



EESTI MAAÜLIKOOL
Metsandus- ja maaehitusinstituut

Villu Melk

**ERINEVATE HAMMASTÜÜBLITEGA
ÜHENDATUD PUIT-PUIDUGA LIIDETE KATSED**

**THE EXPERIMENTS OF TIMBER CONNECTIONS
CONNECTED WITH TOOTHED DOWELS**

Ehitusinseneriõppe lõputöö
Maaehituse õppekava

Juhendaja: lektor Marko Teder, *PhD*

Tartu 2017

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

..... (töö autori allkiri ja kuupäev)

Üliõpilase matrikli number: 110812

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

..... (juhendaja allkiri ja kuupäev)

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Magistritöö lühikokkuvõte	
Autor: Villu Melk		Õppekava: Maaehitus	
Pealkiri: Erinevate hammastüüblitega ühendatud puit-puiduga liidete katsed			
Lehekülgi: 60	Jooniseid: 32	Tabeleid: 6	Lisasid: 8
<p>Osakond: Maaehituse osakond</p> <p>Uurimisvaldkond: Puitkonstruktsioonid, hammastüübel liited</p> <p>Juhendaja: Marko Teder, <i>PhD</i></p> <p>Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu 2017</p>			
<p>Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli katseliselt uurida erinevate hammastüüblitega ühendatud puit-puiduga liidete maksimaalseid koormusi ning võrrelda saadud tulemusi arvutusvalemitega leitud väärtustega.</p> <p>Katse tegemiseks kasutati kolmeosalisest plankliimpuidust nelikantpalkidest valmistatud katsekehi ja kolme erinevat hammastüüblit, nendest üks oli $d_c = 75$ mm läbimõõduga C1 tüüpi ja kaks olid $d_c = 50$ mm ning $d_c = 80$ mm C10 tüüpi. Iga erineva uuritava hammastüübli tüübi katse jaoks valmistati 10 katsekehade komplekti, kokku tehti 40 katset. 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 normidest lähtudes.</p> <p>Kuna uuriti ainult hammastüüblite vastuvõetavat maksimaalset kandevõimet, siis liites poldi puudumisel toimus ekstsentrilise koormuse tõttu katsekeha elementide lahknemine ja hammastüüblite tugev deformatsioon.</p> <p>Katsete tulemusena selgus et C10 tüüpi hammastüüblite kõik kidad töötavad seinapalkidest valmistatud puit-puiduga liidetes nihkejõudude vastvõtjana enam-vähem ühtlaselt, samas kui C1 tüüpi hammastüüblite puhul lõikuvad puidukiududega paralleelsed kidad puidukiudude vahele ja nihkuvad puidus puitu lõhestades nihkejõule väiksemat vastupanu osutades. C1 tüüpi hammastüüblite katselisel teel leitud kandeväärtus oli väiksem, kuid C10 tüüpi hammastüüblite kandevõime oli suurem kui arvutuslikul teel leitud normatiivne kandevõime.</p> <p>Magistritöö raames tehtud uuringu põhjal on võimalik soovitada C10 tüüpi hammastüüblite kasutamist puit-puiduga liidete moodustamiseks ehituskonstruktsioonides.</p>			
Märksõnad: liimpuit, kandevõime, siire			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master's Thesis	
Author: Villu Melk		Speciality: Rural Building	
Title: The experiments of timber connections connected with toothed dowels			
Pages: 60	Figures: 32	Tables: 6	Appendixes: 8
Department: Department of Rural Building Field of research: Toothed-plate connections Supervisors: Marko Teder, <i>PhD</i> Place and date: Tartu, 2017			
<p>The purpose of this thesis was to experimentally study the maximum load carrying capacity of timber connections connected with toothed-plate connectors, and to compare these results with the calculated values obtained by applying formulas.</p> <p>For conducting the experiment, test objects made of square three-member glued timber logs were used together with three different toothed-plate connectors. One of the connectors was of type C1 with $d_c = 75$ mm and two were of type C10 with $d_c = 50$ mm and $d_c = 80$ mm. Ten sets of test objects were prepared for each toothed-plate connector type under study, totalling 40 experiments. Experiments were carried out at the University of Life Sciences timber laboratory on the testing system INSTRON 3369. Test objects were compiled and calculations performed based on the norms defined in section 8.9 of the EVS-EN 1995-1-1:2005+A1+NA+A2 EUROCODE 5: Part 1-1 standard.</p> <p>Since only the maximum acceptable load-carrying capacity of toothed-plate connectors was studied, a separation of the elements of the test object and strong deformation of toothed-plate connectors appeared due to eccentric load when there was no bolt in the connection.</p> <p>The experiment revealed that all the teeth of the C10 type of toothed-plate connectors work rather equally in receiving the shear forces in the timber connections made of wall logs, while in case of C1 type of toothed-plate connectors the teeth that are parallel to the grain direction cut in the grain and slide in timber with less resistance to shear forces, causing the timber to split. The experimentally determined load-carrying capacity of C1 type of toothed-plate connectors was smaller. However, the load-carrying capacity of C10 type of toothed-plate connectors was larger than the characteristic load-carrying capacity that was determined by calculations.</p> <p>Based on the research conducted for this thesis, it is possible to recommend the usage of C10 type of toothed-plate connectors for forming timber connections in structures.</p>			
Keywords: glulam, load-capacity, deformation			

SISUKORD

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU	7
SISSEJUHATUS	10
1 ÜLEVAADE KIRJANDUSEST	14
1.1 Puit ehituskonstruksiooni materjalina	14
1.1.1 Mitme kinnituselemendiga ühendused	16
1.2 Erinevad puit-puiduga tüübelühendused	17
1.2.1 Prismalised puittüüblid	18
1.2.2 Rõngas- ja ketastüüblid	19
1.2.3 Hammastüüblid	20
1.2.4 Hammastüübelühenduse normkandevõime	21
1.2.5 Hammastüübliga ühendatud puit-puiduga liidete arvutusosalused	22
1.3 Eelnevalt tehtud uuringud	25
1.3.1 Tammepuidust plaatnaaglitega liittalade katsed	25
1.3.2 Hammastüübli käitumine vastassuunalisel tsüklilisel koormamisel	26
1.4 Kokkuvõtavad järeldused kirjandusest	27
2 UURIMISMATERJAL JA METOODIKA	28
2.1 Katsete meetodika	28
2.2 Uurimismaterjal	28
2.2.1 Katsekehade niiskusesisaldus	29
2.2.2 Katsekehade märgistamine	29
2.2.3 Ühelõikeliste katsekehade valmistamine	30
2.2.4 Kahelõikeliste katsekehade valmistamine	35
2.3 Katsete tegemine ja andmesalvestus	37
2.4 Statistiline andmetöötlus	40
3 TULEMUSTE KOKKUVÕTE JA ARUTELU	41
3.1 Esimene katseseeria	41
3.2 Teine katseseeria	43
3.3 Kolmas katseseeria	45
3.4 Neljas katseseeria	47
3.5 Katsekehade purunemispiltide kirjeldamine	49
3.6 Hammastüüblite arvutuslikud normatiivsed kandevõimed	54
KOKKUVÕTE	55
SUMMARY	57
KIRJANDUSE LOETELU	59
LISAD	61
Lisa 1. Katsekehade niiskusesisalduse tunnuste statistilised näitajad	62
Lisa 2. Katsetulemuste kandevõime tunnuste statistilised näitajad	63
Lisa 3. Esimese katseseeria purunemispildid	64
Lisa 4. Teise katseseeria purunemispildid	75

Lisa 5. Kolmanda katseseeria purunemispildid	85
Lisa 6. Neljanda katseseeria purunemispildid	96
Lisa 7. Hammastüüblitega puit-puiduga liite parameetrid.....	107
Lisa 8. Hammastüüblite normatiivne kandevõime $F_{v,Rk}$	109

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

Ladina suurtähed

$F_{ax,Rk}$	kinnituselemendi teljesuunalise väljatõmbe normkandevõime, N
$F_{v,ef,Rk}$	efektiivne normkandevõime pikikiudu, N
$F_{v,Rk}$	kinnituselemendi normkandevõime ühe nihkepinna kohta pikikiudu, N
$F_{v,0,Rk}$	puidu kiuga paralleelne tüübli ühe lõikepinna normatiivne kandevõime, N
$M_{y,Rk}$	kinnituselemendi voolavuspiirile vastav paindemomendi normväärtus, Nmm
N_{polt}	poldis tekkiv tõmbejõud, N
V	tüüblile mõjuv nihkejõud, N
R_d	elemendi arvutuslik kandevõime, N
$R_{j,k}$	poldi ja hammastüübliga ühendatud liite iseloomulik kandevõime, N
$R_{c,k}$	hammastüübli iseloomulik kandevõime, N
$R_{b,k}$	poldi iseloomulik kandevõime, N

Ladina väiketähed

a_1	kinnituselementide vahekaugus pikikiudu, mm
a_2	kinnituselementide vahekaugus ristikiudu, mm
$a_{3,t}$	kinnituselemendi kaugus elemendi koormatud otsast, mm
$a_{3,c}$	kinnituselemendi kaugus elemendi koormamata otsast, mm
$a_{4,t}$	kinnituselemendi kaugus elemendi koormatud servast, mm
$a_{4,c}$	kinnituselemendi kaugus elemendi koormamata servast, mm

d	kinnituselemendi läbimõõt, mm;
d_c	hammastüübli tüübist sõltuv mõõt, mm
$f_{h,i,k}$	norm-muljumistugevus puitelemendis i , N/mm ²
$f_{h,\alpha,k}$	puidukiu ja jõu vahelisest nurgast α olenev normatiivne muljumistugevus pikikiudu, N/mm ²
$f_{h,0,k}$	normatiivne muljumistugevus pikikiudu, N/mm ²
$f_{u,k}$	normatiivne tõmbetugevus, N/mm ²
h_e	süvistussügavus, mm.
k_i	modifikatsiooni tegur, kus $i = 1...3$
k_{a1}	minimaalse pikivahe a_1 vähendustegur
k_{a2}	minimaalse põikivahe a_2 vähendustegur
n	poltide arv reas.
n_{ef}	efektiivne kinnituselementide arv pikikiudu
t	puitelemendi paksus, mm;
t_i	on puidu või laua paksus või süvistussügavus, mm

Kreeka tähed

α	nurk jõu mõjumissuuna ja pikikiu vahel, °
ρ_k	puidu normtihedus, kg/m ³

Lühendid

C1	C1 tüüpi hammastüübel
C10	C10 tüüpi hammastüübel
KK1	katsekehade komplekt number 1
KK11	katsekehade komplekt number 2
KK21	katsekehade komplekt number 3

KK31 katsekehade komplekt number 4

2x kahelõikeline katse

SISSEJUHATUS

Teatavasti on puit taastuv materjal ja suhteliselt laialt levinud. Asjakohasel majandamisel säilib võimalus tarbida ja toota puidupõhiseid materjale peaaegu lõpmatult. Järjest enam pöörataksegi tänapäeval tähelepanu keskkonna säästmisele ja taastuvate loodusvarade kasutamisele.

Puitmaterjalide ja sellest erinevate ehituskonstruksioonide tootmine on seotud küll energiakuluga, kuid siiski on see tunduvalt väiksem võrreldes teiste ehitusmaterjalide tootmise ja kasutamisega seotud kuludega. Kui siia juurde arvestada veel puude omadus valguse ja klorofüllil abil lehtede ning okaste kaudu ümbritsevast keskkonnast kasvamisprotsessis süsihappegaasi omastada ja samal ajal fotosünteesis muundada valgusenergia orgaaniliste ainete energiaks, millega kaasneb hapniku ja formaldehüüdi tootmine (Saarman *et al.* 2006), on puidu kasutamine ehituskonstruksioonide rajamisel väga keskkonnasäästlik ja jätab loodusele väiksema jalajälje võrreldes teiste ehitusmaterjalide kasutamisega.

Kandvate ja tugikonstruktsioonide ehitamiseks on puitu kasutatud erineval moel juba väga ammu. Kui varem anti oskusteavet edasi põlvest põlve praktilise töö käigus, siis tänapäeval on erinevad ehituskunsti kogemused ja oskusteave enamasti koondatud erialakirjandusse ning teatmeteostesse.

Erinevaid puitkonstruktsioonide valmistamise näiteid ja arvutamise juhiseid on leida ka päris vanadest ürikutest. Näiteks ehitusinsener C. Kersten on koondanud raamatusse „Freitragende Holzbauten” juhised ja arvutusnäited väga erinevate puitkonstruktsioonide arvutamiseks ning konstrueerimiseks (Kersten 1926). Antud teoses on käsitletud ka käesoleva magistritöö uurimuseks olevaid hammastüüblitega puitliiteid, erinevaid kasutusvõimalusi ja praktilisi näiteid võimalikest kasutuskohtadest.

Kvaliteetse puidu laialdase leviku tõttu Eesti aladel on sellest tänapäeval saanud üks põhilistest Eestis toodetavatest ehitusmaterjalidest. Eesti on Euroopa mõistes juhtival kohal erinevate puitkonstruktsioonide ehitamisel ja eksportimisel.

Ehitustehnoloogia ja seadmete arenedes on tekkinud laialdasemad puidu kasutamisevõimalused ehituskonstruksioonide rajamisel. Üks selliseid valdkondi on ka palkehitised.

OÜ Holzland juhina on töö autor saanud laiapõhjalised teadmised ja töökogemused palkmajade ehitamisel. Esimesed kogemused selles valdkonnas omandas autor palkmaju projekteerivas, tootvas ja ehitavas ettevõttes AS RPM, olles otseselt seotud erineva keerukusega palkkonstruktsioonide planeerimise, konstrueerimise ja püstitamise erinevates riikides. Üks väljakutsetest on olnud ka palkidest peakandjate ja pärlinite kavandamine ning konstrueerimine.

Liimpuidust talade kasutuselevõtt on loonud võimaluse planeerida kandvate konstruktsioonide pikemaid sildeid kui tavalise seinapalgiga ja projekteerida suuremaid avatud ruume lisatugesid kasutamata. Siiski on tihti meeldiv väljakutse rajada kandvad konstruktsioonid arhitektuurselt enam ühtsesse ehitusstiili sobivana ja kasutada tavalise ristkülikukujulise ristlõikega liimpuittalade asemel seinakonstruktsioonidega sarnase profiiliga talasid, peakandjaid ja pärlinid.

Tugevate ja nägusate peakandjate ning pärlinite konstrueerimisel kasutatakse võimaluse piires plankliimpuidust valmistatud palke. Kuid seinapalgi profiili ristlõike kujust tingituna on ühe palgi kasutamine pikas sildeavas tavaliselt ebapiisava kandejõuga. Peale palgi enda ebapiisava kõrguse nõrgestavad seda ka risttapid.

Käesoleva magistr töö autor jälginud erinevatel aegadel rajatud hooneid ja nende kandekonstruktsioonide käitumist eksploatatsiooni käigus ning jõutud järeldusele, et on tekkinud vajadus suurendada seinaprofiili kujuga plankliimpuidust ehitatud peakandjate ja pärlinite kandevõimet ning vähendada nende läbinõtkumist.

Kirjandust uurides on autor leidnud mitmeid artikleid, kus käsitletakse mehaaniliste liidetega moodustatud puit-puiduga liiteid ning nende konstrueerimise ja arvutamise põhimõtteid.

Puitkonstruktsioonide kandevõime ja deformatsioonid olenevad suurel määral elementide omavahelistest liidetest. Paljude paralleelselt töötavate kinnituselementidega deformeeruv liide (nt naelliide) on töökindlam kui jäik liide. Nii võib paralleelselt töötavates suhteliselt jäikades ühendustes (nt tappliites) kõige tihedam lüli puruneda enne, kui teised tööle

hakkavad (järkjärguline purunemine). Paralleelselt töötavad järeleandvad kinnituselemendid hakkavad ka ebavõrdsete paigaldamistiheduste puhul liite deformeerumisel enam-vähem võrdselt tööle (Just, E., Õiger, K. ja Just, A. 2015, 117).

Puit-puiduga liidete puhul kasutatavad hammastüüblid kuuluvad oma töötamise iseloomu tõttu järeleandvate liidete sekka. Järeleandvatele liidetele on iseloomulikud puidu muljumisest tulenevad suhteliselt suured deformatsioonid (Allikas 1985).

Autori teada on erinevaid naagelliiteid palju uuritud, samuti on aastate jooksul uuritud ka niinimetatud Bulldogi tüüpi hammastüübelühendusi ja nende käitumist erinevat liiki koormuse mõjul.

Hammastüübelühenduste kasutamist puitliidetes käsitleb Eurokoodeks 5 alalõigus 8 „Liited metallkinnituselementidega” (Eurokoodeks 5, 2015).

Autorile teada olevalt ei ole varem uuritud hammastüüblite mõju palkmaja peakandjate ja pärlinite kandevõimele. Erilist huvi pakkus autorile C10 tüüpi hammastüüblite kasutamine sellistes konstruktsioonides. Teatavasti on enamiku seinaprofiilide puhul kahe palgirea vahelise vara tõttu konstruktiivne ruum, st vara kohal ei puutu üksteise peale laotud palgiridade toetuspinna tihedalt teineteise vastu. Hammastüübleid peaks olema suhteliselt lihtne ehitusplatsil paigaldada ja tänu oma suuremale süvistussügavusele peaks just C10 tüüpi hammastüübel paremini kandma üle erinevate palgiridade vahelist nihkejõudu.

Käesoleva töö eesmärk on katseliselt uurida erinevate hammastüüblite mõju moodustatavale puit-puiduga liidetele. Lisaeesmärgina võrreldakse teoreetiliste arvutuste tulemusel leitud nihkega töötavate hammastüüblite normkandevõimet kandevõimega, mis leitakse katsete käigus.

Magistritöö esimeses osas antakse lühiülevaade puit-puiduga liidetest üldiselt, samuti nende konstrueerimise ja arvutamise põhimõtetest. Teises osas kirjeldatakse uurimismetoodikat, katseseadet ja katsekehade valmistamist. Kolmandas osas võetakse kokku katsetulemused ja võrreldakse neid arvutuslikul teel leitud väärtustega.

Käesolevas magistritöös on kasutatud teoreetilist ja empiirilist uurimismeetodit.

Autor tänab oma lõputöö juhendajat lektor Marko Tederit, kes oli suureks abiks kogu magistritöö tegemise vältel. Lisaks tänab autor Eesti Maaülikooli metsanduse- ja

maaehitusinstituudi metsatööstuse osakonna lektorit Regino Kaske, kes juhendas katsete teostamisel vajamineva universaalse elektromehaanilise kaseseadeldise INSTRON 3369 kasutamisel ja Eesti Maaülikooli tehnikainstituudi lektorit Eve Aruveed, kes aitas autorit matemaatilise statistika osas. Veel soovib autor tänada AS Ritsu tegevjuhti Elari Kivisood katsekehade ehitamiseks eraldatud materjali eest.

