



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND

Ehituse ja arhitektuuri instituut

PUURNAAGLITEGA KINNITATUD SISSEFREESITUD TERASPLAADIGA CLT LIITED

SLOTTED-IN STEEL PLATE CONNECTIONS WITH SELF-PERFORATING
DOWELS IN CLT

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Martin Ojamaa

Üliõpilaskood: 176435 EAXM

Juhendaja: Eero Tuhkanen, lektor

Tallinn 2019

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“.....” 201.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 201.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri

Ehituse ja arhitektuuri instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Martin Ojamaa, 176435
Õppekava, peeriala: EAXM15/15 - Hooned ja rajatised
Juhendaja(d): Lektor Eero Tuhkanen
Konsultandid:

Lõputöö teema:

Puurnaaglitega kinnitatud sissefreesitud terasplaadiga CLT liited

Slotted-in steel plate connections with self-perforating dowels in CLT

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Analüüsida puurnaaglitega kinnitatud sissefreesitud terasplaadiga CLT liited
2. Analüüsida CLT muljumistugevust

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Katsete ettevalmis ja läbiviimine	
2.	Katseandmete töötlemine	
3.	CLT teemalise kirjanduse uuring	
4.	Katseandmete analüüs ja võrdlus teoreetiliste tulemustega	
5.	Järeldused ja kokkuvõte	

Töö keel: eesti Lõputöö esitamise tähtaeg: "28" mai 2019.a

Üliõpilane: Martin Ojamaa "....."201....a
/alkiri/

Juhendaja: Eero Tuhkanen "....."201....a
/alkiri/

SISUKORD

EESSÕNA.....	6
Lühendite ja tähiste loetelu	7
SISSEJUHATUS	9
1. ÜLDOSA	11
1.1 Ristkihtpuidust üldiselt	11
1.2 Liidetest üldiselt	12
1.3 Sissefreesitud metallplaadiga liite arvutus	14
1.4 Puidu muljumistugevus.....	16
1.4.1 CLT muljumistugevuse valemid	18
1.5 Naagli voolavuspiirile vastav paindemomendi väärtus	21
1.6 Liidete jäikus	22
2. UURIMISMETOODIKA JA KATSEKEHADE KIRJELDUS	24
2.1 Katsekehade kirjeldus	24
2.1.1 Liitekatsed	24
2.1.2 Muljumiskatsed	26
2.2 Katseseadmed.....	28
2.3 Katseteetodika	29
2.3.1 Liitekatsed	29
2.3.2 Muljumiskatsed	30
2.3.3 Naaglite tõmbe- ja paindekatsed	31
2.4 Niiskussisalduse ja tiheduse määramine	31
3. KATSETULEMUSED JA ANALÜÜS	33
3.1 Katsekehade niiskus.....	33
3.2 Katsekehade tihedus.....	34
3.3 Naaglite tõmbe- ja paindekatsed.....	35
3.4 Muljumistugevus.....	36
3.4.1 Katsetulemuste võrdlus Blaß ja Uibel valemitega	39
3.5 Liitekatsed	41
3.5.1 Kõieefekti ja naagli voolavuspiiri mõju kandevõimele	43
3.6 Liitekatsete võrdlus Johansen'i valemitega	46
3.6.1 Kandevõime kasutades katselist M_y ja arvutatud f_h väärtusi	47

3.6.2 Kandevoime kasutades katselist M_y ja f_h väärtusi	48
3.7 Liidete jäikus	49
KOKKUVÕTE	53
SUMMARY	55
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	57
LISAD	58
Lisa 1. Liitekatsekehade tähistused.....	59
Lisa 2. Muljumiskatsete tulemused.....	60
Lisa 3. Liitekatsete tulemused	64
Lisa 4. Liitekatsete koondgraafik.....	66

EESSÕNA

Käesoleva magistritöö eesmärgiks on sissefreesitud metallplaadiga ristkihtliimpuidu liite kandevõime ja jäikuse katseline hindamine. Lisaks analüüsitakse kandevõimet mõjutavaid parameetreid ning võrreldakse tulemusi üldtunnustatud arvutusmudelitega.

Siinkohal soovib autor tänada lõputöö juhendajat, Eero Tuhkaneni, kellega koostöös viidi läbi katsed ja kes organiseeris katsetamiseks vajalikud tingimused ning panustas igakülgset käesoleva töö valmimisse. Tänuavaldused Peetri Puit OÜ-le, kes valmistasid katsekehad, ja ettevõtetele Rotho Blaas ning SFS-Intec kes tarnisid kinnitusvahendid.

Lühendite ja tähiste loetelu

Mõisted

Deformatsioon – keha osakeste vastastikuse asendi muutus, mis tingivad selle keha kuju ja mõõtmete muutuse

Jäikus – keha võime koormuse all vastu panna kuju ning mõõtmete muutumisele ehk deformeerumisele

Jäikussein – vertikaalne kandekarkassi element horisontaalkoormuse vastu võtmiseks

Lamell – hõõveldatud ning sõrmjätkatud materjal liimpuitelemendi tootmiseks

Plastne deformatsioon – jääkdeformatsioon, mis ei kao täielikult pärast välisjõudude lakkamist

Puurnaigel – metalli ja puidu vahelise liite teostamiseks välja töötatud naigel, mis ei vaja kummagi materjali läbistamiseks ettepuurimist

Ristkihtliimpuit (CLT) (ingl k *cross laminated timber*) – puidust konstruktsioonimaterjal, mis koosneb vähemalt kolmest omavahel risti, 90° nurga all, paigutatud kihist, millest vähemalt kaks kihti on puidust

Siire – üleminek ehk punkti paigutis

Tähised

Ladina suured tähed

$E_{0|90}$ – puidu elastsusmoodul paralleelselt (0) või risti (90) kiudu

F – koormus, jõud

F_{max} – maksimaalne koormus

$F_{v,Rk}$ – kinnituselemendi ühe nihkepinna normkandevõime

K – jäikus

K_{ser} – liite nihkemoodul

K_u – hetkeline liite nihkemoodul kandepiiriseisundis

$M_{y,Rk}$ – kinnituselemendi voolupiirile vastava momendi normväärtus

Ladina väiketähed

d – diameeter, läbimõõt

f_u – naagli tõmbetugevus

f_y – naagli voolavuspiir

f_h – puidu muljumistugevus

t – paksus

Kreeka tähed

ρ – puidu tihedus

ρ_k – puidu normtihedus

ρ_{mean} – puidu tiheduse keskväärtus

ρ_{12} – 12% niiskusele taandatud puidu tihedus

SISSEJUHATUS

Ristkihtliimpuit (ingl k Cross-Laminated Timber, CLT) on tänapäeval järjest rohkem kasutust leidv ehitusmaterjal. Tegemist on tehasetingimustes toodetud tasapinnalise elemendiga, mida saab kasutada kandva konstruktsioonina kõikides hoona osades. Puitkarkasshoonete puhul kasutatakse CLT paneele jäigastava elemendina ja sellisel juhul tuleb tähelepanu pöörata jäikusseina kinnitamisele aluskonstruktsioonile. Valikus on erinevaid terasnurgikuid ja naelutusplaate, mille eeliseks on paigaldamise lihtsus, kuid koormuse ülekandmine aluskonstruktsioonile on ekstsentriline ning kinnitite deformatsioonide tõttu on kogu liite efektiivsus väiksem.

Eelnevalt nimetud probleemi vältimiseks on võimalik kasutada sissefreesitavaid, ettepuuritud naaglitega metallplaate. Selline lahendus on levinud liimpuittalade kinnitamiseks, sest see võimaldab koormust edasi kanda tsentriliselt. Samas nõuab selline liide tootmisel ja ehitamisel suurt täpsust, et paigaldamisel augud metallplaadis ja puidus ühtiksid. Lahenduseks on isepuurivate naaglite kasutamine, mis ei vaja ettepuuritud auke kummaski elemendis ja seetõttu on kogu protsess lihtsam.

Käesoleva lõputöö eesmärk on ristkihtliimpuitu sissefreesitud metallplaadiga ja isepuurivate naaglitega kinnitatud liidete tugevus- ja jäikusomaduste määramine. Katseid teostati vastavalt standardile EN 26891:1999, erinevate arvu naaglitega ning välimiste lamellidega 0 ja 90 kraadise nurga all. Lisaks määrati eraldi katsetega naaglite muljumistugevus ristkihtliimpuidus vastavalt standardis EN 383:2003 kirjeldatud meetodile. Liitekatsete tulemusi võrreldi K. W. Johanseni liitekandevõime valemitega ja muljumiskatseid Blaß & Uibel [1] väljapakutud empiirilise mudeliga. Naaglitele määrati katseliselt voolavusmomendi ja tõmbetugevuse väärtus, mida võrreldi standardi EN-1995-1-1 valemitega. Lõputöös uuritavad liited olid üheks osaks täismõõdus CLT jäikusseina omaduste uurimisest.

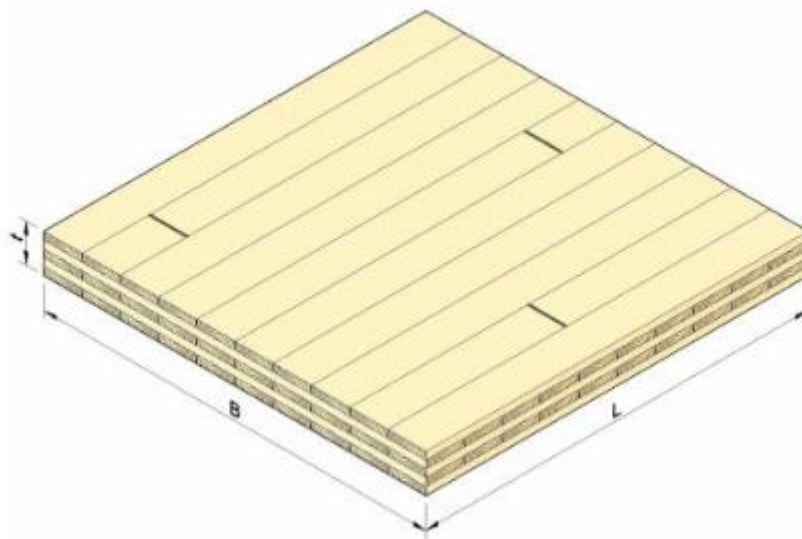
Kinnitusvahenditeks valiti kaks Euroopas enimlevinud naaglitüüpi: SFS-Intec WS – sile, läbimõõt 7 mm, eraldi puurotsaga ja keere ühes otsas; ning Rotho Blaas SBD – 7,5 mm läbimõõduga, spetsiaalse puurotsaga ja keere mõlemas otsas.

Käesoleva lõputöö põhiosa on jaotatud kolmeks. Esimeses jaotises keskendutakse olemasolevate andmete, teoreetiliste valemite ja materjaliomaduste kirjeldusele. Teises osas kirjeldatakse kasutatud katsemeetodeid ning vastavaid standardeid. Viimases kolmandikus esitatakse kokkuvõtte katsetulemustest ning võrreldakse neid arvutatud väärtustega.

1. ÜLDOSA

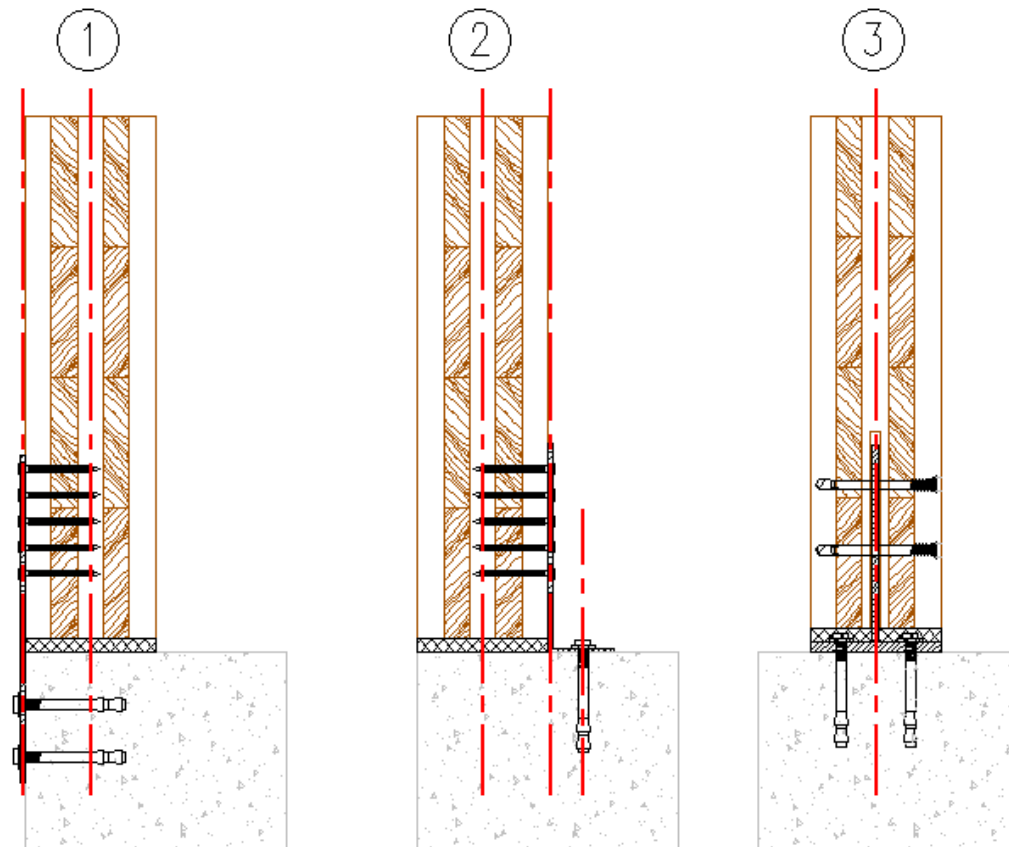
1.1 Ristkihtpuidust üldiselt

Ristkihtpuit (CLT - inglise keeles Cross Laminated Timber, edaspidi CLT) on puidupõhine ehitusmaterjal mis koosneb omavahel vaheldumisi risti olevatest paaritust arvust laudade kihtidest (vt Joonis 1.1). Kihid ühendatakse omavahel tavaliselt liimimise teel, aga kasutatakse ka puidust naaglite ja alumiiniumist naeltega mehaanilist kinnitamist. Ristuvad kihid tagavad plaadi väga hea stabiilsuse ja vastupidavuse niiskuse muutumisest tingitud deformatsioonidele. [2, p. 117]



Joonis 1.1. Ristkihtpuidu skeem [3]

CLT paneele kasutatakse nii hoone kandvates kui ka mittekandvates konstruktsioonides (seinad, vahelaed, katused). Paneelide tootmine toimub kontrollitud tehasetingimustes ja see võimaldab CNC masinate abil lõigata välja kõik vajalikud avaused ning elektripaigalduseks vajalikud sooned ja pesad. Ehitusplatsil teostatakse elementide omavahelised ühendused tavaliselt kruvidega ja aluskonstruktsiooni kinnitamiseks kasutatakse erinevaid nurkraudasid või kinnitusplaate. Järgnevalt on kujutatud enimkasutatavad CLT paneelide kinnituse lahendused ja punase kriipsjoonega on neile märgitud elementide tsentrid (vt Joonis 1.2).



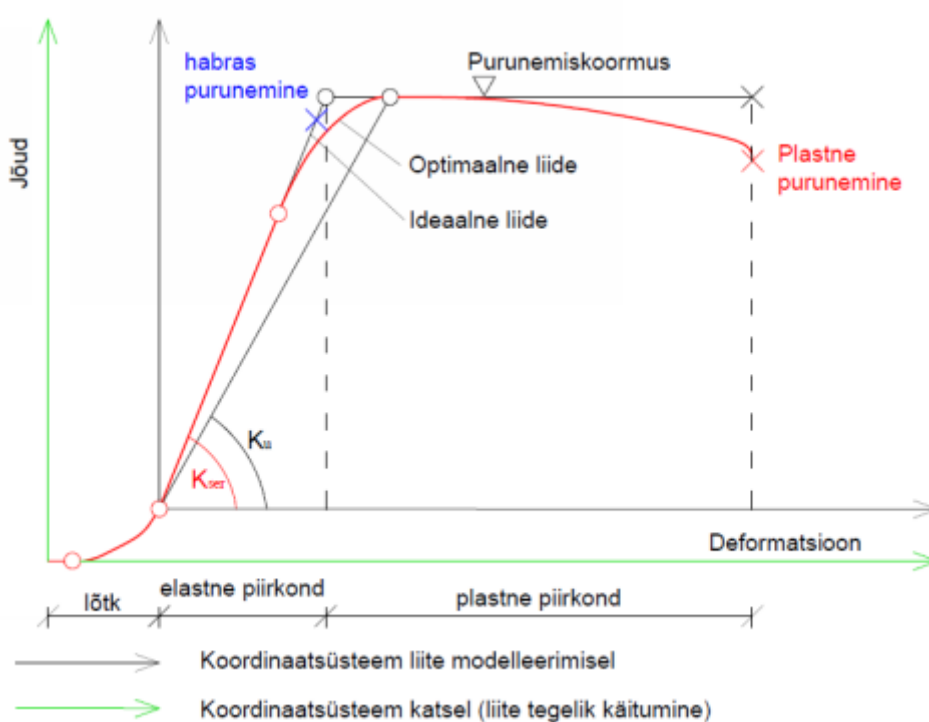
Joonis 1.2. CLT paneeli kinnitus vundamendile: 1. metallplaadiga; 2. terasnurgikuga; 3. sissefreesitud terasplaadiga

Kinnitusvariantide 1 ja 2 puhul toimub jõudude ülekandumine eksentriliselt, mis tekitab kinnitites lisapingeid ja deformatsioone, vähendades sellega liite efektiivsust. Käesolev lõputöö keskendub kolmandale lahendusele, mille puhul kasutatakse CLT paneeli sissefreesitud soonde paigaldatud terasplaati. Kinnitamine toimub puurotsaga naaglite abil ja koormus kantakse üle tsentriliselt.

1.2 Liidetest üldiselt

„Puitkonstruktsioonide kandevõime ja deformatsiivsus olenevad suuresti elementide ühendustest. Liited võivad töötamise iseloomu järgi olla kas jäigad või järeleandvad. Jäiga ühenduse puhul võib ühe detaili habras purunemine otsustada kogu liite saatus. Paljude paralleelselt töötavate sidemetega deformeeruv liide (nt naelliide) on palju töökindlam: taolise liite deformeerudes hakkavad kinnitid enam-vähem võrdset tööle“. [4]

Järgnevalt on kujutatud liite jõu-deformatsiooni graafik, kus välimine teljestik kajastab liite tegeliku käitumist ja sisemine järgi toimub liite arvutusparameetrite määramine arvutusmudelis (vt Joonis 1.3). Osade kinnititüüpide puhul on juba paigaldamise hetkel sees lõtk, millega tuleb ka kalkulatsioonides arvestada. Lõtkuga elementide puhul toimuvad esimesed deformatsioonid suhteliselt väikese jõu juures, kuni kinnitusvahend on täielikult vastu puitu surutud. Seejärel jõu suurenedes toimub deformatsioonide lineaarne kasvamine. Hapra liite puhul toimub jõu ja deformatsiooni suurenemine kuni purunemiseni, ilma eelnevalt märgatavate deformatsioonideta. Plastse liite puhul saavutatakse purunemiskoormus, pärast mida liide ei suuda rohkem jõudu vastu võtta, kuid see ei purune ning deformatsioonid suurenevad kuni plastse purunemiseni.



