



EESTI MAAÜLIKOOL
Metsandus- ja maaehitusinstituut

Joosep Mölder

**LIIM- JA RISTKIHTPUIDU KIHTIDE ARVU MÕJU
MULJUMISTUGEVUSELE NAAGELLIITES**

**INFLUENCE OF NUMBER OF LAYERS ON EMBEDMENT
STRENGTH OF DOWEL CONNECTIONS FOR GLULAM AND
CROSS-LAMINATED TIMBER**

Magistritöö
Maaehituse õppekava

Juhendajad: lektor Marko Teder, MSc
assistent Eero Tuhkanen, MSc

Tartu 2015

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Magistritöö lühikokkuvõte	
Autor: Joosep Mölder		Õppekava: Maaehitus	
Pealkiri: Liim- ja ristkihtpuidu kihtide arvu mõju muljumistugevusele naagelliites			
Lehekülgi: 80	Jooniseid: 69	Tabeleid: 18	Lisasid: 9
Osakond:		Maaehituse osakond	
Uurimisvaldkond:		Naagelliited	
Juhendajad:		Marko Teder, Eero Tuhkanen	
Kaitsmiskoht ja aasta:		Tartu, 2015	
Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli uurida katseliselt liimpuidu ja ristkihtpuidu kihtide arvu mõju muljumistugevusele ja purunemise iseloomule ning võrrelda leitud muljumistugevuse väärtusi levinud arvutusvalemite väärtustega. Katsetamisel kasutati 3-, 5- ja 9-kihilisi liim- ja ristkihtpuidust katsekehi. Igast rühmast valmistati 20 katsekeha, kokku tehti 120 katset. Kõik katsekehad olid 100 mm paksud ja neid katsetati 20 mm naagliga. Katsete läbiviimisel juhinduti standardist EVS-EN 383:2007. Magistritöö tulemusena leiti, et kui erinevate kihtide arvuga katsekehade rühmade vahel ei ole tiheduste väärtustel olulist statistilist erinevust, ei ole olulisi erinevusi ka muljumistugevuses. Sellest tulenevalt võib öelda, et kihtide arv ei mõjuta muljumistugevuse väärtust. Küll aga on kihtide arvul mõju purunemisele ja tulemuste varieeruvusele. Liimpuitkatsekehade puhul järeldati, et mida suurem on kihtide arv, seda suuremaks arenevad deformatsioonid enne lõhestumist. Ristkihtpuitkatsekehade puhul järeldati, et kihtide arvu tõustes vähenes hajuvus katsetulemuste vahel. 9-kihiliste katsekehade puhul oli 4 mm deformatsiooni juures maksimaalse ja minimaalse jõu väärtuste vahe 25% väiksem kui 3-kihiliste katsekehade puhul. Sama seost võis märgata ka liimpuidust katsekehade puhul. Ristkihtpuidu puhul võrreldi katselisi muljumistugevuse väärtusi kahe valemiga, millest üks võttis arvesse pikikiuga risti paiknevate kihtide osakaalu ja teine mitte. Selgus, et mõlemad arvutusvalemid hindavad muljumistugevust keskmiselt 14% suuremaks katseliselt leitud muljumistugevuse väärtustest. Ka liimpuitkatsekehade puhul saadi arvutusvalemitega suuremad muljumistugevuse väärtused kui katseliselt: Eurokoodeks 5 muljumistugevuse valemiga keskmiselt 9%, Graz'i Tehnikaülikooli väljapakutud valemiga keskmiselt 6% ja Šveitsi standardi SIA 265 järgi keskmiselt 2% suuremad väärtused. Kuna töö tulemusena selgus, et arvutusvalemid hindavad muljumistugevust suuremaks tegelikust, siis on vajalikud edasised uuringud selles valdkonnas.			
Märksõnad: naageltuupi liide, muljumistugevus, ristkihtpuit, liimpuit			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master's Thesis	
Author: Joosep Mölder		Specialty: Rural Building	
Title: Influence of number of layers on embedment strength of dowel connections for glulam and cross-laminated timber			
Pages: 80	Figures: 69	Tables: 18	Appendixes: 9
Department:		Department of Rural Building	
Field of research:		Dowel connections	
Supervisors:		Marko Teder, Eero Tuhkanen	
Place and date:		Tartu, 2015	
The purpose of this thesis was to study how the number of layers in glued laminated timber and cross-laminated timber affects embedment strength and breaking characteristics and to compare the test results with embedment strength values found using common formulas. Test pieces of glued laminated timber and cross-laminated timber with three, five and nine layers were used in the testing. 20 test pieces were made of each type, with a total of 120 tests performed. All test subjects had a thickness of 100 mm and were tested with a 20 mm dowel-type fastener. The EVS-EN 383:2007 standard was followed during testing. The thesis showed that if the difference in density between groups of test pieces with a different number of layers is statistically irrelevant, the embedment strength does not vary a great deal. Therefore, it can be said that the number of layers has no effect on embedment strength. However, the number of layers has an effect on the breaking of the material and the variability of the results. It was concluded from the tests with glued laminated timber that the higher the number of layers, the larger the deformations before the material breaks. With cross-laminated timber it was concluded that as the number of layers increases, variance between test results reduces. At a deformation of 4 mm, the difference between maximum and minimum force was 25% smaller with test pieces with nine layers than those with three layers. The same correlation could be seen with test pieces of glued laminated timber. The cross-laminated timber test results were compared with the embedment strength values found using two formulas, one of which took into account the proportion of perpendicular layers and the other of which did not. It became evident that the formulas assess the embedment strength to be an average of 14% higher than the values resulting from testing. The embedment strength values calculated using the formulas were also higher with glued laminated timber than the values resulting from the tests: on average, 9% using the Eurocode 5 formula; 6% using the formula suggested by Graz University of Technology; and 2% following the Swiss standard SIA 265. Since the thesis showed that formulas assess embedment strength as being higher than is actually the case, future research in this field is necessary.			
Keywords: dowel-type fasteners, embedding strength, cross-laminated timber, glued laminated timber			

SISUKORD

Sümbolid, tähised ja lühendid	6
SISSEJUHATUS	8
1. KIRJANDUSE ANALÜÜS	10
1.1 Üldiselt liidetest	10
1.1.1 Naagelliited.....	12
1.2 Naagelliidete arvutamine	13
1.2.1 Johansen'i voolavusteororia.....	13
1.2.2 Näide ühelõikelise teras-puiduga liite arvutusliku kandevoime valemite tuletamisest	14
1.2.3 Teras-puiduga liite purunemisviisid Eurokoodeks 5 põhjal	18
1.3 Muljumistugevus	20
1.3.1 Üldiselt muljumistugevusest	20
1.3.2 Muljumistugevuse arvutamine Eurokoodeks 5 põhjal	22
1.3.3 Alternatiivsed valemid muljumistugevuse arvutamiseks pikikiudu.....	22
1.3.4 Ristkihtpuidu muljumistugevuse empiirilised valemid	23
1.4 Muljumistugevust mõjutavad tegurid	26
1.4.1 Puidu niiskus	26
1.4.2 Puidu tihedus	27
1.4.3 Nurk mõju sirge ja pikikiu vahel	27
1.4.4 Naagli läbimõõt	29
1.4.5 Naagli karedus	31
1.4.6 Tõmbe- ja survekatsetest tekkivate sisepingete võrdlus.....	35
1.5 Kinnituselemendi voolavuspiirile vastav paindemoment	35
2. UURIMUSMATERJAL JA METOODIKA	38
2.1 Katsemetoodika	38
2.2 Katsekehad	39
2.2.1 Katsekehade üldandmed	39
2.2.2 Katsekehade valmistamine	42
2.3 Katsekehade ettevalmistus katsetamiseks.....	44
2.4 Katseseade	45
2.5 Katseskeem	46
2.6 Eeldatav maksimaalne jõud	48
2.7 Koormuse rakendamine ja deformatsioonide salvestamine.....	48
2.8 Katsekehade tiheduse ja niiskussisalduse määramine	50
2.9 Muljumistugevus	51
2.10 Analüüs	51
3. UURIMUSTÖÖ TULEMUSED JA ARUTELU	53
3.1 Naagli mõju katsetulemustele	53
3.2 Katsekehade niiskussisaldus	53
3.3 Katsekehade tihedus	56
3.4 Muljumistugevus	58
3.5 Muljumistugevuste graafikute võrdlus	61
3.6 Regressioonianalüüs	64
3.7 Purunenud katsekeha kirjeldamine	65
3.8 Katsetulemuste võrdlus arvutustulemustega.....	67
3.8.1 Alused ja meetodid	67

3.8.2 Ristkihtpuidu muljumistugevuse katseliste väärtuste võrdlus arvutusvalemitega leitud tulemustega	68
3.8.1 Liimpuidu muljumistugevuse katseliste väärtuste võrdlus arvutusvalemitega leitud tulemustega.....	69
KOKKUVÕTE	72
KASUTATUD KIRJANDUS	75
SUMMARY	78
LISAD	81
Lisa 1. Katsekehade skeemid	82
Lisa 2. Purunemisviisi arvutuslik kontroll.....	84
Lisa 3. Katsekeha lamellide jäädvustamise skeem.....	86
Lisa 4. Eeldatav maksimumkoormuse arvutamine.....	87
Lisa 5. Katsetulemused keskmiste koondtabel.....	88
Lisa 6. 3- ja 9-kihiliste katsekehade purunemispildid	89
Lisa 7. Tüüpilised purunemispildid	91
Lisa 8. Ristkihtpuidu katsetulemuste võrdlus arvutusvalemitega	92
Lisa 9. Liimpuidu katsetulemuste võrdlus arvutusvalemitega	95

Sümbolid, tähised ja lühendid

Ladina suurtähed

A	ristlõike pindala	[mm ²]
F	koormus, jõud	[N]
F_d	arvutuslik jõud	[N]
$F_{ax,Rk}$	kinnituselemendi normatiivne teljesuunaline väljatõmbe-kandevõime	[N]
$F_{max,est}$	eeldatav maksimaalne jõud	[N]
$F_{v,Rk}$	kinnituselemendi ühe nihkepinna normkandevõime	[N]
$M_{y,d}$	kinnituselemendi arvutuslik voolavusmoment	[N·mm]
$M_{y,Rk}$	kinnituselemendi voolupiirile vastava momendi normatiivne väärtus	[N·mm]
R_d	arvutuslik kandevõime	[N]

Ladina väiketähed

d	naagli diameeter	[mm]
$f_{h,0,k}$	puidu normatiivne muljumistugevus pikikiudu	[N/mm ²]
$f_{h,k}$	normatiivne muljumistugevus	[N/mm ²]
$f_{h,i,d}$	i-nda puitelemendi arvutuslik muljumistugevus	[N/mm ²]
$f_{h,\alpha,k}$	puidu normatiivne muljumistugevus nurga α korral	[N/mm ²]
$f_{u,k}$	poldi normatiivne tõmbetugevus	[N/mm ²]
$f_{y,k}$	poldi normatiivne voolavuspiir	[N/mm ²]
t	paksus	[mm]
u	deformatsioon	[mm]

Kreeka väiketähed

α	nurk jõu mõjumissuuna ja pikikiu vahel	[kraadides]
γ_m	Materjali omaduse osavarutegur	
ρ_k	Puidu normtihedus	[kg/m ³]
ρ_{kesk}	Tiheduse aritmeetiline keskmine	[kg/m ³]
ρ_m	Tiheduse keskväärtus	[kg/m ³]

ρ_{max}	Tiheduse maksimumväärtus	[kg/m ³]
ρ_{min}	Tiheduse miinimumväärtus	[kg/m ³]
φ	hõõrdenurk	[kraadides]
μ	hõõrdetegur	

Lühendid

COV	variatsioonikoefitsient	[%]
LP	grupp, kuhu kuuluvad kõik liimpuitkatsekehad	
LP1	rühm, kuhu kuuluvad kõik 3-kihilised liimpuitkatsekehad	
LP2	rühm, kuhu kuuluvad kõik 5-kihilised liimpuitkatsekehad	
LP3	rühm, kuhu kuuluvad kõik 9-kihilised liimpuitkatsekehad	
RKP	grupp, kuhu kuuluvad kõik ristkihtpuitkatsekehad	
RKP1	rühm, kuhu kuuluvad kõik 3-kihilised ristkihtpuitkatsekehad	
RKP2	rühm, kuhu kuuluvad kõik 5-kihilised ristkihtpuitkatsekehad	
RKP3	rühm, kuhu kuuluvad kõik 9-kihilised ristkihtpuitkatsekehad	

SISSEJUHATUS

Ristkihtpuit on puidupõhine plaatmaterjal, mis pakub keskkonnasäästlikku alternatiivi monteeritavatele raudbetoonelementidele, millele sarnaselt saavutatakse tehases elementide valmistamisel suur täpsus, vajadusel valmis pinnaviimistlus ning kiire montaaž ehitusplatsil. Erinevalt raudbetoonist on montaažiga seotud lisatööde hulk ehitusplatsil minimaalne ja ehitusprotsess kuiv, seetõttu ka ehitusaeg lühike. Väga suure eelise annab elementide väike kaal, mistõttu väheneb oluliselt transpordi ja tõsteseadmete kulu.

Ristkihtpuitu kasutatakse enim hoone põhikonstruktsioonina, kuid levima on hakanud ka selle kasutamine traditsioonilistes puitehitistes: puitkarkassmajade ja viilhallide jäigastamine, olemasolevate puithoonete renoveerimine jne. Hoonete jäikus on väga olulisel kohal nii kandevõime kui ka kasutusmugavuse seisukohast. Tehnoloogiate ja projekteerimismuudatuste areng on jõudnud nii kaugele, et puidust konstruktsioonidega hoonete puhul mõeldakse juba kuni 30-korruseliste ehitiste püstitamise peale. Seetõttu kujuneb suurimaks väljakutseks just hoonete jäikuse tagamine. Tuulekoormused (seismiliselt aktiivsetes piirkondades ka maavärina koormused) on sellised, mille puhul ei ole enam võimalik kasutada traditsioonilisi jäigastussüsteeme (nt. diagonaalsidemed).

Ristkihtpuidu kasutamine jäigastussüsteemides on tihedalt seotud liidetega: kinnitus vundamendile, vahelakke, elementide omavaheline kinnitamine jne. Erilahendused ja suuremad koormused nõuavad kinnitusvahendite tootjatelt senisest efektiivsemaid ning optimaalsemaid lahendusi, et ristkihtpuidu võimalusi ära kasutada. Jäikussüsteem vajab kompleksset lähenemist, kuna kinnituspunkte on palju ning kogu süsteemi käitumine on mõjutatud mitmest erinevast parameetrist. Optimaalsete ja turvaliste liidete väljatöötamisel on oluline tunda tegureid, mis mõjutavad liite kandevõimet, järelleandvust ja purunemisviisi.

Naageltüüpi liite käitumist ja seda mõjutavaid parameetreid on puidu puhul palju uuritud. Ristkihtpuidu ja liimpuidu puhul lisandub nende hulka veel kihilisus, lamellide paksus ja paiknemine. Autori teada pole nende parameetrite mõju liite kandevõimele ja purunemisviisile veel uuritud.

Birgit Reichelt katsetas oma magistritöös 3-, 6- ja 20-kihilist liim- ja ristkihtpuitu ning järeldas, et kihtide arvu tõustes suureneb kruvi väljatõmbekandevõime [1]. See tõstatab küsimuse, kas suurem kihtide arv suurendab ka naagelliite korral muljumistugevust.

Käesoleva töö eesmärk on katseliselt määrata kihtide arvu mõju liimpuidu ja ristkihtpuidu muljumistugevusele ja liite purunemisviisile naagelliite korral. Teise eesmärgina võrreldakse katseliselt leitud muljumistugevuse väärtusi arvutuste teel leitavate väärtustega. Liimpuidu muljumistugevuse väärtusi võrreldakse Eurokoodeks 5, Šveitsi standardi SIA 265 ja Graz'i Tehnikaülikooli välja pakutud arvutusvalemitega. Valemid kehtivad puidule ja liimpuidule, kus terve materjali ulatuses on kiud samasuunalised. Ristkihtpuidu katsel saadud vastavaid väärtusi võrreldakse Blaß'i ja Uibel'i poolt tuletatud empiiriliste valemitega [2].

Töö esimeses osas antakse lühiülevaade naagelttüüpi liidetest, muljumistugevusest ning seda mõjutavatest teguritest. Teises osas kirjeldatakse katsekehade valmistamist ja katsemetoodikat. Kolmandas osas analüüsitakse katsete tulemusi ja nende vahelisi seoseid.

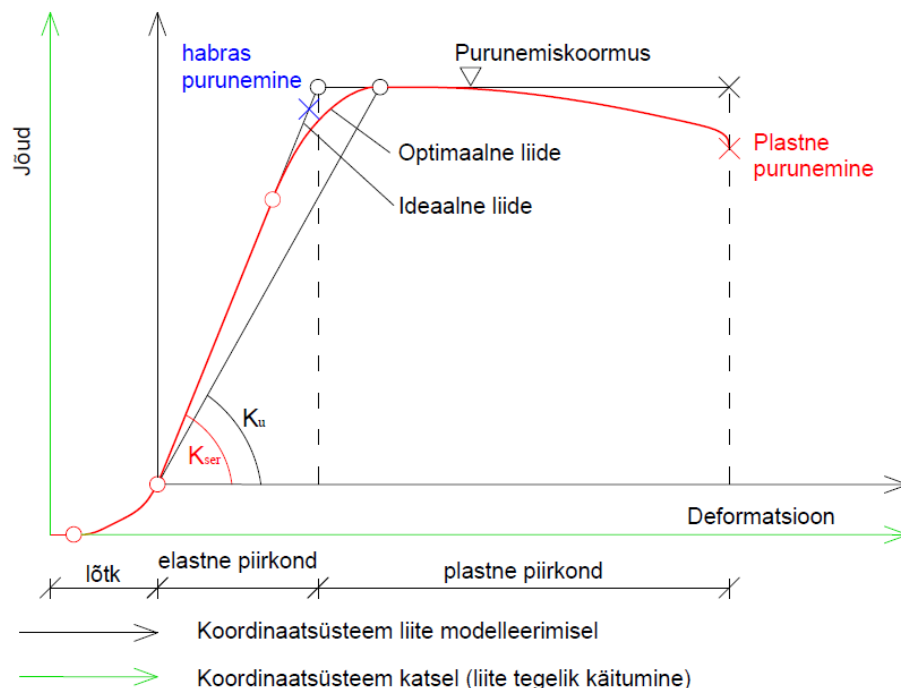
Katsed teostati standardi EVS-EN 383:2007 alusel [3]. Katsekehade valmistamisel lähtuti standarditest EVS-EN 14080:2013 [4] ja prEN16351 [5]. Nii liim- kui ka ristkihtpuidust valmistati 3-, 5- ja 9-kihilised katsekehad, igat tüüpi 20 tükki, kokku 120 katsekeha.

1. KIRJANDUSE ANALÜÜS

1.1 Üldiselt liidetest

E. Gehri on puitliite olemuse kokku võtnud järgmiselt: „Liidete abil seotakse puitkonstruktsiooni osad staatiliselt tervikuna töötavaks süsteemiks. Seejuures eristatakse konstruktsioonelementide omavahelisi liiteid ning jätkuliiteid, mis seovad ristlõiked omavahel. Liites on lubatud kasutada samaaegselt erinevaid kinnitusedetaile, võttes arvesse nende järeleandvust“. [6] Seega on oluline hinnata liite käitumist ja selle mõju konstruktsioonile detailist tervikuni.

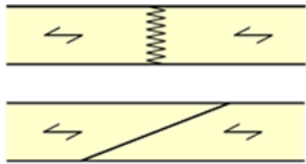
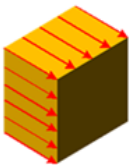
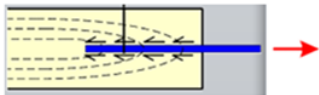
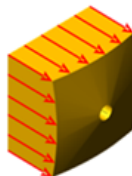
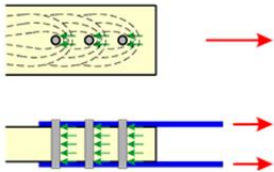
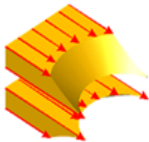
Joonisel 1.1 on toodud ühe kinnitusedetaili jõu–deformatsiooni diagramm, mis üldjuhul kehtib ka kogu liite kohta. Välimise (roheline) koordinaatsüsteemi kaudu kujutatakse liite tegelikku käitumist ning sisemise koordinaatsüsteemi alusel määratakse liite arvutusparameetrid arvutusmodelis. Tegelikku liite käitumist kirjeldav koordinaatsüsteem hõlmab ka paigaldusest tulenevat võimalikku lõtku.



Joonis 1.1. Ühe kinnitusedetaili jõu–deformatsiooni diagramm, kus K_{ser} on nihkemoodul kasutuspiiriseisundis ja K_u nihkemoodul kandepiiriseisundis [7]

Liite konstrueerimisel tuleb silmas pidada selle efektiivsust ja purunemispilti. Efektiivsus iseloomustab seda, kui suur osa liidetavate elementide ristlõikekandevõimest realiseeritakse. Efektiivse liite eelduseks on lokaalsete pingekontsentratsioonide vältimine. Tabelis 1.1 on esitatud erinevat tüüpi liidete efektiivsused ja pingajaotused. Näiteks liimliite efektiivsus on ~100%, sisseliimitud varrastel 80...85% ja naageltüüpi liidetel 60...65%.

Tabel 1.1. Liidete efektiivsus ja pingete jaotus erinevat tüüpi liidete korral [7]

Liitetüüp	Efektiivsus	Jõu ülekandumine	Pingejaotus
Liimliide (otsene jõu ülekanne) 	1,0	Ideaalilähedane: - jätkuv, vähendamata ristlõige; - lokaalsed pingekontsentratsioonid põhjustatud üldjuhul puidu struktuurist	
Sisseliimitud varras (kaudne jõu ülekanne) 	0,8...0,85	Soodne: teraselt puidule üleminekul vähesed pingekontsentratsioonid	
Naageltüüpi liide (kaudne jõu ülekanne) 	0,6...0,65	Ebasoodne: - suured pingekontsentratsioonid; - ebaühtlane pingajaotus	

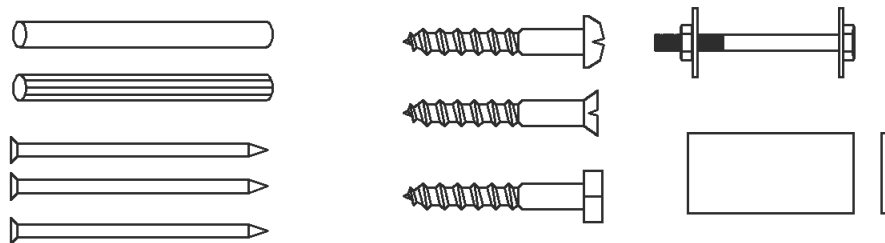
Efektiivseid liiteid iseloomustab rabe purunemispilt – liite kandevõime ammindub äkiliselt ilma eelnevalt nähtavate deformatsioonideta. Optimaalseks loetakse liidet, mille puhul arenevad pärast maksimaalse kandevõime saavutamist välja plastsed deformatsioonid. Kuna puidu purunemine tõmbele on iseloomult rabe, saab puitkonstruktsiooni kui terviku plastset purunemist reguleerida just liidete kaudu. Liidete projekteerimisel on eesmärk leida tasakaal efektiivsuse ja plastse vahel, saavutades sellega optimaalse ja töökindla süsteemi.

Kuigi naagelliite efektiivsus on madal, on selle kaudu võimalik hästi esile kutsuda plastset purunemist, kuna liites hakkavad korraga tööle nii puit kui ka metall.

1.1.1 Naagelliited

Naageltüüpi liites võib naaglik olla ümarvarras või plaat, mis läbib ühendatavaid elemente takistades nende omavahelist nihkumist. Naagel töötab põhiliselt paindele ja löikele. Naageltüüpi liiteid võib kasutada puit-puiduga, puidupõhine plaat-puiduga või teras-puiduga liidetes. Liited võivad olla ühe-, kahe- või mitmelõikelised ning koormamise iseloomu järgi jaotatakse need sümmeetrilisteks ja ebasümmeetrilisteks. [8-9]

Ümarvarrastest naaglite hulka kuuluvad terasest naaglid ja poldid, naelad, puitnaaglid, kruvid ja kuuskantpeaga puidukruvid (vt joonis 1.2). Plaatnaagleid valmistatakse terasest või lehtpuidust. [8]



Joonis 1.2. Erinevat tüüpi naaglid [8]

Liite kandevõime suurendamiseks koostatakse ühendus tavaliselt mitmest naaglist, kusjuures kandevõime oleneb naaglite arvust mitte ühenduse pikkusest. Puidu looduslikud vead mõjutavad liite kandevõimet vähe, seda liite suure pinna ja ühendatavate elementide vähese nõrgestuse tõttu [10].

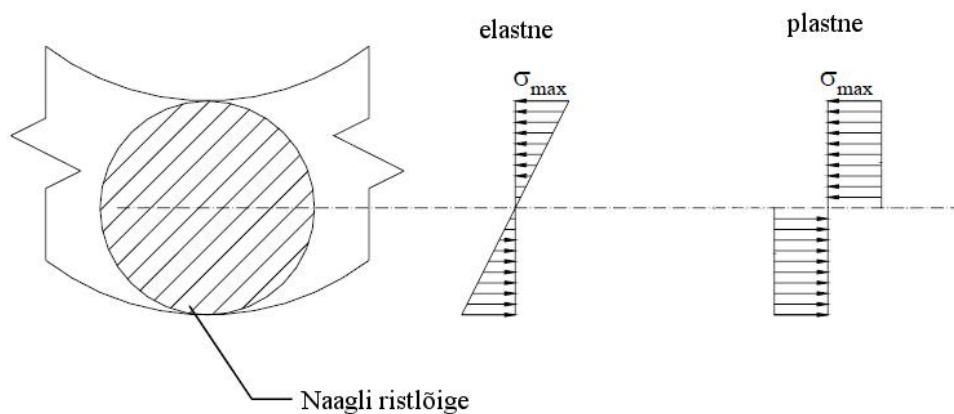
Naagel töötab liites justkui tala elastoplastsel alusel. Liidetud elemendid püüavad nihkudes naaglit liitekohas pöörata kuni tekib olukord, kus naagel toetub liidetavate elementide servadele. Seejärel hakkab naagel kõverduma, naagli ja puidu kontakt suureneb jõu edasisel suurendamisel ja puidus tekivad ebaühtlased muljumispinged. Tekib olukord, kus elementide servad liitühenduses on rohkem muljutud kui nende keskosa. Muljumise tulemusena tekivad kahemärgilised pinged, kus resultantjõud moodustavad teineteist tasakaalustavad jõupaarid, mis takistavad naagli pöördumist. Seosed näitavad, et naagli tasakaal tagatakse ainult pikijõududega, mis on paralleelsed liidetud elementide omavahelise nihkumisega. [8]

1.2 Naagelliidete arvutamine

1.2.1 Johansen'i voolavusteooria

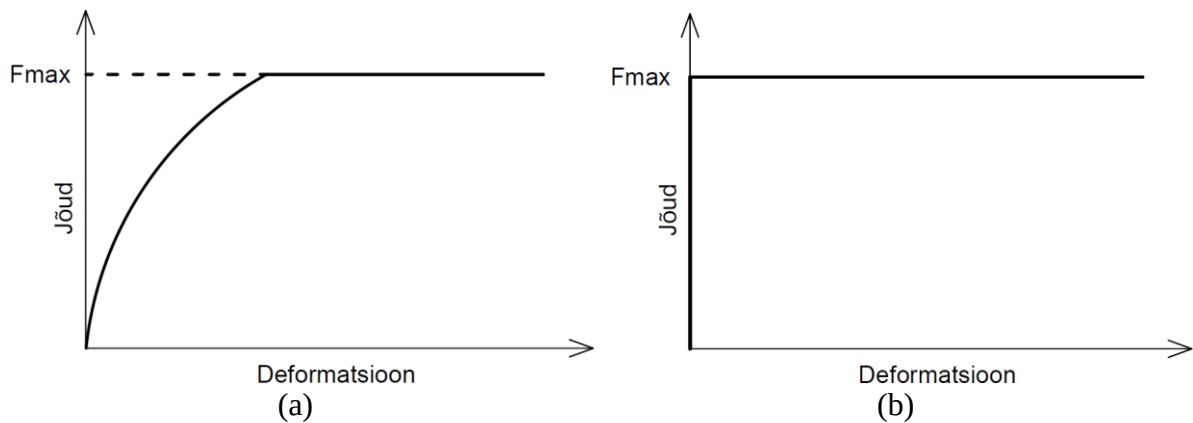
Voolavusteooria põhineb eeldusel, et nii põhimaterjal kui ka kinnituselement käituvad deformeerudes plastse materjalina. Liite kandevõime ammendub, kui puidus tekkivad pinged ületavad plastse purunemise piiri, kinnituselementi tekib plastne liigend või purunemine toimub nende kahe kombinatsioonis. Täpne purunemisviis sõltub liidetavate elementide geometriast, kinnituselemendi voolupiirile vastavast paindemomendist ja puitmaterjali muljumistugevusest. [11]

Naagelliidete kandevõime arvutamise valemid põhinevad K. W. Johansen'i poolt tuletatud voolavusteoorial [12]. Kui algse teooria põhjal eeldas Johansen, et kinnituselemendis tekib elastne liigend, siis A. Meyer täiustas valemeid, võttes arvesse, et naaglisse tekib täielikult plastne liigend (vt joonis 1.3) [13]. Ümarristlõike korral on plastne vastupanumoment elastsest ligikaudu 70% suurem ja tulenevalt sellest on sellel mõju kogu liite kandevõimele. [14]



Joonis 1.3. Elastses ja plastses staadiumis paindepingete epüürid [15]

Joonisel 1.4 on puidu tegelik ja idealiseeritud muljumise graafik. Johansen'i maksimaalse kandevõime valemite eeldatakse, et nii kinnituselement kui puit käituvad ideaalselt jäikplastsete materjalidena - see eeldus lihtsustab analüüsi ja ei muuda oluliselt lõpptulemust. [9]



Joonis 1.4. Katsekehale rakendatud koormuse ja muljumise diagrammid, kus a) tegelik muljumise diagramm, b) lihtsustatud muljumise diagramm

Johansen'i teooria on olnud aluseks Eurokoodeks 5 liidete kandevõime arvutusvalemite tuletamisel.