1 ÜLEVAADE KIRJANDUSEST

1.1 Puit ehituskonstruksiooni materjalina

Puidu kasutamisel ehitusmaterjalina saab esile tuua mitmeid tegureid, mis räägivad puidu kasutamise eelistest:

- puit on taastuv ehitusmaterjal;
- suurem osa puittoodete valmistamiseks kuluvast energiast saadakse puidujääkidest;
- liimpuittala valmistamiseks kulub mitu korda vähem energiat kui sama tugeva terasest või raudbetoonist tala puhul;
- ehitusmaterjalide asendamisel puiduga jääb 5 tm kasutatud puidu kohta põletamata ligikaudu 1 tonn kütteõli;
- puidul on omadus toimida siseruumis niiskuse reguleerijana – öeldakse ju, et puit „hingab”. See väljendub puidu omadusel imada endasse ruumist liigset niiskust ja vabastada seda õhu kiirel kuivamisel;
- puitmaja on kivimajast mitu korda kergem;
- ehitusest üle jäävat puitu või hoone amortiseerumisel saab lammutamisel saadud puitu kasutada kütteks (Just, E., Õiger, K. ja Just, A. 2015).

Kõik materjalid avaldavad mõjuvatele välisjõududele vastupanu. Välisjõudude toimel tekivad materjalides pinged, mis suurenevad väliste jõudude kasvades. Sidestustugevuse piiri ületamisel muudab materjal oma kuju või puruneb (Saarman *et al.* 2006).

Puit on anisotroopne materjal, selle struktuuri ebaühtluse tõttu esineb ka sama puiduliigi piires mehaaniliste omaduste osas suuri kõikumisi. Samuti sõltub puidu tugevus koormuse muutumise kiirusest ja selle mõju kestusest (Just, E., Õiger, K. ja Just, A. 2015).

Vaatamata oma suhtelisele kergusele on puit tugev ehitus- ja konstruktsioonimaterjal. Puidu tugevust mõjutavad järgmised tegurid:

- puuliik;
- tihedus;
- niiskusesisaldus;
- kiudude ja koormuse suund;
- puidu struktuurierinevused ja rikked.

Tavaliselt kasutatakse ehituskonstruktsioonide valmistamisel männi- ja kuusepuitu.

Puidu kasutamisel konstruktsioonides tuleb tähele panna järgmisi erinevusi:

- puidurikete mõju puidukasutusele;
- niiskusemuutused muudavad alati materjali kahanemis- ja paisumisomadusi, muutub ka materjali tugevus;
- kestuskoormuse esinemisel ilmnevad deformatsioonid ja tugevus väheneb.

Puitkonstruktsioonide matemaatiliseks arvutuseks on vaja teada nn lubatud pingeid, mida kasutatakse arvutusvalemities, et praktilisel kasutamisel ei oleks puitkonstruktsioon ohustatud (Saarman *et al.* 2006).

Puit on hügrokoopne materjal. Seetõttu sõltub puitkonstruktsioonide niiskusesisaldus ümbritsevast keskkonnast. Puidu niiskusesisalduse vähenemisel allapoole 30% hakkab puit ristikiudude suunas kahanema, kusjuures piki kiudu on kahanemine piisavalt väike ja selle võib tähelepanuta jätta. Niiskusesisalduse vähenemisel või suurenemisel muutuvad puidu ristlõike mõõtmed ligikaudu 7%. Seetõttu tuleb puitkonstruktsioonide paigaldamisel arvestada nende pikaajase kasutuskeskkonna niiskusesisaldusega (Blass *et al.* 1995).

1.1.1 Mitme kinnituselemendiga ühendused

Puitkonstruktsioonide liited jagunevad töötamise iseloomu järgi jäikadeks ja järeleandvateks. Kui jäikasad liiteid iseloomustab habras purunemine, siis järeleandvate liidete puhul on puidu muljumise tõttu iseloomulikud suhteliselt suured deformatsioonid.

Järeleandvaid puitkonstruktsioonide liiteid tehakse enamasti puit-, metall- ja plastkinnitite abil (Just, E., Õiger, K. ja Just, A. 2015).

Puit-puiduga liidetele täiendava kandevõime lisamiseks on kasutatud väga erinevaid vahendeid, nagu naelad, kruvid poldid ja muud sarnased kinnitusvahendid. Kuid et metallist kinnitusvahendite muljumistugevus on palju kordi suurem kui ehituskonstruktsioonides kasutataval puidul, siis on otstarbekas kasutada liidetavate elementide vahel nihkejõudude ülekandmiseks täiendavaid abivahendeid. Selleks sobivad hästi erinevad hammastüübid, mis täiendavad näiteks poltliite kandevõimet, jaotades liidetavate puitelementide vahelist nihkepinget suuremale pindalale, kui seda võimaldab ainult polt- või metalltüübelliide.

Paralleelselt töötavad järeleandvad kinnituselemendid hakkavad ka ebavõrdse paigaldamistiheduse puhul puidu deformeerumisel enam-vähem võrdselt tööle. Sellise tööpõhimõtte eeldus on, et liites kasutatakse sarnaste deformatsiooniomadustega kinniteid, sest lõikele töötavates puit-puiduga liidetes on nihkepingete kontsentratsioon seda suurem, mida jäigemad on ühenduses kasutatavad elemendid ja kinnitid (Just, E., Õiger, K. ja Just, A. 2015).

Eurokoodeks 5 kohaselt tuleb liidetes arvutatavad kinnituselemendid, nende paigutus ja hulk valida selliselt, et oleks tagatud liite nõutud tugevus ning jäikus. Puitliidete moodustamisel tuleb erilist tähelepanu pöörata metallkinnitite paigutusele liidetavate elementide suhtes. Nõuded kinnitite omavahelisele minimaalsele asetuskaugusele ja kaugusele elementide otstest ning külgedest võivad tekitada olukorra, kus jõudude vastuvõtmiseks ei ole võimalik paigutada piisavat hulka kinnituselemente. Ühes liites tuleks kasutada samade omadustega kinnituselemente, et kõigil paigaldatud kinnitusvahenditel oleks tagatud ühtlane koormuse ülekanne.

Arvestada tuleb, et mitme kinnituselemendiga ning sama tüüpi ja suurusega kinnituselemente sisaldavate liidete kandevõime võib olla üksikute kinnituselementide summeerimisel saadud kandevõimest väiksem (Eurokoodeks 5 2015).

Kui liidetes võrreldakse erinevaid kinnituselementide tüüpe või kui liite jäikus on vastavas mitmelõikelise liite nihkepinnas erinev, tuleb kontrollida nende kokkusobivust.

1.2 Erinevad puit-puiduga tüübelühendused

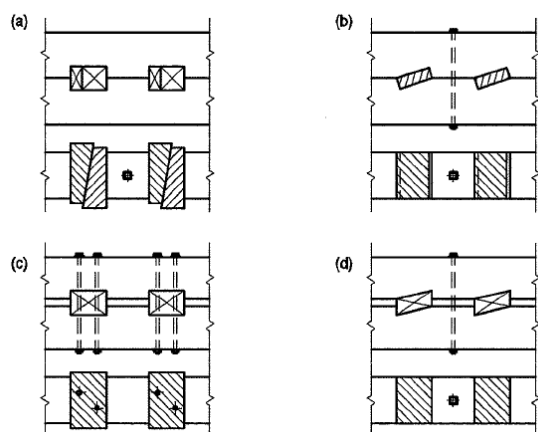
Tüübelliiteid kasutatakse nihkejõudude ülekandmiseks ühelt elemendilt teisele. Tüübelliites võtab tüübel koos poldiga vastu löikekoormusi. Tulenevalt paigaldusviisist jagunevad tüüblid kahte põhirühma selle järgi, kas nad pannakse puitu selleks eelnevalt tehtud avasse või soonde (ketastüübel ja rõngastüübel) või pressitakse tüüblid jõuga puitu (hammastüüblid) (Siikanen 2012).

Tüübelühendused moodustavad jäiga puit-puiduga liite ja mitme ühenduse paralleelne töötamine on tagatud ainult täpse teostamise korral.

Reeglina kasutatakse tüüblitega liidetavaid detaile neid koos hoidva täiendava liitedetailiga. Harilikult kasutatakse sellel otstarbel polti.

1.2.1 Prismalised puittüüblid

Prismaliste puittüüblitega ühendatavad elemendid asetatakse tihedalt üksteise vastu või jäetakse nende vahele pilu (vt joonis 1.1).



Joonis 1.1. Prismalised puittüüblid *Allikas:* Just, E., Õiger, K. ja Just, A. 2015

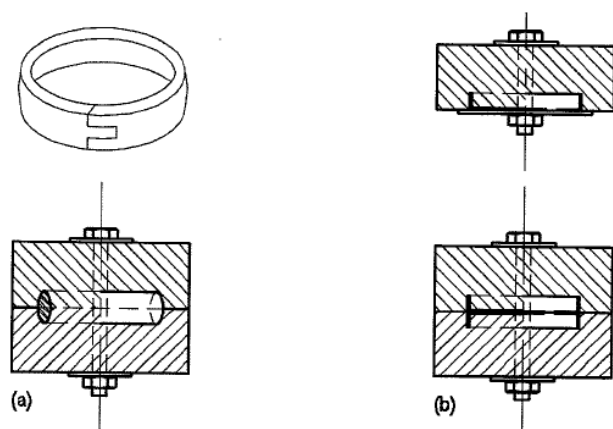
Kui elemendid asetatakse tihedalt üksteise vastu, kasutatakse põik- või kaldtüübleid, nagu on näidatud joonisel 1.1 (a) või (b). Kui aga elementide vahel on pilu, kasutatakse piki- või kaldtüübleid, nagu on näidatud joonisel (c) või (d).

Kaldtüüblite kasutamisel tuleb silmas pidada, et need töötavad vaid ühes suunas mõjuvatele nihkejõududele (Just, E., Õiger, K. ja Just, A. 2015).

Kandilised tüüblid olid varem üldjuhul kõvast puidust, kuid praegu on käibel peamiselt terasest valmistatud. Terasest kandilise tüübli abil saab keevitusega teha üsna lihtsalt terasvarda ja puidu vahelise lõikeühenduse (Siikanen 2012).

1.2.2 Rõngas- ja ketastüüblid

Rõngas- ja ketastüüblid on kasutusel külgsuunas koormatud liidetes, üldiselt koos poltidega. Rõngastüübleid kasutatakse ainult puit-puiduga liidetes. Ketastüübleid võib kasutada nii teras-puiduga kui ka puit-puiduga liidetes. Joonisel 1.2 on toodud rõngas ja ketastüüblite paigaldamisviisid.



Joonis 1.2. (a) rõngastüübel, (b) ketastüübel *Allikas: Just, E., Õiger, K. ja Just, A. 2015)*

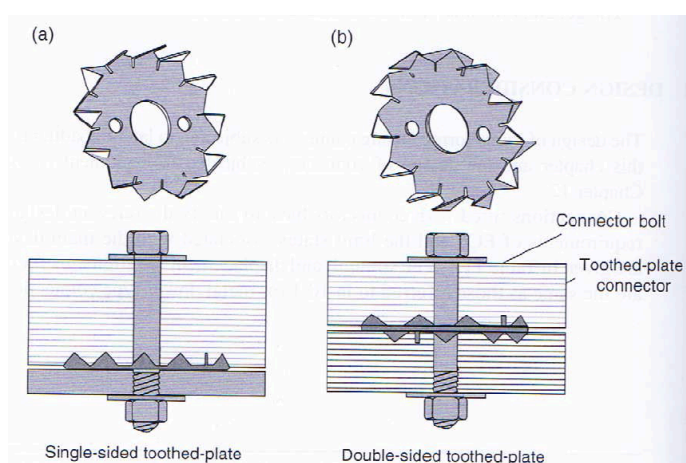
Rõngas- ja ketastüübleid kasutatakse laudsõrestike sõlmede ning tõmbevarraste jätkude kinnititena. Sellise ühenduse tegemine on suurt täpsust nõudev töö ja võimalik kvaliteetselt teostada ennekõike tehase tingimustes. Samuti peavad ühendatavad elemendid olema suhteliselt kuivad ($w < 15\%$) (Just, E., Õiger, K. ja Just, A. 2015).

Eurokoodeks 5 alalõik 8.9 kirjeldab põhjalikult EN 912 ning EN 14545 kohaselt tehtud Euroopas kehtivat rõngas- ja ketastüüblite liite kandevõime arvutusmeetodit.

1.2.3 Hammastüüblid

Hammastüubleid on olemas ümara, neljakandilise ja mitmenurkse kujuga erinevates suurustes 38...165 mm. Sõltuvalt tüübist on hammastüüblid valmistatud kas külmaltsitud väikese süsinikusisaldusega terasest või valatud tempermalmist. Terasest hammastüüblite ääred on kolmnurgakujuliselt valtsitud risti hammastüübli plaadiga, tempermalmist valatud hammastüüblitel on sõltuvalt tüübist ühel või mõlemal vaheplaadi küljel koonilised ogad (Porteous ja Kermani 2013).

Ümara kujuga terasest valtsitud tüüblid on näha joonisel 1.3.



Joonis 1.3. Ümara kujuga terasplekist valtsitud hammastüüblid. Vasakul ühepoolne hammastüübel teras-puiduga liites. Paremal kahepoolne hammastüübel puit-puiduga liites
Allikas: Porteous ja Kermani 2013

Hammastüüblite tööpõhimõte on sama nagu rõngas- ja ketastüüblitel. Nad kannavad nihkejõu otseselt ühelt puitelemendi pinnalt teise elemendi pinnale. Reeglina toimub hammastüüblitega liite valmistamine ehitusplatsil, sest ei vaja eelnevat ettevalmistust tehases. Kui rõngas- ja ketastüüblid vajavad paigaldamiseks spetsiaalsete tööriistadega ettevalmistatud uurdeid, siis hammastüüblid pressitakse otse liidetavasse puitelementi. Kuna hammastüüblid pressitakse hammastega puidu sisse, ei saa paigaldusviisist tulenevalt kasutada liite moodustamisel suurema normtihedusega puitu kui 500 kg/m^3 (Blass *et al.* 1995).

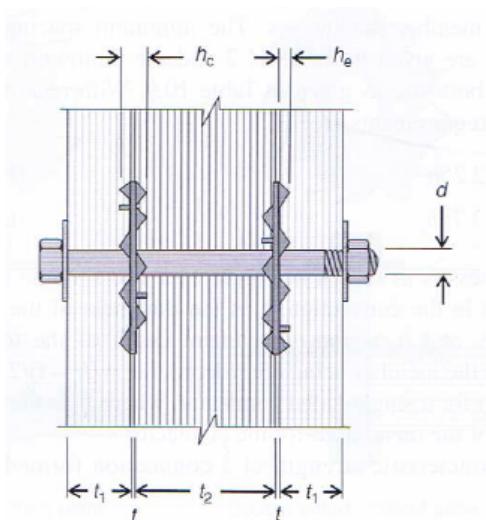
Tüübelühendust iseloomustavad nihkejõudude ekstsentrilisus, mille tagajärjel rebitakse ühendatavad elemendid lahti. Seetõttu tuleb tüübelliites kasutada polte (Just, E., Õiger, K. ja Just, A. 2015).

Standardis EVS-EN 912:2011 on kirjeldatud 11 tüüpi hammastüübleid, vastavalt C1, C2 jne kuni C11. Erinevat tüüpi hammastüüblid on kantud kategooriatesse vastavalt kuju, materjali, kahepoolsete või ühepoolsete ogade järgi (EVS-EN 912:2011).

Tavaliselt kasutatakse koos hammastüüblitega liidete moodustamisel ka polte, mis hoiavad liidetavad külgelemendid omavahel tihedalt koos ja seega ka hammastüüblite ogad täielikult puitu pressituna, st ettenähtud sängitussügavusel. Standardis EVS-EN 13271:2002 on toodud erinevate hammastüüblitega kasutatavate poltide soovitatavad läbimõõdud (EVS-EN 13271 2002).

1.2.4 Hammastüübelühenduse normkandevõime

Hammastüüblitega puit-puiduga liide tuleb koostada standardis EVS-EN 13271:2002 ja Eurokoodeks 5-s (EVS-EN 1995-1-1:2005+A1+NA+A2) kirjeldatud nõuete kohaselt. Joonisel 1.4 on kujutatud tinglikult kahelõikeline puit-puiduga hammastüübelliide, selle elementide tähistused ja liites kasutatavate detailide mõõtmete määramise punktid.



Joonis 1.4. Puit-puiduga hammastüübelliite mõõtmete tähistused *Allikas:* Porteous ja Kermani 2013

Hammastüübelliite kandevõime jaguneb koormuse jagunemisel ogaplaadi ja poldi vahel ning ühenduse normatiivne kandevõime koosneb tüüblite ja poldi normatiivse kandevõime summast (Blaß *et al.* 1993).

$$R_{j,k} = R_{c,k} + R_{b,k} \quad (1.1)$$

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.

Vastavad kandevõimed leitakse Eurokoodeks 5-s kirjeldatud tingimustest lähtuvalt.

1.2.5 Hammastüübliga ühendatud puit-puiduga liidete arvutusalsused

Katsetel kasutatud hammastüüblitega puit-puiduga liidete elementide arvutuslikud parameetrid.

Standardis EVS-EN 13271:2002 on hammastüübli normatiivne kandevõime ühe tüübli kohta koormuse suunal puidu kiudude suunas ($\alpha = 0^\circ$) tähistatud $R_{j,0,k}$. Standardis EVS-EN 1995-1-1:2005+A1+NA+A2 – Eurokoodeks 5-s on normatiivse kandevõime tähiseks $F_{v,Rk}$ ja valemid kirjeldatud:

$$F_{v,Rk} = \begin{cases} 18 k_1 k_2 k_3 d_c^{1,5} & \text{tüüpidele C1-C9} \\ 25 k_1 k_2 k_3 d_c^{1,5} & \text{tüüpidele C10 ja C11} \end{cases} \quad (1.2)$$

kus:

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

k_i – modifikatsiooni tegur, kus $i = 1-3$, on määratud allpool;

d_c – on:

hammastüübli C1, C2, C6, C10 ja C11 tüüpide läbimõõt, mm;

hammastüübli C5, C8 ja C9 tüüpide tüübli külje mõõt, mm;

hammastüübli C3 ja C4 tüüpide mõlema külje pikkuse korrutise ruutjuur, mm (Eurokoodeks 5 2015).

Hammastüübli C1 kuni C9 tüüpidele võetakse välimise puitelemendi minimaalne paksus $2,25 h_e$ ja keskmisel $3,75 h_e$, kus h_e on sängitus-sügavus, vt joonis 2.4 (Eurokoodeks 5 2015). Hammastüübli C10 ja C11 tüüpidele võetakse välimise puitelemendi minimaalne paksus $3,0 h_e$ ja keskmisel $5,0 h_e$ (EVS-EN 13271 2002).

Teguri k_1 väärtus tuleb võtta:

$$k_1 = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{3 h_e} \\ \frac{t_1}{3 h_e} \\ \frac{t_2}{5 h_e} \end{array} \right. \quad (1.3)$$

kus:

t_1 on küljeelemendi paksus;

t_2 on keskmise elemendi paksus;

h_e on süvistussügavus, mm.

