



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

RISTKIHTLIIMPUIDUST TAPPLIITE NIHKETUGEVUSE JA -JÄIKUSE MÄÄRAMINE

DETERMINATION OF STRENGTH AND STIFFNESS OF MORTISE AND TENON JOINT IN CROSS-LAMINATED TIMBER

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Karl Kimmel
/nimi/

Üliõpilaskood: 177528

Juhendajad: Eero Tuhkanen, vanemlektor
Jürgen Einpaul, külalislektor
/nimi, amet/

(Tiitellehe pöördel)

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.

"....." 2023 .

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 2023 .

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

".....".....2023 .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina _____ (autori nimi) (sünnikuupäev:)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

_____ ,

(lõputöö pealkiri)

mille juhendaja on

_____ ,

(juhendaja nimi)

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

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

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

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

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

_____ (allkiri)

_____ (kuupäev)

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Karl Kimmel, 177528 (nimi, üliõpilaskood)
Õppekava, peeriala: EAEI02 Ehitiste projekteerimine ja ehitusjuhtimine, Ehitiste
projekteerimine (kood ja nimetus)
Juhendaja(d): vanemlektor, Eero Tuhkanen, 5206399 (amet, nimi, telefon)
külalislektor, Jürgen Einpaul, 56450571 (amet, nimi, telefon)

Lõputöö teema:

(eesti keeles) RISTKIHTLIIMPUIDUST TAPPLIITE NIHKETUGEVUSE JA -JÄIKUSE
MÄÄRAMINE

(inglise keeles) DETERMINATION OF STRENGTH AND STIFFNESS OF MORTISE
AND TENON JOINT IN CROSS-LAMINATED TIMBER

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Koostada kirjanduse ülevaade tappliite tööpõhimõtetest ja liites mõjuvate jõukomponentide mõjumisest ristkihtliimpuidus
2. Määrata katseliselt erinevate konfiguratsioonidega nihketappide tugevus- ja jäikusomadused
3. Määrata katseliselt tapi ning tapiava vahelise kontaktpinna tugevus- ja jäikusomadused
4. Võrrelda katse tulemusi rahvusvaheliselt tunnustatud arvutusmodelitega
5. Rakendada ja analüüsida tulemusi projekteeritava hoone jäikusseinas

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Kirjanduse ülevaade ning teoreetiliste aluste koostamine	01.12.2022
2.	Katsekehade valmistamine	22.12.2022
3.	Nihketappide katsetamine	13.01.2023
4.	Kontaktpindade survekatsed	31.01.2023
5.	Liidete katsetamine	17.03.2023
6.	Tulemuste analüüs ja arvutusmodelitega võrdlemine	14.04.2023
7.	Lõputöö vormistamine	15.05.2023

Töö keel: eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: ".....".....2023.a

Üliõpilane: Karl Kimmel ".....".....2023.a
/allkiri/
Juhendaja: Eero Tuhkanen ".....".....2023.a
/allkiri/
Kaasjuhendaja: Jürgen Einpaul ".....".....2023.a
/allkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

EESSÖNA	8
Lühendite ja tähiste loetelu	9
1. SISSEJUHATUS	12
2. RISTKIHTLIIMPUIDU KONFIGURATSIOONI SELGITUS	15
3. TAPPLIITEGA LIIDETUD RISTKIHTLIIMPUIDUST JÄIKUSSEINTE ARVUTUSTE TEOREETILISED ALUSED	17
3.1 Tappliite tööpõhimõtted	17
3.2 Ristkihtliimpuidu nihketugevus ja -jäikus koormuse mõjumisel tasapinnas (<i>in-plane</i>)	19
3.2.1 Üldpõhimõtted	19
3.2.2 RVSE meetod	22
3.2.3 Tala meetod	24
3.2.4 CLT parameetrite mõju nihketugevusele tasapinnas mõjuvate koormuste korral	25
3.2.5 CLT nihkedeformatsioonid ja nihkejäikus (<i>in-plane</i>)	26
3.3 Ristkihtliimpuidu survetugevus koormuse mõjumisel tasapinnas (<i>in-plane</i>)	28
3.3.1 Üldpõhimõtted	28
3.3.2 Ekvivalent-tala meetod	31
3.3.3 Nihkekandevõime kriteerium nõtkeotlikule seinale	32
3.3.4 Kihtide arvu mõju kandevõimele	32
4. KATSEKEHADE KONFIGURATSIOONI JA KATSE KIRJELDAMINE	34
4.1 Katsekehade kirjeldus	34
4.2 Katseseadeldiste kirjeldus	36
4.3 Katsemeetod	39
4.3.1 Jäikuse määramine EN 594:2011 meetodil	40
4.3.2 Kuivatusmeetod niiskussisalduse määramiseks	41
4.4 Mõõtevahendid	42
5. KATSETULEMUSED JA ANALÜÜS	45
5.1 Nihkekatse (NK) seeria	45
5.1.1 Üldised katsetulemused	45
5.1.2 Katsekehade jäikused	49
5.1.3 Nihketapi purunemisviis	50
5.1.4 Painedeformatsioonide mõju	52
5.1.5 Välimise kihi lamellide suuna mõju nihkekandevõimele	53

5.1.6 Nihkekatse meetodika sobivus	55
5.2 Survekatse (SK) seeria	57
5.2.1 Üldised katsetulemused	57
5.2.2 Liidete jäikused	59
5.2.3 Surveliite purunemisviis	60
5.2.4 Liite konfiguratsiooni mõju survetugevusele	63
5.3 Tapikatse (TK) seeria	63
5.3.1 Üldised katsetulemused	63
5.3.2 Liidete jäikused	65
5.3.3 Tapikatse purunemisviis	65
5.4 Katseseeriade võrdlus	68
5.4.1 Katsetulemuste võrdlus	68
5.4.2 Välimiste lamellide suund	69
6. TULEMUSTE VÕRDLUS VALITUD ARVUTUSMUDELITEGA	70
6.1 Nihkekandevõime leidmine	70
6.1.1 RVSE meetod	70
6.1.2 Tala meetod	72
6.1.3 Arvutuslike nihkekandevõimete ja katsetulemuste võrdlus	72
6.1.4 Nihkejäikused ja deformatsioonid	74
6.1.5 Katsekehade nihketugevus	76
6.2 Survetugevuse leidmine	77
6.2.1 Teoreetiline survetugevuse hindamine tapis	77
6.2.2 Survetugevuste võrdlused	78
6.2.3 Pikilamellide survetugevus	79
6.3 Tappliite analüüs	80
6.3.1 Efektiivne tapikõrgus	80
KOKKUVÕTE	81
SUMMARY	83
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	85
LISAD	88

EESSÕNA

Käesoleva magistritöö probleempüstituse ja teema ettepaneku tegijaks on Tallinna Tehnikaülikooli külalislektor ehitusteaduste doktor Jürgen Einpaul. Uurimisteema tekkis reaalsest vajadusest projekteerimise käigus kasutatud sõlmlahenduse täpsemaks uurimiseks. Idee aitas lõputööks formuleerida ja lõpptulemuseni jõuda ehituskonstruksioonide uurimisrühma vanemlektor Eero Tuhkanen. Töö fookus on suunatud ristkihtliimpuidust jäikusseinte tappühenduse eksperimentaalsele hindamisele. Katsed sooritati Tallinna Tehnikaülikooli Ehituse Mäemaja katsehallis ja ehituskonstruksioonide laboris. Magistritöös on kokkuvõtte varasemalt tehtud uurimustest ning välja pakutud arvutusmeetoditest, katsete kirjeldusest ja katsetulemuste analüüsist.

Töö valmimisele aitasid kaasa juhendaja Eero Tuhkanen ning kaasjuhendaja Jürgen Einpaul. Katsekehad pärinevad Peetri Puit OÜ-lt, mis olid ülejäägid Kristo Kalbe sooritatud katsetest Tallinna Tehnikaülikoolis. Katseseadmete ehitamisel ning katsekehade ettevalmistusel oli abiks nõu ja jõuga laboriinsener Priit Peterson.

Võtmesõnad: ristkihtliimpuidust jäikussein, tappliide, survekatse omas tasapinnas koormamisel, nihkekate omas tasapinnas koormamisel.

Lühendite ja tähiste loetelu

Ladina suured tähed

A_{gross} – ristlõike pindala

A_{net} – ristlõike netopindala

B – paneeli laius

I_{net} – pikikiudude inertsimoment paneeli sihis

$E_{0,05}$ – elastsusmooduli 5-protsentiili väärtus pikikiudu

E_i – lamelli elastsusmoodul

E_{mean} – elastsusmooduli keskväärtus

F_d – arvutuslik koormus

F_{max} – maksimaalne koormus

$G_{eff,CA}$ – nihkemoodul, mis arvestab liitepindade libisemisega

$G_{eff,CLT}$ – ristkihtliimpuidu nihkemoodul

G_{lam} – lamelli nihkemoodul

K – liite nihkemoodul

M_s – lamellides mõjuvate pikijõudude ekstsentrilisusest kesktelje suhtes tekkiv paindemoment

M_T – väändemoment

$M_{y,d}$ – arvutuspaindemoment horisontaal suunas mõjuvatest jõududest ning pikijõu ekstsentrilisusest

W_{net} – tugevusmoment pikisihis

W_p – polaarvastupanumoment

Ladina väiksed tähed

a_i – vaadeldava lamelli tsentri kaugus ristkihtliimpuit paneeli neutraalteljest

b_l – lamelli laius

$f_{c,0,CLT,net,d}$ – arvutuslik ristkihtliimpuidu survetugevus pikikiudu

$f_{c,0,k}$ – karakteristiklik lamelli survetugevus pikikiudu

$f_{m,CLT,d}$ – arvutuslik ristkihtliimpuidu paindetugevus

$f_{v,CLT,d}$ – arvutuslik ristkihtliimpuidu nihketugevus

$f_{v,CLT,k}$ – karakteristiklik ristkihtliimpuidu nihketugevus

$f_{T,CLT,d}$ – arvutuslik ristkihtliimpuidu väändetugevus

$f_{T,CLT,k}$ – karakteristiklik ristkihtliimpuidu väändetugevus

h – elemendi kõrgus

k_c – vähendustegur

k_{mod} – modifikatsioonitegur

$k_{sys,c,0}$ – süsteemitegur

n_{lay} – kihtide arv ristkihtliimpuidust paneelis

m – nihkele töötavate lamellide arv

t_i^* – ideaalne RVSE paksus

t_{gross} – kogu ristlõike paksus

t_l – lamelli paksus

t_{net} – vähim väärtus ristlamellide summa või pikilamellide summa

t_{tot}^* – summaarne paksus ideaalsetest lamelli paksustest

Kreeka tähed

α_T – parandustegur 5-kihilisele ristkihtliimpuit elemendile

γ_M – varutegur

γ_{tor} – väändepingest tekkinud pööre ristuvate lamellide vahel

γ_{yx} – nihkejõududest tekkinud lõikedeformatsioon ristuvate lamellide vahel

λ – saledus

λ_{rel} – suhteline saledus

v – nihkepinge RVSE elemendil

τ_0 – RVSE elemendil mõjuv nominaalne nihkepinge

$\tau_{v,d}$ – lamelli ristlõikes mõjuv nihkepinge

$\tau_{v,gross}$ – nihkepinge lähtudes gross-shear purunemisviisist

$\tau_{v,net}$ – nihkepinge lähtudes net-shear purunemisviisist

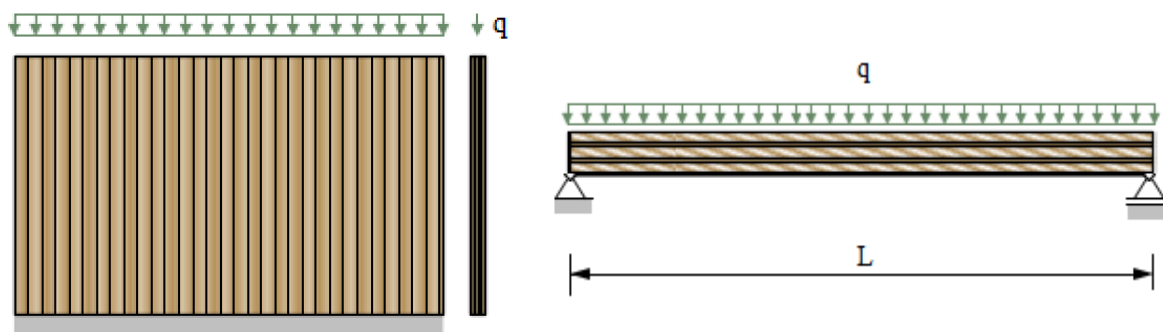
$\tau_{T,d}$ – lamellide omavahelises kontaktpinnas mõjuv arvutuslik väändepinge

1. SISSEJUHATUS

Hoonete ehitamisel mõeldakse üha rohkem keskkonna säästlikkusele, et vähendada ehitustegevuse tagajärjel tekkivat süsinikheidet ning leida viise ehitusmaterjalide taaskasutamiseks. Eesmärkide täitmiseks kasutatakse üha rohkem puitmaterjale, mis seovad endas süsinikku ning puit on taastuv loodusvara. Eestis on heaks näiteks uued avalikud hooned: ehitusjärgus olev Pelgulinna Riigigümnaasiumi hoone ja projekteerimisjärgus olev Keskkonnamaja. Keskkonnamaja arhitektuurse kavandi järgi kasutatakse nii kandevkonstruktsioonides kui ka eksponeeritavates elementides võimalikult palju puitu, sellest peaks tulema Eesti kõige keskkonnasõbralikum riigihoone [1].

Puitmaterjalide valikul on heaks konstruktsioonimaterjaliks ristkihtliimpuit (edaspidi ka CLT), mis on viimase 20 aasta jooksul leidnud üha suuremat kasutust Euroopa ehitussektoris [2]. Ristkihtliimpuit on vähemalt kolmest kihist omavahel kokkuliimitud puitlamellidest koosnev materjal. Vähemalt üks kihtidest peab asetsema risti võrreldes kõrvalseisvate kihtidega [3]. Üldiselt valmistatakse ristkihtliimpuitu paneelina, mis lamellide ristasetuse tõttu on võimeline kandma koormust mõjuvana tasapinnas ja tasapinnast välja ehk kasutatakse nii vahelaeplaadina kui ka seinaelemendina. Suure eelise annab ristkihtliimpuidule tehaseline tootmisprotsess, mis võimaldab väikeseid tolerantse, kontrollitud tulemust ning kiiret ehitust ehitusplatsil [2].

Euroopas on ristkihtliimpuidu tootmisstandard EVS 16351:2021, mis määratleb tootmisnõuded ning tüüpkatsetused. Projekteerimisstandard on välja töötamisel ja peaks ilmuma lähiajal. Ristkihtliimpuidu kasutamine projekteerimises toimub tänasel päeval kirjandusallikate ja tehtud uurimistöde põhjal, mis muudab projekteerimisprotsessi standardiseeritud materjalidega võrreldes mahukamas ja vastusrikkamaks. Kanadas ja Rootsis on väljatöötatud mahukad CLT käsiraamatud, mis koondavad informatsiooni ning lihtsustavad inseneri tööd. Ristkihtliimpuidu projekteerimisel on vajalik mõista koormuse mõjumise suunda paneeli suhtes. Eristatakse omas tasapinnas (*in-plane*) mõjuvat koormust ja tasapinnast välja (*out-of-plane*) mõjuvat koormusolukorda, vaadata Joonis 1.1.

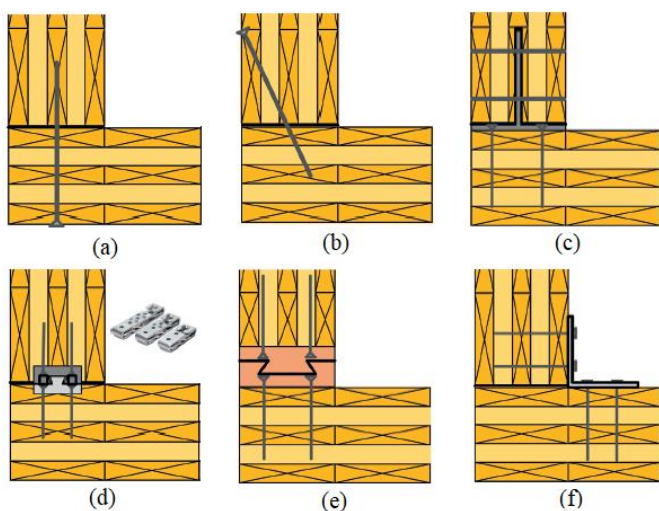


Joonis 1.1 Vasakul koormuse mõjumine omas tasapinnas (*in-plane*) näiteks seinaelement, paremal koormuse mõjumine tasandist välja (*out-of-plane*) näiteks vahelaeelement. Pildimaterjal on kohandatud CLTdesigner tarkvarast [4].

Horisontaalkoormuste (näiteks tuulekoormus) vastuvõtmiseks vajavad hooned jäigastuselemente. Kõrgete ja suurte puithoonete tavapäraseks jäigastuslahendseks on kasutada betoonist jäikuselemente (näiteks betoonist trepikojad või liftišahtid). Kui kasutada monteeritavat või monoliitbetooni puitmaja ehitamises, siis pikeneb ehitusprotsess ning seetõttu väheneb eelnimetatud kiire ehitusprotsessi efektiivsus. Eesti ühe suurima puithoone Pelgulinna Riigigümnaasiumi ehitustööde projektijuhi Taavi Hinnosaare sõnul on keeruline kombineerida puitu ning betooni ka nende väga erinevate tootmistolerantside tõttu, mis muudab montaaži ehitajale keerukaks [5]. Puithoonete jäigastamisel on võimalik kasutada ka ristkihtliimpuidust seinapaneele, mis lihtsustaks oluliselt ehitusprotsessi kuid seejuures muutuvad väga oluliseks elementide vahelised liited.

Liited peavad tagama konstruktsiooni tugevuse, jäikuse, stabiilsuse ja plastilisuse. Näiteks sõltub vahelagede diafragmana töötamine ja seinte vastupanu horisontaalkoormustele just nimelt kinnitussüsteemidest ja kinnititest mida kasutatakse paneelide omavaheliseks liitmiseks. Ristkihtliimpuidust elementide vahelistes ühendustes soovitatakse tootjate poolt kasutada peamiselt pikkasid isekeermeestavaid kruvisid [6]. Samas kasutatakse tõhusalt kinnitusvahenditena koos metallist elementidega ka polte, naelu, neete, puidukruve ja tüübleid. Liite lahendused on esitatud Joonis 1.2.

Käesolev lõputöö käsitleb alternatiiviks mehaanilistele kinnititele puidupõhist ristkihtliimpuidust jäikusseinte ühendust. Selline lähenemine on innovatiivne, kuna asetab traditsioonilise tappühenduse uudse ristkihtliimpuit materjali ühendusliiteks. Tapisüsteem nõuab täpset geometriat, et platsil kokkupandavad paneelid omavahel vigadeta kokku klapiks. Kasutades tehaseelise tootmise juures CNC (*computer numerical control*) tehnoloogiat on võimalik teha keerukaid geometriaid suure täpsusega ning enamuse ristkihtliimpuidu tootmistehased on selle tehnoloogiaga varustatud [6].



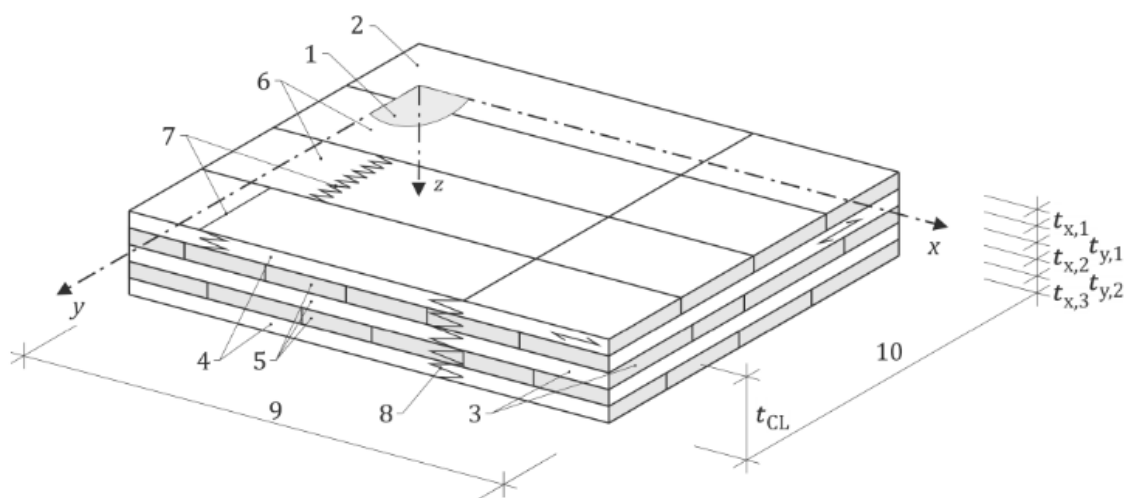
Joonis 1.2 Kanada CLT käsiraamatu soovitatud nurga liited ristkihtliimpuidust paneelide vahel. (a) isekeermestav kruvi väljast kruvitud, (b) isekeermestav kruvi nurga all sisestatud, (c) varjatud metallplaadiga liide, (d) Knapp ühendusdetail, (e) tuvisaba tapp, (f) seespool paiknev metallistnurgik. Pildimaterjal on kohandatud Kanada CLT käsiraamatust [6]

Uurimisteema muudab oluliseks asjaolu, et puidupõhiseid liiteid on ristkihtliimpuidu puhul vähe uuritud. Tavapärasest monoliitpuidust tapiühendusest erineb ristkihtliimpuidust tappliide oluliselt, kuna seotud elementide vahel on pikikiudu töötavad alad, kuid traditsioonilises liites töötab vähemalt üks liidetav element muljumisele ristikiudu. Samuti puudub võrdlusmaterjal hindamaks tappliite ja mehaaniliste liidete toimivust ja efektiivsust. Käesoleva uurimuse käigus vaadeldakse liites tekkivaid sisejõudusid eraldiseisvatena, kui ka tervikliidet koos.

Töö keskendub esimeses peatükis teoreetilistele ja katselistele uurimustele. Uuritakse ristkihtliimpuidu käitumist omas tasapinnas mõjuvale nihkele ning omas tasapinnas mõjuvale survele. Samuti tuuakse välja teoreetilised arvutusmudelid leidmaks ristkihtliimpuidust elemendi kandevõime vastavale koormusolukorrale. Teine peatükk kirjeldab katsekehasid ja katseseadeldisi. Kolmandas punktis esitatakse katsetulemused ja tulemuste analüüs. Viimases peatükis võrreldakse katseandmeid teoreetiliste arvutusmudelite kaudu leitud väärtustega. Magistritöö tulemusena selgus, et ristkihtliimpuidust tappliide on sobilik jäikusseinte ühendusliiteks. Tappliide puruneb maksimaalsele koormusel hapralt, ent saavutab seejärel ühtlase koormusplatoo, mille tõttu on liide hästi deformeeritav. Katsetulemuste põhjal on efektiivseks tapi kõrguseks 450mm, kui tappliide on 5-kihiliste 20mm paksuste lamellidega ristkihtliimpuidust paneelide vahel. Lisades on esitatud teoreetilised arvutused näidishoone eeskujul, et võrrelda tappliite sobivust reaalsesse olukorda.

2. RISTKIHTLIIMPUIDU KONFIGURATSIOONI SELGITUS

Käesolevas uurimustöös on arusaadavuse ning üheselt mõistetavuse huvides kasutatud ühtset ristkihtliimpuidu tähistusviisi. Lähtutakse ristkihtliimpuidu tootmisstandardi esitlusviisist [3], sarnane käsitlus on ka teistes projekteerimismõistetes, näiteks Rootsi CLT käsiraamatus [7].



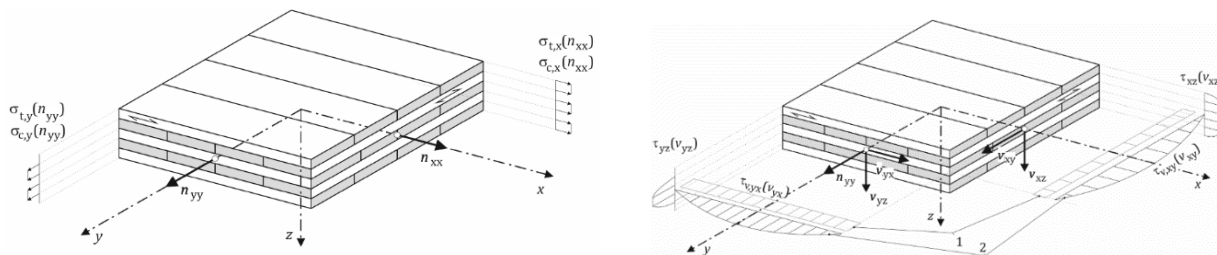
Joonis 2.1 Ristkihtliimpuidust paneeli esitlusviis standardi EVS 16351:2021 kohaselt [3]

1 elemendi tasapind	2 lamelli laiem külg (b_l)	3 lamelli serv (t_l)	4 välimised kihid
5 sisemised kihid	6 lamellid	7 sõrmjätkud	8 suur sõrmjärk
9 paneeli pikkus	10 paneeli laius (B)		

Paneeli teljestik valitakse üldjuhul selliselt, et x-telg ühtib välimiste lamellide suunaga, vastavalt Joonis 2.1. X-telje suunalised lamellid nimetatakse pikilamellideks (*longitudinal layer*) ning y-suunalised lamellid ristlamellideks (*transverse layers*) [7]. Ristkihte nimetatakse ka kestaks (*core*) [8].

Ristkihtliimpuidust seinapaneelide välimised lamellid asetsevad vertikaalselt ehk survejõudude mõjumise sihis, mistõttu seinapaneelil on vertikaalteljeks x-telg ning horisontaaltasandi moodustavad y- ja z-teljed. Sellist lähenemist on kasutatud käesolevas uurimuses.

Seinapaneelile mõjuvate pikijõudude põhjustatud normaalpingete ning nihkepingete tähistus on esitatud Joonis 2.2.



Joonis 2.2 CLT paneeli pingeskeemid standardi EVS 16351:2021 kohaselt [3]. Vasakul normaalpinged, paremal nihkepinged

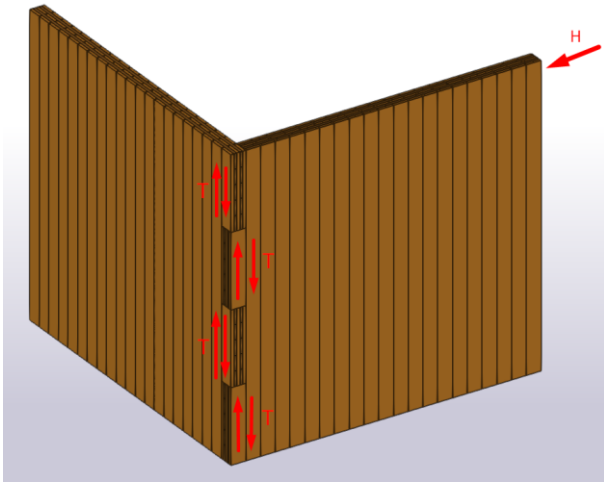
3. TAPPLIITEGA LIIDETUD RISTKIHTLIIMPUIDUST JÄIKUSSEINTE ARVUTUSTE TEOREETILISED ALUSED

3.1 Tapplite tööpõhimõtted

Hoone seintele mõjuvaid horisontaalseid koormuseid, peamiselt tuulekoormus, on vajalik arvesse võtta hoone stabiilsuskontrollis. Vahelaed töötavad korruse ulatuses ühtse diafragmana, kandes välisseintele mõjuva horisontaalkoormuse edasi põikseintele ehk jäigastusseintele. Ristkihtliimpuit vahelagede paneelid töötavad diafragmana, kui kinnitid nende vahel on dimensioneeritud tuulekoormuste vastu võtmiseks [9].

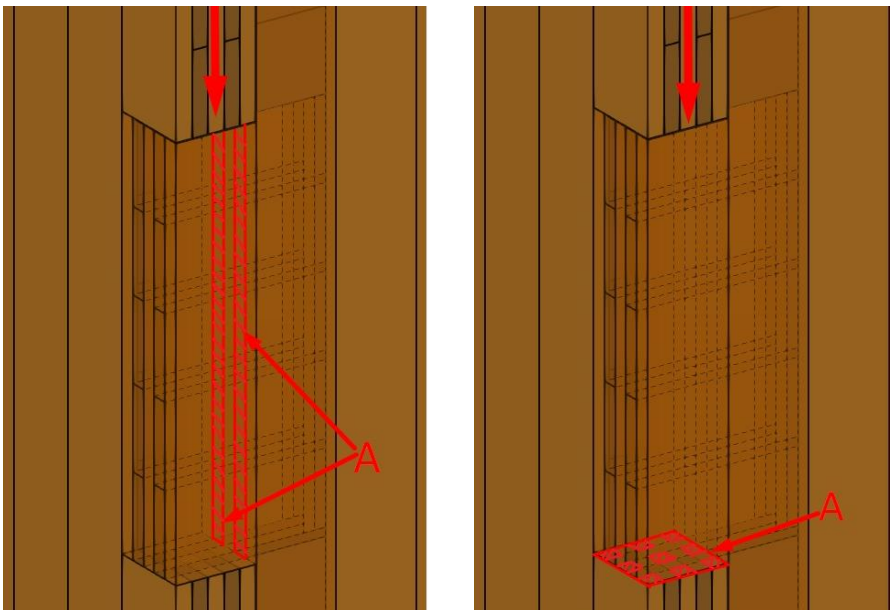
Vahelagede töötamisel ühtse hoonet siduva elemendina jaotub koormus põikseintele, mis kannavad koormuse vundamendile. Ristkihtliimpuidust põikseinad saavad asetseda korruse kaupa omavahel kinnitatuna kui ka hoonekõrguses ühes tükis paiknevate paneelidena. Hoone kõrguses tervikuna paiknevate paneelide projekteerimine jäikusseinteks on lihtsam ning piiravaks saab üldjuhul kinnitus seinaga ja vundamendi vahel. Sellises olukorras tuleb kontrollida nii survesse sattuva seinosa muljumist kui ka tõmbeosa kinnitite vastupanu tõmbejõududele [10].

Jäikusseinte suurema vastupanu horisontaaljõududele annab ristuvate jäikusseinte ühendamine nihkejõudusid ülekandva liite abil. Ristuvad ja omavahel nihkejärgalt seotud jäikusseinte inertsimoment on oluliselt suurem võrreldes eraldiseisva jäikusseinaga. Seetõttu on nihkejõudusid vastu võtva nurgaliite kasutamine vajalik ning tagab optimaalse konstruktsioonilahenduse. Ühe võimalusena saab kasutada liitena puidupõhist tappliidet, mis vähendab mehaaniliste kinnitite arvu ning kasutab ristkihtliimpuidu omadust vastu võtta oma tasapinnas mõjuvat nihkekoormust. Horisontaalkoormuste põhjustatud nihkejõudude jagunemine tapplites on kajastatud Joonis 3.1.



Joonis 3.1 Horisontaalkoormuse (H) edasikandumine ühelt jäikusseinalt temaga ristuvale jäikusseinale tappliite kaudu. Liite pindadel tekivad nihkejõud (T)

Ristkihtliimpuidust elementide vahelises tappliites tekivad nihkepinged ja ristuvate elementide kokkupuutepindade vahel survepinged. Nihkejõud võetakse vastu ristlamellidega, vastavalt Joonis 3.2 vasakpoolsel pildil esitatud skeemi alusel. Kontaktpinnal tekivad survepinged, mis võetakse vastu pikilamellide vahelise pinna kaudu. Ristkihtliimpuidu tugevusarvutused erinevad homogeenpuidu arvutustest, kuna kogu ristlõikest võetakse töötavana arvesse koormuse suunalised lamellid. Ristuvad lamellid lisavad elemendile jäikust [9]. Liite dimensioneerimisel tuleb antud jõudude mõjumist arvesse võtta, lisaks arvestada liite järeleandvusega ning vajadusel ka ekstsentrilisusest tekkivate paindemomentidega.



Joonis 3.2 Ristkihtliimpuidust jäikusseinale tappliites tekkivad töötavad ristlõike osad. Vasakul nihkepingetele töötavate ristkiudude ristlõike pindala, paremal survele töötavate pikikiudude vaheline pindala

3.2 Ristkihtliimpuidu nihketugevus ja -jäikus koormuse mõjumisel tasapinnas (*in-plane*)

3.2.1 Üldpõhimõtted

Ristkihtliimpuit seintes ja diafragmades, kus mõjub jõud omas tasapinnas (*in-plane*), tekivad nihkejõududest nihkepinged, mis kandevõime ületades võivad põhjustada kolme eri tüüpi nihkepurunemise mehhanisme: *gross-shear*, *net-shear* ja väändelev purunemine [9].

Gross-shear purunemisviis leiab aset kui lamellid on külgliimitud [11]. Samuti ei tohi lamellides esineda pragusid näiteks niiskuslikust paisumisest ja kahanemisest. Neid tingimusi täites saavad vaadeldavas konstruktsiooni lõikes nihkepinged mõjuda kogu ristlõike ulatuses. Nihkepingete jaotumine elemendi paksuse sihis on ühtlane ning purunemisel tekib pikisuunaline purunemine kõigis kihtides. *Gross-shear* purunemisviisi selgitab Joonis 3.3 vasakpoolne sektsioon.