1.2.2 Näide ühelõikelise teras-puiduga liite arvutusliku kandevõime valemite tuletamisest

Ühelõikeline paksu terasplaadiga teras-puit liide võib puruneda kolmel viisil ning neid kirjeldavad valemid tuletatakse liite tasakaalutingimusest.

Järgnevates võrrandites kasutatud tähised:

$M_{y,d}$ on kinnituselemendi arvutuslik voolavusmoment, N·mm;

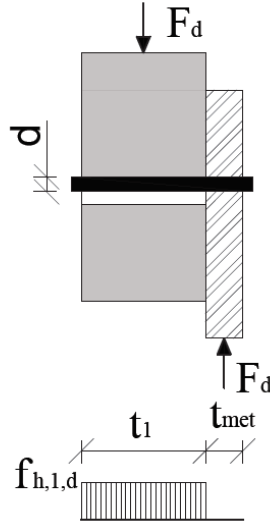
$f_{h,1,d}$ - arvutuslik muljumistugevus elemendis t_1 , N/mm²;

t_1 - puitelemendi paksus, mm;

d - kinnituselemendi läbimõõt, mm;

R_d - ühe kinnituselemendi arvutuslik kandevõimeühe lõikepinna kohta, N.

Purunemisviisi 1 korral muljub naagel puitmaterjali (vt joonis 1.5) ja määravaks saab puidu muljumistugevus.

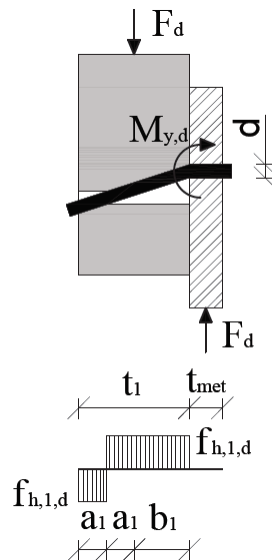


Joonis 1.5. Purunemisviis 1 - purunemine puidu muljumisele paksu terasplaadi korral

Liite tasakaalutingimustest avaldub kandevõime valem:

$$R_d = f_{h,1,d} t_1 d. \quad (1.1)$$

Purunemisviisi 2 korral muljub naagel puitu, samaaegselt kinnituselemendile rakenduva paindemomendi mõjul tekib naaglis plastne liigend (vt joonis 1.6).



Joonis 1.6. Purunemisviis 2 - puidu muljumine naagli paindest paksu terasplaadi korral

Jõudude tasakaalutingimusest leitakse kinnituselemendile mõjuv paindemoment valemiga:

$$M_{y,d} = f_{h,1,d} d \frac{b_1^2}{2} + f_{h,1,d} d a_1 \left(t_1 - \frac{3a_1}{2} \right) - f_{h,1,d} d a_1 \left(t_1 - \frac{a_1}{2} \right).$$

Asendades painemomendi võrrandis $a_1 = \frac{t_1 - b_1}{2}$, saadakse

$$b_1^2 + 2t_1b_1 - \left(t_1^2 + \frac{4M_{y,d}}{f_{h,1,d}d}\right) = 0.$$

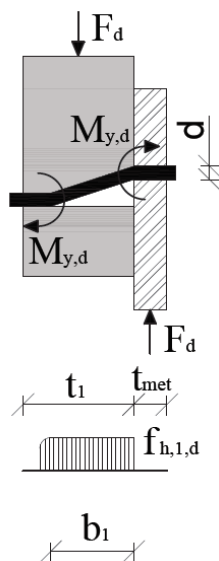
Avaldades eelnevast võrrandist b_1 , saadakse

$$b_1 = t_1 \left[\sqrt{2 + \frac{4M_{y,d}}{f_{h,1,d} dt_1^2}} - 1 \right].$$

Kuna $R_d = f_{h,1,d} db_1$, siis

$$R_d = f_{h,1,d} dt_1 \left[\sqrt{2 + \frac{4M_{y,d}}{f_{h,1,d} dt_1^2}} - 1 \right]. \quad (1.2)$$

Purunemisviisi 3 korral muljub naagel puitu ning samaaegselt tekib kinnituselemendile rakenduva paindemomendi mõjul naaglis kaks plastset liigendit (vt joonis 1.7).



Joonis 1.7. Purunemisviis 3 – puidu muljumine naagli paindest kahe plastse liigendiga paksu terasplaadi korral

Jõudude tasakaalutingimusest avaldub kinnituselemendile mõjuv kahekordne paindemoment valemiga:

$$2M_{y,d} = f_{h,1,d} d \frac{b_1^2}{2}.$$

Avaldades võrrandist b_1 , saadakse

$$b_1 = 2 \sqrt{\frac{M_{y,d}}{f_{h,1,d}d}}$$

Kuna $R_d = f_{h,1,d}db_1$, siis

$$R_d = 2 \sqrt{M_{y,d}f_{h,1,d}d}.$$

$$R_d = 1,4 \sqrt{2M_{y,d}f_{h,1,d}d} \quad (1.3)$$

Tuletatud valemi erinevus võrreldes Eurokoodeks 5 tooduga seisneb selles, et viimases on kasutatud puidu muljumistugevuse ja naagli voolavusmomendi normatiivseid väärtusi. Liite arvutusliku kandevõime leidmisel rakendatakse neile ühist osavarutegurit $\gamma=1,3$, kuid arvestades, et terase ja puidu osavarutegurid on erinevad, siis seda kompenseeritakse kandevõime valemi ees oleva kordajaga.

Purunemisviiside 2 ja 3 korral lisatakse arvutuskandevõime valemile kõieefekti tegur $F_{ax,d} / 4$, mis arvestab kinnituselemendi teljesuunalist väljatõmbe kandevõimet. Kõieefekti mõju kandevõimele tuleb erinevatel kinnitusvahenditel piirata järgmiste suurusteni:

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

Kui teljesuunaline väljatõmbe kandevõime ei ole teada, siis võetakse kõieefekti mõju võrdseks nulliga. [16]

Kõik Eurokoodeks 5 toodud ühe- ja kahelõikeliste liidete kandevõime valemid on tuletatud tasakaaluvõrranditest ning need annavad alati väärtuse ühe nihkepinna kohta. Enam kui kahelõikelise liite puhul kombineeritakse kandevõime erinevate purunemisviiside vastavatest väärtustest nende summana.

1.2.3 Teras-puiduga liite purunemisviisid Eurokoodeks 5 põhjal

Teras-puiduga liidete normkandevõime valemid jagunevad järgnevalt:

- ühelõikeline õhukese terasplaadiga liide;
- ühelõikeline paksu terasplaadiga liide;
- igasuguse paksusega terasplaadist keskelemendiga kahelõikeline liide;
- kahelõikeline liide, kus väliselemendid on õhukestest terasplaatidest;
- kahelõikeline liide, kus väliselemendid on paksudest terasplaatidest.

Terasplaadi paksusel on määrav tähtsus plastse liigendi tekkimise seisukohast. Terasplaadid liigitatakse õhukeseks, kui $t \leq 0,5d$ ja paksuks, kui $t \geq d$ (tingimusel, et ava tolerants on väiksem kui $0,1d$). Õhukese ja paksu plaadi vahele jääva terasplaadi normkandevõime määratakse lineaarse interpoleerimise teel, sealjuures tuleb kontrollida terasplaadi tugevust.

Normatiivne kandevõime ühe kinnituselemendi ühe lõikepinna kohta tuleks leida alljärgnevatest valemitest väikseima väärtusena.

Ühelõikeline õhukese terasplaadiga liide:

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{ll} 0,4f_{h,k}t_1d & (a) \\ 1,15 \sqrt{2M_{y,Rk}f_{h,k}d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (b) \end{array} \right. \quad (1.4)$$

Ühelõikeline paksu terasplaadiga liide:

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{ll} f_{h,k}t_1d & (c) \\ f_{h,k}t_1d \left[\sqrt{2 + \frac{4M_{y,Rk}}{f_{h,k}dt_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (d) \\ 2,3 \sqrt{M_{y,Rk}f_{h,k}d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (e) \end{array} \right. \quad (1.5)$$

Igasuguse paksusega terasplaadist keskelemendiga kahelõikeline liide:

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{ll} f_{h,k}t_1d & (f) \\ f_{h,k}t_1d \left[\sqrt{2 + \frac{4M_{y,Rk}}{f_{h,k}dt_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (g) \\ 2,3 \sqrt{M_{y,Rk}f_{h,k}d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (h) \end{array} \right. \quad (1.6)$$

Kahelõikeline liide, kus väliselemendid on õhukestest terasplaatidest:

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{ll} 0,5f_{h,2,k}t_2d & (j) \\ 1,15 \sqrt{2M_{y,Rk}f_{h,2,k}d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (k) \end{array} \right. \quad (1.7)$$

Kahelõikeline liide, kus väliselemendid on paksudest terasplaatidest:

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{ll} 0,5f_{h,2,k}t_2d & (l) \\ 2,3 \sqrt{M_{y,Rk}f_{h,2,k}d} & (m) \end{array} \right. \quad (1.8)$$

Eelnevates võrrandites kasutatud tähistused:

$F_{v,Rk}$ on kinnituselemendi ühe nihkepinna normatiivne kandevõime, N;

$f_{h,k}$ – puitelemendi normatiivne muljumistugevus, N/mm²;

t_1 – äärmise puitelemendi vähim paksus või süvistussügavus, mm;

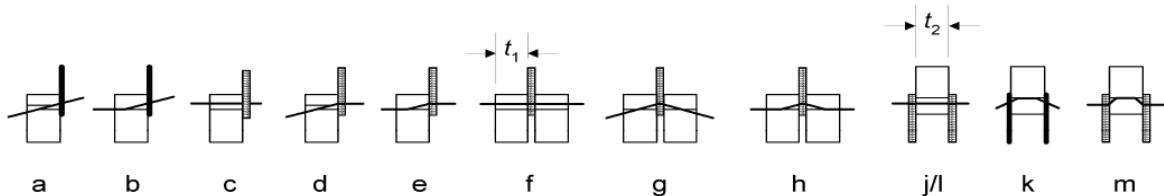
t_2 – keskmise puitelemendi paksus, mm;

d – kinnituselemendi läbimõõt, mm;

$M_{y,Rk}$ – kinnituselemendi voolavuspiirile vastav momendi väärtus, N·mm;

$F_{ax,Rk}$ – kinnituselemendi normatiivne teljesuunaline väljatõmbe-kandevõime, N.

Erinevad purunemisviisid on illustratiivselt näidatud joonisel 1.8.



Joonis 1.8. Teras-puiduga liidete purunemisviisid:

a on puidu muljumine õhukese terasplaadi korral;

b - puidu muljumine naagli paindest (õhuke terasplaat);

c - puidu muljumine paksu terasplaadi korral;

d - puidu muljumine naagli paindest (paks terasplaat);

e - puidu muljumine naagli paindest kahe plastse liigendiga (paks terasplaat);

f - puitelemendi muljumine naaglist keskmises terasplaadis;

g - puitelemendi muljumine naagli paindest keskmises terasplaadis;

h - puidu muljumine naagli paindest puidus ja muljumine terasplaadis;

j/l - puitelemendi muljumine naaglist (õhuke ja paks terasplaat);

k - puitelemendi muljumine naaglist ja naagli paindest (õhuke terasplaat);

m - puitelemendi muljumine naaglist ja naagli paindest (paks terasplaat)

Valemitest järeldub, et liite kandevõime sõltub liidetavate elementide geomeetriast (naagli läbimõõt d ja puitmaterjali paksus t), kinnituselemendi voolupiirile vastavast paindemomendist ($M_{y,Rk}$) ja puitmaterjali muljumistugevusest ($f_{h,k}$).

1.3 Muljumistugevus

1.3.1 Üldiselt muljumistugevusest

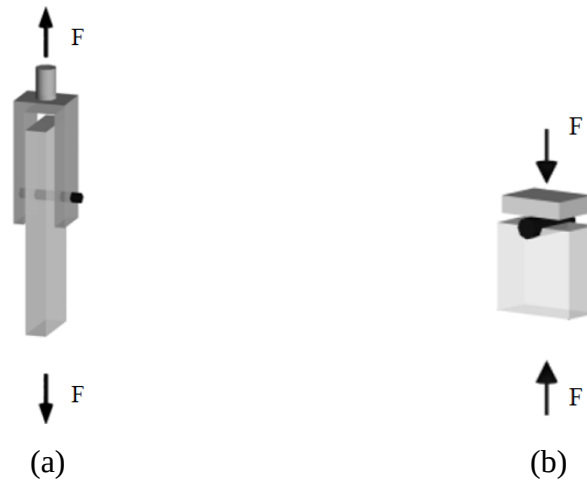
Muljumistugevus ei ole materjali omadus. See on maksimaalne pinge, mis saadakse muljumiskatse tulemusena. Sellest tulenevalt võib öelda, et muljumistugevus on süsteemi väärtus, mis sõltub mitmetest parameetritest, näiteks:

- puidu niiskusest;
- puidu tihedusest;
- naagli diameetrist;
- naagli karedusest;
- nurgast jõu mõjumise suuna ja pikikiu vahel.

Seetõttu on oluline muljumistugevus määrata standardsete katsetega.

Euroopa ja Ameerika Ühendriikide vastavates standardites (EVS-EN 383:2007 [3] ja ASTM D5764-97a(2013) [17]) toodud katsemeetodite põhiline erinevus seisneb selles, et esimesel juhul on terve naagel ümbritsetud puiduga ja koormust rakendatakse läbi katserakise (vt joonis 1.9.a). USA standardi katseskeem näeb ette naagli sissesurumist pinna pealt (vt joonis 1.9.b).

Organisatsioon *American Society of Testing and Materials*, kes töötab välja USA standardeid, on hakanud samuti soovutama Euroopas kasutatavat meetodit, kuna see imiteerib tegelikku olukorda ja annab täpsema tulemuse. [15]



Joonis 1.9. Erinevad muljumistugevuse määramise katseskeemid, kus joonis a) illustreerib standardi EVS-EN 383:2007 katseskeemi ja b) standardi ASTM D5764-97a (2013) katseskeemi [15]

Katse tulemuste põhjal arvutatakse muljumistugevus valemiga [18]:

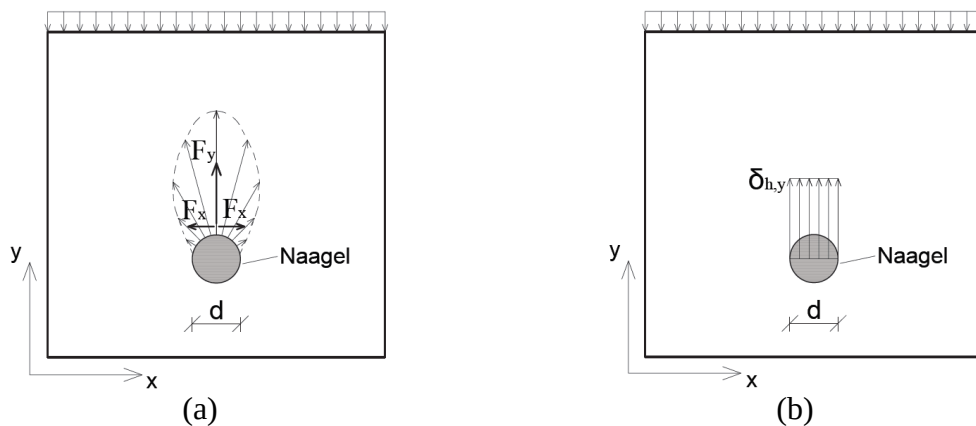
$$f_h = \frac{F_{max}}{td}, \quad (1.9)$$

kus F_{max} on katsekehale rakendatud maksimaalne koormus, N;

t - katsekeha paksus, mm;

d - kinnituselemendi läbimõõt, mm.

Katse tulemuste põhjal tuletatud analüütilistes valemites käsitletakse muljumist lihtsustatult. Joonisel 1.10.a on kujutatud naagli muljumisest tekkivad y- ja x-telje suunalised jõud. Muljumistugevuse arväärtuse leidmisel arvestatakse ühtlast pingust vaid y-telje suunal (vt joonis 1.10.b), x-telje suunaliste jõudude vastuvõtmine tagatakse konstruktiivsete ääritingimustega. [19]



Joonis 1.10. Naagli muljumistest tekkiv pingeaotus puidus, kus joonis a) illustreerib naagli ümber tekkivat reaalselt pingeaotust ja b) idealiseeritud pingeaotust

1.3.2 Muljumistugevuse arvutamine Eurokoodeks 5 põhjal

Enamikes Euroopa riikides, seal hulgas ka Eestis, juhindutakse puitkonstruktsioonide arvutamisel Eurokoodeks 5. Standard esitab naageltüüpi liidete arvutuskandevõime valemid, kus muljumistugevus sõltub puidu tihedusest ja naagli diameetrist.

Ettepuuritud aukudega puidu normatiivne muljumistugevus pikikiudu leitakse valemiga:

$$f_{h,0,k} = 0,082(1 - 0,01d)\rho_k, \quad (1.10)$$

kus ρ_k on puidu normatiivne tihedus, kg/m³;

d - kinnituselemendi läbimõõt, mm.

Valemiga 1.10 saab leida muljumistugevust pikikiudu. Kui jõud mõjub nurga all, leitakse polt- ja naagelliidete korral muljumistugevus valemiga:

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (1.11)$$

kus $f_{h,0,k}$ on puidu normatiivne muljumistugevus pikikiudu, N/mm²;

α - nurk jõu mõjumissuuna ja pikikiu vahel kraadides;

k_{90} - tegur, mis arvestab puidu liiki.

$$k_{90} = \begin{cases} 1,35 + 0,015d & \text{okaspuidule} \\ 1,30 + 0,015d & \text{spoonliimpuidule} \\ 0,90 + 0,015d & \text{lehtpuidule} \end{cases} \quad (1.12)$$

1.3.3 Alternatiivsed valemid muljumistugevuse arvutamiseks pikikiudu

Järgnevalt on välja toodud ja võrreldud ainult pikikiudu muljumistugevuse arvutamise valemeid. Šveitsis arvutatakse puitkonstruktsioone standardi SIA 265 alusel, milles muljumistugevus pikikiudu leitakse valemiga [20]:

$$f_{h,0,k,SIA} = 0,15d^{-0,3}\rho_k, \quad (1.13)$$

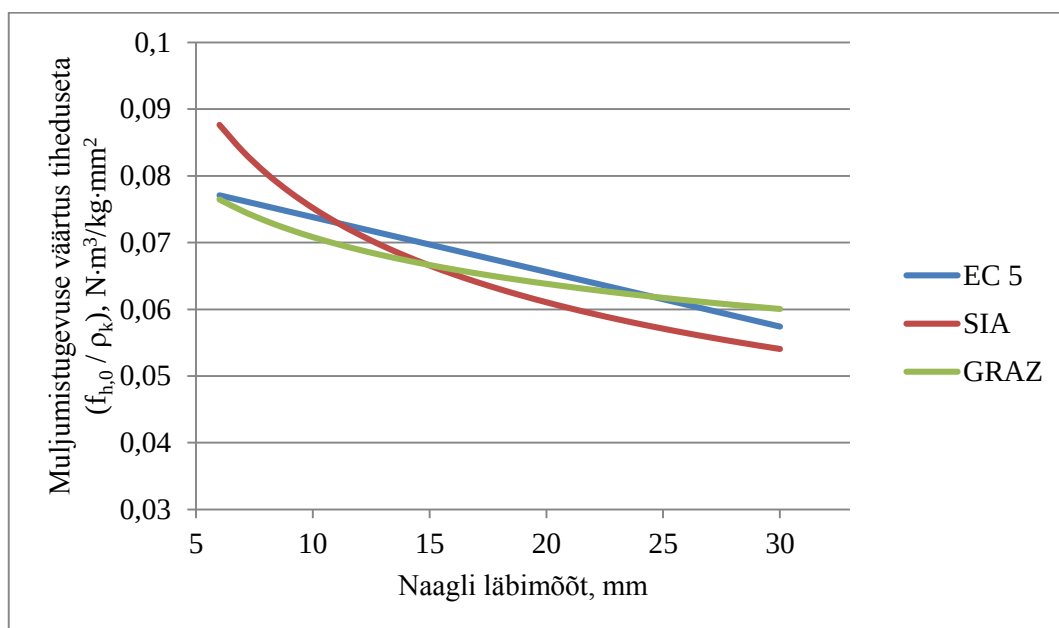
kus ρ_k on puidu normatiivne tihedus, kg/m³;

d - kinnituselemendi läbimõõt, mm.

Austrias Graz'i Tehnikaülikoolis (*Technische Universität Graz*) tehtud uuringute põhjal on välja pakutud valem [21]:

$$f_{h,0,k,GRAZ} = 0,10d^{-0,15}\rho_k. \quad (1.14)$$

Joonisel 1.11 on graafiliselt kujutatud muljumistugevuse valemite omavaheline võrdlus, mis kehtib iga tiheduse väärtuse korral.



Joonis 1.11. Muljumistugevuse pikikiu arvutusvalemite võrdlus joondigrammina, kus EC 5 on Eurokoodeks 5, SIA on SIA 265 ja GRAZ on Graz'i Tehnikaülikooli valemit iseloomustav joon

Kuni 11 mm naagli läbimõõdu korral annab sama tiheduse juures kõige suurema muljumistugevuse väärtuse Šveitsi standard SIA 265, 11 kuni 24 mm naagli puhul Eurokoodeks 5 ja 24 kuni 30 mm korral Graz'i Tehnikaülikooli väljapakutud muljumistugevuse arvutusvalem. Kõige väiksema muljumistugevuse väärtuse 6 kuni 15 mm naagli läbimõõdu korral annab Graz'i valem ja 15 kuni 30 mm naagli korral SIA 265. Kui Eurokoodeks 5 väärtused naagli diameetri suurenedes vähenevad lineaarselt, siis SIA 265 ja Graz'i tulemused eksponentsiaalselt.

1.3.4 Ristkihtpuidu muljumistugevuse empiirilised valemid

Ristkihtpuit on puidupõhine plaatmaterjal, mille kihtideks on serviti kokku liimitud või liimimata puitlamellid. Lamellide kiudude suund eri kihtides on üksteise suhtes risti ning seetõttu ei ole puidu jaoks tuletatud muljumistugevuse valemid ristkihtpuidu puhul kasutatavad. Ristkihtpuidu muljumistugevuse arvutamiseks kasutatakse Blaß'i ja Uibel'i poolt tuletatud empiirilisi valemeid [20]. Antud peatükis käsitletakse nende

uurimustööst vaid osa, mis hõlmab plaadi tasapinnaga risti paigaldatud naagelliiteid. Servaliited ja katsed kruvidega ei kattu käesoleva magistritöö teemaga.

Katsed teostati vastavalt standardile DIN-EN 383:1993. Kokku katsetati 440 katsekeha (vt tabel 1.2), paigutades naaglit viide erinevasse positsiooni lähtudes lamelli servliidete asukohast (vt joonis 1.12). Naaglit koormati kolmes erinevas suunas (vt joonis 1.13).

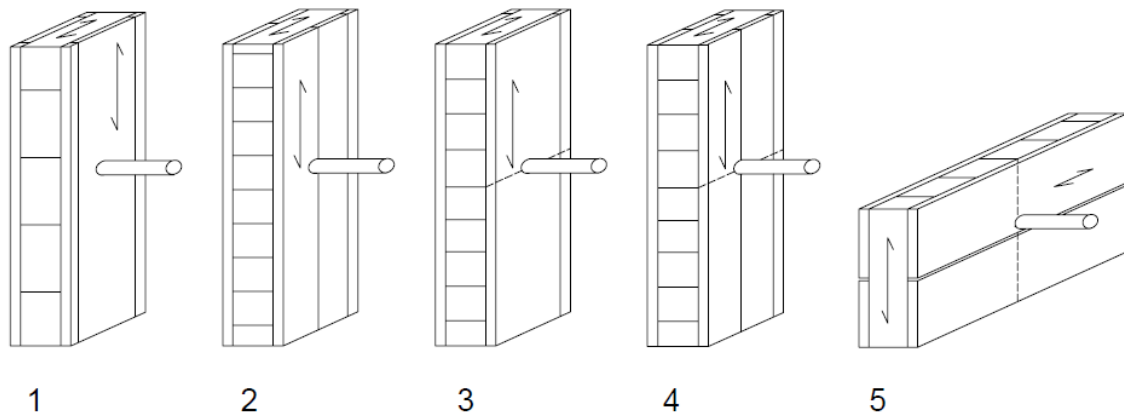
Katsekehad valmistati kuusepuust 3- ja 5-kihilisena. Kokku oli 7 erinevat katsekehatüüpi (vt tabel 1.3). Mõnede katsekehade lamellide vahele jäeti kuni 6 mm vuugid ning osadel saeti siselamellidesse kuni 2,5 mm kompensatsioonipilud laua kaardumise vastu (vt joonis 1.14).

Tabel 1.2. Katsete kirjeldus [2]

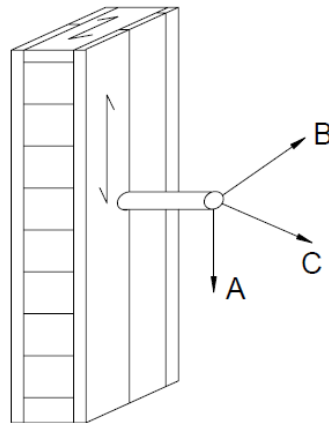
Naagli läbimõõt, mm	Katsekeha (vt tabel 1.3)	Nurk jõu mõjumise suuna ja pikikiu vahel, kraadides	Naagli positsioon					Katsekehasid kokku
			1	2	3	4	5	
			Katsekehade arv					
24	1	0; 90	igat 5	igat 5	igat 5	igat 5	-	40
	2	0; 45; 90	igat 5	igat 5	igat 5	igat 5	-	60
	3	0	5	5	5	5	-	20
20	1	0; 45; 90	igat 5	igat 5	igat 5	igat 5	10	70
	3	0; 90	igat 5	igat 5	igat 5	igat 5	-	40
16	4	0; 90	igat 5	igat 5	igat 5	igat 5	10	50
	5	0; 90	igat 5	igat 5	igat 5	igat 5	-	40
	6	0; 45; 90	igat 5	igat 5	igat 5	igat 5	20	80
12	7	0	5	5	5	5	-	20
8	7	0	5	5	5	5	-	20
Kokku								440

Tabel 1.3. Katsekehade andmed [2]

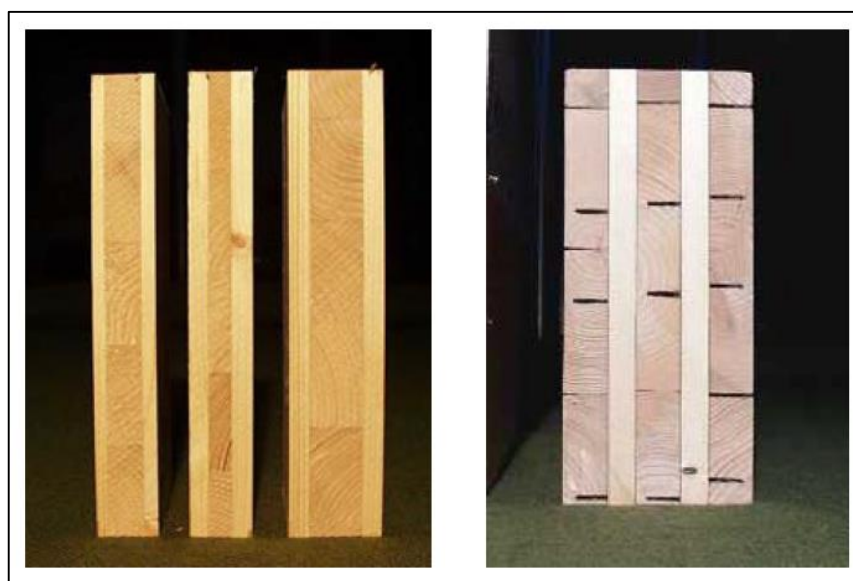
Katsekeha	Katsekeha paksus, mm	Lamellide arv	Lamellide paksus, mm	Minimaalne tihedus, kg/m ³	Keskmine tihedus, kg/m ³	Maksimaalne tihedus, kg/m ³
1	85	5	17-17-17-17-17	415	470	630
2	78	3	19-40-19	372	437	578
3	42	5	8,5-7,5-10-7,5-8,5	397	459	558
4	60	3	19-22-19	372	437	578
5	17	3	5,3-6,4-5,3	406	458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



Joonis 1.12. Naagli paiknemine katsekehades [2]



Joonis 1.13. Katsetamise suunad [2]



Joonis 1.14. Erinevat tüüpi katsekehad [2]

Katsete põhjal tuletati kaks valemit. Esimese valemi (vt valem 1.15) puhul sõltub muljumistugevus naagli diameetrist, puitmaterjali tihedusest ja jõu mõjumise suunast ristkihtpuidu välimise kihi kiudude suhtes.

$$f_{h,pred,1} = \frac{0,035(1 - 0,015d)\rho^{1,16}}{1,1\sin^2\alpha + \cos^2\alpha}, \quad (1.15)$$

kus ρ on ristkihtpuidu tihedus, kg/m³;

d - kinnituselemendi läbimõõt, mm;

α - nurk jõu mõjumissuuna ja väliskihi pikikiu vahel kraadides.