Tegur k_2 tuleks määrata:

- C1 kuni C9 tüüpidele:

$$k_2 = \min \left\{ \begin{array}{l} 1 \\ \frac{a_{3,t}}{1,5 d_c} \end{array} \right. \quad (1.4)$$

kui

$$a_{3,t} = \max \left\{ \begin{array}{l} 1,1 d_c \\ 7 d \\ 80 \text{ mm} \end{array} \right. \quad (1.5)$$

kus:

d on poldi läbimõõt, mm.

- C10 ja C11 tüüpidele:

$$k_2 = \min \left\{ \begin{array}{l} 1 \\ \frac{a_{3,t}}{2,0 d_c} \end{array} \right. \quad (1.6)$$

kui

$$a_{3,t} = \max \left\{ \begin{array}{l} 1,5 d_c \\ 7 d \\ 80 \text{ mm} \end{array} \right. \quad (1.7)$$

kus:

d on poldi läbimõõt, mm.

Tegur k_3 tuleks võtta:

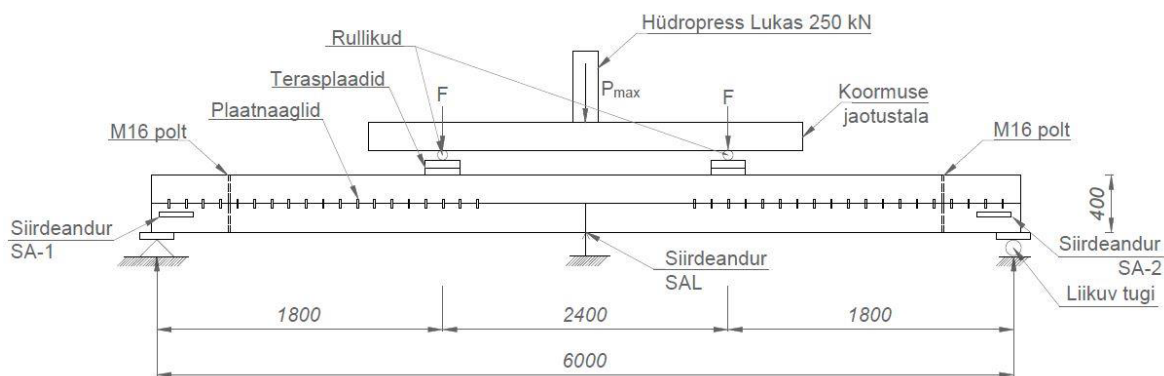
$$k_3 = \min \left\{ \begin{array}{l} 1,5 \\ \frac{\rho_k}{350} \end{array} \right. \quad (1.8)$$

kus ρ_k on puidu normtihedus, kg/m^3 (Eurokoodeks 5 2015).

1.3 Eelnevalt tehtud uuringud

1.3.1 Tammepuidust plaatnaaglitega liittalade katsed

Rauno Hein uuris oma magistritöös tammepuidust valmistatud plaatnaaglitega ühendatud liittalade kandevõimet ja võrdles katseliselt saadud tulemusi arvutuslikega. Katsed viidi läbi Eesti Maaülikooli ehituskonstruksioonide laboris. Katsete käigus veenduti, et algselt arvutuslikult leitud liittalade tugevusomadused on tunduvalt väiksemad kui katsetega määratud liittalade tugevusomadused. Samuti määrati liittala maksimaalsed läbipained, maksimaalsed paindemomendid, määrati liittalade staatilised paindeelastsusmoodulid ning tugevusklassid. Joonisel 1.5 on toodud liittalade katseskeemi põhimõttejoonis.



Joonis 1.5 Liittala katseskeem *Allikas:* Hein 2016

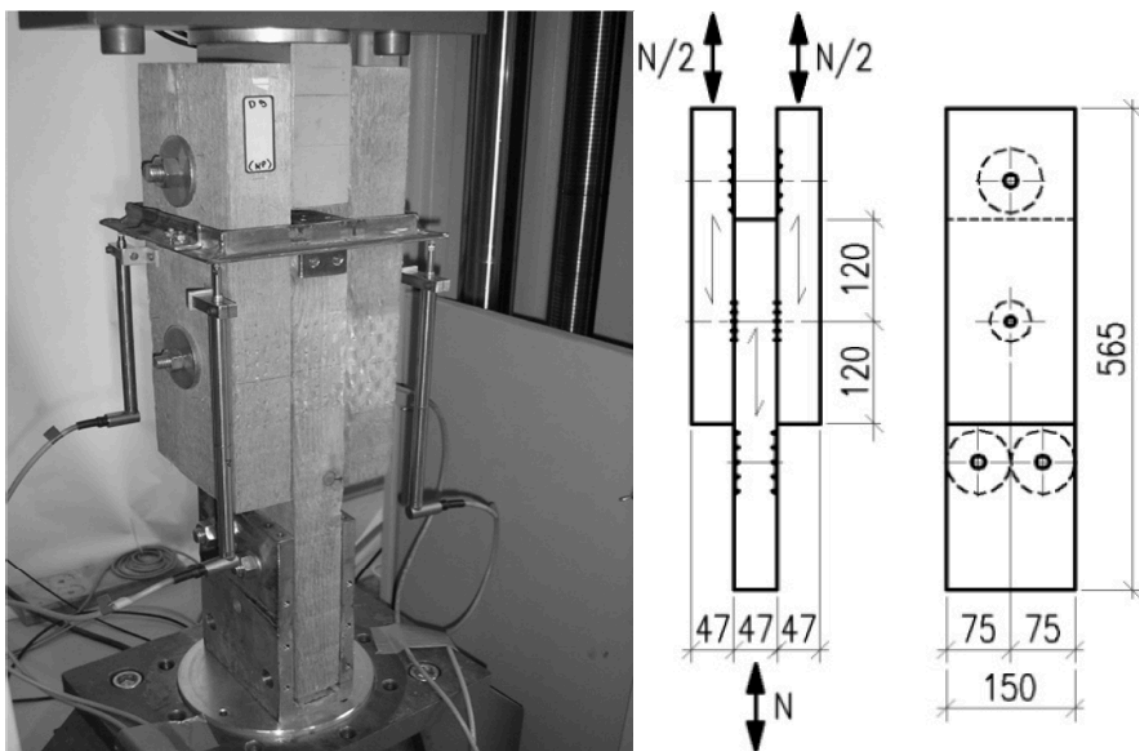
Katsete tulemustest järeldas Rauno Hein, et liittalade plaatnaaglid võtsid nihkejõudu paremini vastu kui esialgu eeldati (Hein 2016).

1.3.2 Hammastüübli käitumine vastassuunalisel tsüklilisel koormamisel

Tallinna Tehnikaülikooli teadurid Eero Tuhkanen ja Karl Õiger uurisid Neubrandenburgi Ülikoolis (Neubrandenburg University of Applied Sciences) kahepoolsete hammastüüblite C1/50 käitumist puit-puiduga liidetes vastassuunalisel tsüklilisel koormamisel.

Sellise iseloomuga koormus esineb puit-puiduga liidetes koormuse liikumisel tasapinnaliste sõrestike puhul (sillad, mastid) ja toestuselement süsteemides maavärinate puhul (Tuhkanen ja Õiger 2013).

Joonisel 1.6 on toodud katsemasina joonis ja katse põhimõtteskeem.



Joonis 1.6 Vasakul katsekeha katseseadmes, paremal katsekeha mõõtmed *Allikas:* Tuhkanen ja Õiger 2013

Katsete tegemiseks kasutati katsemasinat Zwick/Z400. Liite uurimus viidi läbi astmeliselt suureneva amplituudiga ja vastassuunaliselt muutuva suunaga koormustega. Liidetes kasutati korruga polti ja hammastüüblit. Eraldi katseseeria tehti liitele, kus oli ainult hammastüübel.

Katsetulemuste põhjal järeldati, et puidukiudude nihketugevuse ületamisel koormuse ülekandumise korral puidult hammastüüblile venitatakse hammastüübli teravike jäljend puidus välja hammaste asetuse kohaselt puidukiudude suhtes jõu mõjumise suuna järgi. Kokkuvõttes suurendas see liite liikuvust ja kontaktsurve kadumist (Tuhkanen ja Öiger 2013).

Katsetulemuste põhjal tegid autorid järelduse, et empiirilise valemi väljapakkumiseks on vaja teha veel edasisi uuringuid, sest tulemused sõltuvad paljudest teguritest.

Reaalsetes konstruktsioonides on mõningad võimalused, kus purustav jõud saavutatakse mõlemas suunas korduvalt. Seetõttu ei ole vastassuunalise tsüklilise koormusega liidete jaoks hammastüüblitega ühendusviis soovitatav (Tuhkanen ja Öiger 2013).

1.4 Kokkuvõtvad järeldused kirjandusest

Hammastüübelkinniteid on olemas 11 erinevat tüüpi ja paljudes erinevates suurustes, kuid nende kasutamist on väga vähe kajastatud.

Magistritöö autor on uurinud kõiki kehtivaid erinevate tüübelkinnititega puit-puiduga liidete koostamise standardeid, varasemaid lõputöid selles valdkonnas ja samuti erinevaid teadusartikleid. Hammastüüblid kuuluvad mehaaniliste liitmike kategooriasse ja nendega liitmike konstrueerimist kajastatakse teisi tüübelkinniteid ning polte tutvustavas peatükis. Standardites on põhjalikult näidatud poltliidete ja metallist ümartüüblite käitumist erinevates purunemisolukordades, kuid hammastüüblite kohta on teavet ning näiteid tunduvalt vähem.

Kuna sellist mehaaniliste liitmikega elastsete liidete moodustamise võimalust on erialases kirjanduses vähem kajastatud ja kõik leitud varasemad uuringud on tehtud nn Bulldogi tüüpi (C1 kuni C9 tüüpi) hammastüüblitega, pidas käesoleva magistritöö autor vajalikuks katseliselt uurida hammastüüblite kandevõimet ja võrrelda saadud tulemusi vastavates standardites kirjeldatud arvutuslike väärtustega. Samas ei õnnestunud autoril Geka tüüpi (C10 ja C11 tüüpi) tüüblitega tehtud uuringute kohta vastavaid artikleid üldse leida.

2 UURIMISMATERJAL JA METOODIKA

2.1 Katsete meetodika

Katsete tegemisel juhinduti standardis EVS-EN 14545:2008 „Puittarindid. Liitmikud. Nõuded” kirjeldatud nõuetest.

Mehaanilised kinnitusliited peavad vastama standardis EVS-EN 912:2011 „*Timber fasteners – Specifications for connectors for timber*” kirjeldatud nõuetele.

Otseselt ei ole hammastüüblitega katsete tegemise meetodikat kirjeldatud üheski standardis. Erinevate metallkinnititega katsete tegemisel on kasutatud K. W. Johanseni välja töötatud voolavusteoorial põhinevate katsekehade erinevate purunemisviiside arvestamist. Selle teooria põhjal katsete tegemist on kirjeldatud järgmistes standardites: EVS-EN 26891:1999 „Puittarindid. Mehaaniliste kinnitusdetailidega liited. Tugevus- ja deformatsiooninäitajate määramise põhialused“, EVS-EN 1380:2009 „*Timber structures – Test methods – Load bearing, screws, dowels and bolts*” ja EVS-EN 383:2007 „*Timber Structures – Test methods – Determination of embedment strength and foundation values for dowel type fasteners*”. Nendes standardites kirjeldatakse erinevate metallnaaglitega tehtavaid katseid ja andmete salvestamise meetodit.

2.2 Uurimismaterjal

Katsekehade valmistamisel võeti aluseks standardis EVS-EN 13271:2002 „*Timber fasteners – Characteristic load-carrying capacities and slip-moduli for connector joints*” kirjeldatud miinimumnõuded.

Katsekehade valmistamiseks saadi Ritsu AS-ist plankliimpuidust valmistatud seinapalgid ja nendest lõigatud klotsid.

Standardis kirjeldatud miinimumnõudest ja katsekeha valmistamiseks kasutatud palkide suurusest lähtudes valmistati Ritsu AS-i tehases katsekehad. Selleks lõigati palgi ülemisest ja alumisest osast üldkõrgusega 80 mm paksune plank, millest hiljem lõigati Eesti Maaülikooli maaehituse osakonna ehituskonstruksioonide laboris katseskeemi kohaselt sobiva pikkusega detailid.

2.2.1 Katsekehade niiskusesisaldus

Vahetult enne katsekehade koostamist ja katseid määrati katsekehade niiskusesisaldus samades tingimustes iga katsekeha kolmest kohast aparaadiga FME moisture meter. Tabelis 2.1 on toodud katsekehade niiskusesisalduse tunnuse statistikud katseseeriade gruppide kaupa.

Tabel 2.1. Katsekehade niiskusesisalduse statistilised näitajad gruppide kaupa

Katsekehade grupp	Min. (%)	Maks (%)	Mediaan (%)	Keskmine (%)	Ülemine usalduspiir (%)	Alumine usalduspiir (%)	Stand. hälve (%)
KK1...KK10	9,00	12,70	11,40	11,37	11,80	10,94	0,43
KK10...KK20	9,60	13,50	11,70	11,69	12,14	11,24	0,45
KK21...KK30	9,30	16,00	11,05	11,68	12,18	11,17	0,50
KK31-KK40	9,80	17,30	12,35	12,10	12,98	11,22	0,88

Kõigi katsekehade niiskusesisalduse statistilised näitajad on toodud lisas 1.

2.2.2 Katsekehade märgistamine

Ühelõikelisi katseid sooritati kolme erineva hammastüübliga, tehes kolm katseseeriat. Kõikide katsete katsekehad märgistati tähtede ja numbrite kombinatsiooniga katse järjekorranumbri, liites kinnitina kasutatava hammastüübli tüübi ja läbimõõdu d_c alusel.

Järgnevalt on toodud katsekehade märgistamise põhimõtteskeemi selgitus ühelõikeliste katsekehade näitel.

Esimese katseseeria katsekehade KK1-C10/50...KK10-C10/50 sümbolid tähendasid järgmist:

- KK1 – katsekehade komplekt number 1;
- C10 – C10 tüüpi hammastüübel;
- 50 – hammastüübli läbimõõt $d_c = 50$ mm.

Teise katseseeria katsekehade KK11-C10/80...KK20-C10/80 sümbolid tähendasid järgmist:

- KK11 – katsekehade komplekt number 2;
- C10 – C10 tüüpi hammastüübel;
- 80 – hammastüübli läbimõõd $d_c = 80$ mm.

Kolmanda katseseeria katsekehade KK21-C1/75...KK30-C1/75 sümbolid tähendasid järgmist:

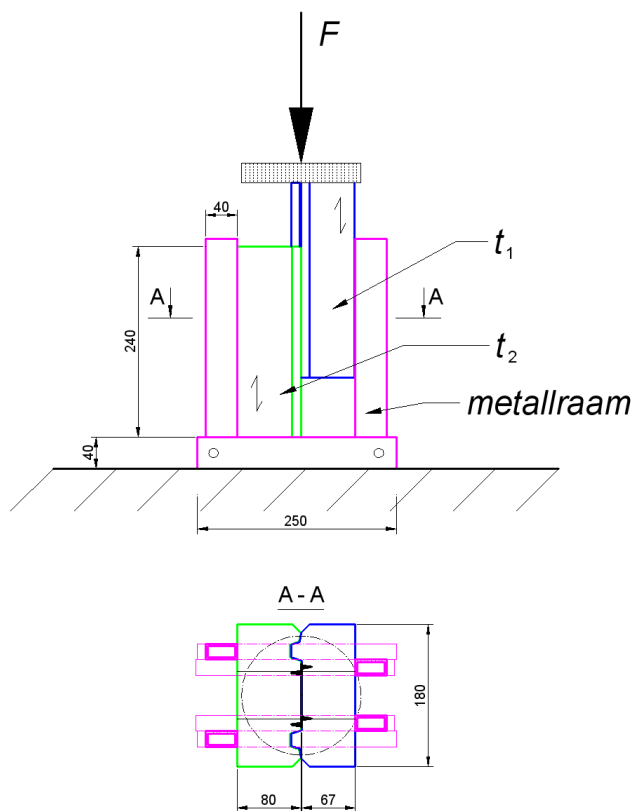
- KK21 – katsekehade komplekt number 3;
- C1 – C1 tüüpi hammastüübel;
- 75 – hammastüübli läbimõõd $d_c = 75$ mm.

Kahelõikeliste katsekehade märgistamise põhimõtteskeemi selgitus neljanda katseseeria katsekehade KK31-2xC10/50...KK40-2xC10/50 seeria esimese katsekeha näitel. Sümbolid tähendasid järgmist:

- KK31 – katsekehade komplekt number 4;
- 2x – kahelõikeline katse;
- C10 – C10 tüüpi hammastüüblid;
- 50 – hammastüüblite läbimõõd $d_c = 50$ mm.

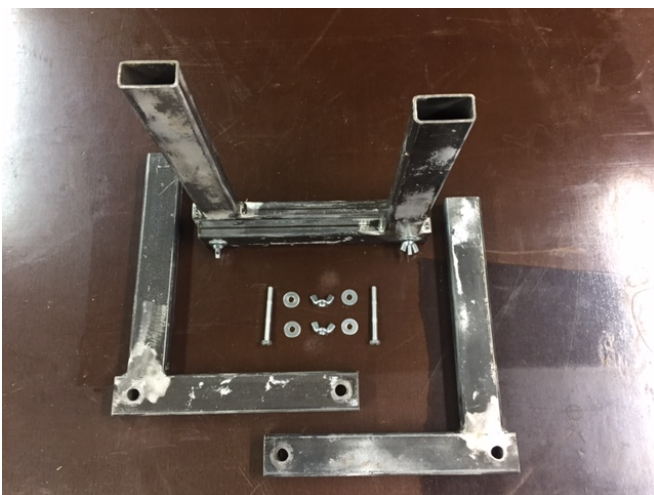
2.2.3 Ühelõikeliste katsekehade valmistamine

Palgi punni ja soone profiili kuju põhjal saadi palgi ülemisest osast liitelement, mille efektiivne paksus oli 67 mm, palgi teisest äärest lõigatud liitelement oli paksusega 80 mm. Katsetel kasutatud elemendid on kujutatud joonisel 2.2.



Joonis 2.2. Ühelõikelise katse põhimõtteskeem. Joonisel tähistatud t_1 ja t_2 on palkidest lõigatud liidetavad elemendid

Joonisel 2.2 tähistatud ja joonisel 2.3 kujutatud metallraam valmistati nelikanttorust ristlõikega $40 \times 20 \times 2$ mm.



Joonis 2.3. Ühelõikeliste katsekehade toetusraami osad

Torud keevitati omavahel kokku L-kujuliselt täisnurga all. Kaks moodustatud L-kujulist tuge ühendati omavahel poltidega. Nii tekkis tugiraamistik, mis välistas surve all katsekehade komplekti väljanõtkumist. Tänu katsekehade pinnaga võrreldes suhteliselt kitsale raamistiku toetuspinnale ei tekkinud tugiraamistiku ja katsekeha vahel arvestatavat hõõrdumist.