Joonis 1.3. Ühe kinnitusdetaili jõu–deformatsiooni diagramm, kus K_{ser} on nihkemoodul

kasutuspiirseisundis ja K_u nihkemoodul kandepiirseisundis [5]

Liite jäikust iseloomustab elastse piirkonna lineaarse osa tõus, mida tähistakse kasutuspiirseisundis K_{ser} . Kandepiirseisundis on selle väärtuse tähisteks K_u ning see näitab tõusu purustava koormuseni [5].

Puitkonstruktsioonide liited on soovituslik projekteerida selliselt, et purunemine toimuks pärast plastsete deformatsioonide tekkimist, kuid oleksid samas ka võimalikult efektiivsed. Puidu enda purunemine tõmbele on rabe, seega konstruktsiooni kui terviku purunemiskiiski saab mõjutada kinnitusvahendi ja -viisi abil.

1.3 Sisefreesitud metallplaadiga liite arvutus

Ristkihtliimpuitu sisefreesitud metallplaadi kasutamisel mõjub naaglis löikejõud ja selle ühe nihkepinna kandevõime arvutamiseks kahelõikelise liite korral võib kasutada K. W. Johanseni poolt väljapakutud valemeid (1.1), millest määravaks saab väikseim tulemus [6].

$$F_{v,R} = \min \begin{cases} f_h * t_1 * d & (f) \\ f_h * t_1 * d * \left[\sqrt{2 + \frac{4 * M_{y,R}}{f_h * d * t_1^2}} - 1 \right] & (g) \\ \sqrt{4 * M_{y,R} * f_h * d} & (h) \end{cases} \quad (1.1)$$

kus $F_{v,R}$ – liite ühe nihkepinna normatiivne kandevõime, N;

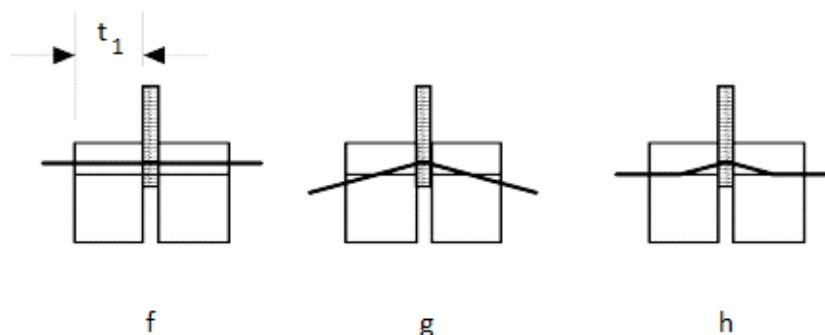
f_h – puitelemendi norm-muljumistugevus, N/mm²;

t_1 – äärmise puitelemendi vähim paksus või süvistussügavus, mm;

d – kinnituselemendi läbimõõt, mm;

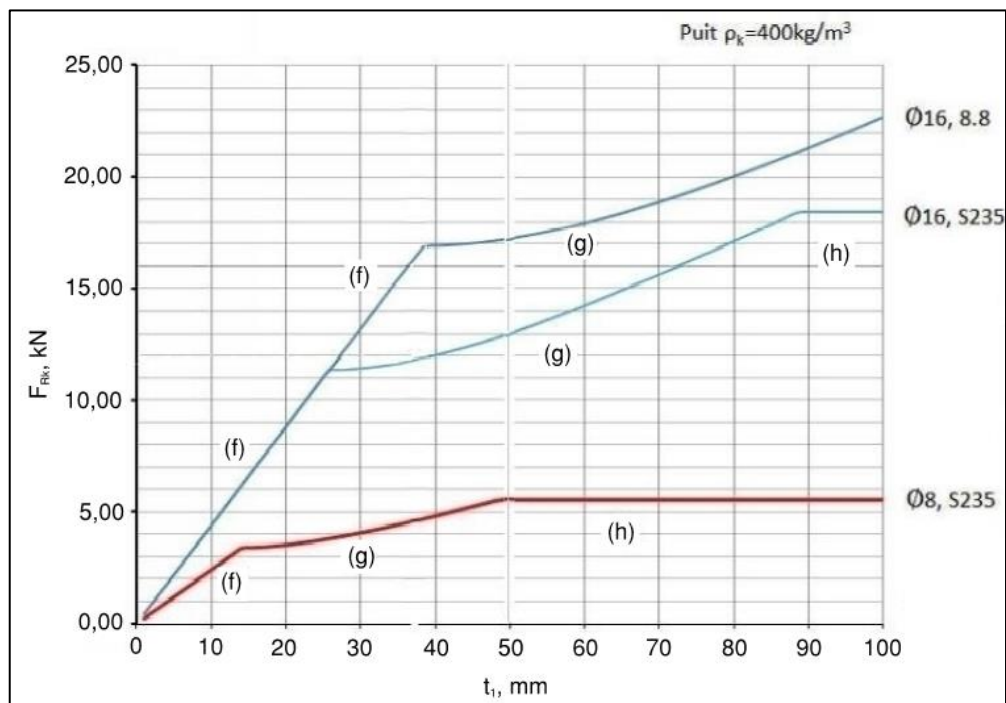
$M_{y,R}$ – kinnituselemendi voolavuspiirile vastav momendi normväärtus, Nmm.

Valemis (1.1) esitatud kolm arvutust tähistavaid liite erinevaid purunemise variante. Esimesel juhul (f) saab määravaks puitelemendi muljumistugevus. See on üldiselt määrav õhtuseseinaliste puitelementidega või suurema läbimõõduga naaglite puhul. Valemi (g) puhul tekib paindemomendi mõjul naaglis plastne liigend ja samal ajal muljutakse puitu. Viimase purunemisiivi (h) korral tekib kinnitusvahendis paindemomendi mõjul naagli ühes lõikes kaks plastset liigendit ja samuti puidu muljumine. Järgneval joonisel on kujutatud igale valemile vastav purunemisiivis (vt Joonis 1.4).



Joonis 1.4. Teras-puiduga liidete purunemisiivisid [7]

Alloleval graafikul on kujutatud sama puidu tiheduse juures kolme erineva naagli kandevõime ja purunemisviisid, olenevalt puitelemendi paksusest (vt Joonis 1.5). Kandevõime arvutamiseks on kasutatud valemit (1.1).



Joonis 1.5. Purunemisviisid vastavalt naagli tüübile ja puitelemendi paksusele

Graafikult selgub, et sama puitelemendi paksuse juures on naagli läbimõõdu ja tugevusklassi valikuga võimalik mõjutada liite kandevõimet ning purunemisviisi.

Purunemisviiside (g) ja (h) puhul saab lisaks arvestada köieefekti tekkimisega ja sellisel juhul lisanduks valemile üks liidetav liige $F_{ax,Rk}/4$. See tähendab, et liite kandevõimet võib suurendada neljandiku kinnituselemendi teljesuunalise väljatõmbe normkandevõime võrra. Kasutatava suuruse piirväärtuseks erinevate kinnitusvahendite puhul on [7]:

- ümarnaelad 15%
- ruut- ja soonilised naelad 25%
- muud naelad 50%
- kruvid 100%
- poldid 25%
- naaglid 0%

Protsendid näitavad kui suures ulatuses on lubatud löikekandevõimet suurendada köieefekti arvelt. Kui kinnitusvahendi väljatõmbe kandevõime ei ole teada, siis ei tohi köieefektiga arvestada ja selle väärtuseks võetakse null [7].

Lisades eelnevalt kirjeldatud liige valemisse (1.1), saab valem kuju (1.2):

$$F_{v,R} = \min \begin{cases} f_h * t_1 * d & (f) \\ f_h * t_1 * d * \left[\sqrt{2 + \frac{4 * M_{y,R}}{f_h * d * t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (g) \\ \sqrt{4 * M_{y,R} * f_h * d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (h) \end{cases} \quad (1.2)$$

kus $F_{ax,Rk}$ – kinnituselemendi teljesuunaline väljatõmbe normväärtus, N.

Standardis Eurokoodeks 5 [7] esitatud valem erineb mõnevõrra ülaltoodust – viimase valemi kordaja on erinev ning muljumistugevuse puhul kasutatakse karakteristliku väärtust, mitte keskvärtust. Valemi modifikatsioonid võtavad arvesse puidu ja terase erinevat osavarutegurit [2, p. 357]. Kuna käesolevas töös tegeletakse katsete analüüsiga, siis kasutatakse valemit (1.2) ning puidu muljumistugevuse keskvärtust.

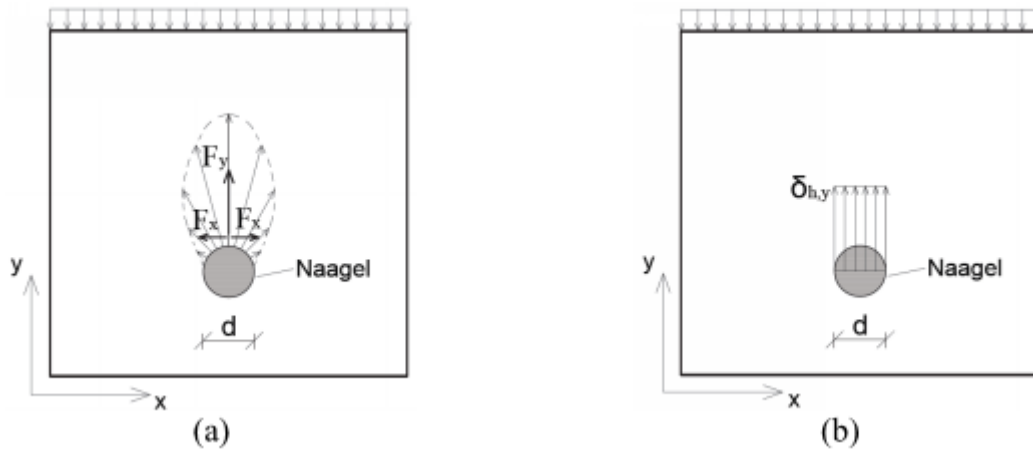
Naagelliited on üldjuhul siledad ning nende teljesuunalise väljatõmbekandevõime väärtus hüljatavalt väike. Seetõttu naagelliidetes köieefekti mõju arvesse ei võeta. Kuna aga puurnaaglitel on mõlemas otsas keere, siis võib eeldada nende mõju liite kandevõimele.

1.4 Puidu muljumistugevus

Puidu muljumistugevus ei ole materjali omadus, vaid väärtus, mis saadakse muljumiskatsega. See näitab keskmist pinget jäiga naagli all, mida surutakse puitu naagli teljega ristsuunas. Muljumistugevuse puhul on määravaks järgmised tegurid:

- puidu tihedus
- naagli diameeter
- nurk jõu ja puidu kiudude suuna vahel
- nake puidu ja naagli vahel
- puidu niiskus

Naagli muljumisel tekivad puidus x - ja y -telje suunalised jõud, aga analüütilistes valemites käsitletakse seda lihtsustatult ja arvestatakse ainult y -suunaliste pingetega, ristipingete vastuvõtmine tagatakse konstruktiivsete nõuetega [8]. Järgnevalt on kujutatud reaalne ja idealiseeritud muljumispingete jaotumine puitelemendis (vt Joonis 1.6).



Joonis 1.6. Muljumisest tekitatud pingeaotus puidus: a) reaalne pingeaotus; b) idealiseeritud pingeaotus [8]
Eurokoodeks 5 põhjal on võimalik muljumistugevust arvutada katsetulemuste põhjal tuletatud valemiga, mis sõltub puidu tihedusest ja naagli läbimõõdust. Ettepuuritud aukudega naaglitele saab normatiivse muljumistugevuse pikikiudu arvutada järgmise valemiga (1.3).

$$f_{h,0,k} = 0,082(1 - 0,01d)\rho_k \quad (1.3)$$

kus ρ_k – puidu normtihedus, kg/m^3 ;
 d – naagli läbimõõt, mm.

Kui jõud mõjub puidukiudude suhtes nurga alla, siis leitakse normatiivne muljumistugevus valemiga (1.4).

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90}\sin^2\alpha + \cos^2\alpha} \quad (1.4)$$

kus $f_{h,0,k}$ – norm-muljumistugevus pikikiudu, N/mm^2 ;
 α – nurk jõu mõjumise suuna ja pikikiu vahel;
 k_{90} – puidu liiki arvestav tegur:

$$k_{90} \begin{cases} 1,35 + 0,015d & \text{okaspuidule} \\ 1,30 + 0,015d & \text{spoonliimpuidule} \\ 0,90 + 0,015d & \text{lehtpuidule} \end{cases} \quad (1.5)$$

Eelnevalt esitatud valem kehtib tava- ja liimpuidule, mille puidukiud on ühes suunas. Kui tuletada valemid (1.1) CLT-s selliselt, et arvestatud oleks ristuvate kihtide mõju (naagli pikkuse ulatuses diferentseeritud muljumistugevus), läheksid need liialt keeruliseks ja ajamahukaks. Blaß ja Uibel [1] analüüsisid võimalust käsitleda diferentseeritud muljumistugevust homogeenena ning kasutada seda väärtust klassikalises Johanseni teoorias [6]. Diferentseeritud muljumistugevuse kaudu tuletatud valemid annavad võrreldes Johanseni valemitega erinevuse 4-6%. Homogeense muljumistugevuse kasutamist võimaldab nõ lukustusefekt, mida on oma artiklis kirjeldanud E. Tuhkanen [9]: ristiolevad kihid takistavad üksikute kihtide lõhestumist. Artiklist selgus ka, et suuremate deformatsioonide korral suurenes CLT muljumistugevus ristiolevate kihtide tihenemise tõttu.

1.4.1 CLT muljumistugevuse valemid

Blaß ja Uibel [1] on uurinud CLT muljumistugevust ja kruvide väljatõmbetugevust erinevate kinnitite asukohtade puhul. Selles peatükis käsitletakse ainult osa, mis hõlmab CLT muljumistugevust plaadi tasapinnaga risti paigaldatud naagli puhul. Järgnevalt on kirjeldatud uurimuses kasutatud katsemetoodikat ja ülesehitust.

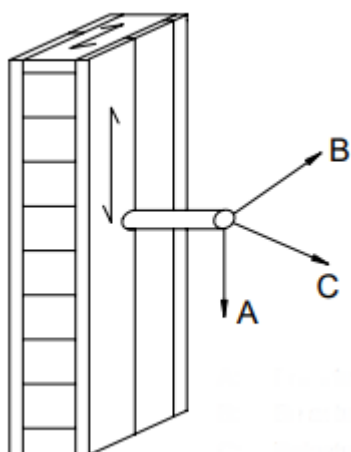
Katsekehad olid valmistatud kolmest või viiest kuusepuust lamelist ja kasutades erinevaid kihtide paksusi (vt Tabel 1.1). Katsed teostati vastavalt standardile EN 383: 1993 ja jõudu rakendati CLT välimiste lamellide suhtes 0°, 45° ja 90° nurga all (vt Tabel 1.2 ja Joonis 1.7). Lisaks varieeriti naagli paiknemist välimiste lamellide vuukide suhtes (vt Joonis 1.8).

Tabel 1.1. Katsekehade andmed [1]

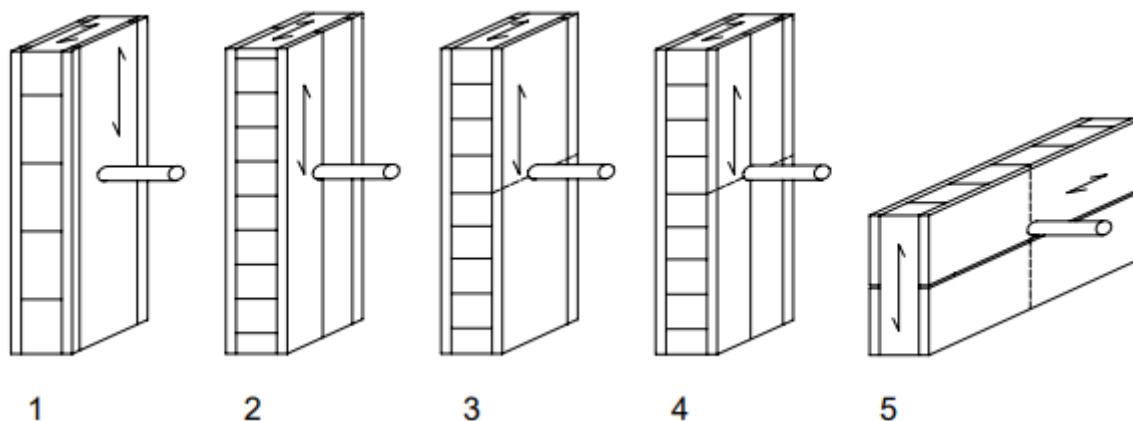
Katsekeha	Katsekeha paksus mm	Lamellide arv	Lamellide paksus mm	Minimaalne tihedus kg/m ³	Keskmine tihedus kg/m ³	Maksimaalne tihedus kg/m ³
1	85	5	17-17-17-17-17	415	470	630
2	78	3	19-40-19	372	437	578
3	42	5	8,5-7,5-10-7,5-8,5	397	459	558
4	60	3	19-22-19	372	437	578
5	17	3	5,3-6,4-5,3	406	458	507
6	25	5	4,5-4,8-6,5-4,8-4,5	397	459	558
7	12	3	3,5-5-3,5	397	459	558

Tabel 1.2. Katsete kirjeldus [1]

Naagli läbimõõt, mm	Katsekeha	Nurk jõu mõjumise suuna ja pikikiu vahel, kraadides	Katsekehade arv					Katsekehasid kokku
			Naagli positsioon					
			1	2	3	4	5	
24	1	0; 90	igat 5	igat 5	igat 5	igat 5	-	40
	2	0; 45; 90	igat 5	igat 5	igat 5	igat 5	-	60
	3	0	5	5	5	5	-	20
20	1	0; 45; 90	igat 5	igat 5	igat 5	igat 5	10	70
	3	0; 90	igat 5	igat 5	igat 5	igat 5	-	40
16	4	0; 90	igat 5	igat 5	igat 5	igat 5	10	50
	5	0; 90	igat 5	igat 5	igat 5	igat 5	-	40
	6	0; 45; 90	igat 5	igat 5	igat 5	igat 5	20	80
12	7	0	5	5	5	5	-	20
8	7	0	5	5	5	5	-	20
							Kokku	440



Joonis 1.7. Jõu avaldamise suund, A: $\alpha = 0^\circ$, B: $\alpha = 90^\circ$, C: $\alpha = 45^\circ$ [1]



Joonis 1.8. Naagli paiknemine katsekehas [1]

438 katsetulemuse analüüsi põhjal tuletati kaks valemit, mis sõltuvad naagli läbimõõdust, puidu tihedusest ja jõu mõjumise suunast CLT välimiste kihtide kiudude suhtes. Esimene valem (1.6) ei arvesta risti olevate kihtide paksuste suhet.

$$f_{h,pred} = \frac{0,035(1 - 0,015d)\rho^{1,16}}{1,1\sin^2\alpha + \cos^2\alpha} \quad (1.6)$$

kus d – naagli läbimõõt, mm;

ρ – puidu normtihedus, kg/m³;

α – nurk jõu mõjumissuuna ja CLT välimiste kihtide kiudude vahel.

Valemi (1.6) korrelatsioonikordaja $r = 0,75$

Teine valem (1.7) võtab arvesse ka piki ja risti paiknevate lamellide paksuste suhet.

$$f_{h,pred} = 0,032(1 - 0,015d)\rho^{1,20} \left[\frac{\sum_{i=1}^n t_{0,i}}{t(1,6\sin^2\alpha + \cos^2\alpha)} + \frac{\sum_{j=1}^{n-1} t_{90,j}}{t(1,6\cos^2\alpha + \sin^2\alpha)} \right] \quad (1.7)$$

kus $\sum_{i=1}^n t_{0,i}$ – CLT välimise kihiga samasuunaliste lamellide kogupaksus, mm;

$\sum_{j=1}^{n-1} t_{90,j}$ – CLT välimise kihiga ristisuunaliste lamellide kogupaksus, mm;

t – CLT kogupaksus.