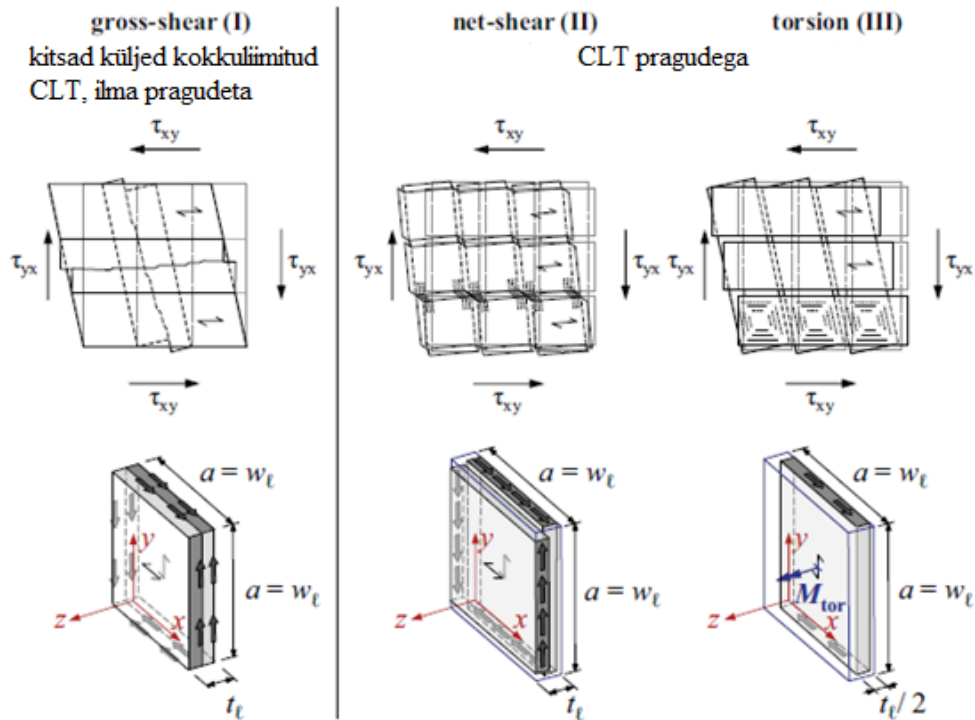
Net-shear purunemisviisi puhul saavad lõikes mõjuvad nihkepinged liikuda vaid lamelli ulatuses mööda lõikepinda, kui lamellid ei ole külgliimitud või esinevad paneelis kuivamispraod. Sellest tingituna toimub purunemine lamelliga ristuv suunas paneeli nõrgemates kihtides. [11]

Austria ja Saksamaa ühises uurimuses [11] toodi välja, et üldiselt järgneb *gross-shear* purunemisele *net-shear* purunemine. Purunemise järel toimub pehmenemine ühtlase platooni, mis on 30-60% *net-shear* tugevusest. Purunemine toimub järkjärguliselt, kuna *gross-shear*-ile purunedes saavad nihkepinged liikuda vaid lamelli ristlõike kaudu kihtide sees, põhjustades *net-shear* purunemist. Pragudeta ja külgliimitud elemendid on suurema jäikuse ning nihketugevusega. Projekteerides *gross-shear*-ile tuleb vältida pragude teket kogu konstruktsiooni eluea jooksul. Purunemisviis on analoogne betoonile, kus esineb pragunenud ristlõikefaas ja pragunenemata ristlõike faas.

Kolmandaks mehhanismiks on purunemine väändelev (*torsion*). Sarnaselt *net-shear* olukorrale, kus lamellid ei ole külgliimitud, tuleb nihkepingete jagunemist vaadata lamelli ulatuses. Kuna kihid asetsevad omavahel risti ja erinevates tasandites, tekitavad nihkepinged väänet lamellide vahel. Väändepinge tekkimist ristuvate lamellide vahelises liimliites kirjeldab Joonis 3.3 parempoolne skeem. [12]

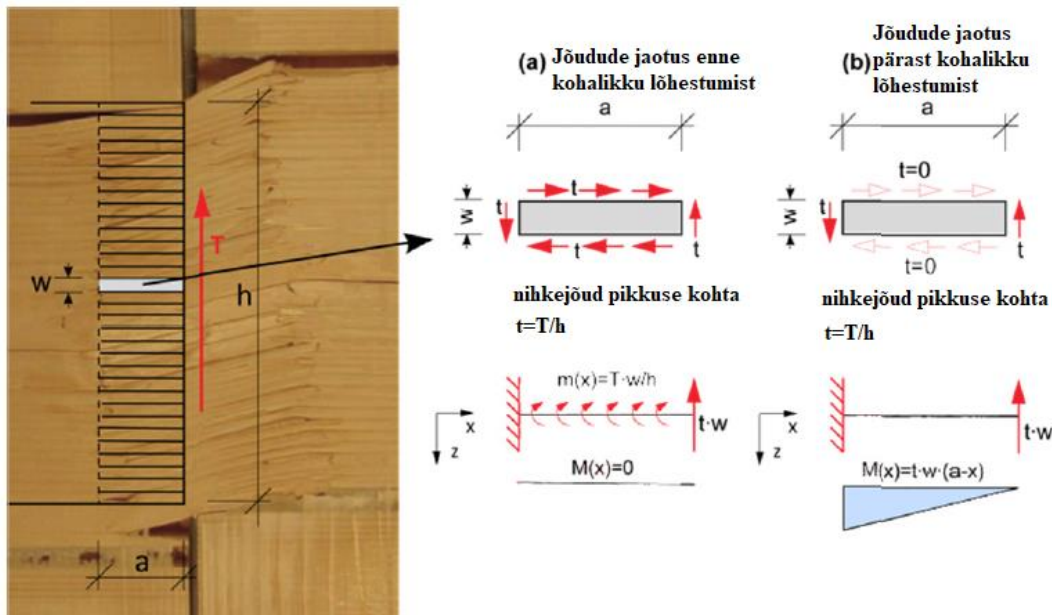
Väändelev purunemist ehk kolmandat mehhanismi, tuleb eeldada kui lamellide paksuse ja laiuse suhe on suurem kui 0,25 ($\frac{t_l}{b_l} > 0,25$) [11]. Mida suurem on lamelli ristlõige, seda

rohkem nihkepinget suudab vastu võtta ja sellevõrra suuremad tekivad ka väändepinged ristuvate lamellide vahelises alas.



Joonis 3.3 Purunemisviisid nihkepingete mõjul ristkihtliimpuidus. Gross-shear (vasakul), net-shear (keskel), vääne (paremal). Illustratsioon on kohandatud kujul võetud Brandner 2017 uurimusest [11]

Net-shear purunemisviisi koormuse-deformatsiooni graafik on lineaarne umbes kuni 80% maksimaalsest koormuses ja edasi on mittelineaarne laugem kasvamine kuni maksimaalse koormuse saavutamiseni. Mittelineaarsus on põhjustatud kohalike pinnaga paralleelsete nihkepingete ületamisest, mis väljendub kevad- ja sügispuidu vaheliste üleminekutsoonide ühenduskohtade purunemisega, samaaegselt lokaalsete väändepingete ületamisega. Vähenevat pehmenemist pärast maksimaalse koormuse ületamist iseloomustab järjestikune nihkepurunemistsooni laienemine ehk toimub kohalik purunemine ja jõu ümberpaigutumine järgmisesse sõlme [11].



Joonis 3.4 Enne purunemist toimuva pehmenemise skemaatiline kirjeldus. T- ülekantav nihkejõud; a) elastne käitumine kuni $0,8 \cdot F_{max}$; b) pärast pragunemist muutunud skeem [13]

Saksamaa ja Austria uurimuses [11] esinesid katseseeriade vahel kandevõime erinevused *net-shear* purunemisviisiga katsekehade vahel. Selline erinevus viitab tahtmatule kitsaste külgede kokku liimimisele, mis tuleneb liimi tungimisest laudade vahedesse tootmisprotsessi käigus. Teiseks tekib tugevalt kontaktis olevate lamellide servade vahele hõõrdejõud. Tootmisjuhised [3] lubavad lamellide vahele kuni 2 mm suuruseid vahesid, millest tulenev ristlõike vähenemine on praktikas tühiselt väike.

Boggian, Andreolli ja Tomasi 2019 [2] aastal ilmunud uurimus võrdles erinevaid tasapinnas koormatud ristkihtliimpuidust elemendi nihkepingete leidmiseks kasutatavaid arvutusmeetodeid. Kokku võrreldi 5 erinevat nihkepingete arvutusmeetodit:

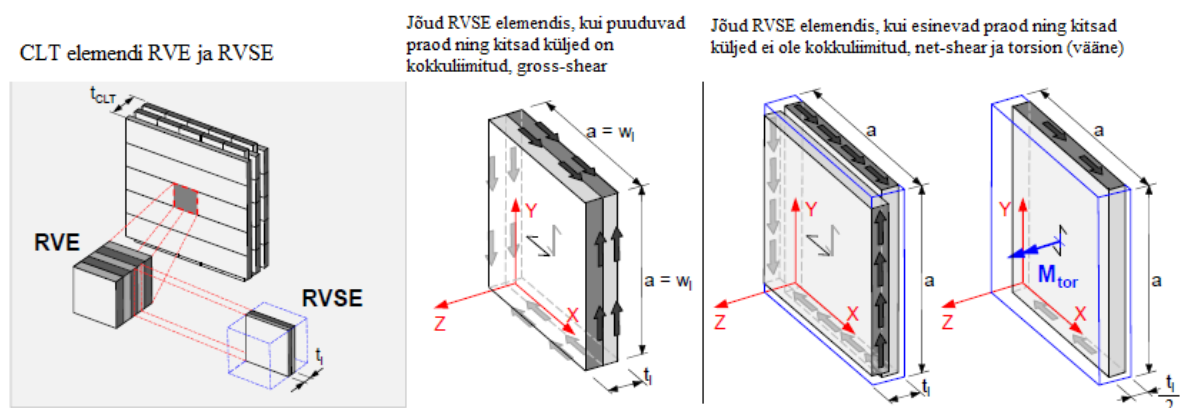
- Equilibrium (tasakaalu) meetod- arendatud Andreolli poolt (2012) [14]
- RVSE meetod- Bogansperger (2010) [15]
- Beam (tala) meetod- Flaig, Blass (2013) [12]
- COST meetod- Brandner (2018) [9]
- Austria annex K meetod (2015) [16]

Selgus, et kõik viis meetodit annavad arvutuslikult sarnaseid *net-shear* nihkepingeväärtuseid, vaid COST meetodiga on pinged 20% suuremad. Väändepinge väärtused on suurimad Austria Annex K meetodiga arvatades. Tasakaalumeetodiga

arvutades eristatakse alates 5-kihilisest paneelist sisemiste ja välimiste liimpindade erinevat pingeaotust. Ülejäänud meetodite väärtused on väga sarnased, jäädes tasakaalumeetodi väärtuste keskmiseks väärtuseks. Edasiselt vaadeldakse täpsemalt RVSE meetodit, mis on kasutusel ka arvutustarkvaras CLTdesigner ning tala meetodit, mis võib olla aluseks uue Eurokoodeksi ristkihtliimpuidu arvutustele.

3.2.2 RVSE meetod

Meetod põhineb ideaalsel ristkihtliimpuidust paneelil, milles on kasutatud võrdse paksusega lamelle ning lõpmatu arv kihte. Paneelist vaadeldakse osa, mille pikkuseks ja laiuks on lamelli laius pluss laudade vaheline vahe ning paksuseks paneeli paksus (RVE- *representative volume element*). RVE lihtsustatakse veelgi, vähendades selle paksust ja saadakse RVSE- *representative volume sub-element*. RVSE paksus on võrdne ristuvatest lamellidest õhema lamelli paksusega pluss lamellide vaheline liimliide. Juhul kui ristuvad lamellid on võrdsete paksustega tuleb kummastki lamelist arvestada poole lamelli paksune osa. [15]



Joonis 3.5 RVSE meetodi selgitus. RVSE elemendis jõudude jagunemine. Pildimaterjal on kohandatud Brandner, Bogensperger ja Schickhofer uurimusest [13]

Gross-shear ja net-shear tugevustingimused avalduvad kujul [17]:

$$|\tau_{v,d}| \leq f_{v,CLT,d} = \frac{k_{mod} * f_{v,CLT,k}}{\gamma_M} \quad (3.1)$$

kus:

$\tau_{v,d}$ – lamelli ristlõikes mõjuv nihkepinge

$f_{v,CLT,d}$ – arvutuslik ristkihtliimpuidu nihketugevus

$f_{v,CLT,k}$ – karakteristlik ristkihtliimpuidu nihketugevus

k_{mod} – modifikatsioonitegur

γ_M – varutegur

Gross-shear nihkepinge leidmine:

$$\tau_0 = \frac{v}{t_{tot}^*} = \frac{F_d}{t_{tot}^* * b_l} \quad (3.2)$$

Net-shear nihkepinge leidmine:

$$\tau_v = 2 * \tau_0 = 2 * \frac{v}{t_{tot}^*} = \frac{2 * F_d}{t_{tot}^* * b_l} \quad (3.3)$$

kus:

τ_0 – RVSE elemendil mõjuv nominaalne nihkepinge

v – nihkepinge RVSE elemendil

t_{tot}^* – summaarne paksus ideaalsetest lamelli paksustest

b_l – lamelli laius

Summaarne paksus ideaalsetest lamelli paksustest on leitav valemiga [17]:

$$t_{tot}^* = \sum_1^{n_{lay}-1} t_i^* \leq t_{gross} \quad (3.4)$$

$$t_i^* = \begin{cases} \min(2 * t_1; t_2) - \text{kui } t_1 \text{ on v\u00e4limine ja } t_2 \text{ sisemine lamell} \\ \min(t_3; t_4) - \text{kui } t_3 \text{ ja } t_4 \text{ on sisemised lamellid} \end{cases}$$

kus:

t_i^* – ideaalne RVSE paksus

n_{lay} – kihtide arv ristkihtliimpuidust paneelis

V\u00e4\u00e4ndele purunemise tugevuskriteerium [17]:

$$|\tau_{T,d}| \leq f_{T,CLT,d} = \frac{k_{mod} * f_{T,CLT,k}}{\gamma_M} \quad (3.5)$$

kus:

$\tau_{T,d}$ – lamellide omavahelises kontaktpinnas mõjuv nihkepinge

$f_{T,CLT,d}$ – arvutuslik ristkihtliimpuidu nihketugevus

$f_{T,CLT,k}$ – karakteristlik ristkihtliimpuidu nihketugevus

k_{mod} – modifikatsioonitegur

Vääändenihkepinge (*torsion*) leidmiseks võrdsete lamelli laiuste korral saab kasutada valemit [15]:

$$\tau_T = \frac{M_T}{W_p} = \frac{\tau_0 * t_l * b_l^2}{W_p} = 3 * \tau_0 * \frac{t_l}{b_l} \quad (3.6)$$

kus:

M_T – väändemoment

W_p – polaarvastupanumoment

τ_0 – lamelli ristlõikes mõjuv nominaalne nihkepinge

t_l – lamelli paksus

b_l – lamelli laius (eeldusel, et piki ja ristisuunas on sama laiad lamellid)

CLT Handbook Swedish Wood kohaselt võib lamelli laiust teadmata kasutada eelduslikult lamelli laiuseks $b_l = 80mm$ [7].

3.2.3 Tala meetod

Meetod on kirjeldatud Flaig ja Blab (2013) poolt ning hiljem kohandatud ka COST uurimuses.

Flaig ja Blab esitanud valemid nihkepingete leidmiseks, tuginedes tala teooriale [12]:

$$\tau_{v,gross} = \frac{3 * F_d}{2 * h * t_{gross}} \quad (3.7)$$

$$\tau_{v,net} = \frac{3 * F_d}{2 * h * t_{net}} \quad (3.8)$$

kus:

$\tau_{v,gross}$ – nihkepinge lähtudes gross-shear purunemisviisist

$\tau_{v,net}$ – nihkepinge lähtudes net-shear purunemisviisist

F_d – mõjuv arvutuslik koormus

t_{gross} – kogu ristlõike paksus

t_{net} – vähim väärtus ristlamellide summa või pikilamellide summa

h – elemendi kõrgus

Väändenihepinge Flaig ja Blab valemi kohaselt [12]:

$$\tau_{T,d} = \frac{3 * F_d}{b_l^2 * (n_{lay} - 1)} * \left(\frac{1}{m} - \frac{1}{m^3} \right) \quad (3.9)$$

kus:

F_d – nihkepingeid tekitav koormus

b_l – lamelli laius

m – nihkele töötavate lamellide arv

n_{lay} – kihtide arv ristkihtliimpuit ristlõikes

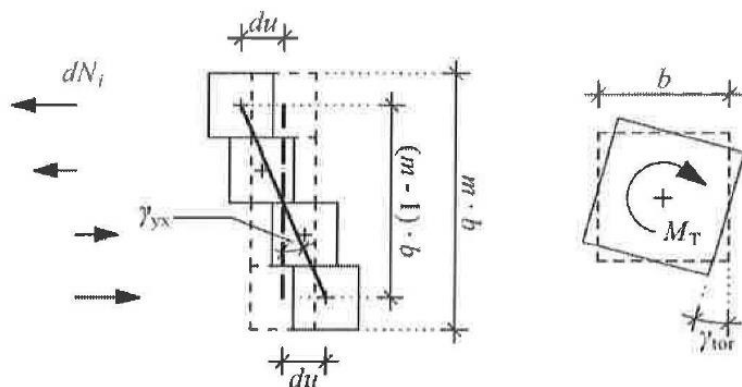
3.2.4 CLT parameetrite mõju nihketugevusele tasapinnas mõjuvate koormuste korral

Lamelli laiuse (b_l) mõju analüüsiti erinevate katseseeriade tulemusi uurides [11] ning leiti vähene regressiivne seos lamelli laiuse ja nihkeomaduste vahel. Kuna purunemine toimub kohaliku väände ja pikinihke koosmõjul, siis võiks eeldada, et laua laiuse suurendamine kahandab väändepingeid ja suurendab nihketugevust. Teisest küljest lõigatakse laiemad lauad tihti palgi südamikü lähedalt, mis tekitab lamellidesse suuremaid pragusid.

Lamelli paksus (t_l) hinnati tähtsaks parameetrik, mis mõjutab oluliselt nihkeomadusi [11]. Suurendades lamelli paksust langeb lamelli nihketugevus. Paksemal lamellil on rohkem puidu osa, milles saab toimuda purunemine piki-tangentsiaal tasapinnas. Samuti lõigatakse laiem lamell rohkem palgi südamikü lähedalt, mis suurendab pragude osakaalu.

3.2.5 CLT nihkedeformatsioonid ja nihkejäikus (*in-plane*)

Tasapinnaliselt koormatud ristkihtliimpuit elementides tekitavad nihkepinged seotud lamellide omavahelist siirdumist. Deformatsioon koosneb kas nihkejõududest tekkinud lõikedeformatsioonist $[\gamma_{yx}]$ või väändepingest tekkinud pöördest $[\gamma_{tor}]$ lamellide vahel (Joonis 3.6) [12].



Joonis 3.6 Nihkepingete põhjustatud lõikedeformatsioon (vasakul) ja väändest tekkiv pöördenurk (paremal). Pildimaterjal pärineb Flaig ja Blab uurimusest [12]

Flaig ja Blab on välja töötanud nihkedeformatsioonide hindamiseks valemid [12]:

$$\gamma_{tor} = \frac{6 * F_d}{b_l^3 * K} * \left(\frac{1}{m} - \frac{1}{m^3} \right) * \frac{1}{(n_{lay} - 1)} \quad (3.10)$$

$$\gamma_{yx} = \frac{12 * F_d}{b_l^3 * K} * \frac{1}{m^3} * \frac{1}{(n_{lay} - 1)} \quad (3.11)$$

kus:

F_d – nihkepingeid tekitav koormus

b_l – lamelli laius

K – liite nihkemoodul

m – nihkele töötavate lamellide arv

n_{lay} – kihtide arv ristkihtliimpuit ristlõikes

Ristkihtliimpuidust elemendi nihkejäikuse leidmiseks tuleb arvestada nii lamellijäikuse kui ka kogu ristlõikejäikusega, mis avaldub valemiga [12]:

$$G_{eff,CLT} = \left(\frac{1}{G_{lam}} + \frac{1}{G_{eff,CA}} \right)^{-1} \quad (3.12)$$

kus:

G_{lam} – lamelli nihkemoodul

$G_{eff,CA}$ – ristkihtliimpuidu nihkemoodul, mis arvestab liitepindade libisemisega

Valem nihkemooduli leidmiseks, mis arvestab liitepindade libisemisega [12]:

$$G_{eff,CA} = \frac{6 * F_d}{5 * A_{gross} * (\gamma_{tor} + \gamma_{yx})} = \frac{K * b_l^2}{5} * \frac{n_{lay} - 1}{t_{gross}} * \frac{m^2}{(m^2 + 1)} \quad (3.13)$$

kus:

F_d – nihkepingeid tekitav koormus

b_l – lamelli laius

K – liite nihkemoodul

m – nihkele töötavate lamellide arv

n_{lay} – kihtide arv ristkihtliimpuit ristlõikes

t_{gross} – kogu ristkihtliimpuit elemendi paksus

A_{gross} – ristlõike pindala

γ_{tor} – väändepingest tekkinud pööre ristuvate lamellide vahel

γ_{yx} – nihkejõududest tekkinud lõikedeformatsioon ristuvate lamellide vahel

Lamelli nihkemooduli väärtuseks on Flaig ja Blab soovitanud võtta $690 \frac{N}{mm^2}$ ning liite nihkemooduli K väärtuseks $5 \frac{N}{mm^3}$. Uurimuses tehtud katseandmete analüüsist selgub, et ristkihtliimpuidu efektiivne nihkejäikus tasapinnas koormamisel sõltub suuresti lamelli laiuusest ning ristilamellide omavahelisest seotusest. [12]

Ristkihtliimpuidu nihkemoodulite leidmiseks on meetodi välja töötanud ka Bogensperger, Moosbrugger ja Silly [15]. Meetodi kasutamiseks on vajalik leida abitegur, mis on erinev olenevalt kihtide arvust ristkihtliimpuidus. Käesolevas töös on

esitatud 5-kihilise paneeli nihkemooduli arvutamise valemid *in-plane* koormusolukorras. Abitegur on leitav valemiga 2.14 ning nihkemoodul valemiga 2.15:

$$\alpha_T = 0,4253 * \left(\frac{t_l}{b_l}\right)^{-0,7941} \quad (3.14)$$

$$G_1^* = \frac{G_{lam}}{1 + \alpha_T * 6 * \left(\frac{t_l}{b_l}\right)^2} \quad (3.15)$$

kus:

α_T – parandustegur 5-kihilisele ristkihtliimpuit elemendile

G_{lam} – lamelli nihkemoodul

b_l – lamelli laius

t_l – lamelli paksus

CLTdesigner arvutustarkvaras on kasutatud alternatiivset ristkihtliimpuidu nihkemooduli leidmise meetodit [17]:

$$\alpha_T = 0,32 * \left(\frac{t_l}{b_l}\right)^{-0,77} \quad (3.16)$$

$$G_2^* = \frac{G_{lam}}{1 + \alpha_T * 6 * \left(\frac{t_l}{b_l}\right)^2} \quad (3.17)$$

3.3 Ristkihtliimpuidu survetugevus koormuse mõjumisel tasapinnas (*in-plane*)

3.3.1 Üldpõhimõtted

Ristkihtliimpuit koosneb tavapuidu lamellidest, mistõttu on survele töötavate lamellide käitumine sarnane tavapuidule. Survel töötab puit plastse materjalina ehk pinged jaotuvad ristlõikes laiali. Puidu survetugevus pikikiudu oleneb suhteliselt vähe kõrvalteguritest ja puidu defektidest [18].

Vastavalt Eurokoodeks 5-le [19] eristatakse saleduse järgi surutud ja surutud ning painutatud elementide arvutamisel erinevaid kandevõime arvutusmeetodeid.

Suhtelised saledused määratakse valemitega:

$$\lambda_{rel} = \frac{\lambda}{\pi} * \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad (3.18)$$

kus:

λ – saledus

λ_{rel} – suhteline saledus

$f_{c,0,k}$ – karakteristiklik survetugevus pikikiudu

$E_{0,05}$ – elastsusmoodul 5% väärtus pikikiudu

Juhul kui $\lambda_{rel} \leq 0,3$ siis ei ole elemendile omane läbipainde suurenemine ning nõtkete mõju arvesse ei võeta [19].

Ristkihtliimpuidu saledus leitakse vastavalt [7] esitatud valemile:

$$\lambda = h * \sqrt{\frac{A_{net}}{I_{net}}} \quad (3.19)$$

kus:

h – elemendi kõrgus

A_{net} – ristlõike netopindala paneeli sihis

I_{net} – pikikiudude inertsimoment paneeli sihis

$$I_{net} = \sum \frac{E_i}{E_{mean}} * \frac{b_l * t_i^3}{12} + \sum \frac{E_i}{E_{mean}} * b_l * t_i * a_i^2 \quad (3.20)$$

kus:

E_i – lamelli elastsusmoodul

E_{mean} – elastsusmooduli keskvärtus

b_l – ristlõike laius

t_i – vaadeldava lamelli laius

a_i – vaadeldava lamelli tsentri kaugus ristkihtliimpuit paneeli neutraalteljest

Ristkihtliimpuidu survetugevus koormuse mõjumisel tasapinnas ehk tüüpilisel seinaelemendi koormusolukorras, sõltub elemendi kandevõime arvutuslikust lamellide survetugevusest ja pikilamellide ristlõikepindala suuruselt. Ristuvaid lamelle tugevusarvutuses arvesse ei võeta, kuna lamellide pikisuunaline elastsusmoodul $E_0 = 11000$ MPa on ligi 30 korda suurem kui elastsusmoodul ristikiudu $E_{90} = 370$ MPa [9].

Nõtkehuta ristkihtliimpuidu ($\lambda_{rel} \leq 0,3$) survetugevuse leidmine [17]:

$$\frac{F_d}{A_{net} * f_{c,0,CLT,net,d}} \leq 1 \quad (3.21)$$

kus:

F_d – mõjuv arvutuslik koormus

A_{net} – paralleelsete lamellide ristlõike pindala

$f_{c,0,CLT,net,d}$ – arvutuslik ristkihtliimpuidu survekandevõime pikikiudu

Arvutuslik ristkihtliimpuidu survetugevus leitakse valemiga:

$$f_{c,0,CLT,net,d} = \frac{k_{mod} * f_{c,0,k}}{\gamma_M} * k_{sys,c,0} \quad (3.22)$$

kus:

k_{mod} – modifikatsioonitegur

$f_{c,0,k}$ – karakteristiklik lamelli survetugevus pikikiudu

$k_{sys,c,0}$ – süsteemitegur

γ_M – varutegur

Olukord kus $\lambda_{rel} \geq 0,3$ ehk nõtkehohtlike elementide survekandevõime leidmisest on viimasel ajal tehtud mitmeid uurimistöid [8],[20],[21]. Seega on tekkinud valik erinevatest meetoditest. Antud uurimustöös esitatakse üks lähenemisviis. Nõtkekandevõime on oluline määrata seinaelemendil, mille kõrgus on palju suurem laiuselt.

3.3.2 Ekvivalent-tala meetod

Paljud projekteerimismid (näiteks CLT handbook Kanada ja Rootsi versioon) kasutavad Ayrton Perry teooriat ekstsentriliselt surutud ristkihtliimpuidu arvutusmeetodites. Sama meetodit kasutab ka Eurokoodeks 5 tavapuidu nõtkekandevõime leidmiseks. Vastavalt teooriale vähendatakse survekandevõimet teguriga k_c , mis võtab arvesse stabiilsuse kadu.

$$\frac{F_d}{k_c * A_{net} * f_{c,0,CLT,net,d}} + \frac{M_{y,d}}{W_{net} * f_{m,CLT,d}} \leq 1 \quad (3.23)$$

kus:

F_d – mõjuv arvutuslik koormus

A_{net} – paralleelsete lamellide ristlõike pindala

$f_{c,0,CLT,net,d}$ – arvutuslik ristkihtliimpuidu survekandevõime pikikiudu

$M_{y,d}$ – arvutuslik moment horisontaal suunas mõjuvatest jõududest ning pikijõu ekstsentrilisusest

W_{net} – tugevusmoment pikisihis

k_c – vähendustegur

Tsentrilise pikijõu mõjumisel ning horisontaalkoormust rakendamata jääb valemis 3.23 alles vaid valemi esimene pool. Abivalemid vähendusteguri leidmiseks on järgmised:

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} \leq 1 \quad (3.24)$$

$$k_y = 0,5 * (1 + 0,1 * (\lambda_{rel,y} - 0,3)) + \lambda_{rel,y}^2 \quad (3.25)$$

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} * \sqrt{\frac{f_{c,0,CLT,k}}{E_{0,05}}} \quad (3.26)$$

$$E_{0,05} = k * E_{0,mean} = \left(1 - \frac{0,328}{\sqrt{\frac{2 * b_x}{0,15} - 1}} \right) * E_{0,mean} \quad (3.27)$$

3.3.3 Nihkekandevõime kriteerium nõtkeohtlikule seinale

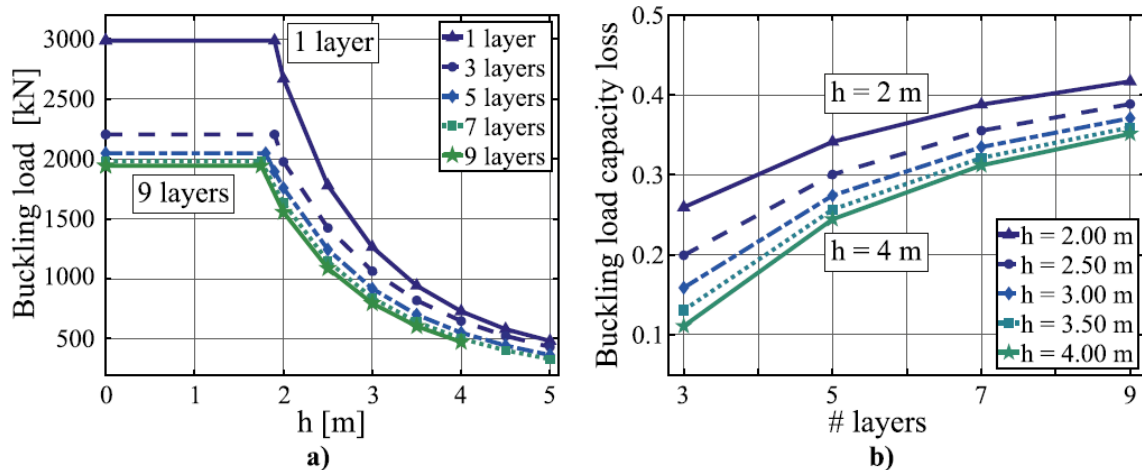
Prantsusmaal koostatud uurimuses [20] selgitati nõtkeohtliku ristkihtliimpuidust seinä arvutamisel nihkepurunemise võimalustega arvestamist. Surutud paneeli nõtkumisel tekivad maksimaalsed külgnihkepinged paneeli otstes kõige keskmises ristkihis. Külgnihke pinged on proportsionaalses sõltuvuses nõtkekõvera pikkusest ning arvutuses on pinged vaadeldavad eraldiseisvatena normaalpingetest. Autorite sõnul on lihtsaim viis hindamaks nihkepurunemise võimalust võrrelda maksimaalse pikilamellide paindepinge $[\sigma_M]$ ning maksimaalse ristlamellide nihkepinge $[\tau_{max}]$ suhet $\frac{\sigma_M}{\tau_{max}}$, pikilamellide paindetugevuse $[\sigma_u]$ ja külgnihke tugevuse $[\tau_u]$ suhtega $\frac{\sigma_u}{\tau_u}$. Kui $\frac{\sigma_u}{\tau_u}$ väärtus on suurem kui $\frac{\sigma_M}{\tau_{max}}$ väärtus, siis on võimalus nihkepurunemiseks enne surve- või tõmbepurunemist.

Uurimuse käigus läbiviidud katsetustes ei pidanud täispaneelide juures esitatud hüpotees paika ning suhte $\frac{\sigma_u}{\tau_u} > \frac{\sigma_M}{\tau_{max}}$ korral purunesid katsekehad normaalpingete tõttu. Hüpotees pidas paika nihketundlike paneelide puhul, mille ristkihis olid lamellid teatud sammuga (*aerated* CLT). Ristkihis õhkvahedega paneelide nihketugevused on täispaneelidega võrrelduna palju madalamad, seetõttu ka nihkele purunemine määravaks osutus. [20]

Autorite soovitusel tuleks täispaneelide korral nihkekriteeriumit kontrollida, kui paneelile mõjuvad lisaks survele ka horisontaalsuunalised koormused (näiteks tuulekoormus). [20]

3.3.4 Kihtide arvu mõju kandevõimele

Tšiili ülikoolide uuringus [21] hinnati numbrilisel meetodil surutud ristkihtliimpuidust paneelide kihtide arvu mõju nõtkekandevõimele. Üldistes käsitlustes vaadatakse kihtide arvu suurenemist kui paneeli paksuse suurenemist ja seetõttu ka nõtkekandevõime suurenemist. Uurimuses leiti, et kihtide arvu suurendamine tähendas nõtkekandevõime vähenemist, sama paksude paneelide korral. Kihtide arvu mõju hindamiseks vaadeldi katsekehasid, mille kogupaksus on sama, aga varieeritakse ristlõike kihtide arvu. Uurimuses kasutati simulatsioonides katsekehasid kihtide arvuga 1,3,5,7,9 ja varieeriti kõrgust 2000mm - 5000mm. Numbrilise meetodi arvutusi võrreldi CLT Handbook (Kanada) arvutusmeetodiga surutud seinä kandevõimele. Tulemused olid väga sarnased, erinedes kuni 3%.



