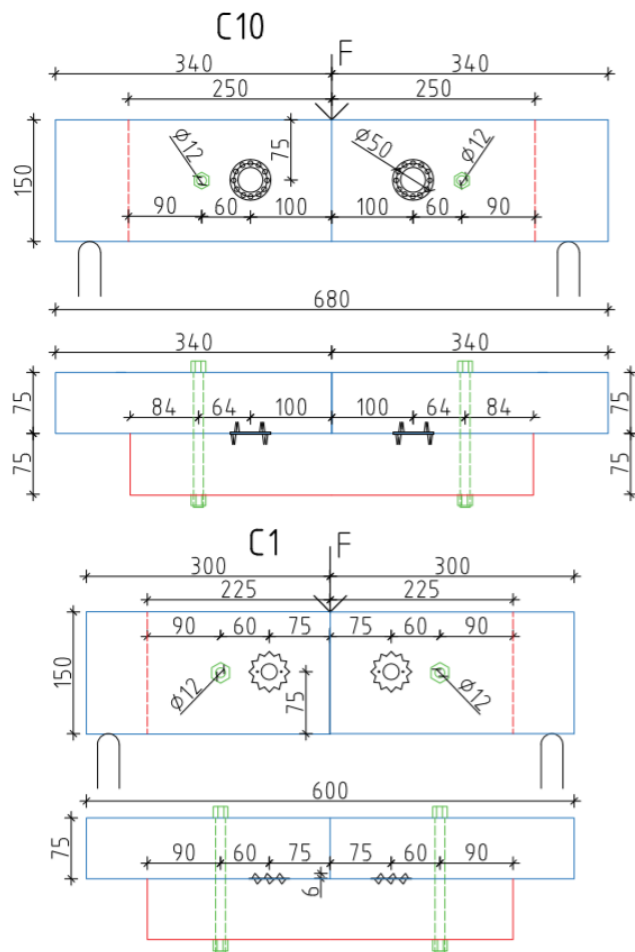
$$a_1 = (1,2 + 0,8|\cos \alpha|)d_c$$

$$a_{3,t} = 2,0d_c$$

$$a_{4,c} = 0,6d_c,$$

kus:

a_1 – on hammastüüblite vahekaugus (Eurokoodeks 5 2007).



Joonis 2.3. Vahe-, serva- ja otsakaugused jätkatud tala puhul. Eest- ja küljeltvaate põhimõtteline katseskeem. Üleval C10 tüüpi ja all C1 tüüpi skeem.

Eesti Maaülikooli maaehituse ja veemajanduse õppetooli ehituskonstruksioonide laboris valmistati joonisel 2.3 toodud katsekehasid kokku 10 tükki kummagi hammastüübli tüübi jaoks.

2.3.3. Liittala paindekatsed

Liittala paindekatsel on kaks planku pandud lapiti teineteise peale ja ühendatud hammastüüblite ning poltidega. Selles katses kasutati samuti hammastüübleid diameetriga $d_c = 50$ mm ning kaht polti diameetriga $d = 12$ mm. Poldide all lisaks seibid paksusega 4 mm ja diameetriga 36 mm. Poldid peavad asetsema hammastüüblitest väljaspool ning võimalikult tala otstes, kuna lauskoormuse puhul on põikjõud just seal kõige suurem, (vt joonis 2.4). Kauguste arvutused on liittala puhul samad, mis jätkatud tala puhul.

Lisaks hammastüüblite kaugustele tuli arvutada ka poldi vahe-, serva- ja otsakaugused.

Poltide vahe-, serva- ja otsakaugused:

$$a_1 = (4 + |\cos \alpha|)d$$

$$a_{3,t} = \max(7d; 80 \text{ mm})$$

$$a_{4,c} = 3d,$$

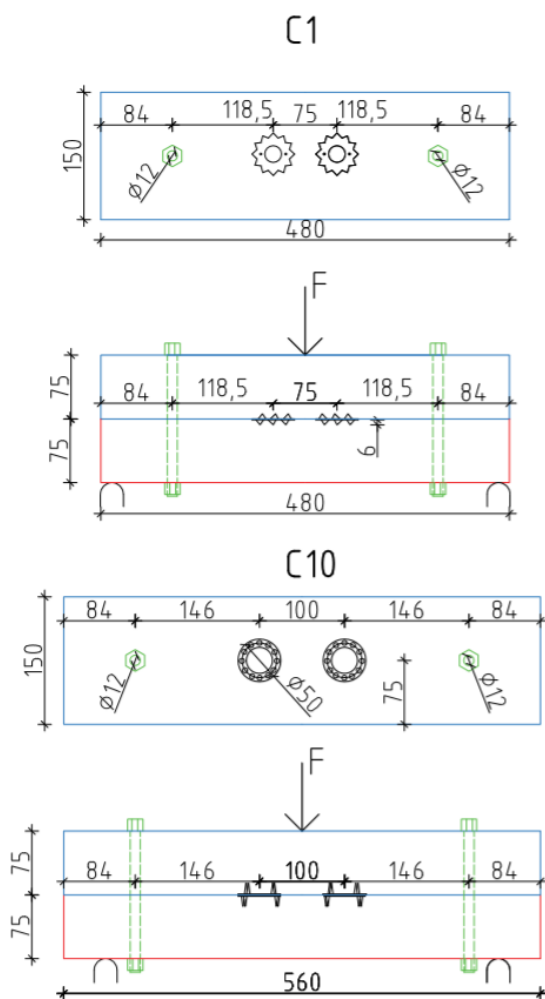
kus:

a_1 – on poltide vahekaugus;

$a_{3,t}$ – on poltide kaugus otsast;

$a_{4,c}$ – on poltide kaugus servast (Eurokoodeks 5 2007).

Katsetes kasutati tsingitud polte, mille tugevusklass on 8.8.



Joonis 2.4. Vahe-, serva- ja otsakaugused liittala puhul. Eest- ja küljeltvaate põhimõtteline katseskeem. Üleval C1 tüüpi ja all C10 tüüpi skeem.

Joonisel 2.4 kujutatud katsekehasid valmistati samuti kokku 10 tükki mõlema hammastüübi tüübi jaoks. Samas pole Eurokoodeksis joonisel 2.3 ega 2.4 kirjeldatud ühendusviisi välja toodud.

2.3.4 Katsekehade niiskusesisaldus

Iga katsekeha niiskusesisaldust mõõdeti vahetult enne katse tegemist kolmest kohast mõõteseadmega Gann Hydromette HT 85 T. Katsekehade statistilised andmed katsegruppide kaupa on toodud tabelis 2.1.

Enne katsekehade valmistamist seisis materjalid Eesti Maaülikooli puidutehnoloogia laboris 65% suhtelise õhuniiskuse juures ning temperatuuril 22...23 °C. Materjal loeti standardi EVS-EN 383-2007 kohaselt katse kõlblikuks, kui 6-tunniste kaalumiste vahel ei erinenud mass rohkem kui 0,1%.

Tabel 2.1. Katsekehade statistilised niiskusenäitajad gruppide kaupa

Katsekehade gruppide tähistused	Min. (%)	Maks. (%)	Mediaan (%)	Keskmine (%)	Standard hälve (%)	Ülemine usalduspiir (95%)	Alumine usalduspiir (95%)
NK1-C1...NK10-C1	15,3	17,1	16,2	16,3	0,50	16,51	16,07
NK1-C10...NK10-C10	15,7	17,1	16,0	16,1	0,43	16,32	15,93
JT1-C1...JT10-C1	15,3	18,6	16,5	16,6	1,01	17,00	16,27
JT1-C10...JT10-C10	16,2	18,4	17,1	17,1	0,63	17,36	16,91
LT1-C1...LT10-C1	16,2	17,9	17,0	17,0	0,48	17,26	16,83
LT1-C10...LT10-C10	16,0	17,4	16,8	16,7	0,41	16,92	16,55

Iga katsekeha statistilised näitajad on eraldi toodud välja lisas 1.

2.3.5 Katsekehade märgistus

Nihkekatse, jätkatud tala ja liittala painde katseseeriaid sooritati kahe erineva hammastüübliga (C1 ja C10). Igal seerial tehti 10 katset. Kõik katsekehad märgistati ära nende vastava katse, hammastüübi ning katseseeria tüübi järgi.

Katsekehade märgistamise põhimõtteline lahendus ühelõikelise nihkekatse puhul on välja toodud allolevate näidetega.

Esimese katseseeria katsekehade NK1-1xC1...NK10-1xC1 sümbolid tähendasid järgmist:

- NK1 – nihkekatse katsekehade komplekt number 1;
- C1 – C1 tüüpi hammastüübel;
- 1x – ühelõikeline katse.

Teise katseseeria katsekehade NK1-1xC10...NK10-1xC10 sümbolid tähendasid järgmist:

- NK1 – nihkekatse katsekehade komplekt number 1;
- C10 – C10 tüüpi hammastüübel;
- 1x – ühelõikeline katse.

Kolmanda katseseeria jätkatud tala painde põhimõtteline märgistamise lahendus katsekehade JT1-C1...JT10-C1 esimeste katsekehade näitel tähendasid sümbolid järgmist:

- JT1 – jätkatud tala paindekatse katsekehade komplekt number 1;
- C1 – C1 tüüpi hammastüübel.

Neljanda katseseeria katsekehade JT1-C10...JT10-C10 sümbolid tähendasid järgmist:

- JT1 – jätkatud tala paindekatse katsekehade komplekt number 1;
- C1 – C1 tüüpi hammastüübel.

Viienda katseseeria liittala painde põhimõttelise märgistamise lahendus katsekehade LT1-C1...LT10-C1 esimeste katsekehade näitel tähendasid sümbolid järgmist:

- LT1 – liittala paindekatse katsekehade komplekt number 1;
- C1 – C1 tüüpi hammastüübel.

Kuuenda katseseeria katsekehade LT1-C10...LT10-C10 sümbolite tähendused:

- LT1 – liittala paindekatse katsekehade komplekt number 1;
- C10 – C10 tüüpi hammastüübel.

Kõikidel katsetel kasutati hammastüübleid läbimõõduga 50 mm, seega ei ole tähistustes seda välja toodud.

2.4. Katsekehade valmistamine

Katsekehasid valmistati kokku 60 tükki, mis jagunesid kuude katsegruppi. Esimene katsekehade grupp oli C1 tüüblitega ja teine grupp C10 tüüblitega nihkekatse. Kolmas ja neljas grupp C1 ja C10 tüüblitega jätkatud tala katsed ning viies ja kuues C1 ja C10 tüüblitega liittala katsed. Katsetel kasutatud tüüblid on toodud joonisel 2.5.



Joonis 2.5. Katsetel kasutatud hammastööblid. Vasakul C10 tüüpi hammastööbel $d_c=50$ mm ja paremal C1 tüüpi hammastööbel $d_c=50$ mm, kus d_c on hammastööbli läbimõõt.

Joonisel 2.5 toodud C10 tööblid on valmistatud tempermalmist ja C1 tööbid külmalvaltsitud pinnakatteta madala süsinikusisaldusega terasest.

2.4.1. Ühelõikelise nihkekatse katsekehade valmistamine

Nihkekatsete jaoks lõigati 300 mm pikkused plangud, mis sobisid nii C1 kui ka C10 tüüpi hammastööbli jaoks. Et nihkekatset saaks sooritada, jäeti plangud 40 mm üksteise suhtes nihkesse, mis lubas koormusel suruda ainult ühte plangu otsa ja teada saada maksimaalse nihkejõu. Katsekehad suruti Eesti Maaülikooli Metsamaja puidulaboris universaalse elektromehaanilise katsemasinaga INSTRON 3369 kokku.

Enne katsekehade kokku surumist puuriti igasse katsekehasse ettenähtud kohta 12 mm puuriga augud, millest hiljem pandi läbi polt.

Nihkekatsetel kasutati nelikanttorudest tehtud toetusraami (vt joonis 2.6), ristlõikega $40 \times 20 \times 2$ mm, mis saadi varem tehtud samanimelise töö autori Villu Melgi käest, kes kasutas neid nihkekatse toestamisel.