Valemi (1.7) korrelatsioonikordaja $r = 0,77$

Valemid (1.6) ja (1.7) kehtivad juhul, kui on täidetud järgmised tingimused:

- lamelli maksimaalne paksus on 40 mm
- ristiolevate lamellide paksuste suhe ζ jääb vahemikku 0,95...2,1

$$\zeta = \frac{\sum_{i=1}^n t_{0,i}}{\sum_{j=1}^{n-1} t_{90,j}} \quad (1.8)$$

1.5 Naagli voolavuspiirile vastav paindemomendi väärtus

Liidete arvutamisel valemiga (1.1) ja (1.2) eeldatakse, et kinnitusvahendis tekib täielikult plastne liigend. Sellisel juhul on kogu naagli ristlõike ulatuses terase voolavuspiir ületatud ning sellele vastava paindemomendi väärtuse saab leida valemiga:

$$M_{y,R} = \frac{1}{6} * f_y * d^3 \quad (1.9)$$

kus f_y – kinnitusvahendi voolavuspiir ($f_y = 0,8 * f_{u,k}$), N/mm²;

d – kinnitusvahendi läbimõõt, mm.

Selline moment realiseerub ainult juhul, kui naagli paindenurk on piisavalt suur – 45°. Mitmed katsed on näidanud [10], et 15 mm deformatsiooni juures (nagu eeldab liitekatse [11]) jääb nurk sellest oluliselt väiksemaks ja seetõttu ei saavutata maksimaalset paindemomenti [12]. Seetõttu on Blaß, Bienhaus ja Krämer oma uurimuses [12] tuletanud valemi, mis võtab arvesse reaalse paindenurga:

$$M_{y,Rk} = 0,3 * f_{u,k} * d^{2,6} \quad (1.10)$$

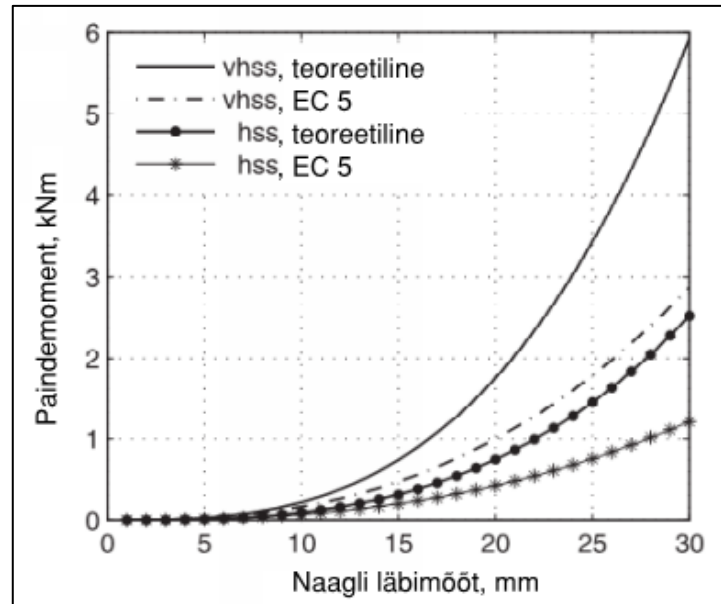
kus $f_{u,k}$ – kinnitusvahendi normatiivne tõmbetugevus, N/mm²;

d – kinnitusvahendi läbimõõt, mm.

Standardis Eurokoodeks 5 on voolavuspiirile vastava paindemomendi arvutamiseks esitatud samuti valem (1.10).

Voolavuspiiri arvutamiseks kasutatav seos tõmbetugevuse vahel on välja töötatud katsetulemustest, mille puhul 10° paindenurga juures oli voolavuspiiri väärtus 67% tõmbetugevusest [12]. Ka Blaß, Bienhaus ja Krämer on enda valemi väljatöötamisel kasutanud seda sama eeldust. Hilisemad katsed kõrgtugevast terasest naaglitega on aga näidanud, et see suhe on 0,94 [10]. Seega võib eeldada, et selliste naaglite kasutamisel alahindab valem (1.10) naagli voolavuspiirile vastavat paindemomenti. Sama on kinnitanud ka A. Misonel, M. Ballerini ja J. W van de Kuilen oma uurimuses [13], kus katsetulemuste baasil soovitatakse kõrgtugevate naaglite paindemomendi väärtuse leidmisel kasutada valemit (1.9) ja voolavuspiiri asemel naagli tõmbetugevust.

C. Sandhaas ja H. W van de Kuilen on oma uurimistöös katseliselt leitud voolavuspiiri ja tõmbetugevuse põhjal arvatud naagli paindemomendi väärtused (Joonis 1.9). Graafikul vhss tähistab kõrgtugevat terast, mille $f_u=1325$ Mpa ja $f_y=1248$ ja hss tähistab terast mille $f_u=591$ Mpa ja $f_y=555$ [10]. Tähisega „teoreetiline“ tulemused on arvatud valemiga (1.9) ja „EC 5“ valemiga (1.10).



Joonis 1.9. Paindemomendi väärtused sõltuvalt naagli diameetrist ja tugevusest [10]

Graafikult nähtub, et mida suurem on naagli diameeter, seda suuremad on erinevused kahe valemi arvutuslike paindemomentide osas. Kõrgtugeva teraste puhul on erinevused suuremad, näiteks 20 mm naagli puhul on Eurokoodeks 5 valemiga arvatud tulemus 46% väiksem kui valemi (1.9) tulemus.

1.6 Liidete jäikus

Liidete konstrueerimisel on oluline arvestada selle järeleandvusega, kuna see mõjutab lõplike deformatsioone ja jõudude ülekandumist. Käesoleva lõputöö üheks eesmärgiks on puurotsaga naaglite nihkemoodulite määramine, mille alusel oleks võimalik arvutusprogrammis modelleerida CLT jäikusena käitumist tulenevalt liite järeleandvusest.

Liite jäikust kasutuspiirteisundis iseloomustab nihkemoodu K_{ser} , kandepiirteisundis on selle tähis K_u . Nihkemoodul näitab jõudu, mis on vajalik ühe millimeetrise deformatsiooni tekitamiseks. Standardis Eurokoodeks 5 on liite ühe kinnitusvahendi ühe lõikepinna nihkemooduli arvutamiseks esitatud valem [7]:

$$K_{ser} = \frac{\rho_m^{1,5} * d}{23} \quad (1.11)$$

kus K_{ser} – ühe lõikepinna nihkemoodul kasutuspiirteisundis, N/mm;

ρ_m – puidu tiheduse keskvärtus, kg/m³;

d – kinnitusvahendi läbimõõt, mm.

$$K_u = \frac{2}{3} K_{ser} \quad (1.12)$$

kus K_u – ühe lõikepinna nihkemoodul kandepiirteisundis, N/mm;

Liidete deformatsioonid arvutatakse eeldusel, et koormuse ja deformatsiooni vahel püsib lineaarne seos. Liite deformatsioon kasutuspiirteisundis mõjuvast koormusest arvutatakse valemiga [14, p. 110]:

$$u = \frac{F_k}{K_{ser}} \quad (1.13)$$

kus u – liite deformatsioon, mm;

F_k – liite koormus, N.

Standardis EN 26891, milles põhjal arvutatakse katsetulemuste põhjal nihkemoodul, on tähise K_{ser} asemel kasutatud tähist k_s . Teras-puiduga liite korral arvutatakse K_{ser} puitelemendi tiheduse keskvärtuse järgi ning seda tuleb korrutada teguriga 2,0. [7]

2. UURIMISMETOODIKA JA KATSEKEHADE KIRJELDUS

2.1 Katsekehade kirjeldus

Käesoleva lõputöö raames teostati kokku 29 liite- ning 47 muljumiskatset. Järgnevates tabelites on esitatud mõlema katse konfiguratsioonid (vt Tabel 2.1 ja Tabel 2.2). Lisas 1 on esitatud täielik liitekatsekehade kirjelduse tabel.

Tabel 2.1. Liitekatsete kirjeldus

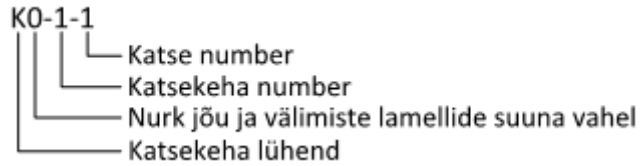
α	Naagli tüüp	Naaglite arv kokku / ühes reas	Katsete arv
0	SBD 7.5x95	2 / 1	4
		8 / 4	3
		10 / 5	1
	SBD 7.5x195	2 / 1	4
		8 / 4	1
		SFS 7x153	8 / 4
90	SBD 7.5x95	2 / 1	4
		8 / 4	4
		10 / 5	1
	SBD 7.5x195	2 / 1	3
		8 / 4	1
		SFS 7x153	8 / 4

Tabel 2.2. Muljumiskatsete kirjeldus

α	$\zeta = \frac{\sum t_{0,i}}{\sum t_{90,j}}$	Naagli läbimõõt mm	Katsete arv
0	1,33	10	41
90	0,75	10	39

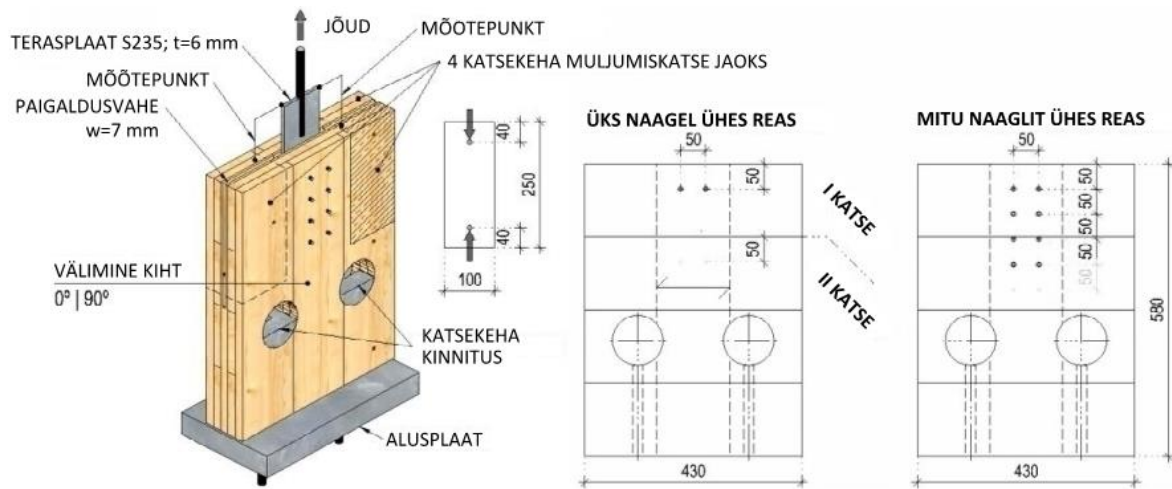
2.1.1 Liitekatseted

Katsekehadeks olid 100 mm paksused CLT plaadid, mis koosnesid kokku viiest võrdse paksusega lamelist. Nendesse oli tehases sissefreesitud 7 mm laiused pilud, kuhu kinnitati isepuurivate naaglitega (SBD 7,5x95) 6 mm paksused terasest plaadid tugevusklassiga S235. Ristkihtliimpuidu välimised lamellid olid testide puhul orienteeritud kas piki või risti jõu mõjumise suunaga. Katsekehad jagati kahte rühma: välimine kiht jõu suunaline ja jõu suunaga risti. Järgneval joonisel on kujutatud liite katsekehade tähistused. Katsekehade nurkadest lõigati ribad muljumiskatseteks (vt Joonis 2.1).



Joonis 2.1. Liite katsekehade tähiste seletus

Katsekehad kinnitati poldide ja spetsiaalsete poolsilindri kujuliste detailidega alusplaadi külge, mis omakorda kinnitus katseseadmele. Ristkihtliimpuitu kinnitatud metallplaadi teises otsas oli terasvarras, mis ühendati seadme ülemise klambri külge (vt Joonis 2.2 ja Joonis 2.3).



Joonis 2.2. Katseskeem



Joonis 2.3. Katsekeha katsetamine

Naaglid paigaldati kahekaupa ühte, nelja ja viiete ritta ning lisaks kasutati osade liidete juures pikemaid naagleid (SBD 7,5x195), et uurida köieefekti mõju kandevõimele. Pikemad naaglid paigaldati nii, et keerrestatud osad jääksid puidust väljapoole (vt Joonis 2.4). Mõnede liidete juures kasutati WS-7x153 naagleid, millel on tunduvalt väiksemad tugevusnäitajad kui SBD tüübil, et hinnata kindlalt volavuspiirile vastava paindemomendi mõju liite kandevõimele. Alumisel joonisel on kujutatud mõlemat tüüpi naaglid (vt Joonis 2.5).



Joonis 2.4. SBD 7,5x95 (ülemine), SBD 7,5x195 (keskmine) ja WS-7x153 (alumine) naagli asetus katsekehas

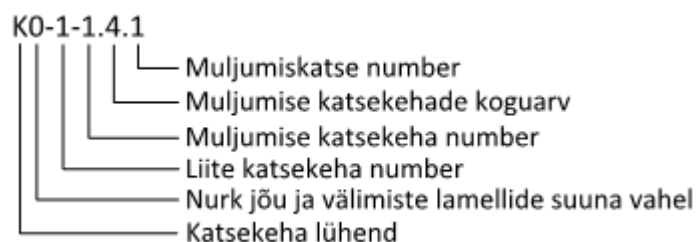


Joonis 2.5. WS (SFS-Intec 2019) ja SBD (Rotho Blaas 2019) tüüpi naaglid

Katsekehad olid pärast valmistamist pakitud õhukindlatesse kottidesse ja pärast liidete katsetamist muljumistugevuse määramiseks nurkadest väljalõigatud tükid paigutati samuti suletavatesse plastikkottidesse.

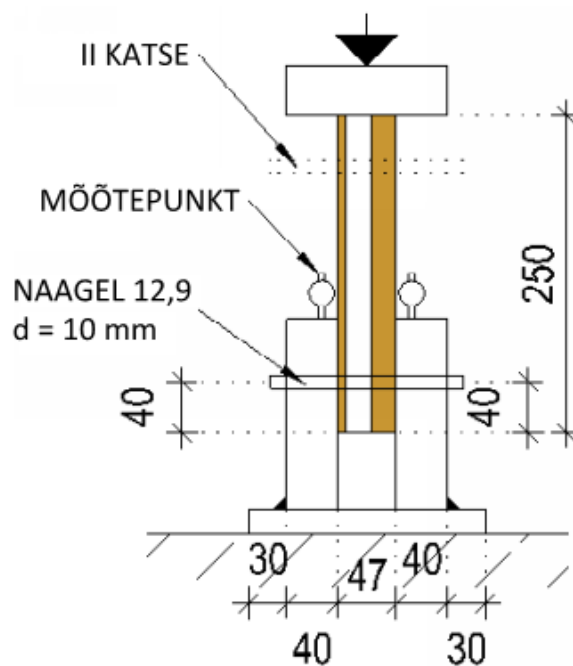
2.1.2 Muljumiskatsed

Liite kandevõime täpsemaks uurimiseks määrati CLT detailidele ka muljumistugevused. Pärast liidete katsetamist lõigati iga katsekeha ülemistest nurkadest neli proovitükki (vt Joonis 2.2). Järgnevalt on kujutatud muljumise katsekehade tähistamise seletus (vt Joonis 2.6).



Joonis 2.6. Muljumise katsekehade tähistuste seletus

Igat proovitükki testiti muljumistugevusele mõlemast otsast, vastavalt standardi EN 383:2007 eeskirjadele [15]. Nimetatud juhend on mõeldud homogeense materjali muljumistugevuse määramiseks, aga arvestades Blaß and Uibel [1] kirjeldatud CLT homogeenset käitumist, on katsetamismeetodika kasutatav ka CLT puhul. Standard soovib kasutada naaglit, mille diameeter on minimaalselt 0,25 katsetatava detaili paksusest, et tagada ainult puidu muljumine mitte naagli deformeerumine. Antud juhul oli proovitüki paksus 46,5 mm, seega oleks soovituslik kinniti läbimõõt 12 mm. Otsustati kasutada 10 mm diameetriga kõrgtugevat naaglit, et olla lähemal liidete puhul kasutatud naaglite läbimõõdule (7 mm ja 7,5 mm). Vältimaks naagli plastilisi deformatsioone ja ebasümmeetrilisusest tingitud katsekeha võimalikku kaldumist, olid katserakise küljed valmistatud 40 mm paksusest terasplaadist seinte vahega 47 mm. Naagel sobis täpselt terasplaatide aukudesse ning jääkdeformatsioone selles pärast katseid ei tuvastatud. Järgnevalt on kujutatud muljumiskatse skeem (vt Joonis 2.7).



Joonis 2.7. Muljumiskatse skeem

2.2 Katseseadmed

Katsed viidi läbi Tallinna Tehnikaülikooli Konstruksiooni- ja vedelikumehaanika uurimisrühma tugevuslaboris kasutades kalibreeritud katseseadet Zwick/Roell Z250 (vt Joonis 2.8). Siirete mõõtmiseks kasutati kahte HBM WA50 elektroonilist nihkeandurit, mille kalibreeritud mõõteulatus on 0...50 mm. Siirde- ja jõuandurid ühendati mõõteseadmega HBM Quantum MX840B. Mõõtetarkvarana kasutati Catman Easy-t, mille võimekus on salvestada katseandmeid 100MB/s [16]. Kahe anduri tulemustest leiti aritmeetiline keskmine. Standardis on määratud katseseadme koormuse rakendamise ja salvestamise minimaalseks täpsuseks $\pm 1\%$ eeldatavast maksimaalsest jõust. Siirdeanduri täpsus peab olema vähemalt $\pm 1\%$. Kõik antud lõputöö raames kasutatud seadmed vastavad esitatud nõuetele.