Joonis 3.7 Nõtkekandevõime sõltuvus kihtide arvust ja paneeli pikkusest [21]

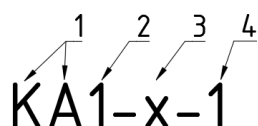
Tulemused näitavad selgelt, et kihtide arvu suurenedes väheneb nõtkekandevõime, näiteks 2 meetri kõrguse posti korral minnes 3 kihiliselt 9 kihilisele paneelile väheneb nõtkekandevõime 1976kN 1556kN, mis on ca 21% kandevõime langus. Seinä kõrguse suurenedes kihtide arvu muutusest tulenev mõju kandevõimele aga väheneb. Ehk mida kõrgem sein, seda vähem oleneb nõtkekandevõime suurus kihtide arvust. Kandevõime kadu kihtide lisades on selgitatav puidu ortotroopse olemusega, mis mõjutab lamellide omadusi paneeli tootmisel. Lisaks suureneb ristkihtide osakaal ristlõikes.

4. KATSEKEHADE KONFIGURATSIOONI JA KATSE KIRJELDAMINE

4.1 Katsekehade kirjeldus

Uurimistöö katselises osas tehti kolm katseseeriat Tallinna Tehnikaülikooli Ehituse Mäemajas, aadressil Mäepealse 3. Katsekehadena kasutati 5-kihilisi ristkihtliimpuidust elemente, mis ei olnud külgliimitud, kihtide jaotusega 20 – 20 – 20 – 20 – 20 mm. Lamelli ristlõike mõõtmed 140 * 20 mm. Kasutatud elementide gabariitmõõtmed ($b * h$) olid 400 * 400 mm ja 200 * 200 mm ning ristlõike kogupaksuseks $t_{gross} = 100$ mm. Katsekehad on jäädgid varasemalt TalTech-is koostatud uurimistööst. Katsekehasid on hoiustatud ühtlases sisekeskkonnas, mistõttu ei sooritatud elementidele täiendavat konditsioneerimist. Katsekehade lamellide tugevusomadused on eraldi määramata, ent eelduslikult täidavad lamellid C24 tugevusklassi nõuded. Katsekehad on toodetud Arcwood [22] ettevõttes, mis kasutab lamelle tugevusklassiga C24. Eeldan, et katsekehad on valmistatud samadel tingimustel ehk on pärit samast tootmispartiiist ehk materjali omadused katsekehade lõikes ei ole suure varieeruvusega.

Katsekehade nummerdamisel kasutatakse kombinatsiooni: seeriatähis, katsekehanumber, konfiguratsiooni ja katsenumber, vastavalt Joonis 4.1 tähistatult. Katseseeriaid ehk seeriatähiseid on kokku kolm: NK- nihkekatse, SK- surve-katse ja TK- tapikatse. Konfiguratsioonitähis tähistab tapikõrgust ning kasutatud on tapi olemasolul.

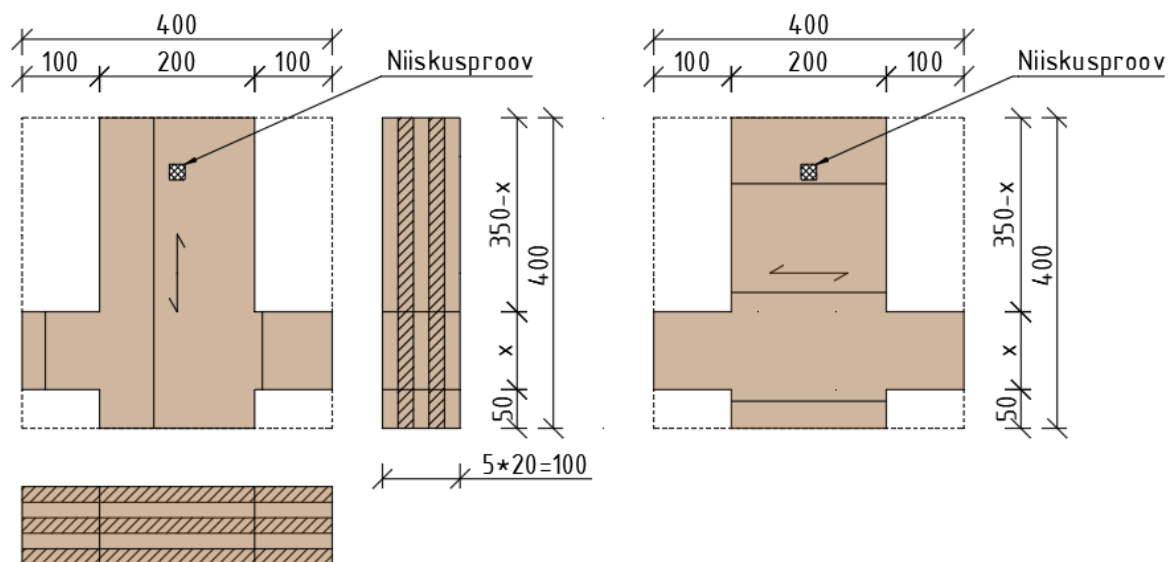


Joonis 4.1 Katsekehade tähtsus, 1-seeriatähis, 2-katsekehanumber, 3-konfiguratsioon, 4-katsenumber

Tähistusviis on kasutusel ka vaid katse või vaid katsekeha kirjeldamiseks. Näiteks nihkekatse nr. 1 tähistamiseks, kus koormati katsekeha NK1 esimest tappi tähistatakse NK-1. Survekatsete puhul tähistatakse katsekehade SK1 ja SK2 survekatset SK-1 ning katsekehade SK3 ja SK4 vaheline survekatse on tähisega SK-2.

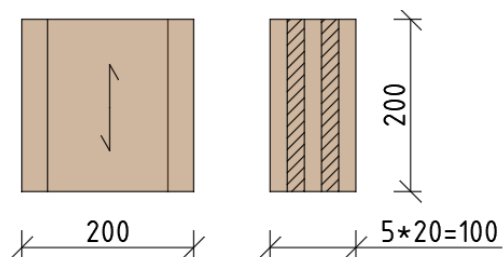
Katsekehad jagunevad vastavalt katseseeriatele kolme gruppi. Esimeses grupi katsekehad on kajastatud Joonis 4.2. Toorikelementide külgedest on tehtud ristküliku kujulised väljalõiked, et moodustuks tapp. Tapi laius on võrdne elemendi paksusega ning tapi kõrgused varieeruvad 100 mm kuni 250 mm. Tapi asukoht katsekeha alumise

serva lähedal tuleneb katseeadeldisest ning võimaldas koormamist sooritada vahetult nihkepinna lähedalt. Katsekehadel on kaks tappi, et iga katsekehaga sooritati kaks katsetust. Katsekehadel NK9 ja NK10 asetsevad välimised lamellid vastupidiselt teistele katsekehadele koormamise suunaga risti. Nende katsekehadega sooviti võrrelda välimiste lamellide asetusest sõltuvalt kandevõime erinevust. NK1 kuni NK9 katsekehadelt võeti katsekeha põhiosa katsetustest puutumata osast niiskusproov.



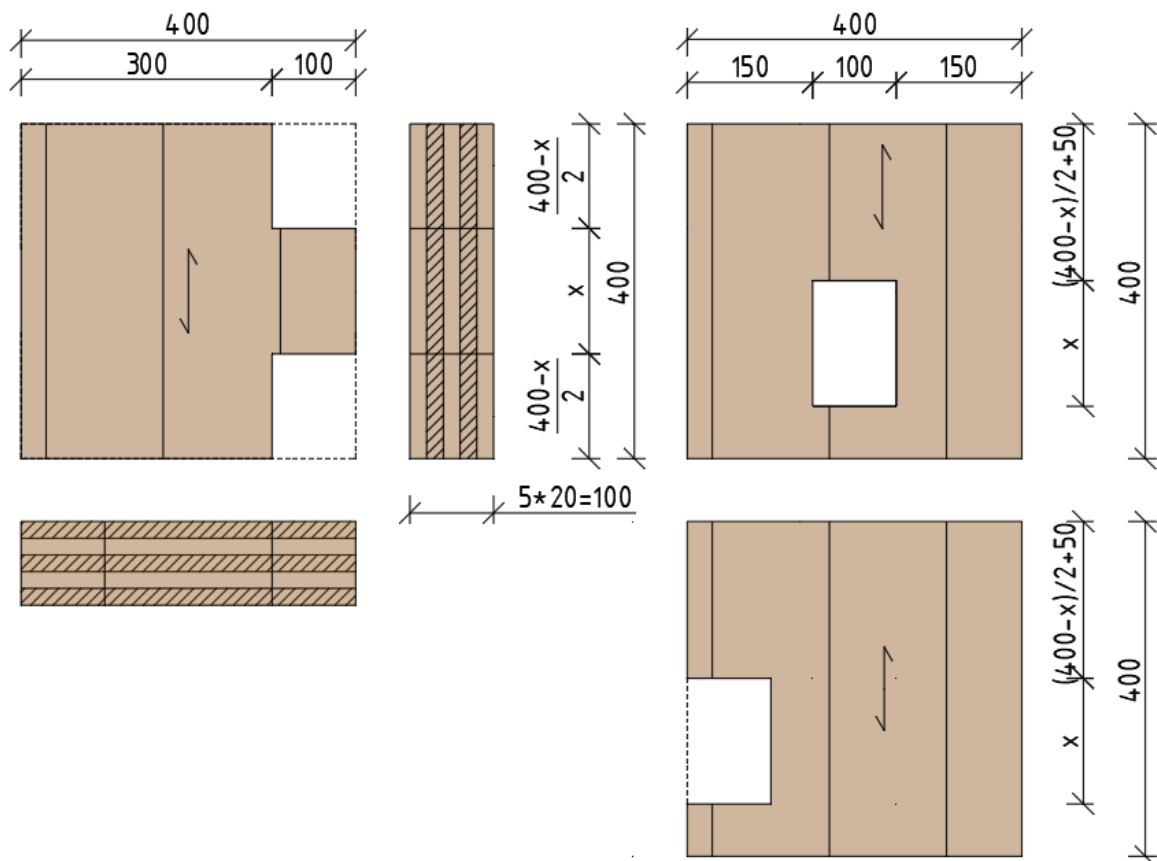
Joonis 4.2 Katsekehade geomeetria, vasakul NK1 – NK8, paremal NK9 – NK10

Teise katsekehade grupi moodustavad $200 \times 200 \text{ mm}$ mõõtmetega katsekehad. Kokku kasutati 10 katsekeha. Katsekehade konfiguratsioonid on näidatud Joonis 4.3.



Joonis 4.3 Katsekehade SK1 - SK10 geomeetria

Joonis 4.4 on esitatud tapikatsete katsekehade konfiguratsioonid. Katsetes kasutatud tapiga katsekehad on samasugused, kuid avaga katsekehad on erinevad. Ühel katsekehal on ava elemendi keskel, teisel elemendi küljel.



Joonis 4.4 Katsekehade geomeetria, vasakul TK1,3, paremal üleval TK2, paremal all TK4.

4.2 Katseseadeldiste kirjeldus

Nihkekatses (NK) katseseadeldis koosneb kahest jäigast nelikanttorust, mis on omavahel keermevarrastega kinni pingutatud. Katsekeha on asetatud nelikanttorude vahele ning vajaliku lisakõrguse annab katsekeha alla paigaldatud paksud terasplaadid. Koormamine toimub õlitungraua abil. Alumine jäik nelikanttorust raam on keermevarraste kaudu ankurdatud jõupõrandasse. Katsekeha koormamiseks on kasutatud Enerpak RC-506 õlitungrauda, mis suudab rakendada koormust kuni 50 tonni ehk ca 490 kN. Katsekeha koormamine tekitab katseseadeldisse paindemomendi, kuna katsekeha fikseeritud tasapindade suhtes toimub jõu rakendamine ekstsentriliselt. Paindemomendist tekkinud jõupaar võetakse mõlema kontaktpinna survega vastu. Õlitungraudad paigaldati võimalikul tapihamba katsekeha poolsele osale lähedale, et vähendada jõu ekstsentrilisust ristlõike mõõtmete muutuse lõike suhtes. Nihkekatseseadeldis on esitatud Joonis 4.5.



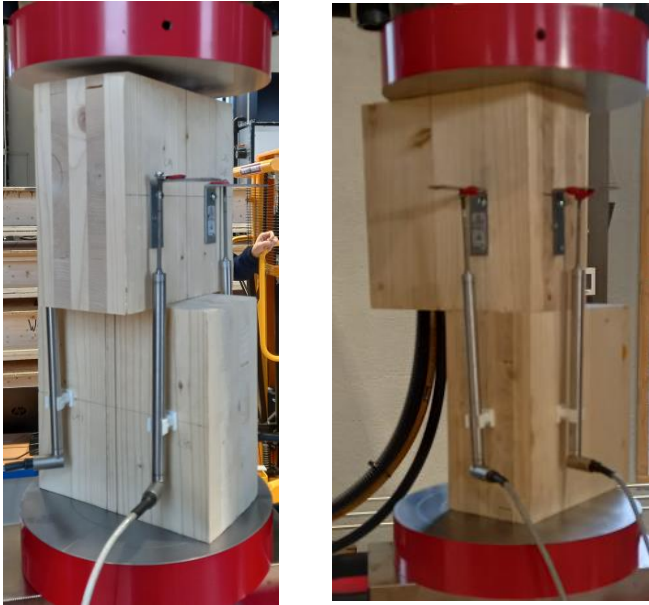
Joonis 4.5 Katseseadeldis NK: 1-ülemine jäik raamiosa; 2- alumine jäik raamiosa; 3- katsekeha; 4- õlitungraud; 5- terasplaadid rihtimiseks; 6- kinnitused läbi jõupõranda, 7- lisakinnitid

Survekatse seeria (SK) viidi läbi Walter + Bai katsemasinaga LFM600. Katsekehad on tsentreeritud koormusplaatide vahele liitepinna järgi. Katsekehad on omavahel 90 kraadise nurga all ning kontaktpinna keskpunkt on koormusplaatide tsentris. Joonis 4.6 esitab survekatseseadeldist.



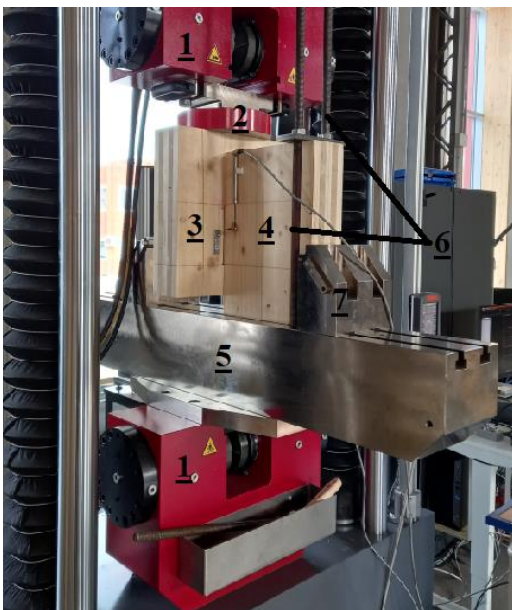
Joonis 4.6 Katsemasin katseseeria SK läbiviimiseks: 1- katsemasina raam; 2- liigendiga jõurakendusplaat; 3- katsekehad

Survekatsekehade erinev asetus katseseadeldisel on esitatud Joonis 4.7.



Joonis 4.7 Katsekehade asetus survekatsel. Vasakul SK-1 ja SK-2, paremal SK-3 kuni SK-5

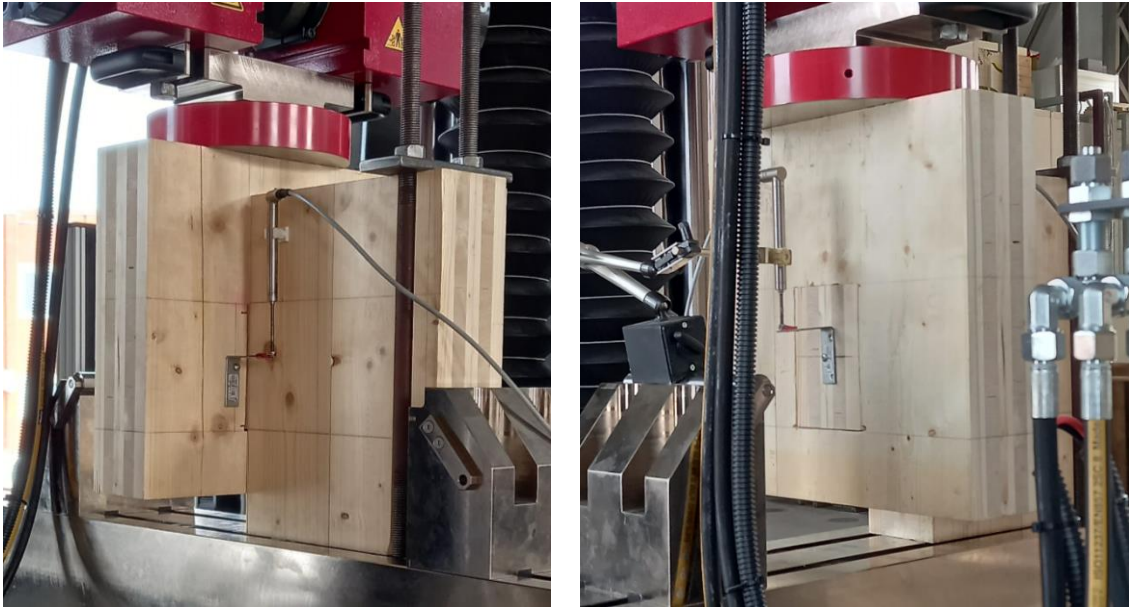
Tapikatse sooritati samuti Walter + Bai katsemasinaga LFM600. Katsemasina alumise koormusplaadi asemel kasutati paindekatssetusteks mõeldud alustala. Lisakinnituseks, et vältida tapiga katsekeha pöördumist paindemomendi tõttu, kasutati keermevardaid koos fikseeriva plaadiga. Lisaks paigaldati alusraami külge poltidega fikseeritud lisatugi vältimaks tapiga katsekeha horisontaalset siirdumist. Tapikatse katseseadeldis on esitatud Joonis 4.8.



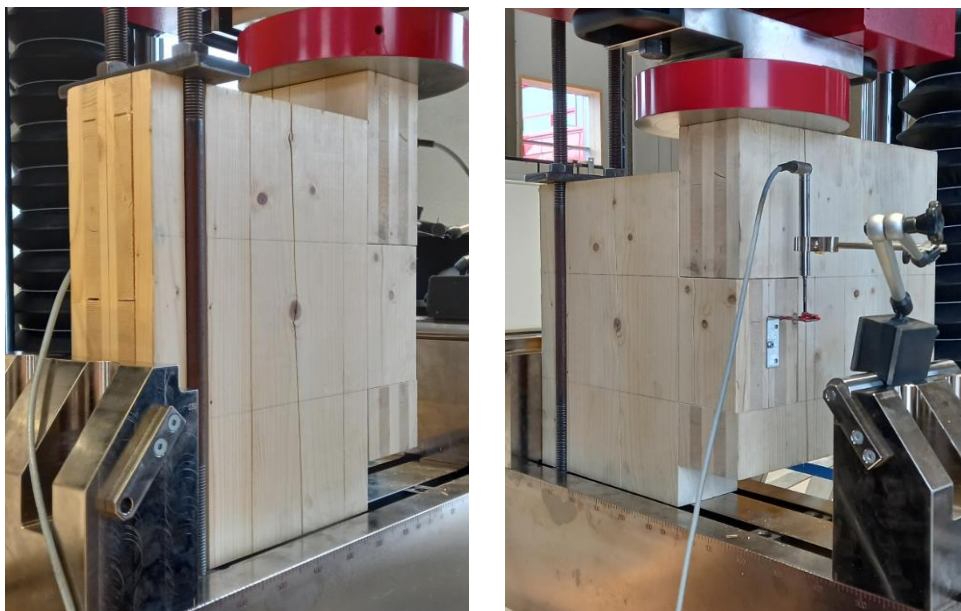
Joonis 4.8 Katsemasin katseseeria TK läbiviimiseks: 1- katsemasina raam; 2- liigendiga jõurakendusplaat; 3- avaga katsekeha, 4- tapiga katsekeha, 5- alusraam katsekeha kinnitamiseks, 6- keermevardad tõmbejõu vastu võtmiseks, 7- lisatugi katsekeha fikseerimiseks

Katsekehad asetsevad tapikatsete puhul erinevalt, nimelt TK-1 korral oli tapiga katsekeha ning avaga keskosas katsekeha, mis ümbritses tappi, esitatud Joonis 4.9.

TK-2 puhul oli tapiga katsekeha konfiguratsioon sama mis TK-1, ent avaga katsekeha ava asetses ühes nurgas, mis imiteerib täpsemalt reaalsuses kasutatavat nurkliidet, esitatud Joonis 4.10.



Joonis 4.9 Katse TK-1 katsekehade asetus katseadeldises.



Joonis 4.10 Katse TK-2 katsekehade asetus katseadeldises.

4.3 Katsemeetod

Katsetamised ei lähtunud standardiseeritud katsemeetodist, kuna ühegi standardkatsega ei olnud piisavat sarnasust. Katsetamisel lähtuti EN 26891 [23]

esitatud ühtlasest koormamisest 300 ± 120 s jooksul. Nihkekatsel (NK) toimus koormamine kuni purunemiseni, mil katsekeha vastupanu langes oluliselt.

Survekatsetel (SK) koormati elektriliselt juhitava pressi all koormusastmetega $1 \frac{\text{kN}}{\text{sek}}$ ning kuni 10% koormuse languseni või kuni 30 mm siirdeni. Viimane koormamine toimus siirde kontrollil $1 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$, et purunemine toimuks aeglasem.

Liitekatsetel (TK) koormati sarnaselt survekatsetele elektrilise pressi all. TK-1 koormamine toimus siirdekontrollil $1 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ kuni 45 mm siirde saavutamiseni, kuna katsekeha konfiguratsioon võimaldas maksimaalset siiret 50mm. Katsetamise kestuseks kujunes seega 45 minutit. Maksimaalne koormus ning esialgne koormuse langus saavutati siiski soovitusliku ajavahemiku jooksul. TK-2 koormamine toimus siirdekontrollil $1 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ kuni 20 mm siirdeni. Piirsiirde saavutamisel rakendus järgmine koormamiskiirus, milleks oli $3 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ kuni üldsiirde saavutamiseni 25 mm. TK-2 katse koormamine jõudis ainult 25 mm siirdeni, kuna katsemasina programmi sisestamisel toimus eksitus, millega sai ekslikult määratud lõppsiirdeks 25 mm mitte 45 mm.

4.3.1 Jäikuse määramine EN 594:2011 meetodil

Standard [24] on mõeldud puitraam seinapaneelide ümberlücke tugevuse (*racking strength*) ja jäikuse määramiseks. Töö autor leiab meetodi sobilikuks kasutada ka tappliite jäikuse määramiseks. Katseandmete kohaselt annab meetod võrreldavaid tulemusi elektrilise pressi all tehtud katsetele ehk survekatsete (SK) ja tappliite katsete (TK) korral. Nihkekatsete (NK) korral, mil koormamine toimus käsitsi õlitungrauaga koormates ja seetõttu ei ole koormus-deformatsiooni graafik piisavalt ühtlane, et antud meetodiga jäikust hinnata.

Vastavalt standardile EVS 594:2011 saab puidu jäikust hinnata valemiga:

$$R = \frac{F_4 - F_2}{v_4 - v_2} \left[\frac{N}{mm} \right] \quad (4.1)$$

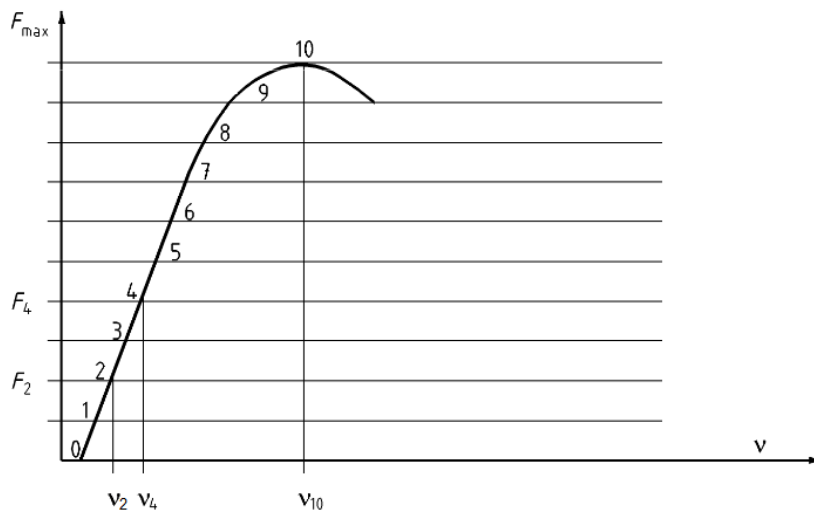
kus:

F_4 – on $0,4 * F_{max}$

F_2 – on $0,2 * F_{max}$

v_4 – on F_4 vastav siire

v_2 – on F_2 vastav siire



Joonis 4.11 Standardi EN 594:2011 koormuse-deformatsiooni diagramm

4.3.2 Kuivatusmeetod niiskussalduse määramiseks

Niiskussaldus määratakse standardi EVS-EN 13183-1:2002 [25] alusel. Vastavalt ristkihtliimpuidu tootmisstandardile EVS-EN 16351:2021 [3] sobib meetod kasutamiseks ka ristkihtliimpuidu puhul. Meetodit on kasutatud mugandustega, kuna katsekeha keskpunktis on katsetuse järgselt struktuur muutunud, võetakse proov NK katsete puhul Joonis 4.2 näidatud asukohast. Võetud katseproov kaaluti pärast lõikamist ja seejärel kuivatati kraadil $(103 \pm 2)^\circ$, kuniks massierinevus kahe 2 tunnise kaalumise vahel on 0,1%.

$$\omega = \frac{m_1 - m_0}{m_0} * 100\% \quad (5.1)$$

kus:

ω – niiskussaldus protsentides

m_1 – enne kuivatamist katsekeha mass

m_0 – pärast kuivatamist katsekeha mass

Katseproovi suuruseks valiti $100 * 40 * 40 \text{ mm}$. Suuremate proovikehade kasuks otsustati kuna ristkihtliimpuidust katsekehade $20 * 20 * t \text{ mm}$ suurused väljalõiked lagunesid.

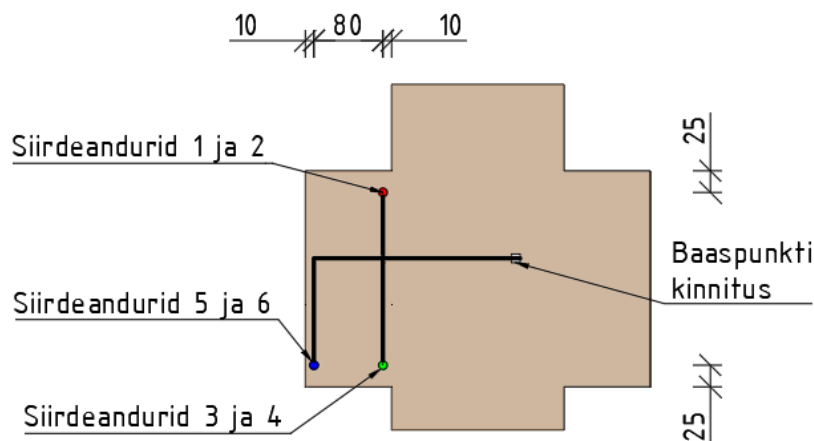
Niiskusproovid võeti pärast katsetamist nihkekatse (NK) katsekehadelt. NK10 katsekehalt niiskusproovi ei võetud, kuna katsekeha välimised lamellid olid katsetamise lõpuks katsekeha küljest lahti ning rikkumata struktuuri katsekehal polnud. Survekatsete ning tapiliitekatsete korral niiskusproove eraldi ei võetud, kuna kõik

katsekehad on hoitud samadel siseõhu tingimustel pika aja vältel. Lihtsustatult eeldatakse sarnast niiskussisaldust mis määratakse nihkekatsekehadel.

4.4 Mõõtevahendid

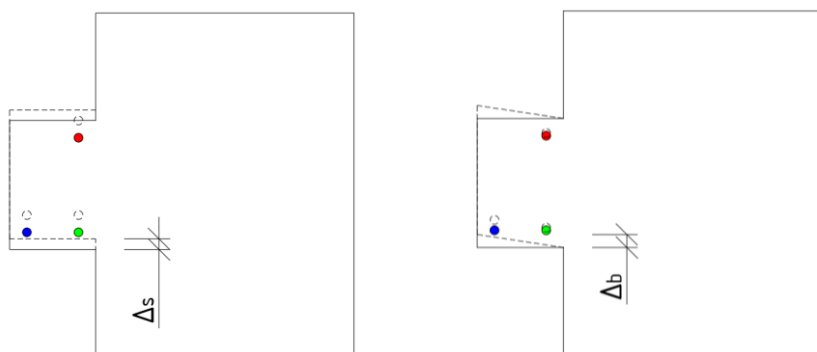
Lokaalsete siirete mõõtmiseks kasutati kaht eri pikkuses LVDT siirde andureid, kontrollitud mõõteulatusega 50 mm ja 100 mm. Väärtused registreeriti mõõteseadmega HBM Quantum MX840B ning salvestati arvutisse Catman Easy programmi abil.

Nihkekatse (NK) siirete mõõtmiseks kasutati kokku 6 LVDT-d (Joonis 4.12). Mõõtmine toimus sümmeetriliselt paigaldatud mõõteseadmetega mõlemalt poolt katsekeha. Siirdeandurid kinnitati katsekeha külge, et mõõtetulemustes vältida katseseadeldises tekkinud deformatsioonide mõju. Põhimõtteline siirde andurite asetus on toodu alljärgnevalt Joonis 4.12. Mõõtmine toimub baaspunkti ja siirdeanduri vahel vertikaalsihis.



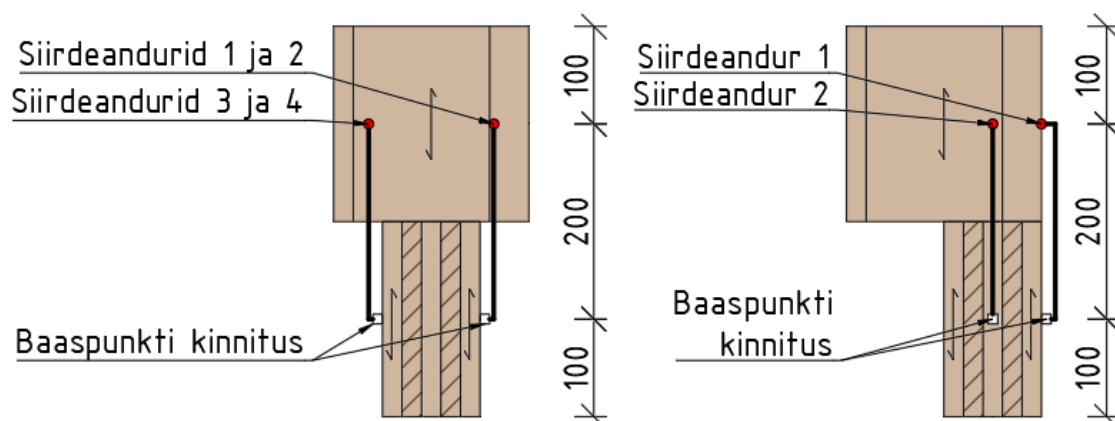
Joonis 4.12 Siirdeandurite asetus NK katsekehadel. Siirdeandurid 2, 4 ja 6 asetsevad skeemil keha vastas küljel

Mõõteseadmetega 1, 2, 3 ja 4 mõõdetakse nihkedeformatsioone. Vastavad mõõtevahendid paigaldati võimalikult tapi ja katsekeha üleminekujuone lähedale, et leida nihkepingete jaotus tapi ulatuses. Siirdeandurite 3, 4, 5 ja 6 abil leitakse paindedeformatsioon. Deformatsioonide tekkimise suunad on esitatud Joonis 4.13.



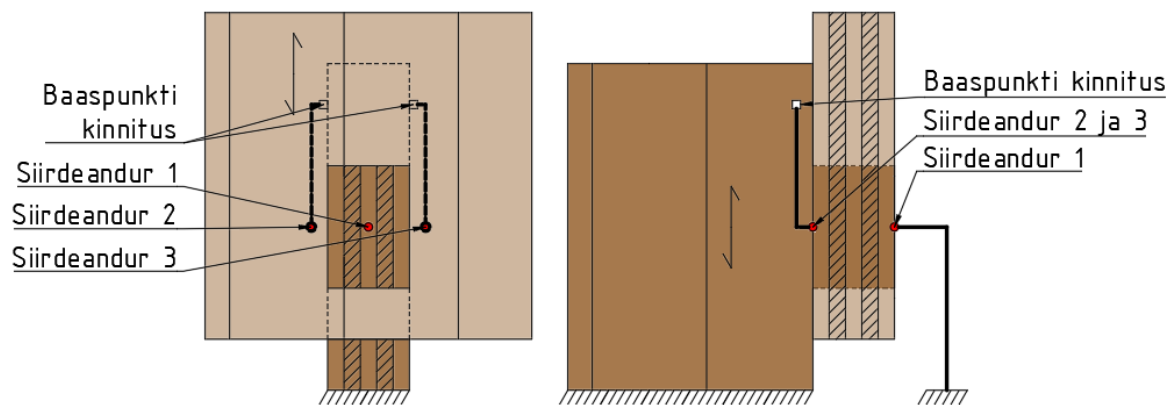
Joonis 4.13 Mõõdetavate siirete selgitus. Vasakul nihkedeformatsioon (Δ_s), paremal paindedeformatsioon (Δ_b).