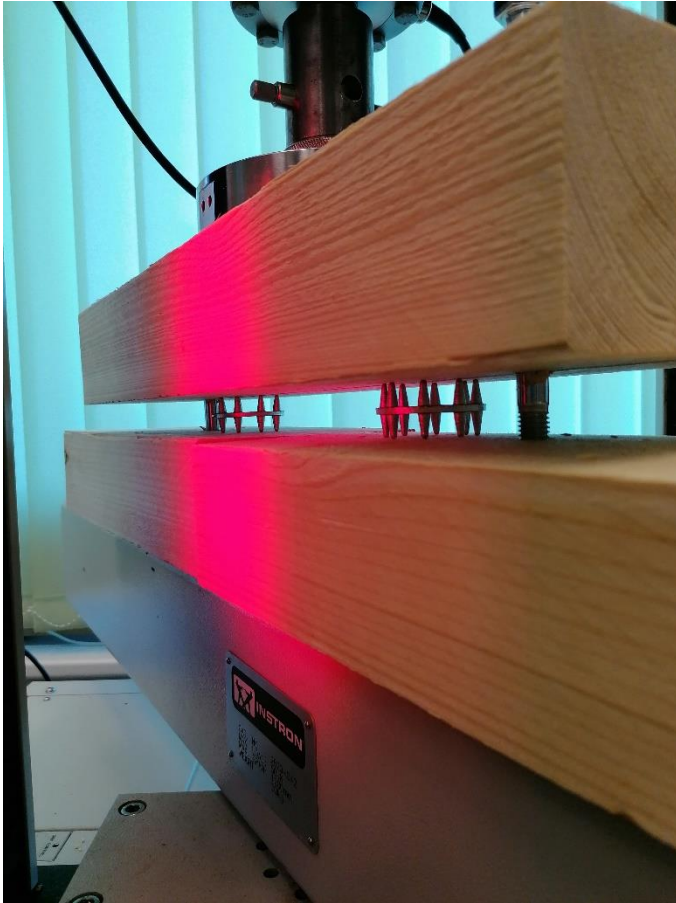


Joonis 2.6. Nihkekatsetel kasutatud toestusraam.

2.4.2. Jätkatud tala katsekehade valmistamine

Jätkatud tala C1 hammastüübli katsekeha koosnes kahest 300 mm pikkusest ja ühest 450 mm pikkusest ning C10 katsekeha kahest 340 mm ja ühest 500 mm pikkusest plangust. Kaks lühemat planku pandi otsapidi kokku pikema plangu keskpunktis, et katsekeha tervikuna oleks sümmeetriline. Seetõttu jäi C1 katsekehal 75 mm ja C10 katsekehal 80 mm kummagi tala üleulatuvat otsa, mis imiteerib vahelae või katuse kandekonstruktsiooni.

Enne plankude kokkusurumist pandi poldid läbi puuritud aukude, et oleks lihtsam katsekehad ühele joonele saada. Kuna poldid olid suhteliselt tihedalt augus, tagas see ka surutava keha ühtlasema sirgjoonelise surumise tüüblite sisse (vt joonis 2.7).



Joonis 2.7. Jätkatud tala C10 hammastüüblite seadmine katsekehade vahele koos poltidega.

Toetuspinnaks kasutati INSTRON katsemasina spetsiaalset tala, mis lubas alumistel kehaadel täispinnalist toetumist, ilma et nad laiali ei vajuks.

Peale hammastüüblite sissepressimist löödi haamriga poldid täienisti läbi katsekehade ja pingutati mutritega, et katsekehad oleks täielikult teineteise vastu surutud.

Kuna poldid on mõeldud kasutamiseks läbi hammastüüblite, mitte nendest eemal, on joonisel 2.8 kujutatud probleem jätkatud tala puhul omapärane, kus poltide pingutusest tulenev jõud tõmbab tala keskkohas asetsevaid kehasi teineteisest eemale.



Joonis 2.8. Poldi pingutamise tõttu tekkinud kehade eemaldumine jätkatud tala keskkohast.

Kuna puidu kuivamisel puit kõmmeldub nooremate aastarõngaste suunas, siis katsekehade kokkupanemisel erines olukordi, kus plangud ei olnud täielikult teineteise vastu surutud.

Joonisel 2.9 on näha, et katsekehad on keskkohast täielikult kokku surutud, kuid äärtest on eemal.



Joonis 2.9. Kõveraks kuivanud katsekehade tavapärane kokkusurutud olek.

Kuna plangud olid keskelt koos, kus asusid ka hammastüüblid ja poldid, ei seganud see katse sooritamist.

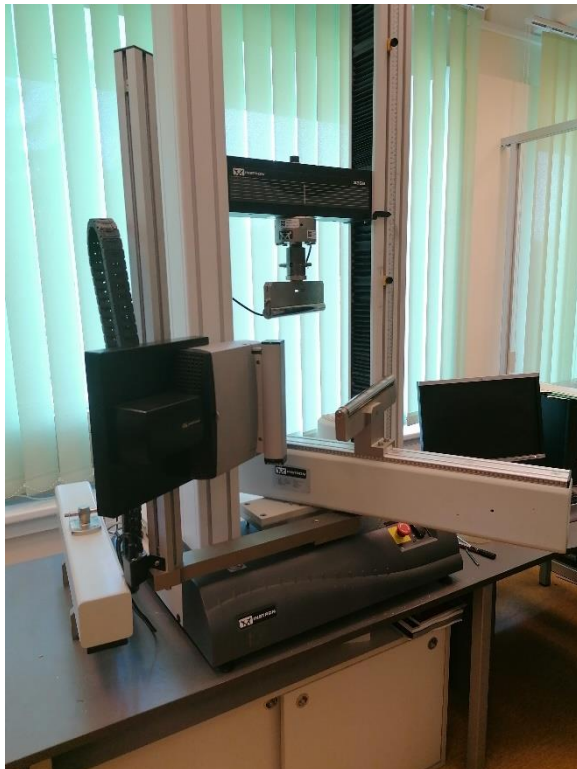
2.4.3. Liittala katsekehade valmistamine

Liittala katsekehad C1 tüüpi hammastüüblitele valmistati kahest 480 mm plangust ja C10 tüüpi tüüblite jaoks kahest 560 mm plangust.

Liittala puhul paigaldati hammastüüblid võimalikult keskele ja poldid võimalikult äärtesse, et nad täidaks oma ülesannet. Kuna liittala koosnes kahest teineteise peale pandud plangust, kus poltide asetus oli väljaspool hammastüübleid, suruti tüüblid poltide pingutuse järel puitu tugevalt sisse.

2.5. Katsete tegemine ja andmesalvestus

Nihkekatsed C10 tüüblitega sooritati Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituudi puidulaboris universaalsel elektromehaanilisel katsemasinal INSTRON 3369 (vt joonis 2.10).



Joonis 2.10. Universaalne elektromehaaniline katsemasin INSTRON 3369.

INSTRONI maksimaalne koormus on 50 kN, minimaalne koormamise kiirus 0,005 mm/min ja mõõtmisviga $\pm 0,5\%$ mõõdetavast väärtusest.

Kuna katseseadeldis ei võimaldanud koormata katsekeha standardi EVS-EN 26891:1999 alusel, anti katsemasinale ette konstantne koormamise kiirus kuni liite purunemiseni või vastupanujõu katkemiseni. Nihkekatsetel võeti koormuse kiiruseks 20 mm/min. Andmeid salvestas Bluehill 4 tarkvara 20 korda sekundis.

Liittala ja jätkatud tala katsekehade ristlõike suuruse tõttu ei olnud katsemasin INSTRON võimeline neid katsekehasid vajaliku jõuga koormama, seega tuli katsekehad viia maaehituse ja veemajanduse õppetooli ehituskonstruksioonide laborisse ja seal jätkata katsete sooritamist survepressiga Form+Test koos katsesilindriga EPZ-D 400, mis on toodud joonisel 2.11.



Joonis 2.11. Katsemasin Form+Test koos katsesilindriga EPZ-D 400.

Joonisel 2.11 toodud silinder võimaldab rakendada 400 kN survet ja 320 kN tõmmet, silindri kõik on 400 mm.

Kontroller on ehitatud tarkvarale Tiab, mis reguleerib silindrite tööd ja salvestab andmeid. Antud katsete puhul salvestati andmeid 20 korda sekundis ning koormamise kiiruseks oli 10 mm/min.

Paindekatsetel liittala ja jätkatud tala jaoks tuli ehitada raamistik, kuhu peale katsekehad toetada (vt joonis 2.12).



Joonis 2.12. Liittala ja jätkatud tala toetusraamistik.

Joonisel 2.12 kujutatud raamistik koosseb I-taladest, mis toetuvad betoonist tugijalgadele, ning I-talade peale toetuvad terasest tallad. Sellist lahendust kasutati piisava kõrguse saamiseks, kuna pressi silindri käigutee pikkus oli piiratud.

Jätkatud tala paindekatsetel kasutati terasest silindrikujulist toru, keskel tala ülaosas ja all ühel pool tala otsa, teisel pool all tala otsas oli kolmnurkne tugi, mis takistas katsekeha minema libisemist. Selline lahendus imiteerib kolme punkti paindekatset (vt joonis 2.13).



Joonis 2.13. Jätkatud tala katsekeha asetus enne kolme punkti paindekatse algust.

Alumised toed pandi jätkatud tala C1 tüüblitega katsete puhul 200 mm kaugusele keskkohast, mis andis tugele omavaheliseks kauguseks 400 mm ja C10 tüüblite puhul 225 mm kaugusele keskkohast ning 450 mm tugelevaheliseks kauguseks. Liittala puhul olid need näitajad C1 tüüblil 215 mm ja 430 mm ning C10 tüüblil 255 mm ja 510 mm.

2.6. Statistiline andmetöötlus

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli leida poltide ja hammastüüblite kandevõime puitpuiduga liites, uurides seda jätkatud tala, nihkekatse ja liittala katsetega.

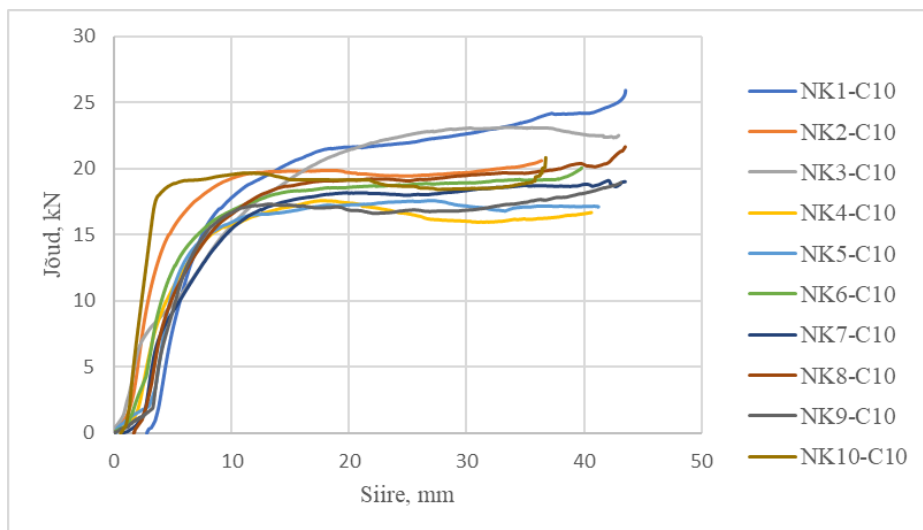
Katsemasinate salvestatud andmeid analüüsiti arvutiprogrammiga *MS Excel 2016*, kus kasutati statistiliste näitajate leidmiseks funktsiooni *Descriptive Statistics*.

Katsetulemuste andmete töötlemisel koostati statistilised näitajad katsekehade niiskusesisalduse, miinimum-, maksimum- ja keskväärtuste põhjal. Lisaks on välja toodud ka standardhälbed ja usalduspiirid 95% tõenäosuse juures. Katsetulemuste gruppide kohta on välja toodud ka graafikud ja diagrammid.

3. KATSETULEMUSED JA ANALÜÜS

3.1. Esimene katseseeria

Esimene katseseeria koosnes puit-puiduga liites kasutatavast C10/50 hammastüüblist ja poldist. Võrreldes C1 tüübliga nihkekatsetel on joonisel 3.1 olevalt graafikult näha, et C10 tüüblil tekib järsem kandevõime märgatav langus, kuid liites olev polt võtab veel koormust vastu.



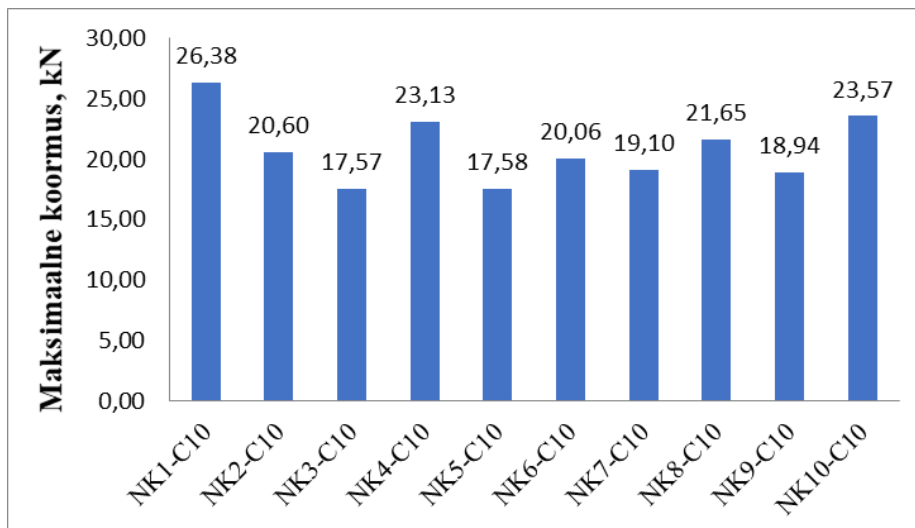
Joonis 3.1. Esimese katseseeria C10/50 hammastüübli ning poldi nihkekatse tulemused.

