



EESTI MAAÜLIKOOL  
Metsandus- ja maaehitusinstituut

**Lauri Ütsik**

**KUUSE (*PICEA ABIES*) JA MÄNNI (*PINUS SYLVESTRIS*)  
KONSTRUKTSIOONIPUIDU TUGEVUSSORTEERIMINE  
ERINEVATE MEETODITEGA**

INVESTIGATION OF SPRUCE (*PICEA ABIES*) AND PINE  
(*PINUS SYLVESTRIS*) STRUCTURAL TIMBER WITH  
DIFFERENT STRENGTH GRADING METHODS

Magistritöö  
Maaehituse õppekava

Juhendaja: lektor Marko Teder, *MSc*

Tartu 2015

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Magistritöö lühikokkuvõte	
Autor: Lauri Ütsik		Õppekava: Maaehitus	
Pealkiri: Kuuse ( <i>Picea abies</i> ) ja männi ( <i>Pinus sylvestris</i> ) konstruktsioonipuidu tugevussorteerimine erinevate meetoditega			
Lehekülgi: 76	Jooniseid: 34	Tabeleid: 14	Lisasid: 6
Osakond:	Maaehituse osakond		
Uurimisvaldkond:	Puidu tugevussorteerimine		
Juhendaja:	Marko Teder		
Kaitsmiskoht ja aasta:	Tartu, 2015		
<p>Käesolevas magistritöös käsitletakse erinevaid tugevussorteerimise meetodeid. Töö eesmärgiks oli võrrelda visuaalse tugevussorteerimise tulemusi masintugevussorteerimiste tulemustega ning kontrollida neid purustaval meetodil saadud paindekatsede tulemustega kuuse- ja männipuidust elementide näitel.</p> <p>Puidu füüsikalise-mehaanilised omadused määrati vastavalt standardile laboratoorselt. Visuaalne tugevussorteerimine viidi läbi standardi NS-INSTA 142:2009 alusel. Masinsorteerimisel kasutati seadmeid <i>Timber Grader MTG</i> ja <i>Fakopp Microsecond Timer</i>. Viimasega teostati puitelementide mõõtmised otsesel ja kaudsel meetodil.</p> <p>Tulemused sõltusid valitud meetodist, masintugevussorteerimise puhul katseseadmest ning puuliigist. Kõige tugevamad seosed saadi purustaval paindekatsel mõõdetud staatilise elastsusmooduli ja <i>Timber Grader</i> seadmega mõõdetud staatilise elastsusmooduli vahel; korrelatsioon männipuidust katsekehadel <math>r=0,96</math> ja kuusepuidust katsekehadel <math>r=0,90</math>. Tugevaid seoseid andis <i>Fakopp</i> seade otseste mõõtmiste korral männipuidust katsekehadel (<math>r=0,70...0,85</math>). Kuusepuidust katsekehade puhul saadi otsestel mõõtmistel keskmised seosed (<math>r=0,68...0,69</math>). Visuaalsel tugevussorteerimisel ilmnes suur valedesse tugevusklassidesse sorteeritud katsekehade arv.</p> <p>Kokkuvõtvalt võib uurimustöö põhjal öelda, et tugevussorteerimise korral on vajalik katsekehadele tulemusi vaadata puuliigipõhiselt. Kindlasti on selles valdkonnas vaja jätkata lisauuringute tegemisega.</p>			
Märksõnad: visuaalne tugevussorteerimine, masintugevussorteerimine, elastsusmoodul			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		<b>Abstract of Master's Thesis</b>	
Author: Lauri Ütsik		Specialty: Rural Building	
Title: Investigation of spruce ( <i>Picea abies</i> ) and pine ( <i>Pinus sylvestris</i> ) structural timber with different strength grading methods			
Pages: 76	Figures: 34	Tables: 14	Appendixes: 6
Department:		Department of Rural Building	
Field of research:		Timber strength grading	
Supervisor:		Marko Teder	
Place and date:		Tartu, 2015	
<p>The present master thesis takes under observation the investigation of wood strength grading methods. The purpose of this work is to compare visual strength grading with machine strength grading and verification of these results by destructive tests with spruce and pine wood elements as an example.</p> <p>The physical-mechanical properties of wood were determined in laboratory conditions according to the standard. Visual strength grading were determined according to the standard NS-INSTA 142:2009. In machine strength grading were carried out using devices like <i>Timber Grader MTG</i> and <i>Fakopp Microsecond Timer</i>. The measurements were performed from the elements using direct and indirect methods.</p> <p>Results were dependent by the method chosen, machine strength grading by the test device and by the wood species. The strongest links were obtained to the destructively measured static bending modulus of elasticity and the <i>Timber Grader</i> static modulus of elasticity measured between the device; correlation in pine test species was <math>r=0,96</math> and <math>r=0,90</math> in test species of spruce. Strong correlation was between the device <i>Fakopp</i> direct measurements of the pine test species (<math>r=0,70...0,85</math>). Spruce wood test species were obtained by direct measurements of the medium correlation (<math>r=0,68...0,69</math>). Huge amount wrong strength classes were created in visual strength grading.</p> <p>In conclusion, that the strength of the sort depends on the type of wood. The weakest results revealed in visual strength grading and the strongest results were in machine strength grading.</p>			
Keywords: visual strength grading, machine strength grading, modulus of elasticity			

# SISUKORD

SISSEJUHATUS .....	6
1. ÜLEVAADE KIRJANDUSEST .....	8
1.1. Puidu ehitus .....	8
1.1.1. Makroskoopiline ehitus .....	8
1.1.3. Mikroskoopiline ehitus .....	9
1.1.3. Keemiline koostis .....	11
1.2. Puidu füüsikalise-mehaanilised omadused.....	12
1.2.1. Tihedus .....	12
1.2.2. Niiskus .....	13
1.2.3. Akustilised omadused.....	15
1.2.4. Paindetugevus .....	16
1.3. Tugevussorteerimise meetodid .....	17
1.3.1. Visuaalne tugevussorteerimine.....	17
1.3.2. Masintugevussorteerimine.....	18
1.4. Eelnevalt tehtud sarnased uuringud Eesti Maaülikoolis.....	21
1.5. Eelnevalt tehtud sarnased välismaised uuringud .....	22
2. METOODIKA .....	24
2.1. Katsekehade valmistamine .....	24
2.2. Katsekehade füüsikaliste omaduste määramine .....	26
2.2.1. Niiskussisalduse määramine.....	26
2.2.2. Tiheduse määramine.....	27
2.3. Visuaalne tugevussorteerimine.....	29
2.4. Mõõtmised <i>Fakopp Microsecond Timeri</i> 'ga.....	29
2.5. Mõõtmised <i>Brookhuis Timber Grader MTG</i> 'ga .....	32
2.6. Tugevusparameetrite määramine purustava paindekatsega .....	33
2.7. Statistiline andmetöötlus.....	35
3. TULEMUSED JA ARUTELU .....	37
3.1. Katsekehade füüsikalise-mehaaniliste parameetrite ülevaade .....	37
3.2. Visuaalse tugevussorteerimise tulemused ja võrdlus paindekatse tulemustega .....	40
3.3. Katsekehade statistilised karakteristikud.....	43
3.3.1. Väikeste katsekehade peamised statistilised karakteristikud.....	43
3.3.2. Suurte katsekehade peamised statistilised karakteristikud .....	45

3.4. Katsekehade heli kiiruste analüüs.....	47
3.4.1. Väikeste katsekehade heli kiiruste analüüs .....	47
3.4.2. Suurte katsekehade heli kiiruste analüüs .....	48
3.5. Erinevate tunnuste korrelatsioonimaatriksid .....	50
3.5.1. Väikeste katsekehade erinevate tunnuste korrelatsioonimaatriksid .....	50
3.5.2. Suurte katsekehade erinevate tunnuste korrelatsioonimaatriksid.....	53
3.6. <i>Timber Grader'i</i> tulemuste analüüs.....	56
3.7. Elastsusmoodulite prognoos .....	59
KOKKUVÕTE .....	62
KASUTATUD KIRJANDUS .....	64
SUMMARY .....	67
LISAD .....	69
Lisa 1. Männipuidust katsekehade mõõtmistulemused .....	70
Lisa 2. Kuusepuidust katsekehade mõõtmistulemused .....	71
Lisa 3. Männipuidust katsekehade keskmiste tunnuste tabel .....	72
Lisa 4. Kuusepuidust katsekehade keskmiste tunnuste tabel .....	73
Lisa 5. Männipuidust katsekehade elastsusmoodulite andmed .....	74
Lisa 6. Kuusepuidust katsekehade elastsusmoodulite andmed .....	75

## SISSEJUHATUS

Puit on anisotroopne looduslik orgaaniline materjal, mida on ehituseks kasutatud juba tuhandeid aastaid. Puidu mitmekesisust ehitusmaterjalina iseloomustab kasutusvõimaluste rohkus nii kandetarindites kui ka viimistlusmaterjalina. Puit on kõrgelt hinnatud ehitusmaterjal Kesk-Euroopas, Põhja-Ameerikas, Jaapanis, Uus-Meremaal ning Austraalias. Puit on eelistatud eelkõige keskkonnasõbralikkuse ja kerge kättesaadavuse tõttu, mida saab peale kasutamist keskkonda kahjustamata ökoloogilisse ringkäiku tagasi suunata. Puidu kasutamine ehituses on järk-järgult tõusmas. Näiteks on Ameerika Ühendriikides ligi 90% kõigist ühe- kuni viiekorruselistest elumajadest ehitatud puidust. Eestis on see näitaja kordades madalam [1].

Puidul on palju positiivseid ehitustehnilisi omadusi. Headeks omadusteks on: suhteliselt suur tugevus mahukaalu kohta, vähetundlikkus keemilistele mõjutustele, väike soojusjuhtivus, hea töödeldavus ning lai levik. Ka lineaarpaisumise tegur väike, mistõttu on temperatuurist tingitud pinged staatikaga määrata konstruktsioonides tühised ja neid ei arvestata. Hea vastupidavus tsüklilisele koormamisele dünaamiliste löökidega võimaldab puidu kasutamist sildade ehitamisel ja maavärinaohtlikes piirkondades. Puidust on võimalik liimida praktiliselt igasuguste ristlõigete ja pikkusega nii sirg- kui ka kõverjoonelisi elemente. Puidul on ka rida puudusi, neist olulisemad on: tuletundlikkus, anisotroopsus, hügrooskoopsus, mahumuutus niiskuse hulga muutudes, mädanevus ja riknevus liigniiskuse ja bioloogiliste tegurite toimele [2].

Eesti metsade tagavarast moodustas 2013. aastal hariliku männi puit 30,3% ja hariliku kuuse puit 23,4%, mis on ka enamlevinumad puuliigid Eestis [3]. Samuti on kuuse- ja männipuit Eestis ehituses enim kasutatavad puuliigid, kuna vaigune okaspuit on meie kliimas vastupidavaim. Seetõttu sai uurimistöö katsekehad valitud just kuuse- ja männipuidust.

Kõige täpsemalt saab puidu mehaanilisi omadusi määrata purustavate meetoditega. Olulisemad neist on surve-, tõmbe- ja paindekatse. Antud meetodite kasutamise korral

katsetatavad elemendid saavad kahjustada või lausa purustatakse [4]. Selleks, et hilisemalt kasutada katsetatavaid elemente, tuleb puidu mehaaniliste omaduste hindamiseks kasutada mittepurustavatel meetoditel põhinevat sorteerimist. Tugevussorteerimine võib toimuda kahel viisil – visuaalselt ja/või masinsorteerimisena [5, 6].

Antud töö eesmärgiks on võrrelda visuaalse tugevussorteerimise tulemusi masintugevussorteerimiste tulemustega ning kontrollida neid purustaval meetodil saadud paindekate tulemustega kuuse- ja männipuidust elementide näitel.

Uurimustöö ülesandeks oli katsekehade visuaalne tugevussorteerimine vastavalt NS-INSTA 142:2009 [7] standardile, seejärel teostati heli levimise aja mõõtmised viiel viisil, kasutades *Fakopp Microsecond Timer*'it. Edasi teostati katsekehade tugevussorteerimine *Brookhuis Timber Grader MTG*'ga. Viimaks määrati katsekehade omadused purustava katsega Eesti Maaülikooli maaehituse osakonna ehituskonstruksioonide laboris katsepressi *Lukas 250 kN* abil ning aluseks võeti Eesti standard EVS-EN 408:2010+A1:2012 [8].

Uurimistöö esimeses peatükis esitatakse ülevaade puidu ehitusest ja tähtsamatest füüsikalise-mehaanilistest omadustest ning lühikokkuvõtteid sarnastel teemadel tehtud uurimustest. Teises osas kirjeldatakse uurimustöös kasutatavaid puitmaterjale ning nende töötlemist katsekehadeks, katsetamise ja statistilise andmetöötluse meetodikaid ja kasutatavaid katseseadmeid. Kolmandas osas analüüsitakse saadud tulemusi ja võrreldakse varasemate uuringutega.

Lõputöö autor tänab lisaks oma juhendajale Martti-Jaan Miljanit, kes oli abiks paindekate läbiviimisel, Regino Kaske katsekehade valmistamise juhendamise eest ning AS Tiksoja Puidugrupi kollektiivi katsekehade kuivatamise ja kalibreerimise eest.

# **1. ÜLEVAADE KIRJANDUSEST**

## **1.1. Puidu ehitus**

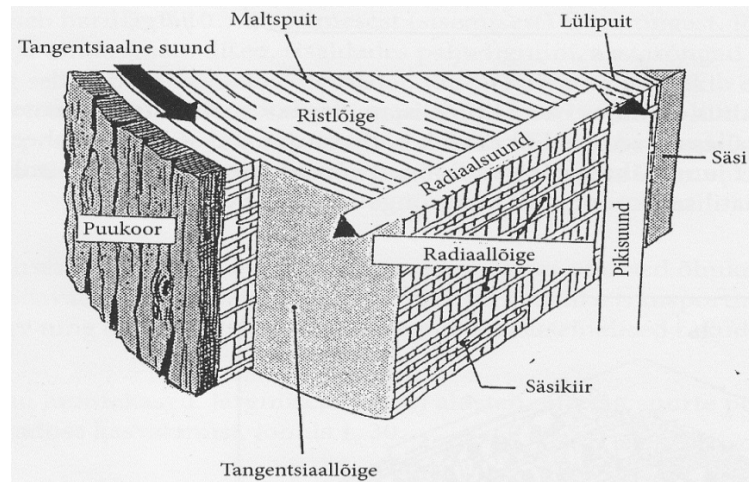
Puit on keerulise ehitusega, paljudest keemilistest elementidest ja erinevatest rakutüüpidest koosnev bioloogiline materjal. Selleks, et mõista paremini puidu füüsikalisi, mehaanilisi, keemilisi, bioloogilisi ja tehnoloogilisi omadusi, peavad meil olema teadmised puidu ehitusest [6].