Survekatse (SK) siirete mõõtmiseks kasutati SK-1 ja SK-2 korral 4 siirdeandurit ning SK-3 kuni SK-5 katsetel 2 siirdeandurit (Joonis 4.14). Siirdeandurid paigaldati katsekehade keskkochtade vahele. Globaalsed siirded mõõdeti Walter + Bai katsemasinaga.

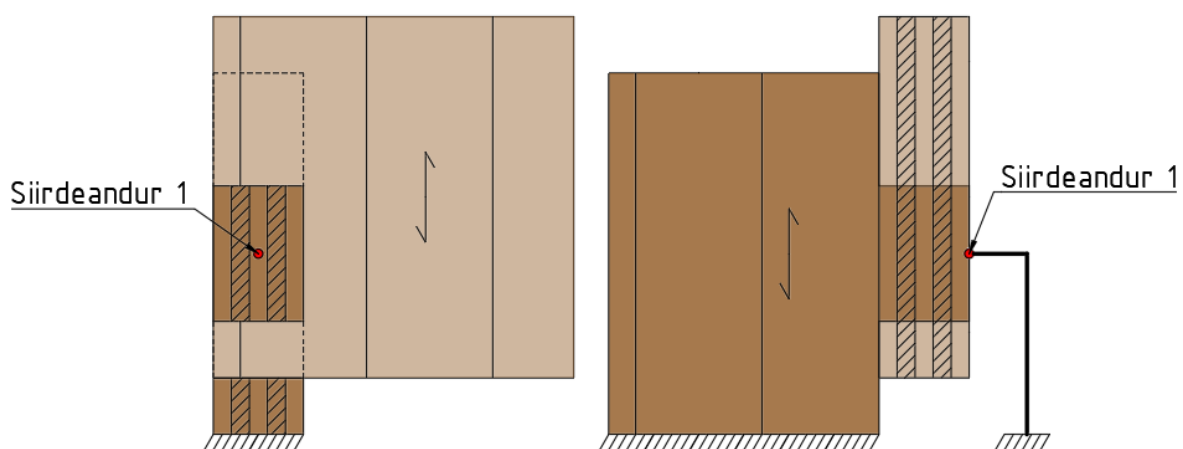


Joonis 4.14 Survedeformatsioonide mõõtmiseskeem. Vasakul SK-1 kuni SK-2 katsed ning paremal SK-3 kuni SK-5 katsed.

Liitekatse (TK) siirete mõõtmiseks kasutati katse TK-1 käigus kolme siirdeandurit ning TK-2 katsetel ühte mõõtevahendit. Mõlemal juhul paiknes üks siirdeandur tapiotsa keskel ning TK-1 korral ka tapi alguses mõlemal pool katsekeha. Siirdeanduritega mõõdeti tapi vertikaalset deformatsiooni. Lisaks sai siirete kontrollimiseks kasutada katsemasina terviksiiret, mis aga arvestab sisse ka katsemasinas endas ja tugeades tekkivad siirded.



Joonis 4.15 TK-1 katse mõõtevahendite asetus.



Joonis 4.16 TK-2 katse mõõtevahendite asetus.

5. KATSETULEMUSED JA ANALÜÜS

5.1 Nihkekatse (NK) seeria

5.1.1 Üldised katsetulemused

Nihkekatseid tehti kokku 10 katsekehaga ning kuna katsetamine toimus 2 poolselt, siis toimus 19 koormuskatset. Ühepoolselt sooritati koormamist katsekehaga NK9, kuna esimese koormamise mõjud ulatusid ka katsekeha teise poole tapini ning teise poole katsetamisel oleks saadud väärad tulemused.

Tabel 5.1 kajastab kõikide nihkekatsekehade maksimaalseid nihkekoormuseid, vastavalt tapi kõrgusele. Tabelis on esitatud ka katsekehade tihedused.

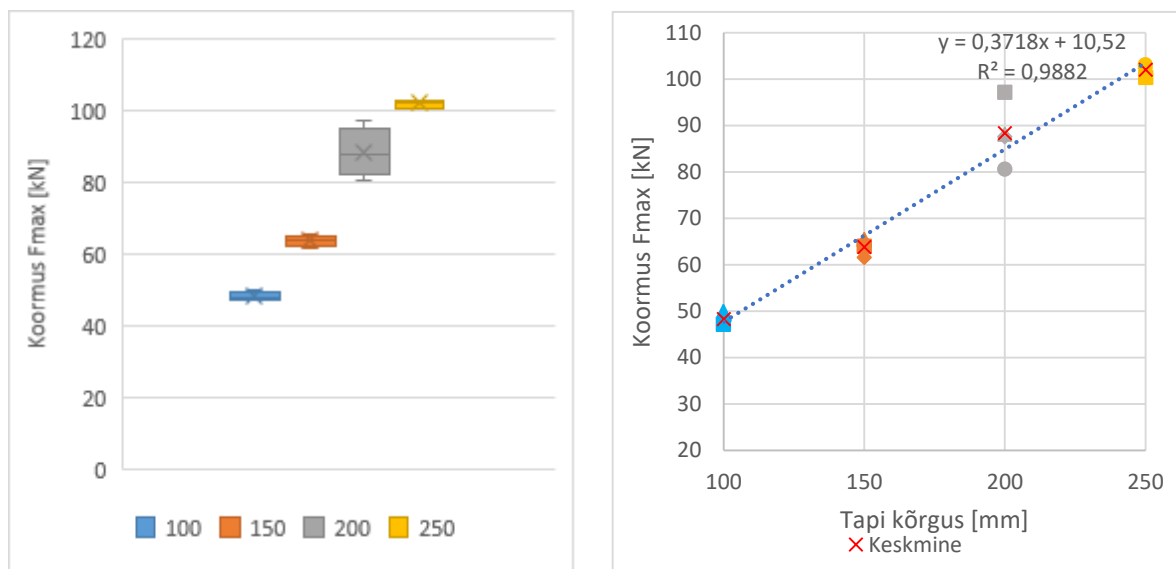
Tabel 5.1 Katsekehade maksimaalsed nihkekoormused vastavalt tapi kõrgusele. 150* tähistab horisontaalsete välimiste lamellidega 150mm kõrge tapiga katsekehasid.

Tähis	Tapi kõrgus [mm]	Tihedus [kg/m ³]	Maksimaalne nihkekoormus [kN]	Keskmine [kN]	Standardhälve	CoV [%]
NK1-100-1	100	469	48,1	48,24	1,00	2,1%
NK1-100-2			47,12			
NK2-100-1		472	47,89			
NK2-100-2			49,86			
NK3-150-1	150	437	64,2	63,76	1,41	2,2%
NK3-150-2			63,95			
NK4-150-1		444	61,51			
NK4-150-2			65,39			
NK5-200-1	200	432	80,57	88,33	5,87	6,6%
NK5-200-2			97,11			
NK6-200-1		425	87,53			
NK6-200-2			88,1			
NK7-250-1	250	435	103,04	102,03	1,01	1,0%
NK7-250-2			100,35			
NK8-250-1		434	102,28			
NK8-250-2			102,43			
NK9-150*-1	150*	407	84,77	79,52	5,75	7,2%
NK9-150*-2			-			
NK10-150*-1		459	71,51			
NK10-150*-2			82,27			

Niiskusproovid võeti katsekehadelt NK1 kuni NK9. NK10 katsekeha välimised lamellid tulid katsetamise käigus katsekeha küljest lahti, mistõttu ei olnud katsetamise järgselt rikkumata struktuuriga osa, millest niiskusproovi võtta. Katsekehadelt võetud niiskusproovide kuivatamise järgselt selgus, et keskmine nihkekatsekehade niiskussisaldus oli 9,4%, COV=4,9%.

Katsekehade NK9 ja NK10 korral asetsevad välimised lamellid horisontaalselt ehk risti koormuse mõjumise suunaga. Kirjeldatud katsekehade tapi kõrgus oli 150mm. Konfiguratsiooni erinevuse tõttu vaadeldakse NK9 ja NK10 katsekehadega sooritatud katsetulemusi eraldi teistest nihkekatsetest. Konfiguratsiooni mõju hindamiseks tapi nihkekandevõimele võrreldakse NK9 ja NK10 katsetulemusi katsekehade NK3 ja NK4 katsetulemustega, sest nende katsekehade tapikõrgused on 150mm.

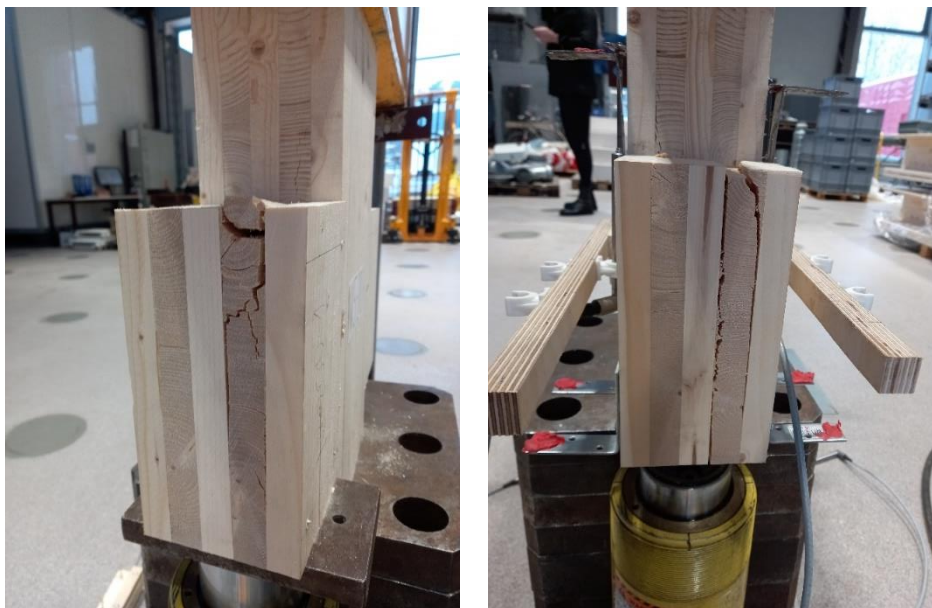
Nihkekandevõime on katsetulemuste põhjal lähedane lineaarsele sõltuvusele tapi kõrgusest. Mudeli determinatsioonikordaja $R^2 = 0,98$, ehk tapikõrguse varieerumine mõjutab 98% ulatuses nihketugevust, vastavalt Joonis 5.1 parempoolne osa.



Joonis 5.1 Katseseeria 1 nihketugevused tapikõrguste kaupa. Parempoolsel graafikul on esitatud katseandmete lineaarset seost kirjeldav mudel.

Joonis 5.1 selgub, et katsekehade maksimaalne kandevõime oli võrdsete tapikõrguste piires küllaltki ühtlane. Vaid tapikõrguse 200 mm puhul oli varieeruvus katsetulemustes suurem. NK5 katsekeha erinevate poolte katsetulemused erinesid 16,54 kN võrra, mis moodustab ligikaudu 19% antud tapikõrgusega katsekehade keskmisest kandevõimest. Katsekeha tappide purunemispildid on esitatud Joonis 5.2. Purunemispiltidelt on näha ristikihtide erinev purunemisviis. Madalama koormuse juures purunenud tapp (Joonis 5.2 vasakpoolne pilt) on purunenud ristlamell külgnihkele, kuid suurema koormuse saavutanud tapi (Joonis 5.2 parempoolne pilt) ristkiht on purunenud ristkihi ja pikikihi

vahelise prao tekkel. Olukord viitab ristlamellide erinevale nihketugevusele, mis võib olla tingitud lamellide kohalike nõrgestuste tõttu. Selline käitumine on puidu puhul eeldatav ning kaetakse varuteguritega. Antud tapikõrgusega katsekehade COV=6,6%.

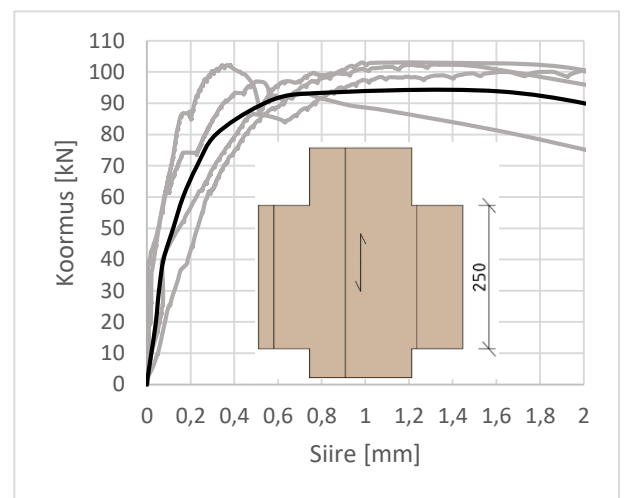
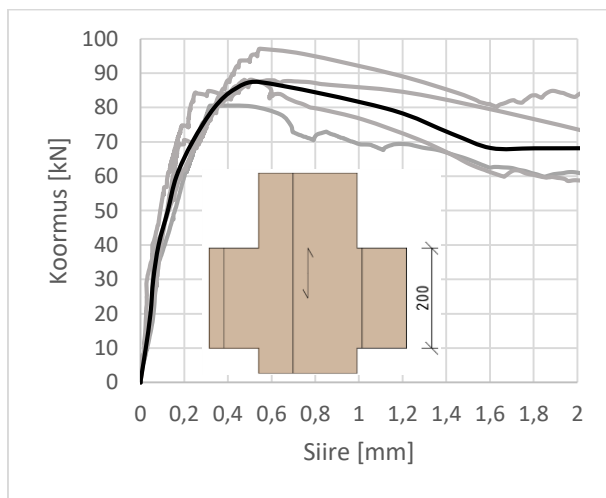
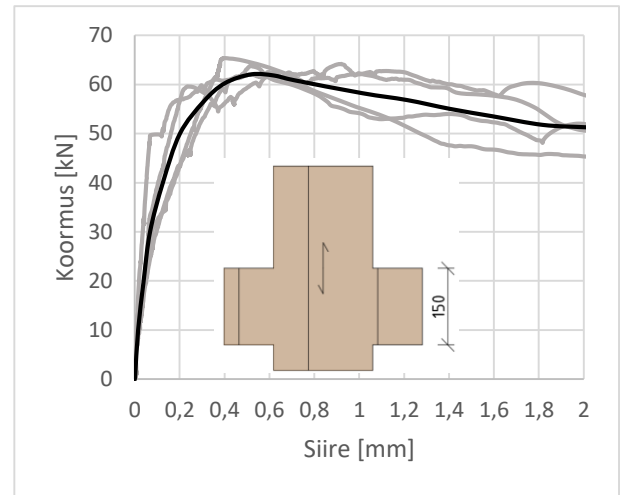
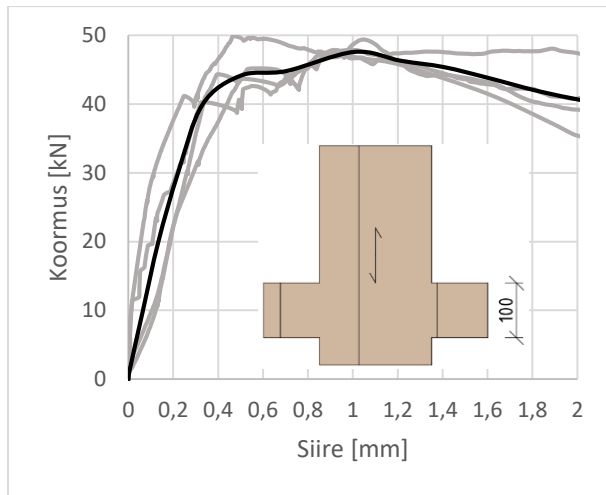


Joonis 5.2 NK5 katsekeha purunemispildid. Vasakul pildil NK5-200-1, paremal NK5-200-2

Joonis 5.3 on esitatud koormuse-deformatsiooni diagrammid ning nende alusel leitud keskväärtused. Keskväärtused on leitud lihtsustatud meetodil, leides esitatud graafikute andmete keskmised väärtused kindlatel siirde suurustel. Seega on keskväärtuste graafiline joon illustratiivne ja annab ülevaate antud tapikõrguse ligikaudsest käitumisest, kuid ei sobi jäikuste hindamiseks.

Graafikud ei ole täiesti ühtlased. Tulemusi mõjutanud tegurid:

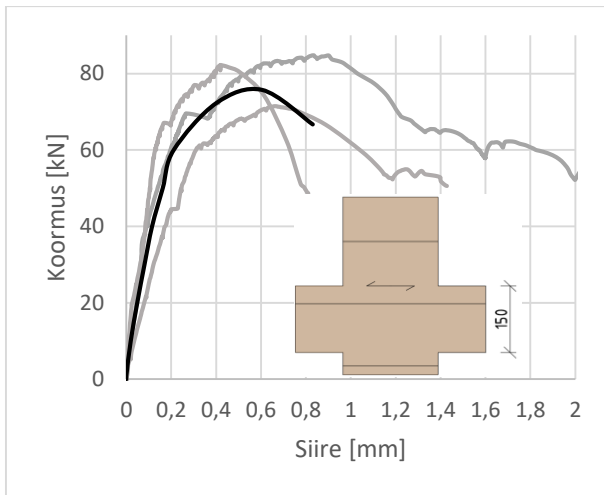
- katseadeldise kinnitusmeetod, sest ülemine raamiosa fikseeriti paika käsitsi mutreid pingutades;
- katsekehade ettevalmistusel esinenud ebatäpsused, kuna mõõtmised ja lõiked sooritati käsitsi;
- tekkinud siirded on väga väikeses suurusjärgus, ehk katsetulemuste tundlikkus on suur;
- koormamise muutlik kiirus, kuna koormamise kiirus sõltus koormaja suutlikusest võimalikult ühtlaselt tungraua rõhku suurendada.



Joonis 5.3 Katsekehade NK1-NK8 koormuse-deformatsiooni graafikud tapikõrguse kaupa. Tumeda joonega on kujutatud katsetulemuste keskmist.

Koormuse-deformatsiooni graafikutelt selgub, et tapi purunemine vastava katseeseldisega katsetades on küllaltki plastne ning graafiku esimese osa tõusunurk on väga järsk, viidates suurele nihkejäikusele.

Joonis 5.4 on esitatud horisontaalsete lamellide asetusega katsekehade koormuse-deformatsiooni diagramm. Jooniselt on märgata katsekehade rabedamat purunemist võrrelduna vertikaalsete välimiste lamellide asetusega katsekehadega.

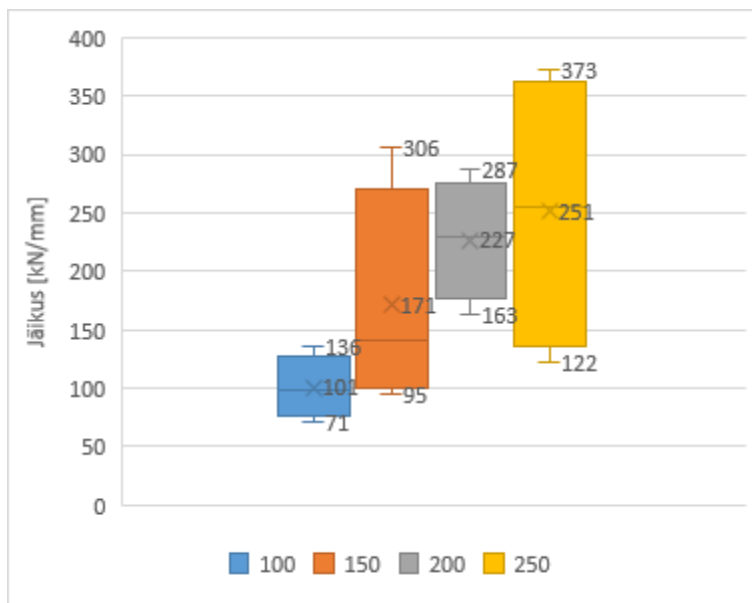


Joonis 5.4 Katsekehade NK9-NK10 koormuse-deformatsiooni graafik. Tumedaga on kujutatud tulemuste keskmist.

5.1.2 Katsekehade jäikused

Standardi EVS 594:2011 [24] järgne jäikuse arvutamine ei sobi leitud andmete töötlemiseks, kuna koormus-deformatsiooni diagrammidel ei teki ühtlase tõusunurgaga lõike, vaid esineb äkilisi muutuseid. Selle tõttu leiti iga katse koormuse-deformatsiooni diagrammilt ühtlase tõusunurgaga graafiku osa, vahemikus 20-70% maksimaalsest nihketugevusest ning määrati selle alusel jäikus. Lähenemisega saadud tulemused on konservatiivsemad kui esitatud standardi meetodil, sest mida lähemale liikuda purunemispunktile seda laugem on graafiku tõusunurk.

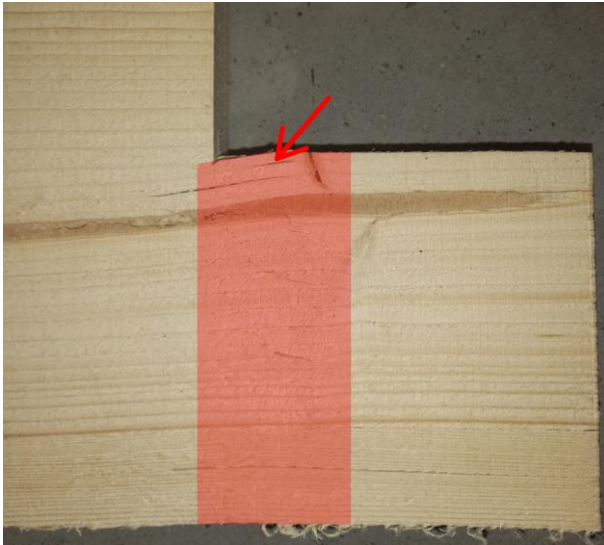
Leitud nihkejäikused tapikõrguste kaupa on toodud Joonis 5.5.



Joonis 5.5 Katsekehade jäikused tapikõrguste kaupa

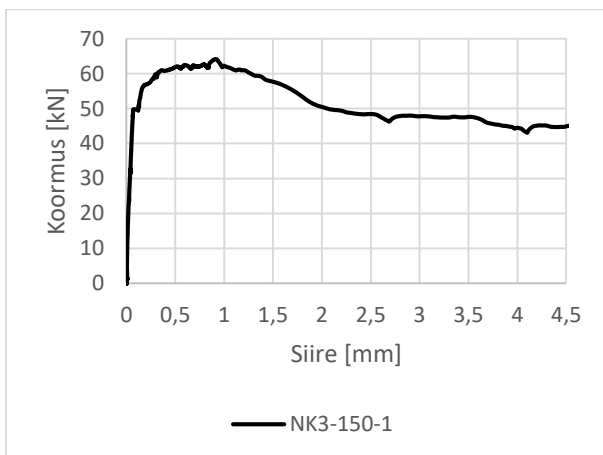
5.1.3 Nihketapi purunemisviis

Kandevõime ületades toimub vastavalt eelnevatele uurimustele purunemine varajase ja hilise puidu vaheliste üleminekutsoonide ühenduskohtades nihketugevuse ületamisel. Katsetatud katsekehast tehtud pikilõige läbi ristkihi on nähtav Joonis 5.6. Lõikel on ristlamellide purunemistärgne seisukord. Nihketugevuse ületades ning praod tekkel hakkab iga praoga eraldatud tsoon tööle eraldiseisvana, millega väheneb oluliselt nihkekandevõime, vastavalt Joonis 3.4 näidatud skeem.



Joonis 5.6 Vertikaallõige purustatud katsekehast piki ristkihti. Punasega tähistatud eeldatav ristlamellide purunemistärgne. Noolega osutatud kevad- ja sügispuidu vahelisele praole

Katsekeha NK3-150-1 puhul jätkati koormamist pikemalt pärast kandevõime saavutamist, vaata Joonis 5.7. Ilmnes, et koormustaluvus kukkus kandevõime ületades ca 30%, mil saavutati ühtlane siirde juurdekasv.



Joonis 5.7 NK3-150-1 katsekeha koormuse-deformatsiooni graafik.

Katsekeha visuaalsel vaatlusel selgus, et ühtlase koormusnivoo saavutas katsekeha tänu ristlamelli kiudude kõieffektile. Ristlamell justkui tõmmati katsekeha põhiosa seest välja, Joonis 5.8.



Joonis 5.8 Tapi koormamine suurte deformatsioonideni. Paremalt tapi plastne purunemine

Tapi plastsel käitumise tekitab ristlamellide töötamine tõmbele ja paindele. Katsetes saavutati ca 50 mm deformatsioon, mis on puidu kohta küllaltki suur deformeeritavus. Tõmbe ja painde koosmõjule töötavad lamellid purunevad järkjärguliselt, kiudude haaval. Selline käitumine imiteerib tapi plastilisust. Kõieffekti ja kiudude purunemist painde ning tõmbe koosmõjul on kujutatud Joonis 5.9.

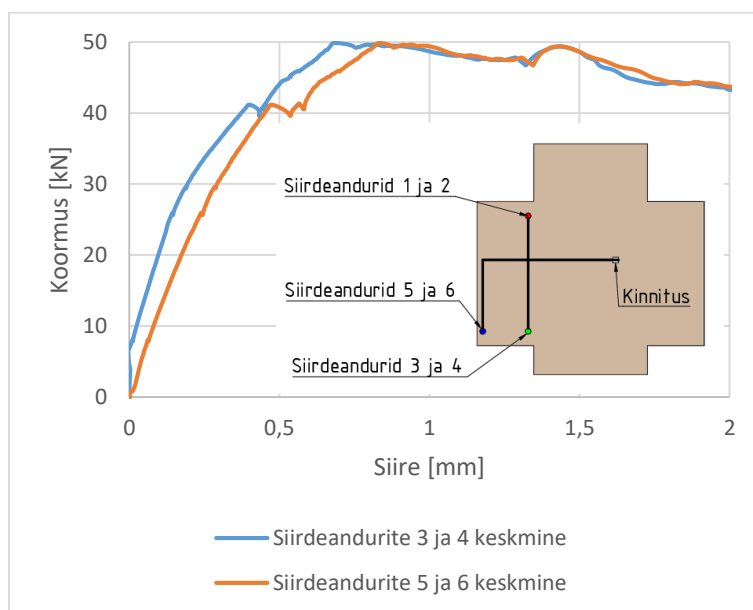


Joonis 5.9 Tõmbele purunenud ristlamelli kiud tähistatud nooltega. Paremalt fotol vertikaallõige ristkihist

5.1.4 Paidededeformatsioonide mõju

Vertikaalkoormuse rakendamine tapihambale läbi tungraua toimub ekstsentriliselt nihkepinna suhtes. Ekstsentrilisus tekitab liitesse lisaks põikkoormusele ka paindemomenti. Kuna ekstsentrilisus on väike ning tapi nihkejäikuse on suur, siis eeldati paindemomendi mõju liite kandevõimele tühiselt väikseks. Lühikeste konsooltalade korral tekib oht paindepurunemisele, kui $\frac{\max \tau}{\max \sigma} = \frac{h}{4 \cdot e}$ [26]. Võttes ristkihtliimpuidu paindetugevuseks tasapinnas mõjuvale koormusele 20,5 MPa [9] ning nihketugevuseks 5,5 MPa [9], saab leida ekstsentrilisuse ja tapikõrguse seose $\frac{5,5 \text{ MPa}}{20,5 \text{ MPa}} = \frac{h}{4 \cdot e} \Rightarrow e = 0,93 \cdot h$. Sellest lähtuvalt saab paindemoment määravaks kui ekstsentrilisus on 93% tapi kõrgusest. Katsetuste korral on kõige väiksema tapikõrguse korral paindepingete määravaks saamiseks vajalik ekstsentrilisus $e = 0,93 \cdot 100 = 93 \text{ mm}$, tegelik ekstsentrilisus on ca 45 mm, ehk ligemale 2 korda väiksem. Suuremate tapikõrguste korral väheneb paindepingete osakaal veelgi.

Painededeformatsioonide määramiseks mõõdeti siirdeanduritega ka tapiotsa deformatsiooni, esitatud Joonis 4.12 ja Joonis 4.13. Joonis 5.10 esitab NK2-100-2 katsetulemustest koormuse-deformatsiooni graafikuid, vastavalt siirdeandurite 3 ja 4 ning 5 ja 6 põhjal. Jooniselt selgub, et siirdeandurite tulemuste vahel on erinevus, ent see ei ole ajas kasvav vaid ligikaudu konstantne. Seetõttu võib olla erinevus tingitud tolerantsidest, mille tõttu on esialgu jagunenud koormuspinnad ebavõrdset ja seetõttu on ka alguses saanud tapi ots suurema siirde.



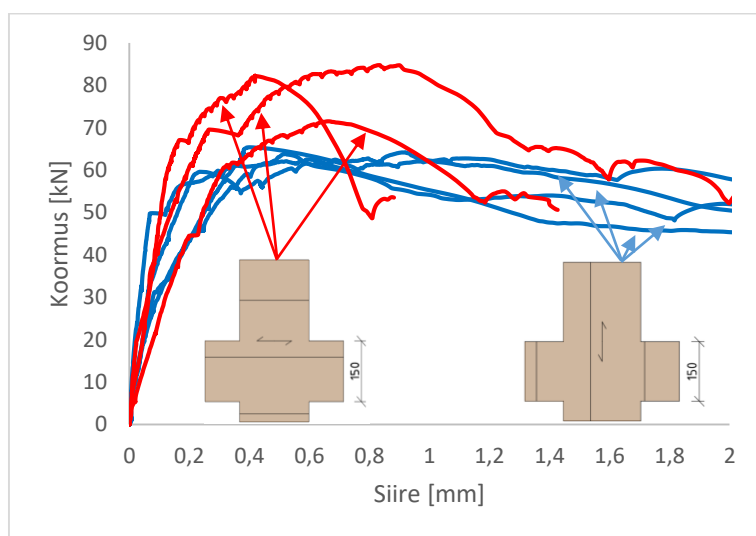
Joonis 5.10 NK2-100-2 koormuse-deformatsiooni graafik nihkepinna lähedal (siirdeandurid 3 ja 4) ning tapi otsas (siirdeandurite 5 ja 6)

Paindedeformatsioonide konstantsel esinemisel koormuse kasvades võib lugeda paindeosakaalu tühiseks ning arvutamisel ja tulemuste analüüsil lähtuda nihketugevusest. Nihkeliite tapikõrgused on realses ehituses veelgi suuremad kui kasetel, mis vähendab paindemomendi osakaalu veelgi.

5.1.5 Välimise kihi lamellide suuna mõju nihkekandevõimele

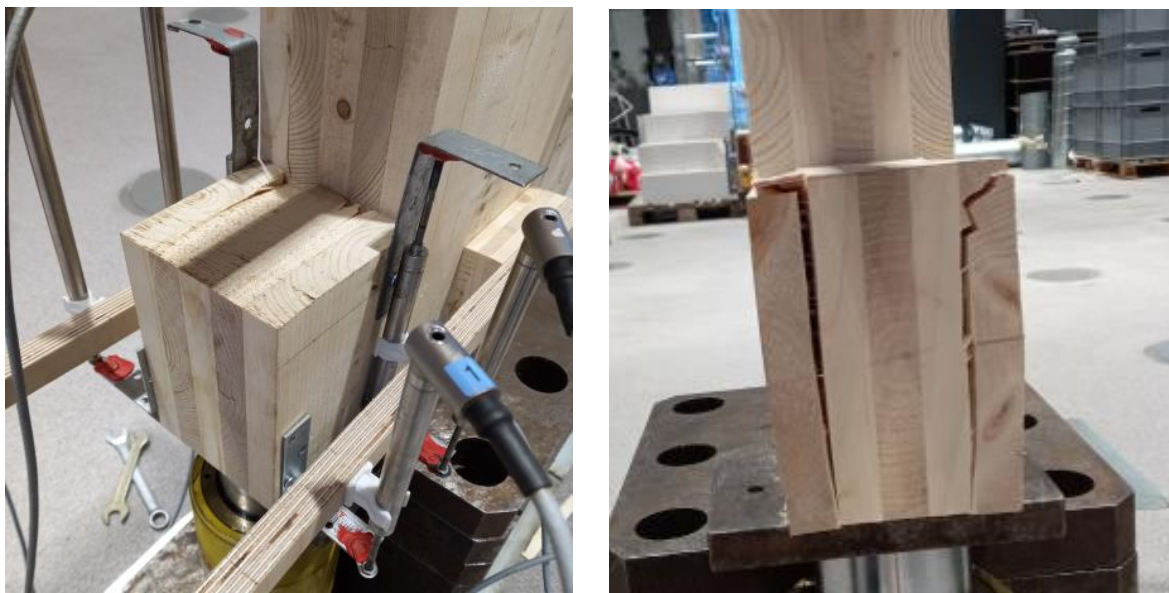
Ristkihtliimpuit koosneb alati paaritu arvulistest lamellikihtidest, mistõttu on olenevalt välimiste lamellide suunast paneelis domineerivad ristkihid või pikikihid. Katsetes kasutatud ristkihtliimpuidu konfiguratsioonis on kõik kihid võrdsete paksustega. Välimiste lamellide vertikaalsel paiknemisel on ristkihte kaks tükki, kuid kihid on mõlemast küljest seotud pikilamellidega. Välimiste lamellide horisontaalsel asetusel tekib kolm ristkihti, milledest keskmine on kahest küljest seotud ning äärmised ühest küljest seotud. RVSE arvutusmeetodi, esitatud peatükis 3.2.2, kohaselt hinnatakse 5-kihilise võrdsete lamellipaksutega ristkihtliimpuidu *in-plane* nihketugevust olenemata välimiste lamellide suunast võrdtugevaks. Konfiguratsiooni erinevustest hoolimata hinnatakse nihketugevust samaväärseks, kuna ristlamellide seotus mõlemast küljest annab suurema nihke vastupanu kui ristlamellide soetus vaid ühest küljest.