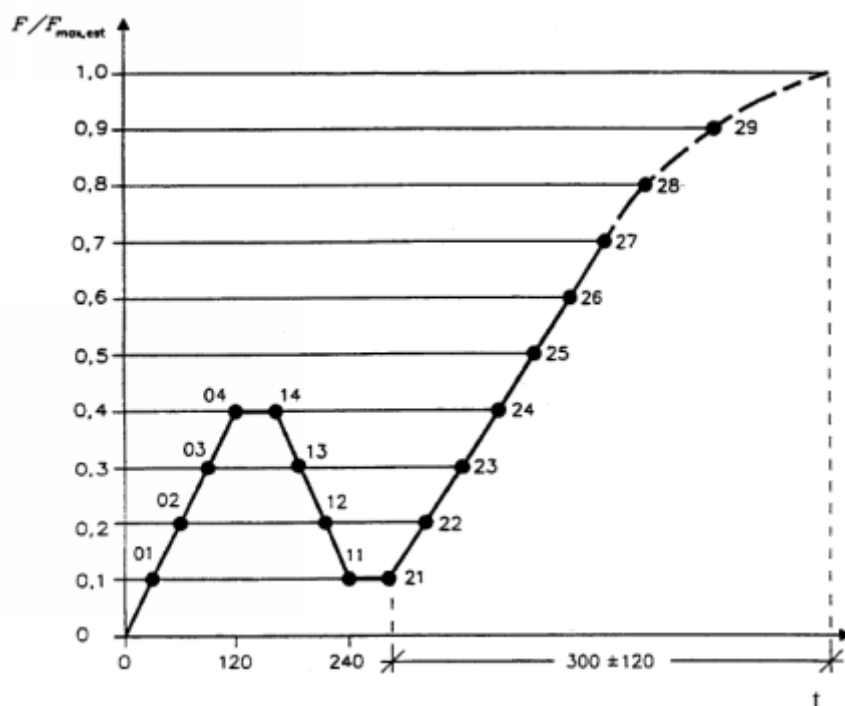


Joonis 2.8. Katseseade Zwick/Roell Z250

2.3 Katsetoodika

2.3.1 Liitekatsed

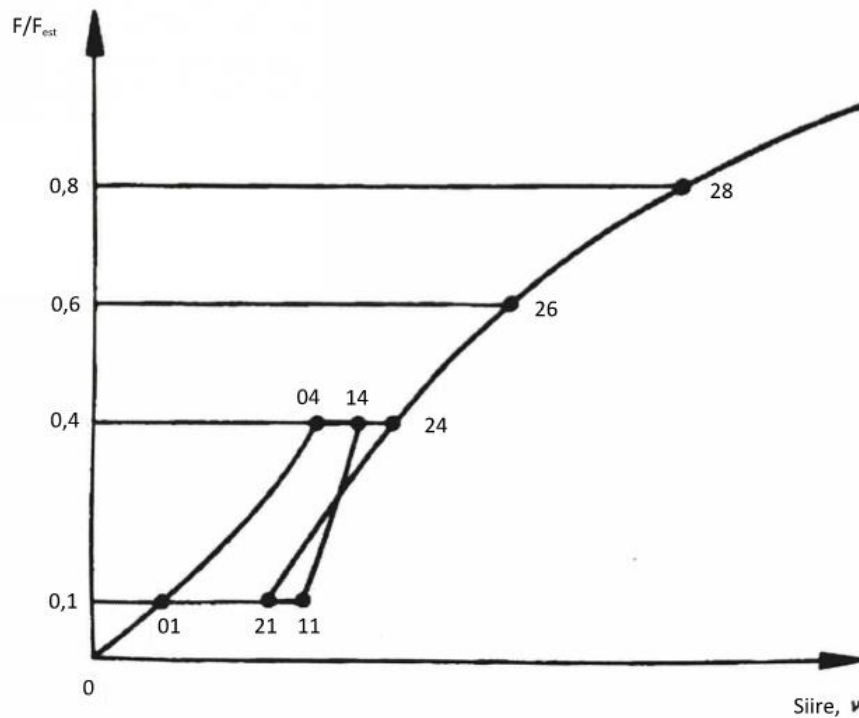
Liidete katsetamine viidi läbi vastavalt standardis EN 26894:1999 toodud juhistele. Iga liitetüübi puhul määrati proovikatsega eeldatav maksimaalne jõud (F_{est}). Jõu rakendamine toimus vastavalt graafilul kujutatule (vt Joonis 2.9). Esmalt koormati 120 sekundi jooksul katsekeha kuni jõuni 40% F_{est} , kiirusega 20% F_{est}/min ning hoiti seda 30 sekundit. Seejärel vähendati koormust sama kiirusega kuni 10% F_{est} ja 30 sekundi pärast alustati taas jõu suurendamist kuni katsekeha purunemiseni. Viimane koormamine peab toimuma 300 ± 120 sekundi jooksul ja kuni 70% eeldatavast maksimaalsest koormusest tõstet jõudu koormuse järgi (N/min). Selle punktist edasi toimus jõu suurendamine siirde järgi (mm/min).



Joonis 2.9. Liidete koormamise skeem [11]

Vastavalt standardile määratakse liite maksimaalne kandevõime katsekeha purunemisel või 15 mm siirde saavutamisel, olenevalt kumb saab määravaks. Üldjuhul purunes katsekeha enne lubatud siirde tekkimist, välja arvatud pikkade naaglite puhul. Deformatsioonide ja jõu väärtuste salvestamine toimus 0,2 sekundilise intervalliga.

Lõputöö raames määrati katsetulemuste baasil liidete nihkemoodulid. Selleks võeti katsegraafikutelt standardis EN 26894:1999 määratud punktides siirdelugemid (vt Joonis 2.10).



Joonis 2.10. Idealiseeritud jõu-deformatsiooni graafik [11]

Nihkemoodul (K_S) arvutatakse standardi EN 26891:1999 järgselt valemiga [11]:

$$K_S = 0,4F_{est}/v_{i,mod} \quad (2.1)$$

kus $v_{i,mod}$ – modifitseeritud esialgne siire, mm.

$$v_{i,mod} = \frac{4}{3}(v_{04} - v_{01}) \quad (2.2)$$

kus v_{04}, v_{01} – Joonis 2.10 vastava punkti siire katsegraafikult, mm.

2.3.2 Muljumiskatsed

Muljumiskatsete puhul kasutati standardis EVS-EN 383:2007 esitatud koormusskeemi, mis ühtib liitekatse koormamise graafikuga (vt Joonis 2.9). Erinevuseks on see, et muljumiskatse puhul fikseeritakse maksimaalne koormus 5 mm siirde saavutamisel. Tuhkanen, Mölder ja Schickhofer artiklist selgub, et jõuga ristiolevate lamellide tihenemise tõttu suureneb jõud pärast 5 mm

deformatsiooni saavutamist keskmiselt 1,8% / mm [9]. Et näha antud katsete puhul sarnast efekti, koormati kõiki katsekehasid 7-9 mm deformatsioonini. Muljumistugevus arvutatakse valemiga [15]:

$$f_h = \frac{F_{max}}{dt} \quad (2.3)$$

kus F_{max} – maksimaalne koormus, N;

d – naagli läbimõõt, mm;

t – katsekeha paksus, mm.

2.3.3 Naaglite tõmbe- ja paindekatsed

Käesoleva lõputöö raames määrati kasutatavatele naaglitele tõmbetugevus ja voolavuspiirile vastav paindemomendi väärtus katseliselt, vastavalt standarditele EN 409:2009 [17] ja EN 1383:2016 [18]. Tõmbetestid teostati Tallinna Tehnikaülikooli (TalTech) laboris ja paindekatsed viidi läbi Karlsruhe Tehnoloogia Instituudi (Karlsruhe Institute of Technology, KIT [19]) poolt.

Tõmbetugevuse määramisel testiti mõlemalt tootjalt nelja naaglit. Paindetugevuse määramisel katsetati kümmet SFS-Intec naaglit kuid Rotho Blaas puhul ainult ühte - selle põhjuseks oli naagli liiga suur tugevus, mis tekitas katseseadme purunemise ohu.

2.4 Niiskussisalduse ja tiheduse määramine

Pärast muljumistugevuste määramist lõigati igast katsekehast muljumiskoha lähedalt proovitükk, mis mõõdeti kalibreeritud elektroonilise nihikuga ja kaaluti elektroonilise kaaluga. Visuaalsel vaatlusel välditi oksakohtade sattumist väljalõigatavasse detailidesse, mis tõstaksid lokaalselt puidu tihedust.

Pärast mõõdistamist ja kaalumist paigutati proovikehad kuivatuskappi, kus neid hoiti kuni püsiva kaalu saavutamiseni. Selle aja möödudes kaaluti katsekehad taas üle, et määrata nende kuivkaalud. Saadud tulemustest on leitav puidu veesisaldus (%) valemiga:

$$\omega = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \quad (2.4)$$

kus m_1 – puidu mass katsetamise ajal, g;
 m_0 – puidu mass pärast kuivatamist, g.

Tükkide esialgsest kaalust ja mõõtmetest lähtuvalt arvutatakse proovikehade tihedus vastavalt standardi ISO 13061-2:2014 valemiga:

$$\rho = \frac{m}{abh} \quad (2.5)$$

kus m – puidu mass katsetamise ajal, g;
 a – proovitüki laius, g.
 b – proovitüki pikkus, g.
 h – proovitüki kõrgus, g.

Kõikide proovitükkide keskmine niiskussisaldus oli 12,1%. Leitud tiheduse väärtusi kasutatakse valemi (1.1) abil teoreetilise liitekandevõime määramiseks.

Vastavalt standardile EN 384 [20] taandatakse arvutatud proovitükkide tihedused 12% niiskusele, et andmed oleksid omavahel võrreldavad ja neid saaks kasutada muljumistugevuse arvutamisel.

Taandatud tihedused arvutatakse valmiga:

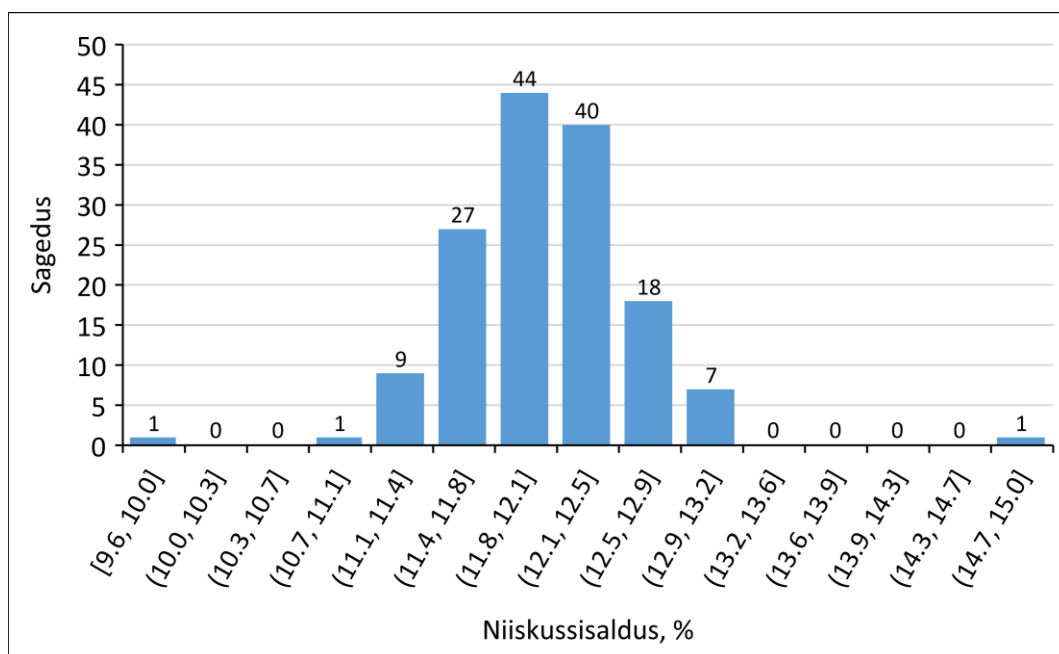
$$\rho_{corr} = \rho_{(u)}(1 - 0,005(u - u_{ref})) \quad (2.6)$$

kus $\rho_{(u)}$ – arvutatud puidu tihedus niiskusel (u), kg/m³;
 u – arvutatud puidu niiskus, %;
 u_{ref} – referents puidu niiskus (12%), %.

3. KATSETULEMUSED JA ANALÜÜS

3.1 Katsekehade niiskus

Järgneval graafikul on esitatud 148 proovitüki niiskussisalduse sagedus (vt Joonis 3.1). Andmetesse on kaasatud nii muljumistugevuse, kui liite katsekehade löigatud proovitükkide väärtused.



Joonis 3.1. Proovitükkide niiskussisaldused

Proovikehade keskmine ja mediaan väärtus langevad kokku, olles mõlemad 12,1%. Andmete variatsioonikoefitsient on 4,4%. Suurem osa tulemusi jääb vahemikku 11,1...13,2%, aga esines kaks ekstreemset väärtust (9,6% ja 14,9%). Mõlemad väärtused on graafiku eri poolel ja seega ei mõjuta oluliselt keskmisi tulemusi. Kõige rohkem tulemusi jääb vahemikku 11,8...12,1%, kokku 44 väärtust. Vahemikku 11,8...12,5% jääb 84 väärtust, mis moodustab 57% kõikidest tulemustest.

Eelnevalt esitatud andmetele tuginedes võib väita, et katsetamise hetkel ei erinenud katsekehade niiskussisaldused oluliselt ning need ei põhjustanud erinevusi katsetulemustes.

3.2 Katsekehade tihedus

Katsekehade tihedused on jaotatud kahte gruppi vastavalt CLT välimiste kihtide suunale. Järgnevalt on esitatud nii muljumistugevuse kui liite katsekehade tiheduse keskmised ($\rho_{mean,12}$) ja 5% fraktili ($\rho_{05,12}$) väärtused ning variatsioonikoefitsendid. Tabel 3.1 koostamisel on arvesse võetud ainult muljumistugevuse katsekehadest lõigatud 47 proovitüki andmeid. Liite katsekehade puhul on võetud arvesse nii koheselt võetud proovitükkide väärtused, kui ka muljumise proovitükkide väärtused, kokku 144 tulemust (vt Tabel 3.2). Tabelites esitatud väärtused on valemiga (2.6) taandatud 12% niiskusega puidu tihedusele.

Tabel 3.1. Muljumiskatse proovitükkide tihedused

α	$\rho_{mean,12}$ kg/m^3	$\rho_{05,12}$ kg/m^3	CV [ρ_{12}] %
0°	466	423	5,0%
90°	473	425	5,5%

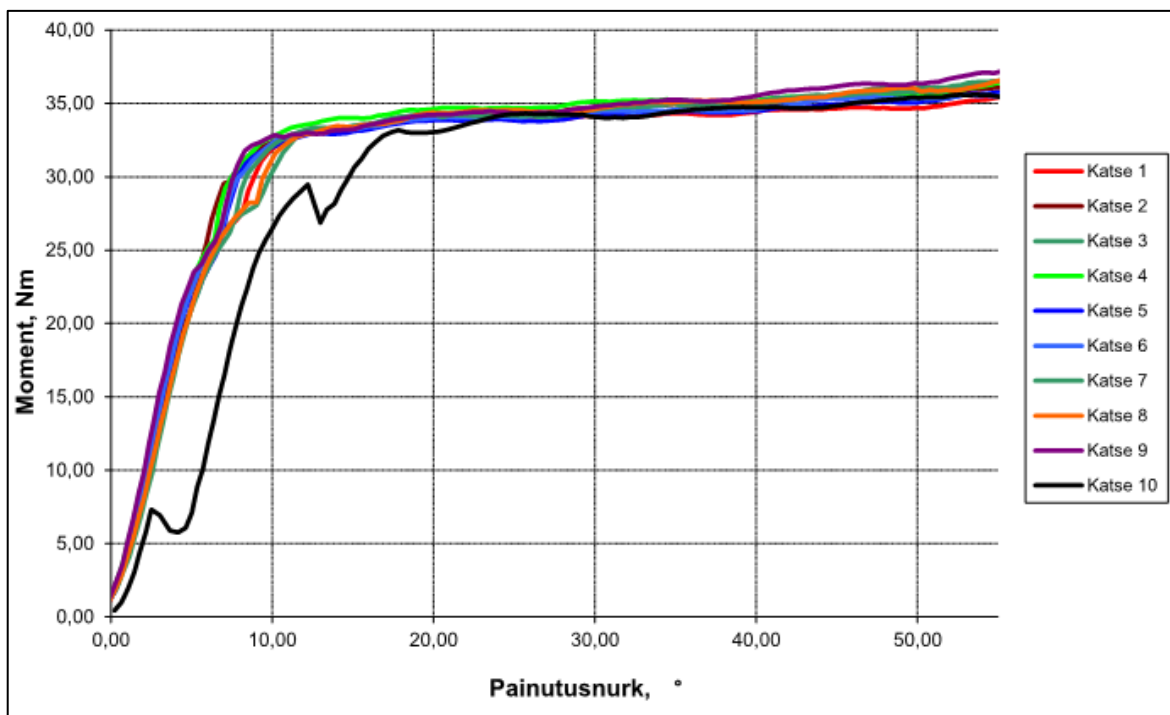
Tabel 3.2. Liitetestide katsekehade tihedused

α	Naagli tüüp	Naaglite arv kokku / ühes reas	$\rho_{mean,12}$ kg/m^3	$\rho_{mean,12.all}$ kg/m^3	$\rho_{05,12}$ kg/m^3	CV [ρ_{12}] %
0°	SBD 7.5x95	2 / 1	466	465	416	5,0
		8 / 4				
		10 / 5				
	SBD 7.5x195	2 / 1	456			
		8 / 4				
	SFS 7x153	8 / 4	451			
90°	SBD 7.5x95	2 / 1	469			
		8 / 4				
		10 / 5				
	SBD 7.5x195	2 / 1	466			
		8 / 4				
	SFS 7x153	8 / 4	465			

Katsekehade tihedused jäävad vahemikku 415,7...528,5 kg/m^3 . Kõikide testide tiheduse mediaanväärtus on 463,1 kg/m^3 , mis ei erine oluliselt keskmisest väärtusest 465,1 kg/m^3 . Esimese grupi (0°) keskmine tihedus on teisest grupi (90°) keskmisest väärtusest 1,4% väiksem.

3.3 Naaglite tõmbe- ja paindekatsed

Karlsruhe Tehnoloogia Instituudis läbiviidud paindekatsete tulemused on esitatud järgneval graafikul (Joonis 3.2).



Joonis 3.2. SFS 7x93 paindekatsete graafik

Järgnevalt on esitatud katsetulemuste keskmised väärtused $M_{y,R,15^\circ,mean}$, $f_{u,mean}$ ja valemi (1.10) järgi arvatud teoreetiline, voolavuspiirile vastav, paindemomendi väärtus $M_{y,R}$ (vt Tabel 3.3).

Tabel 3.3. Naagli katsetulemused ja võrdlus Eurokoodeks 5 valemi väärtustega

Naagli tüüp	Naagli läbimõõt mm	$M_{y,R,15^\circ,mean}$ Nm	$M_{y,R,45^\circ,mean}$ Nm	$f_{u,mean}$ MPa	$M_{y,R}$ Nm	Erinevus %
SFS-Intec WS-7x153	7,0	33,5	35,4	574	27,1	- 19
Rotho Blaas SBD-7,5x95	7,5	100,0	102,0	1243	70,3	- 30

Andmetest selgub, et kasutades mõõdetud tõmbetugevust ning Eurokoodeks 5 järgset paindetugevuse valemit, on saadud tulemused mõõdetutest väiksemad – vastavalt 19 % WS ja 30 % SBD tüüpi naagli puhul.

SBD naagli tootelehel on $M_{y,Rk}$ väärtuseks esitatud 42,0 Nm, mis on 40% väiksem kui tõmbetugevuse järgi arvatud ja 59% väiksem kui katseliselt leitud paindemomendi väärtus. WS tüübi puhul on dokumenteeritud $M_{y,Rk}$ väärtuseks 31,93 Nm, mis on 18% suurem eelnevalt (Tabel 3.3) arvatud väärtusest ja 9,8% väiksem tabelis esitatud katselisest väärtusest.

Kuna liidete katsetulemustest selgus, et naagli painutusnurk jääb vahemikku 30°-50° siis on õigustatud paindemomendi leidmiseks kasutada ehitusmehaanika valemit (1.9). Kuigi SBD naaglite tõmbeküljele tekkisid nähtavad praod, oli mõlema tüübi puhul piisav plastiline deformatsioon ka 50° juures ilma purunemiseta. See lubab eeldada, et kasutati täielikult ära naagli plastiline paindekandevõime. Järgnevalt on võrreldud katseliselt leitud ja valemiga (1.9) tõmbetugevuse järgi arvutatud paindemomendi väärtust (vt Tabel 3.4).