Joonisel 3.1 kujutatud siirde ja jõu graafikul olevate maksimumväärtuste statistilised näitajad on toodud tabelis 3.1.

Tabel 3.1. Esimese katseseeria statistilised näitajad

Statistilised näitajad	Jõud, kN
Keskmine	20,86
Standardviga	0,90
Mediaan	20,33
Standardhälve	2,84
Miimum	17,57
Maksimum	26,38
Usaldustase (95,0%)	2,03

Tabelis 3.1 kujutatud statistilised näitajad on võetud maksimaalse 40 mm siirde juures. Maksimaalsete vastuvõetud koormuste väärtused on toodud tulpdiaagrammina joonisel 3.2.

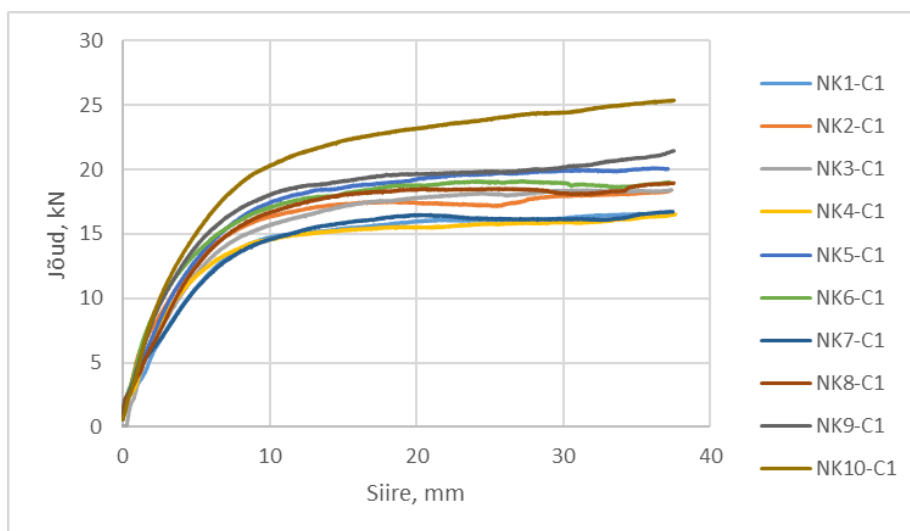


Joonis 3.2. Esimese katseseeria maksimaalsed kandevõime näitajad.

Nagu joonisel olevalt diagrammilt näha, on maksimaalse 26,38 kN ja minimaalse koormuse 17,57 kN vahe 8,81 kN, mis annab kõikumiseks küllaltki suure 33,4% väärtuse.

3.2. Teine katseseeria

Teisel katseseerial kasutati puit-puiduga ühelõikelisel nihkekatsel C1 hammastüübleid läbimõõduga $d_c = 50\text{mm}$ ja polte läbimõõduga $d = 12\text{ mm}$. Joonisel 3.3 toodud graafikul on näha katseseeriade enam-vähem ühtlast jõudude kasvu kuni liite järeleandmiseni, kus polt hakkas puitu muljuma.



Joonis 3.3. C1/50 hammasümbli ja poldi ühelõikelise nihkekatses tulemused.

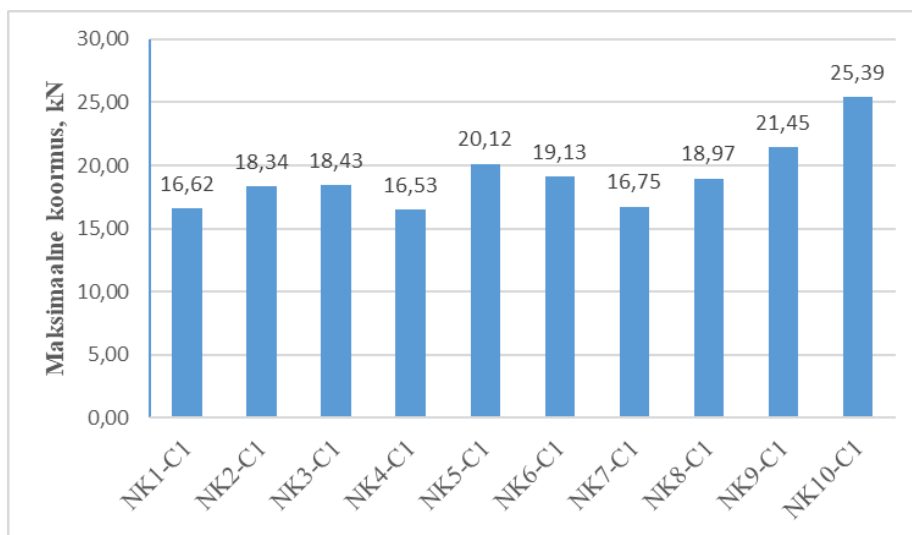
Graafikul on näha, kuidas kümnenda katsekeha maksimaalne koormus erineb teistest märgatavalt, mis tuleneb tõenäoliselt sellest, et antud katsekehal olid sees oksakohad, mis takistasid puidu muljumist (vt lisa 3.10). Samas on graafikult ka näha kandevõime pidevat tõusmist, mis näitab, et sõltumata hammastüübli kandevõime kadumisest hoiab polt veel liidet koos ning ei lase sellel järsult puruneda.

Tabel 3.2 kirjeldab teise katseseeria C1 tüüblite ja poltidega tehtud maksimaalsete tulemuste statistilisi näitajaid 40 mm siirde juures.

Tabel 3.2. C1/50 saadud tulemuste statistilised näitajad

Statistilised näitajad	Kandevõime, kN
Keskmine	19,17
Standardviga	0,85
Mediaan	18,70
Standardhälve	2,70
Miinumum	16,53
Maksimum	25,39
Usaldustase (95,0%)	1,93

Tabelis 3.2 toodud teise katseseeria katsekehade maksimaalsete kandevõimete tulemuste keskmised väärtused on eraldi välja toodud joonisel 3.4.



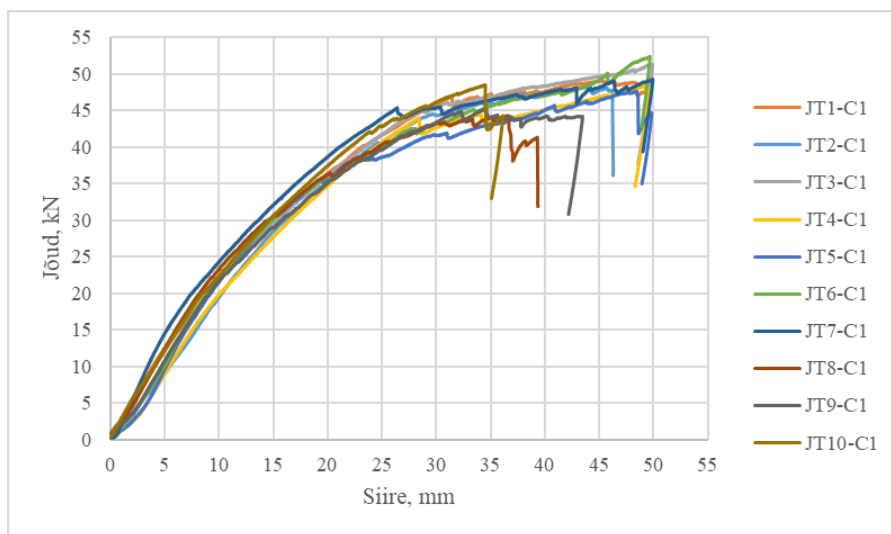
Joonis 3.4. Kõikide katsekehade maksimaalsed väärtused C1/50 hammastüüblite ja poltidega.

Joonisel 3.4 olevalt tulpdiagrammilt on näha, et maksimaalse 25,39 kN ja minimaalse jõu 16,53 kN erinevus on 8,86 kN. See teeb tulemuste kõikumiseks $\pm 34,9\%$, mis on üsnagi suur

vahe ja tuleneb tõenäoliselt puidu oksakohtadest, mis ei võimalda katsetele sarnaseid tingimusi.

3.3. Kolmas katseseeria

Kolmandal katseseerial kasutati jätkatud tala ühendamiseks C1/50 hammastüübleid läbimõõduga $d_c = 50$ mm ja polte läbimõõduga $d = 12$ mm põikjõu vastuvõtmiseks. Joonisel 3.5 oleval graafikul näha liite suhteliselt ühtlast kandevõimet.



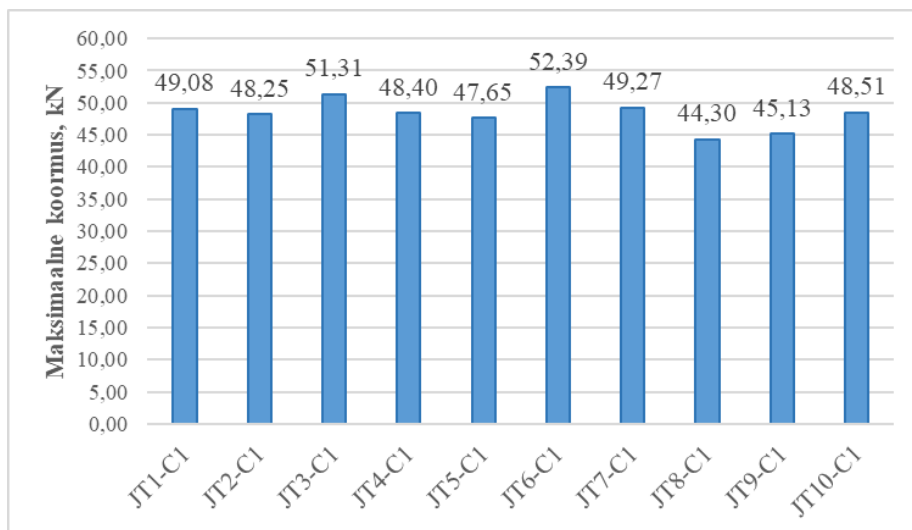
Joonis 3.5. Kolmanda katseseeria C1/50 tüüpi hammastüüblite ja poltide kandevõime tulemused.

Joonisel 3.5 oleval graafikul on toodud siirde suurenemine koormuse kasvades ja katsekeha maksimaalne vastuvõetav jõud. Graafikul olevate koormusnäitajate äkiline langus on tingitud puidu järsust purunemisest suure koormuse all. Maksimaalsete koormuste keskmised näitajad on toodud tabelis 3.3.

Tabel 3.3. Kolmanda katseseeria statistilised näitajad

Statistilised näitajad	Kandevõime, kN
Keskmine	48,43
Standardviga	0,77
Mediaan	48,46
Standardhälve	2,44
Miinum	44,30
Maksimum	52,39
Usaldustase (95,0%)	1,75

Tabelis 3.3 on välja toodud kõikide katsetulemuste maksimaalsete väärtuste statistilised näitajad. Iga katsekeha maksimaalne jõud on eraldi välja toodud joonisel 3.6.



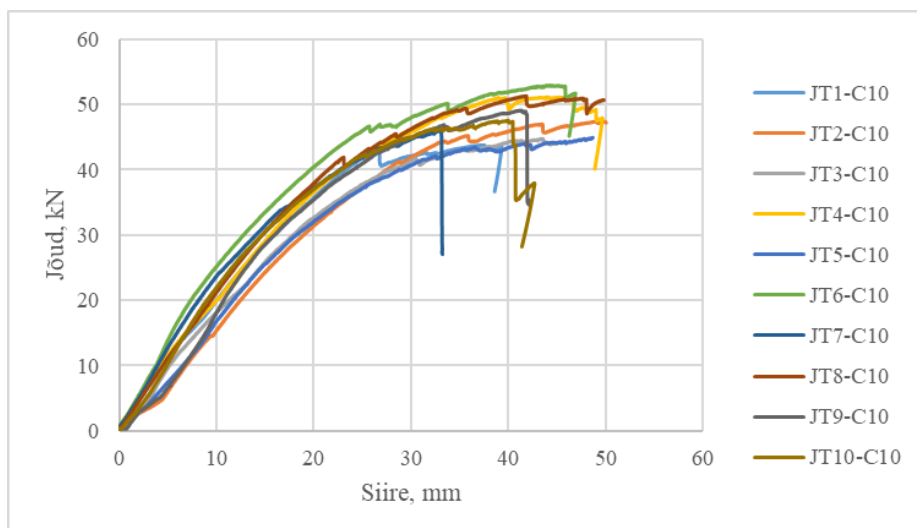
Joonis 3.6. Kolmanda katseseeria katsetulemuste maksimaalsed väärtused C1/50 tüüpi hammastüübli ja poldiga liites.