Katsetamiste käigus tehti tapikõrgusega 150 mm nihkekatsed, kus ühel juhul välimised lamellid asetsesid koormamise suunas (NK3 ja NK4) ning teisel juhul paiknesid välimised lamellid koormamise suunaga risti (NK9 ja NK10). Katseandmetest selgus, et jõu suunaga risti asetsevate välimiste lamellide puhul oli kandevõime keskmiselt 25% suurem kui välimiste lamellide pikisuunalise asetuse korral. Tapikõrguse 150mm koormuse-deformatsiooni diagrammid on esitatud Joonis 5.11.



Joonis 5.11 Välimiste lamellide risti (punasega) ja piki (sinine) asetuse koormuse-deformatsiooni diagramm.

Suurem nihkekandevõime tekkis katsekehade NK9-NK10 korral, kuna nihkele töötavaid ristkihte on antud konfiguratsiooni korral kolm tükki, ent NK3-NK4 korral on töötavaid kihte kaks. Seetõttu tekib erinevus ka nihkele töötavas ristlõike pindalas. Ehk teoreetiline arvutusmetoodika tulemus ei ühti katsetulemustega, mil RVSE meetod annab välimiste lamellide horisontaalsel asetusel kandevõime rohkem tagavara kasuks. Ristlamellide seotus pikilamellidega on vähem tähtsam kui ristkihtide lõikepindala.



Joonis 5.12 Iseloomulikud purunemiskiivid olenevalt välimiste lamellide asetusest. Paremalt NK3 katsekeha, vasakult NK10 katsekeha

Purunemispildid välimiste lamellide asetusel horisontaalselt ning vertikaalselt on esitatud Joonis 5.12. Visuaalsel vaatlusel oli märgata NK9-NK10 katsekehade kandevõime ületamisel purunemist välimistes ristlamellides, vastavalt Joonis 5.12 parempoolne pilt. Välimised lamellid, mis asetsevad koormamise suunaga risti on armeeritud vaid ühelt küljelt ning nihkumise tagajärjel võivad välimised töötavad lamellid liimist lahti tulla ning kandevõimet oluliselt vähendada, vaata Joonis 5.13. Seega on välimiste lamellide ristasetuse korral tapi deformeeritavus purunemise järgselt väiksem kui välimiste lamellide pikiasetuse korral. Lisaks kirjeldavad Joonis 5.11 esitatud koormuse-deformatsiooni diagrammid suuremat kandevõime vähenemist purunemise järgselt horisontaalsete välimiste lamellide asetuse korral.



Joonis 5.13 Ühelt küljelt armeerimata lamellide purunemine

5.1.6 Nihkekatsese meetoodika sobivus

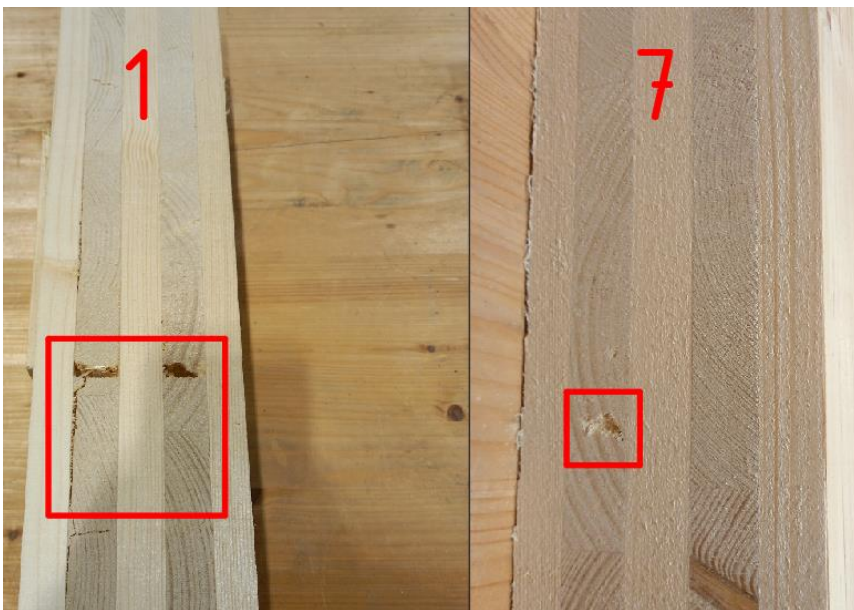
Nihkele töötavate ristlamellide vigastuste ulatust koormamise järgselt kontrolliti vertikaalsete lõigetega tapihamba lähedalt, vaata Joonis 5.14. Lõiked tehti 10 mm laiuste ribadena ning kokku 60 mm sügavusele katsekeha põhiosa sisse, vaata Joonis 5.14. Vigastuste ulatus sumbus minimaalseks 60 mm sügavusel katsekeha sees, vaata Joonis 5.15 ja Joonis 5.16. Katsekehade põhiosa laius on tappide laiuse maha arvestamisel 200 mm. Sellest saab oletada, et kahepoolne katsetamine ei mõjuta katsetulemusi negatiivselt, ehk ühe poole koormamine ja kandevõime ületamine ei mõjuta teise tapihamba kandevõimet.



Joonis 5.14 Vertikaalsed lõiked kontrollimaks ristlamellide vigastuste ulatust katsekeha suunas



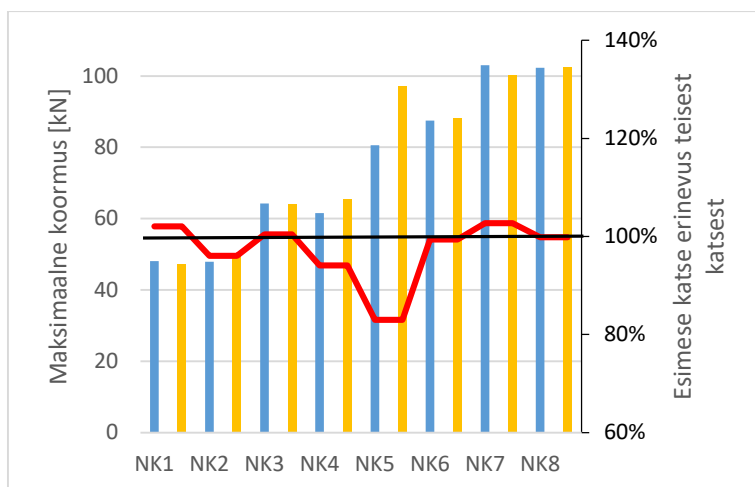
Joonis 5.15 Numbriliselt tähistatud väljalõike osade järjekord. Punasega tähistatud ligikaudne tapihamba mõjuala. Nooltega osutatud vigastatud ristilamelli piirkondadele



Joonis 5.16 Vigastuste ulatuse erinevus esimese lõikepinna ja viimase lõikepinna vahel.

Võrreldes kasutatud katsekehade esimest katsetulemust teise katsetulemusega ei teki seost, mis viitaks teise katse väiksematele kandevõimetele. Katsekehade kaupa on varieeruv kumb katsetest suurema nihketugevuse saavutas. Joonis 5.17 on esitatud protsendiline erinevus esimese ja teise katsetulemuse vahel katsekehade kaupa. Kõige suurem erinevus esimese ja teise katse vahel ilmselt ilmnes NK5 katsekeha puhul, mil esimesel katsel mõõdetud maksimaalne nihkekoormus moodustas 83% teisel katsel saavutatud koormusest. Antud erinevus on ilmselt põhjustatud materjali iseärasustest, kuivõrd katsemeetodist. Samuti ei ole erinevust näha kõrgemate tappide korral, mil jõud on

suuremad ning eeldatavad vigastused ulatuvad kaugemale katsekeha sisemusse. Autori arvates kinnitab analüüs kahepoolse katsetamise sobivust ning katseliste maksimaalsete nihkekoormuste usaldatavust.



Joonis 5.17 Nihkekatsete maksimaalsed koormused katsekehade kaupa, sinisega on katsekeha esimene katsetus ja kollasega katsekeha teine katsetus. Punase joonena on esitatud esimese ja teise katsetulemuse jagatis protsentides, kui esimene on väiksem kui teine katsetulemus, on protsent alla 100% ja vastupidi

5.2 Survekatse (SK) seeria

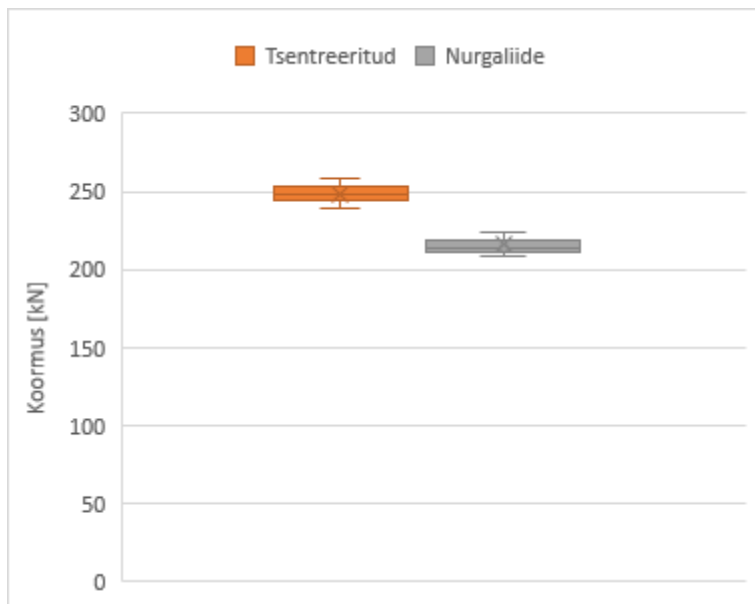
5.2.1 Üldised katsetulemused

Survekatseid sooritati 10 katsekehaga kokku 5 koormuskatset. Esimese 2 katsetuse käigus olid kontaktpinnad katsekehade vahel katsekehade keskel, edaspidi tsentreeritud liide, ning 3-5 katsetusel asetses koormuspind katsekehade nurgas, edaspidi nurgaliide. Katsekehade erinev asetus on nähtav Joonis 4.7. Survekatsete tulemused: maksimaalne saavutatud survekoormus ning pikilamellidesse tekkinud survepinged, on esitatud Tabel 5.2.

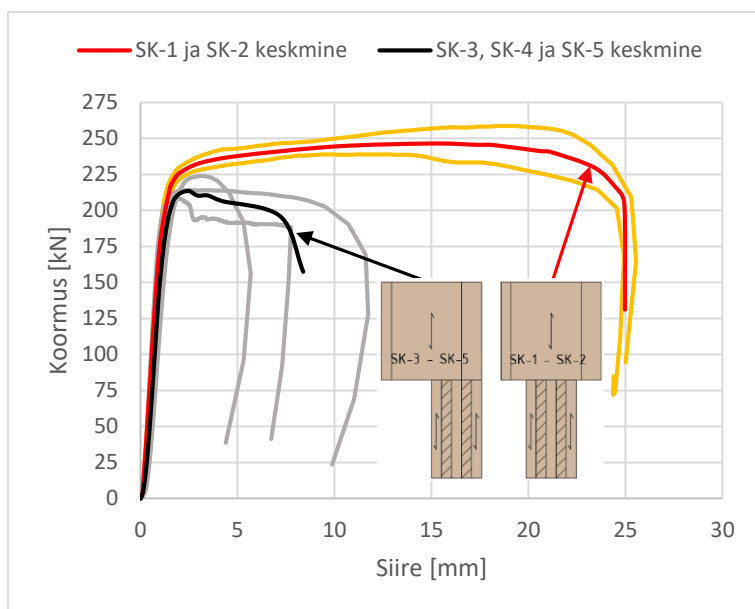
Tabel 5.2 Survekatsete tulemused

Tähis	Tihedused [kg/m ³]	Maksimaalne survekoormus [kN]	Survepinge lamellis [MPa]
SK-1	430	238,89	66,36
SK-2	424	258,66	71,85
SK-3	409	214,14	59,48
SK-4	459	223,99	62,22
SK-5	429	209,13	58,09
Keskmine	430	229	64
CoV [%]	4%	8%	8%

Survekatsete SK-1 ja 2 survetugevused olid keskmiselt 13% kõrgemad kui katsetel SK-3 kuni SK-5. Varieeruvus katsetulemustes on vastavalt SK-1 ja 2 puhul $CoV = 4\%$ ning SK-3 kuni SK-5 katsetel $CoV = 3\%$. Katsekehade asetusele vastavalt grupeeritud katsetulemused on esitatud Joonis 5.18.



Joonis 5.18 Liidete maksimaalsed survekandevõimed

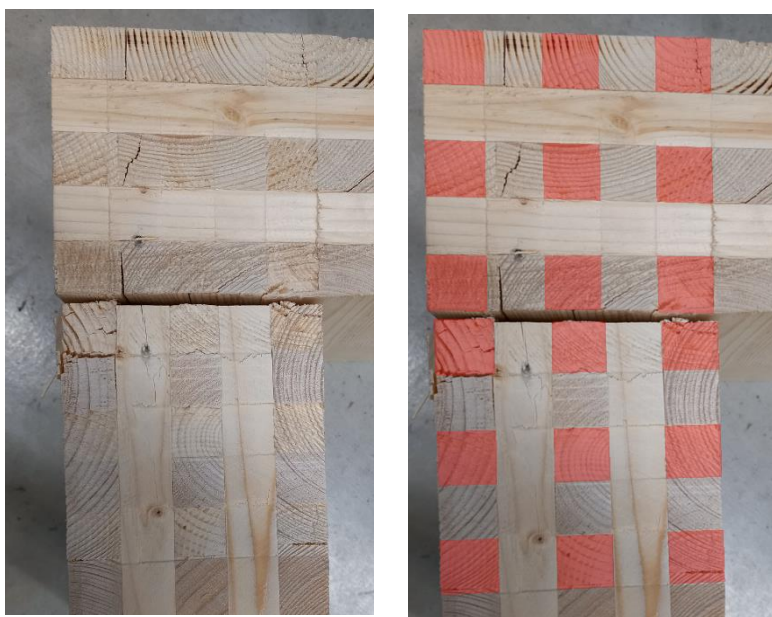


Joonis 5.19 Survekatsete koormuse-deformatsiooni graafikud. Kollasega SK-1 ja SK-2 (punasega nende keskmine), halliga SK-3, SK-4 ja SK-5 (mustaga nende keskmine).

Survekatsete koormuse-deformatsiooni graafikud on esitatud Joonis 5.19. Koormuse-deformatsiooni graafikutelt ilmneb tsentreeritud ja nurgaliite erinevad survetugevused

ning erinevused liite deformeeritavuses. Nurgaliitel on lisaks väiksemale survetugevusele ka väiksem deformeeritavus.

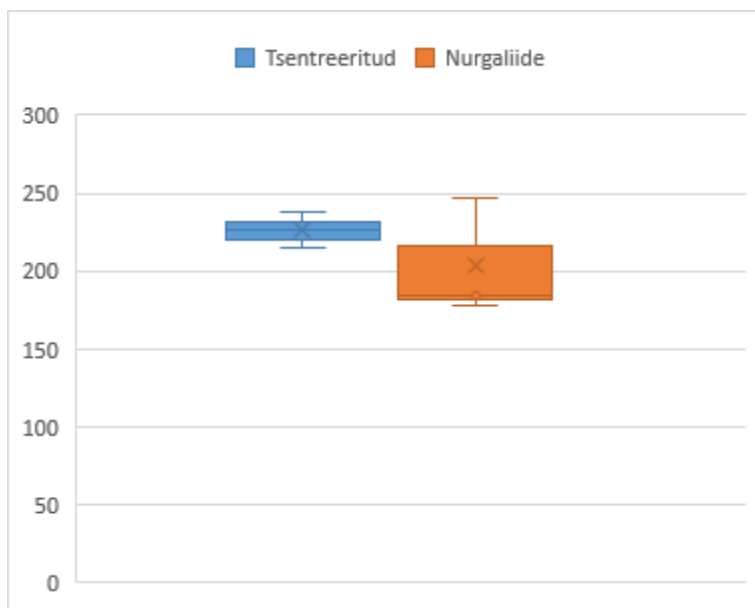
Tasapinnas pikijõuga koormatud ristkihtliimpuit elementide efektiivseks survepinnaks saab lugeda pikilamellide omavahelist kontaktpinda. Efektiivpindala suurenemist ristkiudu asetsevate lamellid arvelt eeldada ei saa, sest ristikiudu on puidu elastsusmoodul ligi 30 korda madalam kui pikikiudu. Katsekehade vaatlusel sai see ka kinnitust, Joonis 5.20 on näha muljumispilt pärast koormamist. Kontaktis olnud pikilamellide vahelised alad (Joonis 5.20 punasega tähistatud) on survepingete tõttu selgelt deformeerunud. Pikilamelli ja ristlamelli vahelises alas ei ole visuaalselt märgata muljumisjälgi pikilamellil, ehk selles alas jõudude ülekannet ei toimunud.



Joonis 5.20 Muljumispindade pilt pärast koormamist. Paremäl on punasega tähistatud efektiivpindala alad

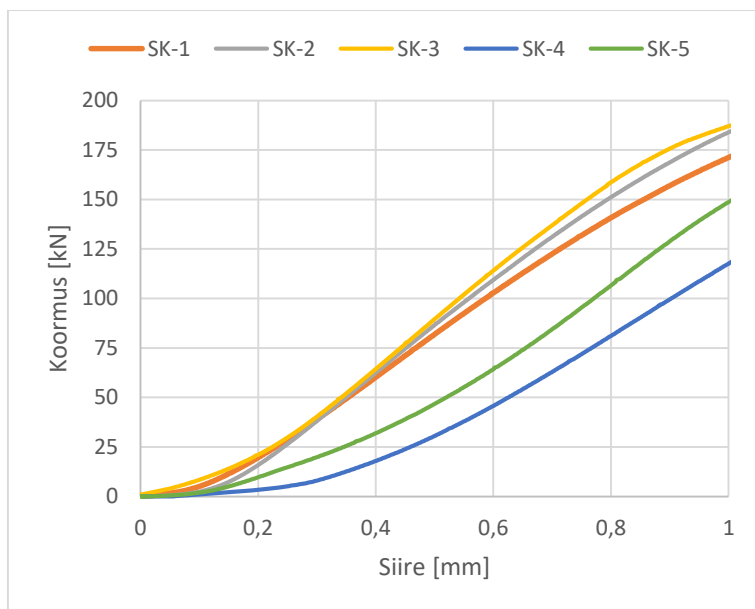
5.2.2 Liidete jäikused

Liite jäikuse leidmiseks kasutati standardi EVS 594:2011 kohast jäikuse leidmise meetodit. Jäikused on leitud siirdeanduritelt mõõdetud siirete alusel, et leida puhta liitekoha jäikus ning välistada välised mõjutegurid, esitatud Joonis 4.14. Globaalne siire, mis on mõõdetud katsemasinaga, arvestab ka katsemasina enda deformatsioone ning seda arvesse ei võetud. Surveliidete jäikused on esitatud Joonis 5.21.



Joonis 5.21 Liite survejäikused EVS 594:2011 meetodil.

Kõigi liitejäikuste $CoV = 13\%$ ehk katseandmete muutlikus on üsna suur. Kui deformeeritavus ja survetugevus oli tsentreeritud liite korral suurem, siis jäikuse tulemuste põhjal on keeruline leida erinevust, mis oleks tingitud liite asetusest. Surveliidete koormuse-deformatsiooni graafikute purunemiseelsed osad on esitatud Joonis 5.22.



Joonis 5.22 Koormuse-deformatsiooni diagrammide tõusunurga kujutamine

5.2.3 Surveliite purunemisviis

Koormatud katsekehade vaatlusel selgus, et purunemine survele toimub peamiselt välimistes pikilamellides. Pikilamellides ületatakse survetugevus tsoonides kus

pikilamellid töötavad ehk on kontaktis teise pikilamelliga. Välimised lamellid on ristilamellide poolt seotud vaid ühelt küljelt ning seetõttu toimus nurkliite korral purunemine just liite välimisest nurgast. Katse SK-5 puhul nähtus ka purunemisviis, mille korral ühe katsekeha küljest lendas koormamise käigus ära osa äärmisest pikilamellist. Eemaldunud tüki suurus oli ligikaudu pool ühest kontaktpinna ruudust, mis vähendas efektiivset kontaktpindala 5,6%. See kajastub ka maksimaalses survetugevuses, mis oli SK-5 katsel 9,9 kN ehk 5% madalam kui SK-3 ja SK-4 keskmine survetugevus. Nurgaliite koormamisjärgsed purunemispildid on esitatud Joonis 5.23. Efektiivpindalade vähenemise mõju analüüs survekandevõimele on esitatud Lisa 4.

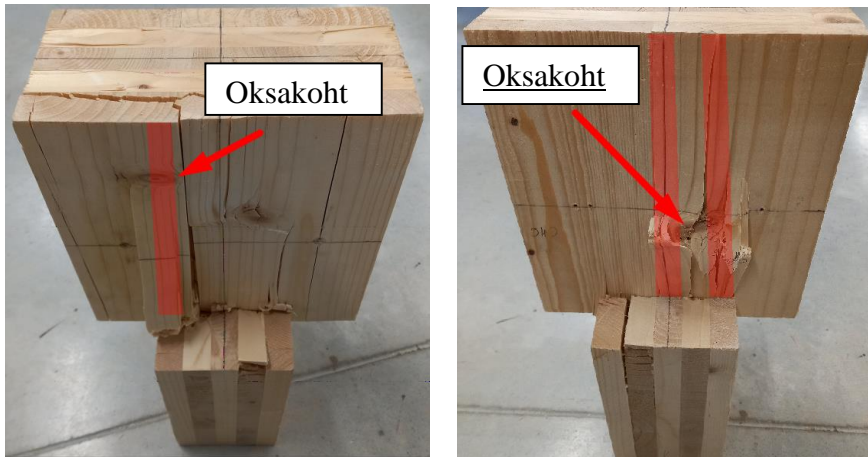


Joonis 5.23 Purunemispilt katsetel alustades vasakult: SK-3, SK-4 ja SK-5

Tsentrilisel liitel toimus purunemine samuti välimises pikilamellis ning piirkonnas, mis kandis pinget edasi. Järgi andis nõrgestusega näiteks oksakohaga lamell, näidatud Joonis 5.24 ja Joonis 5.25.

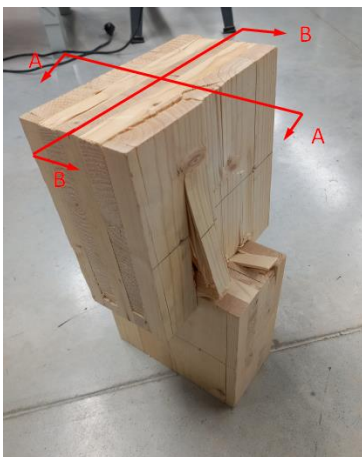


Joonis 5.24 Liidete purunemispildid survekatsetel SK-1 (vasakul) ja SK-2 (paremal)



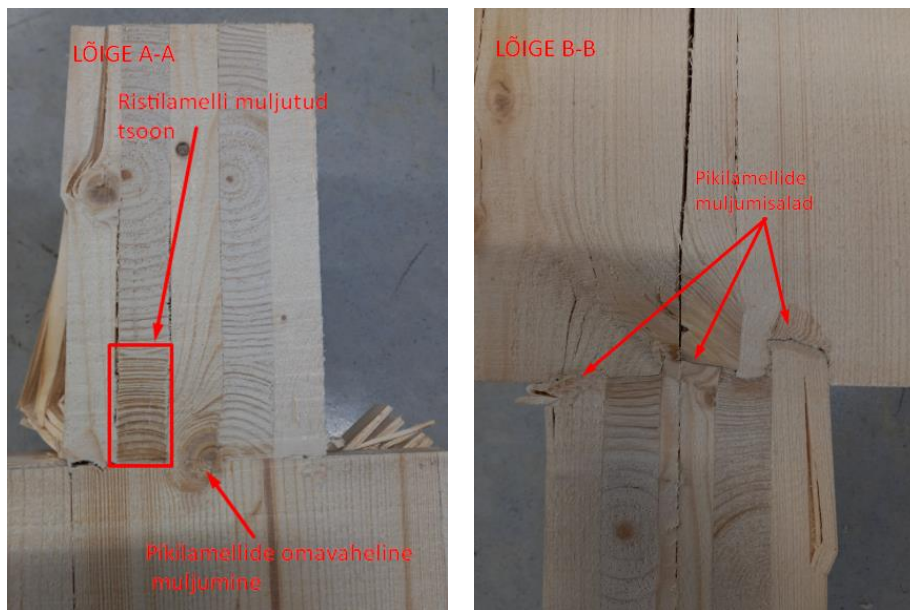
Joonis 5.25 Punasega tähistatud ala on koormatud pikilamelli lõik ning noolega on tähistatud nõrgestuse asukoht

Katsekehade analüüsiks lõigati SK-2 katsekehad vertikaalsete lõigetega piki keskmist pikilamellikihti neljaks oskaks, vastavalt Joonis 5.26.



Joonis 5.26 SK-2 lõikejoonte tähistus

Tsentreeritud surveleite deformeeritavus on väga suur, katsetel saavutati deformatsioon ligemale 25mm, vastavalt Joonis 5.19. Liites on tekkinud muljumine ka pikilamellide vahel, kus tugevama struktuuriga pikilamell on surutud nõrgema pikilamelli kiudude sisse, nähtav Joonis 5.27.



Joonis 5.27 Vertikaallõiked piki keskmist pikilamelli. Tähistatud on pikilamellide omavaheline muljumine ning ristilamelli muljumine.

5.2.4 Liite konfiguratsiooni mõju survetugevusele

Eelnevalt esitatud survekatsete tulemustest selgus, et tsentreeritud liidete (SK-1, SK-2) survetugevused olid keskmiselt 13% kõrgemad kui nurgaliidetel (SK-3 kuni SK-5). Suurem kandevõime võib olla põhjendatud kontaktpindade külgsuunalisele seotusele. Kontaktpind on seotud, kui kontaktpind asetseb katsekeha põhiosa poolisel küljel. Sidumata kontaktpind saab kergemini välja nõtkuda kui seotud kontaktpind, mistõttu purunesid SK-3 kuni SK-5 liited nurgast sidumata kontaktpinna välja nõtkumisel, nähtav Joonis 5.23.

5.3 Tapikatse (TK) seeria

5.3.1 Üldised katsetulemused

Tappliitele tehti kokku 2 koormuskatset, milles kasutati 4 katsekeha. Katsed käsitlesid endas nii seina keskele liituvat olukorda, kui ka nurgaliite olukorda, vastavalt Joonis 4.9 ja Joonis 4.10 näidatud liited. Katsekehade keskmised tihedused olid $433 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, varieeruvusega $CoV = 2\%$. Katseandmetest nähtub, et maksimaalses survekoormuses oli erinevus katsetel 10,6 kN, kuid liidete jäikused on väga sarnased. Katsetulemused on esitatud Tabel 5.3.

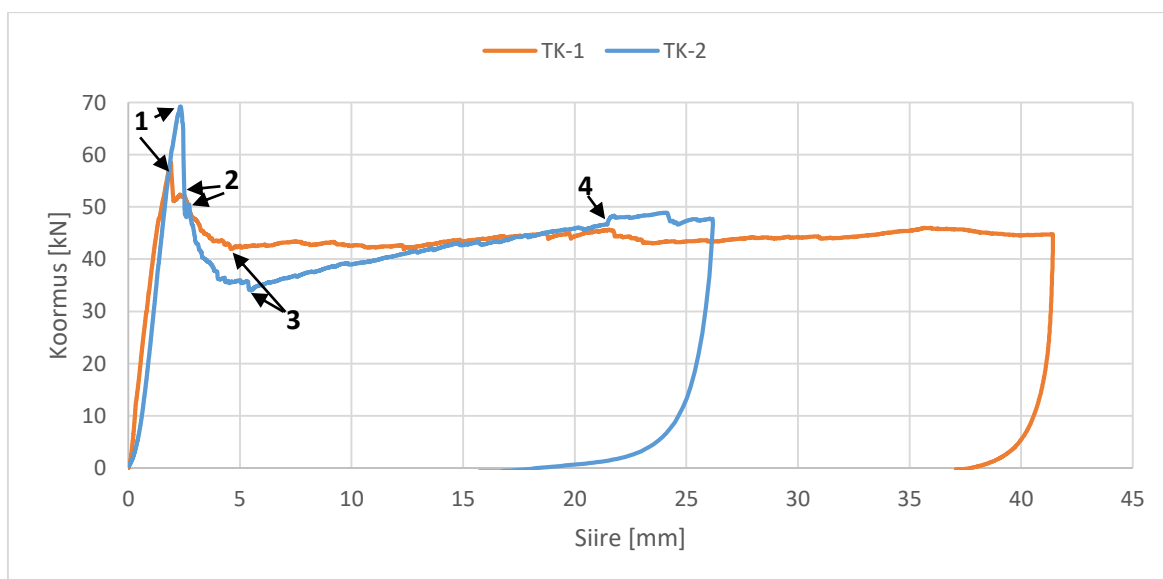
TK-1 korral toimus koormamine 45mm siirde saavutamiseni, katsemasina üldsiirde järgi ning Joonis 5.22 kujutatud ligikaudu 42 mm siire on mõõtekelladega mõõdetud liite lokaalne siire. TK-2 korral toimus koormamine 25 mm siirde saavutamiseni. Joonis 5.22

kujutatud koormuse-deformatsiooni diagrammi järsud langused katse lõpus on tingitud masina koormuse vähendamisest.

Tabel 5.3 Tapiliite katsetulemused

Katsed	Tihedus	Maksimaalne survekoormus	Liite jäikus
	[kg/m ³]	[kN]	[kN/mm]
TK-1	446	58,6	38
	425		
TK-2	433	69,2	39
	428		
Keskmine	433	64	38
CoV [%]	2%	8%	1%

Koormuse-deformatsiooni diagrammidel on näha, et purunemine toimub hapralt, mil kandevõime saavutades langes TK-1 korral koormus 13% ning TK-2 korral 30% (Joonis 5.28 punkt 2). Mõlemal katsel oli seejärel märgata mõningast koormuse kasvu. Edasisel koormamisel langes kandevõime veelgi ning saavutas seejärel TK-1 puhul 28% ja TK-2 puhul 51% koormuse languse korral maksimaalsest koormusest ühtlase tablooo (Joonis 5.28 punkt 3). Koormuse ühtlasel tasemel või mõningasel tõusul kasvas siire järjepidevalt, ehk toimus liite voolamine. Katse TK-2 puhul on Joonis 5.28 punktis 4 kujutatud graafiku tõus tingitud koormustsükli vahetumisest, mil koormamise kiirust suurendati 3 korda, suurem koormamise kiirus tekitab hetkelise suurema kandevõime. Punktis 1 on tähistatud maksimaalsed liite koormused.

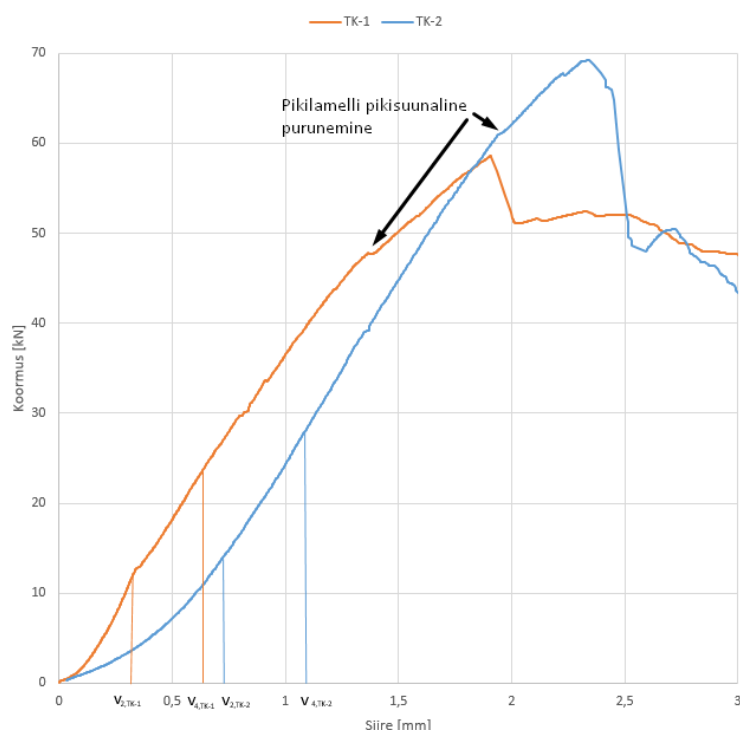


Joonis 5.28 Tapikatsete koormuse-deformatsiooni graafikud.

5.3.2 Liidete jäikused

Tapikatsete jäikused olid mõlema katse puhul väga sarnased, mida illustreerib Joonis 5.29 nähtavad tõusunurgad enne maksimaalse koormuse saavutamist. Samuti on näidatud jäikuse arvutamiseks kasutatud siirde punktid. Liidete jäikused on esitatud Tabel 5.3.