Tabel 3.4. Naagli katsetulemuste võrdlus ehitusmehaanika valemi väärtusega

Naagli tüüp	Naagli läbimõõt mm	$M_{y,R,45^\circ,mean}$ Nm	$f_{u,mean}$ MPa	$M_{y,R}$ Nm	Erinevus %
SFS-Intec WS-7x153	7,0	35,4	574	32,8	- 7
Rotho Blaas SBD-7,5x95	7,5	102,0	1243	87,4	- 14

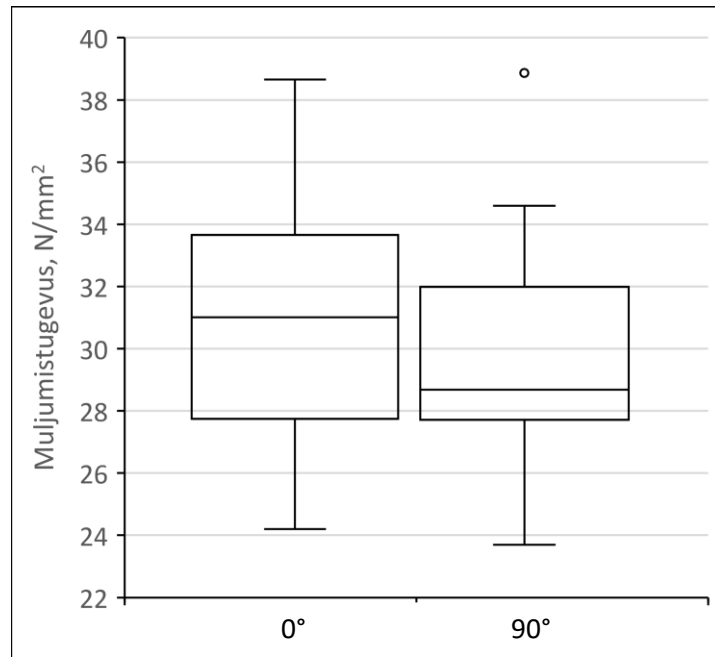
Tabelist nähtub, et kasutades eelnevalt kirjeldatud arvutust on erinevused katsetulemuste ja teoreetiliste väärtuste vahel väiksemad – vastavalt 7% WS ja 14% SBD naagli puhul.

3.4 Muljumistugevus

Järgnevalt on esitatud muljumistugevuse keskmine ja 5% fraktili väärtus ning variatsioonikoefitsendid (vt Tabel 3.5). Tabelis on esitatud ka 7 ja 9 mm deformatsioonile vastava jõuga arvutatud muljumistugevus ning erinevus. Karp-vurrud diagrammil on kujutatud mõlema grupi muljumistugevused vastavalt 5 mm deformatsioonile (vt Joonis 3.3). Andmed on koondatud vastavalt katsekeha välimiste kihtide suunale. Analüüsist on välja jäetud kolm tulemust, mis olid tunduvalt suuremad keskmistest väärtustest. Hilisemal katsekehade lahti löikamisel ja vaatlusel selgus, et antud katsekehade sisemises lamellis paiknes muljumiskoha läheduses oksakoht. Lisas 2 on esitatud muljumiskatsete tulemused kõikide katsekehade kohta.

Tabel 3.5. Muljumistugevuse keskmised väärtused

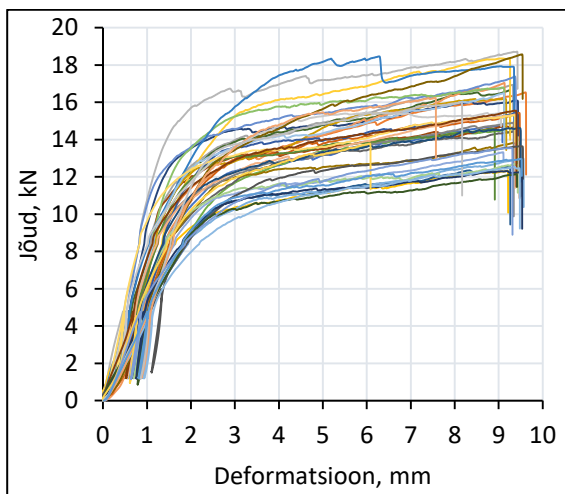
α	$f_{h,mean,5mm}$ N/mm^2	$f_{h,05}$ N/mm^2	CV %	$f_{h,mean,7mm}$ N/mm^2	Erinevus %	$f_{h,mean,9mm}$ N/mm^2	Erinevus %
0°	30,8	24,2	11,9	32,5	+5,5	34,0	+10,4
90°	29,6	23,7	10,8	31,2	+5,2	32,9	+11,1
Kokku	30,3	23,7	11,6	31,9	+5,5	33,4	+10,2



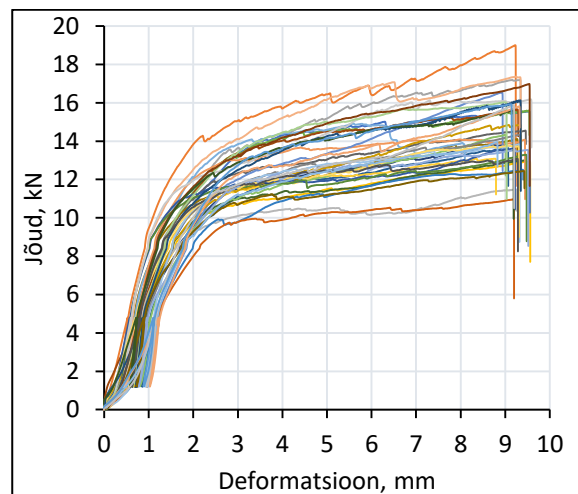
Joonis 3.3. Muljumistugevuse karp-vurrud diagramm

Andmetest selgub, et pärast 5 mm deformatsiooni suureneb jõu mõjul tihenemise tõttu katsekehade muljumistugevus keskmiselt 2,5% / mm. Esimese grupi (0°) puhul on muljumistugevus vahemikus 24,20...38,65 N/mm² ja mediaanväärtuseks 30,84 N/mm², mis ei erine oluliselt keskmisest väärtusest. Teise grupi (90°) puhul on muljumistugevus vahemikus 23,70...38,87 N/mm² ja mediaanväärtuseks 28,68 N/mm², mis on 3,2% väiksem kui keskmine väärtus.

Keskmine muljumistugevus välimiste lamellidega risti on 3,9% ja 5% fraktil keskmiselt 2,1% väiksem kui jõuga paralleelsete välimiste kihtidega katsekehade puhul. Allolevatel diagrammidel on kujutatud muljumiskatsete koondgraafikud – Joonis 3.4 kujutab 0° ja Joonis 3.5 90° gruppi.



Joonis 3.4. 0° muljumiskatsete koondgraafik



Joonis 3.5. 90° muljumiskatsete koondgraafik

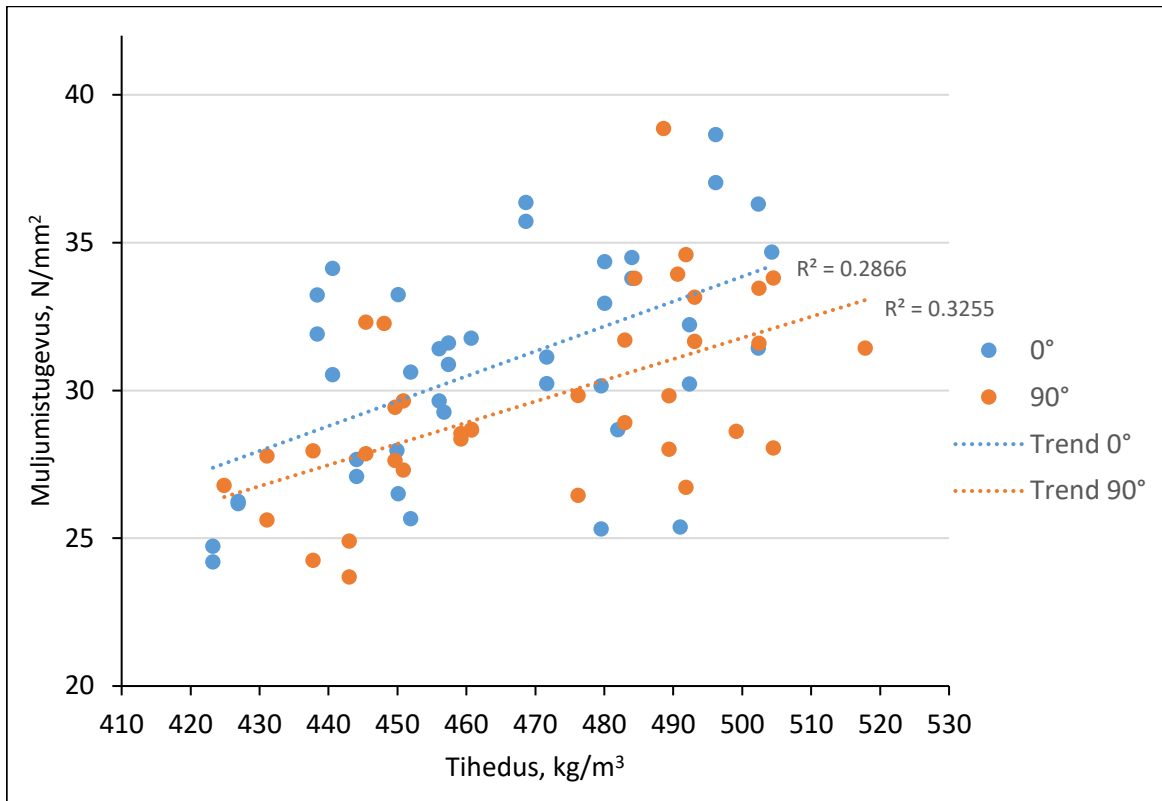
Järgnevalt on kujutatud katsekehade iseloomulik pilt pärast muljumiskatset (vt Joonis 3.6).



Joonis 3.6. Katsekehade pärast katsetamist, vasakul 0° ja paremal 90° välimiste lamellide suunaga

Pärast muljumiskatsed ei tähendatud ühegi katsekeha puhul piki kiudu lõhestumist, mis kinnitab CLT risti olevate kihtide lukustavat efekti.

Järgneval joonisel on kujutatud katsekehade muljumistugevuse ja tiheduse vaheline seos. Graafiku koostamisel on kasutatud iga katsekeha mõõdetud tihedust ning katselist muljumistugevust (vt Joonis 3.7).



Joonis 3.7. Muljumistugevuse ja tiheduse vaheline seos

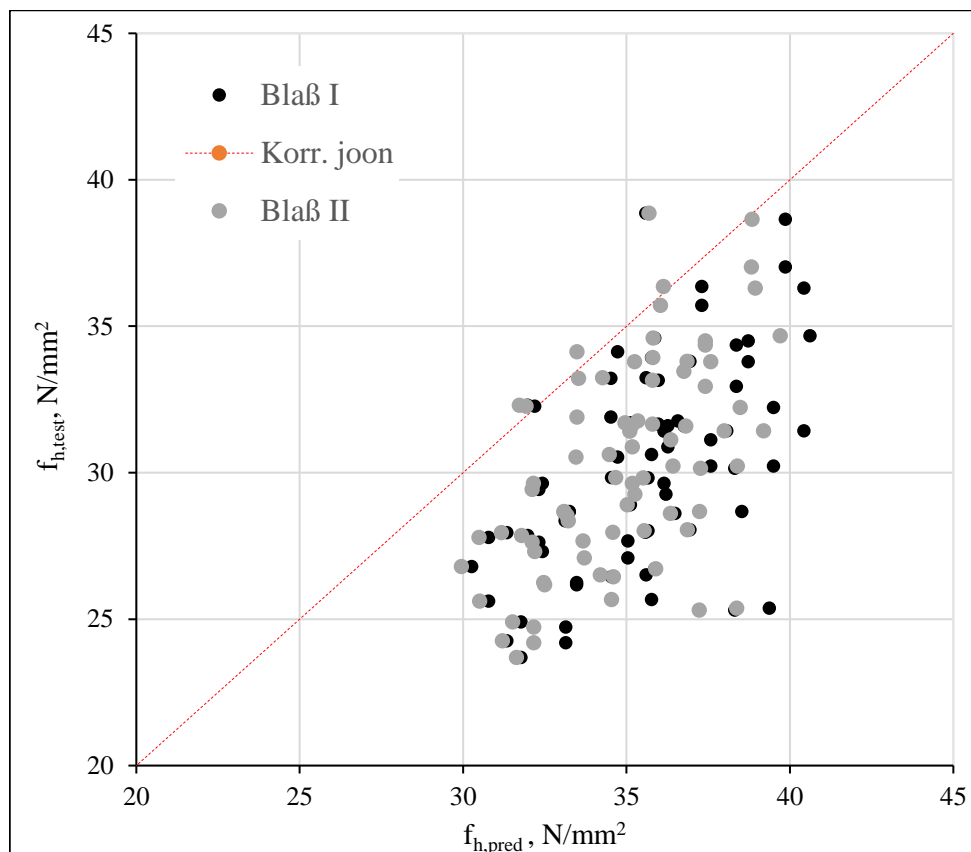
Graafiku punktid on hajutatud, kuid trendide põhjal on näha seost tiheduse ja muljumistugevuse vahel. Esimese grupi (0°) puhul on tulemuste hajuvus suurem võrreldes teise grupi (90°) väärtustega.

3.4.1 Katsetulemuste võrdlus Blaß ja Uibel valemitega

Järgnevalt on võrreldud katsetulemusi valemitega (1.6) ja (1.7) arvutatud muljumistugevuse väärtustega. Kasutades tiheduse keskväärtuseid leiti igale katsele teoreetiline muljumistugevus ning tabelis on esitatud nende keskmine väärtus (vt Tabel 3.6). Punktdiagrammil on kujutatud kõikide katsete teoreetilised tulemused ning teoreetiline korrelatsiooni joon (vt Joonis 3.8).

Tabel 3.6. Muljumistugevuse võrdlus teoreetiliste valemitega

α	$f_{h,mean}$ N/mm^2	Blaß ja Uibel I (1.6)		Blaß ja Uibel II (1.7)	
		$f_{h,mean}$ N/mm^2	Erinevus %	$f_{h,mean}$ N/mm^2	Erinevus %
0°	30,8	36,9	+19,7	35,8	+16,0
90°	29,6	34,0	+14,9	33,9	+14,5



Joonis 3.8. Muljumistugevuse katsete võrdlus teoreetiliste valemitega

Esimese grupi (0°) muljumiskatse tulemused on valemi (1.6) väärtustest keskmiselt 16,4% ja maksimaalselt 35,5% väiksemad. Kõik esimese grupi testid näitasid väiksemat tulemust kui valem (1.6). Valemiga (1.7) võrreldes oli katsetulemused keskmiselt 13,8% ja maksimaalselt 33,8% väiksemad. Kahe testi puhul olid tulemused kuni 2% suuremad valemiga (1.7) arvutatud väärtusest.

Teise grupi (90°) muljumiskatse tulemused on valemi (1.6) väärtustest keskmiselt 12,9% ja maksimaalselt 25,5% väiksemad. Kahe testi puhul olid tulemused kuni 9,2% suuremad valemiga (1.6) arvutatud väärtusest. Valemiga (1.7) võrreldes oli katsetulemused keskmiselt 13,5% ja maksimaalselt 26,1% väiksemad. Kolme testi puhul olid tulemused kuni 8,9% suuremad valemiga (1.7) väärtusest.

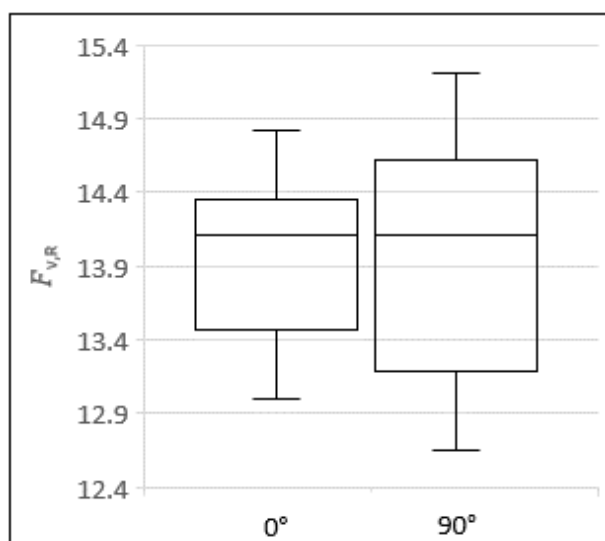
Erinevus võib tuleneda sellest, et Blaß ja Uibel [1] tuletasid valemid (1.6) ja (1.7) katsetest, kus paljud katsekehad koosnesid õhukestest lamellidest. See suurendab muljumistugevust ja seega võib paksemate lamellide puhul valem ülehinnata CLT muljumistugevust.

3.5 Liitekatsed

Katseliselt leitud liite maksimaalne kandevõime on jagatud naaglite arvuga, et leida liite ühe naagli kandevõime. Järgnevalt on esitatud katsete keskmised väärtused, 5% fraktil ja variatsioonikoefitsendid (vt Tabel 3.7). Väheste katsete tõttu on osade naaglitüüpide puhul esitatud ainult keskvaartused. Karp-vurrud diagrammil on võrreldud SBD 7x95 naagli ühe naagli kandevõimet vastavalt katsekeha välimiste lamellide suunale (vt Joonis 3.9). Lisas 3 on esitatud liitekatsete tulemused kõikide katsekehade kohta ning lisa 4 katsete koondgraafik.

Tabel 3.7. Liite ühe naagli kandevõime

α	Naagli tüüp	$F_{v,R,mean}$ kN	$F_{v,R,05}$ kN	CV %
0°	SBD 7,5x95	14,0	13,0	4,2
	SBD 7,5x195	14,7	-	-
	WS 7x153	10,6	-	-
90°	SBD 7,5x95	14,0	12,7	6,6
	SBD 7,5x195	14,9	-	-
	WS 7x153	12,5	-	-

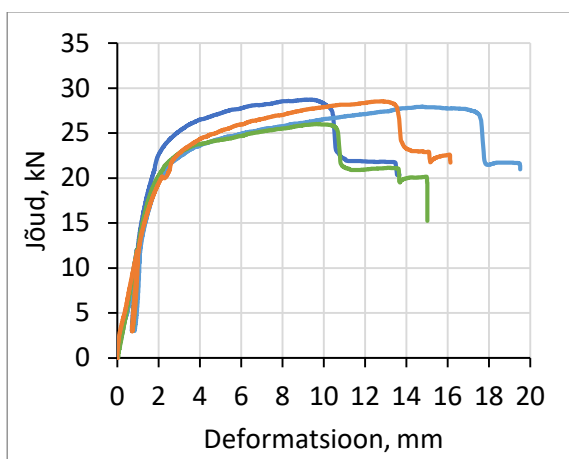


Joonis 3.9. Naagli SBD 7.5x95 ühe löike kandevõime võrdlus vastavalt välimiste lamellide suunale

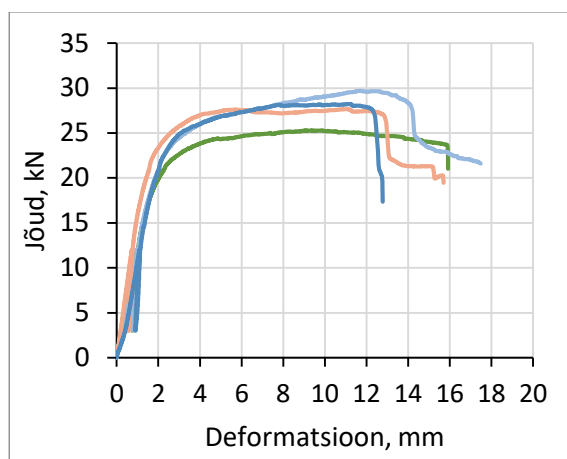
Analüüsid SBD 7,5x95 naagli katseandmeid võib väita, et välimiste lamellide suund ei mõjuta oluliselt liite kandevõimet. Keskmised väärtused olid esimese grupi (0°) puhul 13,98 kN ja teise grupi (90°) puhul 13,96 kN, erinedes omavahel vaid 0,14%. Samas on teise grupi ühe naagli kandevõime vahemik oluliselt suurem kui esimesel, vastavalt 14,11...15,21 kN ja 13,00...14,82 kN ning variatsioonikoefitsendid vastavalt 6,3% ja 4,2%.