Valemi 1.15 uuritavate tunnuste vahelise seose korrelatsioonikordaja (r) on 0,75.

Teise valemi (vt valem 1.16) puhul sõltub muljumistugevus lisaks veel ka risti ja piki paiknevate lamellide omavahelisest suhtest.

$$f_{h,pred,2} = 0,032(1 - 0,015d)\rho^{1,20} \left[\frac{\sum_{i=1}^n t_{0,i}}{t(1,6\sin^2\alpha + \cos^2\alpha)} + \frac{\sum_{i=1}^n t_{90,j}}{t(1,6\sin^2\alpha + \cos^2\alpha)} \right], \quad (1.16)$$

kus $\sum_{i=1}^n t_{0,i}$ on väliskihiga samasuunaliste lamellide paksuste summa, mm;

$\sum_{i=1}^n t_{90,j}$ - väliskihiga risti olevate lamellide paksuste summa, mm.

Valemi 1.16 uuritavate tunnuste vahelise seose korrelatsioonikordaja on 0,77.

Tuletatud valemid kehtivad järgnevatel tingimustel:

- ühe kihi maksimaalne paksus on 40 mm;
- risti ja piki paiknevate kihtide suhe peab jääma vahemikku 0,95 kuni 2,1.

Kuna Eurokoodeks ristkihtpuidu muljumistugevuse väärtusi ei kajasta, on Blaß'i valemid aluseks enamikes ristkihtpuidu tootjate tehnilises vastavusdeklaratsioonis.

1.4 Muljumistugevust mõjutavad tegurid

1.4.1 Puidu niiskus

Puidu niiskuseks nimetatakse seal leiduvat vett väljendatuna protsentides tema massist. Niiskusmuutused põhjustavad puidus alati kahanemist ja paisumist, mistõttu muutuvad ka tema tugevus- ja elastsusomadused. [22] Puidukiudusid siduv ligniin, mis töötab nagu liim,

on seda tugevam, mida kuivem on puit, ja seda suurem on vastupanu välisjõududele [23]. Keskmiselt vähendab üheprotsendiline niiskuse tõus elastsusmooduli väärtust 1% võrra ja survetugevuse väärtust pikikiudu 3% võrra. Puidu tugevusomaduste omavahel võrdlemiseks taandatakse puidu niiskus 12% juurde [24].

1.4.2 Puidu tihedus

Puidu tiheduse all mõeldakse ühe mahuühiku massi loomulikus olekus [25]. Kuna niiskuse muutumisel muutuvad puidu mõõtmed kui ka kaal ja sellest tulenevalt ka tihedus, peab tiheduse määramiseks määrama ka puidu niiskussisalduse. Vastavalt standarditele määratakse puidu tihedus 12% niiskuse juures. [22]

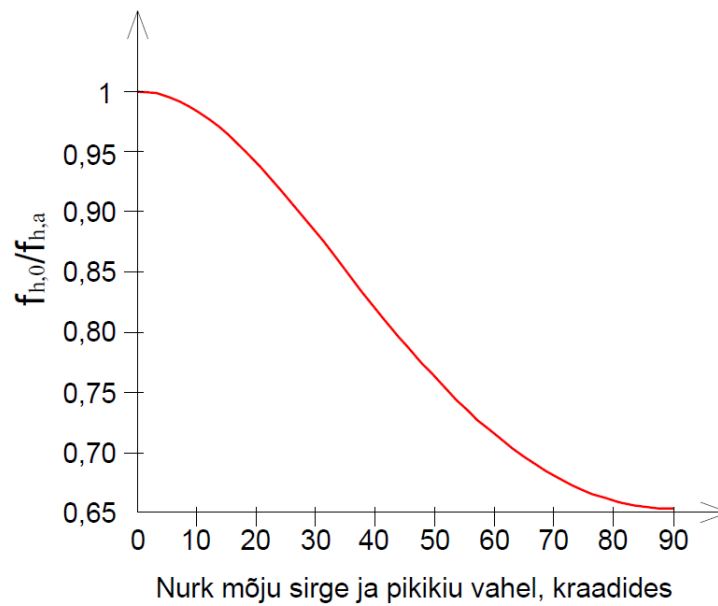
Puidu tiheduse mõju muljumistugevusele on uuritud katseliselt mitmete teadlaste poolt. Ehlbeck ja Werner on leidnud, et sõltumata puidu liigist on tiheduse ja muljumistugevuse vahel lineaarne seos [26]. Mida tihedam on puidu struktuur, seda suurem on muljumistugevus. Hübner, Bogensberger, Schickhofer leidsid enda uurimustöö tulemusena, et lehtpuidu korral ei kasva puidu muljumistugevus tiheduse kasvades lineaarselt, vaid eksponentsiaalselt, kus tiheduse astendaja on 1,3 [27].

Eurokoodeks 5 kasutab Ehlbeck'i ja Werner'i poolt tuletatud valemit, mille järgi kasvab muljumistugevus tiheduse kasvades lineaarselt.

1.4.3 Nurk mõju sirge ja pikikiu vahel

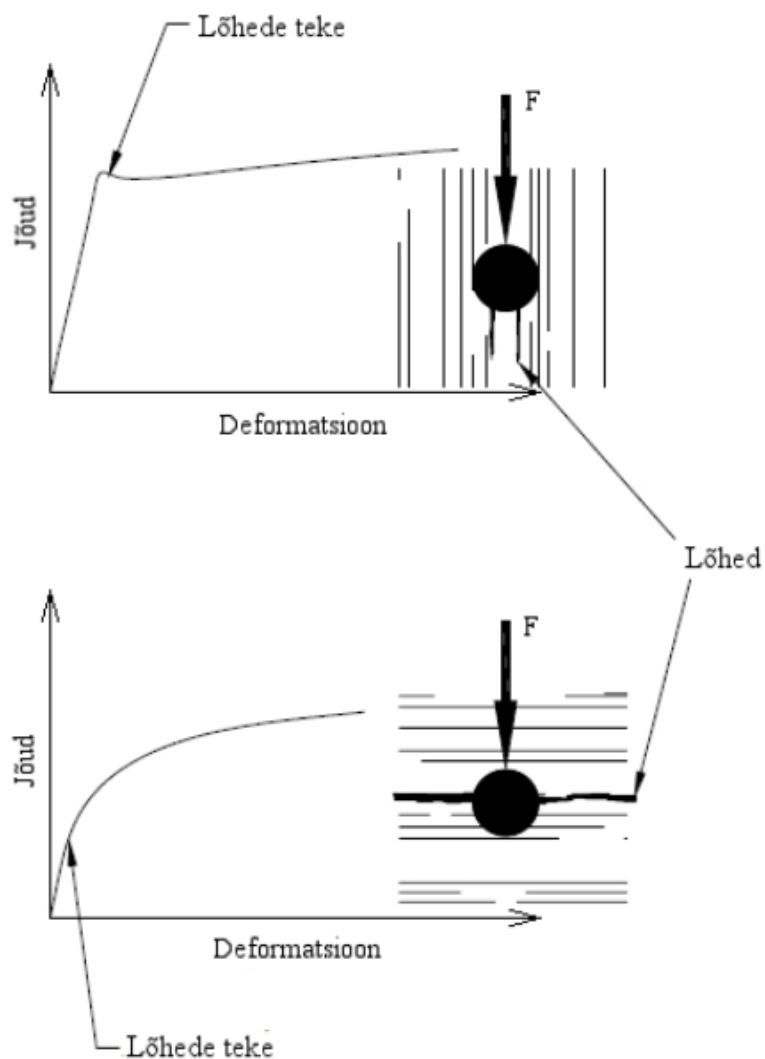
Puidu struktuuri anisotroopsusest tingituna sõltub selle tugevus jõu mõjumise suunast kiudude suhtes. Jõu mõjumisel pikikiudu on puitmaterjal tugevam kui jõu mõjumisel kiududega risti. Puitmaterjali survetugevus väheneb mõjuva jõu suuna ja pikikiu vahelise nurga suurenemisega. [8]

Joonisel 1.15 esitatud graafikul on välja toodud jõu mõjumise suuna ja pikikiu vahelise nurga muutumise mõju muljumistugevusele. Näiteks 45-kraadise nurga puhul on puitmaterjali muljumistugevuse väärtus 78% muljumistugevuse väärtusest jõu mõjumisel pikikiudu ja 90-kraadise nurga all 65%.



Joonis 1.15. Muljumistugevuse muutus nurga suurenedes 12 mm läbimõõdu korral, kus $f_{h,0}$ on muljumistugevuse väärtus pikikiudu ja $f_{h,\alpha}$ muljumistugevuse väärtus nurga α korral

Sõltuvalt jõu mõjumise suunast töötab puit muljumisele väga erinevalt. Joonisel 1.16 on esitatud puidu deformatsioonide arenemise graafikud. Koormuse kasvades pikikiudu suurenevad siirded lineaarselt, kuni pragude tekkimiseni, mille tagajärjel toimub jõu langus. Lõhed tekivad puitu alles maksimaalse jõu juures. Ristikiudu on puit plastne ja hästi kokku surutav. Koormuse mõjudes ristikiudu on muljumistugevuse deformatsioonide graafiku lineaarne lõik lühike. Praod tekivad puitu varases koormamise faasis ja edasine deformatsioonide areng ei toimu lineaarselt. Olenemata jõu mõjumise suunast tekivad lõhed puitu alati pikikiudu.



Joonis 1.16. Puidu deformatsioonide arenemise graafikud, kus ülemine joonis illustreerib deformatsioone jõu mõjumisel pikikiudu ja alumine deformatsioone jõu mõjumisel ristikiudu [15]

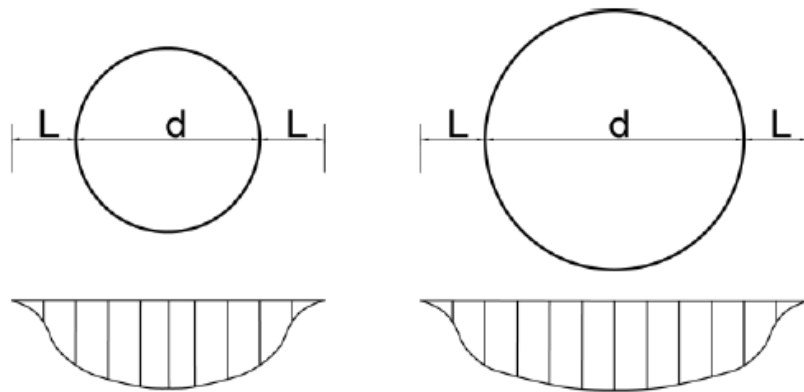
1.4.4 Naagli läbimõõt

Muljumistugevus on leitav valemiga:

$$f_{h,0,k} = 0,082(1 - 0,01d)\rho_k. \quad (1.10)$$

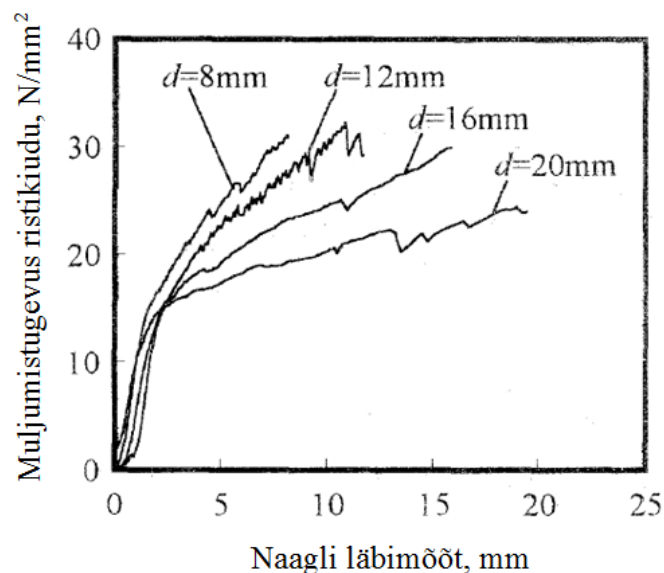
Valemist tulenevalt muljumistugevus suureneb tiheduse kasvades ja väheneb naagli diameetri suurenedes. Muljumistugevuse langus naagli diameetri suurenemisel tuleneb asjaolust, et naagli muljumisel hakkavad tööle ka puuraugu äärmised kiud, mis on joonisel 1.17 kujutatud tsoonis L. Kaasa töötava osa laius ei sõltu naagli diameetrist. Sellest

tulenevalt, suurendades naagli diameetrit väheneb suhe L / d ja seoses sellega väheneb muljumistugevus. [14]



Joonis 1.17. Naagli diameetri erinevusest tekkivad survepinged [28]

Joonisel 1.18 on toodud muljumistugevused jõu mõjumisel ristikiudu samade tihedusnäitajate juures. Katsed tehti nelja erineva diameetriga naaglitega. Selgelt eristub, et 8 ja 12 mm naaglite korral on muljumistugevus suurem kui 16 ja 20 mm naaglite korral. Kui 8 mm naagli maksimaalne muljumistugevus on $\sim 30 \text{ N/mm}^2$, siis 20 mm naagli korral on see ligikaudu 5 N/mm^2 võrra väiksem.



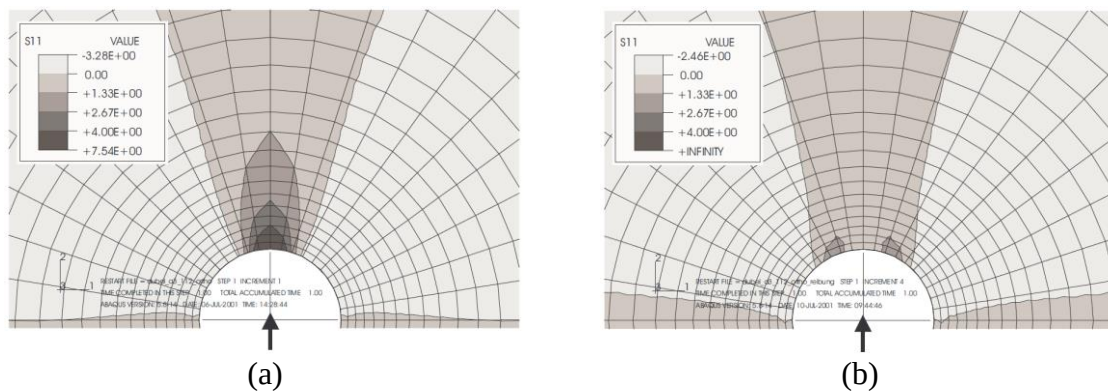
Joonis 1.18. Muljumistugevuse väärtused ristikiudu erinevate naagli läbimõõtude korral [29]

Eeltoodu põhjal võib järeldada, et otstarbekam on liide projekteerida töötama paljude väiksemate naaglitega.

1.4.5 Naagli karedus

Muljumistugevus on mõjutatud naagli pinna karedusest. Naagli pinna karedus suurendab muljumistugevust ja muudab tekkivate pragude iseloomu, mistõttu muutub liide rabedamaks. [19]

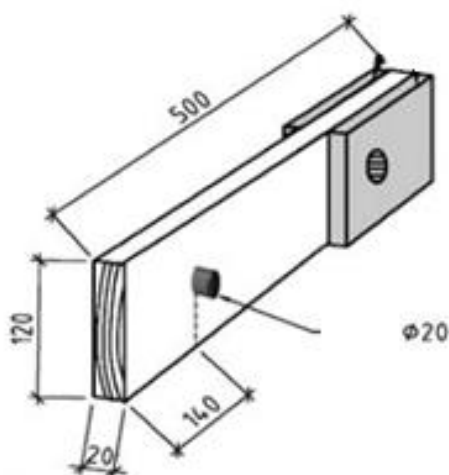
Sõltuvalt naagli pinna karedusest on puidus tekkivad sisepinged erinevad. Martin Schmid uuris oma doktoritöös lõplike elementide meetodiga puidus tekkivaid pingeid erinevate naagli kareduste korral (vt joonis 1.19) [30].



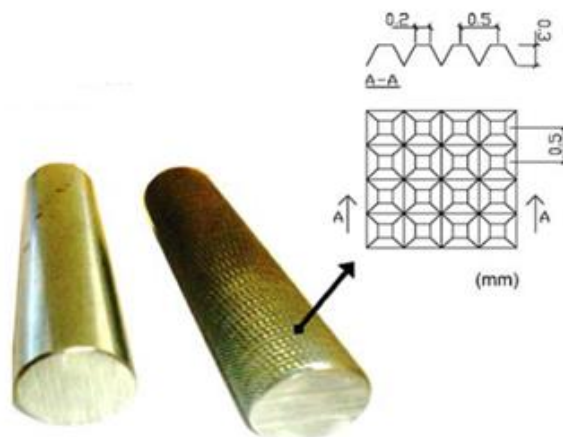
Joonis 1.19. Naagli ümber tekkivad pinged lõplike elementide meetodiga, kus joonis a) illustreerib puidus tekkivaid sisepingeid hõõrdeteguri $\mu=0,0$ korral ja b) sisepingeid hõõrdeteguri $\mu=0,339$ korral [30]

Järeldustes toodi välja, et naaglil hõõrdeteguriga $\mu=0,339$ on pingete jaotus ühtlasem kui ideaalselt sileda naagli puhul. Puidu ja naagli kokkupuute pinna pinged on jagatud laiemale alale. Sileda naagli korral tekivad kõige suuremad pinged vahetult naagli all, kuid suurema hõõrdeteguriga naagli puhul jaguneb suurima pingega ala kaheks, mis omakorda veelgi ühtlustab muljumispingeid.

Naagli pinna kareduse mõju muljumistugevusele on täpsemalt uurinud ka J. Sjödin, E. Serrano ja B. Enquist. Nende töö eesmärk oli katseliselt uurida naagli kareduse mõju naageltüüpi liites. Katseskeem ja katsekeha mõõdud on täpsemalt toodud joonisel 1.20. Katsetati kahte tüüpi naagliga (vt joonis 1.21), millest naagel hõõrdeteguriga 0,1 loeti siledaks ja hõõrdeteguriga 0,4 karedaks. [31]



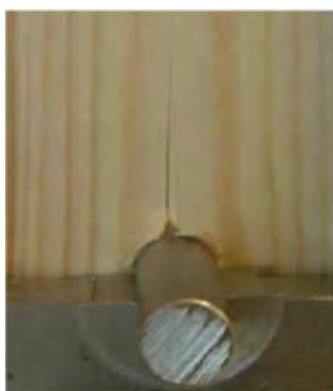
Joonis 1.20. Sjödin *et al.* uuringu katseskeem [31]



Joonis 1.21 Sile naagel (vasakpoolne) ja kare naagel (parempoolne) [31]

Katse tulemustest selgus, et kareda naagli korral on keskmine purustav jõud 44% suurem sileda naagli purustavast jõust, vastavalt 19,1 kN ja 13,3 kN. Samuti erines oluliselt katsetulemuste varieeruvus. Kareda naagli korral olid tulemused ühtlasemad kui sileda naagli korral. Variatsioonikoefitsiendid olid vastavalt 0,4% kareda naagli korral ja 7,6% sileda naagli korral. [31]

Kahe naagli pinnatüübi vahel oli põhimõtteline purunemisviiside erinevus. Siledama naagli korral katsekeha lõhenes ning enne seda tekkis hoiatav pragu (vt joonis 1.22), mis andis märku kohe saabuvast purunemisest. Karedama naagli korral suruti katsekehast tükk välja (vt joonis 1.23). Purunemine toimus järsku ning enne purunemist ei esinenud naagli ümber pragusid. [31]

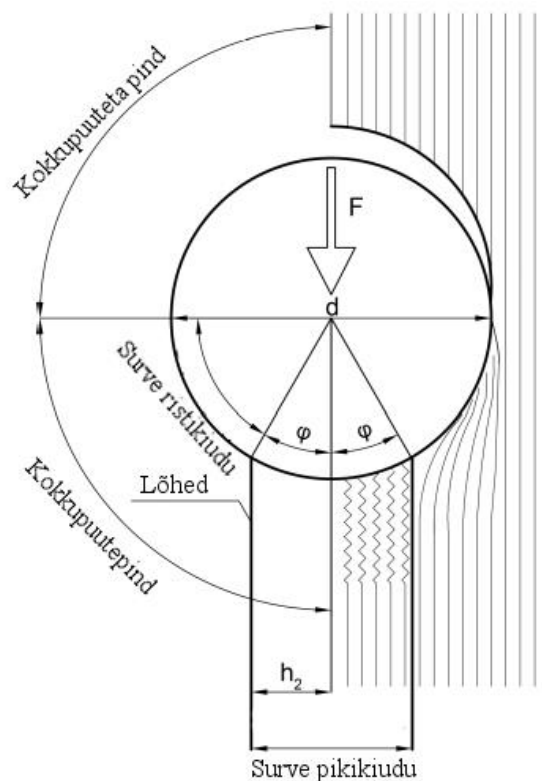


Joonis 1.22. Sileda naagli tüüpiline purunemispilt, kus vasakpoolne joonisel on katsekeha vahetult enne purunemist ja parempoolsel katsekeha vahetult pärast purunemist [31]



Joonis 1.23. Kareda naagli tüüpiline purunemispilt, kus vasakpoolsel joonisel on katsekeha vahetult enne purunemist ja parempoolsel katsekeha vahetult pärast purunemist [31]

Eelnevad purunemisviisid on seletatavad joonise 1.24 põhjal, mis iseloomustab puidus tekkivaid deformatsioone naagli muljumisest. Selle järgi jaguneb puitpind kaheks: kokkupuutepind, mis naagli koormamisel satub otseselt kontakti ja kokkupuuteta pind, mis jõu mõjumisel kaotab naagliga kokkupuute. Kokkupuutepind jaguneb omakorda kaheks: esiteks alaks, kus puidu kiud satuvad survetsooni ja nad purunevad ning teiseks alaks, kus puitkiud lükatakse naagli poolt külgedele ja tekib olukord, kus nad töötavad muljumisele ristikiudu.



Joonis 1.24. Naagli muljumisest tekkivad deformatsioonid puidus [28]

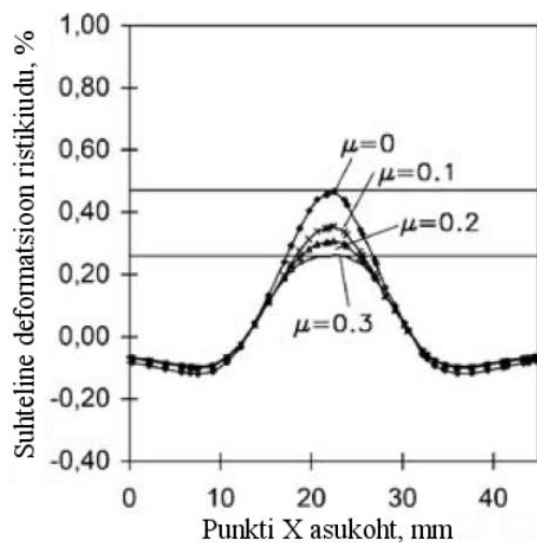
Mida suurem on hõõrdetegur μ , seda suurem on surveala iseloomustav hõõrdenurk φ ja seda väiksem on võimalus, et puit puruneb lõhestumisele. Mida väiksem on nurk φ , seda rohkem lükatakse puidu kiude külgedele, mis põhjustab puidu lõhenemise madalate jõudude juures. Eeldatakse, et ideaalselt sileda naagli korral on hõõrdenurk 0 kraadi. [15]

Tabelis 1.4 on esitatud erinevate pinnakatete korral hõõrdenurgad.

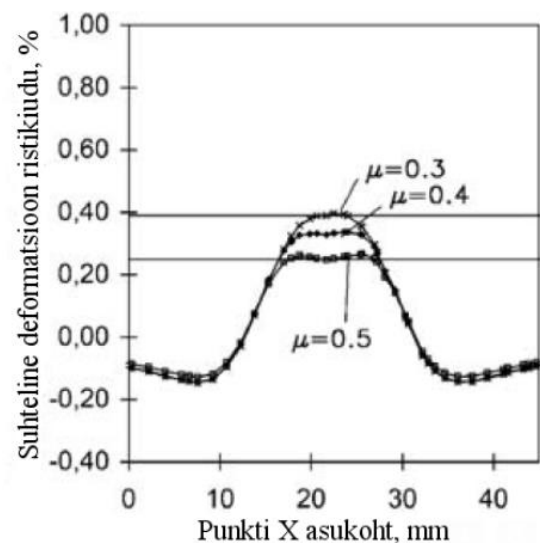
Tabel 1.4. Erinevate pinnatüüpidega terasnaaglite hõõrdetegurid ja -nurgad [30]

	Hõõrdetegur μ	Hõõrdenurk φ
Karestatud pinnaga terasnaagel	0,585	30°
Sileda pinnaga terasnaagel	0,339	19°
Plastikuga kaetud terasnaagel	0,123	7°

Katsete tulemused näitasid, et kui hõõrdetegur on vahemikus 0...0,3, siis on purunemisviis sarnane sileda naagli purunemisviisile ja hõõrdeteguriga vahemikus 0,3...0,5 naaglite korral on purunemisviis sarnane kareda naagli purunemisviisile. Seda illustreerivad joonised 1.25 ja 1.26. Mõõtmised on tehtud 10 mm kauguselt koormatud naagli servast.



Joonis 1.25. Puidus tekkivad sisepinged hõõrdeteguri 0...0,3 korral [31]

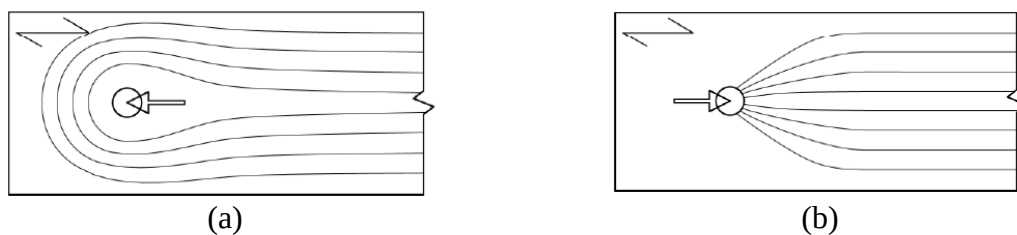


Joonis 1.26. Puidus tekkivad sisepinged hõõrdeteguri 0.3...0,5 korral [31]

Kuigi puidu ja naagli vahelise hõõrdenurga vahel on ilmselge seos, ei võeta selle mõju liite projekteerimisel arvesse. Kindlasti omab see teadmine aga tähtsust muljumiskatsete tulemuste tõlgendamise seisukohast.

1.4.6 Tõmbe- ja survekatsetest tekkivate sisepingete võrdlus

Tõmbe- ja survekatsetel on puidus tekkivad pinged väga erineva iseloomuga (vt joonis 1.27). Tõmbejõu korral tekivad pinged augu ümber, mille tulemusena tekivad ka puidu kiududega ristuvad tõmbepinged. Survejõu korral võtavad pinged koheselt pikikiuga sama suuna.



Joonis 1.27. Naagli muljumisest tekkivad pingete trajektooriid, kus joonis a) iseloomustab tõmbekatte suurimate pingete trajektooriid ja b) survekatse suurimate pingete trajektooriid [28]

Johanna Hohenwarter uuris enda magistr töö, kas tõmbe- ja survekatsetel erineb vastuvõetav jõud erineva pingejaotuse pärast. Katsete tulemusena selgus, et muljumistugevusele ei ole olulist mõju sellest, kas viiakse läbi tõmbe- või survekatseid. [19]

Eurokoodeks 5 ei võta muljumistugevuse arvutamisel arvesse, kas tegemist on tõmbe- või survekatsega.

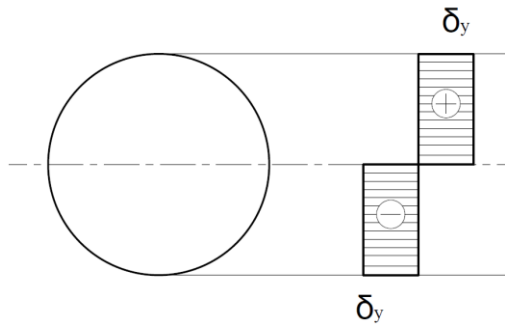
1.5 Kinnituselemendi voolavuspiirile vastav paindemoment

Lisaks muljumistugevusele mõjutab liite kandevõimet kinnituselemendi voolavuspiirile vastav paindemoment, mille puhul eeldatakse, et naaglis areneb välja plastne liigend. Teoreetiliselt tuletatud plastse liigendi puhul eeldatakse, et terve naagli ristlõike ulatuses on terase voolavuspiir ületatud (vt joonis 1.28). Sellises olukorras omab paindemoment suurimat väärtust, mida ristlõige on võimeline vastu võtma. Vastava väärtuse saab leida valemiga:

$$M_{y,pl} = \frac{f_y d^3}{6}, \quad (1.17)$$

kus f_y on naagli voolavuspiir, N/mm²;

d – naagli läbimõõt, mm.