Katsetega uuriti kolme erineva hammastüübli kandevõimet ühelõikelisel katsel. Selleks valiti palgi vara vahele mahtuva läbimõõduga hammastüüblid – C1 tüüpi läbimõõduga $d_c = 75$ mm ning C10 tüüpi hammastüüblid läbimõõduga $d_c = 50$ mm ja 80 mm (joonis 2.4).



Joonis 2.4. Katsetel kasutatud hammastüüblid. Vasakul tüüp C1 läbimõõduga $d_c = 75$ mm, keskel tüüp C10 läbimõõduga $d_c = 50$ mm ja paremal tüüp C10 läbimõõduga $d_c = 80$ mm

Joonisel 2.4 on kujutatud katsel kasutatud erinevad hammastüüblid pealt- ja külgsuunas. Ühelõikeliste katsete jaoks valmistatud katsekehad on näidatud joonisel 2.5.

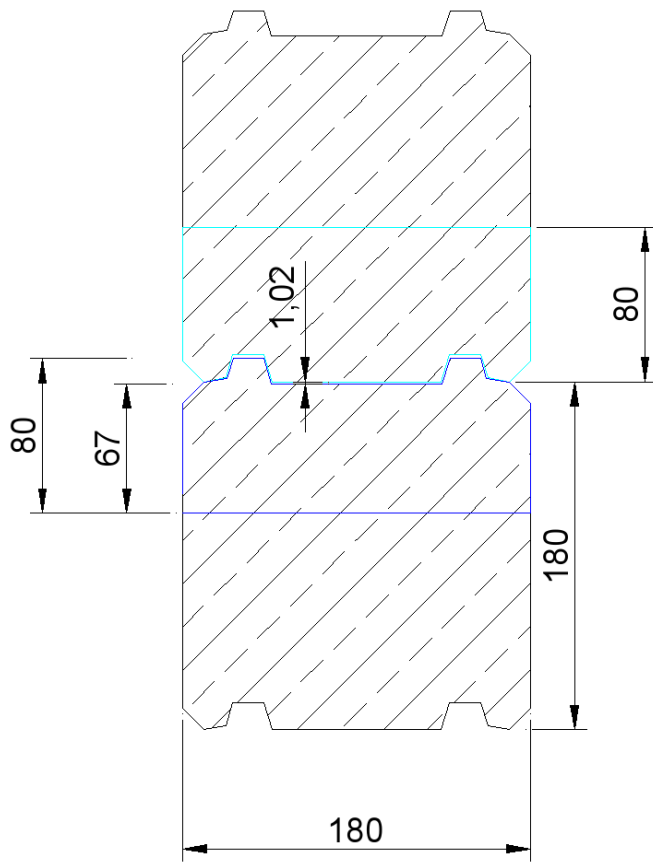


Joonis 2.5. Plankliimpuidust valmistatud seinapalkidest lõigatud katsekehad. Vasakpoolne katsekeha on lõigatud palgi ülemise poole varaga, parempoolne katsekeha on lõigatud palgi alumise poole varaga

Joonisel 2.5 kujutatud viisil on katsekehad teineteise vastas sarnases olukorras, nagu toetuvad seinapalgid horisontaalses asendis üksteise peal.

Ühelõikeliste katsete tarbeks valmistati Maaülikooli maaehituse osakonna ehituskonstruksioonide laboris kokku 30 katsekehade komplekti.

Palkide asetust tavaolukorras on täiendavalt selgitatud joonisel 2.6.



Joonis 2.6. 180 mm paksuste palkide profiili joonis

Joonisel 2.6 on kujutatud katsekehade valmistamiseks kasutatud palkide vara profiil. Samuti on joonisel värviliste joontega märgistatud katseteks lõigatud palkide osad. Palkide profiili joonisel on näha, et palgi vara punnide ja soonte vaheline osa seab ette piirid võimaliku kinniti maksimaalsele välismõõdule. Sellest lähtuti ka katsekehade komplekti moodustamisel.

Samuti jääb enamasti palkide vahele konstruktiivne ruum, kus palkide pinnad ei puutu kokku. Seetõttu oli katsekehade moodustamisel võimalik see ruum ära kasutada hammastüüblite paigaldamisel.

2.2.4 Kahelõikeliste katsekehade valmistamine

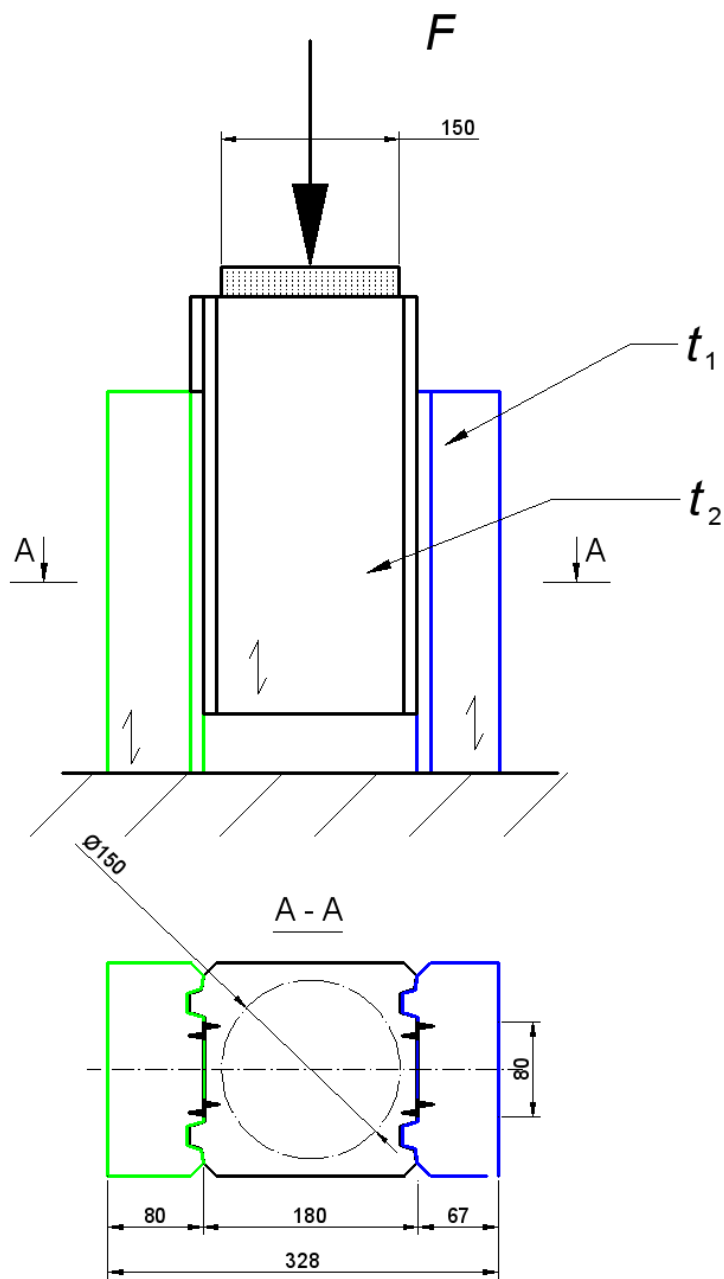
C10 tüüpi hammastüübli kandevõimet katsetati ka kahelõikeliste katsekehadega (joonis 2.7). Sarnast ühendusviisi hammastüüblitega liite moodustamiseks ei ole Eurokoodeksis üldse kirjeldatud.



Joonis 2.7. Palgist lõigatud kahelõikelise katse elemendid.

Vasakul on kujutatud palgi ülemisest osast lõigatud detaili, keskel tervest palgist lõigatud detaili ja paremal alumisest osast lõigatud detaili.

Palkide tootja käest saadud puit-puiduga liite konstrueerimisel lähtuti kinnitina kasutatavate hammastüüblite kasutamisel ettenähtud miinimum kaugust surutud otsast. Samuti seadis katsekehade komplekti moodustamisel nende maksimum mõõtudele omad tingimused ette kasutatav universaalne elektromehaaniline katsemasin Instron 3369. Joonisel 2.8 on toodud kahelõikeliste katsete põhimõtteskeem.



Joonis 2.8. Kahelõikelise katse põhimõtteskeem. Joonisel on liite välimised elemendid märgistatud värviliselt ja tähistatud t_1 , kahelõikelise liite keskmine element on tähistatud t_2

Maaülikooli maaehituse osakonna ehituskonstruktsioonide laboris valmistati kokku kümme joonisel 2.8 kujutatud katsekehade komplekti. Kahelõikelise katse katsekehade keskmine element lõigati tervest palgist sellise pikkusega, et oleks tagatud minimaalne surutud otsa pikkus. Äärmised elemendid lõigati samamoodi ühelõikelise katse tarbeks palgi ülemisest ja alumisest äärest.

2.3 Katsete tegemine ja andmesalvestus

Katsed tehti Eesti Maaülikooli metsandus- ja maehitusinstituudi puidulaboris universaalsel elektromehaanilisel katsemasinal INSTRON 3369 (joonis 2.9).



Joonis 2.9. Universaalne elektromehaaniline katsemasin Instron 3369

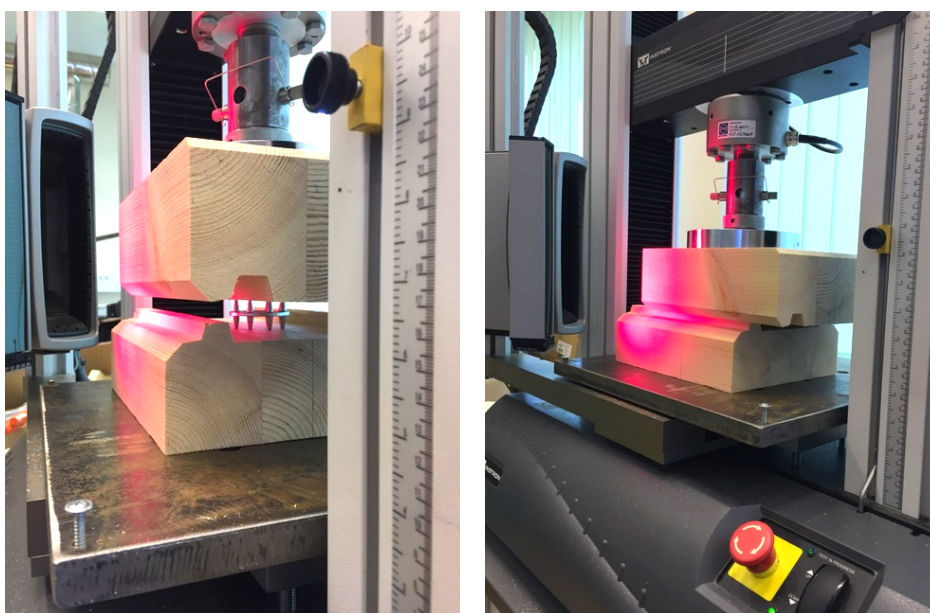
Katsemasina Instron 3369 maksimaalne lubatud koormus on 50 kN. Mõõtmisviga koormuse mõõterežiimis on $\pm 0,5\%$ mõõdetavast väärtusest. Minimaalne koormamise kiirus on 0,005 mm/min. Siirdeid mõõdeti katsemasina komplekti kuuluva kontaktivaba tensomeetriga täpsusega $\pm 0,01$ mm. Mõõtmistulemused salvestati arvutiga operatsioonitarkvaraga Bluehill.

Universaalne elektromehaaniline katseseade Instron 3369 ei võimalda katsekeha koormamist standardis EVS-EN 383:2007 kirjeldatud meetodi kohaselt. Seetõttu rakendati katsekehale etteantud väärtuse alusel konstantsel kiirusel kasvavat koormust kuni liite purunemiseni.

Erinevate katsetulemuste analüüsil on selgunud, et katsemeetodite erinevus hammastüüblitega liidete katsel ei avalda mõju keskmistele katsetulemustele (Blaß *et al.* 1993).

Väikseima hammastüübli tüübi C10/50 leitud nihkemooduli K_{ser} alusel seadistati katsemasina koormuse rakenduskiiruseks 5 kN/min.

Et leida vastuvõetav maksimaalne nihkejõud ja võrrelda seda standardis EVS-EN 13271:2002 ning Eurokoodeks 5-s kirjeldatud normatiivse kandevõime $F_{v,Rk}$ arvutustulemustega, paigaldati katsekehade vahele hammastüüblid. Joonistel 2.10 on toodud katsekehade komplekti koostamine ühelõikelise katsekeha näitel.



Joonis 2.10. Ühelõikeliste katsekehade koostamine. Vasakul hammastüübli katsekehade elementide vahele seadmine, paremal joonisel kokku pressitud katsekeha elemendid

Hammastüübel asetati ettenähtud kaugusele surutud otsast, liite elementide küljed rihiti korrektselt teineteise suhtes ühele joonele ja katsekeha elemendid suruti pressi vahel kokku.

Eurokoodeks 5 põhjal tuleb puit-puiduga liite normkandevõime määrata hammastüübli normkandevõime ja poldi normkandevõime summana.

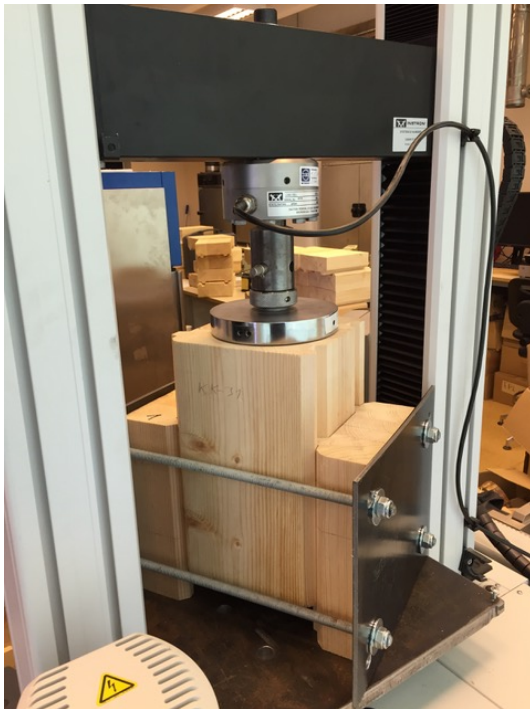
Magistritöös uuriti ainult hammastüüblite kandevõimet puit-puiduga liites, seetõttu tehti kõik katsed ilma poldita. Hammastüüblite tekitatava ekstsentrilise jõu kompenseerimiseks ja katsekehade kooshoidmiseks rakendati pitskruvidega nelikant torudest metallraamile koormus, mis takistas katsekehade üksteisest eemaldumist. Pitskruvide kasutamist illustreerib joonis 2.11.



Joonis 2.11. Pitskruvide kasutamine katsekehasid toestava metallraami kooshoidmisel

Pitskruvid toestasid metalltorust valmistatud raami, raam omakorda hoidis katsekehad katse ajal tasakaaluasendis. Pitskruvide surve tugiraamistikule oli piisav, et hoida puit-puiduga liite detailid ühelöikelisel katsel laiali vajumast. Samas tänu metallraamistiku väikesele ja siledale kokkupuute pinnale katsekehadega oli võimalik täiendav hõõrdejõud arvestamata jätta.

Kahelöikelised katsed sooritati samuti ilma katsekehasid läbistava poltühenduseta. Survekatsel fikseeriti kahelöikelised katsekehad spetsiaalselt selleks otsatabeks valmistatud terasplaatide vahele. Välimised liitelemendid toetusid katsemasina alusele, terasplaadid toestasid tagumistelt külgedelt välimisi liitelemente, takistades hammastüüblite tekitataval ekstsentrilisel survele neid üksteisest eemaldumast. Keskmine element oli liites paigaldatud äärmistest kõrgemale. Terasplaadid ja välimised kahelöikelise puit-puiduga liite elemendid toetusid katsemasina alusele. Terasplaatide neljast nurgast pandi läbi M12 terasplaadid, mis hoidsid katsekehasid katse ajal laiali vajumast. Katsekehade paigutust ja terasplaatide kinnitust on kujutatud joonisel 2.12.



Joonis 2.12. Kahelõikeliste katsekehade asetus katsemasinal

Katseseadme kontaktivaba optiline mõõtur (*Advanced Video Extensometer 2663-821*) mõõtis survekatse ajal katsekehale märgitud ja katseseadme alusele toetuvale klotsile märgitud punktide omavahelist siiret ja salvestas andmed 20 korda sekundis. Katseseadme anduritega fikseeritud andmed salvestati automaatselt Bluehilli tarkvaraga. Kogutud andmetest koostati hammastüüblite surve/siirde graafikud. Salvestatud mõõtmistulemuste alusel koostati katsekehade välise elementide 3 mm siirde juures kandevõimete maksimumväärtuste tabel (lisa 2).

2.4 Statistiline andmetöötlus

Käesoleva töö eesmärgiks oli leida puit-puiduga liites hammastüüblite kandevõime ühelõikelisel ja kahelõikelisel katsel.

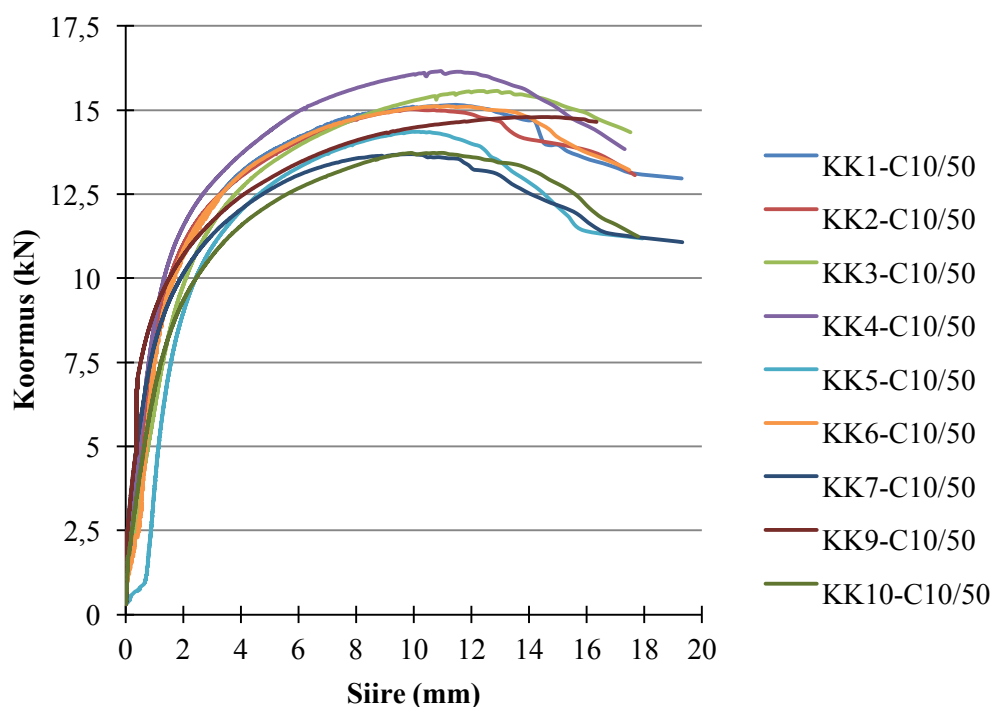
Katsemasinaga salvestatud tulemusi analüüsiti tabelarvutussüsteemis MS Excel 2010. Statistiliste näitajate leidmiseks kasutati funktsiooni *Describe Statistic*.