### **1.1.1. Makroskoopiline ehitus**

Makroskoopilise ehituse all mõistetakse puuliigile omaseid iseärasusi, mille järgi on võimalik eristada puitu väliste tunnuste põhjal. Puidu määramisel eristatakse põhi- ja abitunnuseid. Põhitunnusteks on: malts- ja lülipuidu esinemine, aastarõngaste piirjoonte nähtavus, aastarõngaste vara- ja hilispuidu eristatavus, säsi kiirte nähtavus ja suurus, vaigukäigud, säsi, väärsäsi ning koor. Abitunnused näitavad puidu mõningaid füüsikalisi omadusi, milleks on: värvus, lõhn, läige, tekstuur, tihedus. Samuti kuuluvad abitunnuste hulka puidu mehaanilised omadused: kõvadus ja lõhestatavus [9].

Puit on anisotroopne materjal, see tähendab, et tema omadused on eri suundades erinevad. Puidu makroskoopilisel määramisel uuritakse tema tunnuseid kolmel lõikel – radiaal-, tangentsiaal- ja pikisuunal (vt joonis 1). Pikisuunaks nimetatakse suunda puidukiudude pikisuunas. Radiaalsuunaks nimetatakse suunda tüve keskelt säsi puu väliskihtide suunal ning tangentsiaalsuunaks piki aastarõngaid läbivat suunda. Puutüve ristlõikes võime selgesti eristada järgmist: säsi (keskel), aastarõngaid, koort, tumedamat siseosa ehk lülipuitu ning heledamat välisosa ehk maltspuitu [10].





**Joonis 1.** Puit kolmes lõikes [10]

Harilik mänd (*Pinus sylvestris*) on lülipuiduline okaspuuliik. Männipuidul on selgelt eristatav tumedam maltspuit ja heledam lülipuit. Maltspuit on värvuselt nõrgalt kollakas- või punavalge ning ta koosneb vedelikke juhtivatest rakkudest. Lülipuit on värvuselt punakas või punakaspruun ning ta koosneb surnud rakkudest. Männil on lülipuidu ja maltspuidu üleminek selgelt eristatav. Välisel vaatlusel on männil aastarõngad hästi nähtavad ja selgelt eristatavad, säsikiired ristlõikes palja silmaga nähtavad ei ole. Vaigukäike on rohkesti, need esinevad ristlõikes valgete täppidena, pikilõhedes heledate joontena. Abitunnusena võib esile tuua männile iseloomulikku lõhna, mis on tingitud puidu eeterlikest õlidest, park- ja vaikainetest. Kuivamisel lõhn kaob [9, 11].

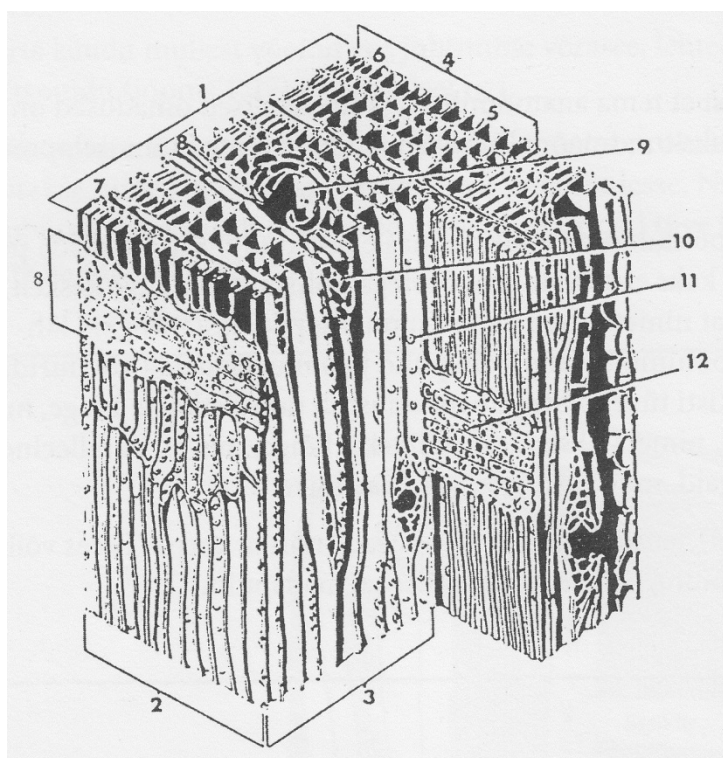
Harilik kuusk (*Picea abies*) on küpsuiduline okaspuu. Küpsuiduliseks nimetatakse puuliigi juhtu, kui sisepuu erineb välispuidust väiksema niiskussisalduse poolest, kuid värvus on kogu ristlõike ulatuses ühesugune. Kuuse välispuidu ja küpsuidu eristamine on väga raske, sageli koguni võimatu. Värvuselt on kuusepuu valge, helekollaka varjundiga, nõrgalt läikiv. Aastarõngad on hästi nähtavad ning sügisene tumedam osa on heledamast kevadisest osast selgesti eristatav. Säsikiired ei ole palja silmaga nähtavad üheski lõikes. Vaigukäike on vähe, need esinevad ristlõikes hajutatult valgete täppidena, pikilõikes tumedamate joontena [9, 10].

### 1.1.3. Mikroskoopiline ehitus

Mikroskoobi abil on võimalik selgitada puidu ehituse omapärasusi. Selleks on vaja vaadelda puidu ehitust rist-, radiaal- ja tangentsiaallõikes. Puit koosneb mitut liiki rakkudest

ja nende kogumikest, mis on omavahel tihedalt ühendatud ja moodustavad puidu anatoomilised elemendid. Neid elemente võib jagada järgmiselt: trahheiidid, parenhüümid, säsiikiired ja vaigukäigud [9, 10].

Trahheiidide osakaal okaspuidus on 90...95%. Trahheiidid on piklikud, otstest teravakujulised rakud. Tüve ristlõikes moodustavad need rakud radiaalsuunalisi ridasid, mille ülesandeks on anda puule mehaanilist tuge ning olla toitelahuseid juhtivaks organiks. Neid rakke nimetatakse ka puidu kiududeks. Trahheiidide suurus muutub olenevalt puuliigist, puu vanusest ja kasvukoha iseärasustest. Trahheiidide arv ristlõikes ulatub ca 1000...2000 tk/mm<sup>2</sup>. Trahheiidide keskmine pikkus kuusel on 3...4 mm ja männil 2...3 mm. Trahheiidide radiaalseintes asuvad koobaspoorid (vt joonis 2), mis võimaldavad mahlade liikumist külgnevatesse rakkudesse [10].



**Joonis 2.** Okaspuu puidu mikroskoopiline ehitus. 1 – ristlõige; 2 – radiaallõige; 3 – tangentsiaallõige; 4 – aastarõngas; 5 – kevadpuit; 6 – sügispuit; 7 – säsiikiir; 8 – säsiikiir; 9 – vertikaalne vaigukäik; 10 – horisontaalne vaigukäik; 11 – koobaspoor; 12 – lihtpoor [12]

Lisaks koosneb okaspuu puit veel parenhüüm-rakkudest, mida leidub peamiselt säsiikiirtes, kus nad eritavad vaiku. Nende rakkude seinad on õhukesed ja varustatud paljude pooridega. Antud elusrakkude sisuks on tavaliselt protoplasma ja rakumahl, samuti veel

ainevahetusega saadud tärklis, rasvad, polüsahhariidid, vaigud ja parkained. Teatavasti on parkainetel antiseptilised omadused, mis takistavad puidu nakatumist seenhaigustesse ja puidu seenhaiguste levikut [10, 11].

Okaspuudel esineb ühe- ja mitmerealisi säsiikiiri, viimastes asuvad ka horisontaalsed vaigukäigud. Säsiikiired koosnevad lühikestest õhukeseseinalistest elusrakkudest ehk parenhüüm-rakkudest, mille ülesandeks on juhtida vett ja toitu tüve sisemusse ning nende säilitamine. Lülipuidu tekkimisel säsiikiired ummistuvad ja rakud surevad [10, 11].

Vaigukäik koosneb kanalist ja seda ümbritsevad parenhüüm-rakud. Vaigukäigud paiknevad nii vertikaalselt kui ka horisontaalselt. Vertikaalsed vaigukäigud on trahheiidide vahel, horisontaalsed vaigukäigud asuvad säsiikiirtes. Vertikaalse vaigukäigu kanali moodustavad eritus-, kaitse- ja saaterakud, horisontaalse vaigukäigu moodustavad ainult eritus- ja kaitserakud. Eritusrakud on külgliseinte kaudu kokkukasvanud rakud, mille vahel moodustub vaigukanal. Eritusrakkudes tekib vaik. Kaitserakud annavad eritusrakkudele mehaanilist tuge. Vaik annab puidule suurema vastupidavuse [10, 11].

### 1.1.3. Keemiline koostis

Puidu põhimass koosneb orgaanilistest ühenditest, mille koostisesse kuulub 50% süsinikku, 43% hapnikku, 6% vesinikku ja 0,1% lämmastikku ning väike kogus mineraalühendeid. Puidu põhilisteks koostisosadeks on tselluloos, hemitselluloos ja ligniin, ülejäänud ühendeid esineb väikestes kogustes [13].

Männi ja kuuse tüvepuidu keemiline koostis on pisut erinev. Männi- ja kuusepuidu põhikomponentide erinevused on toodud tabelis 1.

**Tabel 1.** Männi ja kuuse tüvepuidu ligikaudne keemiline koostis (%) [14]

	Mänd	Kuusk
Tselluloos	45	41
Hemitselluloos	20	26
Ligniin	28	29
Ekstraktiivained	6	3
Tuhk	0,4	0,4
Lämmastik	0,1	0,1
Summa	99,5	99,5

Tselluloos on üheks põhiühendiks, millest koosnevad puidu rakuseinad. Tselluloos on kiudja ehitusega, värvitu, lõhnatu, maitseta, vastupidav, ei muutu õhus ning ei lahustu vees, piirituses, atsetoonis, eetris ega teistes orgaanilistes lahustes. Tselluloosi sisaldus on erinev tüve eri kõrgustel ja puu erinevates osades [10].

Hemitselluloosi keemiline koostis on sarnane tselluloosile. Hapete toimel hüdrolyüsib see kergesti. Eristatakse hemitselluloosi, mis hüdrolyüsil annab heksoosi ja mille kääritamisel saadakse piiritus, ning hemitselluloosi, mille hüdrolyüsil tekib pentoosi, mida kasutatakse plastmassitööstuses ja sünteesvaikude tootmisel [10].

Ligniin on molekulaarselt amorfne, keemiliselt vähepüsiv, kõrgmolekulaarne, isotroopne ja väga keerulisega struktuuriga keemiline ühend. Ligniin on termoplastne, mis on külmana kõva ja soojenedes pehmeneb. Antud omadusel põhineb puidu painutamine. Ligniin erineb tselluloosist suurema süsinikusisalduse poolest ja allub kergesti leeliste ja hapete toimetele. Rakkude puitumisel koondub ligniin rakuseintesse. Vahelamellides, kus ligniini on kuni 80%, kleepuvad rakud üksteise külge, rakustruktuur tugevneb ning rakkude vastupanu survejõududele kasvab. Kui ligniini töödelda happelises keskkonnas kõrgel temperatuuril, omandab see plastse ja tsementeeriva omaduse, mistõttu kasutatakse seda plastmassitööstuses [11, 12].

## **1.2. Puidu füüsikalised-mehaanilised omadused**

Puit on hügrokoopne materjal, see tähendab, et puit võtab endasse niiskust ümbritsevast keskkonnast. Puidu niiskussisaldus on otseses sõltuvuses ümbritseva õhu suhtelisest niiskussisaldusest ja temperatuurist ning puidu niiskussisaldusest sõltub omakorda puidu tihedus. Niiskussisalduse muutudes muutuvad ka puidu mõõtmed ja füüsikalised-mehaanilised omadused. [6].

### **1.2.1. Tihedus**

Puidu tiheduse all mõistetakse mahuühiku massi, see tähendab materjali massi ja mahu suhet, mida reeglina väljendatakse kilogrammides kuupmeetri ( $\text{kg/m}^3$ ) või grammides kuupsentimeetri ( $\text{g/cm}^3$ ) kohta. Erinevad puuliigid võivad olla väga erineva tihedusega, näiteks balsapuu  $150 \text{ kg/m}^3$  või eebenipuu  $1230 \text{ kg/m}^3$ . Seevastu absoluutkuiva puitaine

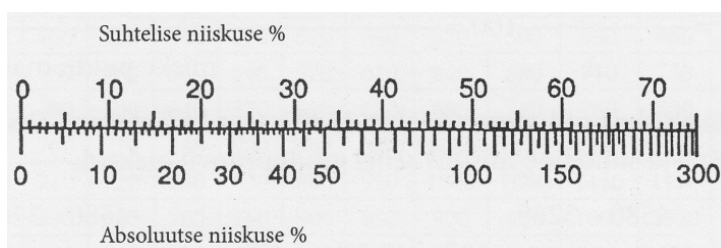
tihedus ehk rakuseinte tihedus on kõikidel puuliikidel enam-vähem võrdne  $1,53 \text{ g/cm}^3$ . Puidu tiheduse määramisel peab teadma tema niiskussisaldust, sest erineva niiskuse korral erineb puidu tihedus märkimisväärselt. Erinevate puuliikide tihedust saab määrata ainult siis, kui need on määratud sama niiskussisalduse juures. Puuliikide võrdlemisel määratakse tavaliselt absoluuttihedus (niiskussisaldus 0%). Vastavalt Eurostandardile [15] määratakse tihedus 12% niiskussisalduse juures [1, 12].