Minimaalse 44,30 kN ja maksimaalse 52,39 kN mõõdetud kandevõime tulemuste vahe oli 8,09 kN, mis annab tulemuste kõikumiseks $\pm 15,4\%$. Võrreldes sama katsetüüpi C10/50 hammastüübliga ei ole märgata suuri erinevusi, see võib olla põhjustatud katsekehade ebapiisavast pikkusest, kus poldid ei saanud oma ülesannet täita, vaid ennem toimus puidu suur muljumine ja katsekeha kaotas selle tõttu oma kandevõime.

3.4. Neljas katseseeria

C10/50 hammastüüblid läbimõõduga $d_c = 50$ mm ja poldid läbimõõduga $d = 12$ mm samal katsetüübil (vt joonis 3.7) andsid C1/50 tüüpi tüüblitega sarnaseid tulemusi.

Joonisel 3.7 toodud graafikul on näha, et maksimaalne siire oli umbes 50 mm peal ning minimaalne siire umbes 33 mm juures, mis annab suhteliselt suure siirde erinevuse. Antud katseseeria maksimaalsete tulemuste statistilised näitajad on toodud tabelis 3.4.



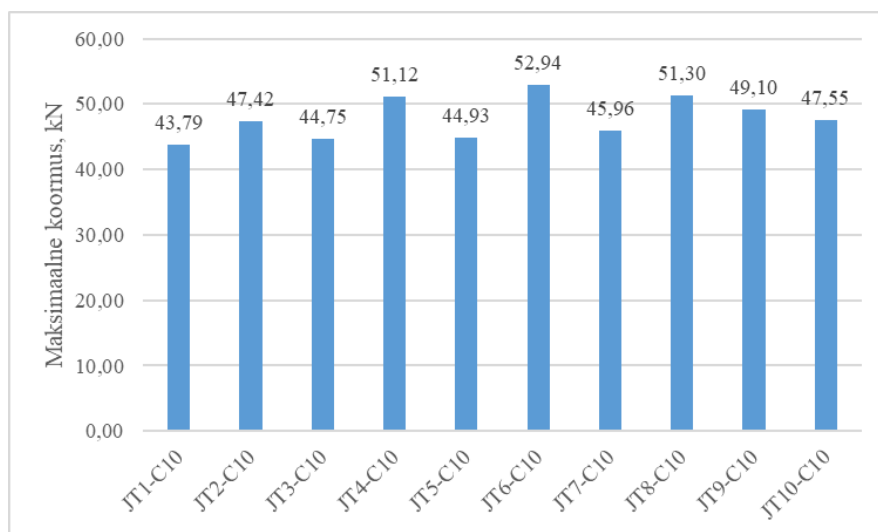
Joonis 3.7. Neljanda katseseeria kandevõime tulemused C10/50 tüüpi hammastüübli ja poldiga.

Tabel 3.4. Neljanda katseseeria statistilised näitajad

Statistilised näitajad	Jõud, kN
Keskmine	47,89
Standardviga	0,99
Mediaan	47,49
Standardhälve	3,14
Miinumum	43,79
Maksimum	52,94
Usaldustase (95,0%)	2,24

Jätkatud tala katseseeriade statistilistest näitajatest on näha, et standardhälve on suhteliselt suur, mis tuleb katsete väikesest arvust. Selle parandamiseks tuleks teha suurem arv katseid.

Maksimaalsed tulemused on toodud joonisel 3.8.

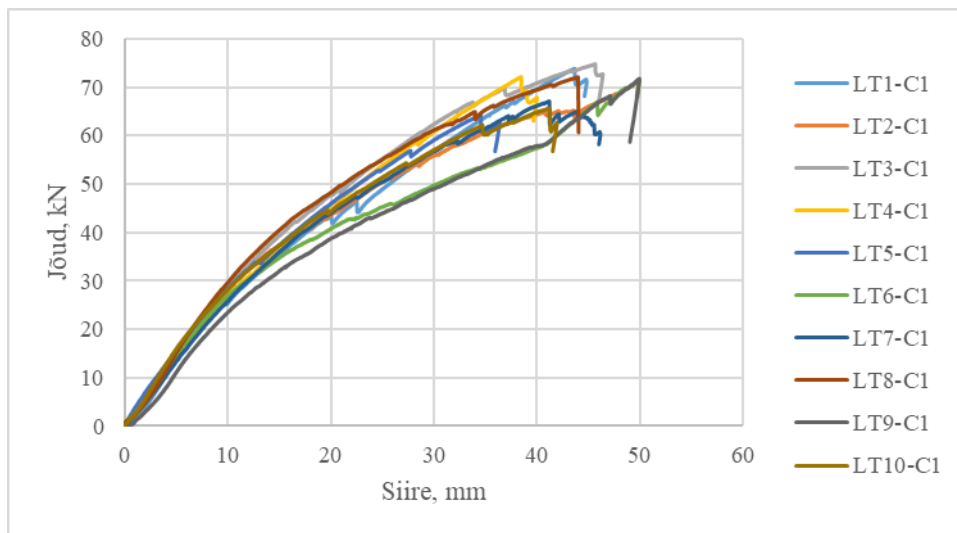


Joonis 3.8. Neljanda katseseeria maksimaalsed tulemused.

Antud joonisel olevalt tulpdiaagrammilt on näha, et minimaalse koormuse 43,79 kN ja maksimaalse koormuse 52,94 kN vahe on 9,15 kN, mis annab nende tulemuste kõikumiseks $\pm 17,3\%$.

3.5. Viies katseseeria

Viiendas katseseerias on toodud C1/50 hammastüüblitega ning poltidega katsete tulemused. Joonisel 3.9 oleval graafikul on toodud siirde kasvamine koormuse suurenemisel ning vastupanu jõu katkemispunkt.



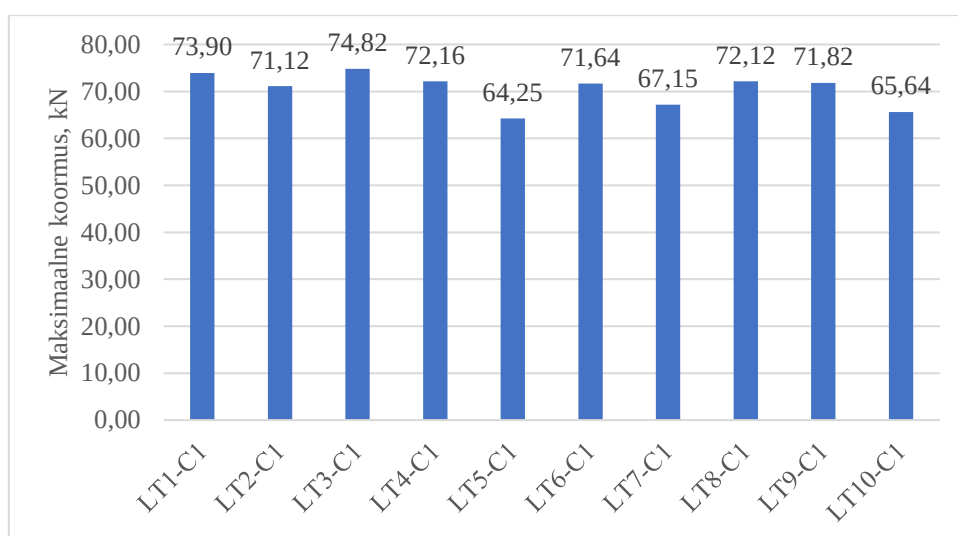
Joonis 3.9. Viienda katseseeria tulemused C1 tüüpi hammastüübli ning poldiga.

Tabel 3.5. Viienda katseseeria statistilised näitajad

Statistilised näitajad	Jõud, kN
Keskmine	70,46
Standardviga	1,12
Mediaan	71,73
Standardhälve	3,54
Miinumum	64,25
Maksimum	74,82
Usaldustase (95,0%)	2,53

Joonisel 3.9 kujutatud graafikul on selgelt näha katsekeha vastupanu jõu katkemist, kus koormus langeb järsult. See ei tulene hammastüübli purunemisest vaid puitdetailide muljumisest ja purunemisest suure koormuse all. Koormuste maksimaalsete väärtuste statistilised andmed on toodud tabelis 3.5.

Nagu ka jätkatud tala puhul, on liittala statistiliste näitajate standardhälve küllaltki suur, mis on põhjustatud katsete väikesest korduste arvust. Antud seeria maksimaalsed väärtused on toodud joonisel 3.10.

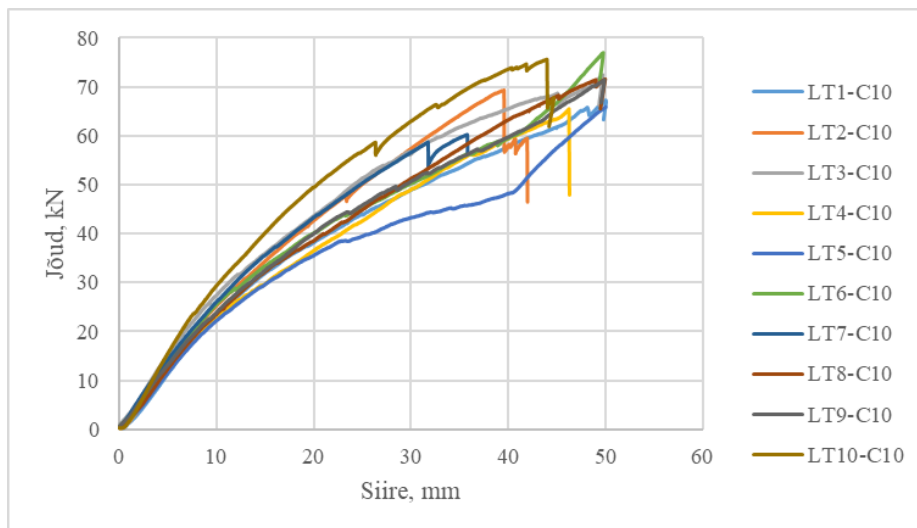


Joonis 3.10. Viienda katseseeria maksimaalsed tulemused C1 tüüpi hammastüüblite ning poltidega.

Viienda katseseeria maksimaalse ja minimaalse tulemuse vahe on 10,57 kN, mis annab 14,1%-se kõikumise.

3.6. Kuues katseseeria

C10/50 tüüpi hammastüüblite ning poltide katseseeriade tulemused liittala puhul on toodud joonisel 3.11.



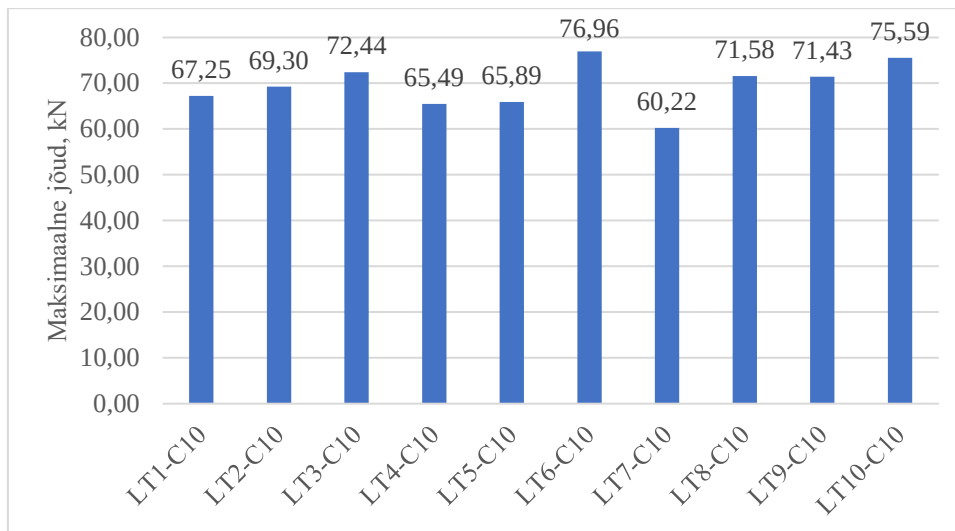
Joonis 3.11. Kuuenda katseseeria tulemused C10 tüüpi hammastüübli ning poldiga.

Joonisel 3.11 on näha tulemuste ebaühtlasemat jaotust võrreldes C1 hammastüübliga, kuid katsetulemuste statistilised näitajad (vt tabel 3.6), on suhteliselt võrdsed.

Tabel 3.6. Kuuenda katseseeria statistilised näitajad

Statistilised näitajad	Jõud, kN
Keskmine	69,61
Standardviga	1,60
Mediaan	70,36
Standardhälve	5,05
Miinimum	60,22
Maksimum	76,96
Usaldustase (95%)	3,61

Nagu ka selle katseseeria statistiliste näitajate puhul on standardhälve suur ja 95%-se tõenäosusega võib öelda et katsete keskmised tulemused jäävad $69,61 \pm 3,61$ kN vahele. Kandevõimete maksimaalsed väärtused on toodud joonisel 3.12.