Katsetulemuste uurimisel koostati statistilised näitajad katsekehade niiskuse ning hammastüüblite kandevõime väärtuste miinimum -, maksimum- ja keskmiste väärtustega, samuti standard hälve ning ülemised ja alumised usalduspiirid.

3 TULEMUSTE KOKKUVÕTE JA ARUTELU

3.1 Esimene katseseeria

Esimese katseseeria puit-puiduga liite ühelõikeliste katsete tulemused C10 tüüpi hammastüüblitega läbimõõduga $d_c = 50$ mm näitasid sarnastel tingimustel tehtud teise katseseeriaga uuritud $d_c = 80$ mm läbimõõduga C10 tüüpi hammastüüblitega võrreldes vähem ühtlast kandevõimet. Joonisel 3.1 toodud graafikul on toodud katsekehadele mõjuvast jõust tekkiv siire ja hammastüüblite kandevõime.



Joonis 3.1. C10/50 tüüpi hammastüübli ühelõikeliste katsekehade tulemused

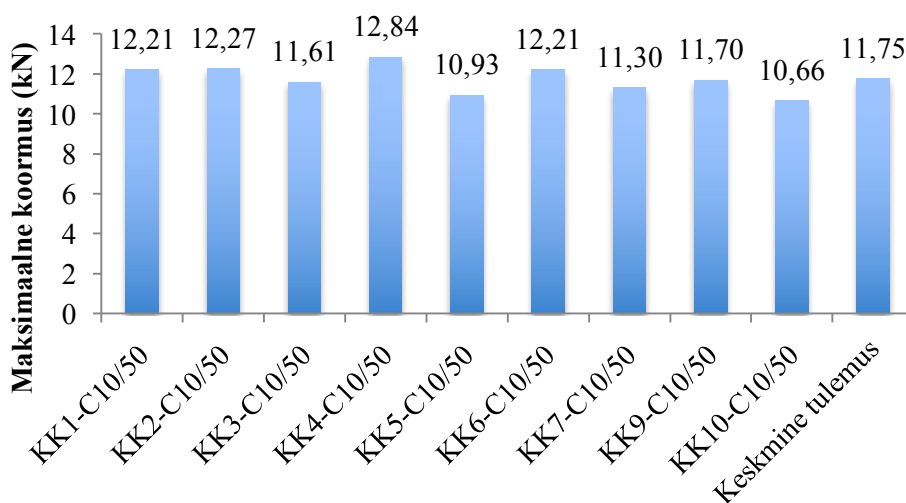
Graafikul on selgelt näha hammastüübli kandevõime lineaarne kasvamine kuni kandevõime ammendumiseni, kui algab puidukiudude plastne voolamine.

Tabelis 3.1 on toodud esimese katseseeriaga uuritud C10/50 tüüpi hammastüüblite keskmiste tulemuste statistilised näitajad.

Tabel 3.1. Esimesest katseseeriast saadud tulemuste statistilised näitajad

Statistilised näitajad	Kandevõime (kN)
Keskmine	11,75
Keskvaartuse standardviga	0,23
Järjestatud andmerea kõige keskmine väärtus	11,70
Miinumiväärtus	10,66
Maksimumväärtus	12,84
Usaldustase (95,0%)	0,54

Tabelis 3.1 on toodud kõikide esimese katseseeria katsekehade maksimaalse 3 mm siirde ulatuses mõõdetud tulemuste statistilised näitajad. Katseseeriaga uuritud iga erineva katsekehad mõõdetud tulemused on eraldi väljatoodud joonisel 3.2.

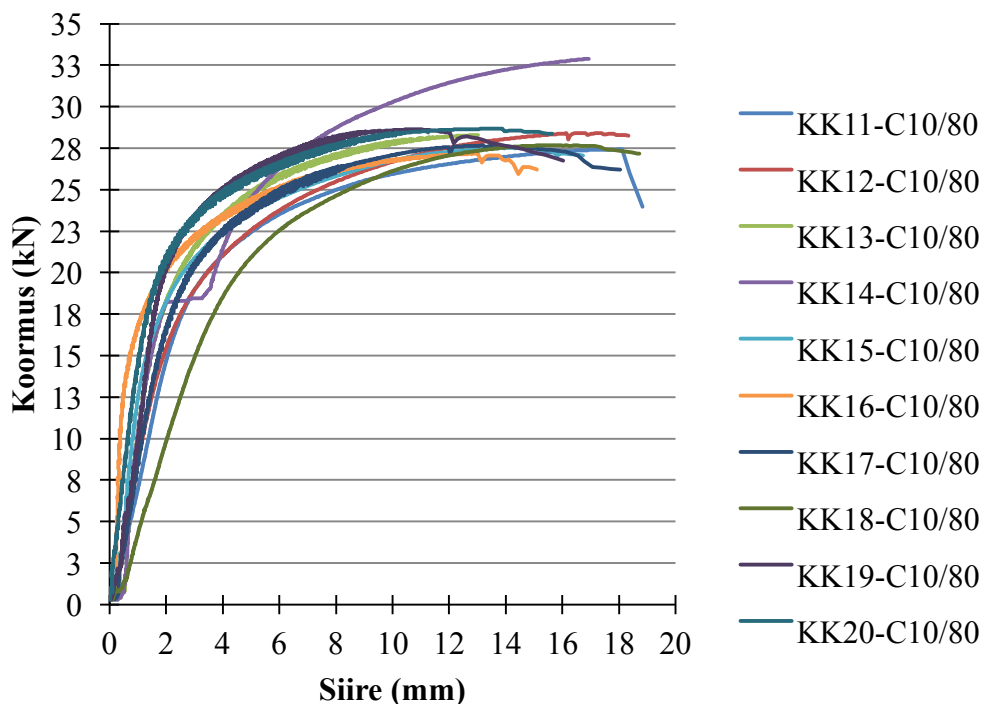


Joonis 3.2. Ühelõikelise katse tulemuste tulpdiaagramm. Katsega uuriti $d_c = 50$ mm läbimõõduga C10 tüüpi hammastüüblite kandevõimet

Minimaalse mõõdetud kandevõime tulemuse 10,66 kN ja maksimaalse mõõdetud kandevõime tulemuse 12,84 kN vahe oli 2,18 kN. See tegi tulemuste kõikumiseks $\pm 9,2\%$, mis on suhteliselt ühtlane saavutatud tulemus.

3.2 Teine katseseeria

Hammastüübliga C10/80 puit-puiduga liite ühelõikelised katsed näitasid suhteliselt ühtlast hammastüübli kandevõimet. Joonisel 3.3 on toodud graafik katsekehadele mõjuvast koormusest tulenev siire ja katsel katsetatud hammastüüblite kandevõime.



Joonis 3.3. C10/80 tüüpi hammastüübli ühelõikeliste katsekehade tulemused

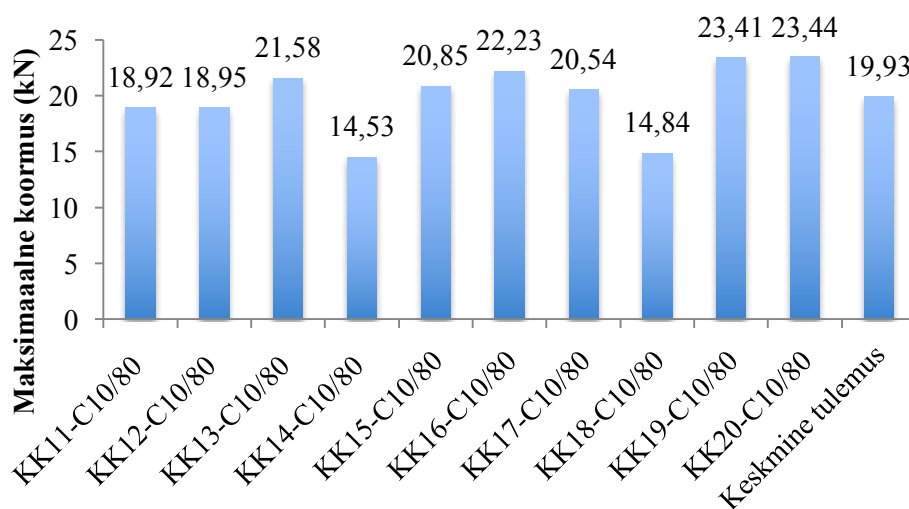
Võrreldes esimese katseseeriaga uuritud C10/50 tüüpi hammastüübliga ei toimu katse lõpus C10/80 tüüpi hammastüüblite kandevõime märgatavat langust. Vaatamata suurenevale siirdele jääb C10/80 hammastüüblite kandevõime enamasti saavutatud maksimaalse tulemuse lähedale. See näitas et ei toimunud liite järsku purunemist vaid liite elemendi jätkavad koormuse vastuvõtmist ka suhteliselt suurel siirdel.

Tabelis 3.2 on toodud teise katseseeriaga uuritud C10/80 tüüpi hammastüüblite keskmiste tulemuste statistilised näitajad.

Tabel 3.2. Teisest katseseeriast saadud tulemuste statistilised näitajad

Statistilised näitajad	Kandevõime (kN)
Keskmine	19,93
Keskvaertuse standardviga	1,00
Järjestatud andmerea kõige keskmine väärtus	20,69
Miimumväärtus	14,53
Maksimumväärtus	23,44
Usaldustase (95,0%)	2,27

Tabelis 3.2 on toodud kõikide teise katseseeria katsekehade maksimaalse 3 mm siirde ulatuses mõõdetud tulemuste statistilised näitajad. Katseseeriaga uuritud kõigi katsekehade mõõdetud tulemused on eraldi väljatoodud joonisel 3.4.

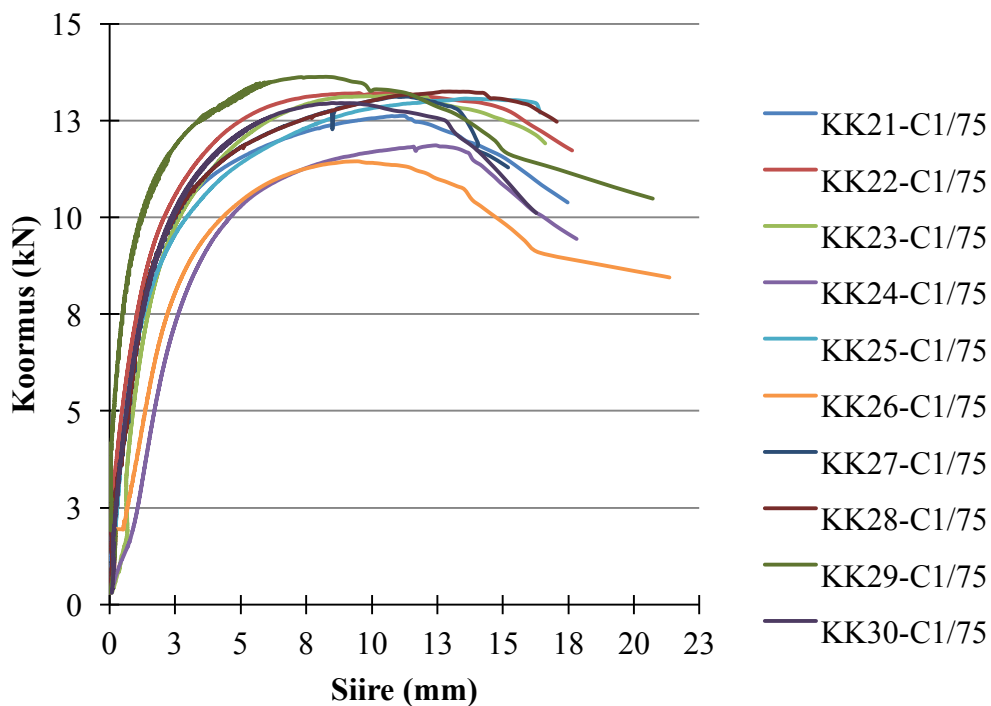


Joonis 3.4. Ühelõikelise katse tulemuste tulpdiaagramm. Katsega uuriti $d_c = 80$ mm läbimõõduga C10 tüüpi hammastüüblite kandevõimet

Minimaalse mõõdetud kandevõime tulemuse 14,53 kN ja maksimaalse mõõdetud kandevõime tulemuse 23,44 kN vahe oli 8,91 kN. See tegi tulemuste 3 mm siirde juures kõikumiseks $\pm 37,2\%$, mis oli suhteliselt suur erinevus. Selle tulemuse põhjustas arvatavasti puit-puiduga liite katsetamine ilma elemente siduva poldita.

3.3 Kolmas katseseeria

Läbimõõduga $d_c = 75$ mm C1 tüüpi hammastüübliga samadel tingimustel puit-puiduga liite ühelõikelised katsetulemused on kujutatud joonisel 3.5.



Joonis 3.5. C1/75 tüüpi hammastüübli ühelõikeliste katsekehade tulemused

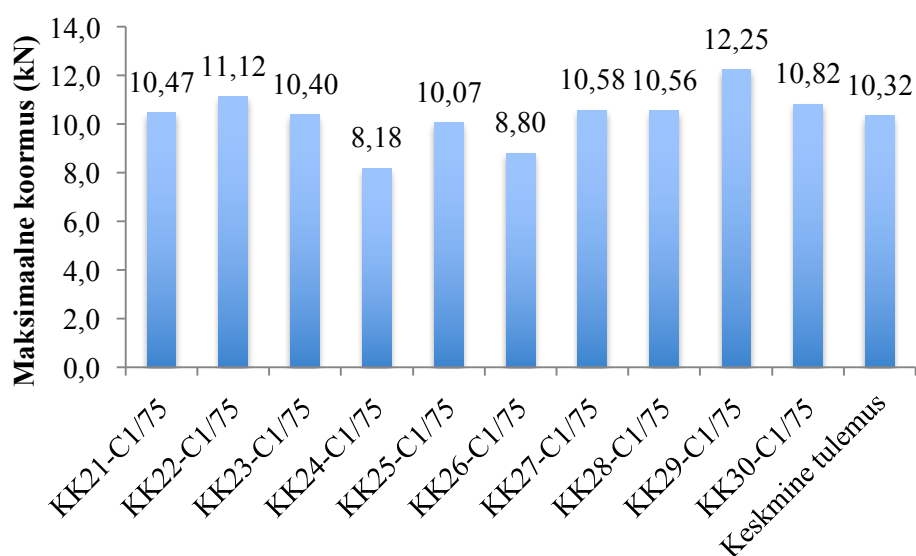
Kolmanda katseseeriaga mõõdetud hammastüüblite maksimumkandevõime väärtuste graafilised tulemused olid suhteliselt sarnased esimese katseseeria tulemuste, jäädes siiski esimese katseseeria tulemustest väiksemaks.

Tabelis 3.3 on toodud kolmanda katseseeriaga uuritud C1/75 tüüpi hammastüüblite keskmiste tulemuste statistilised näitajad.

Tabel 3.3. Kolmandast katseseeriast saadud tulemuste statistilised näitajad

Statistilised näitajad	Kandevõime (kN)
Keskmine	10,32
Keskvärtuse standardviga	0,36
Järjestatud andmerea kõige keskmine väärtus	10,51
Miimumväärtus	8,18
Maksimumväärtus	12,25
Usaldustase (95,0%)	0,82

Tabelis 3.3 on toodud kõikide kolmanda katseseeria katsekehade maksimaalse 3 mm siirde ulatuses mõõdetud tulemuste statistilised näitajad. Katseseeriaga uuritud iga erineva katsekehad mõõdetud tulemused on eraldi väljatoodud joonisel 3.6.

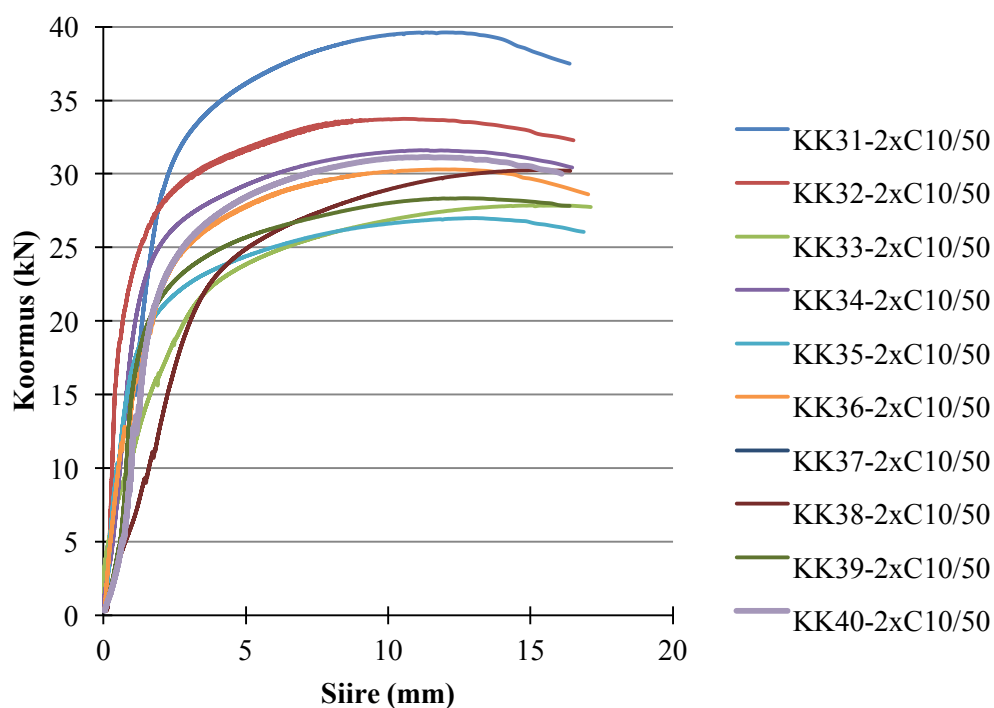


Joonis 3.6. Ühelõikelise katse tulemuste tulpdiaagramm. Katsega uuriti $d_c = 75$ mm läbimõõduga C1 tüüpi hammastüüblite kandevõimet

Minimaalse mõõdetud kandevõime tulemuse 8,18 kN ja maksimaalse mõõdetud kandevõime tulemuse 12,25 kN vahe oli 4,07 kN. See tegi tulemuste 3 mm siirde juures kõikumiseks $\pm 26,16\%$, mis oli samuti suhteliselt suur erinevus.

3.4 Neljas katseseeria

C10/50 tüüpi hammastüblitega puit-puiduga liite kahelõikeliste katsete tulemused on kujutatud joonisel 3.7.