Männi- ja kuusepuit kuuluvad madala tihedusega ( $<550 \text{ kg/m}^3$ ) puidu hulka. Hariliku männi puidu tihedus õhukuivalt (niiskus 15%) on keskmiselt  $510\text{...}520 \text{ kg/m}^3$ , harilikul kuusel aga  $450\text{...}470 \text{ kg/m}^3$ . Puidu tihedus võib suuresti erineda ühe ja sama puu eri osades. Tiheduse vähenemine toimub kännust ladva suunas [10].

Puidu tihedus suurendab puidu järgmisi omadusi: tugevust, kõvadust, kulumiskindlust, soojusjuhtivust, kütteväärtust, kahanemist ning paisumist [10]. Puidu tihedust määrab kasvukiirus, mida mõjutavad järgmised tegurid: pinnase kvaliteet, metsa tihedus, sademete hulk ja nende jagunemine kasvuperioodil, temperatuur, päikesevalguse määr ning kasvukoha kõrgus merepinnast [1].

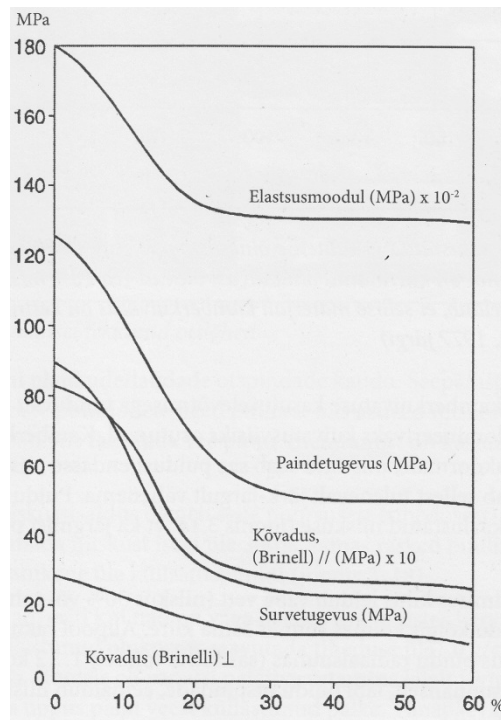
### 1.2.2. Niiskus

Puidu niiskuseks nimetatakse seal leiduvat vett väljendatuna protsentides tema massist. Kasutusel on kaks mõistet: suhteline niiskus ja absoluutne niiskus, mõlemat väljendatakse protsentides (vt joonis 3). Puidutööstuses kasutatakse põhiliselt suhtelise niiskuse mõistet, teadustöös aga absoluutse niiskuse oma. Absoluutne niiskus on puidu niiskushulga suhe puidu kuivkaalule, selle väärtus võib olla isegi üle 100...200%. Suhteline niiskus on niiskuse suhe kogu niiske puidu massile, selle väärtus võib ulatuda kõige rohkem 60...70%-ni [10].



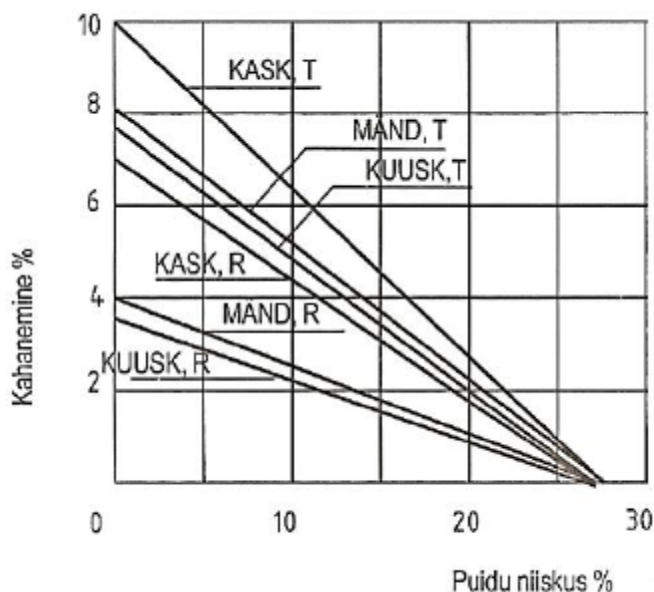
**Joonis 3.** Absoluutse ja suhtelise niiskuse vahetegur [10]

Puitmaterjal püüab vastavalt teda ümbritseva õhu suhtelisele niiskusele ja temperatuurile ühtlustada oma niiskust ehk saavutada tasakaaluniiskust. Kui männi- ja kuusepuitu kuivatada alla küllastuspunkti, mis on umbes 30% niiskust, hakkavad selle mõõtmed kahanema. Suurenevad tugevus-, kõvadus- ja elastsusomadused (vt joonis 4) [10].



**Joonis 4.** Puidu mehaaniliste omaduste muutumine sõltuvalt puidu veesisaldusest [10]

Teatavasti pole niiskus puidus ühtlaselt jaotatud, seetõttu kahaneb ka puit ebahühtlaselt. See tekitab puidus niiskuspingeid. Männipuit kõverdub kuivamisel nende pingete tõttu vähem kui kuusepuit, ent samas kuivab kuusepuuga võrreldes rohkem kokku. Kuna puit on anisotroopne materjal, siis toimub kahanemine ja paisumine kolmes põhisuunas erinevalt. Männi- ja kuusepuidu kahanemine pikisuunas küllastuspunktist kuni absoluutse kuivuseni on 0,2...0,3%, tangentsiaalselt umbes 8% ja radiaalselt ligikaudu 4% (vt joonis 5). Mahukahanemine on ligi 12%. Seetõttu ei oma puidu pikisuunaline kahanemine tarindite projekteerimisel tähtsust [1, 11].



**Joonis 5.** Puidu niiskusdeformatsioonid. T – tangentsiaalsuund, R – radiaalsuund [16]

### 1.2.3. Akustilised omadused

Akustika on õpetus helist (kuuldav heli koos infra- ja ultraheliga), selle tekkimisest, omadustest ja levimisest gaasides, vedelikes ja tahkistes. Puit on helisid absorbeeriv materjal [12].

Helilained levivad erinevates keskkondades erinevate kiirustega. Näiteks õhus levivad helilained kiirusega ca 340 m/s, tahkistes on heli kiirused palju suuremad, klaasis on heli levimise kiirus 5000...6000 m/s. Heli levimise kiirus puidus on puuliigiti erinev, samuti on see erinevates suunades erinev. Pikikiudu on heli levimise kiirus puidus (niiskusega 5...7%) 3800...4800 m/s, ristikiudu aga kordades väiksem, jäädes 500...1500 m/s [10].

Puidu akustilised omadused on sõltuvuses materjali tihedusest ja elastsusmoodulist - mida suurem on elastsus ja mida väiksem tihedus, seda parem on heli levimine materjalis. Puidu elastsusmoodul pikikiudu on 20...25 korda suurem kui ristikiudu. Radiaalne elastsusmoodul on natuke suurem kui tangentsiaalne. Seetõttu on heli levimise kiirus puidus kõige suurem pikikiudu, väiksem radiaalsuunas ja kõige kehvem tangentsiaalsuunas (vahekord vastavalt 14:5:3). Märg ja riketega puit juhib heli palju kehvemalt kui kuiv ja

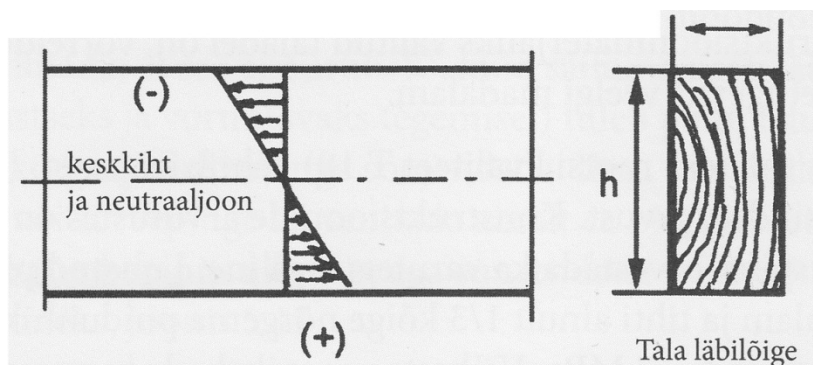
terve puit; selle omaduse tõttu saame puidu mehaanilisi omadusi mõõta heli levimise kiirusega temas [10].

Hinnates puitelemendi tugevust akustilise tugevussorteerimise seadmetega, tuleb arvutada puidu dünaamiline elastsusmoodul. Selleks mõõdetakse puitelemendi tihedus ja heli levimiskiirus [17]. Elastsusmoodul on suurus, mis näitab materjali elastsust, see avaldub pinge ja elastse deformatsiooni suhtena. Elastsuseks nimetatakse materjali omadust koormuse raskuse all deformeeruda ja peale koormusest vabastamist taastada oma esialgne kuju [18].

#### 1.2.4. Paindetugevus

Paindetugevus on kombinatsioon tõmbe- ja survetugevusest (ka nihketugevusest). Selle väärtus ricketeta puitelemendis jääb arvuliselt tõmbe- ja survetugevuse väärtuse vahele. Kahel toel asetseva tala koormamisel keskelt välisjõuga tekib tala ülemises pinnas survejõud ja alumises pinnas tõmbejõud. Tala keskel asub neutraalne tsoon, mis jääb mõõdukal koormamisel pingevabaks (vt joonis 6) [10].

Oluliseks ehituspuidu iseloomustajaks on staatiline paindetugevus. Puidu paindetugevus sõltub puidu tihedusest, vanusest, kasvukoha tingimustest ja geneetilisest päritolust [11]. Samuti vähendavad puidu tugevust erinevad rikked nagu oksakohad, kaldkiulisus, mädanikud, putukate kahjustused, mis võivad vähendada puidu tugevust 30% ja enam [18].



**Joonis 6.** Paindepingete jaotus, (-) märgib survepinget ja (+) tõmbepinget [10]

Vastavalt standardile EVS-EN 338:2009 [15] määratakse paindetugevus 12% niiskussisalduse juures. Sama standard näeb ette saematerjali tugevusklassidesse määramiseks



mehaaniliste omaduste piirid, sest puitmaterjali täpsem omaduste teadmine võimaldab meil puitmaterjali ökonoomsemalt kasutada. Tugevusklassid on tähistatud C14 kuni C50, number tähistab paindetugevust ühikuga  $N/mm^2$ . Tugevusklasside C45 ja C50 puit ei pruugi olla vabalt saadaval [11, 15]. Vanemas puitmaterjale käsitlevas kirjanduses on puidu paindetugevus antud niiskusel 15% [19].

Riketeta kuuse- ja männipuidust väikeste (ristlõige 20x20 mm ja pikkus 200 mm) proovikehade paindetugevus on ca 100 MPa. Kui aga määrata paindetugevus samasuguses puidus, aga suuremate mõõtmetega talas (ristlõige 50x150 mm ja pikkus 3000 mm), siis selle tugevusväärtused on ca 50 MPa. See on pea poole vähem kui väiksel katsekehal. Suuremõõtmelistel puittaladel esineb alati puidurikkeid, mis viivad paindetugevuse alla [12].

### **1.3. Tugevussorteerimise meetodid**

Nii kodumaises kui ka rahvusvahelises puidukaubanduses on järjest suurenenas nõudlus tugevussorteeritud puitmaterjali järele. Puidu tugevussorteerimisel kasutatakse erinevaid mitte-purustavaid meetodeid. Eestis kasutatakse valdavalt visuaalset tugevussorteerimist, kuna mahud on väikesed. Mõned üksikud puiduettevõtted on endale soetanud heli parameetrite mõõtmisel ja paindetehnoloogial põhinevad tugevussorteerimisseadmed. Röntgentehnoloogial põhinevaid sorteerimisseadmeid Eestis teadaolevalt ei ole. Ehitusinseneride jaoks on kõige olulisem, et tugevussorteeritud puitmaterjal vastaks standardis [15] sätestatule. Kõrgema tugevusklassiga materjal võimaldab puitkonstruktsioonide dimensioneerimisel kasutada väiksema ristlõikega elemente. See võimaldab meil materjali kokku hoida ja on ka keskkonna seisukohast säästlikum.

#### **1.3.1. Visuaalne tugevussorteerimine**

Visuaalset tugevussorteerimist võib läbi viia vastava koolituse läbinud ja eksami sooritanud isik, kellele on väljastatud sertifikaat. Puitu võib visuaalselt tugevussorteerida erinevate standardite alusel. Näiteks Eurostandardi EVS-EN 14081-1:2006+A1:2011 [20] alusel. Samuti on Eestis kasutusel Põhjamaade standard [7], kuna Skandinaaviamaad on meie tugevussorteeritud konstruktsioonipuidule olulised eksporditurud. Üksikud ettevõtted

kasutavad veel Saksa ja Briti standardit, kuna nad turustavad oma tooteid nimetatud riikides.

Visuaalsel tugevussorteerimisel on rida eeliseid ja puudusi. Eeliseks on väike alginvesteeringute maht, kui võrrelda visuaalse tugevussorteerimise koolituse ja mõne tugevussorteerimise seadme hinna vahet. Puudusteks võib nimetada suurt ajakulu ja ebatäpset tulemust [5]. Samuti on piir ees, millistesse tugevusklassidesse on võimalik puitu sorteerida. Eurostandard [20] võimaldab puitu sorteerida ainult kahte tugevusklassi, milleks on C16 ja C24. Põhjamaade standard [7] võimaldab sorteerida puitu nelja tugevusklassi T0, T1, T2 ja T3, mis vastavad Eurostandardis [15] klassidele C14, C18, C24 ja C30. Põhjamaade tugevussorteerimise standard [7] täidab kõiki Eurostandardi [20] nõudeid.

Visuaalse tugevussorteerimise korral hinnatakse puitmaterjali erinevate kriteeriumite alusel. Materjalipartii niiskussisaldus peab olema alla 20% ja saagimise või töötlemise tulemusena saadud mõõtmised peavad vastama standardi EVS-EN 336:2013 [21] lubatud tolerantsidele. Sorteeritaval materjalil hinnatakse: okste arvu (okste läbimõõtu ja oksasuhet), ladvaviga, kaldkiulisust, lõhede esinemist (kuivamis-, ring- ja langetuslõhed), aastarõnga laiust, sinavust, mädanike esinemist (kõva- ja pehmemädanikud), geomeetrilisi piiranguid (kaardumus, keerdumus, poomkant), ränipuidu osakaalu, vaigukäike, vaikpuidu esinemist, mõlu, koore ja putukkahjustuste esinemist ning mehaanilistest kahjustustest tulenevaid piiranguid. Samuti tuleb kogu tugevussorteerimist tõendav dokumentatsioon säilitada kümme aastat [20].