SBD 7,5x195 naagliga keskmised katsetulemused olid esimesel grupil 14,73 kN ja teisel 14,88 kN, erinedes omavahel 1,3%. Variatsioonikoefitsient esimese grupi puhul 4,4%, mis ei erine suurelt lühema naagli vastavast väärtusest. SBD 7,5x195 kinniti tulemused on 95 mm pikkusega naagli omast keskmiselt 6,1% suuremad.

Allolevatel graafikutel on esitatud kahe SBD 7,5x95 naaglitega liidete katsegraafikud, kus Joonis 3.10 kujutab jõusuunaliste välimiste lamellidega ja Joonis 3.11 jõu suunaga risti olevate välimiste kihtidega katsekehasid.



Joonis 3.10. 0° katsekehade jõu-deformatsiooni diagramm 2 x SBD 7.5x95 naagliga

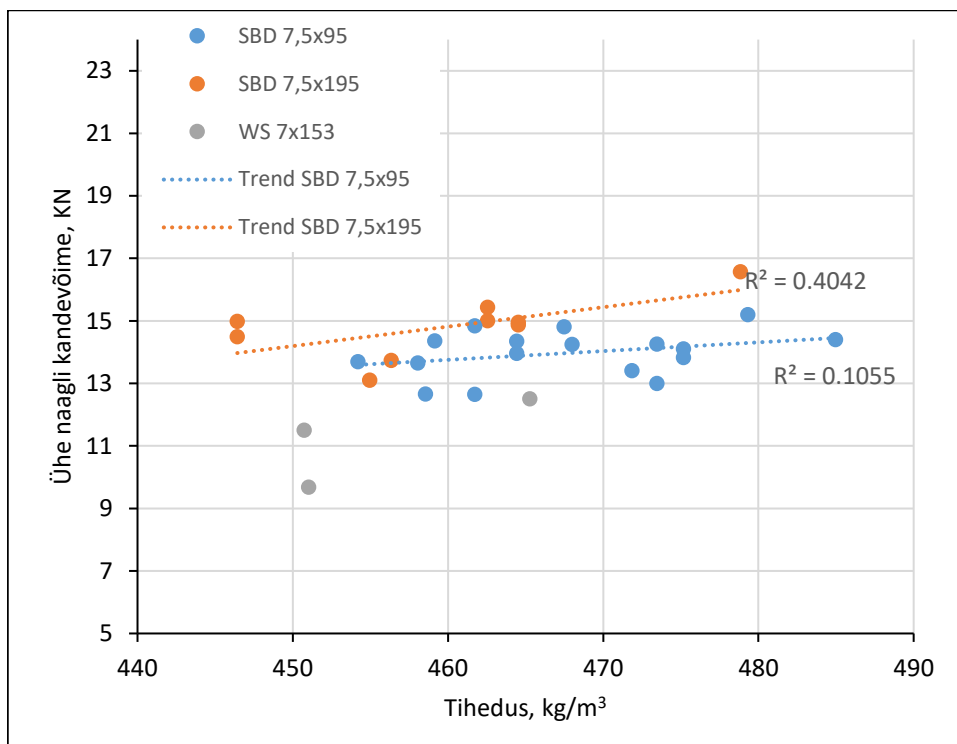


Joonis 3.11. 90° katsekehade jõu-deformatsiooni diagramm 2 x SBD 7.5x95 naagliga

Jõu suunaga paralleelsete välimiste lamellidega katsekehade maksimaalsele kandevõimele vastav siire jääb vahemikku 9,4...14,7 mm ja on keskmiselt 11,7 mm. Jõu suunaga risti olevate välimiste lamellidega katsekehade maksimaalsele kandevõimele vastav siire jääb vahemikku 8,6...11,6 mm ja on keskmiselt 10,6 mm.

Esimese grupi puhul toimus kõikide katsekehade purunemine vahetult peale maksimaalse jõu saavutamist. Teise grupi puhul kolmel juhul neljast järgnes maksimaalse jõu saavutamisele kandevõime vähenemine siirde suurenemisega ja purunemine toimus oluliselt suurema deformatsiooni juures.

Järgneval punktdiagrammil on kujutatud tiheduse ja ühe naagli kandevõime vaheline seos. Kasutatud on iga katsekeha keskmist tihedust ning katsetulemustest ühele naaglile taandatud jõu suurust (vt Joonis 3.12).

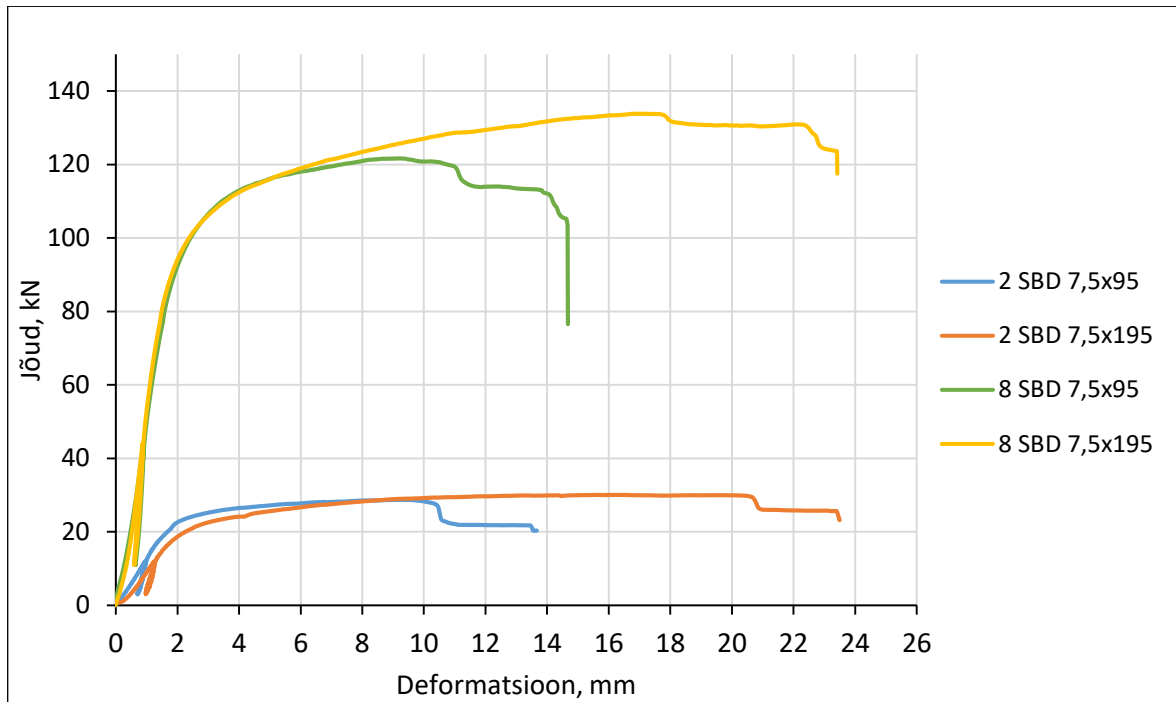


Joonis 3.12. Tiheduse ja ühe naagli kandevõime vaheline seos

Graafikult nähtub SBD 7,5x195 naagli puhul suurem seos kandevõime ja puidu tiheduse vahel kui SBD 7,5x95 naaglil.

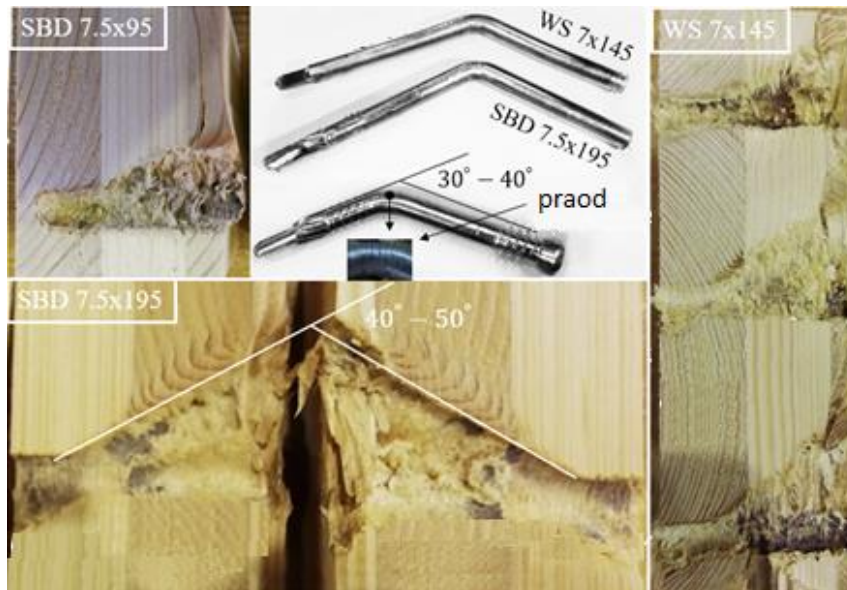
3.5.1 Kõieefekti ja naagli voolavuspiiri mõju kandevõimele

Kõieefekti mõju analüüsimiseks kasutati SBD 7,5x195 naagleid, mis paigaldati selliselt, et keermetatud osad ulatuksid puidust välja ja seega ei mõjutaks liite kandevõimet. Graafikul on kujutatud 2 ja 8 naagliga liited kus ühe variandi puhul on kasutatud SBD 7,5x95 ja teise puhul SBD 7,5x195 naagleid (vt Joonis 3.13).



Joonis 3.13. Kõieefekti mõju liite kandevõimele

Jooniselt nähtub, et lühemate naaglite puhul, mille keerrestatud osad paiknesid puidus, toimub purunemine oluliselt varem kui pikemate naaglite puhul. Selle põhjuseks võib olla naagli pikkus – lühem naagel ei ulatunud läbi katsekeha ning selle puurots ei töötanud tervikuna kandevõimel kaasa. Järgneval joonisel on näha lühema naagli teravikupoelse otsa muljumispind, mille põhjal võib oletada pingete koondumist sisemistele kihtidele (vt Joonis 3.14). Joonisel on märgitud ka sama tüüpi pikema ja lühema naagli paindenurgad, vastavalt 30°-40° SBD 7,5x95 ja 40-50° SBD 7,5x195 puhul. Pikemate SBD tüüpi kinnititega liited purunesid suurema deformatsiooni juures, mis seletab ka suuremaid paindenurkasid.



Joonis 3.14. Naaglite deformatsioonid ja muljumispinnad

Kõikide katsekehade puhul sai määravaks valemi (1.1) purunemisvariant (g) ehk puidu muljumine naagli paindest keskmises terasplaadis, mida kinnitab hilisem katsekehade muljumispindade uurimine. Katsekeha deformatsiooni pildilt on näha, et WS tüüpi naagli äärmine muljumispind on väiksem kui SBD puhul (vt Joonis 3.14). Selle põhjal võib eeldada, et väiksema voolavuspiirile vastava paindemomendiga WS naagli puhul hakkas purunemine lähenema valemi (1.1) variandile (h) ehk naaglis hakkasid katsekeha äärte lähedale tekkima plastsed liigendid. Järgnevalt on kujutatud mitme naagliga liite iseloomulik pilt pärast katsetamist (vt Joonis 3.15).



Joonis 3.15. Mitme naagliga liite iseloomulik pilt pärast katsetamist, vasakul 90° ja paremal 0° välimiste lamellide suunaga katsekeha

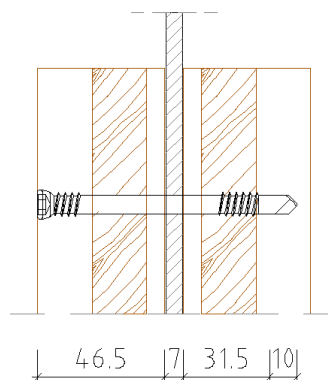
SBD 7,5x195 naaglitega katsekehad hakkasid jõu suurenedes piki sissefreesitud pilu lõhenema, mille vältimiseks tugevdati liite ümbrus kruvidega (vt Joonis 3.16). Sarnase probleemi puudumine lühema, SBD 7,5x95, naagli puhul kinnitab köieefekti olemasolu.



Joonis 3.16. SBD 7,5x195 naaglitega katsekehade tugevdamine

3.6 Liitekatsete võrdlus Johansen'i valemitega

Liite kandevõime arvutamisel SBD 7,5x95 naagli puhul arvestatakse naagli pikkusest maha puurotsa pikkus, kuna see on erineva ristlõikega kui ülejäänud osa. Ühe lõike kandevõime arvutatakse mõlemale poolele eraldi, arvestades naagli tingliku pikkusega 85 mm. Esimesel juhul arvestatakse t_1 väärtuseks 46,5 mm ja teisel 31,5 mm (vt Joonis 3.17). Ühe naagli kandevõime leidmiseks summeeritakse mõlema lõike jaoks valemiga (1.1) arvutatud tulemused.



Joonis 3.17. SBD 7,5x95 naagli süvistuspikkused

Eelneva kontrolli tulemusena selgus, et kõikidel juhtudel saab määravaks valemi (1.1) teine purunemise variant (g) ja järgnevates võrdlustes ongi esitatud ainult antud valemi tulemused. Kandevoime arvutamisel ei ole arvestatud köieefektiga. Järgnevates punktides on võrreldud liite ühe naagli katselisi kandevoimeid teoreetilise valemitega, kombineerides puidu muljumistugevuse ja naagli paindetugevuse arvutuslike ning katselisi tulemusi.

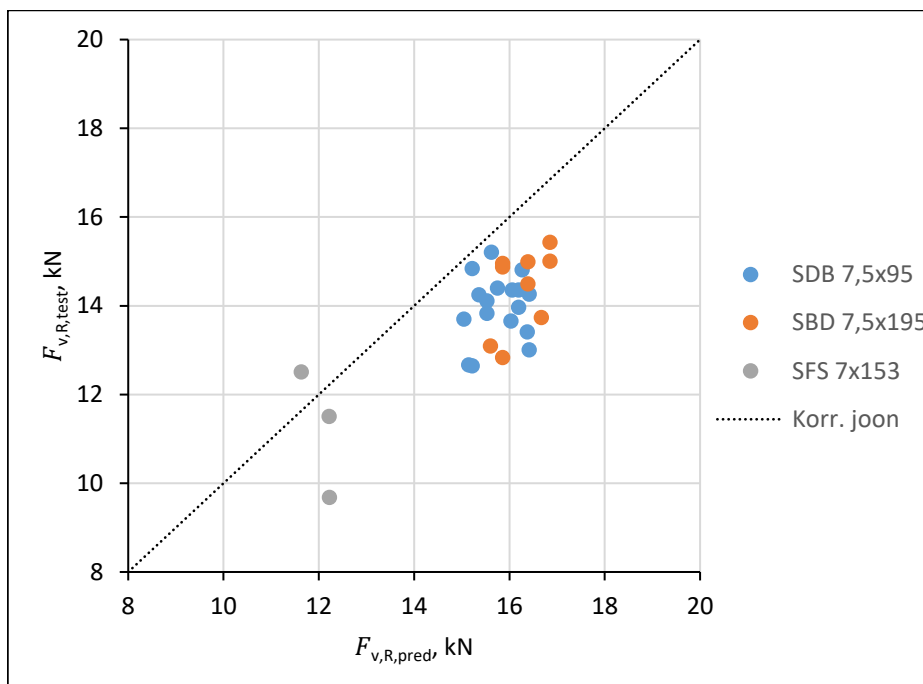
Katsetulemustest selgus, et SBD naaglitega liitekandevoime ei olene välimiste lamellide suunast ja seetõttu on järgmistes tabelites arvutuslikud kandevoimed koondatud ainult naaglitüübi alusel.

3.6.1 Kandevoime kasutades katselist M_y ja arvatud f_h väärtusi

Antud variandi puhul kasutatakse valemiga (1.7) arvatud puidu muljumistugevusi ja katseliselt leitud naagli voolavuspiirile vastava paindemomendi väärtusi ($M_{y,R,45^\circ,mean}$). Katsel paindusid naaglid 30° - 50° ja seetõttu kasutatakse arvutustes katseliselt leitud naagli 45° vastavat paindemomendi väärtust. Arvutustes kasutatakse ristiolevate lamellide suhet mittearvestavat valemit (1.6), kuna katsekehasid hõõveldati enne muljumiskatseid ning täpseid kihtide paksuseid ei määratud. Eelneva võrdluse põhjal nähtub, et kahe valemi tulemuste erinevused ei ole suured – seega on valemi (1.6) kasutamine õigustatud (vt Tabel 3.6). Muljumistugevuse arvutamisel kasutatakse iga katsekeha keskmist korrigeeritud tihedust. Järgnevalt on esitatud ühe naagli arvutustugevuse keskmised väärtused ning võrdlus katsetulemustega (vt Tabel 3.8 ja Joonis 3.18).

Tabel 3.8. Ühe naagli kandevoime katselise M_y ja arvatud f_h väärtustega

Naagli tüüp	$F_{v,R,test,mean}$ kN	$F_{v,R,pred,mean}$ kN	Erinevus %
SBD 7.5x95	14,0	15,8	+13,0
SBD 7.5x195	14,8	16,3	+9,8
WS 7x153	11,2	12,0	+7,0



Joonis 3.18. Katselise M_y ja arvatud f_h väärtustega arvatud liitekandevõime võrdlus katseliste tulemustega. Kasutades kandevõime arvutamiseks arvutuslike parameetreid on tulemused SBD 7x95 naagli puhul keskmiselt 13% ja SBD 7x195 puhul 9,8% suuremad kui katsetulemused. WS 7,5x153 naagli on tulemused keskmiselt 7,0% suuremad kui katselised tulemused, aga väheste tulemuste tõttu ei saa selle põhjal veel kindlaid järeldusi teha.

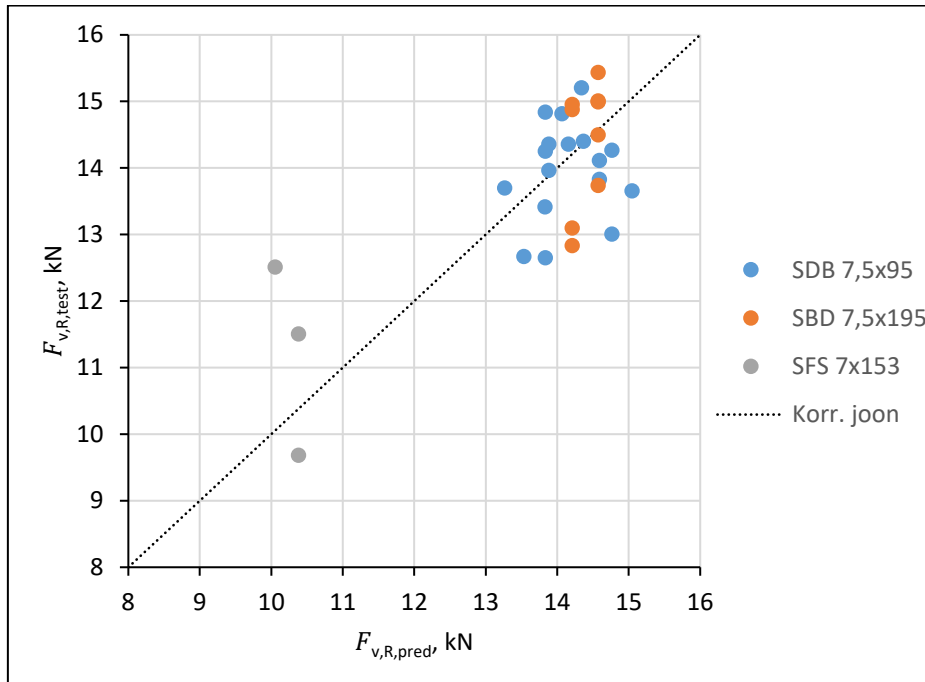
Arvutuslikult suurema liitekandevõime põhjuseks on Blaß ja Uibel [1] valemiga (1.6) arvatud muljumistugevuse kasutamine, sest sellega leitud tulemused on kuni 20% suuremad katseliselt määratud väärtustest (vt Tabel 3.6).