Joonis 3.7. C10/50 tüüpi hammastübli kahelõikeliste katsekehade tulemused

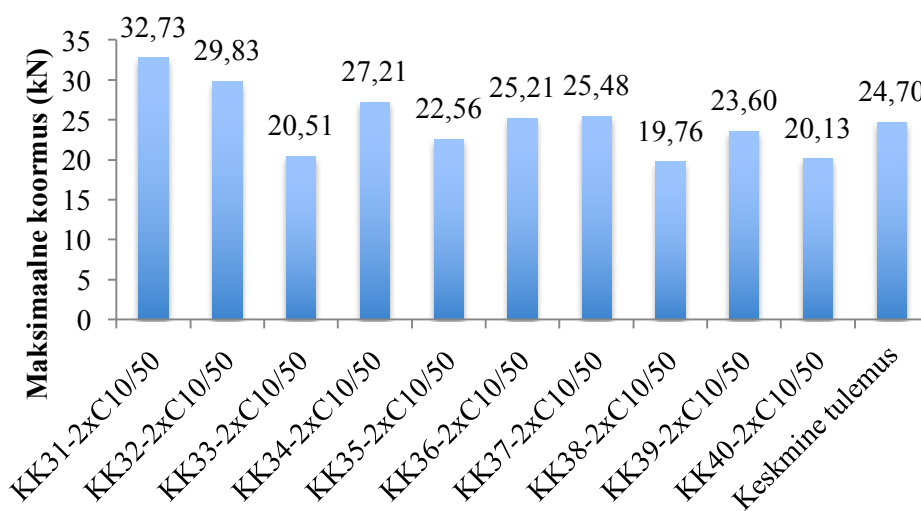
C10/50 tüüpi hammastüblitega kahelõikeliste katsete koormusdiagramm joonisel 3.7 oli kuju poolest natuke sarnane esimese katseseeria joonisega 3.1, kuid üksikute katsekehade koormused olid rohkem varieeruvad.

Tabelis 3.3 on toodud teise katseseeriaga uuritud C10/50 tüüpi hammastüblite keskmiste tulemuste statistilised näitajad kahelõikelises puit-puiduga liitel.

Tabel 3.4. Neljandast katseseeriast saadud tulemuste statistilised näitajad

Statistilised näitajad	Kandevõime (kN)
Keskmine	24,70
Keskvaertuse standardviga	1,36
Järjestatud andmerea kõige keskmine väärtus	24,41
Miinumiväärtus	19,76
Maksimumväärtus	32,73
Usaldustase (95,0%)	3,08

Tabelis 3.4 on toodud kõikide neljanda katseseeria katsekehade maksimaalse 3 mm siirde ulatuses mõõdetud tulemuste statistilised näitajad. Katseseeriaga uuritud kõigi katsekehade mõõdetud tulemused on eraldi väljatoodud joonisel 3.8.



Joonis 3.8. Kahelõikelise katse tulemuste tulppiagramm. Katsega uuriti $d_c = 50$ mm läbimõõduga C10 tüüpi hammastüüblite kandevõimet

Minimaalse mõõdetud kandevõime tulemuse 19,76 kN ja maksimaalse mõõdetud kandevõime tulemuse 32,73 kN vahe oli 12,97 kN. See tegi tulemuste 3 mm siirde juures kõikumiseks $\pm 17,67\%$, mis oli võrreldes esimese katseseeriaga suhteliselt suur, kuid jäi siiski madalamaks kui teise ja kolmanda katseseeriade tulemuste kõikumine. Vaadates

statistilist näitajat Keskväärtuse standardviga võis teha järelduse, et täpsema tulemuse saamiseks oleks pidanud tegema suurema arvu katseid.

3.5 Katsekehade purunemispiltide kirjeldamine

Katsekehade purunemispiltide uurimisel selgus et C1 ja C10 tüüpi hammastüüblite purunemispildid olid erinevad. Samuti on purunemispildid natuke erinevad ka erineva suurusega (50 mm *versus* 80 mm) samatüübiliste hammastüüblitega (C10) puit-puiduga liidetes. Kõikide katsekehade purunemispildid on toodud lisades 3, 4, 5 ja 6.

Joonisel 3.9 on kujutatud esimese katseseeria puit-puiduga ühelõikelisel katsel kasutatud C10 tüüpi hammastüüblid läbimõõduga $d_c = 50$ mm ja puitelementide tüüpiline deformeerumine katsete lõpuks.



Joonis 3.9. C10/50 tüüpi hammastüübli tüüpiline purunemispilt ja liite puitelemendi muljumine ühelõikelise katsel

Enamasti purunesid C10/50 tüüpi hammastüüblid esimesel katseseerial katsekehadele rakendatud jõu ja tekkinud liitelementide siirde tõttu mitmeks tükiks. Katsekehade puitelementidele tekkisid väljavenitatud kujuga hammastüübli jäljendid ja sügavad muljumisest tekkinud puidudeformatsioonid. Katse käigus purunenud tüübel jätkas koormuse vastuvõtmist, küll mitte enam maksimaalse väärtusega. Samas ei toimunud järsku purunemist vaid liide andis järgi.

Teise katseseeria katsetel kasutatud C10 tüüpi läbimõõduga $d_c = 80$ mm hammastüüblite ja lahti võetud liite iseloomulik väljanägemine pärast katsetamist on kujutatud joonistel 3.10.



Joonis 3.10. Teise katseseeria katsekehade tüüpiline purunemispilt. Vasakul joonisel on toodud hammastüübli C10/80 deformeerumine, paremal joonisel hammastüübli tekitatud muljumisjäljed puitelemendis

Purunemispiltide katsetel salvestatud kandevõime väärtuste analüüsi põhjal sai järeldada et isegi deformeerunud olekus olid C10 tüüpi hammastüüblid võimelisel koormust vastu võtma. Joonisel 3.12 on kujutatud C10/80 tüüpi hammastüüblid peale katsetamist ja katsetatud liidete laiali võtmist.



Joonis 3.11. Teise katseseeria C10/80 tüüpi hammastüüblid peale katseid ja uuritud puitpuiduga liite lahti võtmist

Samatüübiliste, kuid erineva suurusega hammastüüblite purunemispildid katseseeriade lõpuks olid erinevad. Selgelt oli mõistetav, et suurem tüübel suutis samadel tingimustel paremini oma kuju säilitada ja hoida sellega ka tervet liidet stabiilsemalt koos.

Kolmanda katseseeria puit-puiduga ühelõikelisel katsel uuritud C1 tüüpi hammastüüblid läbimõõduga $d_c = 75$ mm olid deformeerunud kuid nende purunemispilt erines C10 tüüpi hammastüüblite omast. Joonisel 3.12 on kujutatud kolmanda katseseeria hammastüüblite tüüpiline deformatsioonipilt.



Joonis 3.12. Kolmanda katseseeria hammastüüblite tüüpiline deformeerumine katsete lõpuks

Joonisel 3.12 on selgelt näha puidukiududega risti olevate hammastüübli hammaste mahasurumine ja nende rebenemine vaheplaadi küljest. Katsetel uuritud C1 tüüpi hammastüüblid olid läbimõõduga $d_c = 75$ mm, mis olid 25 mm suuremad kui esimesel katseseerial uuritud C10 tüüpi läbimõõduga $d_c = 50$ mm hammastüüblid. Sellegi poolest saadi nende kahe erinevat tüüpi hammastüübli katsetulemusi analüüsides samasse suurusjärku jäävad kandeväärtuste statistilised tunnused.

Suurema pindalaga C1/75 tüüpi hammastüüblite mõõdetud kandevõimete statistiline keskmine oli natuke madalam (10,32 kN) ja väiksema pindalaga C10/50 tüüpi hammastüüblite mõõdetud kandevõime statistiline keskmine oli 11,75 kN (vt lisa2).

Teise ja kolmanda katseseeria hammastüüblite purunemise üldpilt on kujutatud joonisel 3.13.



Joonis 3.13. Teise ja kolmanda katseseeria hammastüüblite katsejärgne deformatsioonipiltide võrdlus

Selgelt joonistus teise ja kolmanda katseseeria purunemispilte ja mõõdetud kandevõime statistikuid analüüsid, et C10 tüüpi hammastüüblite kõik kidad töötasid nihkejõudude vastvõtjana enam-vähem ühtlaselt. C1 tüüpi hammastüüblite puhul puidukiudude suunaga paralleelselt asetsenud hammastüüblite kidad aga lõikusid puidukiudude vahele ja liikusid puidus seda lõhestades nihkejõule väiksemat vastupanu osutades.

Neljanda katseseeriaga uuriti kahelõikelist puit-puiduga liidet. Kinnititena olid kasutusel esimese katseseeriaga samad hammastüüblid, tüüp C10, läbimõõt $d_c = 50$ mm. Katsekehade tüüpilist purunemispilti iseloomustas samuti hammastüüblite täielik deformeerumine ja osadeks lagunemine. Joonisel 3.14 on kujutatud selle katseseeria katsekehade tüüpiline purunemispilt.



Joonis 3.14. Kahelõikelise katse ühe lõike tüüpiline purunemispilt

Nagu esimese katseseeria käigus ühelõikelises puit-puiduga liitel, purunesid samasuguse mustri järgi ka neljanda katseseeria hammastüüblid kahelõikelisel puit-puiduga liitel. C10/50 tüüpi hammastüüblid purunesid mitmeks osaks, puitelementidesse pressiti piklikud hammastüüblite kidade ja vaheplaadi jäljendid.

Kuna uuriti ainult hammastüüblite vastuvõetavat maksimaalset kandevõimet, siis liites poldi puudumisel toimus ekstsentrilise koormuse tõttu katsekeha elementide lahknemine ja hammastüüblite tugev deformatsioon.

3.6 Hammastüüblite arvutuslikud normatiivsed kandevõimed

Lõputöö eesmärgis oli seatud hammastüüblite kandevõime uurimine puit-puiduga liidetes. Meid huvitas katsetatavate haamastüüblite poolt vastuvõetav maksimaalne koormus siirde juures kuni 3 mm.

Tabelisse 3.5 on koondatud hammastüüblitega ühendatud puit-puiduga liidete maksimaalse 3 mm siirde juures mõõdetud kandevõimed ja samade hammastüüblite Eurokoodeks 5 põhjal arvutatud normatiivsed kandevõimed.

Tabel 3.5. Katsetatud puit-puiduga liidete ja hammastüüblite arvutuslikud normatiivsed väärtused

tüüp	Hammastüübli		Katsetulemuste keskmine F (kN)	Erinevus (%)
	läbimõõt d_c (mm)	arvutuslik normkandeväärtus $F_{v,Rk}$ (kN)		
C1	75	11,64	10,32	-11,34
C10	50	7,43	11,75	58,14
C10	80	17,89	19,93	11,40

Katsetega määratud hammastüüblite kandevõimed 3 mm siirde juures erinevad Eurokoodeks 5 alusel arvutatud hammastüüblite normkandeväärtusest -11,34 % kuni 58,14%. C1 tüüpi hammastüüblite mõõdetud katsetulemuste statistiline keskmine kandeväärtus oli arvutuslikust normkandeväärtusest 11,34 % väiksem. Vastupidiselt olid aga mõlema C10 tüüpi katsetega uuritud tüüblite statistilised keskmised kandeväärtused arvutuslikust normatiivset kandevõime väärtusest kõrgemad. C10/80 hammastüüblite mõõdetud keskmine kandevõimes puit-puiduga liite 3 mm siirde juures ületas arvutusliku normatiivse kandevõime väärtust 58,14 % ja C10/50 11,40 %.

Katsetetulemustest analüütiliselt määratud hammastüüblite kandevõime väärtuste võrdlustabel on koondtabelina toodud lisas 2.

KOKKUVÕTE

Käesoleva magistritöö põhieesmärgiks oli uurida erinevate hammastüüblite mõju puit-puiduga liidetes ja hinnata nende rakendamise võimalust seinapalkidest peakandjate ja pärlinite ehitamisel.

Hammastüübelkinniteid on olemas 11 erinevat tüüpi ja paljudes erinevates suurustes, kuid nende kasutamist on vähe kajastatud ja uuritud. Hammastüüblid kuuluvad mehaaniliste liitmike kategooriasse. Standardites on põhjalikult käsitletud poltliidete ja metallist ümartüüblite käitumist erinevates purunemisolukordades, kuid hammastüüblite kohta on teavet ning näiteid tunduvalt vähem. Samuti ei õnnestunud autoril Geka-tüüpi (C10 ja C11 tüüpi) tüüblitega tehtud uuringute kohta vastavaid artikleid üldse leida.

Paralleelselt töötavad järeleandvad kinnituselemendid hakkavad ka ebavõrdse paigaldamistiheduse puhul puidu deformeerumisel enam-vähem võrdselt tööle. Reeglina toimub hammastüüblitega liite valmistamine ehitusplatsil, sest ei vaja eelnevat ettevalmistust tehases. Kui rõngas- ja ketastüüblid vajavad paigaldamiseks spetsiaalsete tööriistadega ettevalmistatud uurdeid, siis hammastüüblid pressitakse otse liidetavasse puitelementi.

Et hinnata erinevat tüüpi ja erineva suurusega hammastüüblite kandevõimet plankliimpuidust valmistatud puit-puiduga liidetes, valmistati katsekehad sarnaste omadustega seinapalkidest, kontrolliti katsekehade niiskusesisaldust ja kõik katsed viidi läbi konstantse koormamiskiirusega. Katsed teostati Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituudi puidulaboris universaalsel elektromehaanilisel katsemasinal INSTRON 3369. Liimpuidust seinapalkidest valmistatud katsekehad kinnitati $d_c = 75$ mm C1 tüüpi ja $d_c = 50$ mm ning $d_c = 80$ mm C10 tüüpi hammastüübliga. Kokku tehti 30 katset ühelõikelise ja 10 kahelõikeliste katsekehadega. Magistritöö raames teostati võrdlus hammastüüblitega ühendatud puit-puiduga liidete arvutatud normatiivsete ja katsetega mõõdetud kandevõimete vahel.

Erinevate hammastüüblitega tehtud katsetulemuste võrdlus näitas eritüübiliste hammastüüblite kandevõime suurt erinevust.

Katsekehade purunemispiltide uurimisel selgus, et C1 ja C10 tüüpi hammastüüblite purunemispildid on erinevad. Samuti on hammastüüblite erineva iseloomuga purunemisest tingituna ka liite katsekehade kontaktpindade purunemise pildid erinevad.

Samuti on purunemispildid natuke erinevad ka erineva suurusega (50 mm *versus* 80 mm) samatüübiliste hammastüüblitega (C10) puit-puiduga liidetes.

Paremaid tulemusi näitasid kõige suuremad kasutatud hammastüüblid, kusjuures lisaks hammastüübli välismõõdule on seinapalkide vahel kasutades olulise mõjuga ka süvistussügavus h_e , mis C10 tüüpi hammastüüblitel on olenemata tüübli enda läbimõõdust alati 12 mm. Selgelt joonistus välja katsete purunemispilte analüüsid, et C10-tüüpi hammastüüblite kõik kidad töötavad nihkejõudude vastuvõtjana enam-vähem ühtlaselt, samas kui C1-tüüpi hammastüüblite puhul lõikuvad puidukiududega paralleelsed kidad puidukiudude vahele ja nihkuvad puidus seda lõhestades nihkejõule väiksemat vastupanu osutades.

Kuna uuriti ainult hammastüüblite vastuvõetavat maksimaalset kandevõimet, siis poldi puudumisel toimus liites ekstsentrilise koormuse tõttu katsekeha elementide lahknemine ja hammastüüblite tugev deformatsioon.

Magistritöö autor soovitaks uurida sarnast puit-puiduga hammastüüblitega ühendatud liidet koos poldiga. Enamasti paigaldatakse polt läbi hammastüübli tsentri, mis autori arvates nõrgestab tunduvalt puitu hammastüübli vahetus läheduses. Seetõttu oleks soovituslik uurida liite kandevõimet poldi paigaldamisel erinevate paigalduskaugustega väljaspool hammastüüblit.

SUMMARY

The main purpose of this thesis was to study the influence that various toothed-plate connectors have on timber connections and to assess the options for using them in constructing roof trusses and purlins.

There are 11 types of toothed-plate connectors with various different sizes; however, the information on their usage is limited. Toothed-plate connectors belong to the category of mechanical connectors. The behaviour of bolt connections and metallic round connectors in various demolishing conditions has been thoroughly described; however, there is much less information available on toothed-plate connectors. Additionally, the author did not find any respective articles about studies made with Geka type connectors (of types C10 and C11).

Even when spaced unequally, the slipping fasteners operating in parallel will start to work more or less equally when timber is deforming. As a rule, the construction of connections with toothed-plate connectors takes place at the construction site, since there is no need to prepare them in the factory. When the application of split-ring connectors and shear-plate connectors requires that the plugs are prepared with special tools, then toothed-plate connectors are pressed directly into the timber element that needs to be connected.

Test objects were prepared using glulam logs with similar characteristics, their moisture content was checked and all experiments were performed at a constant loading speed, in order to study the load-carrying capacity of various types and sizes of toothed-plate connectors in timber connections made of glued laminated timber logs. Experiments were performed at the timber laboratory of the Department of Rural Building, Estonian University of Life Sciences, using the universal electromechanic testing system INSTRON 3369. Test objects made of wall logs were connected using toothed-plate connectors of type C1 with $d_c = 75$ mm and of type C10 with $d_c = 50$ mm and $d_c = 80$ mm. Altogether, 30 experiments were performed using single shear test objects and 10 experiments were performed using double shear test objects. As part of this thesis, a comparison of characteristic load-carrying capacity and experimentally determined load-carrying capacity of timber connections using toothed-plate connectors was carried out.

The comparison of experimental results of various toothed-plate connectors showed a great variation in the load-carrying capacity of different types of toothed-plate connectors.

When studying the failure patterns of test objects, it appeared that the failure patterns of type C1 and type C10 toothed-plate connectors differ. Due to the different failure characteristics of toothed-plate connectors, also the failure patterns of connection contact surfaces of the test objects were different.

Additionally, in timber connections the failure patterns of differently sized (50 mm *versus* 80 mm) but same type of toothed-plate connectors (C10) were slightly different.

Best results were obtained with the largest toothed-plate connectors, whereas in addition to the size of the toothed-plate connector, also the pointside penetration length h_e is of importance when used between wall logs, and in case of toothed-plate connectors of type C10 this is always 12 mm regardless of the diameter of the connector itself. When analysing the failure patterns, it was clearly evident that all the teeth of the toothed-plate connectors of type C10 work rather equally in receiving the shear forces, whereas in case of C1 type of toothed-plate connectors the teeth that are parallel to the grain direction cut in the grain and slide in timber with less resistance to the shear forces, causing the timber to split.

Since only the maximum acceptable load-carrying capacity of toothed-plate connectors was studied, a separation of the elements of the test object and strong deformation of toothed-plate connectors appeared due to eccentric load when there was no bolt in the connection.

The author of this thesis would recommend to study similar timber connection with toothed-plate connectors together with a bolt. Usually the bolt is inserted through the centre of the toothed-plate connector, which in the opinion of the author considerably weakens the timber in the vicinity of the toothed-plate connector. Therefore, the author recommends to study the load-carrying capacity of toothed-plate connectors upon inserting the bolt at varying spacing outside of the toothed-plate connector.