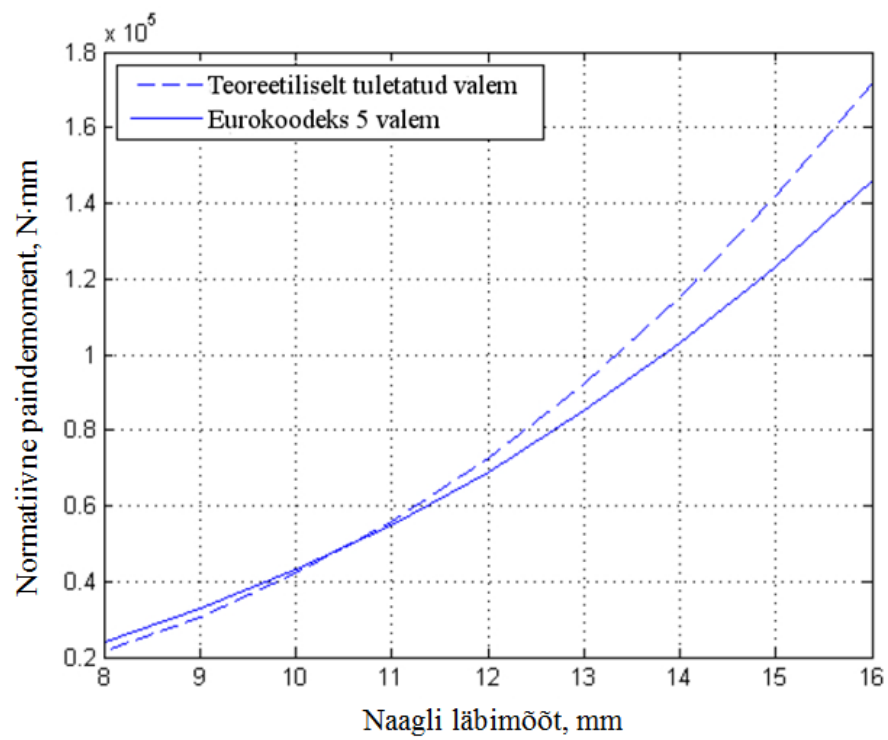
Joonis 1.28. Plastset liigendit iseloomustav pingejaotus ümarristlõike korral

Praktika näitab, et liites ei arene plastne liigend lõpuni välja ning seetõttu ei saa teoreetilist väärtust arvutamisel kasutada. Voolavuspiirile vastava paindemomendi väärtuse saab määrata nelja punkti katsega vastavalt standardile EN 409:2009 [32]. Eurokoodeks 5 on katsete alusel tuletatud voolavuspiirile vastav paindemomendi väärtus tuletatud valemiga

$$M_{y,Rk} = 0,3f_{u,k}d^{2,6}, \quad (1.18)$$

kus $f_{u,k}$ on naagli normatiivne tõmbetugevus, N/mm².

Võrreldes omavahel valemeid 1.17 ja 1.18 selgub, et Eurokoodeksi valemis leitakse paindemoment kinnituselemendi tõmbetugevuse järgi, kuid teoreetiliselt tuletatud valemis voolavuspiiri järgi. Joonisel 1.29 on graafiliselt kujutatud nende kahe valemi väärtuseid sama naagli diameetri juures. Graafikult selgub, et väiksemate diameetritega kinnituselementide korral ei ole olulisi erinevusi naagli paindemomendi väärtuses. Suuremate kui 12 mm naagli diameetrite puhul annab teoreetiliselt tuletatud valem mõnevõrra suurema tulemuse võrreldes Eurokoodeksi valemiga. See tähendab, et Eurokoodeks 5 valemi tulemus on tagavara kasuks.

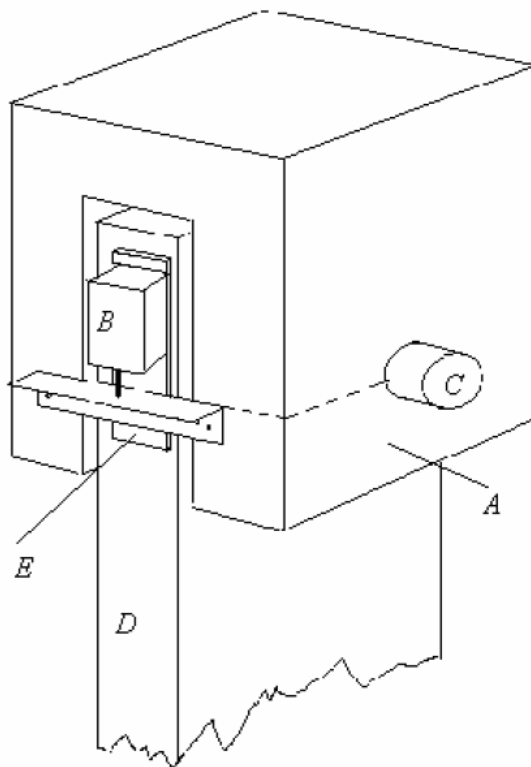


Joonis 1.29. Eurokoodeks 5 ja teoreetiliselt tuletatud valemite paindemomentide väärtuste võrdlus ($f_{u,k} = 360 \text{ N/mm}^2$, $f_{y,k} = 0,7f_{u,k}$) [28]

2. UURIMUSMATERJAL JA METOODIKA

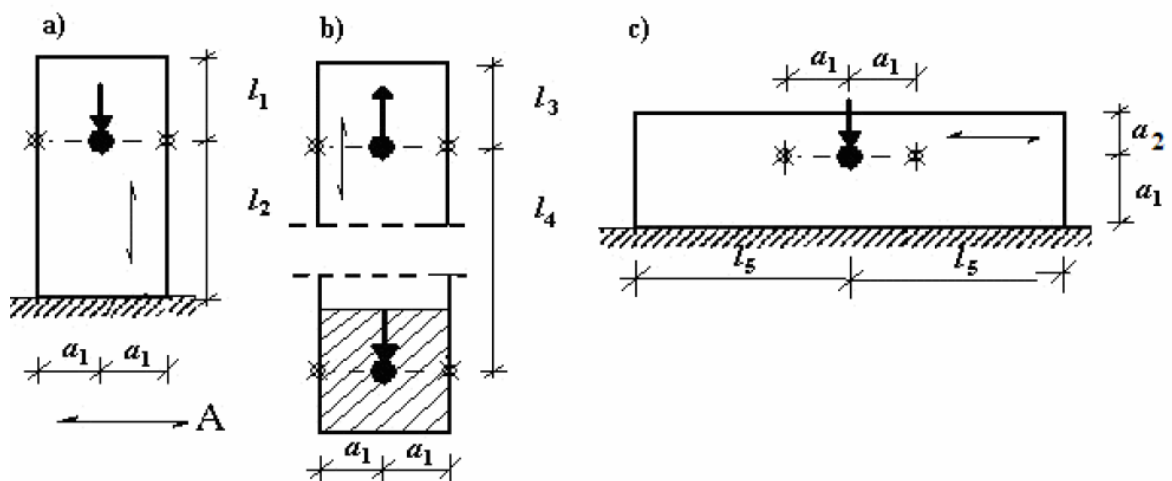
2.1 Katsemetoodika

Katse teostatakse vastavalt kehtivale standardile EVS-EN 383-2007, mis esitab meetodi puidu muljumistugevuse määramiseks [3]. Katse käigus koormatakse katsekeha terasnaagliga läbi katserakise (vt joonis 2.1). Katsekeha ääritingimused on toodud joonisel 2.2.



- A – terasrakis;
- B – siirde mõõteseade;
- C – terasnaagel;
- D – katsekeha;
- E – abiliist siirde mõõtmiseks.

Joonis 2.1. Katseskeem [3]



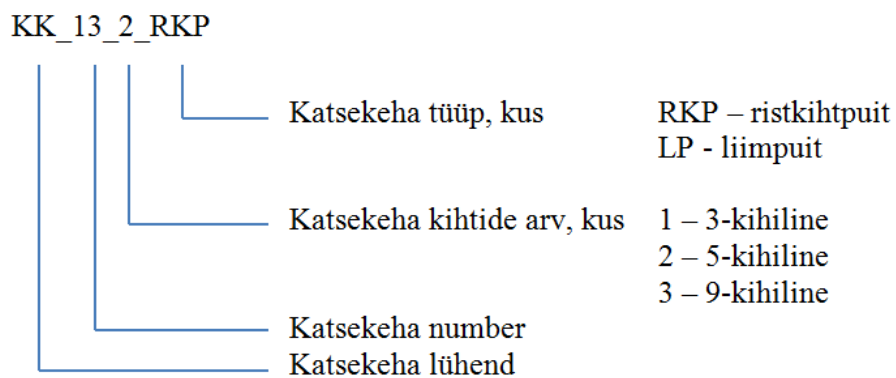
A – pikikiu suund, $\otimes$ - Siirde mõõtmise mõõtepunkt

Joonis 2.2. Katsekehade ääritingimuste nõuded, kus a) survekatse pikikiudu, b) tõmbekatse pikikiudu, c) survekatse ristikiudu [3]

2.2 Katsekehad

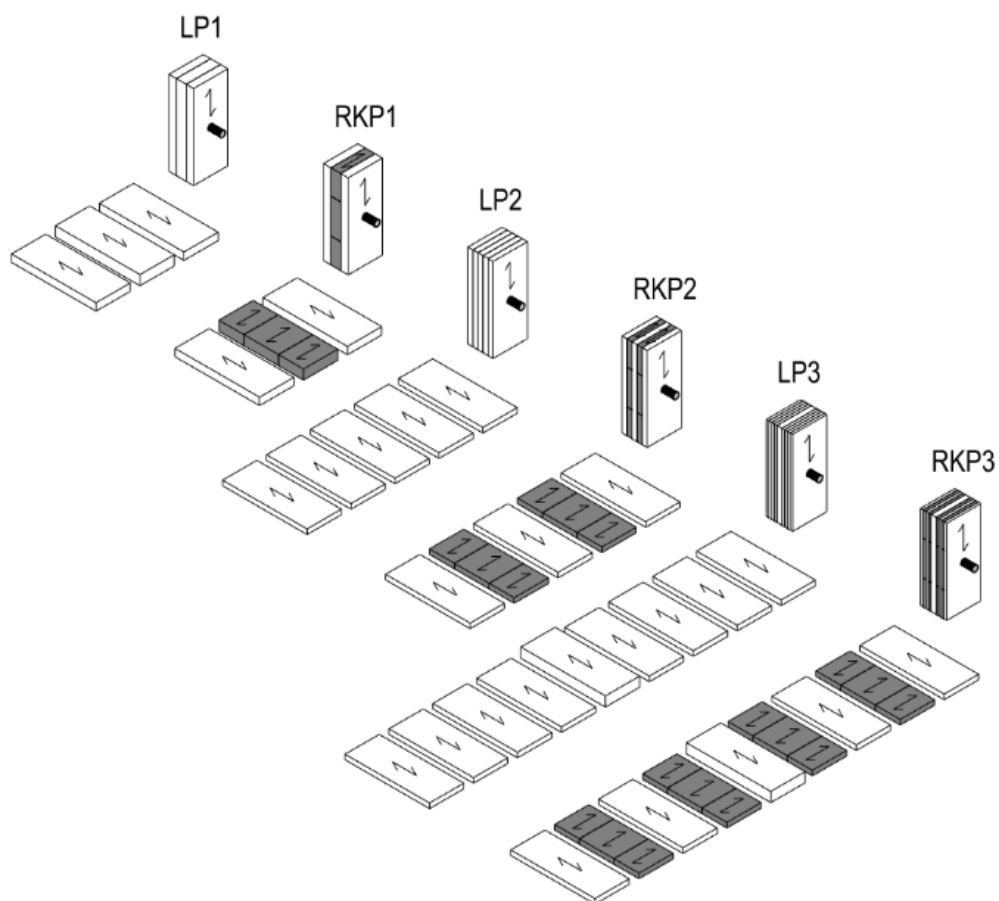
2.2.1 Katsekehade üldandmed

Joonisel 2.3 on esitatud katsekehade tähistused. Katsekehad jaotati kahte gruppi: ristkihtpuitkatsekehad (RKP) ja liimpuitkatsekehad (LP), mis omakorda jagunesid kolme rühma (3-kihilised, 5-kihilised ja 9-kihilised katsekehad).

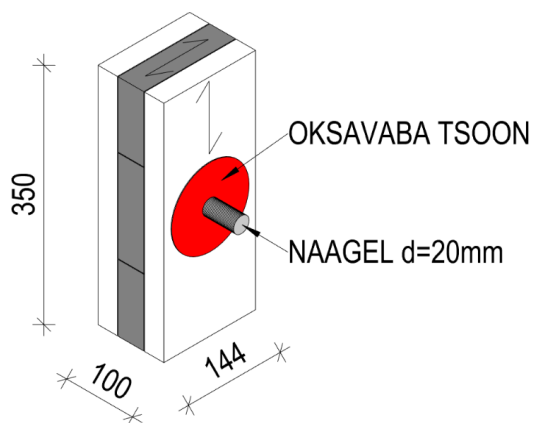


Joonis 2.3. Katsekeha tähiste tähendused

Magistritöös katsetati kuut erinevat tüüpi katsekeha (vt joonis 2.4), mis valmistati kuusepuust. Igasse rühma kuulus 21 katsekeha, millest 20 katset võeti tulemustes arvesse ja üks tehti leidmaks eeldatavat maksimumjõudu. Katsekeha mõõdud ja andmed on toodud tabelis 2.1, joonisel 2.5 ja lisas 1.



Joonis 2.4. Katsekehade skeemid



Joonis 2.5. Katsekeha skeem

Tabel 2.1. Katsekehade andmed

Grupp	Rühm	Lamellide arv	Piki- ja ristikiudude suhe	Lamellide paksused, mm
RKP	RKP1	3	1,5	30-40-30
	RKP2	5	1,5	20-20-20-20-20
	RKP3	9	1,5	10-10-10-10-20-10-10-10-10
LP	LP1	3	-	30-40-30
	LP2	5	-	20-20-20-20-20
	LP3	9	-	10-10-10-10-20-10-10-10-10

Antud töö katsekehade mõõdud ei vasta täpselt standardis EVS-EN 383:2007 nõutavatele mõõtudele. Tabelis 2.2 on välja toodud katsekeha mõõtude erinevused.

Tabel 2.2. Katsekeha mõõtmete erinevused standardi mõõtudest

Mõõtmed (vt. Joonis 2.2)	Standardis toodud katsekeha suurused	Antud töös katsekeha suurus	Katsekeha materjal
a ₁	3d	3,6d	Puit või puidupõhised plaatmaterjalid
l ₁	7d	8,75d	
l ₂	7d	8,75d	
l ₃	7d	8,75d	

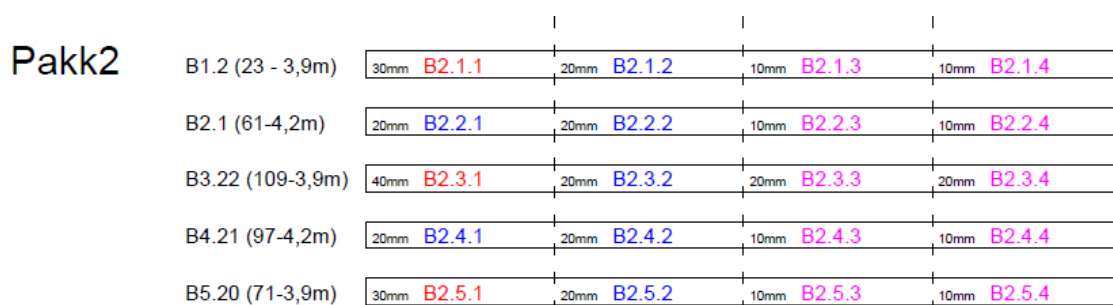
Vastavalt standardis toodud soovitusel, peaks katsekeha paksus jääma vahemikku 1,5 kuni 4d, mis välistaks naagli deformeerumise ja tagaks, et katse käigus toimuks ainult muljumine. Käesolevas töös on katsekeha paksus võrdne 5d. Kuna naaglina kasutati katsetes terasnaaglit tugevusklassiga 12.9, mis on üldkasutatavatest naaglitest kaks korda tugevam, siis antud soovituse rikkumine ei rikkunud katseskeemi põhimõtet. Samuti kasutati kõikide katsete puhul sama naaglit. Sellest tulenevalt võib eeldada, et pingeaotus naagli all kõikidele katsekeha lamellidele ühtlane. Lisaks kontrolliti eelnevalt arvutuslikult, milline purunemisviis saab määravaks (vt lisa 2).

Selleks, et ristkihtpuitkatsekehade katsetulemused ei oleks mõjutatud erinevast piki- ja ristikihtide suhtest projekteeriti katsekehad nii, et see suhe jääb kõigis katsekehades võrdseks. Magistritöös on kõikidel ristkihtpuidust katsekehadel 60% lamellidest pikikiudu ja 40% lamellidest ristikiudu.

2.2.2 Katsekehade valmistamine

Katsekehade valmistamisel lähtuti liimpuidu ja ristkihtpuidu nõuete standarditest EVS-EN 14080:2013 [4] ja prEN16351 [5].

Peetri Puit OÜ-st saadud puitmaterjali ristlõige oli 45 x 145mm, pikkused varieerusid 3,6...4,2 meetrini. 26.11.2014 nummerdati prussid, kaaluti elektrilise kaaluga (täpsusklass 10 g) ja mõõdeti keskmine niiskussisaldus elektromagnetilise niiskumõõtjaga *FMW moisture detector*. Saadud tulemuse kaudu teisendati materjali mahukaal 12% niiskuse peale ja jagati lauad viie kaupa pakkidesse nii, et pakkide omavaheline keskmine tihedus ei erinenud üle 5%. Prussid hõõveldati vajalikku mõõtu Peetri Puit OÜ-s 02.12.2014. Selleks, et saada võimalikult sarnase tihedusega katsekehad, jagati pruss osadeks selliselt, et see oleks esindatud kõigis katsekeha rühmades (vt joonis 2.6). Pärast hõõveldamist pakiti lamellid kuivamisest tingitud lõhenemise vältimiseks pakkekilesse.



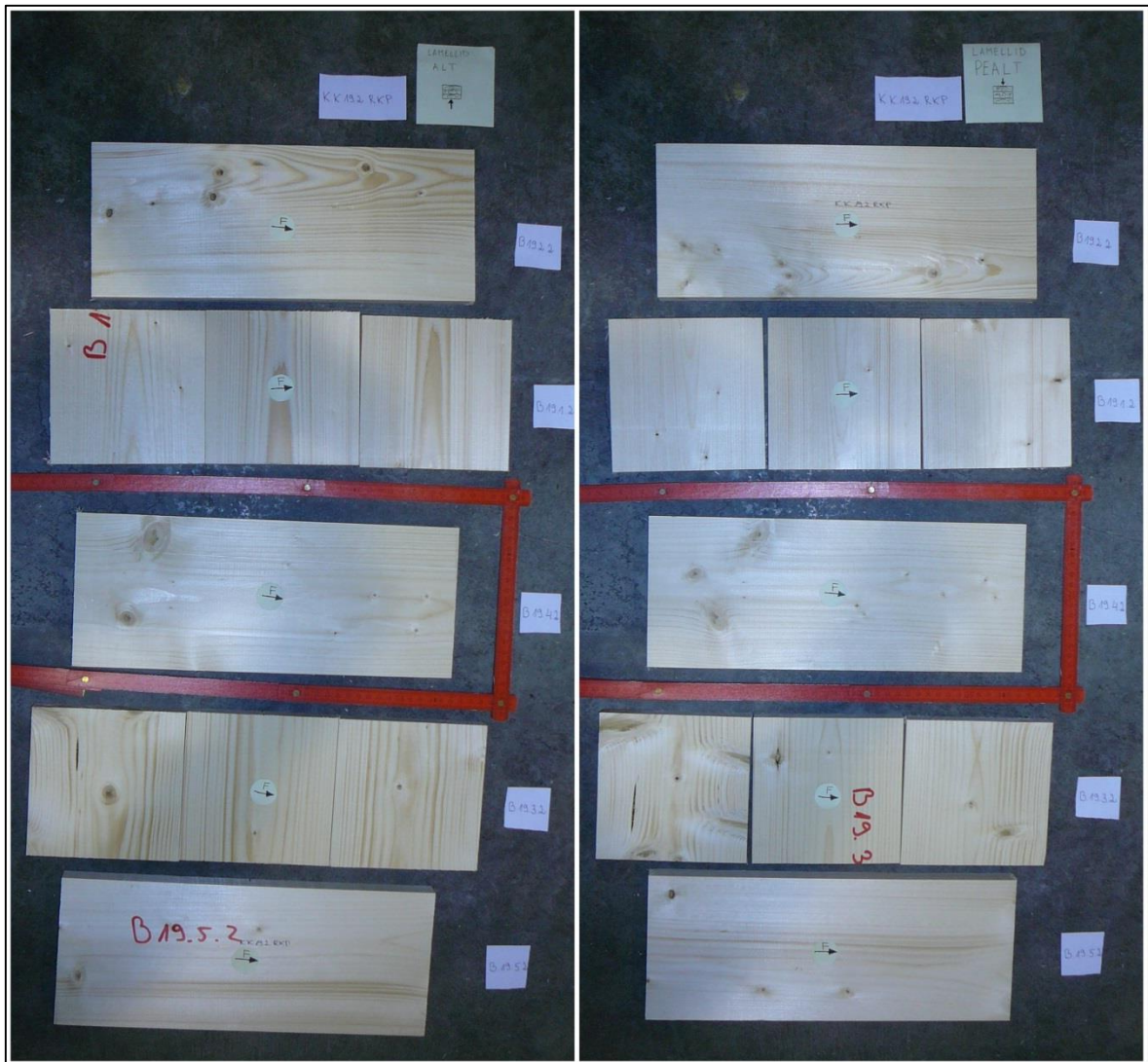
Joonis 2.6. Lamellide hõõveldamise skeem, kus

- B1.2 on prussi number;
- (23-3,9m) - prussi esmane nummerdus ja pikkus;
- 30mm - lamelli paksus;
- B2.1.1 - lamellide nummerdus, kus
 - punast värvi on 3-kihiliste katsekehade lamellid;
 - sinist värvi 5-kihiliste katsekehade lamellid;
 - lillat värvi 9-kihiliste katsekehade lamellid

Katsekehad valmistati ajavahemikul 02.02.2015 kuni 14.02.2015 ettevõttes Puit-Profiil AS. Esimese etapina lõigati lamellid sobivasse mõõtu. Seejuures jälgiti, et katsekeha keskele naagli muljumiskoha ümber jääks vähemalt kolme naagli diameetri ulatuses

oksakohtade, vaigukanalite ja muude defektide vaba ala (vt joonis 2.4), välistamaks nende mõju katsetulemustele.

Enne katsekehade liimimist pildistati lamelle mõlemalt poolt (vt joonis 2.7), mis võimaldab hilisemas faasis paremini tulemusi analüüsida ja vajaduse korral vaadata iga lamelli okste asukohta ja suurust. Selleks, et oleks võimalik tuvastada lamelli päritolu ja seotus konkreetse katsekehaga, tehti skeem lamellide paiknemisest (vt lisa 3).



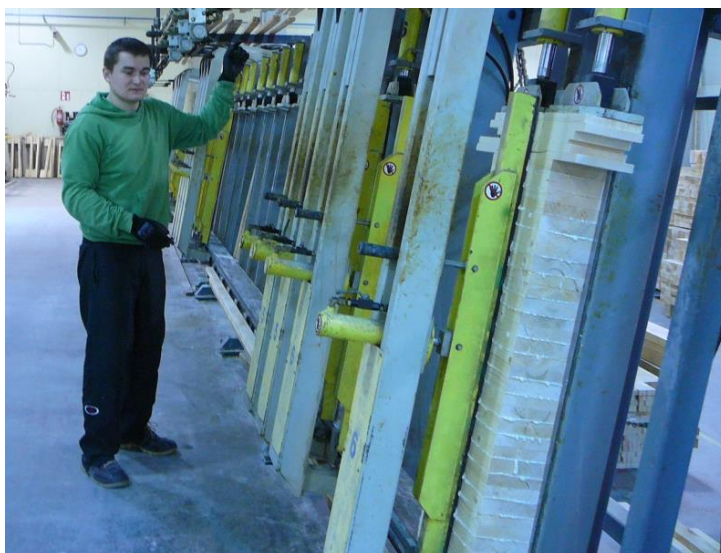
Joonis 2.7. 9-kihilise ristkihtpuitkatsekeha lamellid

Katsekehad liimiti ühekomponentse polüüretaanliimiga Purbond HB S209. Enne liimi pealekandmist puhastati lamellid tolmust ja niisutati. Pealekantava liimi kulu jäi vahemikku 140...180 g/m². Survestamiseks kasutatud Trimwex pressidega (vt joonis 2.8)

anti liimitavatele katsekehadele surve $0,8 \text{ N/mm}^2$. Ruumi keskmine temperatuur ja õhu suhteline niiskus olid katsetamise ajal vastavalt 21°C ning 62%. Liimi pealekandmisest kuni katsekeha survestamiseni ei kulunud rohkem kui 12 minutit ja surve all hoiti neid vähemalt 90 minutit.



(a)



(b)

Joonis 2.8. Katsekehade pressimine

Pärast pressimist puhastati katsekehad ülevõlgsest liimist, kaaluti kalibreeritud kaaluga (täpsus $0,01 \text{ g}$) ning pakendati kilesse.

Erinevate töötappide vahelisteks pausideks, mis kestsid üle 2 tunni, pakendati lamellid ja katsekehad pakkekilesse.

2.3 Katsekehade ettevalmistus katsetamiseks

Katsekehasid hoiti enne katsetamist konstantse massi saavutamiseks staabeldatuna kliimakambris (vt joonis 2.9) suhtelisel õhuniiskusel $65 \pm 2\%$ ja temperatuuril $20 \pm 0,5^\circ\text{C}$. Kui 6-tunnise intervalliga tehtud kaalumise tulemused ei erinenud rohkem kui $0,1\%$, siis loeti katsekehade massi konstantseks. Konstantne mass saavutati 7 ööpäevaga. Katsekehasid hoiti kliimakambris vähemalt 20 ööpäeva.

Naagli augud puuriti katsetamise päeva hommikul (vt joonis 2.10). Kuna katseseade ei asunud kliimakambriga samas ruumis, kiletati katsekehad koheselt kliimakambrist väljavõttes ja pärast katse sooritamist.



Joonis 2.9. Katsekehade hoidmine kliimakambris



Joonis 2.10. Katsekehasse augu puurimine

Vastavalt standardis toodud nõuetele tuli naagel asetada katsekehasse sarnaselt nagu tehakse ehitusel. Puuraugu läbimõõt oli naagli diameetrist 0,05 mm võrra väiksem, mis tähendas, et naagel läks puurauku tihedalt, haamriga kergelt koputades.

2.4 Katseseade

Katsed teostati Tallinna Tehnikaülikooli Mehaanikainstituudi akrediteeritud katselaboris. Koormamisel kasutati kalibreeritud katseseadet *Zwick/Roell Z250* (vt joonis 2.11), siirded mõõdeti kahe HBM elektrilise nihkeanduriga WA10, misjärel leiti nende tulemuste keskmine. Jõu ja nihete andmed viidi kokku mõõteseadmesse *Spyder8* operatsioonitarkvaraga *Catman*. Siirdeid mõõdeti täpsusega $\pm 0,01$ mm, jõudu ± 1 N.



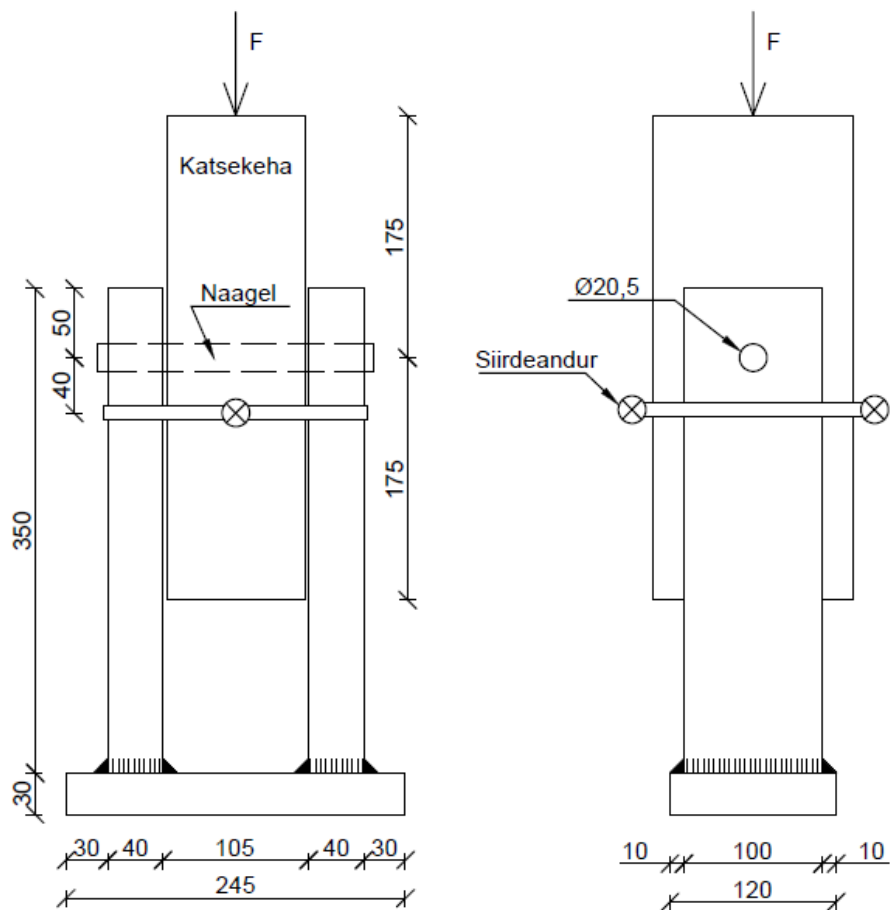
Joonis 2.11. Katseseade Zwick / Roell Z250

Katseseadme andmed vastasid standardis EVS EN 383:2007 toodud nõuetele.

Kuna siiret mõõdeti otseselt katsekeha ja katserakise vahel, ei olnud vajalik määrata katseseadme jäikust.

2.5 Katseskeem

Katse teostati survekatsena. Katserakis valmistati terasest S355. Siirdeandurid paiknesid naagli tsentrist 40 mm allpool, mis erines standardi katseskeemi nõudest paigutada siirdeandurid naagli tsentrisse. Katseskeem on näidatud joonisel 2.12 ja foto katsetamisest on joonisel 2.13.