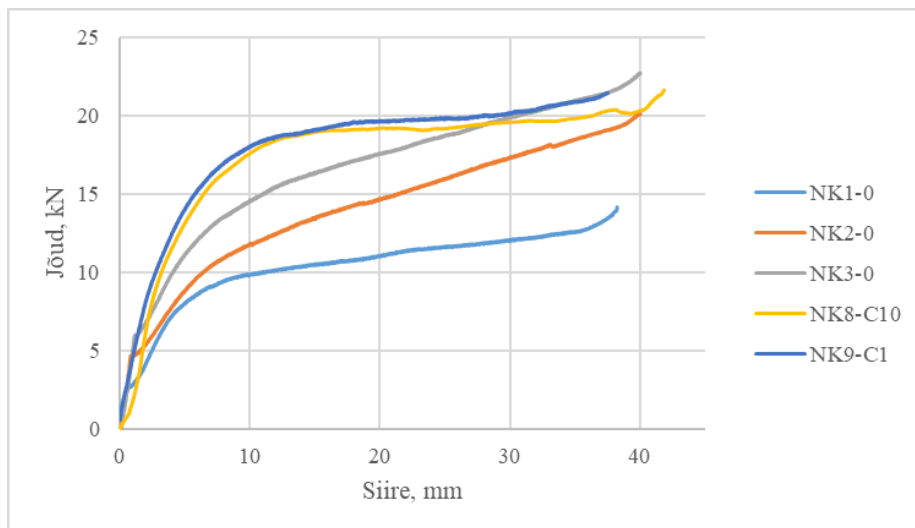


Joonis 3.12. Kuuenda katseseeria maksimaalsed tulemused C10 tüüpi hammastüüblite ning poltidega.

Jooniselt 3.12 näeme, et maksimaalne tulemus on 76,96 kN ja minimaalne tulemus 60,22 kN ning nende vahe on suhteliselt suur, 16,74 kN. See annab tulemuste kõikumiseks $\pm 21,8\%$.

3.7. Graafiline nihkekatsete võrdlus ainult poldi kasutamisel

Tänu katsekehade varule, õnnestus teha nihkekatseid ka ilma liidet siduva hammastüüblita ning neid katsetulemusi graafiliselt võrrelda. Ilma hammastüüblita tehti nihkekatseid kolm tükki, mis ei andnud küll paremat ülevaadet keskmiste tulemuste kohta, kuid andis ülevaate võrdluseks, kas hammastüübli kasutamine liites annab parema tulemuse. Hammastüübliteta nihkekatse tähistus on NK1-0...NK3-0. Joonisel 3.13 on kujutatud C1 ja C10 katsetest saadud tulemuste keskmist väärtust ning võrreldud neid kolme tulemusega, mis on saadud ainult poldi kasutamisel nihkekatsel.



Joonis 3.13. Nihkekatse tulemuste võrdlemine C1/50 ja C10/50 hammastüüblite kasutamine koos poltidega ning nihkekatse ainult poltliitena.

Jooniselt 3.13 on selgelt näha, et liited, kus kasutati nii hammastüübleid kui ka polte, osutavad alguses suuremat jõu vastupanu võrreldes liitega, kus kasutati ainult polte. Sellest võib järeldada, et hammastüübel ei lase koormuse kasvades hakata kohe poldil puitu muljuma, vaid hoiab seda paigal ning peale hammastüübli järeleandmist hakkab polt tööle.

3.8. Katsekehade purunemispiltide kirjeldamine

Katsekehade purunemispiltide uurimisel tuli välja, et C1 hammastüüblid käituvad nihkekatsel üsna erinevalt, võrreldes C10 tüüpi tüüblitega. Kuigi C10 tüüblid võtsid vastu suuremat koormust, oli nende purunemine täielik (vt joonis 3.14) võrreldes C1 tüüblitega. See tuleneb sellest, et C10 tüüpi tüübel on valmistatud tempermalmist, mis on hapram, ja kuna liites oli lisaks veel polt, siis katsekehade nihkumisel suruti polt vastu hammastüüblit, mis purustas selle enamus juhtudel täielikult.



Joonis 3.14. Nihkekatsetel täielikult purunenud C10 hammastüüblid.

Joonisel 3.14 kujutatud hammastüüblite tüüpiline purunemispilt katsekehades on toodud joonisel 3.15.



Joonis 3.15. C10/50 hammastüübli tüüpiline purunemispilt ja muljumisjäljend nihkekatsetel.

Joonisel 3.15 on poldi muljumisjälje järgi näha, et see oli surutud vastu hammastüüblit, mis põhjustas ka selle purunemise.

Kuna C1 tüüpi hammastüüblid on tehtud külmaltsitud pinnakatteta madala süsinikusisaldusega terasest, annab see neile suurema järeleandvuse ning ei tekita järsku koormuse vastuvõtmise langust.

Teise katseseeria purunemispilt C1 hammastüübliga on toodud joonisel 3.15.



Joonis 3.16. C1 tüüpi hammastüübli tüüpiline purunemispilt ja muljumisjäljend nihkekatset.

Joonisel 3.16 on näha, et sarnaselt C10 nihkekatsele on ka siin läinud polt vastu hammastüüblit kuid pole seda purustanud. Samuti on näha hammastüüblite väljaveninud hammaste jäljed ja puidu kiudude rebimine.

Teise katseseeria deformeerunud C1 hammastüüblid on toodud joonisel 3.17.



Joonis 3.17. C1 hammastüüblite deformeerumised nihkekatse järel.

Samatüübiliste hammastüüblite purunemispildid olid paindekatsetel suhteliselt erinevad, võrreldes nihkekatsega. Seda ka sellepärast, et paindekatsetel on jõudude mõjumise suunad hoopiski erinevad.

Joonisel 3.18 toodud kolmanda katseseeria C1 hammastüüblite muljumisjäljed ja deformatsioonid on sama katsetüübi C10 hammastüüblitest erinevad. Kõikide katsete purunemispildid on toodud lisades 2 kuni 7.



Joonis 3.18. Jätkatud tala paindekatses tüüpiline C1 hammastüübli deformatsioon ning muljumisjalg puidus.

Jooniselt 3.18 on näha, et hammastüübel on puidus natukene nihkunud, tekitades sellega puitu muljumisjälje, samas on aga hammastüübli deformatsioonid suhteliselt väikesed.

Kui C1 hammastüübel jättis paindekatsel puidu sisse minimaalse muljumisjälje, siis C10 puhul on see jälj peaaegu et olematu (vt joonis 3.19).



Joonis 3.19. C10 hammastüübli tüüpiline jälj peale paindekatses.

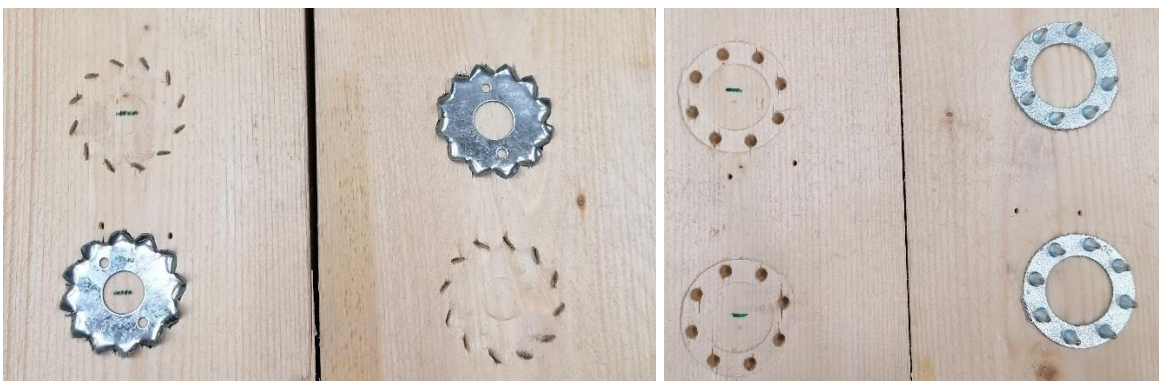
Kuigi hammastüüblil ja poldil ei esinenud märgatavaid deformatsioone, on puidul näha suuri mõrasid ja liite katkemise jälgi (vt joonis 3.20), ning samuti ka suured muljumisjäljed, mida tekitasid katsekehade all asuvad toed. Kõikide C10 tüüblite puhul on joonistelt näha ka hammastüübli vaheplaadi jäljend puidus.



Joonis 3.20. C10/50 hammastüübliga jätkatud tala paindekatsel koormusest tekkinud mõra puidu sees ning tugede muljumisjälg.

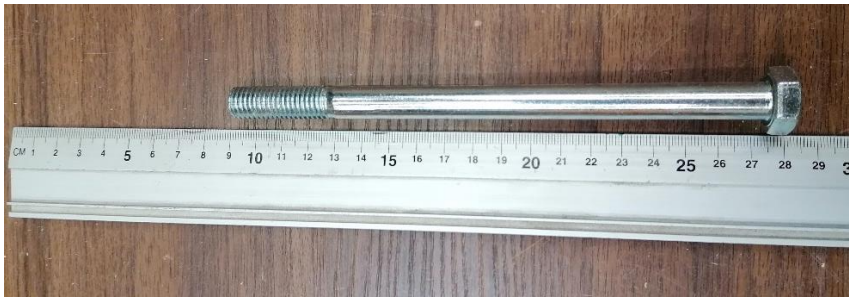
Kui joonisel 3.20 oleval katsekehal on deformatsioonid väga silmatorkavad, siis liittala paindekatsel ei esinenud kuigi suuri deformatsioone, ei puidus, hammastüüblitel, ega poltidel.

Viienda ja kuuenda katseseeria katsetamisjärgsed kehade hammastüüblite jäljendid ja deformatsioonid on toodud joonisel 3.21.



Joonis 3.21. Vasakul: C1 tüüblite ning poltidega liittala paindekatse järgne hammastüübli jäljend. Paremal: C10 tüüblite ning poltidega liittala paindekatse järgne hammastüübli jäljend.

Polt põhjustas nihkekatsete liites suuri deformatsioone, kuid ise jäi suhteliselt terveks. Paindekatsel ei esinenud poldi deformatsioone üldse. Poldide tavapärane katsejärgne olek on toodud joonisel 3.22.



Joonis 3.22. Katsetejärgne poldi tavapärane olek.

Joonisel 3.22 on pandud joonlaud poldi kõrvale, näitamaks nende paralleelsust.

3.9. Nihkekatsete arvutuslikud normatiivsed kandevõimed

Käesoleva töö eesmärgiks oli uurida poltide ja hammastüüblite koosmõju puit-puiduga liites. Nihkekatsetel uuriti maksimaalseid mõjuvaid koormusi 40 mm siirde juures.

Tabelis 3.7 on võrreldud nihkekatsete arvutuslikke normatiivseid kandevõimeid katsetulemustest saadud kandevõimete keskmiseid tulemusi. Puit-puiduga liidetes kasutatud C1/50 ja C10/50 hammastüüblite ning 8.8 tugevusklassiga poltide normatiivsed kandevõime arvutused on tehtud Eurokoodeks 5 juhistest lähtuvalt.

Tabel 3.7. Puit-puiduga liidetes kasutatud poltide ning hammastüüblite arvutuslikud normatiivsed väärtused

Hammastüübel			Katsetulemuste keskmised väärtused, kN	Erinevus, %
tüüp	läbimõõt d_c , mm	arv. norm kandetugevus, kN		
C1	50,00	21,88	19,17	12,39
C10	50,00	20,11	21,31	-5,97

Katsetulemuste saadud väärtused 40 mm siirde juures erinevad C1 hammastüübli puhul 12,39% arvutuslikul teel saadud väärtustest. See näitab, et kuigi arvutuslikul teel saadud väärtus oli suurem tegelikust väärtusest, mõjutab puidu oksakohtade arv ja struktuur katsetulemusi. Vastupidiselt C1 tüüpi hammastüüblile on C10 tüübi arvutuslik tulemus tegelikkusest tulemusest väiksem 5,97% võrra. Vaatamata C10 tüüpi hammastüübli haprale struktuurile, võttis see rohkem jõudu vastu kui C1 tüübel.

KOKKUVÕTE

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli hinnata nihkekatsetel puit-puiduga liites hammastüübli ja poldi koosmõju. Paindekatsetel uuriti kas hammastüüblite ja poltide ühendusviis üldse toimib ning kas oleks mõistlik edasi arendada antud teemat.

Hammastüüblid kuuluvad järeleandvate liidete hulka ja neid on teadaolevalt 11 tüüpi (C1...C11). Standardites on enamasti käsitletud naelte, kruvide ja muude liidete arvutusaluseid, kuid hammastüübel-liidete kohta on äärmiselt vähe informatsiooni ning teadaolevaid katseid. Samas ei õnnestunud autoril paindekatsetel kasutatavate hammastüüblite kohta üldse artikleid leida.