Lisaks on tähistatud enne maksimaalse koormuse saavutamist tekkiv siirde juurdekasv konstantsel koormusel, mis on tekkinud pikilamellide pikisuunalisest purunemisest nihkepinna lähedal. Katsetuse käigus toimus sellel hetkel raksatus katsekehas ning ilmus pragu pikilamelli. Selline käitumine ei pruugi toimuda kui lõikepinna vahetusse lähedusse jääb pikilamellide vaheline liimimata serv.



Joonis 5.29 Koormuse-deformatsiooni graafiku tõusunurga kirjeldus. Graafikul on esitatud ka jäikuse määramise punktid.

5.3.3 Tapikatse purunemisviis

Katsete käigus oli katsekehade käitumist keeruline jälgida, kuna TK-1 puhul oli tapp teise katsekeha poolt varjatud ning visuaalset vaatlust sai teostada peamiselt tapiotsast. TK-2 puhul oli näha ka tapi üks külg.

Joonis 5.22 illustreerib rabadat tapi purunemist nihkele. Maksimaalse kandevõime saavutades väheneb tapi kandevõime järsult ning siirde juurdekasv sellel hetkel on väike. Rabeda purunemise katseliseks tõestamiseks on vajalik katseseadeldise suurt

jäikust, et kandevõime ületades vabanevad pinged katseseadeldises ei kanduks katsekeha siirdamiseks. Purunemishetkel toimub pinge vähenemine väga väikese siirde jooksul, mistõttu saab järeldada katseseadeldise suurt jäikust.

Välimestes pikilamellides tekib vertikaalsuunaline pragu tapi ja põhiosa piirile, vaata Joonis 5.30. Pikipragu tekib enne maksimaalse koormuse saavutamist, ning on nähtav ka Joonis 5.22 osutatud punktis. Pikilamelli prao tekkel väheneb liite jäikus.



Joonis 5.30 TK-2 katsetuses nähtav vertikaalnepragu pikilamellis vahetult tapi ja põhiosa joonel

Joonis 5.31 kujutab TK-1 katse käigus monitooritud tapiotsa ristlamellide purunemist. Kandevõime saavutades ehk ca 2 mm siirde korral tapiotsas ristlamellides pragusid ei tähendatud, ehk sellel hetkel toimub kandevõime ületamine tapi ja põhiosa vahelises alas ristlamellide kandevõime ületamisel. Edasisel koormamisel areneb ristlamellides köieefekt ning üha rohkem pragusid on nähtavad ka tapiotsas. 30 ja 40 mm deformatsioonide korral on 150 mm tapiosa ristlamellides nähtavad suured praod, mis tekivad peamiselt suvise ja talvisepuidu ühenduskohtadesse, ent ka pikilamelli vahetus lähedusse pikilamelli suunaliselt. Tapiotsast nähtav purunemine tekib ristlamellide köieefetist, ehk tõmbele töötamisest. Pikilamellid on samal ajal fikseeritud asendis ehk paralleelsed katsekehaga, tekib ka vääne liimpindadel ristkihi ja pikikihi vahele, ristlamellide pöördumisest pikilamellide suhtes.

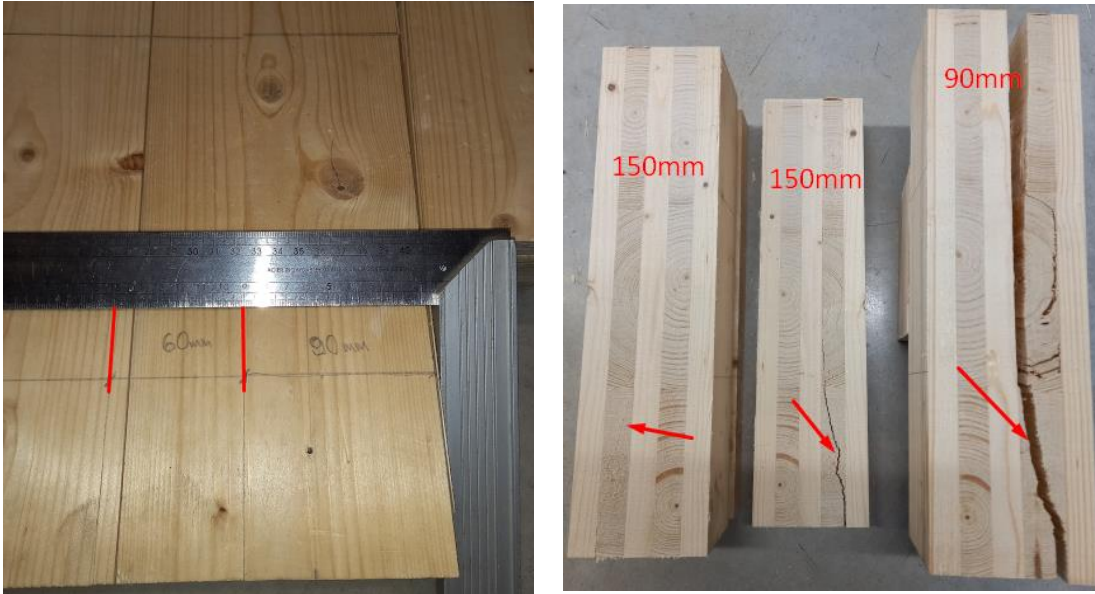


Joonis 5.31 TK-1 katse tapiotsa ristilamellide pragunemine. Paremäl pragunemine ca 10 mm siirdel, keskel ca 35mm siirdel, paremal 43mm siirdel

TK-1 tapiga katsekeha vertikaalsel lõikel piki ristkihti on näha ristlamellidesse tekkinud vigastused, esitatud Joonis 5.32.



Joonis 5.32 TK-1 tapigakatsekeha vigastuste ulatus. Parem poolsel fotol vertikaallõige ristkihist TK-1 katsel koormati katsekeha 42mm siirdeni, mille tõttu ka ristkihis tekkinud vigastused ulatusid kaugemale katsekeha põhiosa sisse kui nihkekatsel. Joonis 5.33 on esitatud katsekehast ristlõiked tapist 90mm ja 150mm kaugusel. Ristkihi vigastused sumbusid antud juhul ca 150mm sügavusel.



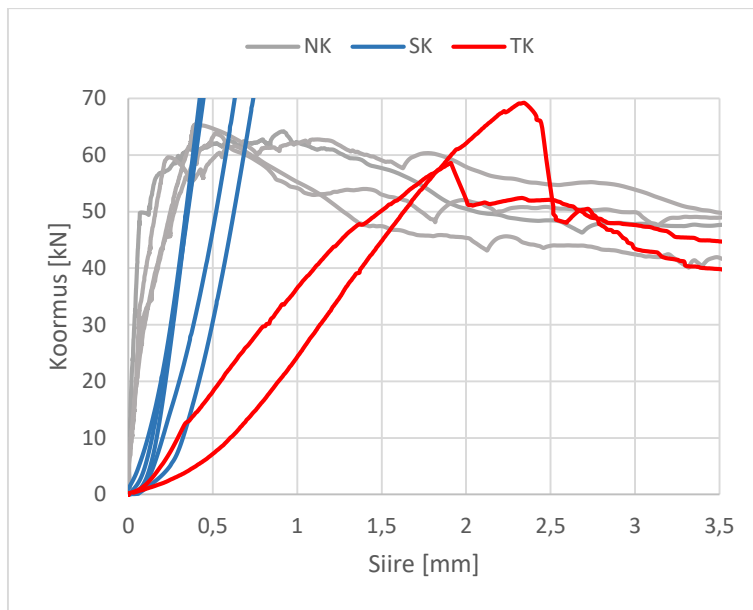
Joonis 5.33 Ristkihi vigastuste ulatus 150mm kaugusel katsekeha põhiosa sees

5.4 Katseseeriade võrdlus

5.4.1 Katsetulemuste võrdlus

Tapikatse (TK) puhul oli tegemist nihkekatse ja survekatse kombinatsiooniga. Katsekehade piiratud mõõtmetest tulenevalt valiti tapikatse tapikõrguseks 150 mm. Nihkekatsete keskmiseks nihkekoormuseks 150 mm tapi korral saadi 64 kN. Survekatsete põhjal oleks survepurunemiseks vajalik saavutada koormus 229 kN. Seega oli teada tapikatse puhul, et purunemine toimub nihkele, kuid nihkejõudusid tekitava pikijõu edasikandumine puidust katsekehalt tapile oli erinev koormusplaadiga koormamisest.

Võrreldes nihkekatse 150 mm tapikõrgusega katsetulemusi tapikatse tulemustega, ilmneb, et tapikatsetes oli liite jäikus oluliselt madalam kui nihkekatsetel katsekehade puhul. Keskmine jäikus nihkekatsetel 150 mm tapikõrguse korral oli $171 \frac{\text{kN}}{\text{mm}}$ ning tapikatsetel oli jäikuseks $38 \frac{\text{kN}}{\text{mm}}$, mis tähendab jäikuse erinevust 4,5 korda. Joonis 5.34 esitab survekatse tulemused, nihkekatsetulemused 150 mm tapi kõrgusega ja tapikatsete tulemused ühes koos. Joonis 5.34 koormusväärtuste ülemiseks piiriks on valitud 70 kN, mis on sobilik nihkekatsete ja tapikatsete tugevuste kajastamiseks. Survekatsete puhul kajastub graafikul katsete jäikuste võrdlus ehk purunemisele eelnev graafiku osa ning purunemiskoormuseni graafiku kujutamine ei ole võrdluseks tähtis.



Joonis 5.34 Nihkekatsete (150mm), survekatsete ja tapikatsete koormus-deformatsiooni graafikute võrdlus.

Tapikatsete keskmine nihketugevus oli 63,9 kN ning nihkekatsetel 150 mm tapikõrguse korral oli selleks 63,7 kN, mis teeb erinevuseks vaid 0,2 kN. Sellest saab järeldada, et katsetuste käigus saadud maksimaalsed nihkekoormused tapile on realistlikud ja kasutatavad järelduste tegemisel. Katsetulemuste analüüsist selgub, et liite tugevust annab hästi ennustada liitekomponente eraldiseisvalt katsetades, kuid jäikust ei saa analoogselt tuletada, kuna liite jäikus on madalam kui katsekehade üksik jäikused. Liitekatse puhul toimub pinge kandumine tapile läbi teise katsekeha, mis on erinev nihkekatsete korral terasplaadiga koormamise olukorrast. Lisaks esinesid katsekehade vahel tolerantsid, mille tõttu ei pruukinud kogu katsekehade vaheline pind saavutada kontakti.

5.4.2 Välimiste lamellide suund

Välimiste lamellide horisontaalsel asetsemisel saavutatakse suurem nihketugevus, Joonis 5.11. Töö autori arvates on välimiste lamellide horisontaalsel asetsemisel aga riskid, nimelt kannatab tappliite töökindlus. Välimised lamellid on niiskuslikele mahumuutustele vastuvõtlikumad ning võib tekkida oht nihkekandevõime vähenemisele ajas. Samuti on purunemispilt riskantsem, kuna välimised lamellid võivad paneeli küljest eemalduda. Tappliite nihketapi kõrgus sõltub surve ja nihkekandevõime kooslusest. Nihkekandevõimet saab suurendada tapikõrguse kasvatamisega, mistõttu saab madalama ristlõike nihkekandevõime kompenseerida tapikõrguse suurendamisega. Töö autor soovib kasutada nihketapi koostamisel välimisi lamelle vertikaalsuunaliselt, et nihkele töötavad ristkihid oleks mõlemalt küljelt armeeritud ning saavutataks suurem survepindala pikilamellide vahel.

6. TULEMUSTE VÖRDLUS VALITUD ARVUTUSMUDELITEGA

6.1 Nihkekandevõime leidmine

6.1.1 RVSE meetod

RVSE meetodi kohaselt leitakse erinevatele tapikõrgustele vastavad kandevõimed. Lisaks arvestatakse, et lamellid ei ole külgliimitud. Võrdlemaks antud tulemusi katsetulemustega, siis arvestatakse varuteguri väärtus võrdseks 1-ga. Modifikatsiooniteguri väärtus arvestatakse võrdseks 1,1-ga, kuna koormamisel on tegemist hetkelise koormusega. Esimese sammuna leitakse summaarne paksus ideaalsetest lamellidest vastavalt valemile (3.4). Kuna kõik lamellid on võrdse paksusega, on tulemuseks: $t_{tot}^* = \sum_1^{n_{lay}-1} t_i^* = 20 + 20 + 20 + 20 = 80 \text{ mm}$. *Net-shear* nihketugevus leitakse vastavalt valemile (3.3):

$$\tau_v = \frac{2 * F_d}{t_{tot}^* * b_l} = \frac{2 * F_d}{80 * 140} \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$$

Katsekehade lamellide laiused on ligikaudu $b_l = 140 \text{ mm}$. Arvestades lamellide nihketugevuseks Brandner R. ja Tomasi R. COST-is esitatud soovitusliku väärtuse $f_{v,CLT,k} = 5,5 \text{ MPa}$ [[9]], saab leida vastava konfiguratsiooniga katsekeha teoreetilise nihketugevuse valemi (3.1) põhjal:

$$f_{v,CLT,d} = \frac{k_{mod} * f_{v,CLT,k}}{\gamma_M} = \frac{1,1 * 5,5}{1} = 6,05 \text{ MPa} \Rightarrow f_{v,CLT,d} = \tau_v \Rightarrow 6,05 = \frac{2 * F_d}{80 * 140}$$

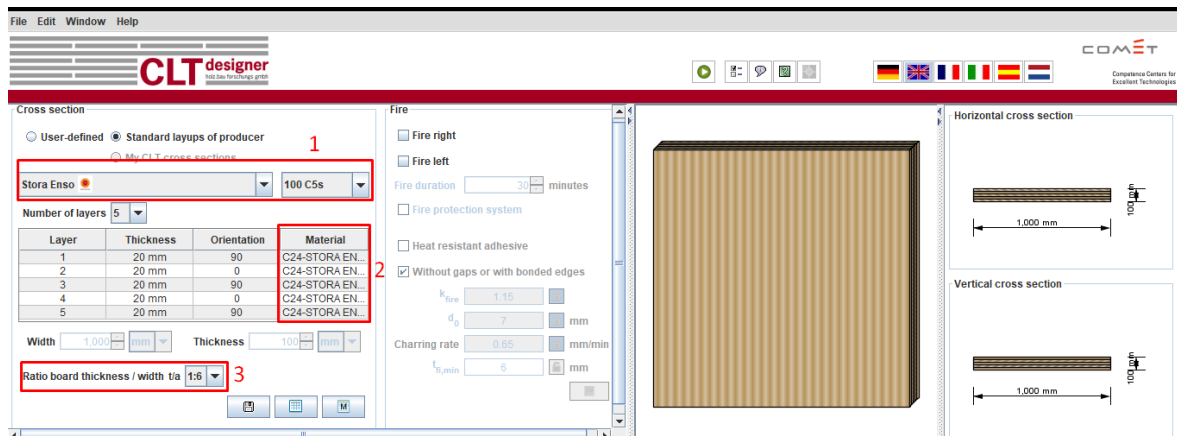
$$F_d = \frac{6,05 * 80 * 140}{2} = 33880 \text{ N}$$

Kuna tapi kõrgus, milles nihkejõud mõjub, ei ole võrdne RVSE laiusega tuleb tegeliku koormuse leidmiseks korrutada RVSE maksimaalne koormus tapi kõrguse ja RVSE laiuse suhtega. Seega on maksimaalne 100 mm tapi kandevõime: $F_{max} = F_d * \frac{x}{b_l} = 33880 * \frac{100}{140} = 24200 \text{ N} = 24,2 \text{ kN}$.

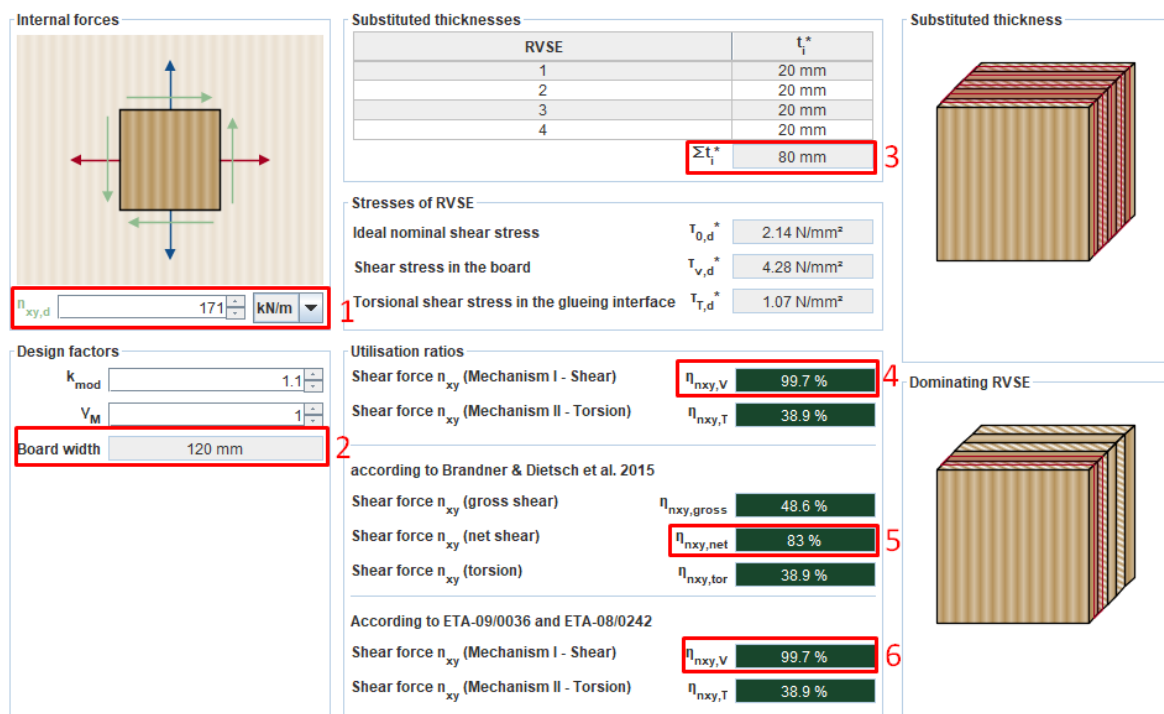
CLTdesigner-i abil nihketugevuse määramine

CLTdesigner arvutustarkvara abil saab arvutada ristkihtliimpuidu nihketugevust kasutades tarkvara moodulit „Plate loaded in plane“ või „Wall“. Viimane nimetatud moodul ei võimalda moodustada nii väikest seina elementi, mis oleks võrreldav katsetes

kasutatud tapi kõrgustega. Seetõttu kasutati antud võrdluses „Plate loaded in plane” moodulit.



Joonis 6.1 Kuvatõmmis CLTdesigner tarkvarast. 1-tootjate seast valitud Stora Enso 100mm paks tavapuidust 5 kihiline toode; 2-materjali lahter, valides tootja tekib vastava tootja deklareeritud materjalitugevusega materjal; 3- lamelli paksuse ja laiuse suhe, maksimaalselt 1/6



Joonis 6.2 CLTdesigner tarkvara tulemused RVSE nihketugevuse kohta. 1- kasutaja sisestatud proportsionaalne nihketugevus; 2- arvutustes kasutatav lamelli laius, mis tuleneb etteantud paksuse ja laiuse suhtest; 3- summaarne ideaalsete RVSE paksus; 4- nihkekandevõime kasutusaste CLTdesigneri lähenemisel; 5- nihkekandevõime kasutusaste Brandner & Dietsch lähenemisel; 6- nihkekandevõime kasutusaste ETA lähenemisel

Käsitletud CLTdesigner moodul kontrollib RVSE tugevust etteantud proportsionaalsele nihkejõule $n_{xy,RVSE}^* \left[\frac{kN}{m} \right]$. Erinevusena katsekehadega tuleb arvestada, et arvutustarkvaras on võimalik valida ristkihtliimpuidu kihtide paksused ning lamelli laiust käsitletakse suhtarvuna lamelli paksusesse ning seda kasutaja otse sisestada ei saa.

Valikus on lamelli paksuse ja laiuse suhted: $\frac{t}{b_l} = \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \frac{1}{5}, \frac{1}{6}$. Seega kasutades ristkihtliimpuitu mille kõikige kihtide lamellide laiused on $t = 20$ mm, siis kõige ligilähedasema lamellilaiuse saamiseks kasutati suhet $\frac{1}{6}$, mille alusel tuleb lamelli laiuseks $b_l = 120$ mm. Katsetes kasutatud lamellide laiused on suuremad, seega ollakse tagavara kasuks. Arvutuste tegemisel võeti aluseks Stora Enso pakutud toode, mille lamellid koosnevad C24 tugevusklassiga puidust.

Vastavalt programmi tulemustele saan leida maksimaalse nihkejõu iga tapikõrguse jaoks. Näitena toodud arvutuskäik 100 mm tapikõrguse korral.

$$n_{xy,d} = 171 \frac{kN}{m} \Rightarrow F_{max} = n_{xy,d} * x = 171 \frac{kN}{m} * 0,1 m = 17,1 kN$$

Joonis 6.2 selgub, et Brandner & Dietsh lähenemisel lubatakse märksa suuremat nihkejõudu ning *net-shear* kandevõime ületatakse alles $n_{xy,d} = 205 \frac{kN}{m}$ korral.

Kuna CLTdesigner kasutab arvutustes RVSE meetodit ent esitatud tulemused sarnanevad rohkem Tala meetodi tulemustega siis vahe tekib justnimelt kasutatud lamellide nihketugevusest. Valitud tootja Stora Enso kasutatud materjali C24 nihketugevus on madalam kui RVSE meetodi arvutustes kasutatud $f_{v,CLT,k} = 5,5 MPa$. See sarnaneb Brandner & Dietsh väärtusele.

6.1.2 Tala meetod

Tala meetodil nihkekandevõime leidmisel on efektiivseks ristlõike paksuseks $t_{net} = 40$ mm, mis on ristlamellide summaarne paksus. Nihkepinge valemist (3.8) saab tuletada maksimaalse lubatud koormuse nihketapile:

$$\tau_{xz,net} = \frac{3 * V_z}{2 * h * t_{net}} = \frac{3 * V_z}{2 * 100 * 40}$$

$$f_{v,CLT,d} = 6,05 MPa \Rightarrow f_{v,CLT,d} = \tau_{xz,net} \Rightarrow 6,05 = \frac{3 * V_z}{2 * 40 * 100} \Rightarrow V_z = \frac{6,05 * 2 * 40 * 100}{3} = 16133 N \Rightarrow V_z = 16,1 kN$$

6.1.3 Arvutuslike nihkekandevõimete ja katsetulemuste võrdlus

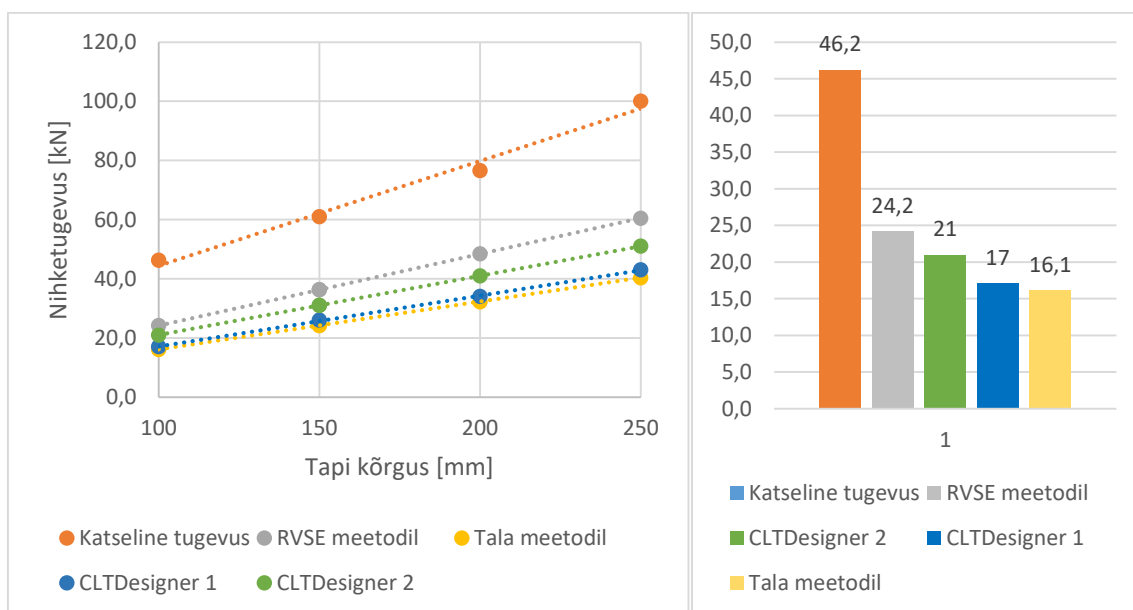
Katsetulemused on teoreetiliste arvutusmudeli tulemustega võrdlemiseks teisendatud 5% kvartiili, kuna arvutustes kasutatavad materjali tugevusväärtused on samuti normaaljaotise 5% kvartiil. Eeldades katsetulemuste normaaljaotust, on võimalik leida 5% kvartiil kui tulemuste keskväärtusest lahutada kahe kordne standardhälve. Vastavalt Tabel 5.1 esitatud katsete keskmiste väärtuste ja standardhälvete alusel leitud 5%

protsentiilile teisendatud nihketugevused: $F_{100,05} = 48,2 - 1 * 2 = 46,2$ kN, $F_{150,05} = 63,8 - 1,4 * 2 = 60,9$ kN, $F_{200,05} = 88,3 - 5,87 * 2 = 76,6$ kN, $F_{250,05} = 102,0 - 1,0 * 2 = 100,0$ kN ja $F_{150*,05} = 79,5 - 5,75 * 2 = 68,0$ kN.

Lahenduste puhul on suureks muutujaks karakteristiklik nihketugevus. Tabel 5.1 esitab nihketulemused erinevate meetodite vahel. CLTDesigner 2 tulemused on Brandner & Dietsch lähenemisel saadud tulemus, kujutatud Joonis 6.2 numbriga 5.

Tabel 6.1 Nihketugevuste väärtused vastavalt tapi kõrgusele

Katsekeha number	Tapi kõrgus [mm]	Katselise tugevuse 5% kvartiil [kN]	RVSE meetod [kN]	Tala meetod [kN]	CLT Designer 1 [kN]	CLT Designer 2 [kN]
NK1-NK2	100	46,2	24,2	16,1	17	21
NK3-NK4	150	60,9	36,3	24,2	26	31
NK5-NK6	200	76,6	48,4	32,3	34	41
NK7-NK8	250	100,0	60,5	40,3	43	51
NK9-NK10	150	68,0	36,3	24,2	26	31



Joonis 6.3 Katsetulemuste, RVSE meetodi, Tala meetodi ja CLT Designeri leitud nihketugevuste võrdlus. Paremal tapikõrguse 100mm puhul võrdlus erinevate meetodite tulemuste vahel.

Joonis 6.3 on kujutatud nihketulemuste võrdlus diagrammidena. Nihketugevuste vahel ilmnes katsetulemuste esitamisel selge lineaarne seos tapikõrguse ja nihketugevuse vahel. Selle tõttu saab kasutada erinevate meetodite võrdlemiseks Joonis 6.3 esitatud paremapoolset graafikut, mis esitab ainult 100mm tapi kõrguse puhul leitud erinevate meetodite võrdluse. Selgelt on kõigi teoreetiliste meetodite tulemused vähemalt 1,9 korda madalama väärtusega kui katsetulemused. Põhjenduseks võib olla asjaolu, et nihketugevuse määramisel kasutatakse 5% protsentiili, ehk 95% juhtudest on nihetugevus suurem kui esitatud väärtus. Katsetulemuste 5% protsentiil ei erine palju katsetulemuste keskvaertusest, kuna katsekehad on ühest tootmispartiist ning katsete arv on väike.

6.1.4 Nihkejäikused ja deformatsioonid

Nihkemoodulite leidmiseks saab kasutada Flaig ja Blab-i väljapakutud meetodit. Vastavalt meetodi esitanud uurijate soovitusel kasutatakse liite nihkemooduli väärtusena $K = 5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^3}$ ning lamelli nihkemooduli väärtusena kasutada $G_{lam} = 690 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$. Nihkele töötavate lamellide arv $m = 2 tk$. Näite arvutuses kasutatakse tapi kõrgust 100 mm. Nihkemoodul leitakse valemite (3.12) ja (3.13) kaudu (edaspidi Meetod 1):

$$G_{eff,CA} = \frac{K * b_l^2}{5} * \frac{n_{lay} - 1}{t_{gross}} * \frac{m^2}{(m^2 + 1)} = \frac{5 * 140^2}{5} * \frac{4}{100} * \frac{2^2}{(2^2 + 1)} = 627,2 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$G_{eff,CLT} = \left(\frac{1}{G_{lam}} + \frac{1}{G_{eff,CA}} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{690} + \frac{1}{627} \right)^{-1} = 328,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Nihkemooduli leidmine Bogensperger, Moosbrugger, & Silly, 2010 pakutud meetodil, valemite (3.14) ja (3.15) kaudu (edaspidi Meetod 2):

$$\alpha_T = 0,43 * \left(\frac{t_l}{b_l} \right)^{-0,79} = 0,43 * \left(\frac{20}{140} \right)^{-0,79} = 2,00$$

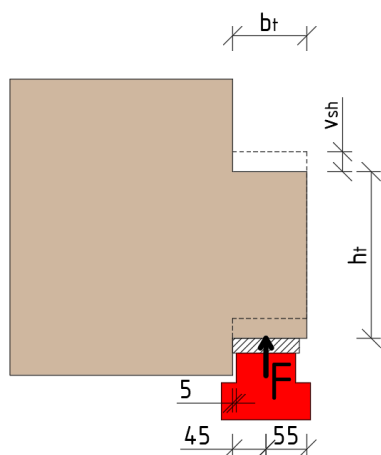
$$G_1^* = \frac{G_{lam}}{1 + \alpha_T * 6 * \left(\frac{t_l}{b_l} \right)^2} = \frac{690}{1 + 2,00 * 6 * \left(\frac{20}{140} \right)^2} = 554,25 \text{ MPa}$$

Nihkemoodul leitakse ka CLTDesigneri kasutatud meetodil, kasutades valemiteid (3.16) ja (3.17), (edaspidi Meetod 3):

$$\alpha_T = 0,32 * \left(\frac{t_l}{b_l} \right)^{-0,77} = 0,32 * \left(\frac{20}{140} \right)^{-0,77} = 1,43$$

$$G_2^* = \frac{G_{lam}}{1 + \alpha_T * 6 * \left(\frac{t_l}{b_l} \right)^2} = \frac{690}{1 + 1,43 * 6 * \left(\frac{20}{140} \right)^2} = 587,07 \text{ MPa}$$

Leitud ristkihtliimpuidu nihkemoodulite alusel leitakse tapi deformatsioon maksimaalse saavutatud nihkekoormuse korral. Katsete kirjeldus nihkedeformatsiooni leidmiseks on esitatud Joonis 6.4.



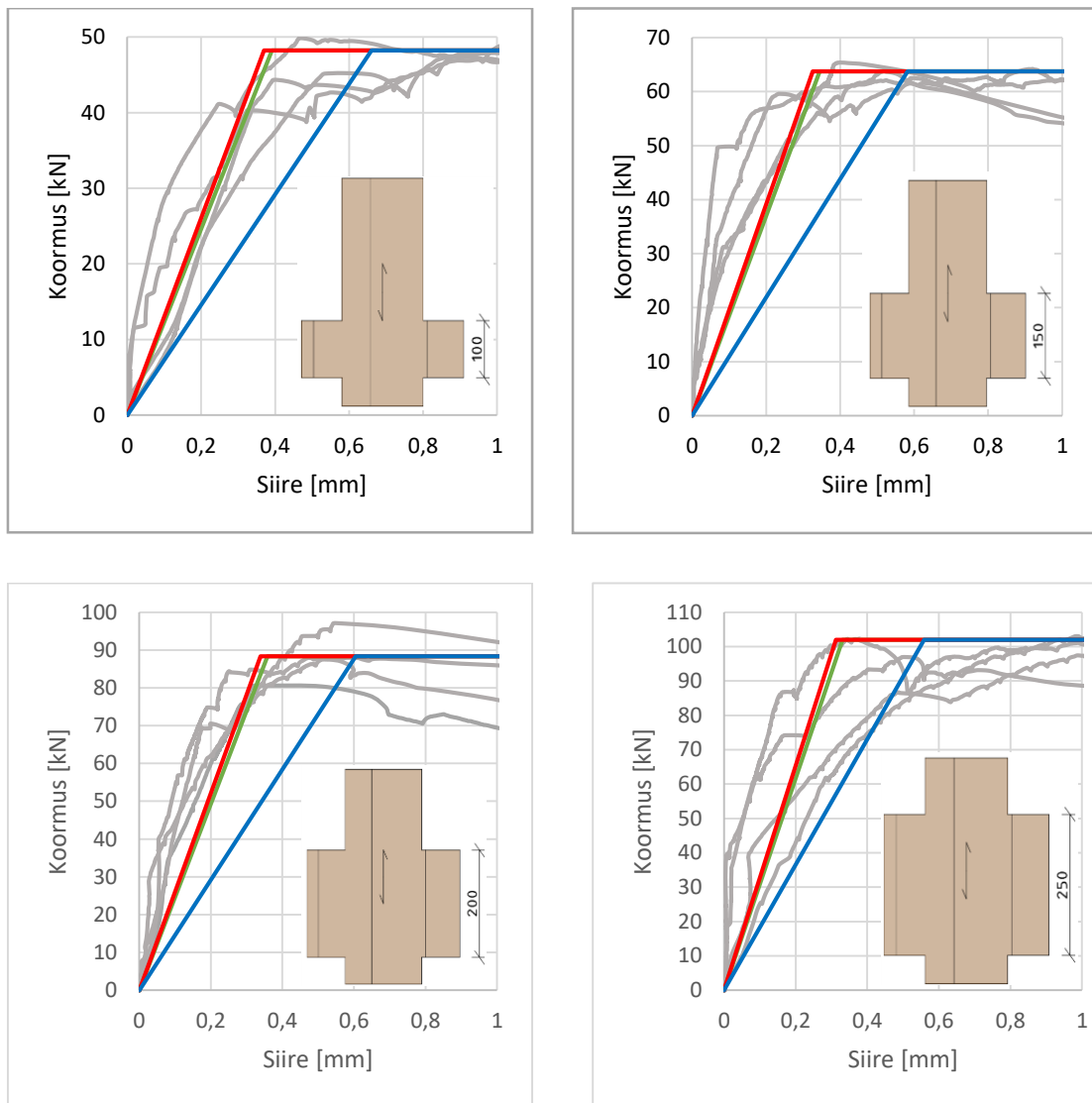
Joonis 6.4 Nihkekatsete alusel nihkedeformatsioonide tekkimise skeem.