Joonis 2.12. Katseskeem



Joonis 2.13. Katsekeha katsetamine

2.6 Eeldatav maksimaalne jõud

Eeldatava maksimumjõu ($F_{\max, \text{est}}$) leidmiseks tehti iga katsekeha rühma kohta üks proovikatse, mille tulemused on kajastatud tabelis 2.3. Kuna töö eesmärk on võrrelda ristkihtpuidust ja liimpuidust katsekehasid võrdsetel tingimustel, määrati kõigile katsekehadele sama koormusskeem ja eeldatav maksimumjõud. Eelnevalt arvutuslikult leitud (vt lisa 4) maksimaalne jõud langes hästi kokku proovikatsete tulemustega.

Tabel 2.3. Proovikatsete tulemused

Katsekeha nr.	$F_{\max}$, N
KK_5_1_L	57482
KK_5_1_R	52009
KK_5_2_L	59093
KK_5_2_R	49308
KK_5_3_L	64006
KK_5_3_R	53010

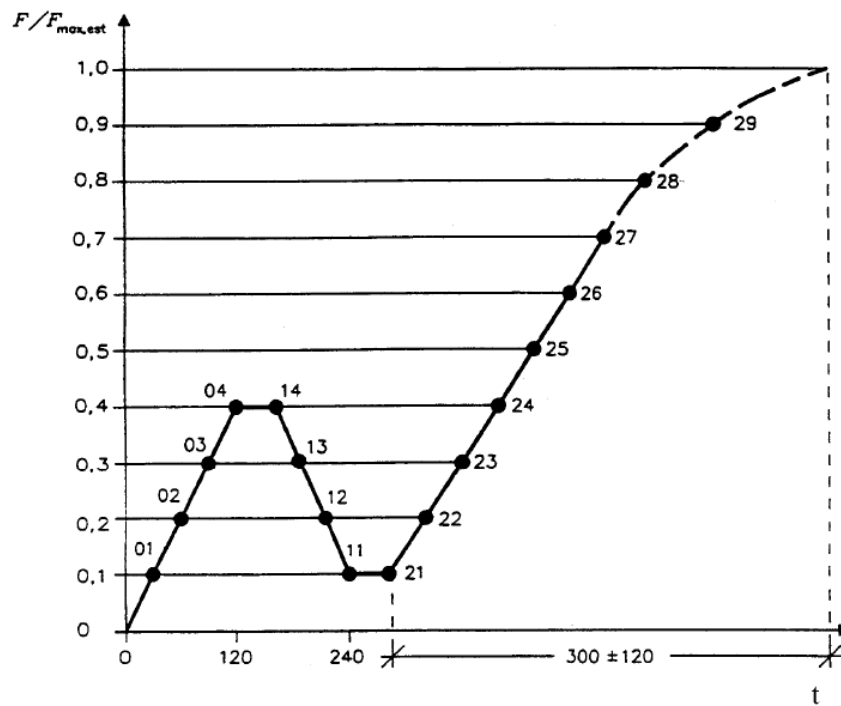
Proovikatsetest tulenevalt võeti eeldatavaks maksimumjõuks $F_{\max, \text{est}}=55$ kN.

2.7 Koormuse rakendamine ja deformatsioonide salvestamine

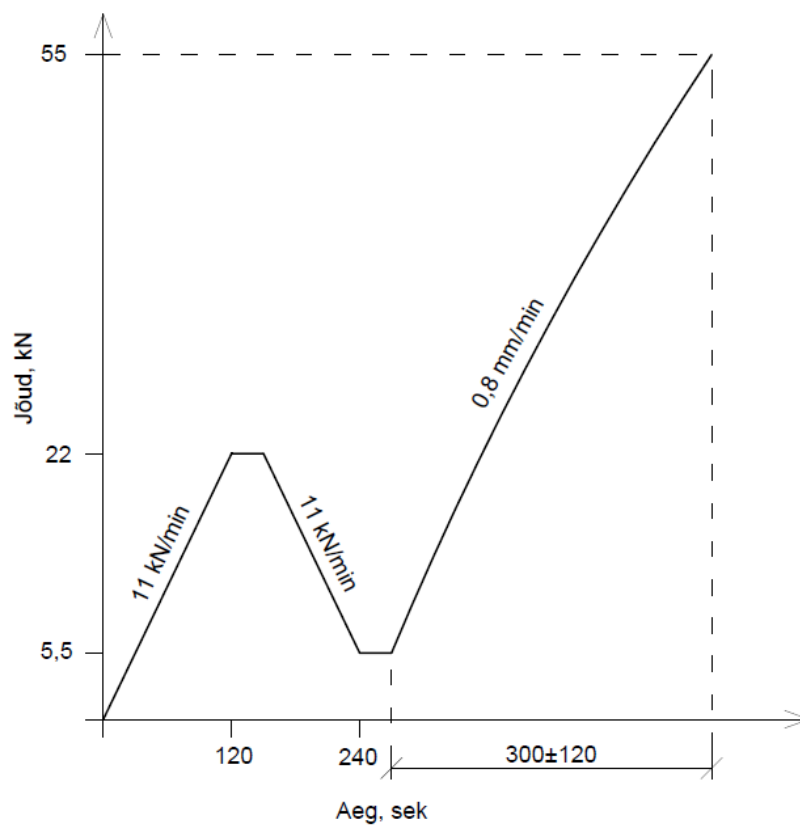
Koormus rakendati vastavalt koormamisprotsessi kirjeldavatele joonistele 2.14 ja 2.15. Eelkoormamise käigus rakendati katsekehale 120 sekundi jooksul 40% eeldatavast maksimumkoormusest ($0,4F_{\max, \text{est}}=22$ kN) kiirusega 11 kN/min. Saavutatud koormust hoiti seejärel 30 sekundi jooksul konstantsena ning langetati seejärel sama kiirusega 5,5 kN-ni, mis oli 10% eeldatavast maksimumkoormusest. Saavutatud koormust hoiti 30 sekundit ning seejärel koormati katsekeha kuni purunemiseni või ettenähtud ajani kiirusega 0,8 mm/min. Katse kestis 1 100 sekundit, mille käigus deformatsioonid arenesid keskmiselt 7,3 mm. Muljumistugevuse arvutamiseks võeti maksimaalne jõud $F_{\max}$ võrdseks kuni 5 mm deformatsioonide tekkimise vahemikus mõjunud suurima jõuga. Deformatsioonide ja koormuse mõõtmine toimus iga 0,1 sekundi järel.

Kuna töö eesmärk oli võrrelda katsekehasid võrdsetel tingimustel, määrati kõigile katsekehadele sama koormusskeem. Maksimumjõud pidi standardi kohaselt saabuma pärast eelkoormamist 300 ± 120 sekundi jooksul, kuid ristkihtpuidu ja liimpuidu

erinevatest omadustest tulenevalt saavutasid liimpuitkatsekehad maksimaalse jõu enne ettenähtud aega ja riskiitpuitkatsekehad pärast ettenähtud aega.



Joonis 2.14. Standardis EVS-EN 383:2007 esitatud koormusskeem

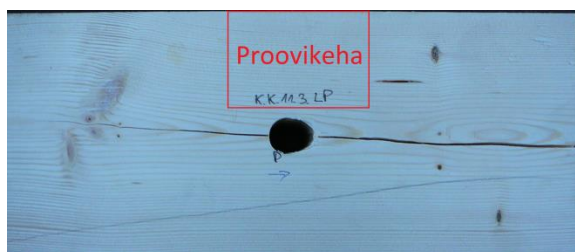


Joonis 2.15. Katse koormusskeem

Ir. P. Vermeyden on analüüsinud koormamist siirde (mm/min) ja koormuse (N/min) järgi ajaühikus. Ta leidis et, katse algfaasis ei ole koormamisviisil olulist mõju tulemustele, kuid lõppfaasis tuleb koormata siirde järgi ajaühikus. Jõu järgi koormates on plastsete deformatsioonide saabudes katset peaaegu võimatu jätkata, sest katsekeha ei võta enam koormust vastu ja puruneb ilma suurte deformatsioonideta. Katse tulemusena ei teki sel juhul analüüsimiseks vajalikku plastset platood. [33]

2.8 Katsekehade tiheduse ja niiskussisalduse määramine

Katsekehade tiheduse ja niiskuse määramiseks lõigati elemendist muljumiskoha lähedalt kõiki lamelle sisaldav okste ja vaigupesadeta proovitükk (vt joonis 2.16). Kõik proovitükid mõõdeti kalibreeritud elektroonilise nihikuga (täpsus $\pm 0,01$ mm) ja kaaluti kalibreeritud elektroonilise kaaluga (täpsus $\pm 0,1$ g) Keskmiselt kaalus proovikeha 251,4 grammi. Vältimaks vaigupesade ja oksakohtade sattumist proovitükki, jälgiti eelnevalt jäädvustatud lamellide pilte, mis võimaldas näha puidu defekte ka katsekeha seesmistes kihtides.



(a) tüüpiline liimpuidu proovikeha



(b) tüüpiline ristkihtpuidu proovikeha

Joonis 2.16. Defektivabast piirkonnast lõigatud tüüpilised proovikehad tiheduse ja niiskuse määramiseks

Niiskussisaldus määrati kuivatusmeetodil lähtudes vastavalt kehtivale standardile EVS-EN 13183-1:2002 täpsusklassiga 0,1% [34].

Kaalutud proovikehad kuivatati kalibreeritud kuivatusahjus 103 ± 2 °C juures ning seejärel mõõdeti absoluutselt kuiva puidu mass. Absoluutselt kuivaks võib nimetada puitu, mille mass ei muutu kahe tunni jooksul rohkem kui 0,1%. Keskmiselt saavutati konstantne mass 17 tunniga. Proovitükke hoiti kuivatuskapis vähemalt 24 tundi.

Puidu veesisaldus (%) on leitav valemiga:

$$\omega = \frac{m_1 - m_0}{m_0} 100, \quad (2.1)$$

kus m_1 on puidu mass katsetamise ajal, g;

m_0 - absoluutselt kuiva puidu mass, g.

Niiskuse määramiseks lõigatud proovitükkide abil leiti vastavalt standardile ISO 13061-2:2014 ka katsekehade tihedus valemiga [35]:

$$\rho = \frac{m}{abh}, \quad (2.2)$$

kus m on katsekehade mass, kg;

a - proovitüki laius, m;

b - proovitüki pikkus, m;

h - proovitüki kõrgus, m.

Mõõdud määrati iga külje viie mõõtmise keskmisena.

2.9 Muljumistugevus

Muljumistugevus leitakse valemiga:

$$f_h = \frac{F_{max}}{dt}, \quad (1.9)$$

kus F_{max} on katsekehale rakendatud maksimaalne koormus, N;

t - katsekeha paksus, mm;

d - naagli diameeter, mm.

Kuigi katse kestis mõnel juhul kauem, võeti kõigile katsekehadele maksimaalseks koormuseks esimese 5 mm deformatsiooni sees esinenud kõige suurem koormus.

2.10 Analüüs

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli välja selgitada kihtide arvu mõju muljumistugevusele liimpuidust ja ristkihtpuidust katsekehadele, võttes samal ajal arvesse

ka veesisalduse ja tiheduse näidud. Andmeid analüüsi tabelarvutussüsteemis MS Excel 2010 ja statistilise analüüsi programmiga R.

Tihedust, veesisaldust ja muljumistugevust võrreldi katsekehade rühmade kaupa. Erinevate rühmade tunnuste normaaljaotust kontrolliti Shapiro-Wilk'i normaaljaotuse testiga (statistikatarkvara R funktsioon *shapiro.test*). Tunnuste erinevuste tõestamiseks kasutati Tukey testi (statistikatarkvara R funktsioon *TukeyHSD*) ja t-Test'i (MS Excel 2010 funktsiooniga *t-Test: Paired Two Sample for Means*).

Regressioonanalüüsi käigus vaadeldi tihedust kui sõltumatut tunnust, mille põhjal oleks võimalik kirjeldada ning samas ka prognoosida muljumistugevuse väärtusi. Kahe tunnuse vahelise seose tugevust kontrolliti statistikatarkvara R funktsiooni *lm* abil.

Katsetulemuste uurimisel kasutatud diagrammid [36]:

- karp-vurrud diagramm iseloomustab tunnuse jaotust. „Karp” graafikul näitab 25% ja 75% kvantiile, keskmine joon selle sees näitab mediaani. „Vurrud”, mis paiknevad karbist üleval ja allpool, iseloomustavad suurimat ja vähimat väärtust. Üksikud ringid näitavad ekstreemseid väärtusi, mis ei tohiks kuuluda vaadeldavasse üldkogumisse. Ekstreemseks loeti väärtusi, mis olid alumisest/ülemisest kvartiilist enam kui 1,5-kordse kvartiilide vahe võrra väiksemad/suuremad.
- hajuvus- ehk punktdiagramm näitab kahe tunnuse vahelist sõltuvust;
- histogramm näitab ühe tunnuse väärtuste esinemissagedust vahemike kaupa.

Tunnuste omavaheliste seoste iseloomustamiseks kasutati järgnevaid statistilisi näitajaid [36]:

- determinatsioonikordaja R^2 – iseloomustamaks kui suur osa funktsioontunnuse varieeruvusest kirjeldatakse regressioonivõrrandiga;
- p-väärtus e. olulisuse tõenäosus – näitamaks, kas prognoosivõrrand on statistiliselt oluline (kui p on väiksem kui 0,05, siis on oluline).

3. UURIMUSTÖÖ TULEMUSED JA ARUTELU

3.1 Naagli mõju katsetulemustele

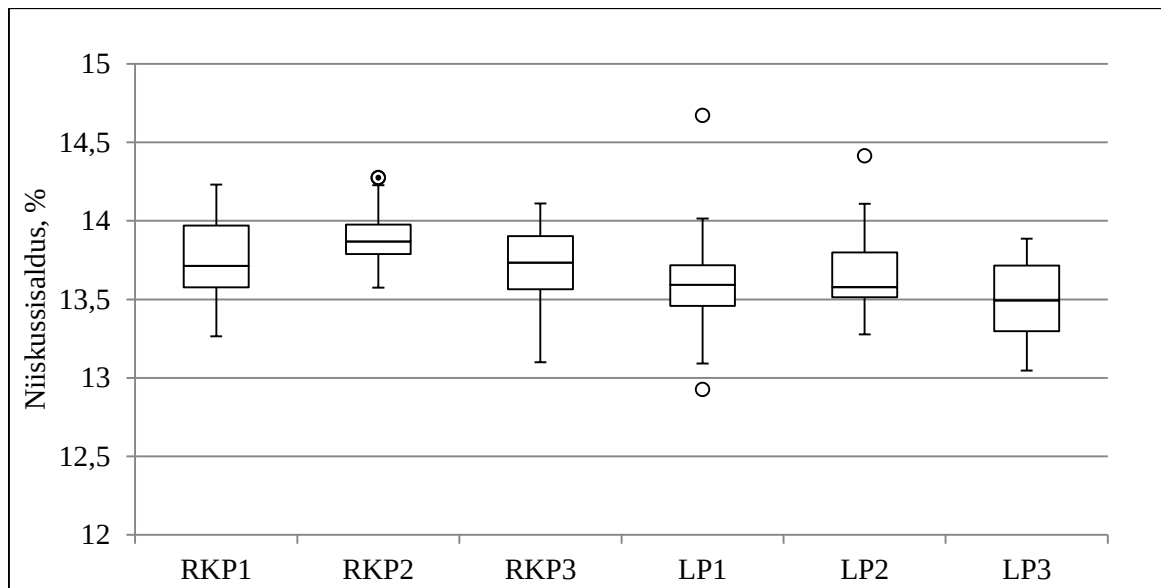
Katsete vahel kontrolliti teatud intervalli tagant siledal metallpinnal naagli võimalikku deformeerumist. Kuna jäävaid deformatsioone ei esinenud, võib eeldada, et pingejaotus naagli all oli kõikidele katsekeha lamellidele ühtlane. Ühe ja sama naagli kasutamine kõigis katsetes lubab ka järeldada, et tulemuste erinevus ei ole tingitud tema pinna hõõrdeegurist.

3.2 Katsekehade niiskussisaldus

Kõigi katsekehade niiskussisaldus määrati samades tingimustes ning tulemusi võrreldi gruppide kaupa, kusjuures ühe grupi moodustasid sarnaste katsekehade rühmad. Joonis 3.1 ja tabel 3.1 iseloomustavad katsekehade niiskussisaldust.

Tabel 3.1. Niiskussisaldust iseloomustavad andmed gruppide ja rühmade kaupa

Grupp / rühm	Miinumum, %	Keskmine, %	Mediaan, %	Maksimum, %	Variatsiooni-koefitsient, %	Normaaljaotuse p-väärtus
RKP	13,1	13,8	13,8	14,3	1,9	0,261
LP	12,9	13,6	13,6	14,7	2,3	0,049
RKP1	13,3	13,8	13,7	14,2	2,0	0,676
RKP2	13,6	13,9	13,9	14,3	1,5	0,200
RKP3	13,1	13,7	13,7	14,1	2,0	0,132
LP1	12,9	13,6	13,6	14,7	2,6	0,121
LP2	13,3	13,7	13,6	14,4	2,0	0,205
LP3	13,1	13,5	13,5	13,9	1,9	0,478



Joonis 3.1. Katsekehade niiskussisalduse karp-vurrud diagramm

Liimpuitkatsekehade niiskussisaldus jäi vahemikku 12,9...14,7%, keskväärtus ja mediaan olid võrdselt 13,6%. Sellest tulenevalt võib öelda, et valimis esineb keskmisest suuremaid ja väiksemaid väärtuseid võrdselt. 3-, 5- ja 9-kihiliste katsekehade keskmised niiskussisaldused erinesid grupi keskmisest niiskussisaldusest 0,1% ja omavahel 0,2%, ekstreemseid väärtuseid esines vähe: LP1 rühmast kaks väärtust ja LP2 rühmast üks väärtus.

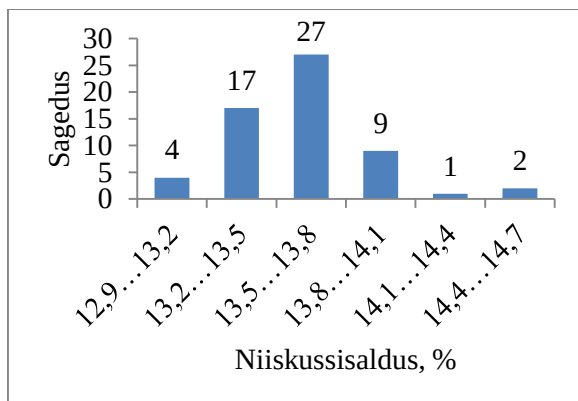
Ristkihtpuidust katsekehade niiskussisalduseks mõõdeti 13,1...14,3%. Keskväärtus ja mediaan olid võrdselt 13,8%. 3-, 5- ja 9-kihiliste katsekehade keskmised niiskussisaldused erinesid samuti grupi keskmisest 0,1% ja omavahel 0,2%, ekstreemseid väärtuseid esines vaid üks ja see oli RKP2 rühmast.

Rühma niiskussisalduse väärtuste normaaljaotust kontrolliti Shapiro–Wilk’i normaaljaotustestiga (statistikatarkvara R funktsioon `shapiro.test`), mille tulemused on toodud tabelis 3.1. Kõikide rühmade korral esines normaaljaotus ning rühma väärtuste erinevuste tõestamiseks võib kasutada Tukey testi.

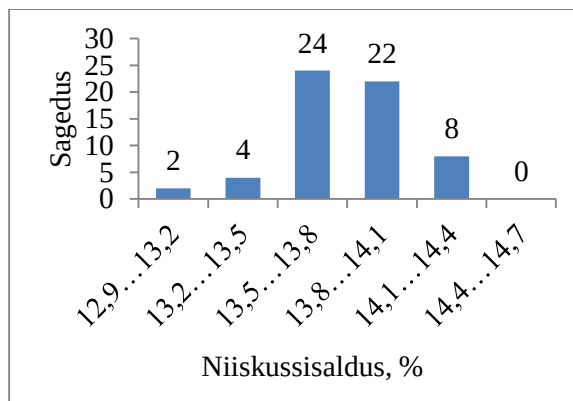
Väikeste ja sarnaste variatsioonikoefitsientide tõttu võib väita, et katsekehad olid katsetamise hetkeks saavutanud tasakaaluniiskuse.

Võrreldes liimpuitkatsekehade niiskussisalduse sagedusdiagrammi ristkihtpuitkatsekehade diagrammiga (vt. Joonised 3.2 ja 3.3) selgub, et enamik tulemusi on vahemikus

13,2...14,1%. Kõige rohkem tulemusi mõlemal grupil jääb vahemikku 13,5...13,8%, liimpuidul 27 väärtust ja ristkihtpuidul 24 väärtust. Peamiseks erinevuseks võib tuua selle, et liimpuidul on väiksemate ja ristkihtpuidul suuremate väärtuste osakaal suurem.



Joonis 3.2. Liimpuitkatsekehade niiskussisalduse histogramm



Joonis 3.3. Ristkihtpuitkatsekehade niiskussisalduse histogramm

Niiskussisalduste erinevuste tõestamiseks kasutati Tukey testi (statistikatarkvara R funktsioon *TukeyHSD*, vt tabel 3.2). Omavahel võrreldi 3-, 5-, 9-kihiliste liimpuidust katsekehade ja 3-, 5-, 9-kihiliste ristkihtpuidust katsekehade niiskussisaldusi.

Tabel 3.2. Katsekehade niiskussisalduste erinevused rühmade vahel

Valimid	Keskmiste erinevused, %			Olulisuse tõenäosus (p-väärtus)
	keskmiste erinevus	95% alumine usalduspiir	95% ülemine usalduspiir	
LP2-LP1	0.1	-0.2	0.3	0.981
LP3-LP1	-0.1	-0.4	0.1	0.706
LP3-LP2	-0.2	-0.4	0.1	0.277
RKP2-RKP1	0.1	-0.1	0.4	0.632
RKP3-RKP1	-0.1	-0.3	0.2	0.987
RKP3-RKP2	-0.2	-0.5	0.1	0.248

Katsekehade keskmised niiskussisalduse väärtused ei erinenud omavahel rohkem kui 0,2%. Kõige suurem oli niiskussisalduste erinevus rühmade RKP3-RKP2 ($p=0,248$) ja LP3-LP2 ($p=0,227$) vahel, kõige sarnasem rühmades LP2-LP1 ($p=0,981$) ja RKP3-RKP1 ($p=0,987$). Kõikide võrreldavate rühmade vahel ei suudetud tõestada niiskussisalduste erinevust ($p>0,05$).

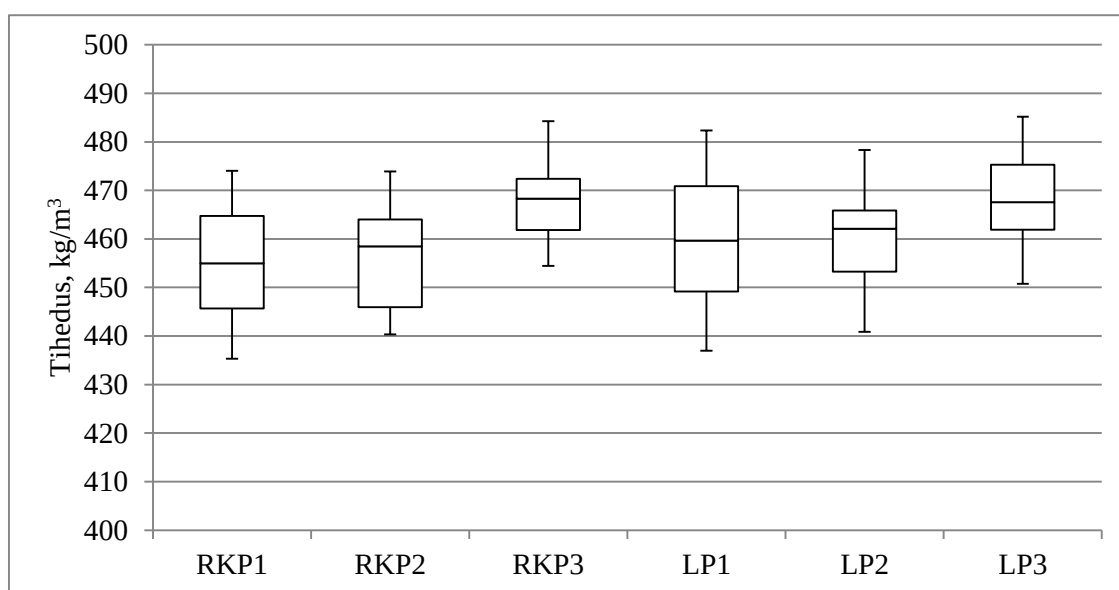
Kuna katsekehade keskmine tasakaaluniiskus ei erinenud katsekehade rühmade vahel märkimisväärselt, võib järeldada, et tulemused ei ole oluliselt mõjutatud niiskussisaldusest.

3.3 Katsekehade tihedus

Katsekehade tiheduste erinevus gruppide ja rühmade kaupa on toodud tabelis 3.3 ja joonisel 3.4.

Tabel 3.3. Tihedust iseloomustavad andmed gruppide ja rühmade kaupa

Katsekeha	Miinumum, kg/m ³	Keskmine, kg/m ³	Mediaan, kg/m ³	Maksimum, kg/m ³	Variatsiooni- koefitsient, %	Normaaljaotuse p-väärtus
RKP	435,3	459,8	461,1	484,2	2,5	0,970
LP	436,9	463,1	463,2	485,2	2,6	0,980
RKP1	435,3	455,0	455,0	474,0	2,6	0,609
RKP2	440,4	456,7	458,5	473,9	2,4	0,162
RKP3	454,4	467,7	468,3	484,2	1,6	0,903
LP1	436,9	460,4	459,7	482,3	3,1	0,236
LP2	440,9	459,9	462,1	478,3	2,2	0,229
LP3	450,7	469,0	467,5	485,2	1,9	0,862



Joonis 3.4. Katsekehade tiheduse karp-vurrud diagramm

Liimpuitkatsekehade tihedus jäi vahemikku 435,3...484,2 kg/m³, keskvärtus ja mediaan ei erinenud oluliselt. 3- ja 5-kihiliste katsekehade keskmised tihedused olid grupi keskmisest 1% võrra väiksemad ja 9-kihiliste keskmised tihedused 1% võrra suuremad. Ekstreemseid väärtuseid ei esinenud.

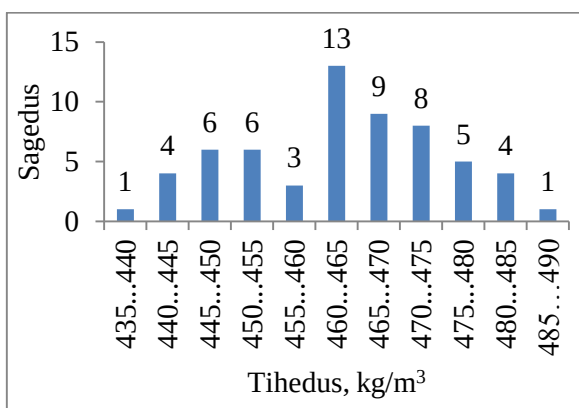
Ristkihtpuidust katsekehade tihedus jäi vahemikku 436,9...485,2 kg/m³. Sarnaselt liimpuidust katsekehadele ei erinenud ka keskvärtus ja mediaan oluliselt. Ekstreemseid väärtusi ei esinenud.

Kihtide arvul on mõju tihedusele. Kuigi kõik katsekehad valmistati samast saematerjalist (vt peatükk 2.2.3), eristub selgelt, et nii liimpuidul kui ka ristkihtpuidul on 9-kihilised katsekehad suurema tihedusega kui 3- ja 5-kihilised katsekehad. Kõrgem tihedus rohkemate kihtidega katsekehadel võib olla juhuslik või põhjustatud sellest, et liimitavaid kihte on rohkem.

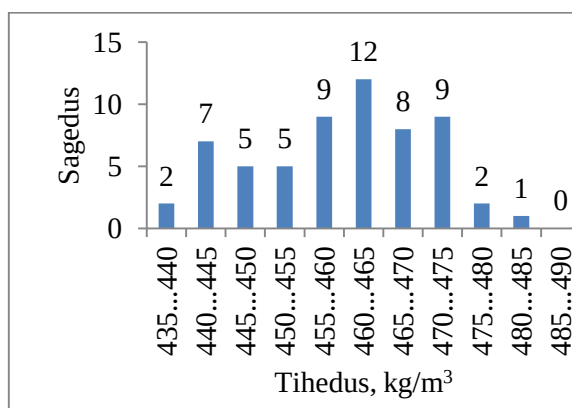
Samuti võib täheldada kihtide arvu mõju rühma tiheduse variatsioonikoefitsiendile. Näiteks on 3-kihilisel liimpuitkatsekehal variatsioonikoefitsient 2,6%, aga 9-kihilisel 1,6%, sama seos kehtib ka ristkihtpuitkatsekehade puhul. Eeltoodu põhjal võib väita, et kihtide arvu tõustes toimub materjali ühtlustumine.

Rühma tiheduse väärtuste normaaljaotust kontrolliti Shapiro–Wilk’i normaaljaotustestiga (statistikatarkvara R funktsioon shapiro.test). Tabelis 3.3 toodud tulemuste põhjal võib väita, et kõikide rühmade vahel esines normaaljaotus ja rühma väärtuste erinevuste tõestamiseks võib kasutada Tukey testi.

Katsekehade tiheduste esinemissagedused on välja toodud joonistel 3.5 ja 3.6. Enim tulemusi mõlemal grupil jäi vahemikku 460...465 kg/m³, liimpuidul 13 väärtust ja ristkihtpuidul 12 väärtust. Väikeste ja suurte väärtuste osakaal on suhteliselt kõrge.



Joonis 3.5. Liimpuitkatsekehade tiheduse histogramm



Joonis 3.6. Ristkihtpuitkatsekehade tiheduse histogramm

Tiheduste erinevuste tõestamiseks kasutatud Tukey testi (statistikatarkvara R funktsioon *TukeyHSD*) tulemused on toodud tabelis 3.4. Rühmi võrreldi sarnaste põhimõtetega nagu niiskussisalduse erinevuste tõestamisel.