Üldjuhul valmistatakse hammastüübliga konstruktsiooni liited ehitusplatsil, kus tüüblid siis surutakse puitelementi jõuga sisse. See teeb hammastüübli, erinevalt ketas- või rõngastüüblist, millele peab olema ette süvistatud auk, palju kergemini kasutatavamaks metallkinnituselemendiks. Hammastüübleid kasutatakse enamasti seinapalkide vahel, et vähendada nende omavahelist nihkumist. Sealjuures pannakse ka kõikidest seinapalkidest läbi keermelatt, mis hoiab neid koos ning surub ka hammastüüblid puit elementidesse sisse.

Hindamaks hammastüüblite ja poltide koosmõju puit-puiduga liidetes, valmistati hõõveldamata puitmaterjalist ristlõikega 75×150 mm katsekehad nihke- ja paindejõudude leidmiseks. Katsekehade niiskusesisaldused mõõdeti ja märgiti üles, sama tehti ka kaalumistega, et katsekehad vastaksid standardis kirjeldatud nõuetele. Katsed viidi läbi konstantse koormamise kiirusega Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituudi puidulaboris universaalsel elektromehaanilisel katsemasinal INSTRON 3369 ning maaehituse ja veemajanduse õppetooli ehituskonstruktsioonide laboris survepressiga Form+Test, katsesilindriga EPZ-D 400. Katsetüüpe tehti kokku 3, igas neist kasutati kaht erinevat hammastüüblit, C1 tüüpi hammastüübel läbimõõduga $d_c = 50$ mm ja C10 tüüpi tüübel läbimõõduga $d_c = 50$ mm. Liitesse oli ette nähtud ka poldid pikkusega $l = 180$ mm, diameetriga $d = 12$ mm. Poltide all kasutati seibe paksusega 4 mm ja läbimõõduga 36 mm. Kokku tehti 20 ühelõikelist nihkekatset, 20 liittala paindekatset ning 20 jätkatud tala paindekatset. Katsekehade varu tõttu õnnestus teha ka nihkekatset ilma hammastüüblita ning võrrelda tulemust hammastüübli ja poldi koos kasutamisel.

Hammas­tüüblitega tehtud katsetest selgus, et mitte ainult purunemispilt ei olnud erinev, vaid ka koormuse vastupidavus näitas erinevust. Katsejärgsel kehade purunemise uurimisel selgus, et C10 hammas­tüübli deformatsioonid olid äärmiselt suured võrreldes C1 tüüpi tüüblitega. See vahe tuleb tüüblite materjali erinevusest, C10 tüübel on tehtud tempermalmist, mis on hapram, ning C1 tüübel on valmistatud külmvaltsitud pinnakatteta madala süsinikusisaldusega terasest, mis annab talle voolavuse maksimaalse koormuse juures. Seetõttu kaotab C10 tüüpi tüübel palju kiiremini oma kandevõime pärast maksimaalse piirini jõudmist, kui C1 tüüpi hammas­tüübel.

Poltidel ei esinenud märgatavaid deformatsioone, kuna poldi tugevus oli puidu muljumistugevusest kordades suurem, siis andis ennem puit järele.

Nihkekatsete võrdluses liites kasutatava hammas­tüübli ning poldi ja ainult poldi vahel esinesid märgatavad erinevused. Katsete tulemusel selgus, et liites, kus kasutati hammas­tüüblit ja polti koos, oli palju suurem vastupanu jõud ühesuguse siirde juures, kui liites, kus kasutati ainult polti. Kusjuures maksimaalsed jõud 40 mm siirde juures olid samad. See näitab et polt hakkab alles siis tööle, kui hammas­tüübel on peaaegu täielikult kaotanud oma kandevõime. Samas lubab poldi kasutamine liites jätkata koormuse vastuvõtmist, ilma et liide puruneks.

Paindekatsetel liittala ning jätkatud tala puhul erilisi erinevusi ei täheldatud. Küll aga andis jätkatud tala katsetulemuste analüüs ülevaate, kas selline ühendusviis võiks üldse toimida. Paindekatsete purunemispiltidest selgus, et hammas­tüübel ja polt ei jõudnud ennem tööle hakatagi, kui koormamine saavutas oma maksimaalse ette antud siirde.

Magistritöö autor soovitaks uurida sarnast puit-puiduga ühendatud hammas­tüübel- ja poltliite käitumist paindekatsel. Samuti võiks paindekatsete puhul suurendada tala pikkust, mis annaks parema ülevaate ning tooks võrdluse, kuidas käituks selline liide reaalses olukorras.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- EVS-EN 383.** (2007). Timber Structures - Test methods - Determination of embedment strength and foundation values for dowel type fasteners. Tartu: Eesti Standardikeskus.
- EVS-EN 912.** (2011). Timber fasteners - Specifications for connectors for timbers. Tartu: Eesti Standardikeskus.
- EVS-EN 14545.** (2008). Puittarindid. Liitmikud. Nõuded. Tartu: Eesti Standardikeskus.
- EVS-EN 26891.** (1999). Puittarindid. Mehaaniliste kinnitusdetailidega liited. Tugevus- ja deformatsiooninäitajate määramise põhialused. Tartu: Eesti Standardikeskus.
- EVS-EN 1995-1-1:2007.** (2007). Eurokoodeks 5: Puitkonstruktsioonide projekteerimine. Osa 1-1: Üldist. Üldreeglid ja reeglid hoonete projekteerimiseks. Tartu: Eesti Standardikeskus.
- Melk, V.** (2017). Erinevate hammastüüblitega ühendatud puit-puiduga liidete katsed. (Magistritöö). Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu.
- Just, E., Õiger, K., Just, A.** (2015). Puit- ja puidupõhised konstruktsioonid. Tallinn: TTÜ kirjastus. 431 lk.
- Danzer, M., Dietsch, P., Winter, S.** (2016). Reinforcement of round holes in glulam beams arranged eccentrically or in groups. World Conference on Timber Engineering. Vienna.
- Porteous, J., Kermani, A.** (2013). Structural Timber Design to Eurocode 5. Oxford: Blackwell Publishing. 624 lk.
- Saarman, E., Veibri, U., Veermets, K., Untera, H., Peterson, P., Sibul, I.** (2006). Puiduteadus. Tartu: Eesti Metsaselts. 560 lk.
- Siikanen, U.** (2012). Puidust ehitamine. Tallinn: Ehitame kirjastus. 345 lk.

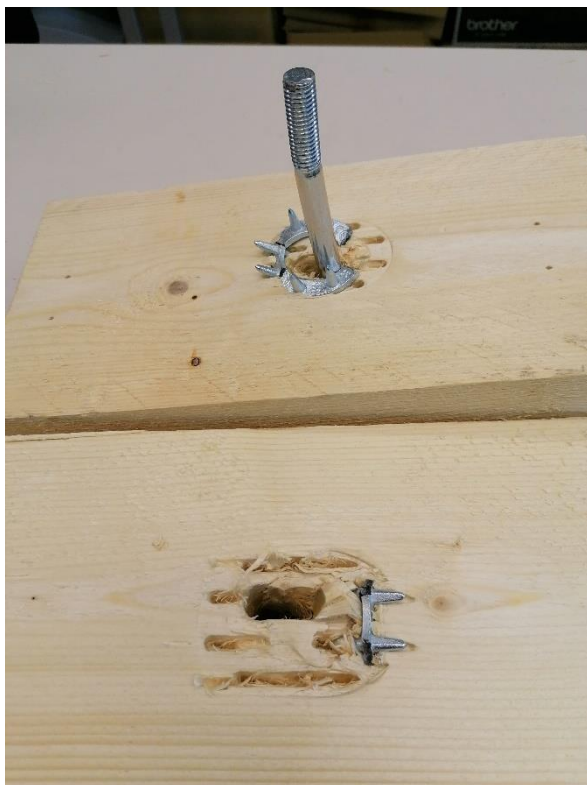
LISAD

Lisa 1. Katsekehade niiskusesisalduste statistilised näitajad

Katsekeha tähistus	Min. (%)	Maks. (%)	Mediaan (%)	Keskmine (%)	Standardhälve (%)	Ülemine usalduspiir (%)	Alumine usalduspiir (%)
NK1-1xC1	15,5	16,6	16,0	16,0	0,44	16,21	15,82
NK2-1xC1	15,7	17,6	16,3	16,4	0,69	16,68	16,06
NK3-1xC1	16,0	17,9	16,5	16,7	0,72	16,99	16,34
NK4-1xC1	14,7	17,1	16,0	15,9	0,88	16,28	15,49
NK5-1xC1	15,5	17,8	16,3	16,4	0,81	16,73	16,00
NK6-1xC1	15,3	16,8	15,9	16,0	0,60	16,25	15,71
NK7-1xC1	15,3	16,7	16,0	16,0	0,52	16,25	15,78
NK8-1xC1	15,4	17,0	16,0	16,0	0,60	16,29	15,75
NK9-1xC1	15,9	18,0	16,2	16,5	0,79	16,82	16,11
NK10-1xC1	16,4	18,1	17,0	17,1	0,66	17,41	16,82
NK1-1xC10	15,3	18,0	16,0	16,2	1,00	16,67	15,77
NK2-1xC10	15,1	16,6	15,8	15,9	0,61	16,13	15,57
NK3-1xC10	15,5	18,2	16,0	16,4	1,02	16,82	15,91
NK4-1xC10	15,3	16,8	15,6	15,9	0,65	16,14	15,56
NK5-1xC10	15,1	16,8	15,8	16,0	0,66	16,26	15,67
NK6-1xC10	15,0	16,9	15,6	15,9	0,68	16,16	15,54
NK7-1xC10	15,3	16,7	15,8	15,9	0,57	16,17	15,66
NK8-1xC10	15,6	18,1	16,3	16,5	0,89	16,87	16,07
NK9-1xC10	16,0	17,8	16,4	16,6	0,70	16,93	16,30
NK10-1xC10	15,3	17,0	16,2	16,2	0,62	16,45	15,89
JT1-C1	14,2	17,4	16,2	16,0	1,12	16,54	15,53
JT2-C1	15,1	17,8	16,1	16,2	1,13	16,71	15,69
JT3-C1	14,7	18,8	16,3	16,6	1,63	17,32	15,86
JT4-C1	15,3	18,8	16,3	16,9	1,35	17,54	16,33
JT5-C1	15,6	17,5	16,8	16,6	0,73	16,94	16,28
JT6-C1	14,9	18,1	16,6	16,7	1,16	17,25	16,20
JT7-C1	15,9	18,4	17,0	16,9	0,95	17,32	16,46
JT8-C1	15,4	18,1	16,9	16,8	0,97	17,22	16,34
JT9-C1	15,7	17,9	17,2	16,9	0,79	17,23	16,52
JT10-C1	15,0	19,3	16,5	16,7	1,51	17,42	16,07
JT1-C10	15,8	17,6	16,5	16,5	0,59	16,76	16,22
JT2-C10	16,1	18,6	17,3	17,5	0,90	17,88	17,07
JT3-C10	16,5	18,9	17,5	17,5	0,65	17,84	17,25
JT4-C10	15,8	18,6	17,3	17,3	0,98	17,72	16,84
JT5-C10	16,6	18,0	17,3	17,3	0,47	17,56	17,13
JT6-C10	15,8	18,4	18,0	17,4	1,02	17,89	16,97
JT7-C10	16,2	18,5	17,3	17,2	0,65	17,50	16,92
JT8-C10	16,2	17,5	17,0	16,9	0,48	17,09	16,66
JT9-C10	15,8	17,5	17,0	16,8	0,69	17,09	16,47
JT10-C10	15,9	17,8	16,9	16,9	0,68	17,23	16,62
LT1-C1	16,3	17,9	17,2	17,0	0,57	17,29	16,78
LT2-C1	16,4	18,1	17,0	17,1	0,58	17,33	16,81
LT3-C1	16,1	17,8	16,9	16,9	0,66	17,18	16,59

LT4-C1	16,3	18,5	16,8	17,1	0,86	17,45	16,68
LT5-C1	16,5	18,5	17,3	17,3	0,77	17,68	16,99
LT6-C1	16,5	17,8	17,0	17,1	0,52	17,28	16,82
LT7-C1	15,9	18,0	16,7	16,8	0,87	17,17	16,39
LT8-C1	16,6	18,4	17,5	17,4	0,62	17,68	17,12
LT9-C1	16,1	17,4	16,8	16,8	0,48	17,05	16,62
LT10-C1	16,5	17,6	17,1	17,0	0,37	17,18	16,85
LT1-C10	16,4	17,2	16,7	16,8	0,37	16,92	16,58
LT2-C10	15,8	17,9	16,9	16,9	0,81	17,21	16,49
LT3-C10	15,3	17,1	16,4	16,4	0,74	16,68	16,02
LT4-C10	15,6	16,8	16,0	16,1	0,54	16,38	15,89
LT5-C10	15,8	17,1	16,0	16,3	0,55	16,51	16,02
LT6-C10	16,4	17,8	16,9	17,0	0,49	17,22	16,78
LT7-C10	16,3	18,1	16,9	17,1	0,62	17,33	16,77
LT8-C10	16,7	18,0	17,0	17,1	0,48	17,33	16,90
LT9-C10	16,0	18,1	17,0	16,9	0,80	17,26	16,54
LT10-C10	16,3	17,7	16,8	16,9	0,62	17,21	16,65

Lisa 2. Esimese katseseeria purunemispildid



L2.1. Katsekehale NK1-1xC10 tekkinud hammastüübli muljumisjäljend ja tüübli purunemine.