3.6.2 Kandevõime kasutades katselist M_y ja f_h väärtusi

Antud variandi puhul kasutatakse katseliselt leitud keskmisi puidu muljumistugevusi (vt Tabel 3.5) ja katseliselt leitud naagli voolavuspiirile vastava paindemomendi väärtusi (vt Tabel 3.3, $M_{y,R,45^\circ,mean}$). Järgnevalt on esitatud ühe naagli arvutustugevuse keskmised väärtused ning võrdlus katsetulemustega (vt Tabel 3.9 ja Joonis 3.19).

Tabel 3.9. Ühe naagli kandevõime katseliste M_V ja f_h väärtustega

Naagli tüüp	$F_{v,R, \text{test, mean}}$ kN	$F_{v,R, \text{pred, mean}}$ kN	Erinevus %
SBD 7.5x95	14,0	14,0	0,0
SBD 7.5x195	14,8	14.4	-2,7
WS 7x153	11,2	10,2	-8,9



Joonis 3.19. Katselise M_V ja f_h väärtustega arvatud liitekandevõime võrdlus katseliste tulemustega

Kasutades katseliselt leitud keskmist muljumistugevust ja voolavuspiirile vastavat paindemomenti on SBD 7,5x95 naagli puhul keskmine väärtus võrdne katsetulemustega ja SBD 7,5x195 puhul 2,7% väiksem. WS 7x153 puhul on arvutuslikud tulemused keskmiselt 8,9% väiksemad

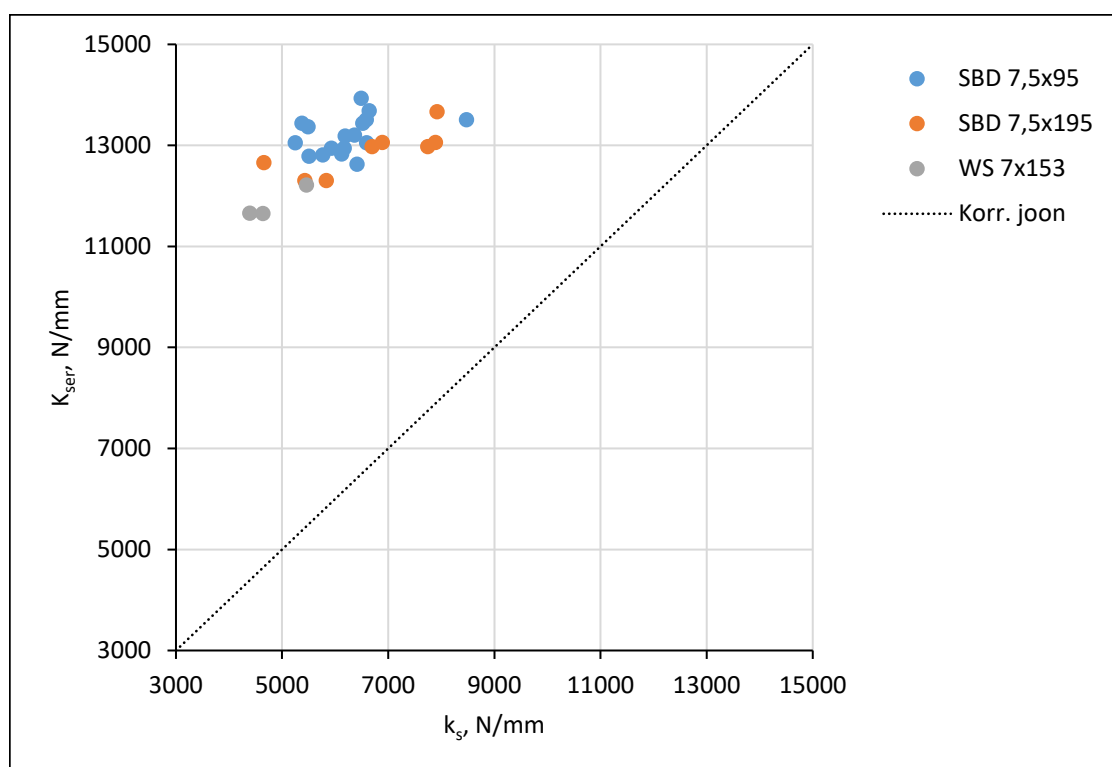
3.7 Liidete jäikus

Liidete katsetulemuste alusel on valemiga (2.1) ja (2.2) arvatud iga liite järeleandvus ehk nihkemoodul (k_s). Valemiga (1.11) on arvatud liite teoreetiline kasutuspiirseisundile vastav nihkemoodul (K_{ser}). Arvutuses on kasutatud iga katsekeha keskmist tihedust. Kuna tegemist on puit-terasega liidetega, siis vastavalt standardile Eurokoodeks 5 on valemi (1.11) tulemused korrutatud teguriga 2,0. Järgnevalt on esitatud arvutustulemuste keskmised väärtused ühe naagli kohta (vt Tabel 3.10). Tulemused on koondatud vastavalt välimiste lamellide suunale ja liites

kasutatud naaglite. Joonisel on graafiliselt võrreldud katsetulemuste väärtusi arvutuslikega (vt Joonis 3.20).

Tabel 3.10. Katsetulemuste ja Eurokoodeks 5 põhjal arvatud nihkemoodulite võrdlus

α	Naagli tüüp	$k_{s,mean}$ N/mm	CV %	$K_{ser,mean}$ N/mm	Erinevus %
0°	SBD 7,5x95	5877,6	9,1	13144,6	+123,6
	SBD 7,5x195	6268,3	-	12654,7	+101,9
	WS 7x153	4509,8	-	11655,2	+158,4
90°	SBD 7,5x95	6534,8	12,0	13239,9	+102,6
	SBD 7,5x195	6834,4	-	13110,5	+91,8
	WS 7x153	5453,8	-	12217,6	+124,0



Joonis 3.20. Katseliselt leitud ja arvutusliku nihkemooduli võrdlus

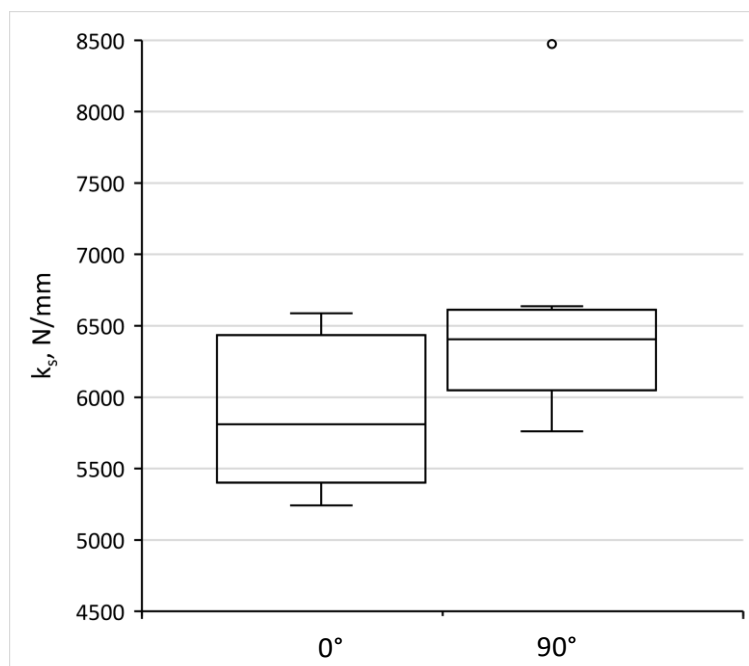
Katsetulemustest arvatud nihkemooduli väärtused on esimese grupi SBD 7,5x95 naagli puhul keskmiselt 5877,6 N/mm ja variatsioonikoefitsent 9,1%. Teise grupi sama naagli keskmine tulemus on 6534,8 N/mm ja variatsioonikoefitsent 12,0, aga antud katsete juures esines ka üks ekstreemne väärtus. Kui sellega mitte arvestada oleksid väärtused vastavalt 6292,4 N/mm ja 5,0%. Teise grupi tulemused SBD 7,5x95 naagliga on keskmiselt 11,2% suuremad esimese grupi väärtustest. SBD 7,5x195 naagli keskmine tulemus on esimese grupi puhul 6268,3 N/mm ja teisel grupil keskmiselt 6834,4 N/mm, mis on 9,0% suurem. Ka WS tüüpi naagli juures on sama tendents – teise grupi väärtus on 20,9% suurem esimese grupi omast. Katsetulemustele tuginedes võib väita, et liite järeleandvus sõltub CLT välimiste lamellide suunast.

Andmestest selgub, et Eurokoodeks 5 valem (1.11) ülehindab suurelt käesoleva lõputöö raames läbiviidud liidete tegelikku jäikust. Erinevused on 0° grupi SBD 7,5x95 naagli puhul keskmiselt 123,6%, minimaalselt 98,1% ja maksimaalselt 150,1%. SBD7,5x195 naagliga on erinevused keskmiselt 101,9%, minimaalselt 67,6% ja maksimaalselt 126,7%. Veel suurem erinevus oli WS tüüpi naagliga – keskmiselt 158,4%. 90° grupi puhul on erinevused SBD 7,5x95 naagli puhul keskmiselt 102,6%, minimaalselt 59,4% ja maksimaalselt 122,3%. SBD7,5x195 naagliga on erinevused keskmiselt 97,8%, minimaalselt 65,6% ja maksimaalselt 172,0%. WS tüüpi naagli keskmine erinevus oli 124,0%. Suurem erinevus WS naagli puhul võib olla tingitud väiksemast tugevusest ja asjaolust, et teoreetiline valem ei võta arvesse kinniti tugevust vaid ainult läbimõõtu.

SBD 7,5x95 naaglitega liidete suurem erinevus arvutuslike ja katseliste tulemuste vahel võib olla tingitud sellest, et antud naaglid oli lühemad kui katsekeha paksus ja seega ei ulatunud täielikult läbi puitelemendi.

Eurokoodeks 5 valemi (1.11) liite jäikuse ülehindamist on tähendanud ka varasemad uurimused nihkemooduli teemal [10].

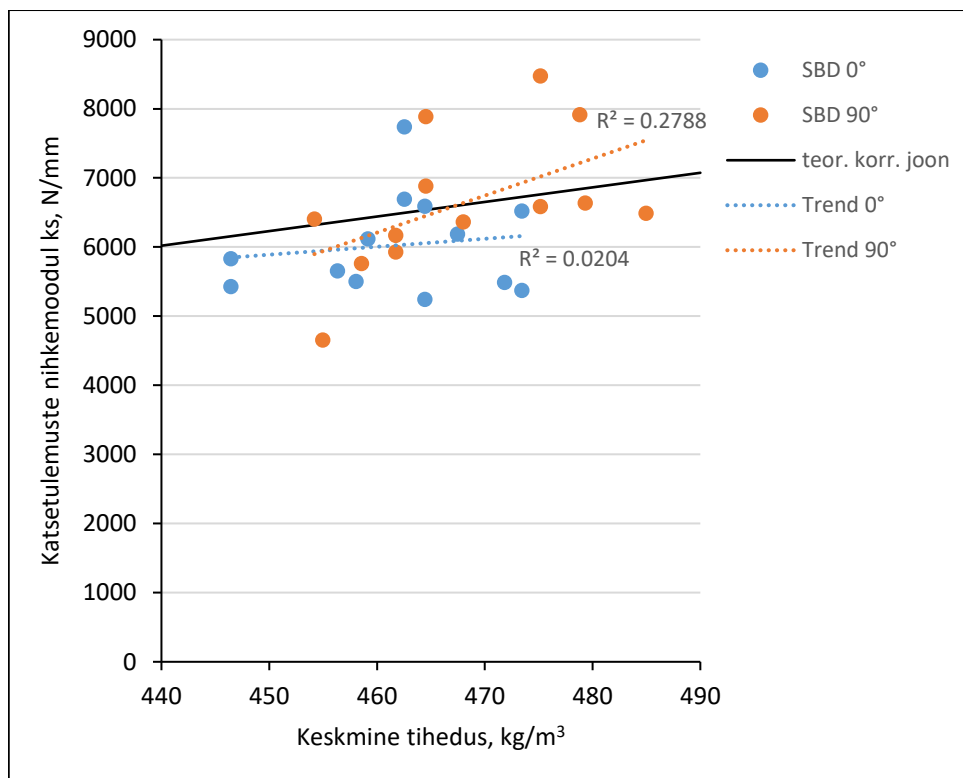
Järgnevalt on karp-vurrud diagrammil esitatud SBD 7,5x95 naagli katselise nihkemooduli võrdlus vastavalt CLT välimiste lamellide suunale (vt Joonis 3.21).



Joonis 3.21. SBD naagli nihkemooduli võrdlus CLT välimiste lamellide suuna vahel

Graafik lubab oletada seost nihkemooduli suuruse ja CLT välimiste lamellide suuna vahel. 0° grupi keskmine väärtus on 5877,6 N/mm ja mediaan 5810,5 N/mm. Teise grupi puhul keskmine väärtus 6534,8 N/mm ja mediaan 6406,9 N/mm, mis esimese grupi tulemustest vastavalt 11,2% ja 10,3% suuremad. Teises grupis esines ka üks ekstreemne väärtus – 8473,9 N/mm.

Järgnevalt on võrreldud katselisi nihkemooduli väärtusi katsekehade keskmise tihedusega. Graafikul on esitatud SBD naagli väärtused vastavalt katsekeha välimiste lamellide suunale, mõlema grupi trend ning teoreetiline korrelatsiooni joon (vt Joonis 3.22).



Joonis 3.22. Katselise nihkemooduli ja tiheduse vaheline seos

Mõlema grupi tulemused on hajutatud, kuid teise grupi (90°) puhul on näha suuremat seost tiheduse ja katselise nihkemooduli väärtuse vahel kui esimesel grupil (0°).

KOKKUVÕTE

Käesoleva töö põhieesmärgiks oli ristkihtliimpuitu sissefreesitud terasplaadiga ja puurotsaga naaglitega kinnitatud liidete tugevus- ja jäikusomaduste määramine ning võrdlemine teoreetiliste tulemustega. Katsetamisel kasutati 20 mm paksustest lamellidest koosnevat 5-kihilist CLT katsekehasid, mille välimised kihid olid kas risti- või pikisuunas. Metallplaadi kinnitamiseks kasutati SFS-Intec ning Rotho Blaas puurotsaga naagleid. Lisaks lõigati katsekehade nurkadest välja proovitükid, mida kasutati muljumistugevuse määramiseks. Magistritöö raames teostatud katsed viidi läbi vastavalt kehtivatele standarditele.

Tiheduse määramiseks võeti igast katsekehast proovitükk mis kaaluti ja mõõdeti ning seejärel asetati kuivatuskappi kuni püsiva kaalu saavutamiseni. Pärast seda määrati proovitükkidele kuivkaal ning arvutati niiskussisaldus. Niiskussisalduse baasil korrigeeriti katsekehade mõõdetud tihedust, et see vastaks 12% niiskusele.

Muljumisel ei toimunud katsekehade piki kiudu lõhestumist, mis kinnitab CLT risti olevate kihtide lukustavat efekti. Katsete tulemusele tuginedes võib väita, et CLT välimiste lamellide suund ei mõjuta oluliselt muljumistugevust – erinevus kahe grupi vahel oli 3,9%. Katselisi tulemusi võrreldi Blaß ja Uibel poolt tuletatud empiiriliste valemite tulemustega, mille arvutamiseks kasutati korrigeeritud katsekehade tihedusi. Jõu suunaliste välimiste lamellidega katsekehade teoreetilised muljumistugevuse väärtused olid keskmiselt 20% ja ristisuunaliste välimiste kihtidega katsekehade puhul keskmisel 15% suuremad kui katseliselt saadud tulemused.

Liitekatsed teostati 2, 8 ja 10 naagliga ühes liites ning kasutades kolme erinevat kinnitit: Rotho Blaas kõrgtugevast terasest SBD 7,5x95 ja SBD 7,5x195; ning SFS-Intec WS 7x153. Mõlemale tüübile määrati katseliselt tugevusparameetrid, mida kasutati valemiga kandevõime arvutamiseks. Eurokoodeks 5 järgi arvutatud naagli voolavuspääle vastav paindemoment oli WS naaglil keskmiselt 19% ja SBD naaglil 30% väiksem kui katseliselt saadud väärtused. Erinevused annavad alust kahelda standardis esitatud valemi vastavuses naagli tegelikele omadustele. Liited, kus kasutati pikemaid naagleid ja mille keermestatud osa ei asunud puidus, vajasisid kruvidega tugevdamist, et vältida piki sissefreesitud pilu lõhestumist. SBD 7,5x95 naagli puhul, mille keermestatud otsad asusid katsekehas, see vajadus puudus, mis kinnitab köieefekti olemasolu.

Tulemuste analüüsist selgus, et CLT välimiste lamellide suund ei mõjute liite kandevõimet. Liidete katsetulemusi võrreldi Johansen poolt tuletatud valemitega ning kõikidel juhtudel sai määravaks purunemisviis (g). SBD 7,5x95 puhul arvestati naagli pikkus puurotsa võrra väiksem. Kasutades katseliselt leitud naagli paindemomenti ja tiheduse järgi arvatud muljumistugevust olid tulemused SBD 7,5x95, SBD 7,5x195 ja WS 7x153 naaglit vastavalt 13,0%, 9,8% ja 7,0% suuremad kui katseliselt leitud väärtused. Paremad tulemused saadi kasutades katseliselt leitud muljumistugevuse väärtust. Sellisel juhul oli erinevused vastavalt 0,0%, -2,7% ja -8,9%. Võib järeldada, et kasutades katseliselt leitud materjalide omadusi saavutatakse teoreetilise valemiga tegelikkusele lähedane tulemus.

Katsetulemuste põhjal arvatud liidete jäikus oli 90° grupis SBD 7,5x95 naaglit keskmiselt 11% ja SBD 7,5x195 naaglit 9% suurem kui esimese grupi (0°) väärtus. See lubab eeldada seost liite jäikuse ja CLT välimiste lamellide suuna vahel. Võrreldes katsetulemusi standardis Eurokoodeks 5 esitatud liite järeleandvuse valemi tulemustega olid erinevused suured. Teoreetilised väärtused olid SBD 7,5x95 naagli puhul 0° grupis keskmiselt 124% ja 90° grupis 103% suuremad katselistest tulemustest. SBD 7,5x195 naaglit olid väärtused vastavalt 102% ja 92% suuremad. Nende tulemuste põhjal võib väita, et Eurokoodeks 5 valem ülehindab suurelt käesoleva lõputöö raames kasutatud liidete jäikust.