Tabel 3.4. Katsekehade tiheduste erinevused rühmade kaupa

Valimid	Keskmiste erinevused, kg/m ³			Olulisuse tõenäosus (p-väärtus)
	keskmine	95% alumine usalduspiir	95% ülemine usalduspiir	
LP2-LP1	-0,5	-10,4	9,4	0.999
LP3-LP1	8,6	-1,3	18,5	0.126
LP3-LP2	9,1	-0,8	19,0	0.090
RKP2-RKP1	1,7	-8,2	11,6	0.997
RKP3-RKP1	12,7	2,8	22,6	0.004
RKP3-RKP2	11,0	1,1	20,9	0.020

Rühmade RKP3-RKP2 ($p=0,020$) ja RKP3-RKP1 ($p=0,004$) tihedusväärtuste vahel tõestati statistiline erinevus. Sama võib järeldada ka rühmade omavaheliste keskmiste suure erinevuse alusel, mis olid vastavalt 12,7 ja 11,0 kg/m³. Rühmade LP2-LP1, LP3-LP1, LP3-LP2, RKP2-RKP1 tihedusväärtuste vahel olulist erinevust ei suudetud tõestada ($p>0,05$).

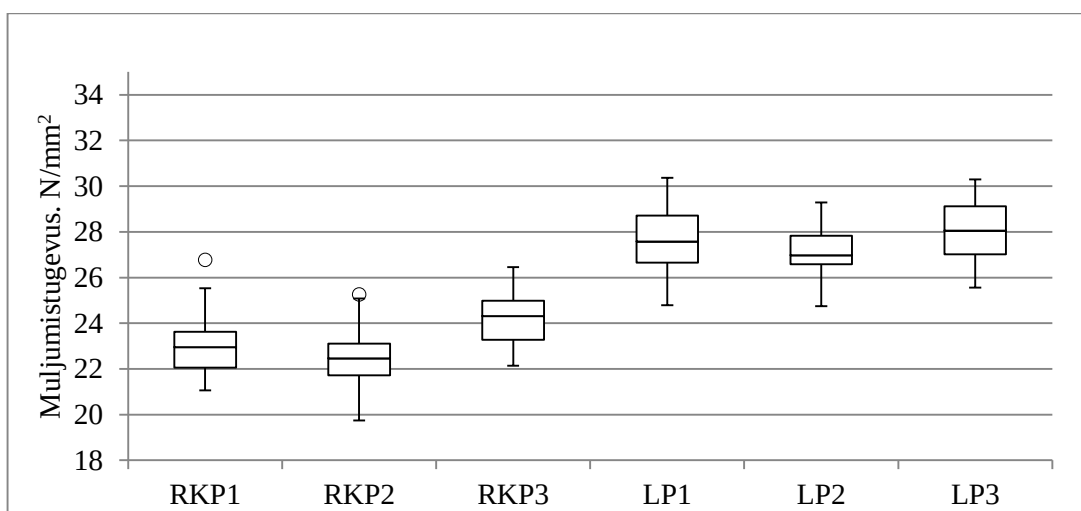
Arvestades asjaolu, et saematerjali keskmine tihedus oli $485 \pm_{90}^{78}$ kg/m³ ja katsekehade keskmine tihedus $461 \pm_{26}^{24}$ kg/m³, võib väita, et meetodika osas kirjeldatud viis katsekehade ühtlase tiheduse saavutamiseks õnnestus. Võimaluse korral soovitab autor veel ühtlasema tiheduse saamiseks teostada esimene sorteerimine juba saematerjaliga, kus oleks soovitatav võtta materjali tiheduste erinevuseks maksimaalselt 80 kg/m³.

3.4 Muljumistugevus

Tabelis 3.5 ja joonisel 3.7 on esitatud gruppide ja rühmade muljumistugevust iseloomustavad näitajad.

Tabel 3.5. Muljumistugevust iseloomustavad andmed gruppide ja rühmade kaupa

Katsekeha	Miinumum, N/mm ²	Keskmine, N/mm ²	Mediaan, N/mm ²	Maksimum, N/mm ²	Variatsiooni- koefitsient, %	Normaaljaotuse p-väärtus
RKP	19,74	23,29	23,11	26,78	6	0,981
LP	24,74	27,68	27,52	30,37	5	0,976
RKP1	21,06	23,08	22,95	26,78	6	0,167
RKP2	19,74	22,63	22,47	25,26	6	0,407
RKP3	22,14	24,16	24,31	26,46	5	0,846
LP1	24,79	27,75	27,58	30,37	5	0,986
LP2	24,74	27,17	26,98	29,29	5	0,845
LP3	25,56	28,13	28,05	30,30	5	0,572

**Joonis 3.7** Katsekehade muljumistugevuse karp-vurrud diagramm

Liimpuitkatsekehade muljumistugevus jäi vahemikku 24,74...30,37 N/mm². Keskvaartus oli 27,68 N/mm², mis ei erinenud oluliselt mediaanväärtusest. Suurim muljumistugevus oli 9-kihilistel liimpuitkatsekehadel, mis ületas grupi keskmist 2% võrra. Vähim väärtus esines 5-kihiliste puhul jäädes grupi keskmisest 2% võrra alla. Ekstreemseid väärtusi ei esinenud.

Ristkihtpuidust katsekehade muljumistugevus jäi vahemikku 19,74...26,78 N/mm² keskvaartusega 23,29 N/mm². Sarnaselt liimpuitkatsekehadel oli kõige suurem muljumistugevus 9-kihilistel ja väikseim 5-kihilistel katsekehadel. 3- ja 5-kihilistel katsekehadel esines mõlemal 1 ekstreemum.

Rühma tiheduse väärtuste normaaljaotust kontrolliti Shapiro–Wilk’i testiga (statistikatarkvara R funktsioon `shapiro.test`), mille tulemused on toodud tabelis 3.5. Normaaljaotuse korral võib rühma väärtuste erinevuste tõestamiseks kasutada Tukey testi (statistikatarkvara R funktsioon `TukeyHSD`).

Muljumistugevuse erinevus rühmade kaupa on toodud tabelis 3.6.

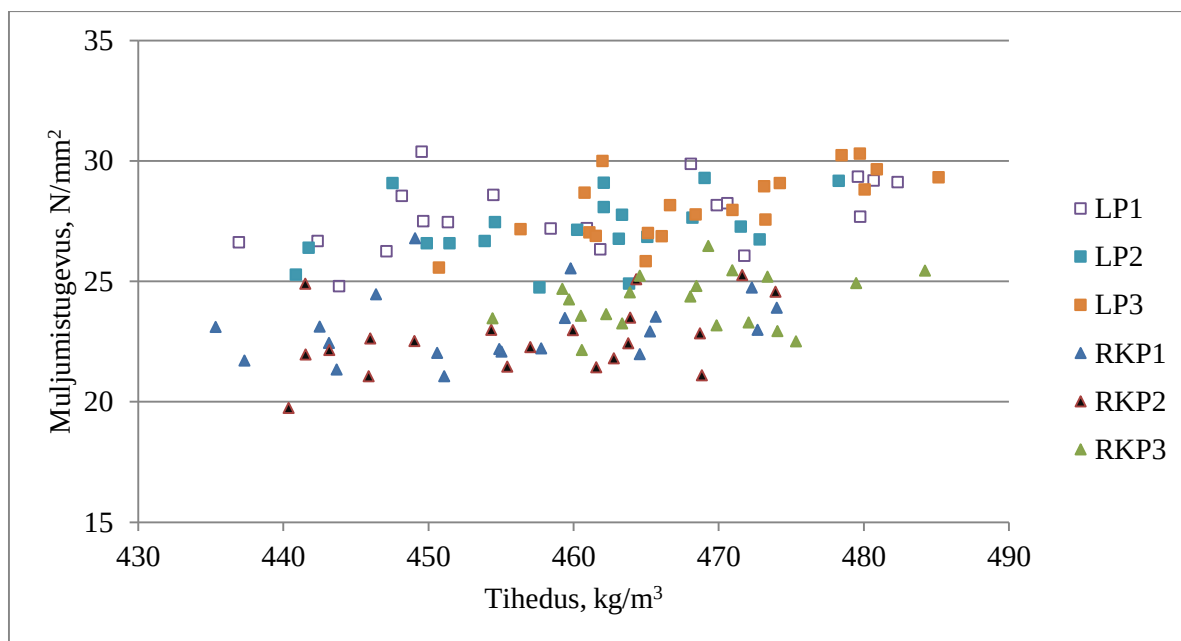
Tabel 3.6. Katsekehade muljumistugevuse erinevused rühmade kaupa

Valimid	Keskmiste erinevused, N/mm ²			Olulisuse tõenäosus (p-väärtus)
	keskmine	95% alumine usalduspiir	95% ülemine usalduspiir	
LP2-LP1	-0,6	-1,8	0,7	0,757
LP3-LP1	0,4	-0,9	1,6	0,952
LP3-LP2	1,0	-0,3	2,2	0,235
RKP2-RKP1	-0,4	-1,7	0,8	0,907
RKP3-RKP1	1,1	-0,2	2,3	0,131
RKP3-RKP2	1,5	0,3	2,8	0,008

Muljumistugevuse väärtused on statistiliselt erinevad rühmade RKP3-RKP2 ($p=0,008$) vahel, ülejäänute omavahelisel võrdlemisel oluline erinevus puudub ($p>0,05$).

Sellest võib järeldada, et rühmade vahel, kus tiheduse väärtus statistiliselt ei erine, puudub erinevus ka muljumistugevuste vahel ning seega kihtide arv ei mõjuta otseselt muljumistugevust.

Tiheduse ja muljumistugevuse seos on toodud joonisel 3.8 punktdiagrammina.



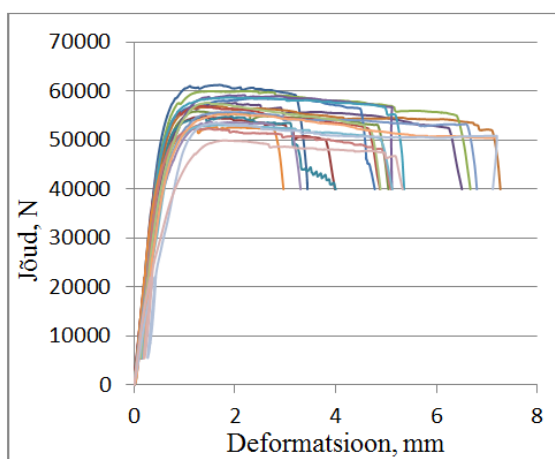
Joonis 3.8. Katsekehade tiheduse ja muljumistugevuse vaheline seos

LP ja RKP gruppide vahel on selge erinevus muljumistugevusele, mille väärtused jäid vahemikku vastavalt 25...30 N/mm² ning 20...25 N/mm². 19% keskvaartuste erinevus

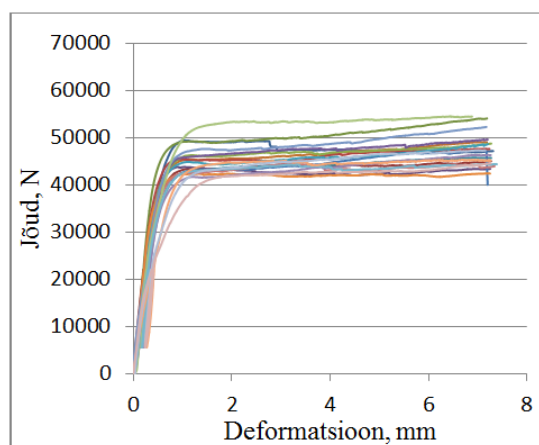
lubab järeldada, et ristkihtpuidus väliskihiga risti paiknevad kihid mõjutavad oluliselt muljumistugevust.

3.5 Muljumistugevuste graafikute võrdlus

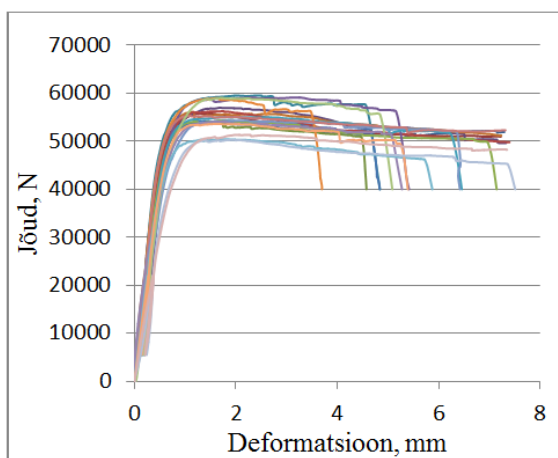
Katse kestis 1 100 sekundit, mille käigus jõudsid deformatsioonid keskmiselt 7,30 millimeetrini. Rühmade keskmised purunemise ajad ja neile vastavad siirded on toodud lisas 5. Joonistel 3.9 kuni 3.14 on esitatud erinevate katsekehade rühmade katsetulemused joondiaagrammina.



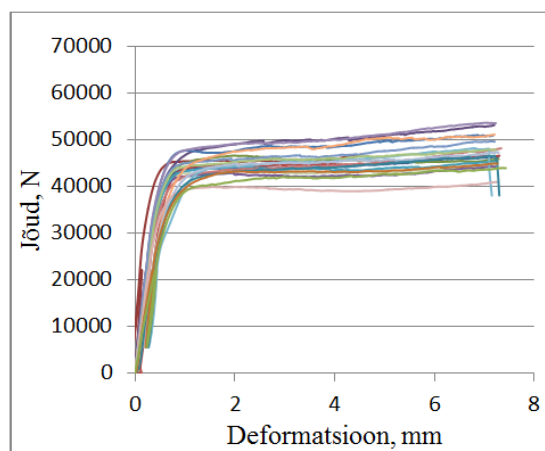
Joonis 3.9. 3-kihilise liimpuidu jõu-deformatsiooni diagramm



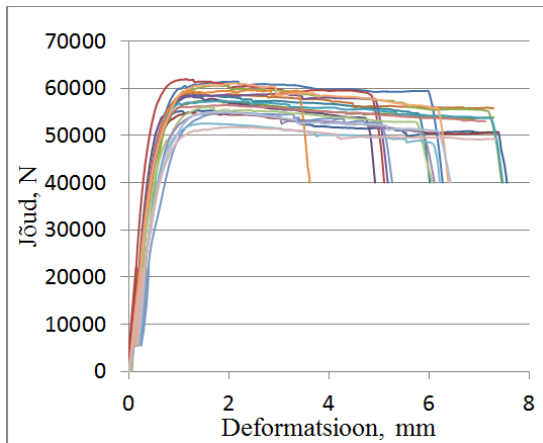
Joonis 3.10. 3-kihilise ristkihtpuidu jõu-deformatsiooni diagramm



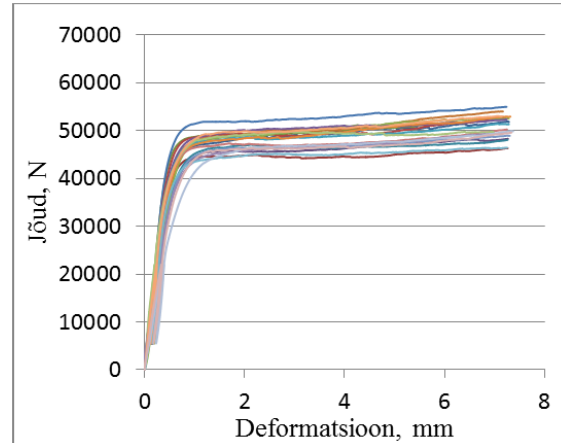
Joonis 3.11. 5-kihilise liimpuidu jõu-deformatsiooni diagramm



Joonis 3.12. 5-kihilise ristkihtpuidu jõu-deformatsiooni diagramm



Joonis 3.13. 9-kihilise liimpuidu jõu-deformatsiooni diagramm



Joonis 3.14. 9-kihilise ristkihtpuidu jõu-deformatsiooni diagramm

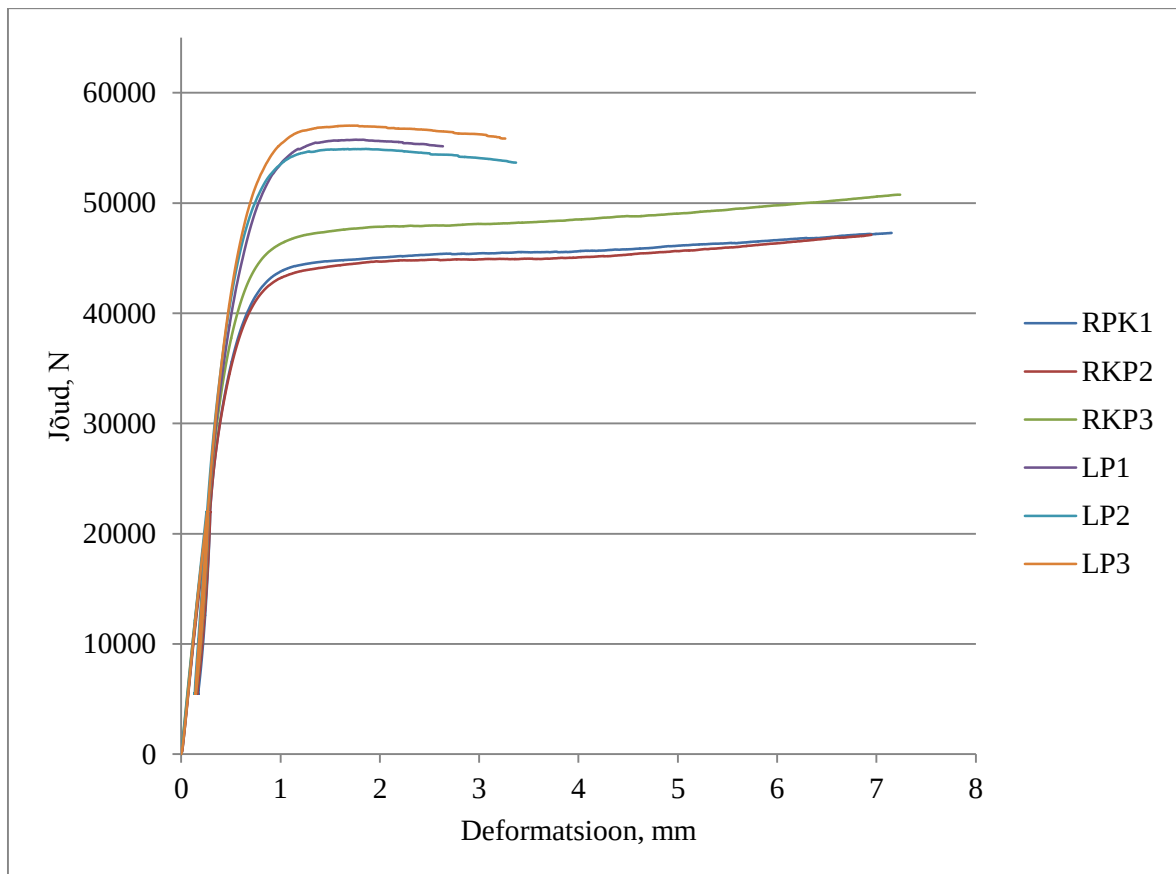
Katse jooksul purunes 3-kihilistest liimpuidust katsekehade 90%, 5-kihilistest 65% ning 9-kihilistest 75%. Esimeste puhul algasid purunemised varem kui kahel viimasel. 5 mm deformatsioonini jõudis 3-kihilistest katsekehade 9, teised purunesid enne seda. 5- ja 9-kihilistest saavutas sama deformatsiooni vastavalt 15 ja 16 katsekeha.

3-kihilise ristkihtpuidu katsetel purunes 5% katsekehade 5, 5-kihilistel 10%, 9-kihilistel mitte ükski. Purunemine toimus alles katse lõppfaasis, kus deformatsioonid ületasid juba 7 mm.

Võib järeldada, et kihtide arv mõjutab purunemisaega, suurema kihtide arvuga katsekeha lõhestub hiljem.

Ristkihtpuidu graafikute võrdlusest selgub, et tulemuste hajuvus 9-kihiliste katsekehade puhul on väiksem kui 3-kihilistel. 4 mm deformatsiooni juures mõõdetud maksimaalse ja minimaalse jõu väärtuste vahe kahanes kihtide arvu suurenedes vastavalt 11 146 N, 11 117 N ja 8 414 N. Sarnane seos esineb ka liimpuitkatsekehade tulemuste vahel. Selle põhjal saab järeldada, et kihtide arvu tõustes väheneb tulemuste varieeruvus.

Joonisel 3.15 on esitatud rühmade keskmiste väärtustega jõu-deformatsiooni joondiaagramm. Graafiku kestus on võetud esimese katsekeha lõhestumiseni.



Joonis 3.15. Rühmade keskmised katsetulemused deformatsiooni järgi

Liimpuitkatsekehade rühmade graafikute omavaheline erinevus on väiksem kui ristkihtpuidul. Rühmade LP1 ja LP2 keskmised tulemused ei erine oluliselt erinevatel ajahetkedel, LP3 puhul on aga eristatav, et katsekehad võtavad vastu suuremaid koormuseid. Kõikide LP rühmade graafikud on sarnase iseloomuga: koormus kasvab lineaarselt kuni katsekeha saavutab maksimaalse kandevõime ning seejärel hakkab koormus deformatsioonide suurenedes vähenema. Maksimumjõu saavutamisel tekkisid katsekehasse esimesed pikilõhed, mis edasisel koormamisel suurenesid. Graafikuid iseloomustab joonte paralleelsus ning kihtide arvu suurenemine purunemise iseloomu ei muuda.

Ristkihtpuidu graafiku lineaarne osa jääb liimpuidu omast lühemaks. Pärast elastsete deformatsioonide lõppu tekkisid katsekehasse esimesed praod, kuid graafik liigub vaatamata sellele tõusvas joones. Ristuvad kihid vähendavad pikikiudu lõhestumise mõju ning seetõttu saavad ristkihtpuidus areneda oluliselt suuremad deformatsioonid.

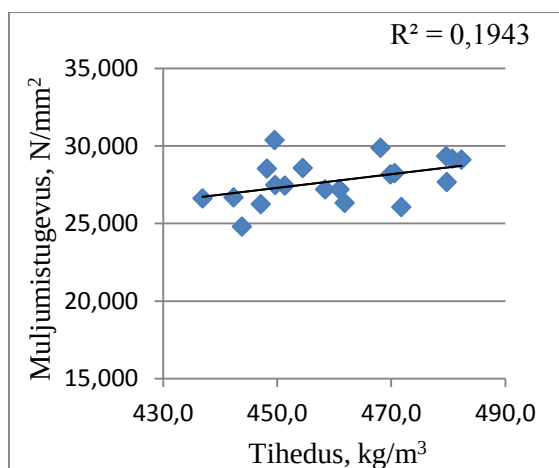
3.6 Regressioonanalüüs

Joonistel 3.16 kuni 3.21 on välja toodud tiheduse ja muljumistugevuse omavahelise seose hajuvusdiagrammid, mida hinnatakse determinatsioonikordaja R^2 , p -väärtuse ja lineaarse trendijoone kaudu.

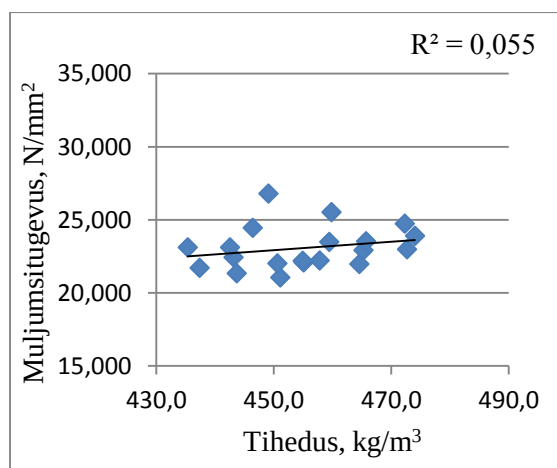
Usaldusväärne seos ($p < 0,01$) esineb ainult 9-kihiliste liimpuitkatsekehade muljumistugevuse ja tiheduse väärtuste vahel. Ülejäänud juhtudel võib järeldada kahe tunnuse vahelist nõrka seost ($p > 0,05$). Vähim ja suurim varieeruvus, 5% ja 49%, esinesid vastavalt 3-kihiliste ristkihtpuidust ja 9-kihiliste liimpuitkatsekehade korral.

Kõik uuritud seosed on positiivsed, mis tähendab suuremate tihedusväärtuste korral ka suuremat muljumistugevust. Suurema varieeruvuse korral katse tulemuste vahel kasvas ka trendijoone tõusunurk.

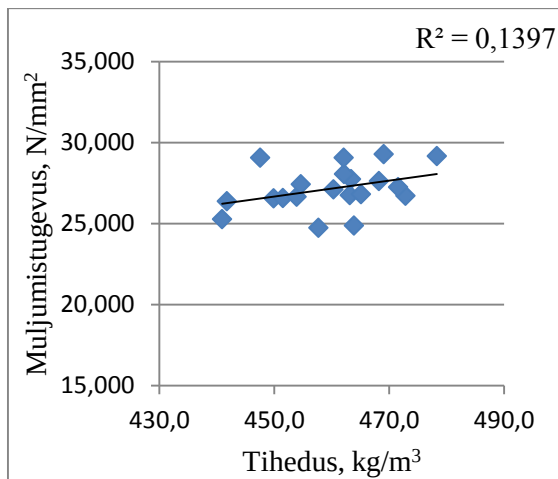
Regressioonanalüüsiga saadud nõrk seos muljumistugevuse ja tiheduse vahel on põhjendatav sisendparameetrite väga kitsa valimiga, kuid trendijooned viitavad selgelt, et tulemused on usaldusväärsed isegi sellistes tingimustes. Muljumistugevuse arvutusmodeli loomisel võib neid väärtusi kindlasti arvestada.