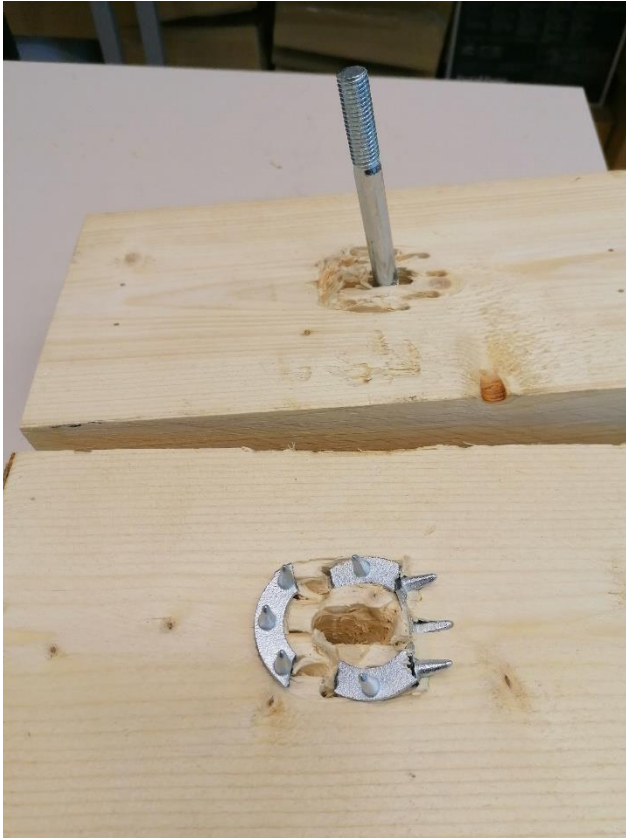
L2.2. katsekehale NK2-1xC10 tekkinud hammastüübli jäljend ja tüübli purunemine.



L2.3. Katsekehale NK3-1xC10 tekkinud muljumisjäljend, tüübli purunemine ja puidu lõhenemine.



L2.4. Katsekehale NK4-1xC10 tekkinud muljumisjäljend ja tüübli purunemine.



L2.5. Katsekehale NK5-1xC10 tekkinud muljumisjäljend ja tüübli purunemine.



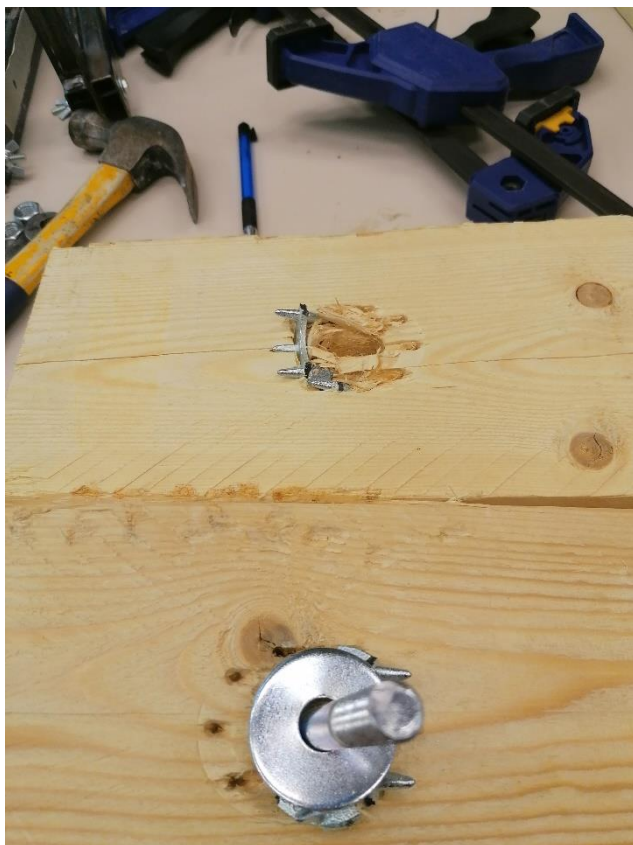
L2.6. Katsekeha NK6-1xC10 hammastüübli purunemine ja muljumisjäljend.



L2.7. Katsekeha NK7-1xC10 hammastüübli purunemine ja muljumisjälg.



L2.8. Katsekeha NK8-1xC10 hammastüübli purunemine ja muljumisjälg.

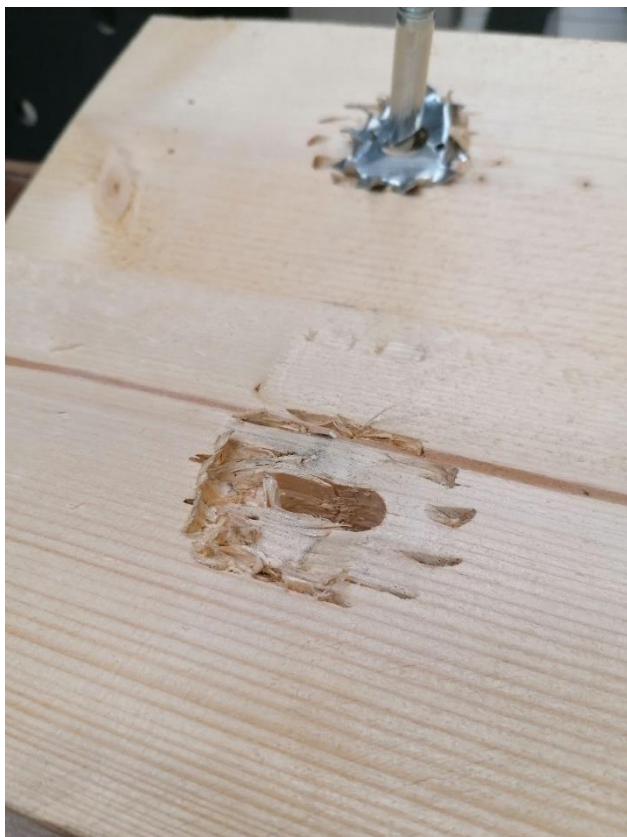


L2.9. Katsekeha NK9-1xC10 hammastüübli purunemine ja jäljend.



L2.10. Katsekeha NK10-1xC10 hammastüübli purunemine ja jäljend.

Lisa 3. Teise katseseeria purunemispildid



L3.1. Katsekeha NK1-1xC1 hammastüübli ja puidu muljumine.



L3.2. Katsekeha NK2-1xC1 hammastüübli ja puidu muljumine.



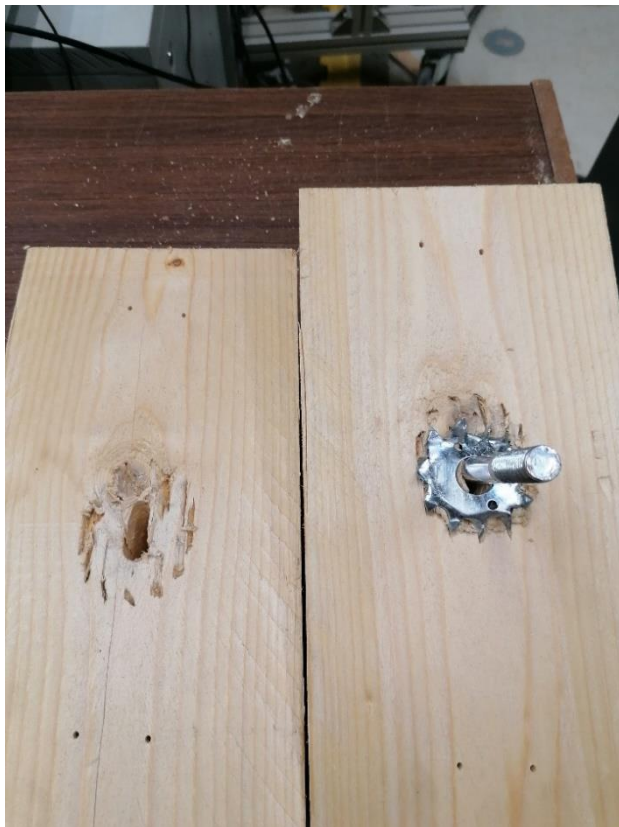
L3.3. Katsekeha NK3-1xC1 hammastüübli ja puidu muljumine.



L3.4. Katsekeha NK4-1xC1 hammastüübli ja puidu muljumine.



L3.5. Katsekeha NK5-1xC1 puidu ja hammastüübli muljumine.



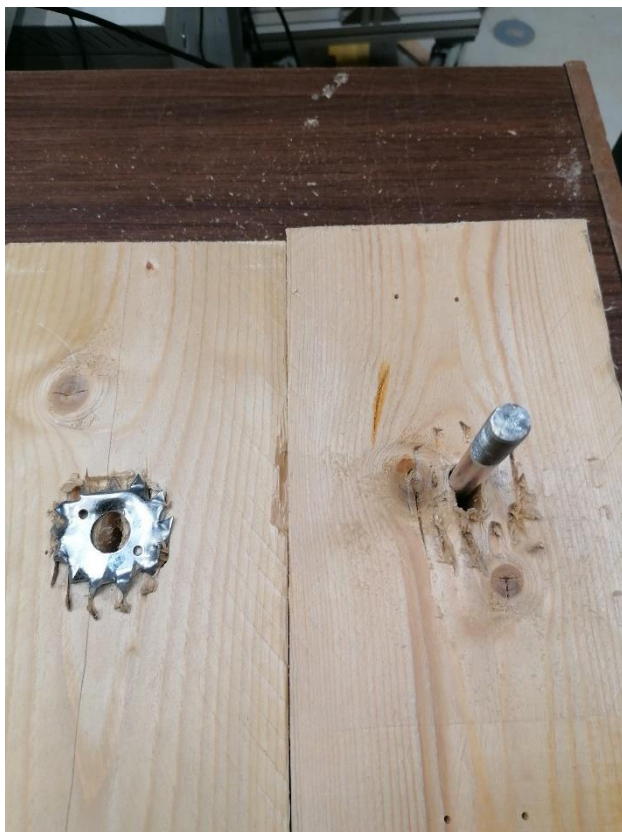
L3.6. Katsekeha NK6-1xC1 hammastüübli ja puidu muljumine.



L3.7. Katsekeha NK7-1xC1 hammastüübli ja puidu muljumine.



L3.8. Katsekeha NK8-1xC1 hammastüübli ja puidu muljumine.



L3.9. Katsekeha NK9-1xC1 hammastüübli ja puidu muljumine.



L3.10. Katsekeha NK10-1xC1 hammastüübli ja puidu muljumine.

Lisa 4. Kolmanda katseseeria purunemispildid



L4.1. Katsekeha JT1-C1 hammastüübli ja puidu muljumine.



L4.2. Katsekeha JT2-C1 hammastüübli ja puidu muljumine.



L4.3. Katsekeha JT3-C1 hammastüübli ja puidu muljumine.



L4.4. Katsekeha JT4-C1 hammastüübli ja puidu muljumine.



L4.5. Katsekeha JT5-C1 hammastüübli ja puidu muljumine.



L4.6. Katsekeha JT6-C1 hammastüübli ja puidu muljumine.



L4.7. Katsekeha JT7-C1 hammastüübli ja puidu muljumine.



L4.8. Katsekeha JT8-C1 hammastüübli ja puidu muljumine.



L4.9. Katsekeha JT9-C1 hammastüübli ja puidu muljumine.



L4.10. Katsekeha JT10-C1 hammastüübli ja puidu muljumine.

Lisa 5. Neljanda katseseeria purunemispildid



L5.1. Katsekeha JT1-C10 hammastüübli ja puidu muljumine.



L5.2. Katsekeha JT2-C10 hammastüübli ja puidu muljumine.



L5.3. Katsekeha JT3-C10 hammastüübli ja puidu muljumine.



L5.4. Katsekeha JT4-C10 hammastüübli ja puidu muljumine.



L5.5. Katsekeha JT5-C10 hammastüübli ja puidu muljumine.



L5.6. Katsekeha JT6-C10 hammastüübli ja puidu muljumine.



L5.7. Katsekeha JT7-C10 hammastüübli ja puidu muljumine.



L5.8. Katsekeha JT8-C10 hammastüübli ja puidu muljumine.



L5.9. Katsekeha JT9-C10 hammastüübli ja puidu muljumine.



L5.10. Katsekeha JT10-C10 hammastüübli ja puidu muljumine.