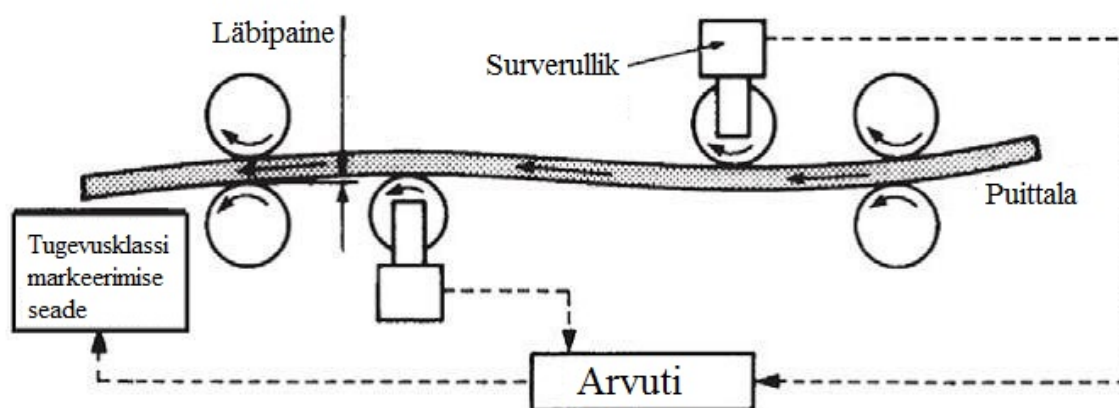
Kui sortimine on läbi viidud enne töötlemist ja töötlustest tingitud mõõtmete kahanemine ei ole suurem kui 5 mm algmõõtmete puhul, mis on  $\leq 100$  mm, või mitte suurem kui 10 mm algmõõtmete puhul  $> 100$  mm, võib lugeda, et puidusort ei ole töötlemise kestel muutunud. Kui mõõtmete vähenemine on suurem, tuleb puit uuesti sorteerida [20].

### **1.3.2. Masintugevussorteerimine**

Masinsorteerimine peab vastama standardi EVS-EN 14081 [20–24] kõigile neljale osale. Kogu tugevussorteerimist tõendav dokumentatsioon tuleb säilitada vähemalt kümme

aastat. Niiskussisaldus ja töötlemise lubatud tolerantsid on samad, mis visuaalsel tugevussorteerimisel. Tugevusklassid määratakse standardi [15] alusel.

Paindedeformatsiooni sorteerimisseadmed on üle maailma võrdlemisi laialt levinud. Neil on oma nõrgad ja tugevad küljed. Eeliseks on suurte koguste võrdlemisi kiire ja täpne sorteerimine erinevatesse tugevusklassidesse. Puudusteks võib nimetada seadme kõrget maksumust ja seadmete suuri mõõtmeid, samuti ka piiranguid sorteeritavate materjalide ristlõigetele. Seetõttu on neid otstarbekas ja majanduslikult tasuv kasutada väga suurte mahtude juures. Paindedeformatsiooni sorteerimise seadmete tööpõhimõte on väga lihtne: need mõõdavad mehaaniliselt katsetatava elemendi paindedeformatsiooni (vt joonis 7) ning arvutavad paindele vastava elastsusmooduli. Selle alusel määratakse puitmaterjali tugevusklass [5, 25].



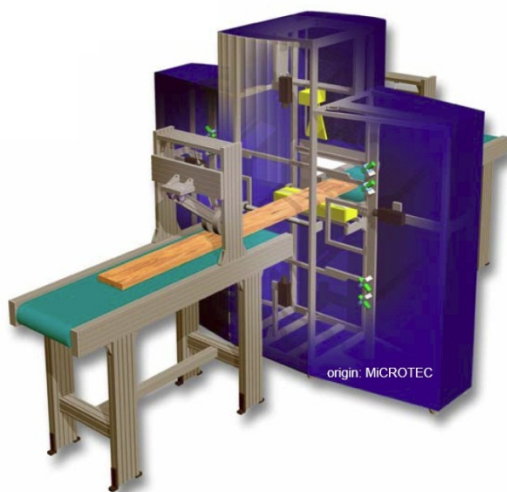
**Joonis 7.** Paindedeformatsiooni sorteerimisseadme tööpõhimõte [25]

Akustilised tugevussorteerimise seadmed põhinevad heli (ka ultraheli) levimisaja mõõtmisel pikikiudu. *Stress wave* tehnoloogial töötavad masinad põhinevad väikse välise löögi tekitatud helilaine levimise aja mõõtmisel. See tähendab, et käsiseadmetel tuleb väikese haamriga lüüa, olenevalt tootjast, kas katsetatava elemendi või siis heli saatja pihta. Masinsorteerimisliinidel annab väikse löögi pneumosilindri otsa kinnitatud teraskuul (vt joonis 8). Antud tehnoloogial põhinevad sorteerimisseadmed on laialt levinud Norras, Rootsis, Soomes ja Taanis [26]. Akustilistel sorteerimisseadmetel on mitmeid eeliseid; sorteerimine on kiire, on olemas ka käsiseadmed, seadmeid saab võrdlemisi väikeste kuludega paigaldada juba olemasolevatele tootmisliinidele ning kõik tugevussorteerimise andmed salvestatakse [5].



**Joonis 8.** Dynalyse AB Precigrader tugevussorteerimiseade [26]

Viimasel ajal on hakanud laiemalt levima ka röntgentehnoloogial põhinevad tugevussorteerimisseadmed (vt joonis 9). Seadmete tööpõhimõte seisneb selles, et mõõdetavad puitelemendid valgustatakse röntgenkiirtega läbi ning selle tulemusena saadakse mustvalge pilt puittalast. Röntgenpildil on selgelt näha okste suurus ja asukohad, kuna okste tihedus on ligi kaks korda suurem võrreldes ümbritseva riketeta puidu tihedusega. Samuti mõõdavad antud seadmed keskmist tihedust. Röntgentehnoloogial põhinevate seadmete eeliseks on väga suur sorteerimiskiirus, kuid puudusteks seadmete suured mõõtmed ja kõrge hind. Veel täpsema tulemuse annab röntgenseadme ja heli parameetreid mõõtvast seadme kombineerimine [17].



**Joonis 9.** MiCROTEC Goldeneye 702 röntgentehnoloogial tugevussorteerimisseade [27]

#### 1.4. Eelnevalt tehtud sarnased uuringud Eesti Maaülikoolis

2010. aastal uuris Marko Teder oma magistritöös ultraheli kasutamise võimalusi puidu füüsikalise-mehaaniliste omaduste hindamiseks kasutusel olnud puidus. Uurimistöö katsekehad olid mõõtmetega 50x50x1005 mm. Mõõtmised teostati pikikiudu ja ristikiudu radiaalsuunas. Analüüsid selgus, et erinevate mõõtmisviiside tulemuste vahel esines nõrk korrelatsioon. Pikikiudu mõõdetud väärtused näitasid puidu tugevus-jäikuse omadusi kõige paremini, paindetugevuse korral  $r=0,42$  ja elastsusmooduli korral  $r=0,61$ . Individuaalsete argumentide regressioonanalüüside põhjal ei andnud ükski üle keskmise korrelatiivset seost puidu paindetugevuse ja elastsusmooduli vahel, seevastu andsid samade tunnuste põhjal leitud mitmesed regressioonanalüüsid vastavalt keskmise ja tugeva korrelatsiooni [4].

2011. aastal uuris Priit Lepik oma magistritöös ultraheli kasutamise võimalusi erineva niiskussisaldusega kasutusel mitteolnud puidu füüsikalise-mehaaniliste omaduste hindamiseks. Töö uurimisobjektina kasutati 12 kuusepuidust tala mõõtmetega 50x150x5500 mm. Ultraheli mõõtmised teostati nii otsesel kui ka kaudsel teel. Seejärel lõigati esialgne saematerjal 50x50x1100 mm suurusega katsekehadeks. Edasi teostati eelmainitud katsekehade ultraheli kiiruste mõõtmine erinevate niiskussisalduste korral. Katsekehad olid kolmes niiskusklassis: a) 6...8%, b) 10...12%, c) 20...23%. Priit Lepik leidis, et erinevate mõõtmisviiside tulemuste vahel esineb nõrk korrelatsioon. Individuaalsete argumentide regressioonanalüüside põhjal ei andnud ükski üle keskmise korrelatiivset seost puidu paindetugevuse, painde-elastsusmooduli, survetugevuse ega surve-elastsusmooduli vahel. Seevastu näitasid samade tunnuste põhjal leitud mitmesed regressioonanalüüsid keskmisi ja tugevaid seoseid [28].

2014. aastal uuris Mirko Hani kasutusel mitteolnud kuuse- ja männipuidu tugevusparameetreid akustiliste mitte-purustavate ja purustavate meetoditega. Töös kasutati nii heli kui ka ultraheli katseseadmeid. Katsetes kasutati 50 männipuidust ja 50 kuusepuidust katsekeha mõõtmetega 50x50x970 mm. Ultraheli levimiskiiruse mõõtmised teostati katseseadmetega *Ultrasonic Instrument TICO* ja *Proceq Pundit Lab*. Heli levimise mõõtmised teostati *Fakopp Microsecond Timer* seadmega. Seadmetega teostati puitelementidel mõõtmised otstest pikikiudu, nooremate aastarõngaste poolt pikikiudu ning nooremate ja vanemate aastarõngaste poolt pikikiudu. Hani leidis, et erinevate mõõtmis-

viiside vahel esines nii kuuse- kui männipuidul enamasti keskmine või tugev korrelatsioon. *Fakopp Microsecond Timer*´iga mõõdetud väärtused andsid tugevaid seoseid painde-elastsusmooduliga; korrelatsioon kuusepuidust katsekehadega ( $r=0,78...0,86$ ) ning männipuidust katsekehadega ( $r=0,75...0,8$ ). Individuaalsete argumentide regressioon-analüüside põhjal andsid *Fakopp* seadmega tehtud mõõtmised mõlema puuliigi puhul enamasti tugevaid seoseid elastsusmooduliga [29].

## 1.5. Eelnevalt tehtud sarnased välismaised uuringud

- **Visuaalne tugevussorteerimine Euroopas**

Uuringus võrreldi erinevaid Euroopas kasutusel olevaid visuaalseid tugevussorteerimise standardeid. Omavahel võrreldi Saksa DIN 4074-1:2012-06 [30], Briti BS 4978:2007 + A1: 2011 [31], Põhjamaade DS/INSTA 142:2009 [7], Prantsuse NF B 52-001-1:2011 [32] ja Šveitsi SIA 265/1:2009 [33] standardeid. Sõltuvalt standardist saab saematerjali liigitada kuni nelja klassi. Osa saematerjalist ei vasta ka madalaima klassi nõuetele ja praagitakse välja. Kõik purustavad katsed viidi läbi vastavalt EN 408:2010 [34]. Paindekatsel valiti objekti asetus juhuslikult; kui ristlõike serval esines rikkeid, valiti võimalusel katsetuseks nõrgestustega serv. Kokku katsetati umbes 12000 okaspuust katsekeha. Leiti, et sageli eksitakse tugevusklassiga, eriti väikeste ja suurte ristlõigete korral. Mitme standardi puhul oli praagi protsent suur, kuna puuduvad madalad tugevusklassid. Praaki langemise protsent on madalaim INSTA puhul, kuna ainult siin on olemas klass T0 (C14). Erinevates standardites puuduvad või siis kasutatakse vähe kõrgeid tugevusklasse – väga hea materjal liigitatakse madalasse klassi [35].

- **Masintugevussorteerimine Itaalias**

Uuringu eesmärgiks oli kindlaks teha mitte-purustavate katsete teel saadud väärtuste seos purustavate katsete tulemustega. Töös uuriti erinevatest puuliikidest katsekehi, kokku katsetati 1600 tala. Töös kasutati *MiCROTEC GoldenEye 706* seadet, mis kombineerib endas röntgen- ja heli tehnoloogial töötavat seadet. Röntgeniga määratakse puidus olevate oksakohtade suurused ja asukohad ning heli seadmega määratakse dünaamiline elastsusmoodul. Purustavad katsed viidi läbi vastavalt standardile [34]. Regressioon-analüüsiga leiti, et dünaamilise paindeelastsusmooduli ja ja purustava katsega saadud

staatilise elastsusmooduli tulemuste vahel on tugev seos, determinatsioonikordaja harilikul kuusel  $R^2=0,89$ . Samuti oli tugev seos laboris määratud tiheduse ja katseseadmega määratud tiheduse vahel ( $R^2=0,93$ ). Paindetugevuse vahel oli keskmine seos ( $R^2=0,57$ ). Järeldati, et katsetatud talade hulk pole piisav, et teha lõplikke järeldusi. Vaja on veel teha täiendavaid uuringuid [36].

- **Konstruksioonipuidu tugevussorteerimine Hispaanias mittepurustavaid meetodeid kasutades**

Uuringu eesmärgiks oli kindlaks teha mitte-purustavate katsete teel saadud väärtuste seosed võrreldes purustavate katsetega. Uuringus kasutati Hispaanias kasvavate erinevate männipuuliikide puitu. Katsetatavad ristlõiked olid alates 80x120mm kuni 200x250mm, kokku katsetati 687 tala. Kasutati erinevaid ultraheli ja heli parameetreid mõõtvaid seadmeid. Mõõtmised tehti nii otseselt kui ka kaudselt. Purustavad katsed viidi läbi vastavalt standardile [34]. Analüüsisides mitte-purustaval teel ja purustaval katsel saadud tulemusi, leiti nende vahel keskmine seos. *Fakopp Microsecond Timer*'i heli levimise kiiruse ja purustava katsega saadud staatilise elastsusmooduli tulemuste vahel on keskmine seos ( $R^2=0,62$ ). Võrreldes *Fakopp Microsecond Timer*'i heli levimise kiirust paindetugevusega, mis saadi purustaval katsel, oli seos nõrk ( $R^2=0,20$ ). Antud tulemus näitab, et heli levimise kiirus ei ole eriti hea paindetugevuse näitaja. See tuleneb sellest, et kohalikud puidurikked mõjutavad paindetugevust rohkem kui kogu tala kvaliteeti tervikuna [37].