Tapihamba nihkedeformatsioon on leitav valemiga: $v_{sh} = \frac{F_{max} * l}{G * t_{gross} * h_t}$. Esitatud valemis tähistab l - jõu mõjumise kaugust tapi servast, ehk $l = 45$ mm.

Katsekehade teoreetilised tapi nihkedeformatsioonid on esitatud maksimaalsetele koormusetel vastavalt Tabel 6.2.

Tabel 6.2 Nihkedeformatsioonide suurused vastavalt maksimaalsele nihkekoormusele.

Katsekeha number	Tapi kõrgus	Katseline tugevus	Arvutuslikud nihkedeformatsioonid [mm]		
	h_t [mm]	F_{max} [kN]	Meetod 1	Meetod 2	Meetod 3
NK1-NK2	100	48,2	0,66	0,39	0,37
NK3-NK4	150	63,8	0,58	0,35	0,33
NK5-NK6	200	88,3	0,60	0,36	0,34
NK7-NK8	250	102,0	0,56	0,33	0,31



Joonis 6.5 Nihkekatsete koormuse-deformatsiooni diagrammid, millel on lisaks näidatud Meetod 1 ja Meetod 2 ja Meetod 3 korral leitud nihkedeformatsioonid maksimaalse nihkekoormuse korral. Sinisega on kujutatud Meetod 1, rohelisega Meetod 2 ja punasega on kujutatud Meetod 3.

Meetodite 2 ja 3 vahel esinesid väikesed erinevused, mil nihkedeformatsioonid erinesid vaid 0,02 mm. Saadud nihkedeformatsioonid on kantud vastava koormuse juures katseliste koormuse-deformatsiooni diagrammidele, esitatud Joonis 6.5. Graafikul on Meetod 1 esitatud sinise joonega, Meetod 2 tulemused rohelise joonega ja Meetod 3 tulemused punase joonega. Selgub, et katselised tulemused sarnanevad Meetodi 2 ja 3 alusel leitud teoreetiliste nihkedeformatsioonidega.

6.1.5 Katsekehade nihketugevus

Vastavalt nihkekatse seeria katsetulemusele saab leida katsekehade nihketugevuse. Nihketugevus leitakse RVSE meetodile tuginedes valemite (3.3) ja (3.4) alusel ning kasutatakse maksimaalse kandevõime 5% protsentiili. Näitena esitatakse arvutus 100 mm tapi kohta:

$$f_{v,k} = \frac{46,2 * 10^3 * 2}{100 * 80} = 11,6 \text{ MPa}$$

Analoogselt esitatud arvutusele leitud kõigi tapikõrguste keskmine nihketugevus on $f_{v,k} = 10,3 \text{ MPa}$. Brandner R. ja Tomasi R. COST-is esitatud soovitusliku väärtuse $f_{v,CLT,k} = 5,5 \text{ MPa}$ [9].

Katsetulemuste põhjal leitud lamelli nihketugevus on ligikaudu 1,9 korda suurem kui Brandner ja Tomasi soovitatud $f_{v,CLT,k} = 5,5 \text{ MPa}$ väärtus ning 2,6 korda suurem standardis EVS-EN 338:2016 esitatud C24 okaspuidu nihketugevusest $f_{v,k} = 4,0 \text{ MPa}$. Materjali tugevuse erinevus tekitabki suure erinevuse teoreetiliste kandevõimete ja katseliselt leitud kandevõimete vahel. Puidu puhul eeldatakse suurt materjali varieeruvust, mistõttu ka tugevusparameetrid esitatakse konservatiivsed. Käesolevas töös on sooritatud katsete arv väike ja katsekehad pärinevad samast partiist, mistõttu on varieeruvus tulemustes väike. Katsekehad koosnevad 20 mm lamellidest, mis on suhteliselt õhukesed ning vastavalt peatükis 3.2.4 esitatule langeks nihketugevus lamelli paksuse suurenedes. Sellest tulenevalt on põhjendatud ka katseliselt saavutatud suur nihketugevus.

6.2 Survetugevuse leidmine

6.2.1 Teoreetiline survetugevuse hindamine tapis

Survetugevuse leidmiseks tuleb määratleda piirid, millest alates arvestada ka nõtket survetugevuse arvutustes. Vastavalt Brandner ja Tomasi [9] soovitusele saab omas tasapinnas koormatud ristkihtliimpuidu elastsusmooduliks võtta väärtuse $E_{mean} = 11600 \text{ MPa}$ ning vastavalt EVS-EN 338:2016 standardile C24 lamelli elastsusmoodul $E_i = 11000 \text{ MPa}$. Survetugevuseks soovitab Swedish Wood The CLT Handbook võtta väärtuse $f_{c,0,k} = 21 \text{ MPa}$. Katsekehade pikikiudude inertsimoment valemi (3.20) kohaselt on:

$$I_{net} = \sum \frac{E_i}{E_{mean}} * \frac{b * t_i^3}{12} + \sum \frac{E_i}{E_{mean}} * b * t_i * a_i^2 = \left(\frac{11000}{11600} * \frac{200 * 20^3}{12} \right) * 3 + \frac{11000}{11600} * 200 * 20 * (40^2 + 0^2 + 40^2) = 12517241 \text{ mm}^4 = 1251,7 \text{ cm}^4$$

Netoristlõike pindala: $A_{net} = (20 + 20 + 20) * 200 = 12000 \text{ mm}^2$. Arvestades katsekeha kõrguseks $h = 200 \text{ mm}$, on ühe katsekeha saleduseks valemi (3.19) põhjal:

$$\lambda = h * \sqrt{\frac{A_{net}}{I_{net}}} = 200 * \sqrt{\frac{12000}{1251,7 * 10^4}} = 6,19$$

Tappliites vaadeldakse korruga ühe tapi kõrgust ala nõtkehoju hindamiseks. Paneelid asetsevad liites teineteise suhtes risti, mistõttu nõtkumine ristuvatel tappidel toimub erinevates telgede suundades. Saleduse leidmiseks tapile võetakse seega arvesse vaid üks tapiosa kõrgus.

Arvesse tuleb võtta katsekehade vahel tekkinud kontaktpindala, mille suurus on $A_{kontakt} = 100 * 100 = 10000 \text{ mm}^2$. Efektiivne ristlõike pindala, ehk pindala kontaktsete pikilamellide vahel on $A_{net,ef} = 20 * 20 * 9 = 3600 \text{ mm}^2$.

Liites oleva katsekeha inertsimoment ja saleduse määramine valemite (3.20) ja (3.19) alusel:

$$I_{net} = \left(\frac{11000}{11600} * \frac{60 * 20^3}{12} \right) * 3 + \frac{11000}{11600} * 60 * 20 * (40^2 + 0^2 + 40^2) = 3755172 \text{ mm}^4 = 375,5172 \text{ cm}^4$$

$$\lambda = h * \sqrt{\frac{A_{net,ef}}{I_{net}}} = 200 * \sqrt{\frac{3600}{375,5 * 10^4}} = 6,19.$$

Vastav tingsaledus on valemi (3.18) järgi $\lambda_{rel} = \frac{\lambda}{\pi} * \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{6,19}{3,14} * \sqrt{\frac{21}{9667}} = 0,09 < 0,3$, mistõttu võib käsitleda kui nõtkehoju elementi.

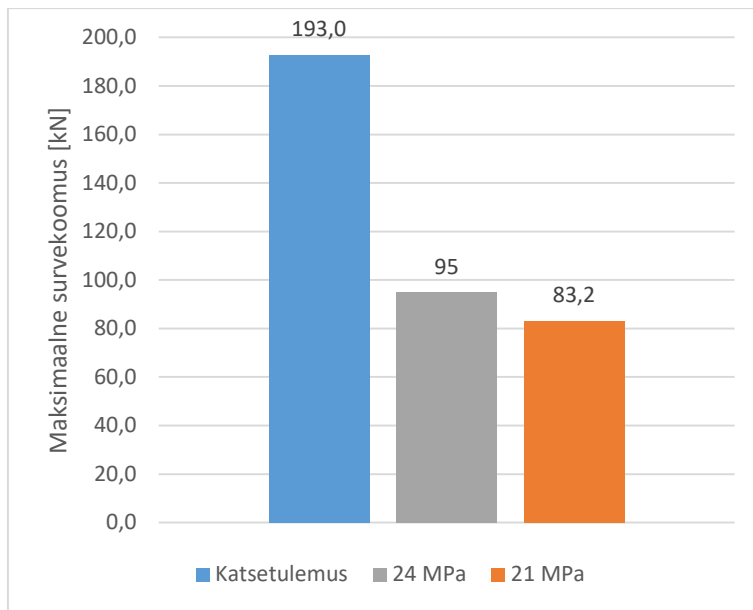
Sama konfiguratsiooni juures tekib nõtkehoht kui katsekeha kõrgus on $h = 650 \text{ mm}$ ehk kõrgema tapikõrguse juures tuleb arvestada nõtkehuga ning kasutada survetugevust vähendavaid meetodeid.

Survetugevuse leidmiseks, et võrrelda katsetulemustega, võetakse $k_{mod} = 1,1$, $\gamma_M = 1$ ja $k_{sys,c,0} = 1$, ehk $f_{c,0,CLT,net,d} = f_{c,0,k} * k_{mod} = 23,1 \text{ MPa}$. Maksimaalne teoreetiline survekoormus on $N_d = A_{net,ef} * f_{c,0,CLT,net,d} = 3600 * 23,1 = 83160 \text{ N} = 83,2 \text{ kN}$.

Brandner ja Tomasi uurimuses [9] on soovitatud kasutada survetugevuseks väärtust $f_{c,0,k} = 24 \text{ MPa}$, mis teeks maksimaalseks survejõuks $N_d = 95 \text{ kN}$.

6.2.2 Survetugevuste võrdlused

Teoreetilised survetugevuse arvutused ei arvesta liite konfiguratsiooni mõju, seega võrdluses vaadeldakse katsetulemusi koos. Keskmise katsete tulemusel saadud maksimaalne survekoormus on $N_{katse,d} = 229 \text{ kN}$, mis teisendatuna 5% protsentiilile $N_{katse,05} = 229 - 18 * 2 = 193 \text{ kN}$. Teoreetilisest arvutustest saadud tulemused $N_{21,d} = 83 \text{ kN}$ ja $N_{24,d} = 95 \text{ kN}$. Katsetulemused erinesid 21 MPa survetugevusega arvutustulemustest 232% ning 24 MPa survetugevusega arvutustest 203%.



Joonis 6.6 Maksimaalse survetugevuse võrdlused

Katsetulemuste väärtused on 2 kuni 2,3 korda suuremad teoreetilistest arvutusväärtustest, mis on suur erinevus. Ühelt poolt võib erinevus olla tingitud kõrgest lamellide tugevusest, kuna käesolevas töös kasutatud katsekehad on samast partiist ning katsete arv on vähene. Samuti lisab katsetulemustele lisatugevust liite konfiguratsiooni mõju, mida ei ole arvestatud teoreetilistes arvutustes.

6.2.3 Pikilamellide survetugevus

Katsekehade konfiguratsioonist tulenevalt on efektiivseks pindalaks $A_{ef} = 3600 \text{ mm}^2$. Lamellide keskmine survetugevus on katseandmete, Tabel 5.2, põhjal $f_{c,0} = \frac{F_{max}}{A_{ef}} = \frac{193000 \text{ N}}{3600 \text{ mm}^2} = 53,6 \text{ MPa}$. Katsetest tulenev lamellide survepinge väärtus on puidu kohta väga kõrge. Võrrelduna tüüpse ehituses kasutatava ristkihtliimpuidust elemendiga, mis koosneb C24 tugevusklassiga lamellidest ehk lamellide survetugevuseks 21 MPa. Kõrge survetugevusväärtuse üheks põhjuseks võib olla normaaljaotise 5% protsentiil, ehk 95% tõenäosusega ongi lamell tugevam kui 21 MPa. Väheste katsetulemuste tõttu ja ühe paneelipartii kasutamise tõttu on katsetulemused väga vähe varieeruvad. Seetõttu ei ole ka katsetulemuste teisendamine 5% protsentiilile võrreldav standardis esitatud tugevusväärtustega. Puit- ja puidupõhised konstruktsioonid õpikus on esitatud keskmiseks okaspuidu survetugevuseks pikikiudu 30-50 MPa [18]. Seega võib lamellide tugevus üle 54 MPa olla täiesti reaalne tulemus.

6.3 Tappliite analüüs

6.3.1 Efektiivne tapikõrgus

Vastavalt katsetulemustele on võimalik leida optimaalne tappliite kõrgus, mille puhul oleks survetugevuselt kui ka nihketugevuselt liide efektiivselt kasutatud. Tappliite konstrueerimisel eeldatakse tapiga liidetavate seinte võrdset paksust ja samasugust lamellide jaotust, mistõttu on tekkiva tappliite kontaktpindalaks seinapaksuse ruut. Nihkekatsete analüüsist selgus, et tappliite kõrgus on lineaarses seoses nihketugevusega. Kuna survetugevus sõltub efektiivsest kontaktpindalast ning see on määratud ristkihtliimpuidu konfiguratsiooniga, jääb tappliites seetõttu peamiseks muutujaks tapikõrgus.

Katsetulemuste kohaselt on nurkliite survetugevus $N_{katse,d} = 216 \text{ kN}$.

Vastavalt nihkekatsetulemustele on keskmise nihketugevuse väärtus 1mm kõrguse tapi korral $0,439 \frac{\text{kN}}{\text{mm}}$. Tapi efektiivseks kõrguseks $h_{tapp} = \frac{216 \text{ kN}}{0,439 \frac{\text{kN}}{\text{mm}}} = 492 \text{ mm}$. Tappliide võiks olla dimensioneeritud purunema nihkele, mistõttu soovib töö autor valida tapi kõrguseks $h_{tapp} = 450 \text{ mm}$.

Seega 5 kihilise ristkihtliimpuit paneeli, mille lamelli paksus on $t_l = 20 \text{ mm}$, tappliite optimaalne kõrgus liites on $h_{tapp} = 450 \text{ mm}$.

Katsetulemuste võrdlusel teoreetiliste arvutusega selgus, et nihketugevused on katsetulemustega võrreldes 2-3 korda alahinnatud ning survetugevused 2,5-3 korda alahinnatud. Sarnane varu nii nihketugevustes kui ka survetugevustes loob eelduse, et ka teoreetilistel arvutustel leitud tapid dimensioneeritakse lähedasteks optimaalsele tapi kõrgusele. Jäikusseinte vahelise tappliite projekteerimist on esitatud Lisa 2. Antud lisas on esitatud arvutusmeetod ning selgitused tugevusparameetrite valikuks.

KOKKUVÕTE

Käesoleva lõputöö raames on uuritud ristkihtliimpuidust seinapaneelide tappliite tööpõhimõtteid ning sobivust kasutamaks jäikusseinte ühendamiseks. Eesmärgiks oli eksperimentaalselt leida ristkihtliimpuidust elementide tugevused liites mõjuvatele jõu komponentidele ja viimaks võrrelda tervikliites komponentide koostoimivuse mõju. Katsetulemuste alusel sooviti leida efektiivne ühendusliite konfiguratsioon. Katsetamised viidi läbi kolmes katseseerias: nihkekatsed, survekatsed ja tapikatset. Kõik kasutatud katsekehad olid paksusega 100 mm, 5- kihilised ja lamelli paksusega 20 mm. Nihkekatsed tehti 10 katsekehaga kokku 19 koormuskatset, mille juures määrati maksimaalne nihkekoormus ning mõõdeti tapisiirded. Nihkekatsed koosnesid neljast eri kõrguse tapihambaga katsekehast, millele rakendati nihkepinget. Katsetulemuste alusel määrati nihketugevuse ja -jäikuse sõltuvus tapi kõrgusest. Survekatsed sooritati ristuvate ristkihtliimpuidust elementide vahel, eesmärgiga määrata ristuvate elementide vaheline survetugevus ja -jäikus ning hinnata liite konfiguratsiooni mõju survetugevusele. Kokku tehti 5 survekatset. Tapikatsete tulemustest sooviti hinnata surve- ja nihkepingete koosmõjust tingitud kandevõimet ja liite jäikust. Kokku katsetati 2 tappliidet.

Katsetulemustest selgub, et nihketugevuse ja tapikõrguse vahel esineb praktiliselt lineaarne seos, $R^2 = 0,9788$. Teoreetiliste nihketugevuse arvutustega võrreldes on valemid katseandmetega kooskõlas ja kasutatavad, peamiseks erinevuseks on ristkihtliimpuidu tugevusväärtused, mille tõttu on katsetulemused ligemale 2 korda suuremad RVSE meetodil leitud teoreetilistest väärtustest ja ligemale 3 korda suuremad „Tala meetodil“ leitud teoreetilistest väärtustest. Seetõttu soovib töö autor kasutada RVSE meetodit ning CLTDesigner programmi. Katsetulemuste põhjal on kasutatud katsekehade keskmine nihketugevus $f_{v,k} = 10,3$ MPa. Katsekehade visuaalsel vaatlusel täheldati ristlamellide töötamisel köieefekti, mille tõttu säilib pärast purunemist nihkekandevõime ühtlasel platool, mis nihkekatsete korral on ligikaudu 30% madalam maksimaalsest koormusest.

Survekatsete visuaalsel vaatlusel selgus, et survepingeid edasikandev ala tekib vaid pikilamellide kokkupuutepunktides. Katseandmete tulemusel on ristkihtliimpuidu lamelli pikikiudu keskmine survetugevus 54 MPa, mis on 3 korda suurem kui standardi järgne survetugevus C24 tugevusklassiga puidu puhul. Keskmine survejäikus oli katsekehadel $212 \frac{kN}{mm}$. Katsetel asetsesid katsekehad teineteise suhtes tsentriliselt või nurgas, ning kandevõime erinevus nende vahel oli 13%. Tulemuste erinevus on tingitud nõtkete

seotud pikilamellide kontaktpindalade arvust, mis nurgaliite korral on väiksem kui tsentrilise liite korral.

Tapikatsetel purunesid liited nihkepingete ületamise tõttu, sest katsekeha ja katsemasina mõõtmed olid piiratud ning tapikõrguseks sai valitud 150 mm. Tapikatsete tugevused olid keskmiselt sama väärtusega mis nihkekatsetel. Katsetulemustel saadud jäikused iseloomustavad tapiliite jäikust, milleks oli $38 \frac{\text{kN}}{\text{mm}}$, mis oli 4,5 korda väiksem nihkekatsetel saadud nihkejäikustest. Tapikatse purunes maksimaalsele koormusele hapralt, ent saavutas seejärel ca 50% koormuselangu järel püsiva koormusplatoo. Tapikatsel koormati tulenevalt katsekeha konfiguratsioonist 45mm deformatsioonini, mille jooksul säilis ühtlane koormusplatoo. Tappliide on seega hästi deformeeritav.

Katsetes kasutatud ristkihtliimpuidu konfiguratsiooni korral on efektiivseks tapi kõrguseks tulenevalt katselistest survetugevuse ja nihketugevuse väärtustest 450 mm, mille korral tappliide puruneb nihkele. Uurimustöö tulemusel on tappliide sobilik ristkihtliimpuidust jäikusseinte ühendamiseks. Käesolevast uurimustööst lähtuvalt võiks tulevikus uurida efektiivsete tappide töötamise tegurit, sest tootmis ja paigaldamis tolerantsid tekitavad liitesse loksud, mis võivad tekitada olukorra, et üks tapp hakkab tööle varem kui järgnevad. Ideaalne oleks sooritada vähemalt kahest tapist koosnev seinade ühendusliite täismõõdus katsetus. Liites võiks kasutada efektiivse tapikõrgusega tappe ning koormata liidet horisontaalselt. Samuti on tulevikus vajalik sooritada katseid ka teiste konfiguratsioonide ja lamelli paksustega.

SUMMARY

In this thesis, mortise and tenon joint between shear walls of cross-laminated timber have been investigated. The aim was to find an optimal connection joint configuration. Therefore, the shear strength of tenon and compression strength between two perpendicular cross-laminated timber elements were found experimentally. Also, the whole joint was tested to compare force components acting together. All the test specimen had five layers of 20 mm each and total thickness of 100 mm. The tests were carried out in three series: tenon shear, compression and whole joint.

Shear tests were carried out with four different tenon heights: 100, 150, 200 and 250 mm. The results show that there is practically a linear relation between shear strength and tenon height, $R^2 = 0,9788$. Compared to the theoretical shear strength calculations, the methods are consistent with the test data and, therefore, usable. The main difference is the cross-laminated timber strength values. The average cross-lamella shear strength obtained from the test results is $f_{v,k} = 10,3$ MPa. Visual observation of the test specimen revealed a rope effect in cross-lamellas after failure at the maximum load. Due to rope effect, the shear capacity achieves a even plateau, which in shear tests is approximately 30% lower than the maximum load capacity.

Compression tests used two configurations: compression between centered elements and compression between elements placed in corner. Visual observation of the compression tests revealed that the area transmitting the compressive stresses occurs only at the contact areas of the longitudinal lamellae. For the result, the average compressive strength of the longitudinal lamella of the cross-laminated timber was 54 MPa. The average compressive stiffness of the test specimen was $212 \frac{\text{kN}}{\text{mm}}$. Due to different configurations, the results of centered specimen 13% higher than elements placed in the corner. The difference derives from the number of contact surfaces of the longitudinal lamellas where buckling was not allowed.

In mortise and tenon joint tests, a tenon height 150 mm was used. The connection and failure was caused by exceeding the shear stresses. Joint strength was correlated with tenon shear tests. Mortise and tenon joint obtained shear stiffness $38 \frac{\text{kN}}{\text{mm}}$, which was 4.5 times lower than obtained on tenon shear tests. Whole joint test specimen had a fragile failure at maximum load capacity. After exceeding the load capacity, a stable load plateau was reached after a load drop of about 50%. Even for the deformation of 45 mm, the stable load plateau was maintained.

In the author's opinion, mortise and tenon connections are suitable for connecting shear walls made of cross-laminated timber. The effective tenon height is 450 mm due to the experimental values for cross-laminated timber panels used in tests. Based on this thesis, the effective number of working mortise and tenon along the connecting line of the wall could be investigated. Production and installation tolerances create gaps in the joint, which can cause one tenon to start working earlier than the following ones. It would be ideal to perform a full-scale test of the wall joint consisting of at least two tenons. It is also necessary to experiment with other configurations and lamella thicknesses in the future.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] Riigi Kinnisvara AS. *Uudised*. [www] <https://www.rkas.ee/et/uudised/keskkonnamaja-arhitektuurikonkursi-voitis-arhitektuuriburoo-kavakava>. Kasutatud 31.10.2022.
- [2] F. Boggian, M. Andreolli, R. Tomasi, „Cross laminated timber (CLT) beams loaded in plane: testing stiffness and shear strenght“, *Frontiers*, vol. 5, 2019, doi: <https://doi.org/10.3389/fbuil.2019.00058>. Kasutatud 17.02.2023.
- [3] *EVS-EN 16351:2021 Timber structures - Cross laminated timber - Requirements*.
- [4] CLTdesigner (version 8.3). Structural analysis and Design Software. [www] <https://www.cltdesigner.at/en/>. Kasutatud 31.10.2022.
- [5] K. Tamm, „Uhke puidust kool: suunanäitaja linnaruumis“, *EhitusEST*, oktoober 2022, [www] <https://ehitusest.ee/uudis/2022/10/14/pelgulinna-riigigymnaasium/>. Kasutatud 20.03.2023.
- [6] E. Karacabeyli, S. Gagnon, *Canadian CLT Handbook*, FPIinnovations, 2019
- [7] E. Borgström, J. Fröbel, *The CLT Handbook- CLT structures- facts and planning*, Swedish wood, Stockholm, 2019
- [8] M. Heinisuo, S. Pajunen, A. Aspila, „Ultimate failure load analysis of cross-laminated timber panels subjected to in-plane compression“, *Structures*, vol. 47, p. 1558-1565, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.12.016>. Kasutatud 09.02.2023.
- [9] R. Brandner, R. Tomasi, T. Moosbugger, E. Serrano, P. Dietsch, „Properties, Teting and Design of Cross Laminated Timber“ , *A state-of-the-art Report by COST Action FP1402 / WG 2*, Germany, 2018.
- [10] E. Tuhkanen, „Sissefreesitud terasplaadiga naagelliited ristkihtliimpuidust jäigastusseintes“, [Doktoritöö], Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2021. [Online]. Loetud aadressil: <https://digikogu.taltech.ee/et/Item/25d2c18f-714e-4116-87c4-c897b2fc5753>. Kasutatud 01.10.2022.
- [11] R. Brandner, P. Dietsch, J. Dröscher, M. Schulte-Wrade, H. Kreuzinger, M. Sieder, „Cross laminated timber (CLT) diaphragms under shear: Test configuratsion, properties and design“, *Construction and Building Materials*, vol. 147, p. 312-

- 327, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.153>. Kasutatud 01.10.2022.
- [12] M. Flaig, H. J. Blab, „Shear strength and shear stiffness of CLT-beams loaded in plane“, Germany, 2013. [Online]. Loetud aadressil: https://www.researchgate.net/publication/346942816_Shear_strength_and_shear_stiffness_of_CLT-beams_loaded_in_plane. Kasutatud 01.10.2022.
- [13] R. Brandner, T. Bogensperger, G. Schickhofer, „In plane shear strength of cross laminated timber (CLT): Test configuration, quantification and influencing parameters“, in *International Council for Research and Innovation in Building and Construction W18*, Vancouver, Canada 2013. Loetud aadressil: https://www.researchgate.net/publication/259891586_In_plane_Shear_Strength_of_Cross_Laminated_Timber_CLT_Test_Configuration_Quantification_and_influencing_Parameters. Kasutatud 01.10.2022.
- [14] M. Andreolli, R. Tomasi, A. Polastri, „Experimental investigation on in-plane behaviour of cross-laminated timber elements“, in *Proceedings of CIB-W18*. Växiö, Sweden, 2012.
- [15] T. Bogensperger, T. Moosbrugger, G. Silly, „Verification of CLT-plates under loads in plane“, WCTE-World Conference on Timber Engineering, Riva del Garda, Italy, 2010. [Online]. Loetud aadressil: <https://graz.elsevierpure.com/en/publications/verification-of-clt-plates-under-loads-in-plane>. Kasutatud 01.10.2022.
- [16] J. Dröscher, „Prüftechnische Ermittlung der Schubkenngrößen von BSP-Scheibenelementen und Studie Ausgewählter Parameter“, Austria, 2014. [Online]. Loetud aadressil: <https://diglib.tugraz.at/download.php?id=576a74f4a4f1b&location=browse>. Kasutatud 20.03.2023.
- [17] A. Thiel, „ULS and SLS design of CLT and its implementation in the CLTdesigner“, in *Focus Solid Timber Solutions - European Conference on Cross Laminated Timber*, Graz, Austria, 2013.
- [18] E. J. Just, K. Öiger, A. Just, *Puit- ja puidupõhised konstruktsioonid*. Tallinn: TTÜ kirjastus, 2015.
- [19] *EVS-EN 1995-1-1:2005+A1+NA+A2 Puitkonstruktsioonide projekteerimine. Osa 1-1: Üldreeglid ja reeglid hoonete projekteerimiseks*.

- [20] O. Perret, C. Douthe, A. Lebee, K. Sab, „A shear strength criterion for the buckling analysis of CLT walls“, *Engineering Structures*, vol. 211, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110344>. Kasutatud 01.10.2022.
- [21] J. C. Pina, E. I. S. Flores, K. Saavedra, „Numerical study on the elastic buckling of cross-laminated timber walls subject to compression“, *Construction and Building Materials*, vol. 199, p. 82-91, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.013>. Kasutatud 01.10.2022.
- [22] Peetri Puit OÜ. *Tooted*. [www] <https://arcwood.ee/product/clt-ristkihtpuit/>. Kasutatud 31.10.2022.
- [23] *EVS-EN 26891:1999 Puittarindid. Mehaaniliste kinnitusdetailidega liited. Tugevus- ja deformatsiooninäitajate määramise põhialused.*
- [24] *EVS-EN 594:2011 Puitkonstruktsioonid. Katsemeetodid. Puitraamiga seinaplaatide tõmbetugevus ja jäikus.*
- [25] *EVS-EN 13183-3:2005 Saematerjali üksuse niiskussisaldus. Osa 3: Määramine mahtuvustakistuse meetodil.*
- [26] A. Klasuson, J. Metsaveer, P. Põdra, U. Raukas, *Tugevusõpetus*, Tallinn, 2012.

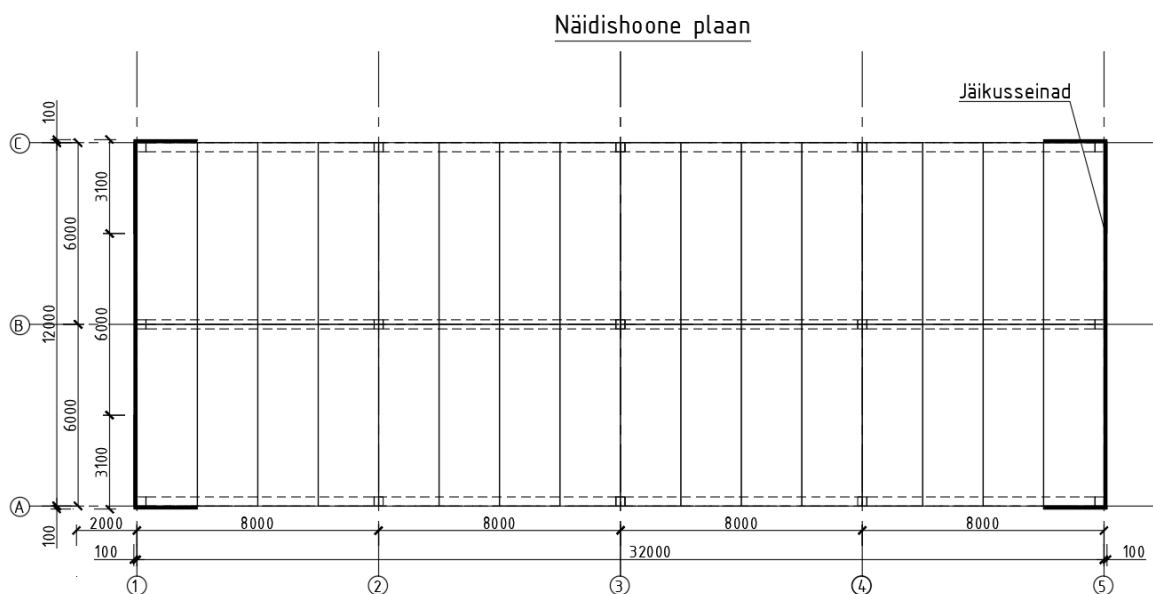
LISAD

Lisa 1 Näidishoone arvutusalsused

Näidishoone parameetrid:

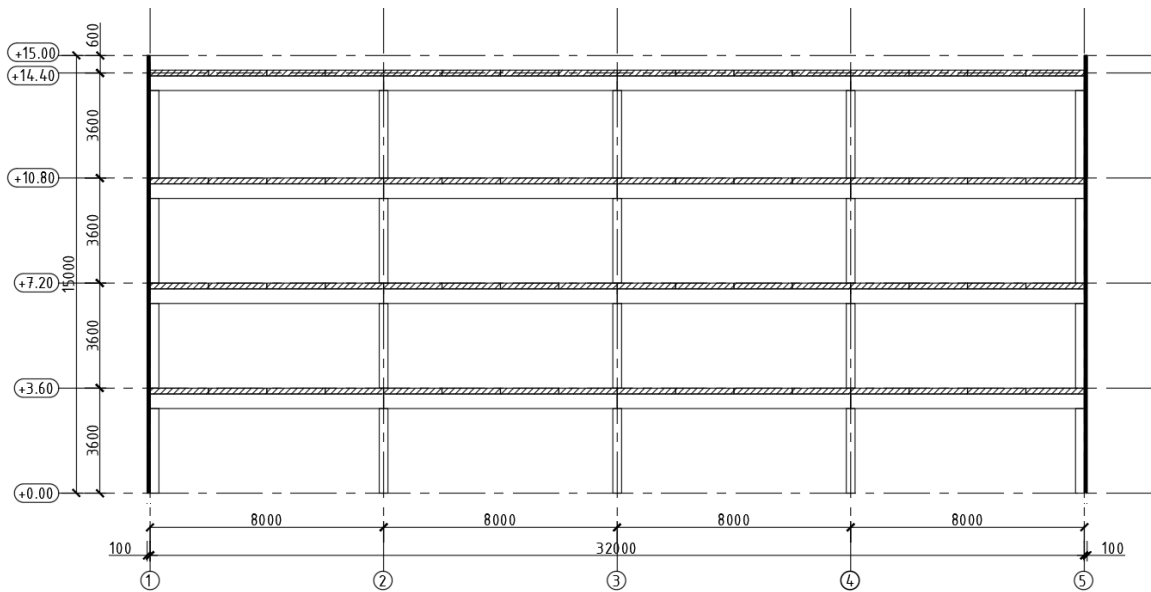
- laius: $B = 12 \text{ m}$
- pikkus: $A = 32 \text{ m}$
- korruse kõrgus: $h_k = 3,6 \text{ m}$
- korruste arv: $n_k = 4$
- parapeti kõrgus: $h_{par} = 0,6 \text{ m}$
- hoone kõrgus: $H = 15 \text{ m}$
- postid liimpuidust: $400 \times 400 \text{ mm}$, talad liimpuidust: $400 \times 600 \text{ mm}$
- ristkihtliimpuidust vahe- ja katuslaepaneelid: $6000 \times 2000 \times 200 \text{ mm}$
- ristkihtliimpuidust jäikusseinad: $3600 \times 2000 \times 100 \text{ mm}$ ja $3600 \times 12000 \times 100 \text{ mm}$

Näidishoone konstruktsioonide plaan ja lõige on esitatud Joonis L.0.1 ja Joonis L.0.2. Hoone kandeskeem on post-tala süsteem, kus vahe- ja katuslaepaneelid toetuvad taladele. Talad kannavad jõu edasi postidele. Hoonet jäigastavad U-kujuliselt seotud jäikusseinad, kus paneeli kõrgus on korruse kõrgus. Plaaniliselt moodustavad U-kuju 2 ja 12 meetri pikkused paneelid, paksusega 100 mm. Jäikusseinad on ristkihtliimpuidust 5 kihilised paneelid, lamelli paksusega 20 mm. Vertikaalkoormused võtavad vastu vahelaepaneelid, talad ja postid ning horisontaaljõud võtavad vastu jäikusseinad.