KIRJANDUSE LOETELU

1. **Allikas, L.** (1985). Puit- ja plastmasskonstruktsioonid. Tallinn: Valgus. 360 lk.
2. **Blaß, H.J., J. Ehlbeck, M Schlager.** (1993). Characteristic strength of tooth-plate connector joints. Holz als Roh- und Werkstoff, No 6 Vol. 51 pp. 395-399.
3. Timber Engineering. STEP 1. (1995). The Netherlands: Salland De Lange. 483 lk.
4. **EVS-EN 383.** (2007). Timber Structures - Test methods - Determination of embedment strength and foundation values for dowel type fasteners. Tallinn: Eesti Standardikeskus.
5. **EVS-EN 912.** (2011). Timber fasteners - Specifications for connectors for timbers. Tallinn: Eesti Standardikeskus.
6. **EVS-EN 13271.** (2002). Timber fasteners - Characteristic load-carrying capacities and slip-moduli for connector joints. Tallinn: Eesti Standardikeskus.
7. **EVS-EN 1380.** (2009). Timber structures - Test methods - Load bearing, nails, screws, dowels and bolts. Tallinn: Eesti Standardikeskus.
8. **EVS-EN 14545.** (2008). Puittarindid. Liitmikud. Nõuded. Tallinn: Eesti Standardikeskus.
9. **EVS-EN 14592:2008+A1.** (2008). Puittarindid. Liitmikud. Nõuded. Tallinn: Eesti Standardikeskus.
10. **EVS-EN 26891.** (1999). Puittarindid. Mehaaniliste kinnitusdetailidega liited. Tugevus- ja deformatsiooninäitajate määramise põhialused. Tallinn: Eesti Standardikeskus.
11. **EVS-EN 1995-1-1:2005+A1+NA+A2.** (2015). Eurokoodeks 5: Puitkonstruktsioonide projekteerimine. Osa 1-1: Üldist. Üldreeglid ja reeglid hoonete projekteerimiseks. Tallinn: Eesti Standardikeskus.

12. **Hein, R.** (2016). Tammepuidust plaatnaaglitega ühendatud liittalade katsed. (Magistritöö). Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu.
13. **Just, E., Õiger, K., Just, A.** (2015). Puit- ja puidupõhised konstruktsioonid. Tallinn: TTÜ kirjastus. 431 lk.
14. **Kersten, C.** (1926). Freitragende Holzbauten. Ein Lehrbuch für Schule und Praxis. Berlin: Verlag von Julius Springer. 742 lk.
15. **Laul, H., Aare, J., Allikas, L., Kulbach, V., Raidna, V.** (1969). Ehituskonstruktsioonide projekteerimise alused. Tallinn: Valgus. 440 lk.
16. **Masso, T.** (2012). Ehituskonstruktööri käsiraamat. Tallinn: Ehitame kirjastus. 2012. 577 lk.
17. **Porteous, J., Kermani, A.** (2013). Structural Timber Design to Eurocode 5. Oxford: Blackwell Publishing. 624 lk.
18. **Saarman, E., Veibri, U., Veermets, K., Untera, H., Peterson, P., Sibul, I.** (2006). Puiduteadus. Tartu: Eesti Metsaselts. 560 lk.
19. **Siikanen, U.** (2012). Puidust ehitamine. Tallinn: Ehitame kirjastus. 345 lk.
20. **Tuhkanen, E., Õiger, K.** (2013) The behavior of toothed-plate connectors under reversed cyclic loading. Second International Conference on Structures and Architecture. London: CRC Press. Pp. 2248-2254.

LISAD

Lisa 1. Katsekehade niiskusesisalduse tunnuste statistilised näitajad

Katsekeha	Miinumum (%)	Maksimum (%)	Mediaan (%)	Keskmine (%)	Ülemine usalduspiir (%)	Alumine usalduspiir (%)	Standardhälve (%)
KK1-C10/50	10,8	12,3	11,4	11,5	12,0	11,0	0,48
KK2-C10/50	11,0	11,9	11,2	11,3	11,7	11,0	0,33
KK3-C10/50	11,4	12,2	11,6	11,7	12,0	11,3	0,32
KK4-C10/50	11,1	12,7	12,2	12,0	12,7	11,4	0,61
KK5-C10/50	10,3	12,2	11,6	11,4	12,1	10,8	0,62
KK6-C10/50	11,9	12,5	12,2	12,2	12,4	12,0	0,22
KK7-C10/50	11,0	12,0	11,4	11,5	11,9	11,0	0,43
KK8-C10/50	9,0	10,8	10,3	10,1	10,9	9,3	0,73
KK9-C10/50	10,2	10,9	10,8	10,7	11,0	10,4	0,26
KK10-C10/50	11,3	12,2	12,0	11,9	12,2	11,5	0,33
KK11-C10/80	12,0	12,7	12,4	12,4	12,7	12,0	0,30
KK12-C10/80	9,6	10,6	10,0	10,0	10,5	9,6	0,45
KK13-C10/80	11,4	11,9	11,6	11,6	11,8	11,4	0,19
KK14-C10/80	10,9	11,6	11,3	11,3	11,6	11,0	0,25
KK15-C10/80	11,5	12,0	11,7	11,7	11,9	11,5	0,17
KK16-C10/80	10,8	12,7	12,0	11,9	12,7	11,1	0,75
KK17-C10/80	11,1	12,5	12,4	12,2	12,7	11,6	0,54
KK18-C10/80	12,0	12,5	12,3	12,3	12,5	12,1	0,16
KK19-C10/80	10,7	12,2	11,6	11,6	12,2	10,9	0,58
KK20-C10/80	11,8	13,5	12,5	12,6	13,4	11,8	0,75
KK21-C1/75	10,7	11,7	11,3	11,2	11,6	10,8	0,36
KK22-C1/75	10,7	11,6	11,1	11,1	11,5	10,8	0,33
KK23-C1/75	9,4	11,3	10,5	10,3	11,1	9,5	0,74
KK24-C1/75	10,7	11,5	11,1	11,1	11,4	10,8	0,31
KK25-C1/75	10,9	12,2	11,4	11,5	12,1	10,9	0,54
KK26-C1/75	14,7	16,0	15,8	15,5	16,0	15,0	0,50
KK27-C1/75	10,5	11,4	11,0	11,0	11,3	10,6	0,33
KK28-C1/75	11,8	15,0	13,9	13,6	14,9	12,3	1,24
KK29-C1/75	9,3	10,4	9,8	9,8	10,3	9,3	0,46
KK30-C1/75	10,2	12,1	11,1	11,1	12,0	10,2	0,87
KK31-2xC10/50	10,7	16,2	12,8	13,2	14,3	12,0	1,84
KK32-2xC10/50	10,7	14,0	12,1	12,1	12,8	11,5	1,00
KK33-2xC10/50	9,8	12,9	11,1	11,2	11,8	10,7	0,88
KK34-2xC10/50	11,4	14,5	12,9	12,8	13,4	12,3	0,85
KK35-2xC10/50	11,2	14,2	13,2	12,8	13,4	12,1	1,01
KK36-2xC10/50	10,2	11,4	10,8	10,9	11,1	10,6	0,40
KK37-2xC10/50	11,1	13,3	12,4	12,4	12,7	12,0	0,62
KK38-2xC10/50	10,9	17,3	12,4	12,9	14,2	11,6	2,06
KK39-2xC10/50	10,4	13,2	12,4	12,0	12,6	11,4	0,96
KK40-2xC10/50	11,2	13,8	13,0	11,8	14,0	9,6	0,88

Lisa 2. Katsetulemuste kandevõime tunnuste statistilised näitajad

Maksimaalselt 3 mm siirde juures määratud statistikud (kN)				
	Ühelõikelisel katsel			Kahelõikelisel katsel
Hammastüübel	C10/50	C10/80	C1/75	C10/50
Keskmine	11,75	19,93	10,32	24,7
Mediaan	11,70	20,69	10,51	24,41
Standardhälve	0,23	3,17	1,14	4,3
Miinum väärtus	10,66	14,53	8,18	19,76
Maksimum väärtus	12,84	23,44	12,25	32,73
Confidence Level (95,0%)	0,54	2,27	0,82	3,08
Ülemine usalduspiir	12,29	22,2	11,14	27,78
Alumine usalduspiir	11,21	17,66	9,51	21,62

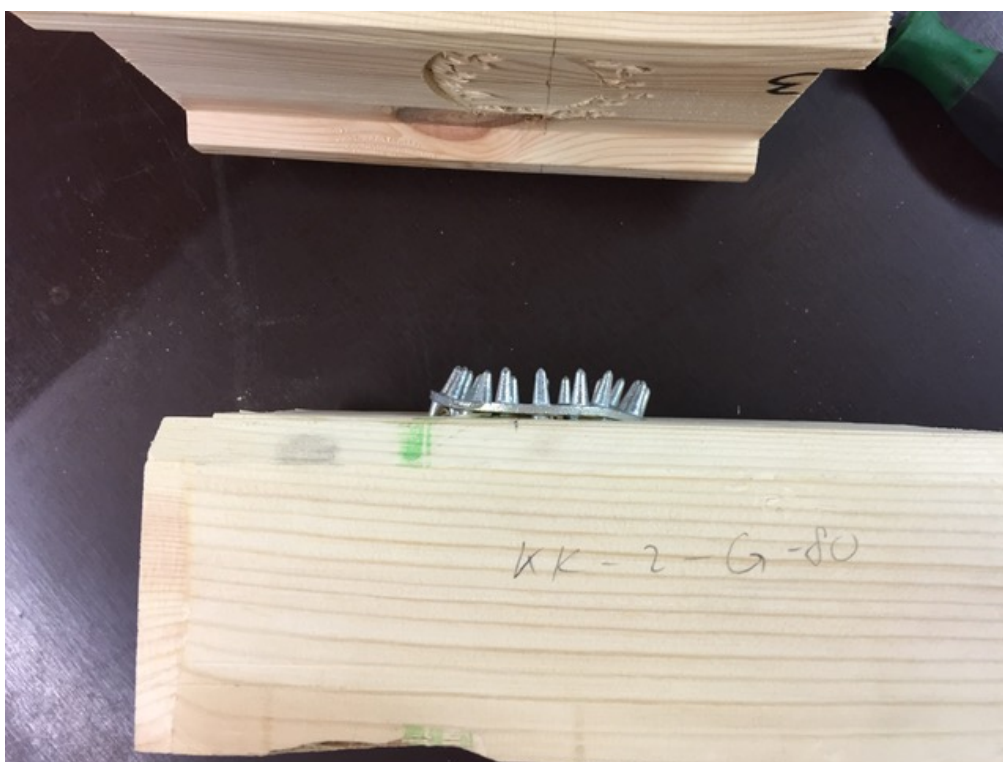
Lisa 3. Esimese katseseeria purunemispildid



L3.1. Katsekeha KK1-C10/80 hammastüübli purunemine



Joonis L3.2. Katsekehale KK1-C10/80 tekkinud hammastüübli jäljend



Joonis L3.3. Katsekeha KK2-C10/80 hammastüübli purunemine



Joonis L3.4. Katsekehale KK2-C10/80 tekkinud hammastüübli jäljend



Joonis L3.5. Katsekeha KK3-C10/80 hammastüübli purunemine



Joonis L3.6. Katsekehale KK3-C10/80 tekkinud hammastüübli jäljed



Joonis L3.7. Katsekeha KK4-C10/80 hammastüübli purunemine



Joonis L3.8. Katsekehale KK4-C10/80 tekkinud hammastüübli jäljed



Joonis L3.9. Katsekeha KK5-C10/80 hammastüübli purunemine



Joonis L3.10. Katsekehale KK5-C10/80 tekkinud hammastüübli jäljend



Joonis L3.11. Katsekeha KK6-C10/80 hammastüübli purunemine



Joonis L3.12. Katsekehale KK6-C10/80 tekkinud hammastüübli jäljed



Joonis L3.13. Katsekeha KK7-C10/80 hammastüübli purunemine



Joonis L3.14. Katsekehale KK7-C10/80 tekkinud hammastüübli jäljend



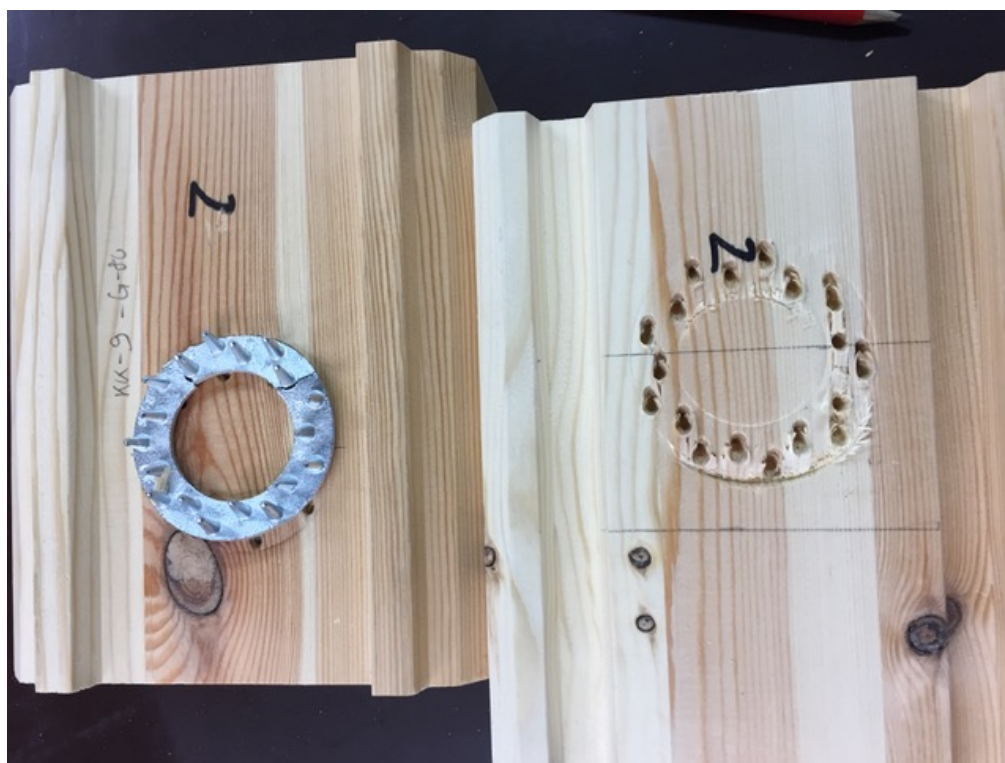
Joonis L3.15. Katsekeha KK8-C10/80 hammastüübli purunemine



Joonis L3.16. Katsekehale KK8-C10/80 tekkinud hammastüübli jäljend



Joonis L3.17. Katsekeha KK9-C10/80 hammastüübli purunemine



Joonis L3.18. Katsekehale KK9-C10/80 tekkinud hammastüübli jäljend



Joonis L3.19. Katsekeha KK10-C10/80 hammastüübli purunemine



Joonis L3.20. Katsekehale KK10-C10/80 tekkinud hammastüübli jäljend



Joonis L3.21. Katsetel kasutatud C10/80 tüüpi hammastüübli iseloomulik purunemispilt



Joonis L3.22. Katsetel kasutatud C10/80 tüüpi hammastüübli iseloomulik väändumine

Lisa 4. Teise katseseeria purunemispildid



Joonis L4.1. Katsekeha KK10-C10/50 hammastüübli purunemine



Joonis L4.2. Katsekehale KK10-C10/50 tekkinud hammastüübli jäljend



Joonis L4.3. Katsekeha KK12-C10/50 hammastüübli purunemine



Joonis L4.5. Katsekehale KK12-C10/50 tekkinud hammastüübli jäljend



Joonis L4.5. Katsekeha KK13-C10/50 hammastüüpli purunemine



Joonis L4.6. Katsekehale KK13-C10/50 tekkinud hammastüüpli jäljend



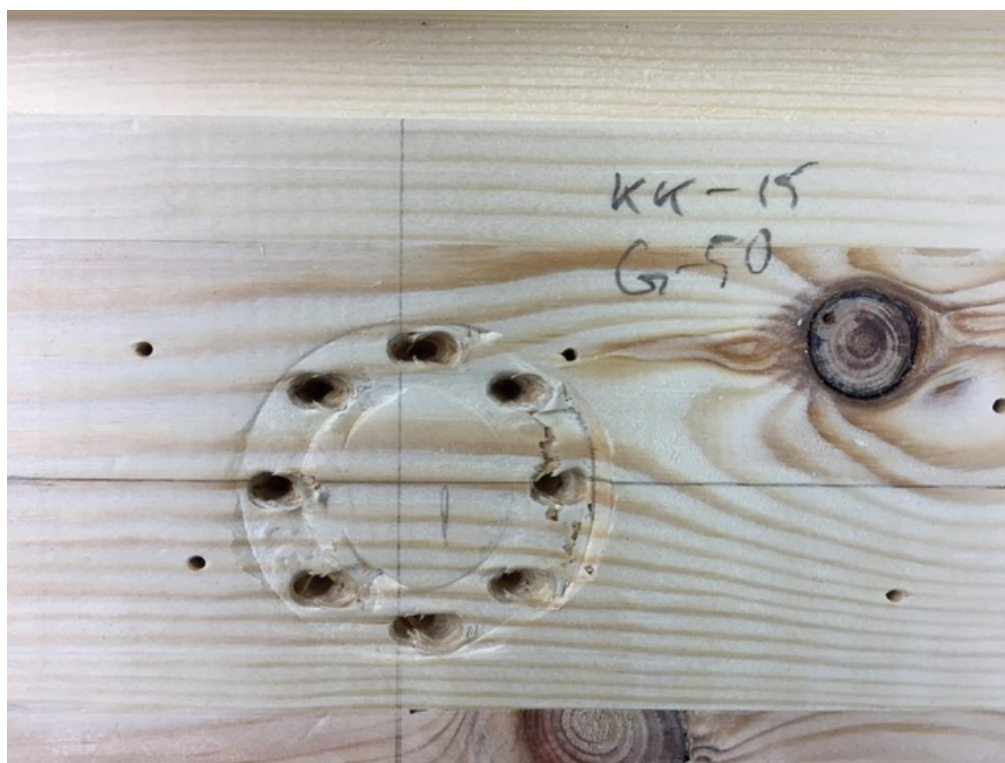
Joonis L4.7. Katsekeha KK14-C10/50 hammastüübli purunemine