Lisa 6. Viienda katseseeria purunemispildid



L6.1. Katsekeha LT1-C1 hammastüübli hammaste jäljend.



L6.2. Katsekeha LT2-C1 hammastüübli hammaste jäljend.



L6.3. Katsekeha LT3-C1 hammastüübli hammaste jäljend.



L6.4. Katsekeha LT4-C1 hammastüübli hammaste jäljend.



L6.5. Katsekeha LT5-C1 hammastüübli hammaste jäljend.



L6.6. Katsekeha LT6-C1 hammastüübli hammaste jäljend.



L6.7. Katsekeha LT7-C1 hammastüübli hammaste jäljend.



L6.8. Katsekeha LT8-C1 hammastüübli hammaste jäljend.



L6.9. Katsekeha LT9-C1 hammastüübli hammaste jäljend.



L6.10. Katsekeha LT10-C1 hammastüübli hammaste jäljend.

Lisa 7. Kuuenda katseseeria purunemispildid



L7.1. Katsekeha LT1-C10 hammastüübli muljumisjälgend.



L7.2. Katsekeha LT2-C10 hammastüübli muljumisjälgend.



L7.3. Katsekeha LT3-C10 hammastüübli muljumisjäljend.



L7.4. Katsekeha LT4-C10 hammastüübli muljumisjäljend.



L7.5. Katsekeha LT5-C10 hammastüübli muljumisjäljend.



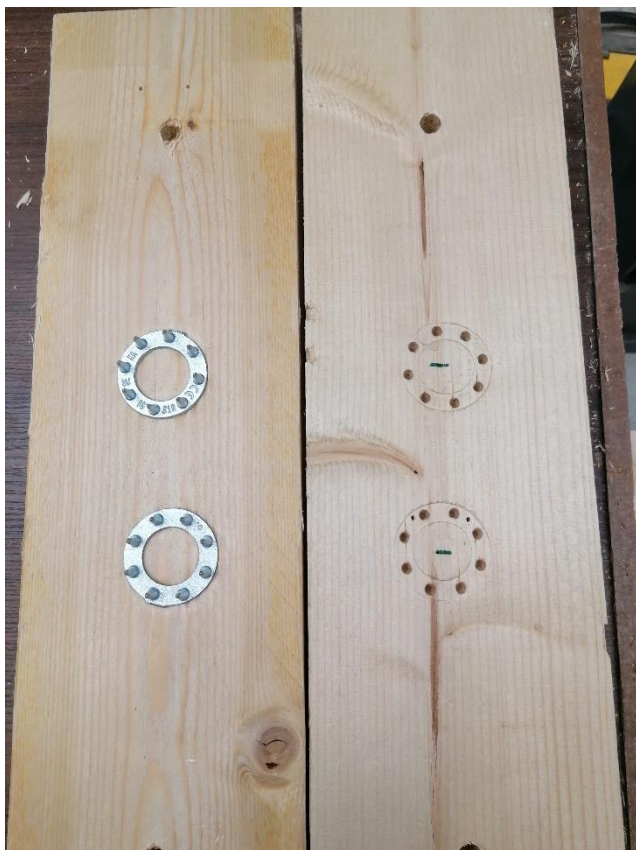
L7.6. Katsekeha LT6-C10 hammastüübli muljumisjäljend.



L7.7. Katsekeha LT7-C10 hammastüübli muljumisjäljend.



L7.8. Katsekeha LT8-C10 hammastüübli muljumisjäljend.



L7.9. Katsekeha LT9-C10 hammastüübli muljumisjälgend.



L7.10. Katsekeha LT10-C10 hammastüübli muljumisjälgend.

Lisa 8. Kahepoolsete hammastüüblite puit-puiduga liidete parameetrid

C1/50 kahepoolse hammastüübli puit-puiduga liidete parameetrid Eurokoodeks 5 kohaselt

- süvistussügavus h_e leitakse standardi EVS-EN 1995-1-1:2007 kohaselt:

$$h_e = (h_c - t)/2$$

kus:

h_c – on hammastüübli kõrgus

t – on hammastüübli vaheplaadi paksus

$$h_e = (13 - 1)/2 = 6 \text{ mm}$$

- välimise puitelemendi minimaalne paksus t_1 tuleb valida

$$t_1 \geq 2,25 h_e$$

$$t_1 = 2,25 \times 6 \text{ mm} = 13,5 \text{ mm}$$

- hammastüüblite vahekaugus a_1 leidmine jätkatud tala ja liittala puhul

$$a_1 = (1,2 + 0,3 |\cos \alpha|) d_c$$

$$a_1 = (1,2 + 0,3 \times |\cos 0^\circ|) \times 50 = 75 \text{ mm}$$

- puitelemendi koormatud otsa minimaalne kaugus $a_{3,t}$ Eurokoodeks 5 kohaselt:

$$a_{3,t} = 1,5 d_c$$

$$a_{3,t} = 1,5 \times 50 = 75 \text{ mm}$$

Koormamata serv tabelis 8.8 toodud avaldise järgi:

$$a_{4,c} \geq 0,6 d_c$$

$$a_{4,c} \geq 0,6 d_c = 0,6 \times 50 = 30 \text{ mm}$$

C10/50 kahepoolse hammastüübli puit-puiduga liite parameetrid Eurokoodeks 5 kohaselt:

- süvistussügavus h_e leitakse valemi järgi:

$$h_e = (h_c - t)/2 = (27 - 3)/2 = 12 \text{ mm}$$

- välimise puitelemendi minimaalne paksus t_1 tuleb valida:

$$t_1 \geq 2,25 h_e$$

$$t_1 = 2,25 \times 12 \text{ mm} = 27 \text{ mm}$$

- hammastüüblite vahekaugus a_1 leidmine jätkatud tala ja liittala puhul:

$$a_1 = (1,2 + 0,8 |\cos \alpha|) d_c$$

$$a_1 = (1,2 + 0,8 |\cos 0^\circ|) \times 50 = 100 \text{ mm}$$

- puitelemendi koormatud otsa minimaalne kaugus $a_{3,t}$ Eurokoodeks 5 kohaselt:

$$a_{3,t} = 2,0 d_c$$

$$a_{3,t} = 2,0 \times 50 = 100 \text{ mm}$$

- koormamata serv tabelis 8.9 toodud avaldise järgi:

$$a_{4,c} \geq 0,6 d_c$$

$$a_{4,c} \geq 0,6 d_c = 0,6 \times 50 = 30 \text{ mm}$$

Lisa 9. Poltide parameetrid hammastüübel-liites

Poltide parameetrid hammastüübel-liites Eurokoodeks 5 kohaselt

- poltide vahekaugus a_1 leidmine:

$$a_1 = (4 + |\cos \alpha|)d$$

$$a_1 = (4 + |\cos 0^\circ|) \times 12 = 60 \text{ mm}$$

kus:

a_1 - on poltide vahekaugus

- koormamata serv $a_{3,t}$ kaugus Eurokoodeks 5 järgi:

$$a_{3,t} = \max(7d; 80 \text{ mm})$$

$$a_{3,t} = \max(7 \times 12 = 84 \text{ mm}; 80 \text{ mm})$$

$$a_{3,t} = 84 \text{ mm}$$

- koormatud otsa $a_{4,c}$ kaugus:

$$a_{4,c} = 3d$$

$$a_{4,c} = 3 \times 12 = 36 \text{ mm}$$

Lisa 10. Kahepoolsete hammastüüblite ja poltide normatiivne kandevõime

Kahepoolsete hammastüüblite C1/50 normatiivse kandevõime $F_{v,Rk}$ arvutus Eurokoodeks 5 kohaselt:

$$F_{v,Rk} = 25k_1k_2k_3d_c^{1,5} = 25 \times 1 \times 1 \times 1,22 \times 50^{1,5} = 10,78 \text{ kN}$$

sängitussügavusega, külgmise ja keskmise elemendi paksusega seotud teguri k_1 väärtuseks võetakse valemitest 8.62 leitav minimaalne väärtus:

$$k_1 = \min \begin{cases} \frac{t_1}{3h_e} = \frac{75}{3 \times 6} = 4,17 \\ \frac{t_2}{5h_e} = \frac{75}{5 \times 6} = 2,5 \end{cases} \rightarrow k_1 = 1$$

Poldi ja plaadi läbimõõdust sõltuva k_2 väärtuseks võetakse võrrandist tulenev minimaalne väärtus:

- C1 kuni C9 tüüpidele:

$$k_2 = \min \begin{cases} \frac{a_{3,t}}{1,5 d_c} = \frac{75}{1,5 \times 50} = 1 \end{cases} \rightarrow k_2 = 1$$

kus $a_{3,t}$ võetakse võrratusest leitav maksimaalne väärtus:

$$a_{3,t} = \max \begin{cases} 1,1d_c = 1,1 \times 50 = 55 \text{ mm} \\ 7d = 7 \times 12 = 84 \text{ mm} \\ 80 \text{ mm} \end{cases} \rightarrow a_{3,t} = 84 \text{ mm}$$

Puidu normtihedusest tulenev k_3 minimaalne väärtus on järgmine:

$$k_3 = \min \begin{cases} \frac{\rho_k}{350} = \frac{428}{350} = 1,22 \end{cases} \rightarrow k_3 = 1,22$$

Kahepoolsete hammastüüblite C10/50 normatiivse kandevõime $F_{v,Rk}$ arvutus Eurokoodeks 5 kohaselt:

$$F_{v,Rk} = 25k_1k_2k_3d_c^{1,5} = 25 \times 1 \times 0,84 \times 1,22 \times 50^{1,5} = 9,01 \text{ kN}$$

sängitussügavusega, külgmise ja keskmise elemendi paksusega seotud teguri k_1 väärtuseks võetakse valemitest 8.62 leitav minimaalne väärtus:

$$k_1 = \min \begin{cases} \frac{t_1}{3h_e} = \frac{75}{3 \times 12} = 2,08 \\ \frac{t_2}{5h_e} = \frac{75}{5 \times 12} = 1,25 \end{cases} \rightarrow k_1 = 1$$

Poldi ja plaadi läbimõõdust sõltuva k_2 väärtuseks võetakse võrrandist tulenev minimaalne väärtus:

tüüpidele C10 ja C11:

$$k_2 = \min \left\{ \frac{a_{3,t}}{2,0d_c} = \frac{84}{2,0 \times 50} = 0,84 \rightarrow k_2 = 0,84 \right.$$

kus

$$a_{3,t} = \max \left\{ \begin{array}{l} 1,5d_c = 1,5 \times 50 = 75 \text{ mm} \\ 7d = 7 \times 12 = 84 \text{ mm} \\ 80 \text{ mm} \end{array} \rightarrow a_{3,t} = 84 \text{ mm} \right.$$

kus poldi läbimõõt d on 12mm.

Puidu normtihedusest tulenev k_3 minimaalne väärtus on järgmine:

$$k_3 = \min \left\{ \frac{\rho_k}{350} = \frac{428}{350} = 1,22 \rightarrow k_3 = 1,22 \right.$$

kus $\rho_k = 428 \text{ kg/m}^3$ on kõikide kaalutud katsekehade aritmeetiline keskmine.

Kuna liites kasutati lisaks hammastüüblitele ka polti, siis tuleb arvesse võtta nende kandevõimete summat.

Eelnevalt on meil teada C1 ja C10 hammastüübli normatiivne kandevõime.

Eurokoodeks 5 kohaselt tuleb ühe kinnituselemendi normkandevõime $F_{v,Rk}$ minimaalne väärtus ühe nihkepinna kohta võtta valemist 8.6. See kehtib ainult nihkekatsete kohta.

Valemist 8.6 saadud $F_{v,Rk}$ väärtus:

$$F_{v,Rk} = 11,10 \text{ kN}$$

Seega liidame $F_{v,Rk}$ saadud väärtuse hammastüüblite saadud väärtustele juurde:

C1/50 puhul:

$$R_{j,k} = R_{c,k} + R_{b,k}$$

$$R_{j,k} = 10,78 + 11,10 = 21,88 \text{ kN}$$

C10/50 puhul:

$$R_{j,k} = 9,01 + 11,10 = 20,11 \text{ kN},$$

kus:

$R_{j,k}$ – on poldi ja hammastüübliga ühendatud liite iseloomulik kandevõime (Eurokoodeks 5).

Lisa 11. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendajate kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, Silver Närep,
(sünnipäev 02.09.1996) 39609022745

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö Hammastüüblitega ühendatud puit-puiduga liidete katsed, mille juhendajad on Renno Reitsnik ja Marko Teder,
 - 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
 - 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
 - 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemisekskuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor _____/allkirjastatud digitaalselt/
allkiri

Tartu, 11. juuni 2020

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

Renno Reitsnik /allkirjastatud digitaalselt/ 11. juuni 2020
(juhendaja nimi ja allkiri) (kuupäev)

Marko Teder /allkirjastatud digitaalselt/ 11. juuni 2020
(juhendaja nimi ja allkiri) (kuupäev)