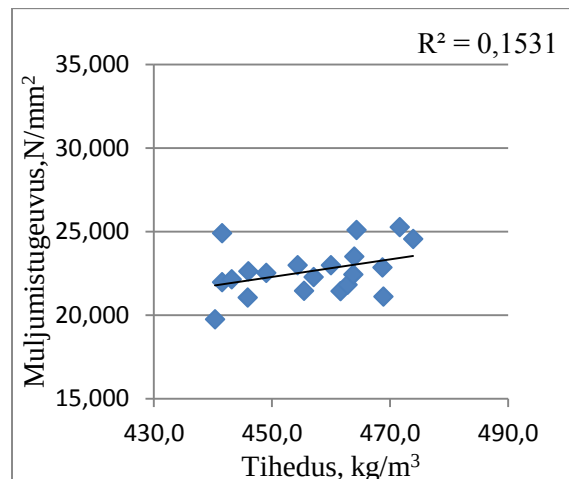
Joonis 3.16. 3-kihiliste liimpuitkatsekehade tiheduse ja muljumistugevuse vahelise seose hajuvusdiagramm ($p=0,051$)



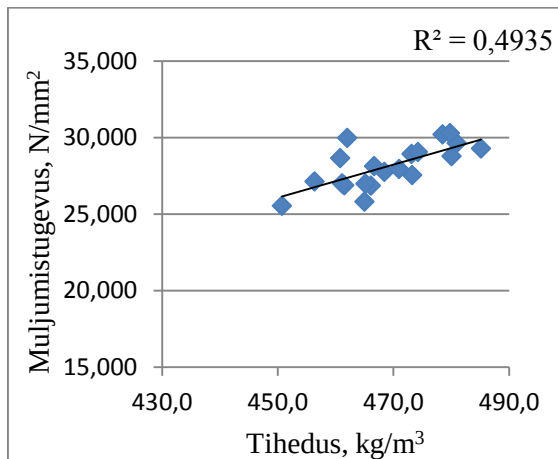
Joonis 3.17. 3-kihiliste ristkihtpuitkatsekehade tiheduse ja muljumistugevuse vahelise seose hajuvusdiagramm ($p=0,319$)



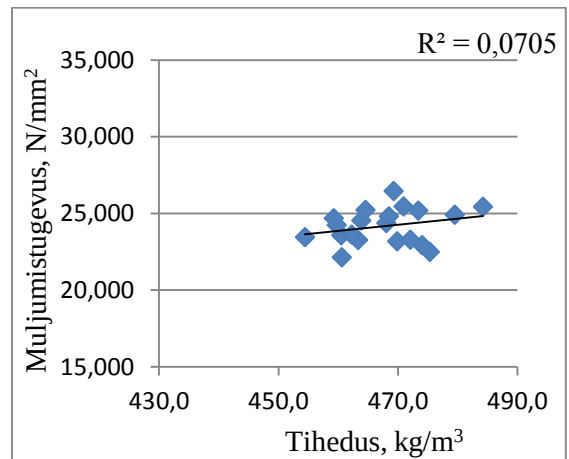
Joonis 3.18. 5-kihiliste liimpuitskatsekehade tiheduse ja muljumistugevuse vahelise seose hajuvusdiagramm ($p=0,105$)



Joonis 3.19. 5-kihiliste ristkihtpuitskatsekehade tiheduse ja muljumistugevuse vahelise seose hajuvusdiagramm ($p=0,088$)



Joonis 3.20. 9-kihiliste liimpuitskatsekehade tiheduse ja muljumistugevuse vahelise seose hajuvusdiagramm ($p=0,001$)



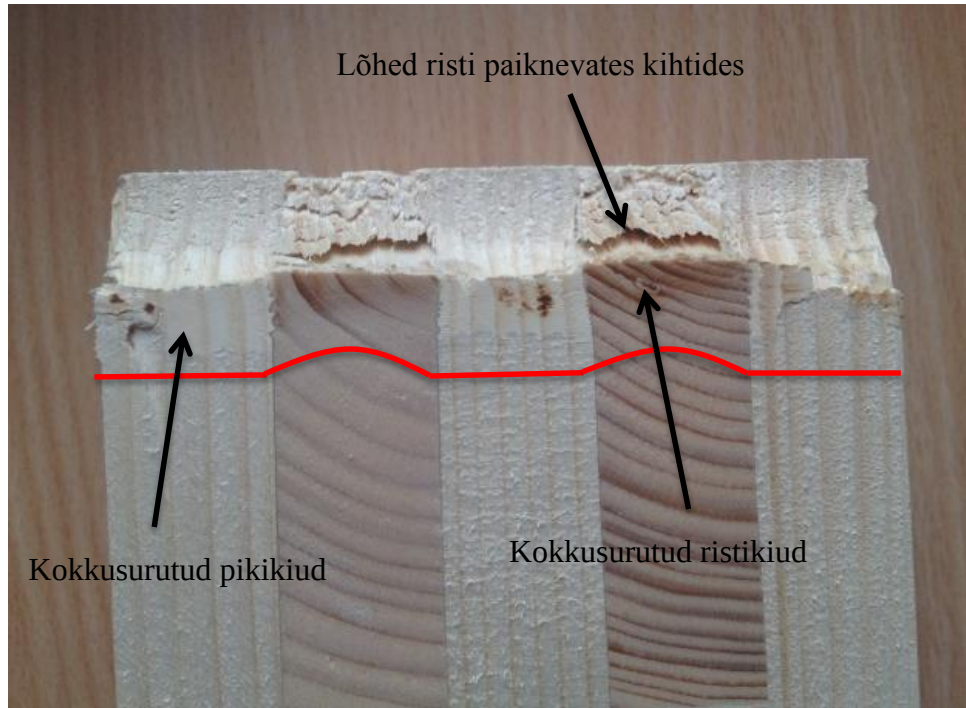
Joonis 3.21. 9-kihiliste ristkihtpuitskatsekehade tiheduse ja muljumistugevuse vahelise seose hajuvusdiagramm ($p=0,258$)

3.7 Purunenud katsekeha kirjeldamine

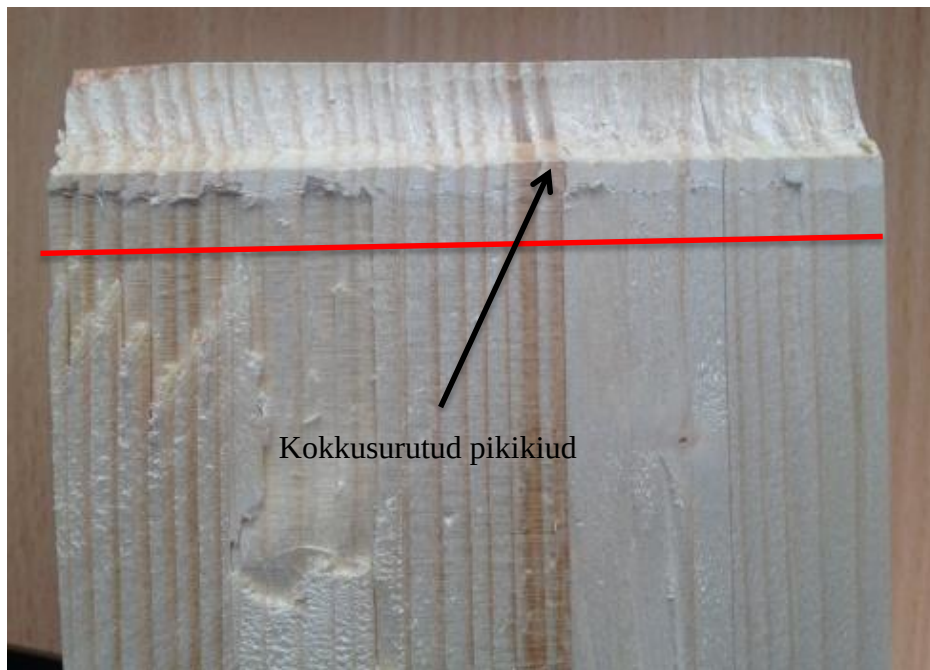
Kõikidel katsekeha tüüpidel oli sarnane purunemise iseloom ning seda kirjeldatakse 5-kihiliste katsekehade näitel. Lisas 6 on toodud ka teiste katsekehade tüüpilised purunemispildid.

Jooniselt 3.22 selgub, et ristkihtpuidu ristikiudu surutud kihid taastavad pärast koormuse eemaldamist osaliselt oma esialgse kuju isegi suurte plastsete deformatsioonide korral.

Liimpuidu puhul sellist tendentsi ei esine, kuna kõik kihid on samasuunalised. Pikikiudu kokku surutud kihtide ülemine pind on kogu ristlõike ulatuses paralleelne ning muljutud osa kõrgus konstantne kogu katsekeha laiuses.



Joonis 3.22. Viiekihilise ristkihtpuidust katsekeha purunemispilt



Joonis 3.23. Viiekihilise liimpuidust katsekeha purunemispilt

3-kihilises ristkihtpuidus tekkisid ristikiudu surutud kihtides pikilõhed (vt joonis 3.24) kogu katsekeha laiuses 45% katsekehade, 5-kihilistel 20% ning 9-kihilistel ei arenenud praod katsekeha servadeni ühelgi juhul. Sellest võib järeldada, et pikikihi lukustav efekt avaldub enim õhukeste ja suurema arvu kihtide puhul.



Joonis 3.24. Näide katsekehas risti paiknevas kihis kogu katsekeha laiuses väljaarenenud lõhest

Võiks eeldada, et kui praod ei arene kogu katsekeha laiuses, siis muljumistugevus kasvab. Selleks oleks vajalikud lisakatsed ääritingimustega, kus ristikihid lukustatakse vähemalt kolme lamelli laiuse ulatuses. Praegusel juhul on naagli kaugus servast määratud standardiga EVS-EN 383:2007, mis kehtib puidule ja liimpuidule.

Katsekeha rühmade purunemispiltide vahel suuri erinevusi ei olnud, seega katsete tulemused on usaldusväärsed ning omavahel võrreldavad.

3.8 Katsetulemuste võrdlus arvutustulemustega

3.8.1 Alused ja meetodid

Tabelites 3.7 kuni 3.11 on võrreldud katsetega leitud muljumistugevuse keskmisi väärtusi erinevate arvutusvalemitega saadud tulemustega. Punasega tähistatud tulemused on

arvutuslikult suuremad kui katseliselt leitud ja rohelised vastupidi. Erinevust ei mõjuta materjali tihedus. See võib olla põhjustatud regressioonanalüüsi käigus välja tulnud nõrgast tiheduse ja muljumistugevuse vahelisest seosest. Lisas 8 ja 9 on välja toodud kõigi katsete tulemuste võrdlus.

Tulemuste erinevusi võrreldi p-väärtusega, mis on leitud programmiga Excel 2010 funktsiooniga „t-Test: Paired Two Sample for Means“. Analüütilised väärtused ei ole oluliselt erinevad katsetulemustest juhul, kui $p > 0,05$.

3.8.2 Ristkihtpuidu muljumistugevuse katseliste väärtuste võrdlus arvutusvalemitega leitud tulemustega

Ristkihtpuidu tulemusi võrreldakse empiiriliselt tuletatud arvutusvalemitega 1.15 ja 1.16, mida on käsitletud peatükis 1.5.2.

Tabelis 3.7 toodud võrdluses ei võta analüütiline valem arvesse väliskihiga risti olevate kihtide osakaalu.

Tabel 3.7. Ristkihtpuidu muljumistugevuste keskmiste väärtuste võrdlus valemiga 1.15

Rühm	Katseline keskmine, N/mm ²	Arvutuslik keskmine, N/mm ²	Tulemuste erinevus, %	p-väärtus
RKP1	23,08	26,99	-14	<0,01
RKP2	22,63	27,10	-16	<0,01
RKP3	24,16	27,86	-13	<0,01

Arvutatud muljumistugevuse väärtused on 3-kihilistel katsekehadel keskmiselt 14%, 5-kihilistel 16% ja 9-kihilistel 13% suuremad katsetega leitud muljumistugevustest. Kõikide rühmade puhul ilmnes arvutustulemuste ja katsetulemuste vahel erinevus ($p < 0,01$). 60 tulemusest oli ainult üks juhtum, kus arvutuslikult leitud muljumistugevus oli suurem katseliselt leitud väärtusest.

Tabelis 3.8 toodud võrdluses võtab analüütiline valem 1.16 arvesse ristkihtpuidus välimise kihiga risti olevate lamellide osakaalu.

Tabel 3.8. Ristkihtpuidu muljumistugevuste keskmiste väärtuste võrdlus valemiga 1.16

Rühm	Katseline keskmine, N/mm ²	Arvutuslik keskmine, N/mm ²	Tulemuste erinevus, %	p-väärtus
RKP1	23,08	26,87	-13	<0,01
RKP2	22,63	26,99	-16	<0,01
RKP3	24,16	27,77	-13	<0,01

Valemiga 1.16 arvutatud muljumistugevuse väärtused on 3-kihilistel katsekehadel keskmiselt 13%, 5-kihilistel 16% ja 9-kihilistel 13% suuremad katsetega leitud muljumistugevustest. Kõikide rühmade puhul ilmnes arvutustulemuste ja katsetulemuste vahel erinevus ($p < 0,01$). 60 tulemusest esines ainult üks juhtum, kus arvutuslikult leitud muljumistugevus oli suurem katseliselt leitud väärtusest.

Antud konfiguratsiooniga katsekeha puhul (piki- ja ristikihtide suhe oli 1,5) kahe valemi tulemustes olulist erinevust ei olnud.

98% juhtudest selgus, et arvutusmodelid hindavad muljumistugevust tegelikust suuremaks.

3.8.1 Liimpuidu muljumistugevuse katseliste väärtuste võrdlus arvutusvalemitega leitud tulemustega

Tabelis 3.9 on võrreldud liimpuidu katsel saadud muljumistugevuse keskmisi väärtusi Eurokoodeks 5 valemi (vt valem 1.10) järgi arvutatavate väärtustega.

Tabel 3.9. Liimpuidu muljumistugevuste keskmiste väärtuste võrdlus valemiga 1.10

Rühm	Katseline keskmine, N/mm ²	Arvutuslik keskmine, N/mm ²	Tulemuste erinevus, %	p-väärtus
LP1	27,75	30,22	-8	<0,01
LP2	27,17	30,19	-10	<0,01
LP3	28,13	30,78	-9	<0,01

Valemiga 1.10 leitud muljumistugevused on 3-kihilistel katsekehadel keskmiselt 8%, 5-kihilistel 10% ja 9-kihilistel 9% suuremad katsetel saadud väärtustest. Kõikide rühmade puhul ilmnes arvutustulemuste ja katsetulemuste vahel erinevus ($p < 0,01$). 60 tulemusest

esines ainult üks juhtum, kus arvutuslikult leitud muljumistugevus oli suurem katseliselt saadud väärtusest.

Tabelis 3.10 esitatakse muljumistugevuse võrdlus Šveitsi standardi SIA 265 valemi (vt valem 1.13) tulemustega, milles erinevalt Eurokoodeks 5-st on muljumistugevuse sõltuvus naagli diameetrist eksponentsiaalne.

Tabel 3.10. Liimpuidu muljumistugevuste keskmiste väärtuste võrdlus valemiga 1.13

Rühm	Katseline keskmine, N/mm ²	Arvutuslik keskmine, N/mm ²	Tulemuste erinevus, %	p-väärtus
LP1	27,75	28,11	-1	0,230
LP2	27,17	28,08	-3	<0,01
LP3	28,13	28,64	-2	0,052

Valemiga 1.13 leitud muljumistugevuse väärtused on 3-kihilistel katsekehadel keskmiselt 1%, 5-kihilistel 3% ja 9-kihilistel 2% suuremad katsetel saadud väärtustest. Rühmade LP1 ja LP3 puhul ei suudetud tõestada arvutustulemuste ja katsetulemuste vahel statistilist erinevust ($p > 0,05$), millest võib järeldada, et analüütilised väärtused ei ole oluliselt erinevad katsetulemustest. 60 tulemusest esines 42 juhtumit, kus arvutuslikult leitud muljumistugevus oli suurem katseliselt saadud väärtusest, seitsmel juhul olid vastavad väärtused ligikaudu võrdsed ning 12 juhul jäi arvutuslikult leitud muljumistugevus väiksemaks katseliselt leitud väärtusest.

Tabelis 3.11 on esitatud muljumistugevuse võrdlus Graz'i Tehnikaülikooli katsete põhjal tuletatud valemi (vt valem 1.14) tulemustega. Valem sarnaneb oma tööpõhimõttelt standardile SIA 265.

Tabel 3.11. Liimpuidu muljumistugevuste keskmiste väärtuste võrdlus valemiga 1.14

Rühm	Katseline keskmine, N/mm ²	Arvutuslik keskmine, N/mm ²	Tulemuste erinevus, %	p-väärtus
LP1	27,75	29,37	-5	<0,01
LP2	27,17	29,34	-7	<0,01
LP3	28,13	29,92	-6	<0,01

Valemiga 1.14 leitud muljumistugevuse väärtused on 3-kihilistel katsekehadel keskmiselt 5%, 5-kihilistel 7% ja 9-kihilistel 6% suuremad katsetega leitud väärtusest. Kõikide

rühmade puhul ilmnes arvutustulemuste ja katsetulemuste vahel erinevus ($p < 0,01$). 60 tulemusest esines 55 juhtumit, kus arvutuslikult leitud muljumistugevus oli suurem katseliselt leitud väärtusest, kaks juhtumit, kus tulemused olid ligikaudu võrdsed ning kolmel juhul jäi arvutuslikult leitud muljumistugevus väiksemaks katsel saadud väärtusest.

Katsetes kasutatud naagli diameetri puhul on katsetulemused kõige sarnasemad standardi SIA 265 valemi tulemustele.

KOKKUVÕTE

Käesoleva töö põhieesmärgiks oli uurida liimpuidu ja ristkihtpuidu kihtide arvu mõju muljumistugevusele ja lõhestumisele ning võrrelda tulemusi arvutuste põhjal saadud muljumistugevuste väärtustega. Katsetati kuut erinevat tüüpi kuusepuust katsekeha: 3-, 5- ja 9-kihilised liim- ja ristkihtpuidust katsekehad, igat tüüpi 21 tükki, millest analüüsil läks arvesse 20. Magistritöö raames tehtud katsed kulgesid tõrgeteta ning uurimustöö eesmärgid täideti. Kogu protsess toimus vastavalt standardites ettenähtud metoodikale ning katseseadmetest tulenevaid olulisi kõrvalekaldeid ei esinenud.

Selleks et hinnata ainult kihtide arvu mõju, hoiti kõik teised muljumistugevust mõjutavad tegurid võimalikult konstantsed. Katsed teostati ühe ja sama naagliga ning katsekehi hoiti enne katsetamist kolm nädalat samades kliimaatilistes tingimustes. Tiheduse ühtlustamiseks sorteeriti saematerjal enne katsekehade valmistamist, mille tulemusena erinesid tihedused katsekehade vahel ainult 11%. Puidu defektide mõju tulemustele välistati sellega, et naagli ümber jäeti kolme naagli diameetri suurune oksakohtade ja vaigukanalite vaba ala.

Kui saematerjali tiheduste maksimaalne erinevus oli 168 kg/m^3 , siis sorteerimise tulemusena saavutati valmis katsekehade puhul erinevuseks ainult 50 kg/m^3 . Veel parema tulemuse saavutamiseks soovib autor sorteerida prussid tiheduse järgi ning võtta algstaadiumis valimi maksimaalseks tiheduse erinevuseks 80 kg/m^3 .

Tulemustest selgub, et kui erinevate kihtide arvuga katsekehade rühmade vahel ei ole tiheduste väärtustel olulist statistilist erinevust, ei ole olulisi erinevusi ka muljumistugevuses. Sellest tulenevalt võib öelda, et kihtide arv ei mõjuta muljumistugevust.

Kihtide arvul on mõju katsekeha purunemisajale: mida suurem on kihtide arv, seda hiljem toimub katsekeha lõhestumine. Katse käigus arenesid deformatsioonid ligikaudu 7,3 mm ning selle jooksul purunes 90% 3-kihilistest, 65% 5-kihilistest ning 75% 9-kihilistest liimpuitkatsekehade. Kolmekihiliste katsekehade purunemine toimus oluliselt varem kui viie- ja üheksakihilistel. Ristkihtpuidu katsetel purunes 5% 3-kihilistest, 10% 5-kihilistest katsekehade. 9-kihilistest ei purunenud ükski katsekeha. Seejuures oli täheldatav, et

purunemine toimus alles katse lõppfaasis. Nii liimpuidu kui ka ristkihtpuidu katsetulemused muutusid kihtide arvu suurenemisel oluliselt ühtlasemaks. 9-kihiliste katsekehade tulemuste hajuvus oli oluliselt väiksem kui 3-kihilistel, näiteks 4 mm deformatsiooni juures jäi 9-kihilistele ristkihtpuidust katsekehadele mõjuva maksimaalse ja minimaalse jõu väärtuste vahe 25% väiksemaks kui 3-kihilistel katsekehadel.

Võrreldes liim- ja ristkihtpuidust katsekehade tulemusi omavahel, selgus, et esimese puhul on muljumistugevus keskmiselt 19% suurem. Võib küll järeldada, et materjalis väliskihiga risti paiknevad kihid mõjutavad oluliselt muljumistugevust, kuid silmas tuleb pidada ka ääritingimusi. Purunemispildist võis näha, et osadel 3- ja 5-kihiliste ristkihtpuidust katsekehade risti paiknevates kihtides arenesid praod välja kogu lamelli laiuses, 9-kihilistel mitte. Suurem servakaugus ja lukustavate kihtide arv tõstavad tõenäoliselt mõnevõrra muljumistugevust.

Katselisi muljumistugevuse väärtusi võrreldi analüütilistega. Ristkihtpuitkatsekehade võrdluseks kasutati Blaß'i ja Uibel'i empiirilisi valemeid, kus esimene arvestas risti olevate kihtide osakaalu, teine mitte. Mõlemad arvutusvalemid andsid keskmiselt 14% suurema tulemuse kastetel saadust.

Liimpuitkatsekehade muljumistugevuse väärtusi võrreldi Eurokoodeks 5, Šveitsi standardi SIA 265 ja Graz'i Tehnikaülikooli välja pakutud valemitega. Kõige sarnasemad tulemused saadi SIA 265 muljumistugevuse arvutusvalemiga, kus standard hindab muljumistugevust keskmiselt 2% suuremaks. Graz'i Tehnikaülikooli valem hindas muljumistugevuse väärtust keskmiselt 6% ja Eurokoodeks 5 9% suuremaks.

Regressioonianalüüsiga saadud nõrk seos muljumistugevuse ja tiheduse vahel on põhjendatav sisendparameetrite väga kitsa valimiga. Sellegipoolest annavad võrdlused analüütiliste valemitega alust järeldada, et Eurokoodeks 5 alusel leitav muljumistugevuse väärtus hindab tegelikku üle ning tulevikus võiks olla eelistatud mõni alternatiivsetest lähenemistest. Siiski tuleks arvesse võtta, et magistritöös kasutati katsetes vaid üht tüüpi naaglit ning teistsuguse läbimõõduga naaglite korral ei pruugi olla järeldus sama.

Kuna katsete läbiviimisel polnud suuri kõrvalekaldeid standardist, saab kindlasti antud katsetulemusi võtta aluseks järgnevatel uurimustöödel, mis on seotud puitmaterjali muljumistugevuse empiiriliste arvutusvalemite leidmisega.

Autor loodab, et antud tööst leitakse ideid ja innustust uurimaks täpsemalt liiteid ristkihtpuiduga, mis aitaks täiustada projekteerimisnorme.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. **Reichelt, B.** (2012). Einfluss der Sperrwirkung auf den Auszieh Widerstand selbstbohrender Holzschrauben. (MSc). Technische Universität Graz, Institut für Holzbau und Holztechnologie. Graz, Austria.
2. **Blaß, H.J., Uibel, T.** (2007). Tragfähigkeit von stiftförmigen Verbindungsmitteln in Brettsperrholz. Deutschland: Universitätsverlag Karlsruhe. 193 pp.
3. **EVS-EN 383:2007.** Timber Structures - Test methods - Determination of embedment strength and foundation values for dowel type fasteners. Tallinn: Eesti standardikeskus.
4. **EVS-EN 14080:2013.** Puitkonstruktsioonid. Laudliimpuit ja plankliimpuit. Nõuded. Tallinn: Eesti standardikeskus.
5. **prEN 16351:2011.** Timber structures – Cross laminated timber – Requirements. European standard.
6. **Gehri, E.** (2000). Arbeitsgemeinschaft für Holzforschung, Verbindungstechnik im Holzbau. *Tagungsband zum 32 SAH-Fortbildungskurs*. Weinfelden, Switzerland.
7. Handbuch 1 – Tragwerke aus Holz. (2008). Leonardo da Vinci Pilot Projekt „Lehr- und Lernunterlagen für die Bemessung und Konstruktion von Tragwerken aus Holz – TEMTIS“. [WWW]
http://fast10.vsb.cz/temtis/documents/Handbuch1_German.pdf (20.05.2015).
8. **Just, E.** (2012). Puitkonstruktsioonid. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli õppematerjal. 183 lk.
9. Timber Engineering STEP 1. (1995). The Netherlands: Salland De Lange. 483lk
10. **Allikas, L.** (1985). Puit- ja plastmasskonstruktsioonid. Tallinn: Valgus. 360 lk.
11. **Mõrd, L.** (2012). Puit-puiduga liidete kasutamine ja projekteerimine ehitistes. (Magistritöö). Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu.

12. **Johansen, K.W.**, (1949). Theory of timber connections – IABSE Journal 9 . Vol. 9. pp. 249-262.
13. **Meyer, A.** (1957). Die Tragfähigkeit von Nagelverbindungen bei statischer Belastung – Holz als Roh- und Werkstoff, Vol. 15, No 2. pp. 96-109.
14. **Jorissen, A.** (1998). Double Shear Timber Connections with Dowel Type Fasteners. (PhD). Delft University of Technology, Civil Engineering Department. Delft, Netherlands.
15. **Heine, C.P.** (2001). Simulated Response of Degrading Hysteretic Joints With Slack Behavior. (PhD). Virginia Polytechnic Institute and State University. Virginia, USA.
16. **Eurokoodeks 5: Puitkonstruktsioonide projekteerimine.** (2009). Osa 1-1: Üldist. Üldreegliid ja reegliid hoonete projekteerimiseks. Eesti standardi rahvuslik lisa EVS-EN 1995-1-1/NA:2007+A1:2008/NA:2009. Tallinn: Eesti standardikeskus.
17. **ASTM D5764 – 97a(2013).** Standard Test Method for Evaluating Dowel-Bearing Strength of Wood and Wood-Based Products. USA: American Society for Testing and Materials.
18. **Thelandersson, S., Larsen, H.J.** (2003). Timber engineering. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd. 446 pp.
19. **Hohenwarter, J.** (2014). Vergleich der Lochleibungsfestigkeit in Folge von Zug- und Druckbelastung. (MSc). Technische Universität Graz. Graz, Austria.
20. **SIA 265:2012.** *Holzbau (Timber Structures)*. Schweizerischer Ingenieur- und Architekturverein. Zurich, Switzerland
21. **Schickhofer, G., Augustin, M., Jeitler, G.** (2007). Einführung in die Verbindungstechnik mit Stabdübeln, Schrauben und eingeklebten Stahlstangen. 6. Grazer Holzbau-Fachtagung. Graz, Austria.
22. **Saarman, V., Veibri, U.** (2006). Puiduteadus. Tartu: Vali Press OÜ. 560 lk
23. **Veski, A.** (1940). Puitehituse käsiraamat. Tartu: Teaduslik kirjandus. 264 lk.

24. **EVS-EN 384:2010.** Structural timber – Determination of characteristic values of mechanical properties and density. Tallinn: Eesti standardikeskus.
25. **Siikanen, U.** (2012). Puidust ehitamine. Tallinn: Ehitame kirjastus. 345 lk.
26. **Ehlbeck, J., Werner, H.** (1992). Softwood and Hardwood Embedding Strenght for dowel-type Fasteners. Meeting no. 25 of CIB-W18. Åhus, Sweden.
27. **Hübner, U., Bogensberger, T., Schickhofer, G.** (2008). Embedding strength of European hard-woods. Meeting no. 41 of CIB-W18. St. Andrews, Canada.
28. **Wilding, B.** (2014). Group Effect in Timber Joints with Focus on Dowel-Type Fasteners. (MSc). Technische Universität Graz. Graz, Austria.
29. **Sawata, K. Yasumura, M.** (2002). Determination of embedding strength of wood for dowel-type fasteners. Journal of Wood Science. Vol. 48, pp. 138-146.
30. **Schmid M.** (2002). Anwendung der Bruchmechanik auf Verbindungen mit Holz. (PhD). Karlsruhe Institute of Technology. Karlsruhe, Germany
31. **Sjödin, J. Serrano, E. Enquist, B.** (2008). Anexperimental and numerical study of the effect of friction in single dowel joints. Holz Roh Werkst. Vol. 66, pp. 363–372.
32. **EVS-EN 409:2009.** Puittarindid. Tüübelkinnitusdetailide voolavuspiirile vastava paindemomendi määramine. Naelad. Tallinn: Eesti standardikeskus.
33. **Vermeyden, Ir. P.** (1963). A loading procedure for testing Timber joints. HERON 11. Vol. 2, pp. 41-51.
34. **EVS-EN 13183-1:2002.** Saematerjali üksuse niiskussisaldus. Osa 1: Määramine kuivatusmeetodil. Tallinn: Eesti standardikeskus.
35. **ISO 13061-2:2014.** Physical and mechanical properties of wood. Test methods for small clear wood specimens. Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests. International Organization for Standardization.
36. **Kiviste, A.** (2007). Matemaatiline statistika MS *Exceli* keskkonnas. Tartu, 86 lk.

INFLUENCE OF NUMBER OF LAYERS ON EMBEDMENT STRENGTH OF DOWEL CONNECTIONS FOR GLULAM AND CROSS-LAMINATED TIMBER

SUMMARY

The main objective of this thesis was to study how the number of layers in glued laminated timber and cross-laminated timber affects embedment strength and breaking and to compare the test results with calculated embedment strength values. Six different types of spruce wood test pieces were tested: glued laminated timber and cross-laminated timber test pieces with 3, 5 and 9 layers; 21 pieces of each type, of which 20 were included in the analysis. The tests were carried out without any problems and the objectives of the thesis were fulfilled. The methods specified in standards were followed throughout the process and there were no significant irregularities caused by the test equipment.

In order to solely evaluate the effect of the layers, all other factors influencing embedment strength were kept as constant as possible. The tests were performed with the same dowel and the test pieces were kept in the same climatic conditions for three weeks before testing. In order to achieve an even density, the sawn timber was sorted before making the test pieces. As a result, the difference in density between the test pieces was just 11%. The effect of timber defects on the test results was eliminated by leaving an area free from branch knots and resin channels with a size equal to three times the diameter of the dowel around the fastener.

The maximum difference of the density in the sawn timber was 168 kg/m^3 , but after sorting the difference between the finished test pieces was just 50 kg/m^3 . In order to achieve an even better result, the author recommends sorting the timber according to density and using 80 kg/m^3 as the maximum difference in the sawn timber.

The test results showed that if the difference in density between groups of test pieces with a different number of layers is statistically irrelevant, embedment strength does not vary a great deal. Therefore, it can be said that the number of layers has no effect on embedment strength.

The effect of the number of layers on breaking time is that the higher the number of layers, the later the test pieces broke. During testing, deformations developed up to around 7.3 mm and 90% of the glued laminated timber test pieces with 3 layers, 65% of those with 5 layers and 75% of those with 9 layers broke. The test pieces with 3 layers broke significantly sooner than those with 5 and 9 layers. 5% of the cross-laminated timber test pieces with 3 layers, 10% of those with 5 layers and none of those with 9 layers broke during testing. It was noted that the test pieces broke only during the final phase of the tests. As the number of layers rose, the test results became significantly more unvarying for both glued laminated and cross-laminated timber. The test results of the test pieces with 9 layers were significantly less varying; for example, at a deformation of 4 mm, the difference between the maximum and minimum force was 25% smaller than with test pieces with 3 layers.

When comparing the test results of glued laminated timber and cross-laminated timber, it became evident that embedment strength on average is 19% higher for the former. It can be concluded that layers perpendicular to the outer layer significantly affect embedment strength, but conditions at the edges must also be kept in mind. It could be seen from the breaking pattern that unlike in test pieces with 9 layers, in those with 3 and 5 layers, cracks developed throughout the entire width of the lamella in the perpendicular layers. Greater distance from the edges and a higher number of interlocking layers probably increase embedment strength.

The embedment strength test results were compared with analytical results. The cross-laminated timber test results were compared using the empirical formulas of Blaß and Uibel, wherein one of them took into account the proportion of perpendicular layers and the other one did not. Both formulas produced results which were on average 14% higher than the test results.

The glued laminated timber test results were compared with the values determined using the Eurocode 5 and Swiss standard SIA 265 formulas and the formula suggested by Graz University of Technology. The test results were the most similar with the values found using the SIA 265 formula, which assessed embedment strength to be on average 2% higher. The Graz University of Technology formula assessed embedment strength to be on average 6% higher, while Eurocode 5 assessed it to be 9% higher.

The weak correlation between embedment strength and density seen in the regression analysis can be explained by the very small sample of input parameters. Nevertheless, the comparison with analytical formulas provides a basis for the conclusion that Eurocode 5 assesses embedment strength to be higher than it really is, and in the future an alternative approach should be preferred.