Joonis L4.8. Katsekehale KK14-C10/50 tekkinud hammastüübli jäljend



Joonis L4.9. Katsekeha KK15-C10/50 hammastüübli purunemine



Joonis L4.10. Katsekehale KK15-C10/50 tekkinud hammastüübli jäljend



Joonis L4.11. Katsekeha KK16-C10/50 hammastüüpli purunemine



Joonis L14.12. Katsekehale KK16-C10/50 tekkinud hammastüüpli jäljend



Joonis L4.13. Katsekeha KK17-C10/50 hammastüübli purunemine



Joonis L4.14. Katsekehale KK17-C10/50 tekkinud hammastüübli jäljend



Joonis L4.15. Katsekeha KK18-C10/50 hammastüübli purunemine



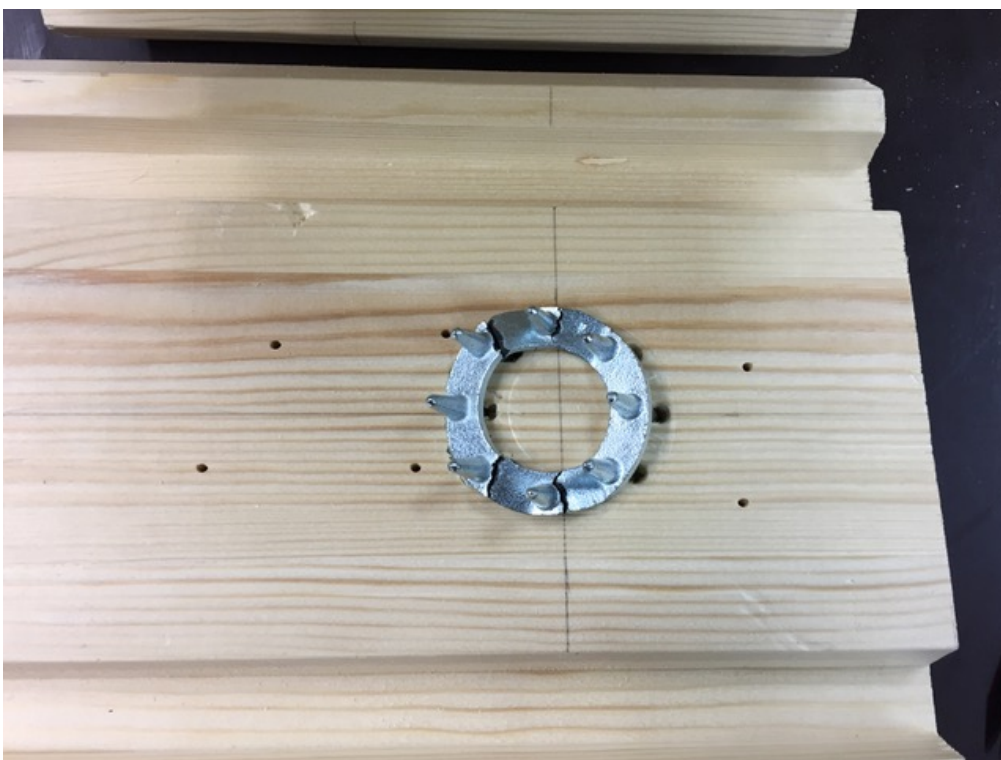
Joonis L4.16. Katsekehale KK18-C10/50 tekkinud hammastüübli jäljend



Joonis L4.17. Katsekeha KK19-C10/50 hammastüübli purunemine



Joonis L4.18. Katsekehale KK19-C10/50 tekkinud hammastüübli jäljend



Joonis L4.19. Katsekeha KK20-C10/50 hammastüübli purunemine



Joonis L4.20. Katsekehale KK20-C10/50 tekkinud hammastüübli jäljend

Lisa 5. Kolmanda katseseeria purunemispildid



Joonis L5.1. Katsekeha KK21-C1/75 hammastüüpli purunemine



Joonis L5.2. Katsekehale KK21-C1/75 tekkinud hammastüüpli jäljend



Joonis L.3. Katsekeha KK22-C1/75 hammastüübli purunemine



Joonis L5.4. Katsekehale KK22-C1/75 tekkinud hammastüübli jäljend



Joonis L5.5. Katsekeha KK23-C1/75 hammastüübli purunemine



Joonis L5.6. Katsekehale KK23-C1/75 tekkinud hammastüübli jäljed



Joonis L5.7. Katsekeha KK24-C1/75 hammastüübli purunemine



Joonis L5.8. Katsekehale KK24-C1/75 tekkinud hammastüübli jäljend



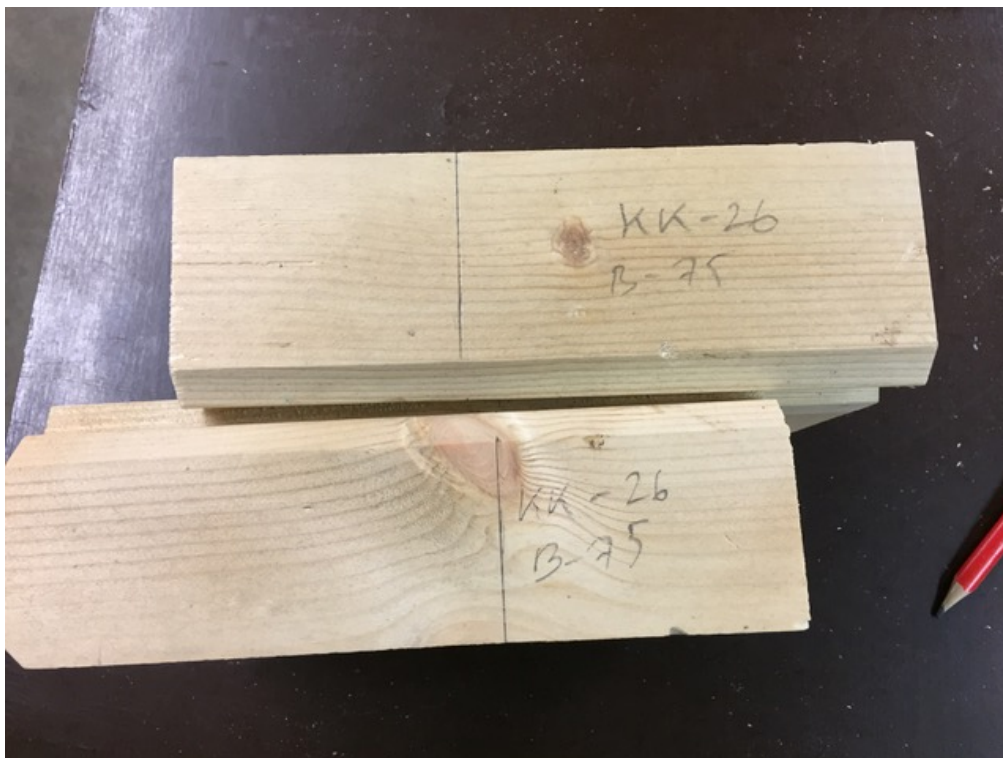
Joonis L5.9. Katsekeha KK25-C1/75 hammastüübli purunemine



Joonis L5.10. Katsekehale KK25-C1/75 tekkinud hammastüübli jäljed



Joonis L5.11. Katsekeha KK26-C1/75 hammastüübli purunemine ja jäljend vastaspoole elemendis



Joonis L5.12. Katsekehal KK26 nähtav tüüpiline tagajärg, mis tekib hammastüübli avaldatava ekstsentrilise jõu tõttu, mis läbi katse lõpuks katsekehad laiali pressiti



Joonis L5.13. Katsekeha KK27 põhjal näide elementide omavahelisest siirdest katse lõpuks



Joonis L5.14. Katsekeha KK27 lahknemine katse lõpuks



Joonis L5.15. Katsekeha KK28-C1/75 hammastüübli jäljendid katse lõpuks



Joonis L5.16. Katsekehale KK28-C1/75 tekkinud hammastüübli jäljend lähemalt. Fotol on ilmekalt näha hammastüübli kidade nihkumine pikikiudu ja kiududega rohkem risti olevate hammaste muljumise jäljend



Joonis L5.17. Katsekeha KK29-C1/75 hammastüübli purunemine



Joonis L5.18. Katsekehale KK29-C1/75 tekkinud hammastüübli jäljend



Joonis L5.19. Katsekeha KK30-C1/75 hammastüübli purunemine



Joonis L5.20. Katsekeha KK30-C1/75 hammastüübli ilmekas kidade muljumine ühel küljel



Joonis L5.21. Hammastüüblite C1/75 tüüpiline purunemispilt katse lõpuks



Joonis L5.22. Hammastüüblite C1/75 iseloomulik hammaste muljumine jõu mõjumise suunas

Lisa 6. Neljanda katseseeria purunemispildid



Joonis L6.1. Katsekeha KK31-2xC10/50 hammastüübli purunemine



Joonis L6.2. Katsekehale KK31-2xC10/50 tekkinud hammastüübli muljumise jäljend



Joonis L6.3. Katsekeha KK32-2xC10/50 hammastüübli purunemine



Joonis L6.4. Katsekehale KK32-2xC10/50 tekkinud hammastüübli muljumise jäljed



Joonis L6.5. Katsekeha KK33-2xC10/50 hammastüüpli purunemine



Joonis L6.6. Katsekehale KK33-2xC10/50 tekkinud hammastüüpli muljumise jäljend



Joonis L6.7. Katsekeha KK34-2x10/50 hammastüübli purunemine



Joonis L6.8. Katsekehale KK34-2xC10/50 tekkinud hammastüübli muljumise jäljend



Joonis L6.9. Katsekeha KK35-2xC10/50 hammastüüpli purunemine



Joonis L6.10. Katsekehale KK35-2xC10/50 tekkinud hammastüüpli muljumise jäljend



Joonis L6.11. Katsekeha KK36-2xC10/50 hammastüübli purunemine



Joonis L6.12. Katsekehale KK36-2xC10/50 tekkinud hammastüübli muljumise jäljend ja deformeerunud hammastüübel



Joonis L6.13. Katsekeha KK37-2xC10/50 hammastüübli purunemine



Joonis L6.14. Katsekehale KK37-2xC10/50 tekkinud hammastüübli muljumise jäljend



Joonis L6.15. Katsekeha KK38-2x10/50 hammastüübli purunemine



Joonis L6.16. Katsekehale KK38-2xC10/50 tekkinud hammastüübli muljumise jäljend



Joonis L6.17. Katsekeha KK39-2xC10/50 hammastüübli purunemine



Joonis L6.18. Katsekehale KK39-2xC10/50 tekkinud hammastüübli muljumise jäljend



Joonis L6.19. Katsekeha KK40-2xC10/50 hammastüübli purunemine



Joonis L6.20. Katsekehale KK40-2xC10/50 tekkinud hammastüübli muljumise jäljend



Joonis L6.21. Kahelõikelisel katsel deformeerunud C10 tüüpi hammastüüblid, läbimõõt $d_c = 50$ mm

Lisa 7. Hammastüüblitega puit-puiduga liite parameetrid

C1/75 tüüpi hammastüübli puit-puiduga liite parameetrid Eurokoodeks 5 kohaselt

- süvistussügavus h_e leitakse standardi EVE-EN 912:2011 kohaselt:

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

kus

h_c – hammastüübli paksus

t – hammastüübli vaheplaadi paksus

$$h_e = (19,5 - 1,25)/2 = 9,125 \text{ mm}$$

- välimise puitelemendi minimaalne paksus t_1 tuleb valida

$$t_1 \geq 2,25 h_e$$

$$t_1 = 2,25 \times 9,125 \text{ mm} = 20,53 \text{ mm}$$

- keskmise elemendi minimaalne paksus t_2 tuleb valida

$$t_2 \geq 3,75 h_e$$

$$t_2 = 3,75 \times 9,125 \text{ mm} = 34,22 \text{ mm}$$

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

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

$$a_{3,t} = 1,5 \times 75 = 112,5 \text{ mm}$$

Koormamata serv tabelis 2.3 toodud avaldise järgi:

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

$$a_{4,c} \geq 0,6 d_c = 0,6 \times 75 = 45 \text{ mm.}$$

Hammastüüblite tüüp C10/80 mm 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 ja keskmise elemendi minimaalne paksus t_2 tuleb valida standardi EVE-EN 13271:2001 nõuete kohaselt:

$$t_1 \geq 3 h_e \quad \Rightarrow \quad t_1 \geq 3 \times 12 \text{ mm} = 36 \text{ mm}$$

$$t_2 \geq 5 h_e \quad \Rightarrow \quad t_2 \geq 5 \times 12 \text{ mm} = 60 \text{ mm}$$

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

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

siit:

- hammastüübli tüüp C10/50 puhul:

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

- hammastüübli tüüp C10/80 puhul:

$$a_{3,t} = 2,0 \times 80 = 160 \text{ mm}$$

Koormamata serv Eurokoodeks 5 kohaselt:

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

siit:

- hammastüübli tüüp C10/50 puhul:

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

- hammastüübli tüüp C10/80 puhul:

$$a_{4,c} = 0,6 \times 80 = 48 \text{ mm}$$

Lisa 8. Hammastüüblite normatiivne kandevõime $F_{v,Rk}$

Hammastüübli tüüp C1/75 mm normatiivse kandevõime $F_{v,Rk}$ arvutusväärtus Eurokoodeks 5 kohaselt

Hammastüübli C1/75 normatiivne kandevõime $F_{v,Rk}$ valemi järgi:

$$F_{v,Rk} = 18 k_1 k_2 k_3 d_c^{1,5} = 18 \times 1 \times 0,996 \times 1 \times 75^{1,5} = 11,64 \text{ kN}$$

kus

süvistussügavusega, külgmise ja keskmise elemendi paksusega seotud teguri k_1 väärtuseks võetakse valemite 3.3 leitav minimaalne väärtus:

$$k_1 = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{t_1}{3 h_e} = \frac{67}{3 \cdot 9,125} = 2,48 \\ \frac{t_2}{5 h_e} = \frac{80}{5 \cdot 9,125} = 1,75 \end{array} \right. \Rightarrow k_1 = 1$$

poldi läbimõõdust ja plaadi tüübist sõltuva teguri k_2 väärtuseks võetakse võrratusest leitav minimaalne väärtus:

$$k_2 = \min \left\{ \frac{a_{3,t}}{1,5 d_c} = \frac{112}{1,5 \cdot 75} = 0,75 \right. \Rightarrow k_2 = 0,996$$

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

$$a_{3,t} = \max \left\{ \begin{array}{l} 1,1 d_c = 1,1 \cdot 75 = 82,5 \text{ mm} \\ 7 d = 7 \cdot 16 = 112 \text{ mm} \\ 80 \text{ mm} \end{array} \right. \Rightarrow a_{3,t} = 112 \text{ mm}$$

kui $d = 16 \text{ mm}$

puidu normtihedusega seotud teguri k_3 väärtuseks võetakse võrratusest leitav minimaalne tulemus:

$$k_3 = \min \left\{ \frac{\rho_k}{350} = \frac{350}{350} = 1 \right. \Rightarrow k_3 = 1$$

kus ρ_k on puidu normtihedus, kg/m^3

Katsekehades kasutatav puit oli C24 tugevusklassi kuuluvast puidust valmistatud plankliimpuitpalk, seega puidu normtihedus $\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$.

Hammasrüübli tüüp C10/50 mm normatiivse kandevõime $F_{v,Rk}$ arvutusväärtus Eurokoodeks 5 kohaselt

Hammasrüübli tüübi C10/50 normatiivne kandevõime $F_{v,Rk}$ on leitav eespool kirjeldatud valemiga:

$$F_{v,Rk} = 25 k_1 k_2 k_3 d_c^{1,5} = 25 \times 1 \times 0,84 \times 1 \times 50^{1,5} = 7,43 \text{ kN}$$

kus

süvistussügavusega, külgmise ja keskmise elemendi paksusega seotud teguri k_1 väärtuseks võetakse võrratusest leitav minimaalne väärtus:

$$k_1 = \min \begin{cases} \frac{t_1}{3 h_e} = \frac{67}{3 \cdot 12} = 1,86 \\ \frac{t_2}{5 h_e} = \frac{80}{5 \cdot 12} = 1,33 \end{cases} \Rightarrow k_1 = 1$$

poldi läbimõõdust ja plaadi tüübist sõltuv teguri k_2 väärtuseks võetakse võrratusest leitav minimaalne väärtus:

$$k_2 = \min \begin{cases} \frac{a_{3,t}}{2,0 d_c} = \frac{84}{2,0 \cdot 50} = 0,84 \end{cases} \Rightarrow k_2 = 0,84$$

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

$$a_{3,t} = \max \begin{cases} 1,5 d_c = 1,5 \cdot 50 = 75 \text{ mm} \\ 7 d = 7 \cdot 12 = 84 \text{ mm} \\ 80 \text{ mm} \end{cases} \Rightarrow a_{3,t} = 84 \text{ mm}$$

kui $d = 12 \text{ mm}$

puidu normtihedusega seotud teguri k_3 väärtus võetakse valemitega leitav minimaalne väärtus:

$$k_3 = \min \begin{cases} \frac{\rho_k}{350} = \frac{350}{350} = 1 \end{cases} \Rightarrow k_3 = 1$$

kus ρ_k on puidu normatiivne tihedus, kg/m^3

Katsekehades kasutatav puit oli C24 tugevusklassi kuuluvast puidust valmistatud plankliimpuitpalk, seega võime puidu normtiheduseks võtta $\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$.

Hammasüübli tüüp C10/80 normatiivse kandevõime $F_{v,Rk}$ arvutusväärtus Eurokoodeks 5 kohaselt

Hammasüübli C10/80 normatiivne kandevõime $F_{v,Rk}$ valemi järgi:

$$F_{v,Rk} = 25 k_1 k_2 k_3 d_c^{1,5} = 25 \times 1 \times 1 \times 1 \times 80^{1,5} = 17,89 \text{ kN}$$

kus

süvistussügavusega, külgmise ja keskmise elemendi paksusega seotud teguri k_1 väärtuseks võetakse valemist leitav minimaalne väärtus:

$$k_1 = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{t_1}{3 h_e} = \frac{67}{3 \cdot 12} = 1,86 \\ \frac{t_2}{5 h_e} = \frac{80}{5 \cdot 12} = 1,33 \end{array} \right. \Rightarrow k_1 = 1$$

poldi läbimõõdust ja plaadi tüübist sõltuv teguri k_2 väärtuseks võetakse võrratusest leitav minimaalne väärtus:

$$k_2 = \min \left\{ \frac{a_{3,t}}{1,5 d_c} = \frac{140}{1,5 \cdot 80} = 1,17 \right. \Rightarrow k_2 = 1$$

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

$$a_{3,t} = \max \left\{ \begin{array}{l} 1,5 d_c = 1,5 \cdot 80 = 120 \text{ mm} \\ 7 d = 7 \cdot 20 = 140 \text{ mm} \\ 80 \text{ mm} \end{array} \right. \Rightarrow a_{3,t} = 140 \text{ mm}$$

kui $d = 20 \text{ mm}$

puidu normtihedusega seotud teguri k_3 väärtuseks võetakse võrratusest leitav minimaalne tulemus:

$$k_3 = \min \left\{ \frac{\rho_k}{350} = \frac{350}{350} = 1 \right. \Rightarrow k_3 = 1$$

kus ρ_k on puidu normtihedus, kg/m^3

katsekehades kasutatav puit oli C24 tugevusklassi kuuluvast puidust valmistatud plankliimpuitpalk, seega on puidu normtihedus $\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$.

Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, Villu Melk,
Sünniaeg 04.09.1964,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö Erinevate hammastüüblitega ühendatud puit-puiduga liidete katsed, mille juhendaja on Marko Teder,
 - 1.1 salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
 - 1.2 digiarhiivi Dspace lisamiseks ja
 - 1.3 veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks kuni 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

(allkiri)

Tartu, 22.05.2017

Juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)