- **Suuremõõtmeliste männipuidust konstruktsioonelementide katsetamine mitte-purustavalt koos visuaalse tugevussorteerimisega**

Uuringu eesmärgiks oli hariliku männi tugevusparameetrite hindamine mitte-purustavalt koos visuaalse tugevussorteerimisega. Uuringus kasutati 116 hariliku männi tala mõõtmega 200x150x4200mm. Visuaalne sorteerimine viidi läbi standardi UNE 56544:2207 [38] alusel. Seadmetest kasutati *Fakopp Microsecond Timer*'it. Katsekehade niiskussisaldus oli ca 12%. Purustav katse viidi läbi vastavalt standardile [34]. Katsetega saadud puidu füüsikalisi-mehaanilisi omadused arvutati ümber standardniiskusele 12%. Leiti, et kombineerides mitte-purustavat masinhindamist koos visuaalse tugevussorteerimisega, on võimalik täpsemalt määratleda männipuidu erinevaid mehaanilisi omadusi; ainult visuaalse tugevussorteerimise korral on määratlemine vähem täpne [39].

## 2. METOODIKA

### 2.1. Katsekehade valmistamine

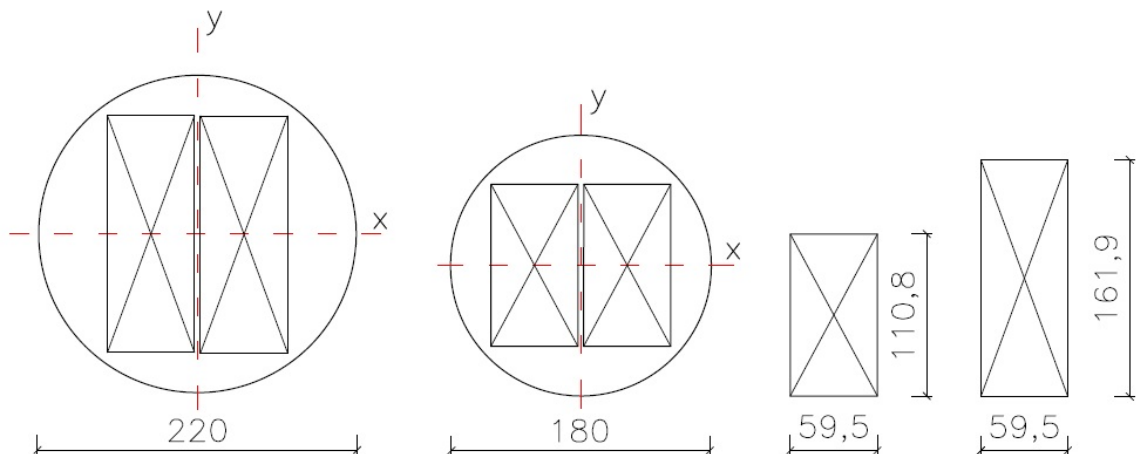
Kokku valmistati 48 katsekeha: 24 männi- ja 24 kuusepuidust katsekeha (vt tabel 2), ristlõikega 50x100 mm ja 50x150 mm. Katsekehade mõõdud valiti vastavalt standardile [8], mille järgi peab purustaval katsel paindetugevuse mõõtmisel katsekehade minimaalne pikkus olema 19-kordne katsekeha kõrgus. Seega on katsekehade minimaalsed mõõdud 50x100x1900 mm ja 50x150x2850 mm, millele jäeti lisaks pikkusevaru 50 mm. Katsekehade arv tuleb samuti standardist, mille järgi peab globaalse paindeelastsusmooduli määramiseks katsetama vastavast sordist vähemalt kümmet katsekeha [8]. Igale sordile võeti varuks kaks katsekeha, kokku oli igas sordis 12 katsekeha.

**Tabel 2.** Katsekehad

Puuliik	Ristlõige (mm)	Katsekehade arv	Kokku
Kuusk	50x100	12	24
	50x150	12	
Mänd	50x100	12	24
	50x150	12	
Kokku			48

Kõigepealt koostati ristlõigetele minimaalsete kadudega saekavad (vt joonis 10) ja sealt saadi vajaminevate palkide läbimõõdud. Saekavade koostamisel arvestati puitmaterjali kuivamiskahanemisega [40]. Samuti lisati varu 2,5 mm igale küljele, mis peale katsekehade kuivatamist maha hõõveldati.





**Joonis 10.** Saekavad palkidele läbimõõduga 220 mm ja 180 mm, paremal väljalõigatavate prusside mõõtmed (millimeetrites)

Katsekehade jaoks vajalik metsamaterjal toodi Eesti Maaülikoolile kuuluvast metsast Järveljalt. Kuuse- ja männipalkide ristlõike diameetrid olid kahes läbimõõdus vahemikus 17...18 cm ja 21...23 cm ning pikkused vastavalt 3,1 m ja 4,3 m. Sealt toodud palgid viidi Maaülikooli metsatööstuse laborisse, kus 4,3 m palgid lõigati mootorsaega ligikaudu 2 m tükkideks. Edasi toimus palkide lahtilõikamine lintsael plankudeks (vt joonis 11) ja seejärel lahkamissael prussideks.



**Joonis 11.** Osa palke on saetud plankudeks

Järgnevalt viidi katsekehad AS Tiksoja Puidugruppi, kus toimus katsekehade kuivatamine ja töötlemine. Katsekehi kuivatati kamberkuivatis kaks nädalat  $85 \pm 3$  °C temperatuuri juures, et saada niiskussisalduseks 12%. Seejärel katsekehad lõigati paralleelsaega mõõtu,

kalibreeriti ning markeeriti. Kõikide katsekehade mõlemad otsad lihviti, et visuaalsel tugevussorteerimisel oleks parem katsekehade aastarõngaid lugeda. Lõpuks katsekehad pakiti ja transporditi tagasi Eesti Maaülikooli maaehituse osakonna ehituskonstruktsioonide laborisse.



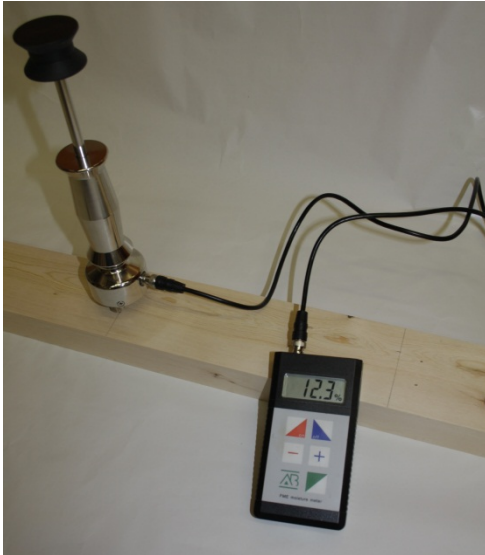
**Joonis 12.** Katsekehad hetk enne kamberkuivatisse asetamist

## **2.2. Katsekehade füüsikaliste omaduste määramine**

Töö katsekehadega toimus Eesti Maaülikooli Maaehituse osakonna ehituskonstruktsioonide laboris. Vastavalt standardile [8] tuleb katsekehi hoiustada kliimaruumis temperatuuril  $20 \pm 2$  °C, suhtelise niiskuse juures  $65 \pm 5\%$ . Need tingimused olid tagatud.

### **2.2.1. Niiskussisalduse määramine**

Katsekehade niiskussisaldus määrati kahel viisil: elektritakistuse meetodil käsiseadmega ja kuivkaalumeetodil laboris. Kõigepealt mõõdeti katsekehade absoluutne niiskussisaldus *Brookhuis FME moisture meter* (edaspidi *FME*) käsiseadmega (vt joonis 13) standardi EVS-EN 13183-2:2002 [41] alusel. Teostati kolm mõõtmist vastavalt 1/3, 1/2 ja 2/3 pealt ning arvutati aritmeetiline keskmine.



**Joonis 13.** Katsekeha niiskussisalduse mõõtmine käsiseadmega

Niiskussisaldus kuivkaalumeetodil määrati vastavalt standardile EVS-EN 13183-1:2002 [42]. Selleks lõigati peale purustavat katset oksteta ja vaigupesadeta täisristlõike-suurune proovitükk võimalikult lähedalt purunemiskohale. Proovitükid mõõdeti, markeeriti ja kaaluti. Edasi asetati proovikehad kuivatusahju, kus temperatuur oli  $103 \pm 2$  °C. Peale 24 h kuivatamist kaaluti proovikehi kahetunniste intervallidega, kuni nende mass ei muutunud rohkem kui 0,1% [8].

Puidu absoluutne niiskussisaldus arvutati valemiga [10]:

$$W_{abs} = \frac{A-B}{B} \cdot 100\% \quad (1)$$

kus  $W_{abs}$  on absoluutne niiskussisaldus, %;

A – proovikeha mass enne kuivatamist, g;

B – proovikeha mass peale kuivatamist, g.

### 2.2.2. Tiheduse määramine

Magistritöös leiti kolm tihedust: suure katsekeha tihedus, väikese proovikeha tihedus ja arvutatud tihedus. Suure katsekeha tiheduse määramiseks mõõdeti katsetatavate talade laius, kõrgus ja pikkus ning seejärel kaaluti kõik katsekehad. Katsekehade mõõtmete ja

massi alusel arvutati nende tihedus valemiga [18]:

$$\rho_w = \frac{m}{V} \quad (2)$$

kus  $\rho_w$  on katsekeha tihedus;

$m$  – katsekeha mass niiskussisalduse  $W$  juures, kg;

$V$  – katsekeha ruumala niiskussisalduse  $W$  juures,  $m^3$ .

Väikese proovikeha tiheduse määramiseks kasutati samu täisristlõikelisi proovikehi, mida niiskussisalduse määramiselgi. Proovikeha tiheduse määramiseks kaaluti seda enne kuivatusahju panemist ning mõõdeti laius, kõrgus ja pikkus. Statistilises analüüsis kasutatakse proovikeha tihedust, mis on arvatud 12% niiskussisalduse peale. Kui proovikeha niiskussisaldus on üle 12%, siis tihedust vähendatakse 0,5% võrra iga niiskussisalduse ületanud protsendi kohta. Kui proovikeha niiskussisaldus on väiksem kui 12%, siis tihedust suurendatakse 0,5% võrra iga standardniiskussisaldusest väiksema protsendi kohta [43].

Kolmandaks leiti puidu tihedus kaudsel teel arvutades. Juhul kui puidu ruumala ja massi ei ole võimalik määrata (näiteks konstruktsioonielement objektil), saab puitelemendi tiheduse arvutada kaudsel teel. Puidu tihedust ükskõik millise niiskuse puhul piirides kuni 30% saab määrata järgmise valemiga [10]:

$$t_w = \frac{t_{12}}{(1,060 - 0,005W)} \quad (3)$$

kus  $t_w$  on arvatud tihedus,  $kg/m^3$ ;

$t_{12}$  - vastava puuliigi puidu tihedus 12% niiskussisalduse juures,  $kg/m^3$ ;

$W$  - niiskussisaldus vahemikus 0 ... 30%.

Männipuidu tihedus 12% niiskussisalduse korral on  $500 kg/m^3$  ja kuusepuidul vastavalt  $445 kg/m^3$  [10].

### 2.3. Visuaalne tugevussorteerimine

Katsekehade visuaalne tugevussorteerimine viidi läbi vastavalt [7] standardile. Katsekehade niiskussisaldus mõõdeti *FME* käsiseadmega standardi [41] alusel. Kõrgeim lubatud katsekehade niiskussisaldus visuaalsel tugevussorteerimisel on 20%, erandina on mõnel üksikul katsekehal lubatud kuni 24% niiskussisaldus [20]. Katsekehade mõõtmed vastasid standardi [21] tolerantsi klassile number 2.

Katsekehade sorteerimisel hinnati järgmist: okste arvu (okste läbimõõtu ja oksasuhet), ladvaviga, kaldkiulisust, lõhede esinemist (kuivamis-, ring- ja langetuslõhed), aastarõnga laiust, sinavust, mädanike esinemist (kõva- ja pehmemädanikud), geomeetrilisi piiranguid (kaardumus, keerdumus, poomkant), ränipuidu osakaalu, vaigukäike, vaigupuidu esinemist, mõlu, koore ja putukkahjustuste esinemist ning mehaanilistest kahjustustest tulenevaid piiranguid [7].

Visuaalsel tugevussorteerimisel määrati aastarõnga laius millimeetri täpsusega. Mehaanilisi kahjustusi, ränipuitu, ringlõhesid ja koore olemasolu katsekehadel ei täheldatud.

Vastavalt standardile sorteeriti puitmaterjal neis esinevate rikete alusel nelja klassi: T0, T1, T2 ja T3 [7]. Eurostandardis EVS-EN 338:2009 [15] vastavad need tugevusklassidele C14, C18, C24 ja C30. Statistilistes analüüsides kasutati Eurostandardile vastavaid tugevusklasse.

### 2.4. Mõõtmised *Fakopp Microsecond Timeri*ga

*Fakopp Microsecond Timer*iga (edaspidi *Fakopp*) (vt joonis 14, tabel 3) mõõdetakse heli levimise aega. Seadmel on kaks otsikut, millest üks töötab saatjana ning teine vastuvõtjana. Lüües saatjale haamriga, tekib heli-impulss, heli liigub võimalikult sirgjooneliselt vastuvõtjani. See võib kaasa tuua aga olukorra, kui heli kiirust vähendav defekt ei asu puidu keskel. Siis ei pruugi *Fakopp* seade seda avastada [44].