Autor loodab, et käesoleva töö raames läbiviidud katsed ja võrdlused teoreetiliste valemitega annavad alust ristkihtliimpuidu liidete täpsemaks uurimiseks ning arvutusmodelite täiustamiseks.

SUMMARY

The purpose of this thesis was to determine the strength and stiffness properties of slotted-in steel plate connections with self-perforating dowels in CLT and compare the results with theoretical values. The specimen consisted of five 20 mm layers, and outer layers were either parallel or perpendicular to the loading direction. Self-perforating dowels from SFS-Intec and Rotho Blaas were used for fixing. Also, pieces were cut off from the corners of the test pieces to determine the embedment strength. The tests discussed in the master's thesis were carried out according to current standards.

To determine the density, a test piece was cut from each specimen, weighed and measured, and then placed in the oven until a constant weight was reached. After this, the dry weight was determined, and the moisture content was calculated. Based on the moisture content, the measured density of the test pieces was adjusted to correspond to 12% moisture.

No splitting along the fiber was observed during embedment tests, which confirms the locking effect of the cross-layers of CLT. Based on the results of the experiments, it can be stated that the direction of the outer lamellae of CLT does not significantly affect the embedment strength - the difference between the two groups was 3.9%. Experimental results were compared with the results of empirical formulas derived from Blaß and Uibel, which were calculated using corrected sample densities. The theoretical embedment strength values of the force-oriented exterior lamellae were 20% higher on average and 15% higher on the test specimens with transverse outer layers than the experimental results.

Joint tests were performed with 2, 8 and 10 dowels and using three different fasteners: Rotho Blaas SBD 7.5x95 and SBD 7.5x195; and SFS-Intec WS 7x153. For both types, the strength parameters were experimentally determined. The bending moment corresponding to the yield strength calculated according to Eurocode 5 was on average 19% lower on the WS dowel and 30% lower on the SBD dowel than the experimental values. The differences give reason to doubt the accuracy of the formula. The joints using the longer dowels needed reinforcement with screws to prevent cracking along the milled slot. For the SBD 7.5x95, the threaded ends were in the test piece, and there was no need for that which confirms the existence of rope effect.

The analysis of the results showed that the direction of the outer lamellae of CLT does not affect the load-bearing capacity of the joint. The test results of the joints were compared with the formulas derived by Johansen, and in all cases, the failure mode (g) became determinant. In the case of SBD 7.5x95, the length of the spike was calculated by a drill bit smaller. Using experimental dowel bending moment and embedment strength, the results for SBD 7.5x95, SBD 7.5x195, and WS 7x153 were 13.0%, 9.8%, and 7.0%, respectively, higher than the experimental values. Better results were obtained using an experimentally found embedment strength values. In this case, the differences were 0.0%, -2.7% and -8.9%, respectively. It can be concluded that when using the properties of the materials found experimentally, a result close to the theoretical formula is achieved.

Based on the test results, the stiffness calculated for the joints in the 90° group was 11% higher for SBD 7,5x95 and 9% higher for SBD 7,5x195 than the first group (0°) results. This indicates a connection between the rigidity of the joint and the direction of the outer lamellae of the CLT. Comparing the test results with the results calculated with the Eurocode 5 formula, the differences were large. The theoretical values for the SBD 7.5x95 dowel in the 0° group were on average 124% higher and in the 90 ° group 103% higher than the experimental results. On SBD 7.5x195, the values were 102% and 92% higher respectively. Based on these results; the Eurocode 5 formula overestimates the rigidity of the joints used in this thesis.

The author hopes that the experiments and comparisons of the theoretical formulas carried out within the thesis will provide a basis for a more detailed examination of the CLT connections and the improvement of calculation models.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] T. Uibel ja H. J. Blaß, „Tragfähigkeit von stiftförmigen Verbindungsmitteln in,“ Universitätsverlag Karlsruhe, Karlsruhe, 2007.
- [2] H. J. Blaß ja C. Sandhaas, Timber Engineering. Principles for Design, Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2017.
- [3] „CLT Ristkihtpuit,“ Peetri Puit OÜ, [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.arcwood.ee/et/clt-ristkihtpuit>. [Kasutatud 08 mai 2019].
- [4] A. Just, „Puitkonstruktsioonide liited,“ *Ajakiri Ehitaja*, pp. 42-44, jaanuar 2005.
- [5] Leonardo da Vinci Pilot Project, „HANDBOOK 1 - Timber structures,“ 2008. [Võrgumaterjal]. Available: http://fast10.vsb.cz/temtis/documents/Handbook_1_one_V2_2.pdf. [Kasutatud 22 mai 2019].
- [6] K. W. Johansen, „Theory of timber connections,“ *International Association for Bridge and Structural Engineering*, nr 9, pp. 249-262, 1949.
- [7] „EVS-EN 1995-1-1:2005. Eurokoodeks 5: Puitkonstruktsioonide projekteerimine. Osa 1-1: Üldist. Üldreeglid ja reeglid hoonete projekteerimiseks,“ Eesti standardikeskus, Tallinn.
- [8] J. Hohenwarter, *Vergleich der Lochleibungsfestigkeit in Folge von Zug- und Druckbelastung. (MSc)*, Graz: Technische Universität Graz, 2014.
- [9] E. Tuhkanen, J. Mölder ja G. Schickhofer, „Influence of number of layers on embedment strength of dowel-type connections for glulam and cross-laminated timber,“ *Engineering Structures*, kd. 176, pp. 361-368, 2018.
- [10] C. Sandhaas ja J.-W. G. d. Kuilen, „Strength and stiffness of timber joints with very high strength steel dowels,“ *Engineering Structures*, kd. 131, pp. 394-404, 2017.
- [11] „EVS-EN 26891:1999. Puittarindid. Mehaaniliste kinnitusdetailidega liited. Tugevus- ja deformatsiooninäitajate määramise põhialused,“ Eesti standardikeskus, Tallinn.
- [12] H. J. Blaß, A. Bienhaus ja V. Krämer, „Effective bending capacity of dowel-type,“ *Proceedings of the International RILEM Symposium Joints in Timber*, kd. 22, pp. 71-88, 2001.
- [13] A. Misconel, M. Ballerini ja J. W. v. d. Kuilen, Steel-to-timber joints of beech-LVL with very high strength steel dowels, Viin: WCTE 2016 - World Conference on Timber Engineering, 2016.
- [14] E. J. Just, K. Öiger ja A. Just, Puit- ja puidupõhised konstruktsioonid, Tallinn: TTÜ kirjastus, 2015.
- [15] „EVS-EN 383:2007. Timber Structures - Test methods - Determination of embedment strength and foundation values for dowel type fasteners,“ Eesti standardikeskus, Tallinn.
- [16] „HBM,“ [Võrgumaterjal]. Available: www.hbm.com. [Kasutatud 6 Mai 2019].
- [17] „EVS-EN 409:2009. Puittarindid. Tüübelkinnitusdetailide volavuspiirile vastava paindemomendi määramine. Naelad,“ Eesti standardikeskus, Tallinn.
- [18] „EVS-EN 1383:2016. Timber structures - Test methods - Pull through resistance of timber fasteners,“ Eesti standardikeskus, Tallinn, 2016.
- [19] „KIT,“ Karlsruhe Institute of Technology, [Võrgumaterjal]. Available: www.kit.edu.
- [20] „EVS-EN 384:2016. Structural timber - Determination of characteristic values of mechanical properties and density,“ Eesti standardikeskus, Tallinn.

LISAD

Lisa 1. Liitekatsekehade tähistused

Katsekeha	Seeria	Naagli tüüp	Naaglite arv	Lõikepindade arv
0°				
K0-1	1	SBD-7.5x95	2	4
	2	SBD-7.5x95	2	4
K0-2	1	SBD-7.5x95	2	4
	2	SBD-7.5x95	2	4
K0-3	-	SBD-7.5x95	8	16
K0-4	-	SBD-7.5x95	8	16
K0-5	-	SBD-7.5x95	8	16
K0-6	-	SBD-7.5x95	10	20
K0-1L	1	SBD-7.5x195	2	4
	2	SBD-7.5x195	2	4
K0-2L	1	SBD-7.5x195	2	4
	2	SBD-7.5x195	2	4
K0-3L	-	SBD-7.5x195	8	16
K0-SFS-1	-	WS-7x153	8	16
K0-SFS-2	-	WS-7x153	8	16
90°				
K90-1	1	SBD-7.5x95	2	4
	2	SBD-7.5x95	2	4
K90-2	1	SBD-7.5x95	2	4
	2	SBD-7.5x95	2	4
K90-3	-	SBD-7.5x95	8	16
K90-4	-	SBD-7.5x95	8	16
K90-5	-	SBD-7.5x95	8	16
K90-6	-	SBD-7.5x95	8	16
K90-7	-	SBD-7.5x95	10	20
K90-1L	-	SBD-7.5x195	2	4
K90-2L	1	SBD-7.5x195	2	4
	2	SBD-7.5x195	2	4
K90-3L	-	SBD-7.5x195	8	16

Lisa 2. Muljumiskatsete tulemused

Katsekeha tähis	Katsekeha tihedus, kg/m ³	Katseline muljumistugevus, N/mm ²	Valemiga 1.6 arvutatud muljumistugevus, N/mm ²	Erinevus katselise väärtusga, %	Valemiga 1.7 arvutatud muljumistugevus, N/mm ²	Erinevus katselise väärtusga, %
KO-1-1.4.1	438	31.91	34.51	8	33.48	5
KO-1-1.4.2	438	33.23	34.51	4	33.53	1
KO-1-2.4.1	452	25.67	35.76	39	34.53	35
KO-1-2.4.2	452	30.63	35.76	17	34.47	13
KO-1-3.4.1	480	30.16	38.30	27	37.25	24
KO-1-3.4.2	480	25.32	38.30	51	37.22	47
KO-1-4.4.1	472	31.13	37.57	21	36.35	17
KO-1-4.4.2	472	30.23	37.57	24	36.42	20
KO-2.1-1.4.1	450	27.97	35.57	27	34.58	24
KO-2.1-2.4.1	484	33.79	38.72	15	37.57	11
KO-2.1-2.4.2	484	34.50	38.72	12	37.40	8
KO-2.1-3.4.1	450	26.51	35.59	34	34.20	29
KO-2.1-3.4.2	450	33.25	35.59	7	34.27	3
KO-2.1-4.4.1	496	38.65	39.85	3	38.83	0
KO-2.1-4.4.2	496	37.03	39.85	8	38.81	5
KO-3-1.4.1	469	35.72	37.29	4	36.03	1
KO-3-1.4.2	469	36.36	37.29	3	36.12	-1
KO-3-2.4.2	461	31.77	36.56	15	35.34	11
KO-3-3.4.1	441	30.53	34.72	14	33.45	10
KO-3-3.4.2	441	34.13	34.72	2	33.48	-2
KO-3-4.4.1	457	31.61	36.26	15	35.15	11
KO-3-4.4.2	457	30.88	36.26	17	35.17	14
KO-4-1.4.1	492	32.23	39.49	23	38.47	19

Katsekeha tähis	Katsekeha tihedus, kg/m ³	Katseline muljumistugevus, N/mm ²	Valemiga 1.6 arvutatud muljumistugevus, N/mm ²	Erinevus katselise väärtusga, %	Valemiga 1.7 arvutatud muljumistugevus, N/mm ²	Erinevus katselise väärtusga, %
KO-4-1.4.2	492	30.23	39.49	31	38.38	27
KO-4-2.4.1	502	36.31	40.42	11	38.93	7
KO-4-2.4.2	502	31.43	40.42	29	39.19	25
KO-4-3.4.1	427	26.18	33.47	28	32.49	24
KO-4-3.4.2	427	26.25	33.47	28	32.46	24
KO-4-4.4.1	456	29.64	36.14	22	35.17	19
KO-4-4.4.2	456	31.42	36.14	15	35.09	12
KO-6-1.4	482	28.67	38.53	34	37.23	30
KO-6-2.4	504	34.68	40.61	17	39.70	14
KO-6-3.4	491	25.38	39.37	55	38.36	51
KO-SFS-1.4.1	423	24.20	33.14	37	32.16	33
KO-SFS-1.4.2	423	24.73	33.14	34	32.16	30
KO-SFS-2.4.1	480	34.36	38.35	12	37.40	9
KO-SFS-2.4.2	480	32.96	38.35	16	37.40	13
KO-SFS-3.4.1	457	29.27	36.20	24	35.25	20
KO-SFS-4.4.1	444	27.67	35.04	27	33.66	22
KO-SFS-4.4.2	444	27.10	35.04	29	33.70	24
K90-2-1.4.1	489	38.87	35.59	-8	35.68	-8
K90-2-2.4.1	492	34.60	35.86	4	35.81	4
K90-2-2.4.2	492	26.72	35.86	34	35.89	34
K90-2-3.4.1	491	33.94	35.76	5	35.80	5
K90-2-3.4.2	484	33.79	35.23	4	35.24	4
K90-2-4.4.1	425	26.79	30.26	13	29.94	12
K90-2-4.4.2	448	32.27	32.18	0	31.92	-1

Katsekeha tähis	Katsekeha tihedus, kg/m ³	Katseline muljumistugevus, N/mm ²	Valemiga 1.6 arvatud muljumistugevus, N/mm ²	Erinevus katselise väärtusga, %	Valemiga 1.7 arvatud muljumistugevus, N/mm ²	Erinevus katselise väärtusga, %
K90-3-1.4.1	450	29.44	32.31	10	32.10	9
K90-3-1.4.2	450	27.63	32.31	17	32.10	16
K90-3-2.4.1	431	27.79	30.77	11	30.48	10
K90-3-2.4.2	431	25.62	30.77	20	30.50	19
K90-3-3.4.1	502	33.46	36.76	10	36.75	10
K90-3-3.4.2	502	31.60	36.76	16	36.81	16
K90-3-4.4.1	438	24.26	31.33	29	31.19	29
K90-3-4.4.2	438	27.95	31.33	12	31.16	11
K90-4-1.4.1	451	29.64	32.42	9	32.15	8
K90-4-1.4.2	451	27.31	32.42	19	32.18	18
K90-4-2.4.1	443	24.91	31.76	28	31.51	26
K90-4-2.4.2	443	23.70	31.76	34	31.63	33
K90-4-3.4.1	461	28.66	33.24	16	33.08	15
K90-4-3.4.2	461	28.68	33.24	16	33.09	15
K90-4-4.4.1	459	28.54	33.11	16	33.17	16
K90-4-4.4.2	459	28.36	33.11	17	33.22	17
K90-5-1.4.1	499	28.62	36.48	27	36.34	27
K90-5-2.4.1	445	32.31	31.97	-1	31.72	-2
K90-5-2.4.2	445	27.86	31.97	15	31.78	14
K90-5-3.4.1	505	28.06	36.93	32	36.86	31
K90-5-3.4.2	505	33.81	36.93	9	36.85	9
K90-5-4.4.1	493	31.67	35.97	14	35.79	13
K90-5-4.4.2	493	33.16	35.97	8	35.79	8
K90-7-1.4.1	476	29.83	34.54	16	34.66	16

Katsekeha tähis	Katsekeha tihedus, kg/m ³	Katseline muljumistugevus, N/mm ²	Valemiga 1.6 arvutatud muljumistugevus, N/mm ²	Erinevus katselise väärtusga, %	Valemiga 1.7 arvutatud muljumistugevus, N/mm ²	Erinevus katselise väärtusga, %
K90-7-1.4.2	476	26.45	34.54	31	34.60	31
K90-7-2.4.2	518	31.43	38.07	21	37.99	21
K90-7-3.4.1	489	28.02	35.65	27	35.53	27
K90-7-3.4.2	489	29.82	35.65	20	35.51	19
K90-7-4.4.1	483	28.91	35.11	21	35.01	21
K90-7-4.4.2	483	31.70	35.11	11	34.95	10

Lisa 3. Liitekatsete tulemused

Katsekeha tähis	Katsekeha tihedus, kg/m ³	Naaglite arv liites	Liite katseline kandevõime, kN	Liite katseline ühe naagli kandevõime, kN	Valemiga 1.1 (g) arvutatud liite ühe naagli kandevõime (A), kN	Erinevus katselise väärtusga, %	Valemiga 1.1 (g) arvutatud liite ühe naagli kandevõime (A), kN	Erinevus katselise väärtusga, %
K0-1_1	464.4	2	14.4	14.36	16.19	13	13.89	-3
K0-1_2	464.4	2	14.0	13.97	16.19	16	13.89	-1
K0-1L	446.4	2	15.0	14.99	16.38	9	14.57	-3
K0-1L-2	446.4	2	14.5	14.50	16.38	13	14.57	1
K0-2_1	473.5	2	13.0	13.01	16.41	26	14.77	14
K0-2_2	473.5	2	14.3	14.27	16.41	15	14.77	4
K0-2L	462.6	2	15.0	15.01	16.85	12	14.57	-3
K0-2L-2	462.6	2	15.4	15.44	16.85	9	14.57	-6
K0-3	458.1	8	13.7	13.66	16.03	17	15.05	10
K0-3L	456.3	8	13.7	13.74	16.67	21	14.57	6
K0-4	467.5	8	14.8	14.82	16.27	10	14.07	-5
K0-5	459.2	8	14.4	14.36	16.06	12	14.16	-1
K0-6	471.8	10	13.4	13.41	16.37	22	13.83	3
K0-SFS-1	451.0	8	9.7	9.68	12.22	26	10.38	7
K0-SFS-2	450.7	8	11.5	11.51	12.21	6	10.38	-10
K90-1_1	461.7	2	12.7	12.65	15.21	20	13.84	9
K90-1_2	461.7	2	14.8	14.84	15.21	3	13.84	-7
K90-1L	455.0	2	13.1	13.10	15.60	19	14.21	9
K90-2_1	475.2	2	13.8	13.83	15.52	12	14.59	5
K90-2_2	475.2	2	14.1	14.11	15.52	10	14.59	3

Märkus: variant A arvutamisel on kasutatud katseliselt määratud M_y ja valemiga (1.6) arvutatud f_n väärtusi;

variant B arvutamisel on kasutatud katseliselt määratud M_y ja katseliselt leitud f_n väärtusi.

Katsekeha tähis	Katsekeha tihedus, kg/m ³	Naaglite arv liites	Liite katseline kandevõime, kN	Liite katseline ühe naagli kandevõime, kN	Valemiga 1.1 (g) arvutatud liite ühe naagli kandevõime (A), kN	Erinevus katselise väärtusga, %	Valemiga 1.1 (g) arvutatud liite ühe naagli kandevõime (A), kN	Erinevus katselise väärtusga, %
K90-2L	464.5	2	15.0	14.96	15.85	6	14.21	-5
K90-2L-2	464.5	2	14.9	14.88	15.85	7	14.21	-4
K90-3	458.6	8	12.7	12.67	15.14	20	13.53	7
K90-3L	478.8	8	16.6	16.58	16.23	-2	14.21	-14
K90-4	454.2	8	13.7	13.70	15.04	10	13.26	-3
K90-5	479.3	8	15.2	15.21	15.62	3	14.34	-6
K90-6	468.0	8	14.3	14.25	15.36	8	13.84	-3
K90-7	485.0	10	14.4	14.40	15.75	9	14.37	0
K90-SFS1L	465.3	8	12.5	12.51	11.63	-7	10.06	-20

Märkus: variant A arvutamisel on kasutatud katseliselt määratud M_y ja valemiga (1.6) arvutatud f_h väärtusi;

variant B arvutamisel on kasutatud katseliselt määratud M_y ja katseliselt leitud f_h väärtusi.

Lisa 4. Liitekatsete koondgraafik