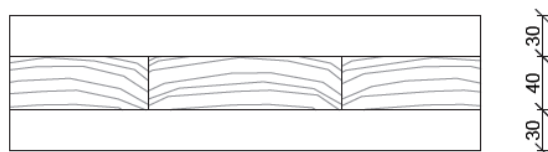
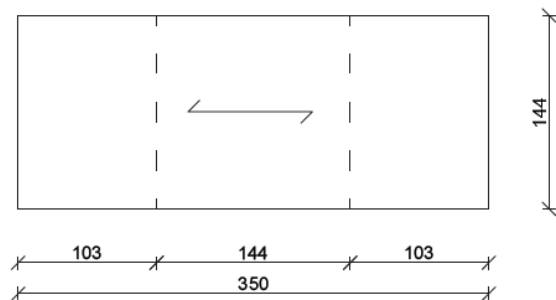
Since the tests were performed without major deviations from the standard, the results could without doubt be taken as a basis for future research related to finding empirical formulas for timber embedment strength.

The author hopes the thesis provides inspiration and ideas for more detailed research in the fastening of cross laminated timber which helps to improve design requirements.

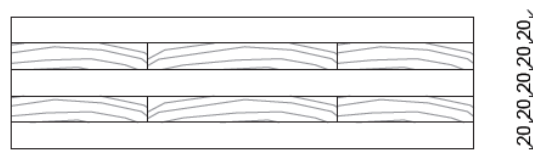
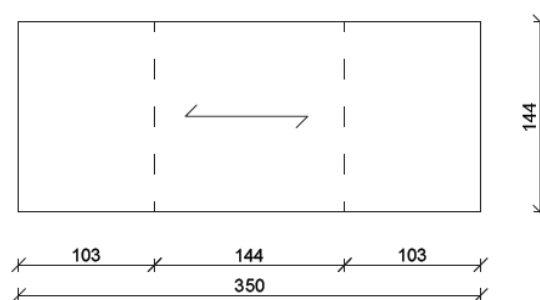
LISAD

Lisa 1. Katsekehade skeemid

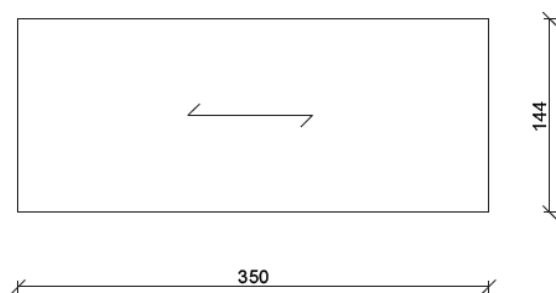
3-kihiline ristkihtpuit



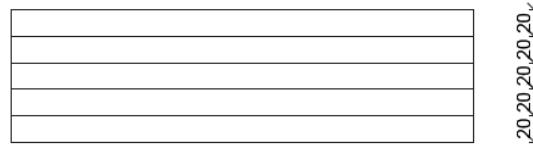
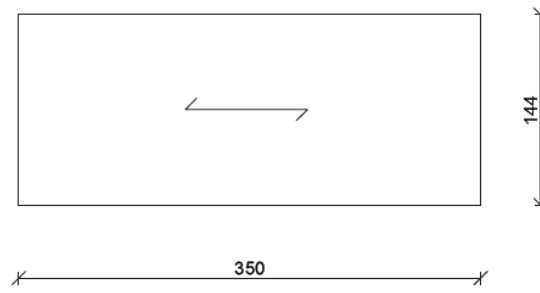
5-kihiline ristkihtpuit



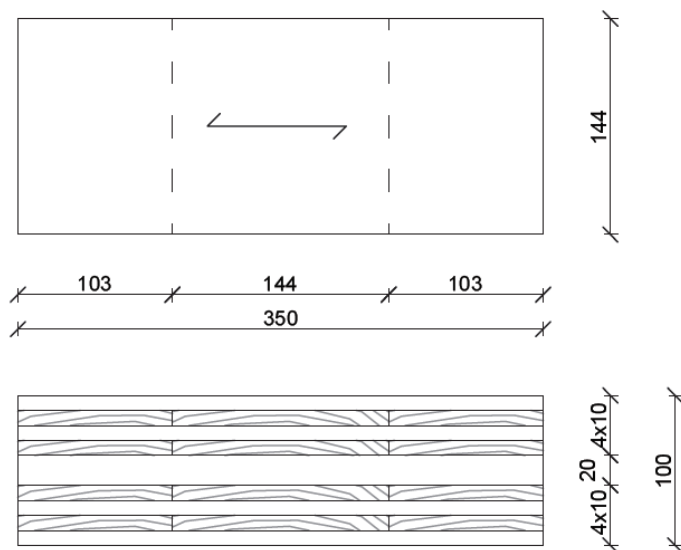
3-kihiline liimpuit



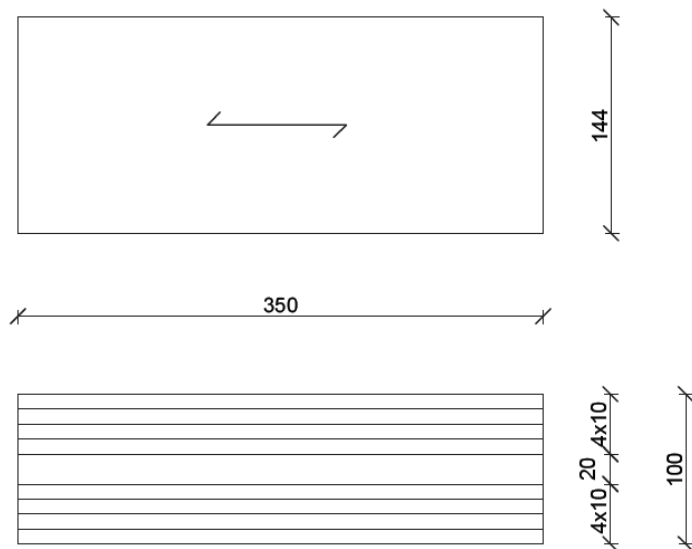
5-kihiline liimpuit



9-kihiline ristkihtpuit



9-kihiline liimpuit



Lisa 2. Purunemisviisi arvutuslik kontroll

Katseskeem on terasest paksude väliselementidega kahelõikeline liide, mille ühe lõikepinna arvutuskandevõime leitakse valemiga 1.8.

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} 0,5 f_{h,2,k} t_2 d & (l) \\ 2,3 \sqrt{M_{y,Rk} f_{h,2,k} d} & (m) \end{cases} \quad (1.8)$$

Katsekehade esialgne keskmine tihedus: $\rho_{alg}=478 \text{ kg/m}^3$

Katsekeha eeldatav paksus: $t_{kk,alg}=100 \text{ mm}$

Terasplaadi paksus: $b_{t,alg}=40 \text{ mm}$

Naagli eeldatav diameeter: $d_{alg}=20 \text{ mm}$

Naagli eeldatav voolavuspiir: $f_{uk}=1200 \text{ N/mm}^2$

Naagli voolavuspiirile vastav paindemoment leitakse valemiga 1.14:

$$M_{y,Rk} = 0,3 f_{uk} d^{2,6}.$$

$$M_{y,Rk} = 0,3 \cdot 1200 \cdot 20^{2,6} = 8,689 \cdot 10^5 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Puidu norm-muljumistugevuse leitakse valemiga 1.10:

$$f_{h,0,k} = 0,082(1 - 0,01d)\rho_{alg}$$

$$f_{h,0,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot 20) \cdot 478 = 31,36 \text{ N/mm}^2$$

Purunemisviisile I vastava kandevõime arvutus:

$$F_{v,Rk,(I)} = 0,5 f_{h,0,k} t_{kk,alg} d_{alg}$$

$$F_{v,Rk,(I)} = 0,5 \cdot 31,36 \cdot 100 \cdot 20 = 31360 \text{ N}$$

Purunemisviisile m vastava kandevõime arvutus:

$$F_{v,Rk,(m)} = 2,3 \sqrt{M_{y,Rk} f_{h,0,k} d_{alg}}$$

$$F_{v,Rk,(m)} = 2,3 \cdot \sqrt{8,689 \cdot 10^5 \cdot 31,36 \cdot 20} = 53693 \text{ N}$$

Antud liide puruneb purunemisviisil I ehk toimub puidu muljumine. Kuna purunemisviisile m vastav kandevõime on 71% suurem purunemisviisi I kandevõimest, võib järeldada, et liide puruneb muljumisele enne kui algavad deformatsioonid naaglis.

Lisa 3. Katsekeha lamellide jäädvustamise skeem

K.K.17.1

K.K.17.1.RKP		K.K.17.1.LP
	B17.1.1	
	B17.3.1	
	B17.5.1	

K.K.18.1

K.K.18.1.RKP		K.K.18.1.LP
	B18.1.1	
	B18.3.1	
	B18.5.1	

K.K.17.2

K.K.17.2.RKP		K.K.17.2.LP
	B17.2.1	
	B17.1.2	
	B17.3.2	
	B17.5.2	
	B17.4.2	

K.K.18.2

K.K.18.2.RKP		K.K.18.2.LP
	B18.1.2	
	B18.2.2	
	B18.3.2	
	B18.5.2	
	B18.4.2	

K.K.17.3

K.K.17.3.RKP		K.K.17.3.LP
	B17.1.3	
	B17.1.4	
	B17.2.3	
	B17.2.4	
	B17.3.3	
	B17.4.3	
	B17.4.4	
	B17.5.3	
	B17.5.4	

K.K.18.3

K.K.18.3.RKP		K.K.18.3.LP
	B18.1.3	
	B18.1.4	
	B18.2.3	
	B18.2.4	
	B18.3.3	
	B18.4.3	
	B18.5.3	
	B18.4.4	
	B18.5.4	

Märkus: Lühendid on seletatud peatükis 2.1.1. Näiteks K.K.17.1.RKP on katsekeha lühend ja B17.1.1 on lamelli number.

Lisa 4. Eeldatav maksimumkoormuse arvutamine

Liimpuitkatsekehade arvutuslik muljumistugevus saadakse valemiga 1.10:

$$f_{h,0,k} = 0,082(1 - 0,01d_{alg})\rho_{alg}$$

$$f_{h,0,k} = 0,082(1 - 0,0120)478 = 31,36 \text{ N/mm}^2$$

Liimpuitkatsekehade eeldatav maksimumjõud leitakse valemiga:

$$F_{max,est,LP} = f_{h,0,k} d_{alg} t_{kk,alg}$$

$$F_{max,est,LP} = 31,36 \cdot 20 \cdot 100 = 62720 \text{ N}$$

Katsekehade esialgne keskmine tihedus: $\rho_{alg}=478 \text{ kg/m}^3$

Katsekeha eeldatav paksus: $t_{kk,alg}=100 \text{ mm}$

Terasplaadi paksus: $b_{t,alg}=40 \text{ mm}$

Naagli eeldatav diameeter: $d_{alg}=20 \text{ mm}$

Ristkihtpuitkatsekehade arvutuslik muljumistugevus leitakse valemiga 1.16:

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

$$f_{h,pred,2} = 0,032(1 - 0,015 \cdot 20)478^{1,20} \left[\frac{60}{100(1,6 \cdot \sin^2 0 + \cos^2 0)} + \frac{40}{100(1,6 \cdot \sin^2 90 + \cos^2 90)} \right]$$

$$f_{h,pred,2} = 28,50 \text{ N/mm}^2$$

Ristkihtpuitkatsekehade eeldatav maksimumjõud leitakse valemiga:

$$F_{max,est,RKP} = f_{h,0,k} d_{alg} t_{kk,alg}$$

$$F_{max,est,RKP} = 28,50 \cdot 20 \cdot 100 = 57000 \text{ N}$$

Lisa 5. Katsetulemused keskmiste koondtabel

		Muljumistugevus, N/mm ²	Tihedus, kg/m ³	Niiskus, %	Purunemise aeg, sek	Siire purunemise ajal, mm
RKP	Keskmine	23,29	459,8	13,8	766,2	4,25
	Mediaan	23,11	461,1	13,8	842,4	4,98
	Standardhälve	1,48	11,5	0,26	141,7	1,27
	Maksimum	26,78	484,2	14,3	861,4	5,00
	Miinumum	19,74	435,3	13,1	398,6	0,91
LP	Keskmine	27,68	463,1	13,6	495,0	1,76
	Mediaan	27,52	463,2	13,6	494,3	1,75
	Standardhälve	1,42	11,9	0,31	45,0	0,42
	Maksimum	30,37	485,2	14,7	640,7	3,14
	Miinumum	24,74	436,9	12,9	422,2	1,11
RKP1	Keskmine	23,08	455,0	13,8	741,3	4,01
	Mediaan	22,95	455,0	13,7	844,8	4,94
	Standardhälve	1,45	11,7	0,28	166,1	1,47
	Maksimum	26,78	474,0	14,2	857,6	5,00
	Miinumum	21,06	435,3	13,3	398,6	0,91
RKP2	Keskmine	22,63	456,7	13,9	741,5	4,05
	Mediaan	22,47	458,5	13,9	837,7	4,96
	Standardhälve	1,46	10,9	0,21	156,3	1,40
	Maksimum	25,26	473,9	14,3	857,1	5,00
	Miinumum	19,74	440,4	13,6	461,7	1,55
RKP3	Keskmine	24,16	467,7	13,7	815,9	4,69
	Mediaan	24,31	468,3	13,7	844,7	4,99
	Standardhälve	1,13	7,5	0,27	80,1	0,75
	Maksimum	26,46	484,2	14,1	861,4	5,00
	Miinumum	22,14	454,4	13,1	532,7	2,14
LP1	Keskmine	27,75	460,4	13,6	490,3	1,71
	Mediaan	27,58	459,7	13,6	496,3	1,72
	Standardhälve	1,43	14,2	0,36	35,8	0,30
	Maksimum	30,37	482,3	14,7	554,2	2,33
	Miinumum	24,79	436,9	12,9	430,9	1,23
LP2	Keskmine	27,17	459,9	13,7	498,5	1,80
	Mediaan	26,98	462,1	13,6	492,3	1,75
	Standardhälve	1,34	10,1	0,28	53,1	0,49
	Maksimum	29,29	478,3	14,4	640,7	3,14
	Miinumum	24,74	440,9	13,3	422,2	1,11
LP3	Keskmine	28,13	469,0	13,49	496,2	1,75
	Mediaan	28,05	467,5	13,49	499,6	1,76
	Standardhälve	1,41	9,1	0,25	46,5	0,45
	Maksimum	30,30	485,2	13,89	614,2	2,91
	Miinumum	25,56	450,7	13,05	431,3	1,13

Lisa 6. 3- ja 9-kihiliste katsekehade purunemispildid



Joonis L6.1. 3-kihilise ristkihtpuidust katsekeha purunemispilt



Joonis L6.2. 3-kihilise liimpuidust katsekeha purunemispilt



Joonis L6.3. 9-kihilise ristkihtpuidust katsekeha purunemispilt



Joonis L6.4. 9-kihilise liimpuidust katsekeha purunemispilt

Lisa 7. Tüüpilised purunemispildid

RKP1



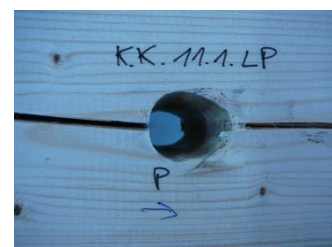
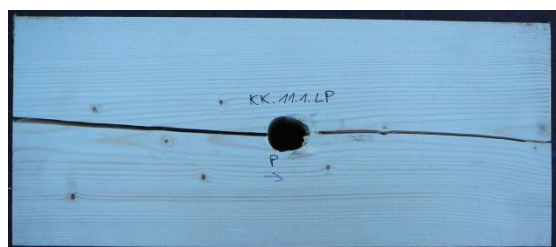
RKP2



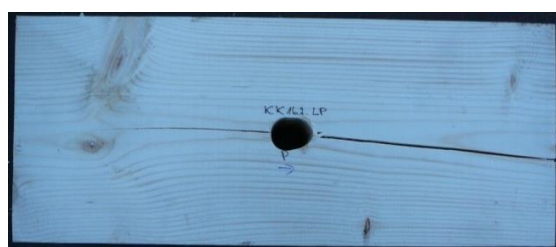
RKP3



LP1



LP2



LP3



Lisa 8. Ristkihtpuidu katsetulemuste võrdlus arvutusvalemitega

Katsekeha	Katseliselt leitud muljumistugevus, N/mm ²	Valemiga 1.15 leitud muljumistugevus, N/mm ²	Erinevus katseliselt leituga, %	Valemiga 1.16 leitud muljumistugevus, N/mm ²	Erinevus katseliselt leituga, %	Katsekeha tihedus, kg/m ³
3-kihilised katsekehad						
KK_1_1_R	24,46	26,39	-7	26,25	-7	446,4
KK_2_1_R	21,97	27,64	-21	27,54	-20	464,6
KK_3_1_R	25,53	27,31	-7	27,21	-6	459,8
KK_4_1_R	21,70	25,77	-16	25,62	-15	437,3
KK_6_1_R	22,19	26,97	-18	26,86	-17	454,9
KK_7_1_R	23,52	27,72	-15	27,62	-15	465,7
KK_8_1_R	22,92	27,69	-17	27,59	-17	465,3
KK_9_1_R	23,12	26,12	-11	25,98	-11	442,5
KK_10_1_R	23,47	27,29	-14	27,18	-14	459,4
KK_11_1_R	23,90	28,29	-16	28,22	-15	474,0
KK_12_1_R	22,98	28,20	-19	28,12	-18	472,7
KK_13_1_R	21,06	26,71	-21	26,59	-21	451,1
KK_14_1_R	24,73	28,18	-12	28,09	-12	472,3
KK_15_1_R	22,02	26,68	-17	26,55	-17	450,6
KK_16_1_R	26,78	26,57	1	26,44	1	449,1
KK_17_1_R	22,21	27,17	-18	27,06	-18	457,8
KK_18_1_R	22,07	26,98	-18	26,87	-18	455,0
KK_19_1_R	22,44	26,17	-14	26,03	-14	443,1
KK_20_1_R	23,11	25,63	-10	25,48	-9	435,3
KK_21_1_R	21,34	26,20	-19	26,06	-18	443,7

Märkus: Valem 1.15 arvestab ja 1.16 ei arvesta ristkihtpuidus risti ja piki paiknevate lamellide omavahelist suhet.

Katsekeha	Katseliselt leitud muljumistugevus, N/mm ²	Valemiga 1.15 leitud muljumistugevus, N/mm ²	Erinevus katseliselt leituga, %	Valemiga 1.16 leitud muljumistugevus, N/mm ²	Erinevus katseliselt leituga, %	Katsekeha tihedus, kg/m ³
5-kihilised katsekehad						
KK_1_2_R	21,97	26,06	-16	25,91	-15	441,5
KK_2_2_R	21,45	27,01	-21	26,89	-20	455,4
KK_3_2_R	22,52	26,57	-15	26,44	-15	449,0
KK_4_2_R	22,97	27,32	-16	27,21	-16	460,0
KK_6_2_R	25,08	27,62	-9	27,53	-9	464,3
KK_7_2_R	24,56	28,29	-13	28,21	-13	473,9
KK_8_2_R	22,27	27,12	-18	27,01	-18	457,0
KK_9_2_R	21,10	27,94	-24	27,85	-24	468,9
KK_10_2_R	21,80	27,52	-21	27,42	-20	462,8
KK_11_2_R	25,26	28,13	-10	28,05	-10	471,6
KK_12_2_R	23,49	27,60	-15	27,50	-15	463,9
KK_13_2_R	22,42	27,59	-19	27,49	-18	463,8
KK_14_2_R	22,84	27,93	-18	27,84	-18	468,7
KK_15_2_R	22,98	26,94	-15	26,82	-14	454,3
KK_16_2_R	24,90	26,06	-4	25,91	-4	441,5
KK_17_2_R	22,62	26,36	-14	26,23	-14	446,0
KK_18_2_R	19,74	25,98	-24	25,83	-24	440,4
KK_19_2_R	22,14	26,17	-15	26,03	-15	443,2
KK_20_2_R	21,43	27,43	-22	27,33	-22	461,6
KK_21_2_R	21,05	26,36	-20	26,22	-20	445,9

Märkus: Valem 1.15 arvestab ja 1.16 ei arvesta ristkihtpuidus risti ja piki paiknevate lamellide omavahelist suhet.

Katsekeha	Katseliselt leitud muljumistugevus, N/mm ²	Valemiga 1.15 leitud muljumistugevus, N/mm ²	Erinevus katseliselt leituga, %	Valemiga 1.16 leitud muljumistugevus, N/mm ²	Erinevus katseliselt leituga, %	Katsekeha tihedus, kg/m ³
9-kihilised katsekehad						
KK_1_3_R	24,68	27,27	-12	27,16	-12	459,2
KK_2_3_R	22,14	27,37	-19	27,26	-18	460,6
KK_3_3_R	24,92	28,67	-10	28,61	-10	479,5
KK_4_3_R	22,93	28,30	-20	28,22	-20	474,0
KK_6_3_R	23,17	28,01	-18	27,92	-18	469,9
KK_7_3_R	25,45	28,08	-7	28,00	-7	471,0
KK_8_3_R	26,46	27,97	-4	27,88	-4	469,3
KK_9_3_R	24,25	27,31	-14	27,20	-14	459,7
KK_10_3_R	25,44	29,00	-8	28,95	-8	484,2
KK_11_3_R	25,19	28,25	-7	28,17	-6	473,4
KK_12_3_R	24,36	27,88	13	27,79	-12	468,1
KK_13_3_R	24,81	27,91	10	27,82	-9	468,5
KK_14_3_R	23,28	28,16	-17	28,08	-17	472,1
KK_15_3_R	23,63	27,48	-19	27,38	-18	462,2
KK_16_3_R	24,54	27,59	-12	27,49	-12	463,9
KK_17_3_R	23,46	26,94	-16	26,82	-16	454,4
KK_18_3_R	22,50	28,38	-18	28,31	-17	475,3
KK_19_3_R	25,23	27,64	-11	27,54	-11	464,6
KK_20_3_R	23,57	27,36	-14	27,25	-13	460,5
KK_21_3_R	23,26	27,56	-17	27,46	-17	463,3

Märkus: Valem 1.15 arvestab ja 1.16 ei arvesta ristkihtpuidus risti ja piki paiknevate lamellide omavahelisest suhtest.

Lisa 9. Liimpuidu katsetulemuste võrdlus arvutusvalemitega

Katsekeha	Katseliselt leitud muljumistugevus, N/mm ²	Valemiga 1.10 leitud muljumistugevus, N/mm ²	Erinevus katseliselt leituga, %	Valemiga 1.13 leitud muljumistugevus, N/mm ²	Erinevus katseliselt leituga, %	Valemiga 1.14 leitud muljumistugevus, N/mm ²	Erinevus katseliselt leituga, %	Katsekeha tihedus, kg/m ³
3-kihilised katsekehad								
KK_1_1_L	30,37	29,51	3	27,45	11	28,68	6	449,5
KK_2_1_L	27,19	30,09	-10	27,99	-3	29,25	-7	458,4
KK_3_1_L	27,44	29,63	-7	27,56	0	28,80	-5	451,3
KK_4_1_L	28,58	29,83	-4	27,75	3	29,00	-1	454,5
KK_6_1_L	27,19	30,26	-10	28,15	-3	29,41	-8	460,9
KK_7_1_L	28,24	30,89	-9	28,74	-2	30,03	-6	470,6
KK_8_1_L	29,12	31,66	-8	29,45	-1	30,78	-5	482,3
KK_9_1_L	28,15	30,84	-9	28,69	-2	29,98	-6	469,9
KK_10_1_L	29,87	30,73	-3	28,58	5	29,87	0	468,1
KK_11_1_L	29,34	31,48	-7	29,29	0	30,60	-4	479,6
KK_12_1_L	29,18	31,55	-8	29,35	-1	30,67	-5	480,7
KK_13_1_L	26,24	29,35	-11	27,30	-4	28,53	-8	447,1
KK_14_1_L	27,67	31,49	-12	29,30	-6	30,61	-10	479,8
KK_15_1_L	26,06	30,97	-16	28,81	-10	30,10	-13	471,8
KK_16_1_L	28,54	29,42	-3	27,37	4	28,60	0	448,2
KK_17_1_L	26,67	29,04	-8	27,01	-1	28,23	-6	442,4
KK_18_1_L	26,32	30,32	-13	28,20	-7	29,47	-11	461,9
KK_19_1_L	27,49	29,52	-7	27,46	0	28,69	-4	449,7
KK_20_1_L	26,61	28,68	-7	26,68	0	27,88	-5	436,9
KK_21_1_L	24,79	29,13	-15	27,10	-9	28,32	-12	443,9

Märkus: Valem 1.10 on Eurokoodeks 5, valem 1.13 SIA 265 ja valem 1.14 Graz'i Tehnikaülikooli väljapakutud muljumistugevuse arvutusvalem.

Katsekeha	Katseliselt leitud muljumistugevus, N/mm ²	Valemiga 1.10 leitud muljumistugevus, N/mm ²	Erinevus katseliselt leituga, %	Valemiga 1.13 leitud muljumistugevus, N/mm ²	Erinevus katseliselt leituga, %	Valemiga 1.14 leitud muljumistugevus, N/mm ²	Erinevus katseliselt leituga, %	Katsekeha tihedus, kg/m ³
5-kihilised katsekehad								
KK_1_2_L	26,58	29,53	-10	27,47	-3	28,70	-7	449,9
KK_2_2_L	27,45	29,84	-8	27,76	-1	29,00	-5	454,6
KK_3_2_L	26,58	29,64	-10	27,57	-4	28,81	-8	451,5
KK_4_2_L	28,07	30,33	-7	28,22	-1	29,48	-5	462,1
KK_6_2_L	29,29	30,79	-5	28,64	2	29,93	-2	469,1
KK_7_2_L	27,64	30,73	-10	28,59	-3	29,87	-7	468,2
KK_8_2_L	26,73	31,04	-14	28,87	-7	30,17	-11	472,8
KK_9_2_L	27,75	30,41	-9	28,29	-2	29,56	-6	463,4
KK_10_2_L	26,76	30,40	-12	28,28	-5	29,55	-9	463,1
KK_11_2_L	29,17	31,40	-7	29,21	0	30,52	-4	478,3
KK_12_2_L	27,12	30,21	-10	28,11	-3	29,37	-8	460,3
KK_13_2_L	29,08	30,33	-4	28,22	3	29,48	-1	462,1
KK_14_2_L	26,83	30,53	-12	28,40	-6	29,67	-10	465,1
KK_15_2_L	27,26	30,95	-12	28,79	-5	30,09	-9	471,5
KK_16_2_L	29,07	29,38	-1	27,39	6	28,56	2	447,5
KK_17_2_L	26,67	29,79	-10	27,71	-4	28,96	-8	453,9
KK_18_2_L	24,89	30,45	-18	28,32	-12	29,59	-16	463,8
KK_19_2_L	26,39	29,00	-9	26,98	-2	28,19	-6	441,8
KK_20_2_L	24,74	30,04	-18	27,95	-11	29,20	-15	457,7
KK_21_2_L	25,27	28,94	-13	26,92	-6	28,13	-10	440,9

Märkus: Valem 1.10 on Eurokoodeks 5, valem 1.13 SIA 265 ja valem 1.14 Graz'i Tehnikaülikooli väljapakutud muljumistugevuse arvutusvalem.

Katsekeha	Katseliselt leitud muljumistugevus, N/mm ²	Valemiga 1.10 leitud muljumistugevus, N/mm ²	Erinevus katseliselt leituga, %	Valemiga 1.13 leitud muljumistugevus, N/mm ²	Erinevus katseliselt leituga, %	Valemiga 1.14 leitud muljumistugevus, N/mm ²	Erinevus katseliselt leituga, %	Katsekeha tihedus, kg/m ³
9-kihilised katsekehad								
KK_1_3_L	27,15	29,96	-9	27,87	-3	29,12	-7	456,4
KK_2_3_L	26,87	30,59	-12	28,46	-6	29,74	-10	466,1
KK_3_3_L	28,16	30,63	-8	28,50	-1	29,77	-5	466,7
KK_4_3_L	28,67	30,25	-5	28,14	2	29,40	-2	460,8
KK_6_3_L	28,80	31,51	-9	29,32	-2	30,63	-6	480,1
KK_7_3_L	29,07	31,13	-7	28,96	0	30,26	-4	474,2
KK_8_3_L	30,23	31,41	-4	29,22	3	30,53	-1	478,5
KK_9_3_L	30,30	31,49	-4	29,30	3	30,61	-1	479,8
KK_10_3_L	29,64	31,57	-6	29,37	1	30,68	-3	480,9
KK_11_3_L	28,93	31,06	-7	28,89	0	30,19	-4	473,1
KK_12_3_L	27,95	30,91	-10	28,76	-3	30,05	-7	471,0
KK_13_3_L	29,31	31,85	-8	29,63	-1	30,96	-5	485,2
KK_14_3_L	26,99	30,53	-12	28,40	-5	29,68	-9	465,1
KK_15_3_L	27,77	30,75	-10	28,60	-3	29,89	-7	468,4
KK_16_3_L	27,56	31,06	-11	28,90	-5	30,19	-9	473,2
KK_17_3_L	27,02	30,27	-11	28,16	-4	29,42	-8	461,1
KK_18_3_L	25,83	30,52	-15	28,39	-9	29,67	-13	465,0
KK_19_3_L	29,99	30,33	-1	28,21	6	29,48	2	462,0
KK_20_3_L	26,88	30,30	-11	28,18	-5	29,45	-9	461,5
KK_21_3_L	25,56	29,59	-14	27,52	-7	28,76	-11	450,7

Märkus: Valem 1.10 on Eurokoodeks 5, valem 1.13 SIA 265 ja valem 1.14 Graz'i Tehnikaülikooli väljapakutud muljumistugevuse arvutusvalem.

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

Mina, Joosep Mölder,
sünniaeg 02.01.1990,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö Liim- ja ristkihtpuidu kihtide arvu mõju muljumistugevusele naagelliites, mille juhendajad on Marko Teder ja Eero Tuhkanen,
 - 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
 - 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
 - 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemisekskuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor

allkiri

Tartu, 1.06.2015

Juhendajate kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)