**Joonis 14.** *Fakopp Microsecond Timer*

**Tabel 3.** Katseseadme *Fakopp Microsecond Timer* tehnilised andmed [44]

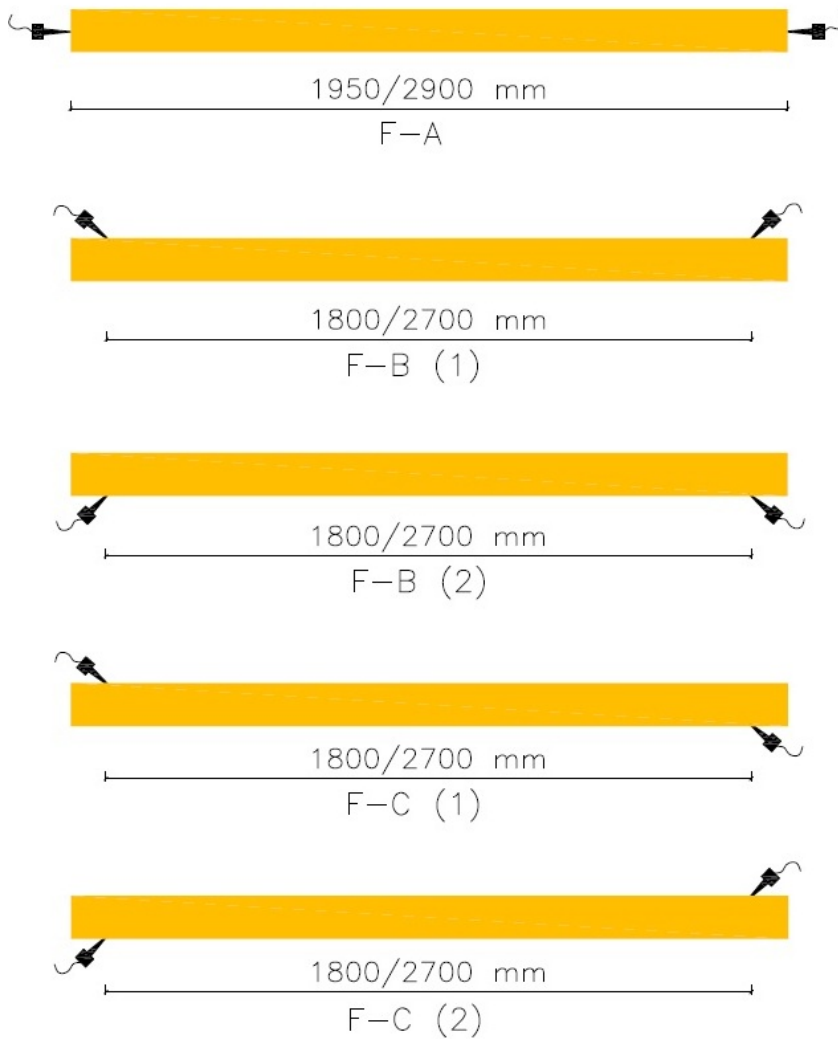
Tehnilised andmed	
Ühele mõõtmisele kuluv aeg	~60 s
Mõõteviga	$\pm 3 \mu\text{s}$
Kaal	347 g
Energiatarve	320 mW
Lubatud töötemperatuuri vahemik	0-40 °C

Katsekehade mõõtmisel kasutati viit erinevat varianti (vt joonis 15):

- 1) heli levimise aja mõõtmine otstest pikikiudu, vahemaa otsikute vahel 1950 mm väiksemate (50x100 mm) katsekehade korral ning 2900 mm suuremate (50x150 mm) katsekehade korral (edaspidi F-A);
- 2) heli levimise aja mõõtmine kaudselt katsekeha ühel ja samal serval, esimene serv. Otsikud asusid 30...45° nurga all puidukiu suhtes ja vahemaa otsikute vahel 1800 mm väiksemate (50x100 mm) katsekehade korral ning 2700 mm suuremate (50x150 mm) katsekehade korral (edaspidi F-B 1);
- 3) heli levimise aja mõõtmine kaudselt katsekeha ühel ja samal serval, teine serv, otsikud asusid 30...45° nurga all puidukiu suhtes. Vahemaa otsikute vahel 1800 mm väiksemate (50x100 mm) katsekehade korral ning 2700 mm suuremate (50x150 mm) katsekehade korral (edaspidi F-B 2);
- 4) heli levimise aja mõõtmine kaudselt katsekeha vastakuti servadelt. Otsikud asusid 30...45° nurga all puidukiu suhtes katsekeha vastasservadel ja kumbki erinevas otsas (esimene variant). Vahemaa otsikute vahel 1800 mm väiksemate

(50x100 mm) katsekehade korral ning 2700 mm suuremate (50x150 mm) katsekehade korral (edaspidi F-C 1);

5) heli levimise aja mõõtmine kaudselt katsekeha vastakuti servadelt. Otsikud asusid 30...45° nurga all puiduki suhtes katsekeha vastasservadel ja kumbki erinevas otsas (teine variant). Vahemaa otsikute vahel 1800 mm väiksemate (50x100 mm) katsekehade korral ning 2700 mm suuremate (50x150 mm) katsekehade korral (edaspidi F-C 2).



**Joonis 15.** Katsekehade erinevad mõõtmisviisid ja tähistused. Esimene mõõt vastab 50x100 mm ristlõikega katsekehale, teine 50x150 mm ristlõikega katsekehale

Iga meetodi korral tehti kolm mõõtmist ning nende aritmeetiliste keskmiste põhjal arvutati heli levimise kiirused. Teades katsekeha tihedust ja heli levimise kiirust, arvutati

dünaamiline elastsusmoodul valemiga [17]:

$$MoE_{dyn} = \rho v^2 \quad (4)$$

kus  $MoE_{dyn}$  on dünaamiline elastsusmoodul, Pa;

$\rho$  – katsekeha tihedus, kg/m<sup>3</sup>;

$v$  – heli levimiskiirus, m/s.

Seejärel arvutati staatiline elastsusmoodul 12% niiskussisalduse juures. Staatilise elastsusmooduli ümberarvutamisel 12% niiskussisaldusele juhitudi standardist EVS-EN 384:2010 [43]. Iga niiskussisalduse protsent üle standardniiskussisalduse suurendab elastsusmoodulit 1% võrra ning iga protsent alla standardniiskussisalduse vähendab elastsusmoodulit 1% võrra. Lõpuks määrati 12% niiskussisalduse juures oleva staatilisele elastsusmoodulile vastav tugevusklass standardi [15] alusel.

## **2.5. Mõõtmised *Brookhuis Timber Grader MTG*'ga**

*Brookhuis Timber Grader MTG* (edaspidi *Timber Grader*) (vt joonis 16) mõõdab heli levimisaega. Iga katsekehaga tehti üks mõõtmine tala otsast pikikiudu. Eelnevalt sisestati katsekeha mõõtmed, puuliik, niiskussisaldus, tihedus ja pinna töötuse kvaliteet (saetud või hõõveldatud). Katsetel kasutati *FME* käsiseadmega määratud niiskussisaldusi ja suure katsekeha tihedusi. Seade arvutab niiskussisalduse, tiheduse ja dünaamilise elastsusmooduli alusel staatilise elastsusmooduli 12% niiskussisalduse juures. Seadme väljundiks on võimalik valida staatilise elastsusmooduli ja tugevusklassi vahel. Magistritöös valiti väljundiks staatiline elastsusmoodul ning tugevusklass arvutati vastavalt standardi [15] alusel.

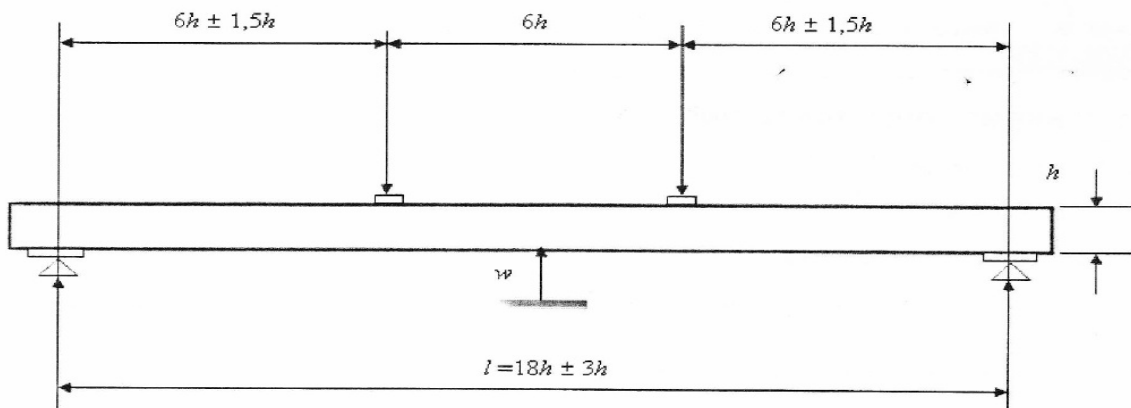




Joonis 16. Brookhuis Timber Grader MTG

## 2.6. Tugevusparameetrite määramine purustava paindekatsega

Peale visuaalset- ja masin tugevussorteerimist teostati katsekehade mehaaniliste omaduste mõõtmised purustava katsega Eesti Maaülikooli maaehituse osakonna ehituskonstruktsioonide laboris katsepressi *Lukas* 250 kN abil standard [8] alusel. Katsekeha avaga 18 ristlõike kõrgust toetati lihttalana ning koormati paindele sümmeetriliselt kahes punktis (vt joonis 17).



Joonis 17. Katseskeem globaalse paindeelastusmooduli määramisel [8]

Kuna uurimustöös kasutatavate katsekehade ristlõigete kõrgused olid 100 ja 150 mm, siis toepunktide vaheliseks kauguseks valiti vastavalt 1800 mm ja 2700 mm. Koormus taladele rakendati tangentsiaalsuunaliselt. Katsemasin seadistati nii, et maksimaalne koormus saavutati  $300 \pm 120$  sekundi jooksul. Koormuspeade liikumiskiirus ei ületanud 0,003 h mm/s. Kohalike muljumiste vähendamiseks kasutati koormuspea all ja tala tugeudel terasplaati, mille pikkus ei ületanud poolt katsekeha kõrgust. Suurematel katsekehadel (kõrgus 150 mm) kasutati külgtöestust, et vältida katsekehade kiivet. Toestus võimaldas katsekehadel painduda ilma olulise hõõrdetakistusega. Väiksematel katsekehadel (kõrgus 100 mm) polnud külgtöestust vaja [8].

Katse käigus mõõdeti tala mõlemal küljel läbipainded ja arvutati tulemuste aritmeetiline keskmine. Veel leiti läbipainetele vastavad koormused ja maksimaalne koormus. Katsetulemused salvestati arvuti tarkvara abil ning saadud tulemuste põhjal arvutati elastsusmoodulid ja paindetugevused. Paindeelastsusmoodulid leiti lineaarsest regressioonist vahemikus  $0,1 F_{\max}$  ja  $0,4 F_{\max}$ , mille korral korrelatsioonitegur oli suurem kui 0,99. Globaalne paindeelastsusmoodul arvutati valemiga [8]:

$$E_{m,g} = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3 \left( 2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gbh} \right)} \quad (5)$$

kus  $E_{m,g}$  on globaalne elastsusmoodul, Pa;

$F_2 - F_1$  – on koormuse juurdekasv, N;

$w_2 - w_1 - (F_2 - F_1)$ -le vastav läbipainde juurdekasv, mm;

$l$  – katseava pikkus, mm;

$a$  – kaugus koormuse rakenduspunkti ja lähima toe vahel, mm;

$b$  – katsekeha ristlõike laius, mm;

$h$  – katsekeha ristlõike kõrgus, mm;

$G$  – nihkemoodul, N/mm<sup>2</sup>.

Standard lubab okaspuuliikide keskmiseks nihkemooduliks võtta  $G = 650 \text{ N/mm}^2$ , mida kasutati ka uurimustöös. Elastsusmoodul arvutati täpsusega 1% [8].

Kuna katsekehade niiskussisaldus ei olnud 12%, siis arvutati paindekatsel leitud elastsusmoodulid 12% niiskussisalduse peale, juhinduti standardist [43]. Iga niiskussisalduse protsent üle standardniiskussisalduse suurendab elastsusmoodulit 1% võrra ning iga protsent alla standardniiskussisalduse vähendab elastsusmoodulit 1% võrra [43].

Paindetugevus arvutati valemiga [8]:

$$f_m = \frac{3F_{max}a}{bh^2} \quad (6)$$

kus  $f_m$  on paindetugevus, N/mm<sup>2</sup>;

$F_{max}$  - maksimaalne koormus, N;

$a$  – kaugus koormuse rakenduspunkti ja lähima toe vahel, mm;

$b$  – katsekeha ristlõike laius, mm;

$h$  – katsekeha ristlõike kõrgus, mm.

Paindetugevuse ümberarvutamist standardniiskussisaldusele ei ole vajalik, kui katsekehade niiskussisaldus jääb vahemikku 8 % kuni 18 % [43].

Lõpuks arvutati paindekatsel saadud tulemuste põhjal igale katsekehale vastav tugevusklass standardi [15] alusel.

## 2.7. Statistiline andmetöötlus

Katsete käigus saadud andmed sisestati programmi *MS Excel*, millega viidi läbi katseandmete statistiline uuring ning korrelatsioon- ja regressioonanalüüs tunnuste vaheliste seoste leidmiseks.

Katseandmete statistilisel uurimisel kasutatud erinevad diagrammid ja korrelatsiooni-maatriksid [45]:

- jaotushistogramm – näitab ühe tunnuse väärtuste esinemist vahemike kaupa;
- karpdiagramm – näitab tunnuse jaotuse hajuvust. Karp näitab 25% ja 75% kvartiile ja mediaani ning „vurrude“ tipud näitavad tunnuse minimaalset ja maksimaalset väärtust;

- hajuvusdiagramm – näitab kahe tunnuse vahelist sõltuvust;
- korrelatsioonimaatriks – näitab tunnuste omavahelist korreleeruvust korrelatsioonikordaja  $r$  kaudu.

Tunnuste vaheliste seoste iseloomustamiseks kasutati järgmisi statistilisi näitajaid [45]:

- korrelatsioonikordaja  $r$  – kasutatakse uuritavate tunnuste vahelise lineaarse seose tugevuse iseloomustamiseks;
- determinatsioonikordaja  $R^2$  – kasutatakse iseloomustamiseks, kui suur osa funktsioontunnuse varieeruvusest (hälvete ruutude summast) kirjeldatakse regressioonivõrrandiga.