Joonis L.0.1 Näidishoone plaan

Näidishoone lõige



Joonis L.0.2 Näidishoone lõige

Hoonele mõjuvad koormused:

- lumekoormus: $s = 1,2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
- tuulekoormus: $w = 1 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
- kasuskoormus (arvestab ka kergvaheseinasid): $q_k = (2 + 0,8) \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 0,85 = 2,38 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
(vähendustegur $\alpha_n = 0,85$)

Jäikusseinad dimensioneeritakse hoonele mõjuvatele horisontaalkoormustele. Horisontaalkoormus koosneb tuulekoormusest ning konstruktsioonihälvetest tekitatud koormusest. Hoone geomeetriast tulenevalt jagunevad horisontaalkoormused hoone otsaseinade vahel. Otsaseinad moodustavad U-ristlõikega jäikuselemendi, vastavalt Joonis L.4. Paneelid on jäikuselemendis seotud tappliitega. Koormuskombinatsioonidest on esitatud kõige kriitilisemad olukorrad.

Vertikaalkoormused korruse kohta:

- Lumekoormus: $N_{lumi,k} = 1,2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 12 \text{ m} * 32 \text{ m} = 461 \text{ kN}$
- Kasuskoormus: $N_{kasus,k} = 2,38 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 12 \text{ m} * 32 \text{ m} = 914 \text{ kN}$
- Konstruktsioonide omakaalukoormus: $N_{OK,k} = 1611 \text{ kN}$

Konstruktsioonide omakaalukoormustel on arvestatud vahelaele lisa omakaalukoormus ujuvpõrandatest $2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$, riputuskoormuseks $0,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$ ning katusekihtide koormuseks on võetud $1 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$.

Vertikaalkoormused kogu hoone kohta:

- Lumekoormus: $N_{lumi,k} = 1,2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 12 \text{ m} * 32 \text{ m} = 461 \text{ kN}$
- Kasuskoormus: $N_{kasus,k} = 2,38 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 12 \text{ m} * 32 \text{ m} * 3 = 2742 \text{ kN}$
- Konstruktsioonide omakaalu koormus: $N_{OK,k} = 5816 \text{ kN}$

Konstruktsioonihälve: $\theta_i = \theta_0 * \alpha_h * \alpha_m = \frac{1}{200} * 1 * 0,75 = 0,00375$

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{l}} = \frac{2}{\sqrt{3,6}} = 1,05 \Rightarrow \alpha_h = 1; \alpha_m = \sqrt{0,5 * \left(1 + \frac{1}{m}\right)} = \sqrt{0,5 * \left(1 + \frac{1}{8}\right)} = 0,75$$

Hälvetes tekkiv täiendav horisontaalkoormus katuslae kohta ning jagatuna hoone otsaseinte vahel:

$$H_{h\grave{a}lve,korrus,katus,d} = \frac{(1,5 * 0,5 * 461 \text{ kN} + 1,2 * 1035 \text{ kN})}{2} * 0,00375 = 22 \text{ kN}$$

Hälvetes tekkiv täiendav horisontaalkoormus ühe korruse kohta ning jagatuna hoone otsaseinte vahel:

$$H_{h\grave{a}lve,korrus,d} = \frac{(1,5 * 0,7 * 914 \text{ kN} + 1,2 * 1611 \text{ kN})}{2} * 0,00375 = 41 \text{ kN}$$

Hälvetes tekkiv täiendav horisontaalkoormus kogu hoone kohta ning jagatuna hoone otsaseinte vahel:

$$H_{h\grave{a}lve,d} = \frac{(1,5 * 0,7 * 2742 \text{ kN} + 1,5 * 0,5 * 461 \text{ kN} + 1,2 * 5816 \text{ kN})}{2} * 0,00375 = 144 \text{ kN}$$

Katuslae tasapinnas mõjuv tuulekoormus:

$$H_{t,katuslagi,d} = 1 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 32 \text{ m} * \left(\frac{3,6 \text{ m}}{2} + 0,6 \text{ m}\right) * 1,5 = 115 \text{ kN}$$

Vahelae tasapindades mõjuv tuulekoormus: $H_{t,vahelagi,d} = 1 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 32 \text{ m} * 3,6 \text{ m} * 1,5 = 173 \text{ kN}$

Horisontaalkoormus ühe jäikuselemendi kohta katuslae ulatuses:

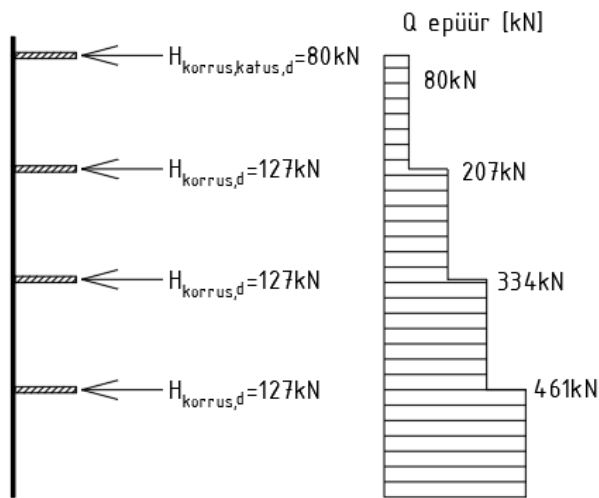
$$H_{korrus,katus,d} = \frac{115}{2} + 22 = 80 \text{ kN}$$

Horisontaalkoormus ühe korruse ulatuses ühe jäikuselemendi kohta:

$$H_{korrus,d} = \frac{173}{2} + 41 = 127 \text{ kN}$$

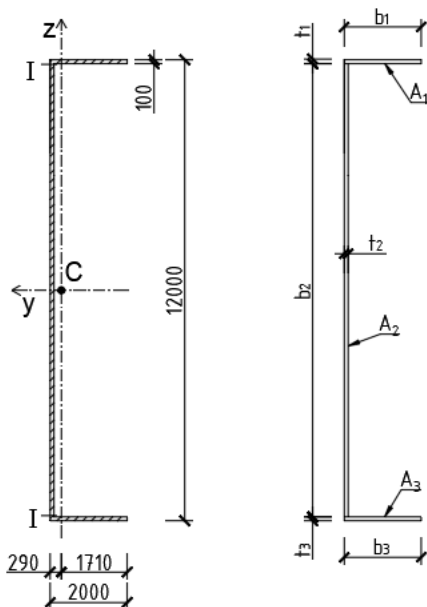
Summaarne horisontaalkoormus esimese korruse tasapinnas, ühele hoone otsale:

$$H_{sum,d} = 80 + 127 * 3 = 461 \text{ kN}$$



Joonis L.3 Horisontaalkoormuse kandumine vahelagedelt jäikusseinale. Jäikusseinale tekib põikjõuepüür

Jäigastusseinte vahelisse tappliitesse tekib horisontaalkoormusest nihkejõud. Nihkejõud leitakse Joonis L.4 esitatud jäikusseintest moodustunud ristlõike lõikes I.



Joonis L.4 Jäikusseintest koosnev U-ristlõikega jäikuselement. c tähistab ristuvate seinte raskuskeskme asukohta. I tähistab lõiget, kus on leitud nihkepinge. Parempoolisel joonisel on esitatud elementide tähised

Lõikesse I tekkiva nihkejõu leidmine jäikusseinte liites, ühe korruse ulatuses:

- raskuskeskme kaugus servast: $y_c = \frac{A_1 \cdot \frac{t_2}{2} + A_2 \cdot \frac{t_2}{2} + A_3 \cdot \frac{t_2}{2}}{A_1 + A_2 + A_3} = 290 \text{ mm}$
- inertsimoment: $I_y = \frac{b_1 \cdot (b_2 + t_1 + t_3)^3}{12} - \frac{(b_1 - t_1) \cdot (b_2)^3}{12} = 27,85 \cdot 10^{12} \text{ mm}^4$
- staatilinemoment: $S_y = A_1 \cdot \left(b_2 + \frac{t_1}{2}\right) = 0,119 \cdot 10^{10} \text{ mm}^3$
- seinte ühenduslõikes mõjuv nihkepinge korruse kohta: $\tau_{xz} = \frac{H_{sum,d} \cdot S_y}{I_y \cdot t_2} = 0,197 \text{ MPa}$
- liites mõjuv nihkejõud: $T = \tau_{xz} \cdot h_k \cdot t_2 = 70900 \text{ N} = 71 \text{ kN}$

Liites mõjuv nihkejõud tuleb tappliite abil vastu võtta ehk korruse kõrguses asetsevad tapid peavad vastu võtma 71 kN koormuse.

Horisontaalkoormus tekitab U-ristlõikesse paindepinged. Kogu jäikuselemendile mõjuv horisontaalkoormus kantakse vundamendile. Maksimaalse paindepingete tekitatud survejõu leidmine:

- jäikusseinas mõjuv maksimaalne paindemoment:

$$M_y = 80 \text{ kN} \cdot 14,4 \text{ m} + 127 \text{ kN} \cdot (3,6 \text{ m} + 7,2 \text{ m} + 10,8 \text{ m}) = 3896 \text{ kNm}$$

- vaadeldava osa kaugus raskuskeskmest: $z = 6000 \text{ mm}$
- maksimaalne paindepinge: $\sigma_{c,max} = \frac{M}{I} \cdot z = \frac{3896 \cdot 10^6}{27,85 \cdot 10^{13}} \cdot 6000 = 0,84 \text{ MPa}$
- paindepingele vastav survejõud: $F_c = \sigma_{c,max} \cdot t_1 \cdot b_1 = 168 \text{ kN}$

Tagavara kasuks arvestatakse maksimaalse tekkiva survepingega ning sellele vastava survejõuga. Arvestades survejõu mõjuvana kogu ristuva seina laiuses, saab survejõu esitada kui korruse kõrgusele seinale mõjuva joonkoormusena. Joonkoormus seina jooksva meetri kohta: $q_{c,d} = \frac{F_c}{b_1} = \frac{168 \text{ kN}}{2 \text{ m}} = 88 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$.

Hoone tuulepoolisel küljel asuv elemendi osa töötab tõmbele. Tõmbele töötamiseks seotakse paneel terasliidetega vundamendi külge. Tõmbeliiteid käesolevas töös ei dimensioneerita.

Jäikusseinte omavahelise liiteta töötaks näites esitatud horisontaalkoormuse vastu võtmiseks vaid Joonis L.4 esitatud A_2 pindalaga tähistatud element. Vastavalt geomeetrialet väheneb liiteta olukorras inertsimoment ligemale 2 korda, mille tulemusel tekib maksimaalne paindepinge jäikusseina otsa $\sigma_{c,max} = 1,62 \text{ MPa}$, millest tekkiv

joonkoormus seinä jooksva meetri kohta on $q_{c,d} = 162 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$. Näidishoonele vastava konfiguratsiooni korral vähendab ideaalne nihketapliide jäikuselementi tekkivat survekoormust ligemale 2 korda. Võrdlus illustreerib ristuvate jäikusseinte liitmise vajalikkust.

Lisa 2 Nihketapi projekteerimine

Nihketapi projekteerimine kahe ristuva jäikusseina vahele algab nihketappide vahelise survetugevuse määramisest, mille põhjal leitakse vajalik tapikõrgus lähtuvalt nihketugevusest. Tapi konstrueerimisel lähtutakse tingimusest: $F_{c,Rd} \geq F_{v,Rd}$. Antud tingimuse korral puruneb nihketapp nihkele, kuid on vastavalt survetugevusele optimaalse kõrgusega. Kandevõime leidmisel on eeldatud $k_{mod} = 0,9$, $\gamma_M = 1,25$, ning kasutatud Brandner ja Tomasi soovitatud survetugevus väärtust $f_{c,0,k} = 24$ MPa ning nihketugevuse väärtust $f_{v,CLT,k} = 5,5$ MPa. Arvutused on tehtud vastavalt katsetes kasutatud katsekehade konfiguratsioonile ehk 5-kihiline ristkihtliimpuidust paneel, mille lamelli laiused on $t_l = 20$ mm. Arvutustes on eeldatud konfiguratsioonist tulenevalt *net-shear* purunemiskiisi. Peatükis 3.2.1 esitatud teoreetiliste eelduste põhjal tekib väände purunemise oht kui $\frac{t_l}{b_l} > 0,25$. Sellisel juhul tuleb nihkekandevõime valem tuletada valemist (2.6).

Vastavalt peatükkides 6.2.4 ja 7.2.1 näidatud arvutusmeetoditele saab tapi kõrguse leida:

$$\begin{cases} F_{c,Rd} = A_{ef} * f_{c,0,d} * k_k \\ F_{v,Rd} = \frac{f_{v,CLT,d} * t_{tot}^* * x}{2} \end{cases}$$
$$x \leq \frac{A_{ef} * f_{c,0,d} * k_k * 2}{f_{v,CLT,d} * t_{tot}^*} = \frac{A_{ef} * f_{c,0,k} * k_k * 2}{f_{v,CLT,k} * t_{tot}^*}$$

kus:

$F_{c,Rd}$ – tapiliite arvutuslik survekandevõime

$F_{v,Rd}$ – tapiliite arvutuslik nihkekandevõime

k_k – konfiguratsioonist tulenev tegur, autori soovitusel 1,13

t_{tot}^* – summaarne paksus ideaalsetest lamelli paksustest

x – nihketapi kõrgus

Peatükis 6.2.4 kirjeldatud liite konfiguratsiooni mõjust survetugevusele on esitatud autori poolne soovitus suurendada survekandevõimet teguriga $k_k = 1,13$. Antud tegur on leitud katsetulemustele tuginedes ning kehtib vaid esitatud konfiguratsiooni korral, ehk 5-kihilise ristkihtliimpuidu korral, mille lamellide paksused on 20 mm.

Näidishoone konfiguratsioonide kohaselt on optimaalseks tapi kõrguseks:

$$x \leq \frac{3600 * 24 * 1,13 * 2}{5,5 * 80} = 444 \text{ mm} \Rightarrow x = 440 \text{ mm}$$

Selgub, et leitud optimaalne tapikõrgus on sarnane katsetulemuste alusel leitud optimaalse tapikõrgusega, milleks on vastavalt peatükile 6.3.1 $h_{tapp} = 450 \text{ mm}$. Töö autori hinnangul tuleb nihketugevuse väärtus valida pigem kõrgem väärtust, näiteks kasutada Brandner ja Tomasi soovitatud $f_{v,CLT,k} = 5,5 \text{ MPa}$. Nihketugevuse alahindamisel ja väiksema väärtuse valikul saavutatakse kõrgem tapikõrgus, mille tõttu võib tapp puruneda survele.

Vastavalt valitud nihketapi kõrgusele leitakse nihketapi kandevõime, mis on võrdne $F_{v,Rd}$ väärtusega. Jäikusseina nihkekandevõime leitakse järgnevalt:

$$F_{v,sein,Rd} = F_{v,Rd} * n_{tapp}$$

kus:

$F_{v,Rd}$ – tapiliite arvutuslik nihkekandevõime

n_{tapp} – tappide arv jäikusseinte vahelises liites

Näidishoone korruse kõrgus on $h_k = 3,6 \text{ m}$, mistõttu $n_{tapp} = \frac{h_k}{x} = \frac{3,6}{0,44} = 8,1 \text{ tk}$, soovides saada nihkepurunemist ning kõikide tappide võrdset kõrgust, siis valitakse tappide arvuks $n_{tapp} = 9 \text{ tk}$, ehk $x = \frac{3,6}{9} = 0,4 \text{ m}$. Ühe liidetava seina puhul töötavad kaasa vaid pooled tapid, mistõttu on töötavate tappide arvuks 4 tappi. Seinaliite nihkekandevõime:

$$F_{v,sein,Rd} = \frac{f_{v,CLT,d} * t_{tot}^* * x}{2} * n_{tapp} = \frac{5,5 * 0,9 * 80 * 400}{2 * 1,25} * 4 = 253 * 10^3 \text{ N} = 253 \text{ kN}$$

Leitud kandevõime on eeldusel, et kõik tapid töötavad ideaalselt, kuid reaalsuses tekivad liites tolerantside tõttu loksud ning kõik tapid ei tööta võrdselt. Seetõttu tuleks seina kandevõime valemis tappide arv n_{tapp} asendada efektiivselt töötavate tappide arvuga $n_{tapp,ef}$. Seetõttu on oluline ka dimensioneerida tapid võimalikult optimaalsed ehk võimalikult kõrged, et vähendada tappide arvu liites, millega saavutatakse suurem kaasatöötavate tappide osakaal.

Käesoleva diplomitöö raames ei katsetatud mitmest tapist koosnevaid liiteid, et hinnata efektiivselt töötavate tappide arvu. Tagavara kasuks tegutsemiseks ning arvestades peatükis 1.3 esitatud tapikatsete suurt deformeeritavust, soovib töö autor kasutada pärast esmase kandevõime ületamist tekkinud ühtlase nihkekandevõime platoo väärtust. Vastavalt TK-2 katsest tulenevalt oli selle platoo väärtus 51% madalam

maksimaalsest nihketugevusest. Kasutades maksimaalse nihketugevuse asemel väärtust $0,49 * F_{max}$ eeldatakse, et tappide vahelised tolerantsid ületatakse ning kõik tapid töötavad antud kandevõimega. Kasutatud lähenemine on tagavara kasuks.

Seega seinaliite nihkekandevõime konservatiivne väärtus on:

$$F_{v,sein,Rd} = 0,49 * \frac{f_{v,CLT,d} * t_{tot}^* * x}{2} * n_{tapp} = 124 \text{ kN}$$

Antud tulemust saab võrrelda katsetulemuste alusel leitud nihketugevusega, mis on võimalik 400mm kõrguse tapi jaoks tuletada Joonis 5.1 parempoolsel diagrammil esitatud joonevõrrandi $y = 0,3718 * x + 10,52$ järgi, kus y tähistab maksimaalset nihkekandevõimet ning x tapikõrgust. Maksimaalne kandevõime lähtudes katsetulemustest on:

$$F_{max} = 0,3718 * x + 10,52 = 0,3718 * 400 + 10,52 = 159,24 \text{ kN}$$

Sellele vastav seinaliite nihkekandevõime on:

$$F_{v,sein,katse} = 0,49 * F_{max} * n_{tapp} = 0,49 * 159,24 * 4 = 312 \text{ kN}$$

Selgub, et arvutuste kohane 3,6m kõrguse seina nihkeliite kandevõime on $\frac{312}{124} = 2,5$ korda madalam kui katseliste tulemuste põhjal leitud.

Näidishoone jäikusseinte liiteks on tappliite kandevõime piisav. Vastavat Lisa 1 põhjal tuleb korruse kõrguses tappliitel vastu võtta nihkejõud $T = 71 \text{ kN}$. Tappliite kandevõime kasutusaste on $\frac{71}{124} * 100\% = 57\%$.

Näitest selgub, et tappliide on kasutatud ligemale 60% ulatuses. Suurima nihkekoormuse saavad esimese korruse nihketapid.

Lisa 3 Näidishoone jäikusseinte kontroll vertikaalsurvele

Ristkihtliimpuidust jäikusseinte surve ja nõtkekandevõime on leitud vastavalt Swedish Wood The CLT Handbook [[7]] esitatud viisile. Kõiki arvutusetape ei ole lahti kirjutatud ning valemid on leitavad The CLT Handbookist. Arvutused on tehtud 1 m laiuse seinariba kohta.

5-kihilise ristkihtliimpuidust paneeli arvutustes vajaminevad andmed:

- elastsusmoodul: $E_{0,x,mean} = 11000$ MPa
- seinariba arvutus pikkus: $L = 3600$ mm
- nõtketegur: $\mu = 1$

Tugevustingimus vastavalt valemile (3.23): $\frac{\sigma_{c,d}}{k_{c,y} * f_{c,0,xtay,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,xtay,d}} \leq 1$

Valemite (3.24 – 3.27) alusel leitakse nõtket arvestav vähendustegur:

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} = 0,35 \leq 1$$

$$k_y = 0,5 * (1 + 0,1 * (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2) = 1,91$$

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} * \sqrt{\frac{f_{c,0,xtay,k}}{E_{0,x,05}}} = 1,64$$

$$\lambda_y = \frac{L}{i_{x,ef}} = 112,0$$

$$E_{0,x,05} = k * E_{0,x,mean} = 0,91 * 11000 = 9973 \text{ MPa}$$

$$k = 1 - \frac{0,328}{\sqrt{\frac{2 * b_x}{0,15} - 1}} = 0,91$$

Arvutuslik koormus seinale (omakaal + paindepingest tekkiv survejõud):

$$N_d = 10 + 88 = 98 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

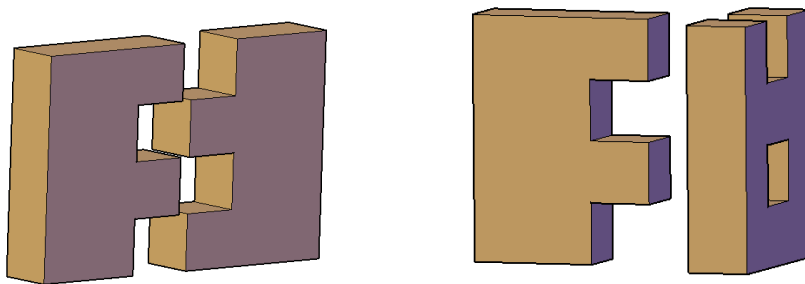
$$\frac{\sigma_{c,d}}{k_{c,y} * f_{c,0,xtay,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,xtay,d}} \leq 1 \Rightarrow \frac{1,63}{0,35 * 15,12} = 0,31 < 1$$

Seina kandevõime omakaalukoormusele ja paindepingetest tekkivale survejõule on tagatud.

Selgub, et valitud konfiguratsiooniga näidishoone korral on paneeli kandevõime vertikaal- ja horisontaalkoormuste koosmõjul 31% ulatuses kasutatud, mistõttu on varu suurem kui tappliites (Lisa 2). Näite põhjal on tappliide igati sobilik suurte horisontaalkoormuste vastu võtmiseks.

Lisa 4 Ristkihtliimpuidust elementide surveleites tekkivad efektiivpindalad

Järgnevalt on esitatud ristkihtliimpuidust tappliites tekkivate survepindade efektiivpindalade jaotus ning tekkivate tolerantside mõju. Võrdlusena on järgnevalt kasutatud ristuvate paneelide (edaspidi T-liide) ja samasuunaliste paneelide (edaspidi I-liide) ühendusliidet. Eelduseks on, et jäikusseinad on hoone risti ja põikisuunas võrdsete paksustega, ehk liite pindala on võrdne seinapaksuse ruuduga. Teiseks eelduseks on, et välimised lamellid on pikilamellid. Liites efektiivselt survele töötav efektiivpindala on tähistatud A_{ef} .



Joonis L.5 Paremalt I-liide, vasakult T-liide.

Kogu liite pindala on leitav: $A = t_{gross}^2$.

Efektiivne pindala T-liite korral on leitav:

$$A_{ef,T} = (t_1^2 + t_3^2 + t_5^2 + \dots + t_n^2) * n_{net} = \sum_1^{n_{net}} t_{net,i} * n_{net}$$

Efektiivpindala I-liite korral on leitav:

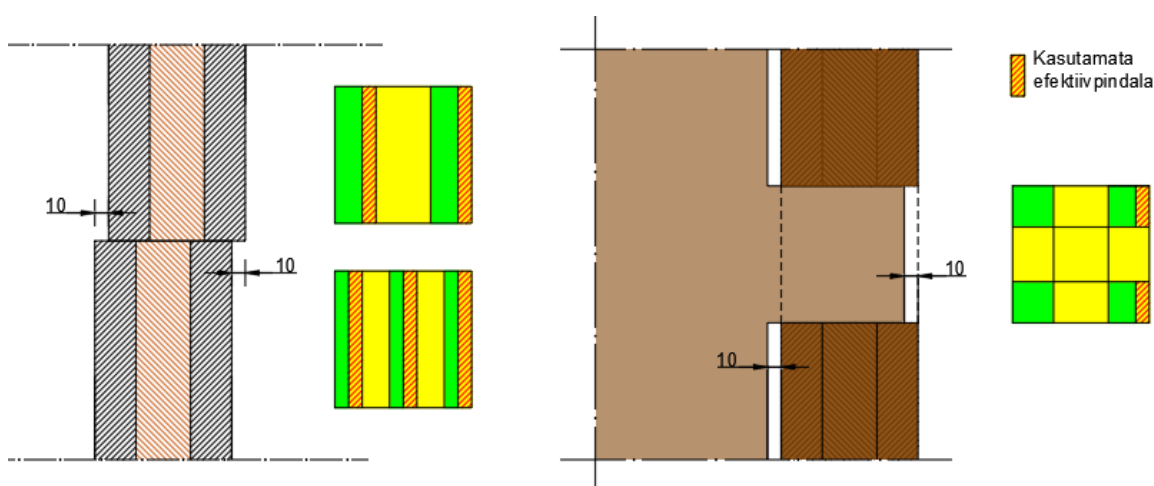
$$A_{ef,I} = (t_1 + t_3 + \dots + t_n) * t_{gross} = \sum_1^{n_{net}} t_{net,i} * t_{gross}$$

Võttes aluseks Eesti suurima ristkihtliimpuitu tootva ettevõtte Arcwood tootevaliku [[22]], saab koostada vastavalt lamelli paksustele ja kihtide arvule efektiivpindalade suuruse ja osakaalu liite kogupinnast. Vastavalt Tabel L.1 esitatud andmetele on I-liite efektiivne pindala igal juhul suurem kui T-liite survepindala, mistõttu ristuvate seinte liite tapi kõrgused peavad sama konfiguratsiooni juures olema väiksemad kui pikiseinte liides. Esitatud konfiguratsioonide korral on I-liite efektiivne pindala keskmiselt 1,5 korda suurem T-liite pindalast.

Tabel L.1 Arcwoodi tootevaliku [22] liitepindade suurused

Seina paksus	Lamellide paksused kihtide kaupa					Liite pindala	T-liide		I-liide	
	Kiht 1	Kiht 2	Kiht 3	Kiht 4	Kiht 5	A [mm ²]	A _{ef} [mm ²]	[%]	A _{ef} [mm ²]	[%]
60	20	20	20			3600	1600	44%	2400	67%
80	30	20	30			6400	3600	56%	4800	75%
90	30	30	30			8100	3600	44%	5400	67%
100	30	40	30			10000	3600	36%	6000	60%
120	40	40	40			14400	6400	44%	9600	67%
100	20	20	20	20	20	10000	3600	36%	6000	60%
120	30	20	20	20	30	14400	6600	46%	9600	67%
140	40	20	20	20	40	19600	10800	55%	14000	71%
160	40	20	40	20	40	25600	14400	56%	19200	75%
180	40	30	40	30	40	32400	14400	44%	21600	67%
200	40	40	40	40	40	40000	14400	36%	24000	60%

Liite efektiivsete survepindalade arvutustes arvestamisel tuleb lisaks tootmis tolerantsidele arvestada paigaldustäpsust platsil, mis võib oluliselt vähendada töötava pinna suurus. Välimised lamellid on pikilamellid ning seetõttu ka efektiivset pindala moodustavad lamellid, siis on survetugevus paigaldustolerantsidest tugevalt mõjutatud. Sellest tulenevalt on tolerantsidest rohkem mõjutatud I-liide kui T-liide, vastavalt Joonis L.6. T-liite puhul on oluline, et tapp ulatuks ristuva paneeli kaugema servaga tasa. Joonis L.6 on esitatud illustreerivad näited liidete 10 mm ebatäpsusest paigaldusel ja selle mõjust liite efektiivpindalale.



Joonis L.6 Näited paigalduse ebatäpsuse mõjust efektiivpindaladele.

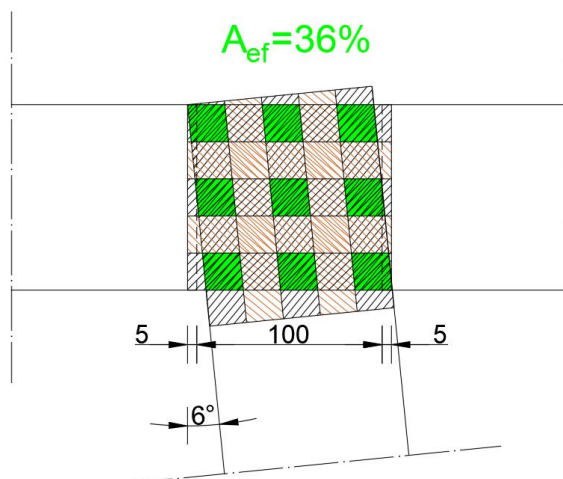
Vastavalt Joonis L.6 esitatud hälbe tüüpidele on võimalik hinnata selle mõju survekandevõimele. Kuna tappliite puhul on tapp parameetritelt enamasti nõrke ohuta

element, sõltub survetugevus efektiivpindalast ning lamelli survetugevusest. Tabel L.2 esitab efektiivpindalade vähenemise 10 mm hälbe korral, vastava protsendi võrra väheneb ka tapi survekandevõime.

Tabel L.2 Arcwood-i standard tootevaliku efektiivpindalade vähenemine 10 mm hälbe korral

Seina paksus	Lamellide arv	T-liide			I-liide		
		Aef,tol [mm ²]	[%]	Aef vähenemine tolerantside mõjul [%]	Aef,tol [mm ²]	[%]	Aef vähenemine tolerantside mõjul [%]
60	3	1200	33%	25%	1200	33%	50%
80	3	3000	47%	17%	3200	50%	33%
90	3	3000	37%	17%	3600	44%	33%
100	3	3000	30%	17%	4000	40%	33%
120	3	5600	39%	13%	7200	50%	25%
100	5	3000	30%	17%	3000	30%	50%
120	5	5700	40%	14%	6000	42%	38%
140	5	9600	49%	11%	9800	50%	30%
160	5	13200	52%	8%	14400	56%	25%
180	5	13200	41%	8%	16200	50%	25%
200	5	13200	33%	8%	18000	45%	25%

Paigalduse juures on võimalik T-liite puhul täisnurgast erineva nurga teke. T-liite konfiguratsioonist sõltuvalt ei mõjuta väikesed nurga muutused efektiivpindala suurust. Pöördumisest tekivad rombi kujulised kontaktpindalad, mis on pindalalt suuremad kui täisnurga all tekkivad alad. Seega ei ole pöördumine tähtsa mõjuga efektiivpindaladele.



Joonis L.7 Näitlik paigaldustolerantsi mõju, kui ristuvad seinad ei asetse täielikult 90 kraadise nurga all.

Esitatud tabelite L.1 ja L.2 ning jooniste L.6 ja L.7 põhjal saab järeldada, et paigaldustolerantsid mõjutavad otseselt efektiivpindala ja seeläbi ka survekandevõimet tappliites. Suuremat mõju avaldavad paigaldustolerantsid just I-liitele. Tappliite konstrueerimisel tuleb esitada kõrgemad nõudmised tappliite elementide paigaldusele. Näiteks T-liite puhul on lubatud sügavamad tapid, mis lubavad paigaldada elemendi selliselt, et tapi ots jääb ristuva elemendi välimisest pinnast üle ulatuvalt. Samuti on Tabel L.2 põhjal olenevalt paneeli konfiguratsioonist hälvete mõjud efektiivpindalale väga erinevad, mistõttu soovitab töö autor valida hälbe mõju kandevõimele vastavalt paneeli konfiguratsioonile. Lisaks tuleb arvestada ka tootmistolerantsidega, mis avaldavad mõju kihtide paksustele ja võib seeläbi vähendada efektiivpindala.