Seoste tugevust hinnatakse järgnevalt [45]:

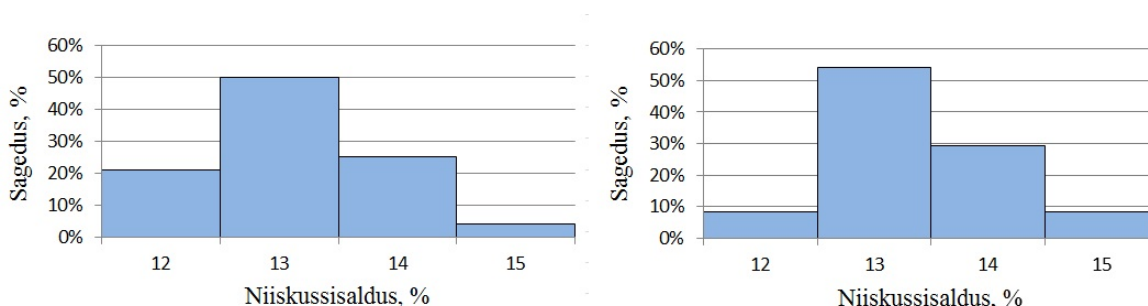
- $r = 0$  – korrelatsioon puudub;
- $r \leq |0,3|$  – väga nõrk seos;
- $|0,3| \leq r \leq |0,7|$  – keskmise tugevusega seos;
- $r \geq |0,7|$  – tugev seos;
- $r = 1$  – täielikult korreleeruvad suurused.

### 3. TULEMUSED JA ARUTELU

#### 3.1. Katsekehade füüsilis-mehaaniliste parameetrite ülevaade

Enne katseandmete analüüsimist on oluline teha ülevaade katsekehade füüsilis-mehaanilistest parameetritest. Selleks on koostatud sagedusdiagrammid katsekehade niiskussisalduse, tiheduse, purustaval katsel saadud paindetugevuse ja staatilise elastsusmooduli kohta. Võrdlevalt on kõrvutatud männi- ja kuusepuidust katsekehade histogrammid. Paindetugevuse ja staatilise elastsusmoodulite tulemustele on lisaks kõrvutatud väikeste ja suurte katsekehade sagedusdiagrammid. Joonised on koostatud lisa 1 ja 2 põhjal.

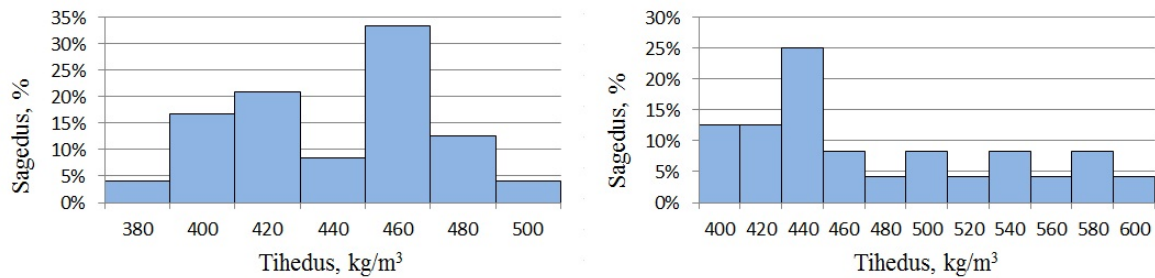
Uurimustöös oli oluline, et katsekehad vastaksid 12% absoluutsele standardniiskussisaldusele. Kuigi katsekehi kuivatati AS Tiksoja Puidugrupi kamberkuivatis ligi kaks nädalat, ei saavutatud siiski soovitud 12%-list absoluutset niiskussisaldust. Histogramm näitab, et kuusepuidust katsekehade absoluutne niiskussisaldus oli 12...15% ja männipuidust katsekehade absoluutne niiskussisaldus oli samuti 12...15%. Kuusepuidust katsekehade korral oli standardniiskussisaldusel olevate katsekehade arv natuke suurem kui männipuidust katsekehade korral (vt joonis 18).



**Joonis 18.** Vasakul kuusepuidust ja paremal männipuidust katsekehade absoluutse niiskussisalduse sagedusdiagramm

Puidu tihedus määratakse kindlal niiskussisaldusel. Uurimustöös peeti oluliseks, et katsekehade tihedus arvutatakse ühele ja samale niiskussisaldusele, mis on vastavalt

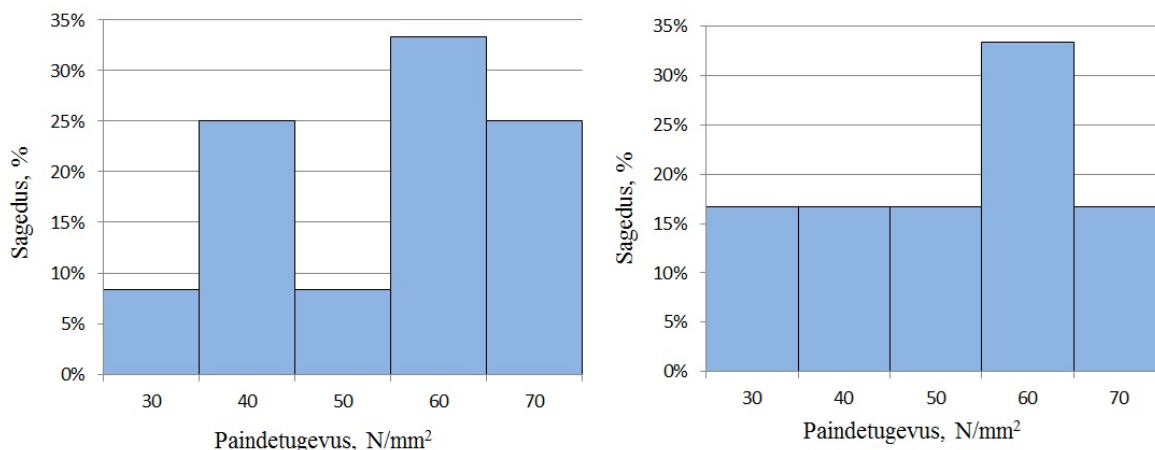
Eurostandardile 12% [15]. Histogramm (vt joonis 19) näitab, et katsekehade tiheduse sagedused on väga erinevad. Kuusepuidust katsekehade tihedus jääb vahemikku 380...500 kg/m<sup>3</sup>; samas männipuidust katsekehade tihedus varieerub tunduvalt rohkem, nende tihedus jääb vahemikku 400...600 kg/m<sup>3</sup>.



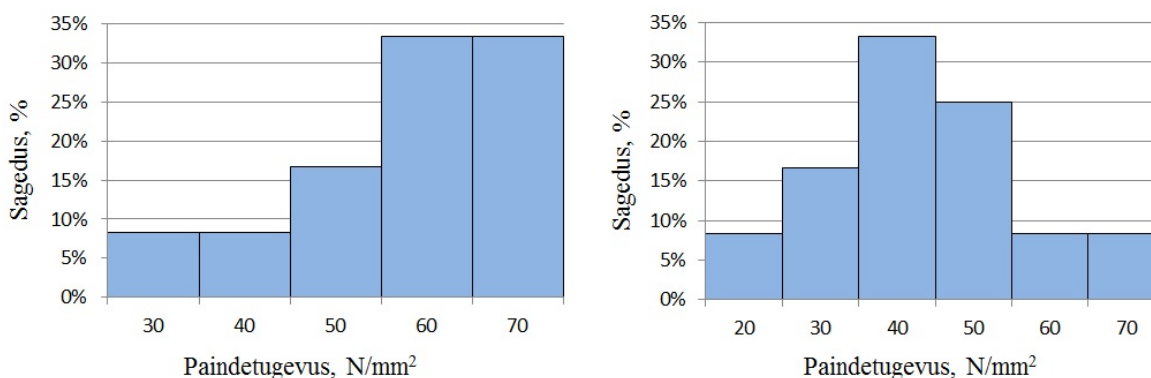
**Joonis 19.** Vasakul kuusepuidust ja paremal männipuidust katsekehade tihedused 12% absoluutse niiskussisalduse juures

Hariliku kuusepuidu keskmine tihedus on enamasti 450...470 kg/m<sup>3</sup> ja hariliku männipuidu keskmine tihedus vastavalt 500...530 kg/m<sup>3</sup> [46]. Saarmani ja Veibri [10] andmetel on hariliku kuusepuidu keskmine tihedus niiskusel 12% 445 kg/m<sup>3</sup> ja harilikul männil vastavalt 500 kg/m<sup>3</sup>. Antud uurimustöös on katsekehade keskmised tihedused samas suurusjärgus, kuid varieeruvus on tunduvalt suurem. Histogrammidelt on selgelt näha, et mõlema puuliigi katsekehade tihedused ei vasta normaaljaotusele.

Järgnevalt on toodud katsekehade purustaval paindekatsel saadud paindetugevuste väärtuste histogrammid (vt joonis 20 ja 21). Katsekehade paindetugevused on toodud niiskussisaldusel 12...15%. Võrreldes omavahel väiksema ristlõikega (50x100 mm) katsekehasid, näeme, et paindetugevuse jaotused ei vasta normaaljaotusele. Kuusepuidust katsekehade korral näeme, et enim on kõrgema paindetugevusega katsekehi. Suurema ristlõikega (50x150 mm) katsekehade graafikul näeme, et enim on just keskmisest kõrgemate näitajatega kuusepuidust katsekehi. Suurte männipuidust katsekehade paindetugevusi analüüsid näeme, et enim on keskmiste tunnustega katsekehi. Võib väita, et sagedusjaotus läheneb normaaljaotusele.

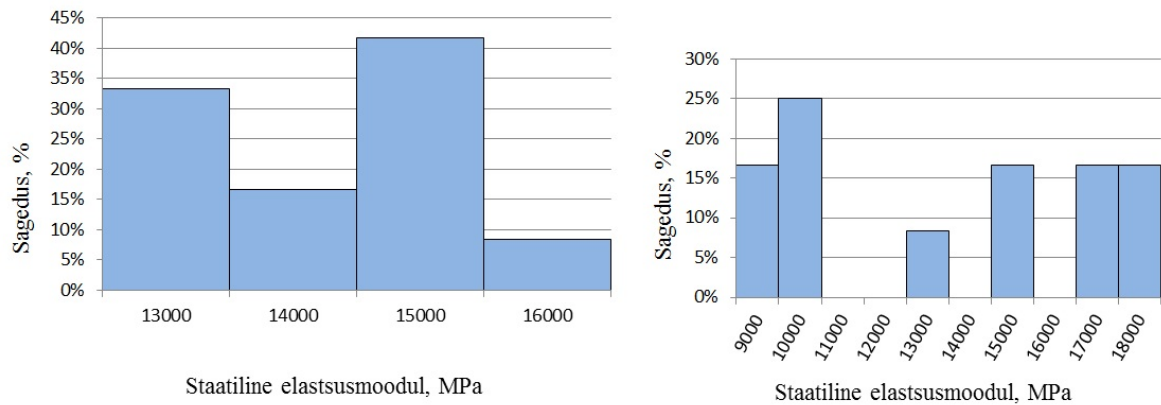


**Joonis 20.** Vasakul kuusepuidust ja paremal männipuidust katsekehade paindetugevuse sagedusdiagramm (ristlõige 50x100 mm)

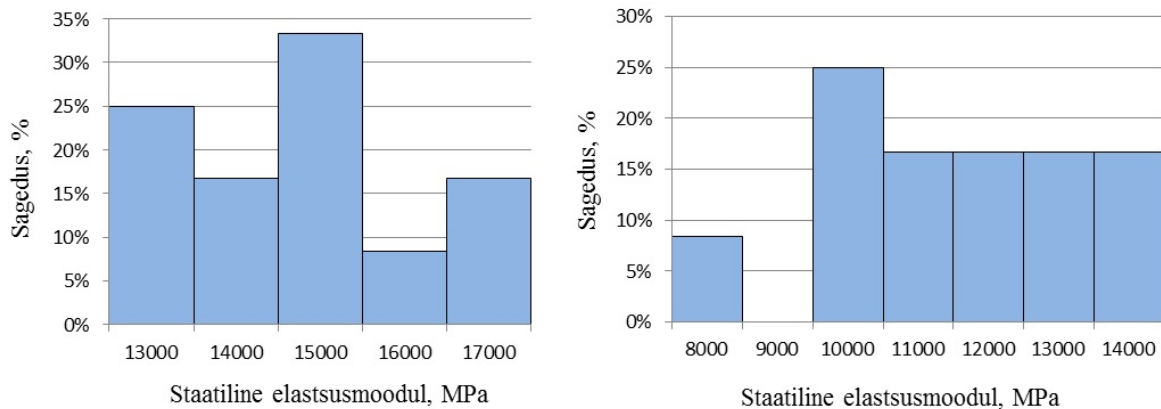


**Joonis 21.** Vasakul kuusepuidust ja paremal männipuidust katsekehade paindetugevuse sagedusdiagramm (ristlõige 50x150 mm)

Purustaval paindekatsel on staatilised elastsusmoodulid ümber arvutatud 12% niiskussisaldusele vastavalt standardile [43]. Võrreldes omavahel kuuse- ja männipuidust katsekehade staatilisi elastsusmooduleid (vt joonis 22 ja 23), näeme, et tulemused erinevad puuliigiti. Männipuidust katsekehade tulemused varieeruvad rohkem kui kuusepuidust katsekehade tulemused. Kokkuvõtvalt võib öelda, et staatiliste elastsusmoodulite jaotused ei vasta normaaljaotusele.



**Joonis 22.** Vasakul kuusepuidust ja paremal männipuidust katsekehade elastsusmoodulite sagedusdiagramm (ristlõige 50x100 mm)



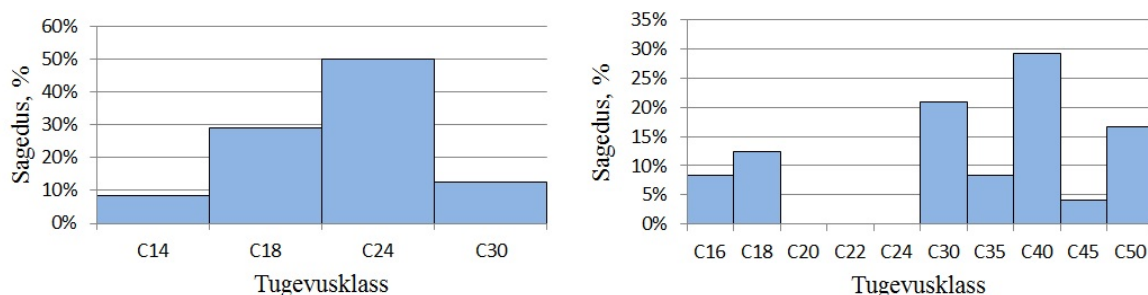
**Joonis 23.** Vasakul kuusepuidust ja paremal männipuidust katsekehade elastsusmoodulite sagedusdiagramm (ristlõige 50x150 mm)

### 3.2. Visuaalse tugevussorteerimise tulemused ja võrdlus paindekatses tulemustega

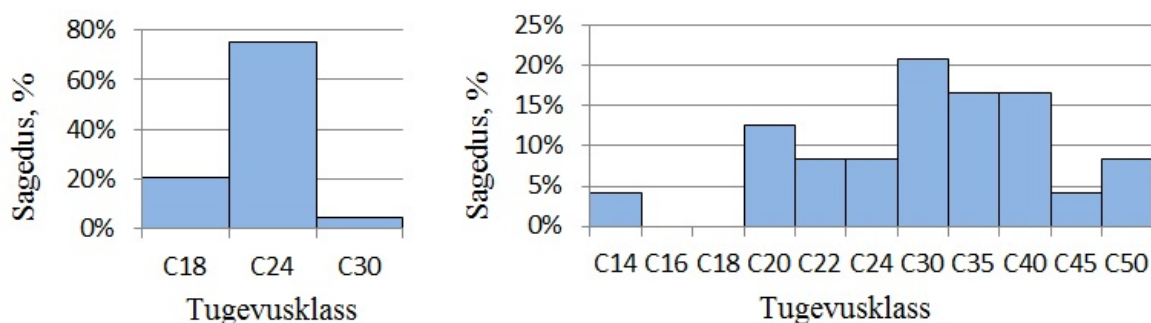
Katsekehade visuaalsel tugevussorteerimisel mõjutasid tulemust enim oksad (servaoks, küljeoks ja oksasumma). Ükski katsekeha praaki ei läinud. Nimelt sai 95,83% katsekehade tugevusklassi määramisel otsustavaks okste läbimõõdu ja asukohaga seotud piirangud ning ülejäänud 4,17% puhul said määravaks muud puidurikked (kõvamädanik ja putukkahjustused). Niisiis võib väita, et visuaalsel tugevussorteerimisel on oksad kõige olulisemad tugevust mõjutavad tegurid ning ülejäänud puidurikked on suurusjärgu võrra vähem olulisemad. Antud uurimustöö tulemused langevad kokku ka varem Norras läbi viidud uuringuga, kus kuusepuidu visuaalsel tugevussorteerimisel 91% juhtudest sai tugevusklassi määramisel otsustavaks okstega seotud piirangud [47].



Võrreldes visuaalsel tugevussorteerimisel ja purustaval paindekatsel saadud tugevusklasse, näeme, et graafikud ei ole üldse sarnased (vt joonis 24 ja 25). Kui visuaalsel tugevussorteerimise standardi [7] järgi on katsekehi võimalik sorteerida ainult nelja tugevusklassi, siis purustaval paindekatsel saadud tulemuste alusel jagunesid katsekehad vastavalt standardile [15] kuni kaheteistkümnesse tugevusklassi. Järgnevad sagedusdiagrammid on koostatud Lisa 1 ja 2 põhjal.



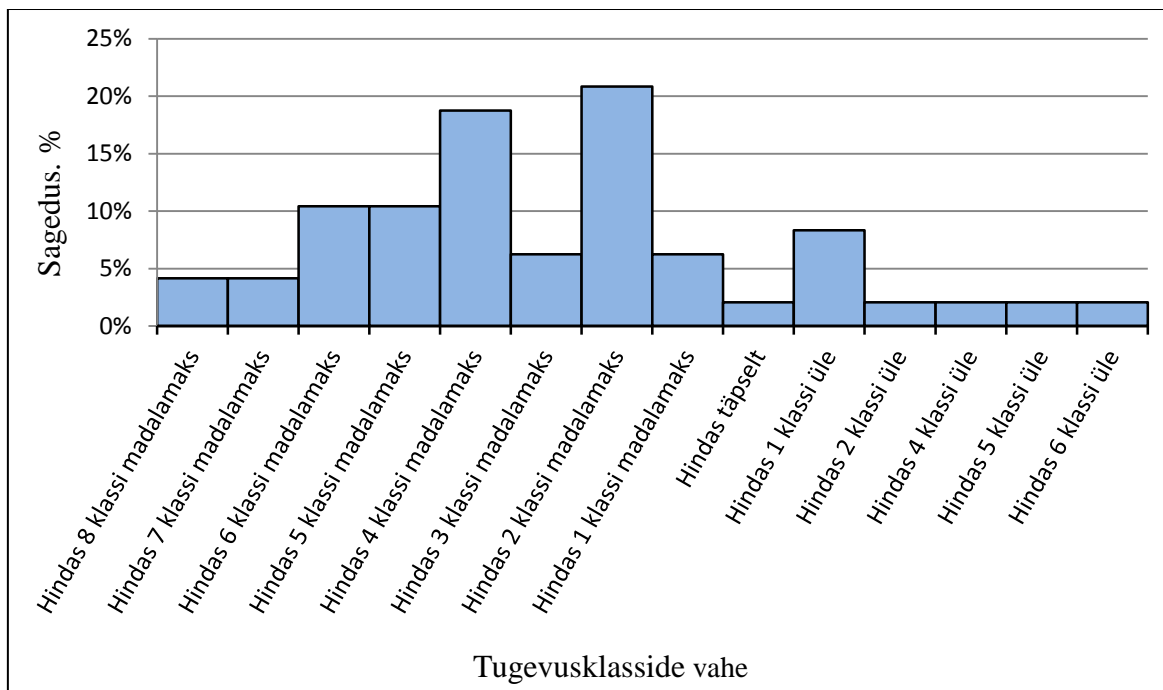
**Joonis 24.** Vasakul visuaalsel tugevussorteerimisel ja paremal purustaval paindekatsel saadud tugevusklassid männipuidust katsekehadel



**Joonis 25.** Vasakul visuaalsel tugevussorteerimisel ja paremal purustaval paindekatsel saadud tugevusklassid kuusepuidust katsekehadel

Võrreldes visuaalse tugevussorteerimise tulemusi paindekatsel saadud tugevusklassidega, näeme, et kui visuaalsel tugevussorteerimisel on kõige kõrgem klass C30, siis paindekatsel on see koguni C50. Siit tuleb ka visuaalse tugevussorteerimise üks suuremaid puudusi: puitmaterjali ei ole võimalik sorteerida kõrgematesse tugevusklassidesse ja liiga hea puitmaterjal turustatakse madalama klassi materjalina. Mõlema puuliigi puhul on selgelt näha, et purustaval paindekatsel on suurem osa katsekehade tugevusklass C30 ja kõrgem, samas visuaalsel tugevussorteerimisel on C30 tugevusklassi katsekehade arv väike. See näitab, et visuaalse tugevussorteerimise suurimaks puuduseks on sorteerimise täpsus, enamasti hinnatakse puitmaterjal üks kuni mitu tugevusklassi tegelikusest madalamaks.

Antud uurimustöös hinnati ligi 81% katsekehi tegelikkusest üks kuni kaheksa klassi madalamaks (vt joonis 26). Täpselt hinnati ainult 2% katsekehdest. Ligi 17% katsekehdest hinnati üks kuni kuus tugevusklassi kõrgemaks, kui materjal tegelikult oli.



**Joonis 26.** Visuaalse tugevussorteerimise ja purustaval paindekatsel saadud tugevusklasside vahe

Puitmaterjali tugevusklassi ülehindamine on eriti ohtlik lõpptarbija seisukohast, kuna sellisel juhul ei vasta materjali tugevus-jäikuse omadused standardis kehtestatud väärtustele ning konstruktsioonis võivad tekkida probleemid. Antud probleemi vältimiseks kasutatakse puitkonstruktsioonide projekteerimisel vastavaid osavarutegureid, kusjuures eeldatakse, et materjal on sorteeritud võimalikult täpselt. Visuaalse tugevussorteerimisega ja paindekatsel saadud tugevusklasside vahel on nõrk seos,  $R^2=0,06$  ja regressioonivõrrand  $y=0,6523x+18,436$  ning  $p<0,04$ .

Uurimustöö tulemused langesid kokku ka varem tehtud uurimustega [35], milles leiti, et visuaalse tugevussorteerimise täpsus jätab soovida ning tihti eksitakse tugevusklassi määramisega, eriti väikeste ja suurte ristlõigetega korral. Samuti hinnatakse liiga hea materjal madalamasse tugevusklassi, kuna visuaalsel tugevussorteerimisel on tugevusklasside arv piiratud.

### 3.3. Katsekehade statistilised karakteristikud

#### 3.3.1. Väikeste katsekehade peamised statistilised karakteristikud

Järgnevat tabelites 4 ja 5 on välja toodud kuuse- ja männipuidust väikeste (ristlõige 50x100mm) katsekehade karakteristikute statistilised näitajad. Tabelis on näidatud erinevate mõõtmisviisidega saadud heli levimise kiirused (m/s), paindekatsel saadud maksimaalne paindetugevus (MPa) ja staatiline elastsusmoodul 12% niiskussisaldusel (MPa). Proovikeha arvutatud tihedus 12% niiskussisaldusel ( $\text{kg/m}^3$ ), proovikeha tihedus 12% niiskussisaldusel ( $\text{kg/m}^3$ ) ning absoluutne niiskussisaldus (%).

**Tabel 4.** Männipuidust väikeste katsekehade statistilised näitajad (ristlõige 50x100mm)

Põhinäitajad/ tunnused	F-A, (m/s)	F-B (1), (m/s)	F-B (2), (m/s)	F-C (1), (m/s)	F-C (2), (m/s)	Max painde- tugevus, (MPa)	Staatiline elastsus- moodul, (MPa)	Arvutatud tihedus, ( $\text{kg/m}^3$ )	Proovi- keha tihedus, ( $\text{kg/m}^3$ )	Absoluutne niiskus- sisaldus, (%)
Keskmine	5072	4810	4892	4849	4838	46,04	12862	502,9	497,2	13,16
Mediaan	5105	4801	4918	4845	4809	50,5	13577	502,4	516,4	12,95
Standardhälve	281,8	330,7	360,1	282	326,2	13,69	3732	2,024	67,48	0,797
Miinumum	4549	4317	4296	4387	4320	20,87	8080	500,6	392,8	12,25
Maksimum	5452	5373	5471	5352	5341	64,74	17502	507,4	585,5	14,93

Märkused: Tabel on koostatud lisa 3 põhjal. Tähistused: F-A - Fakopp otstest pikikiudu, F-B (1) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha ühel ja samal serval (esimene serv), F-B (2) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha ühel ja samal serval (teine serv), F-C (1) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha vastasserval ja kumbki erinevas otsas (esimene variant), F-C (2) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha vastasserval ja kumbki erinevas otsas (teine variant).

**Tabel 5.** Kuusepuidust väikeste katsekehade statistilised näitajad (ristlõige 50x100mm)

Põhinäitajad/ tunnused	F-A, (m/s)	F-B (1), (m/s)	F-B (2), (m/s)	F-C (1), (m/s)	F-C (2), (m/s)	Max painde- tugevus, (MPa)	Staatiline elastsus- moodul, (MPa)	Arvutatud tihedus, ( $\text{kg/m}^3$ )	Proovi- keha tihedus, ( $\text{kg/m}^3$ )	Absoluutne niiskus- sisaldus, (%)
Keskmine	5650	5385	5502	5349	5421	49,68	13677	445,9	423,0	12,40
Mediaan	5644	5414	5519	5368	5403	52,79	13810	445,9	416,0	12,40
Standardhälve	103,9	226,9	181,6	170,4	174,5	11,32	1124	1,299	30,05	0,580
Miinumum	5483	4869	5192	5118	5099	29,54	12048	443,8	375,1	11,45
Maksimum	5798	5788	5775	5708	5631	62,07	15649	448,8	463,1	13,68

Märkused: Tabel on koostatud lisa 4 põhjal. Tähistused: F-A - Fakopp otstest pikikiudu, F-B (1) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha ühel ja samal serval (esimene serv), F-B (2) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha ühel ja samal serval (teine serv), F-C (1) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha vastasserval ja kumbki erinevas otsas (esimene variant), F-C (2) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha vastasserval ja kumbki erinevas otsas (teine variant).

Võrreldes kuuse- ja männipuidust väikeste katsekehade statistilisi näitajaid, näeme, et esimesel puhul on keskmised heli levimise kiirused kõikide mõõteviiside korral suuremad kui männipuidust katsekehadel. Võrreldes erinevate mõõteviisidega saadud helikiiruste miinimum- ja maksimumväärtusi, näeme, et männipuidust katsekehade tulemuste vahel on suurem erinevus kui kuusepuidust katsekehadel. Mõlema puuliigi korral on väikseim miinimum- ja maksimumväärtuste erinevus mõõteviisi F-A korral. Samuti on mõlemast puuliigist katsekehadel mõõteviisi F-A korral kõige väiksemad standardhälbe väärtused, mis viitavad tulemuse väiksele hajuvusele. Ülejäänud mõõtmisviiside korral on standardhälbe väärtused suuremad, mis omakorda viitavad ka tulemuste suuremale hajuvusele.

Uurimustöös saadi väikeste katsekehade maksimaalseks paindetugevuseks männipuidul 64,74 MPa ja kuusepuidul 62,07 MPa. Hani [29] sai oma magistrیتöös katsetatud kuusepuidust katsekehade keskmiseks maksimaalseks paindetugevuseks 37,33 MPa ning männipuidust katsekehade korral 52,36 MPa. Vaadeldes paindetugevuse keskmist erinevust aritmeetilisest keskmisest, näeme, et kuusepuidul on see näitaja 11,32 MPa, mis viitab tulemuste võrdlemisi väiksele hajuvusele. Samas männipuidul on vastav väärtus 13,69 MPa, mis on natuke kehvem tulemus. Mõlema puuliigi korral on valimis esindatud üksikud väga nõrgad ja tugevad katsekehad, sellele viitavad paindetugevuse miinimum- ja maksimumväärtuste suur vahe.

Uurimustöös saadi purustaval paindekatsel kuusepuidust katsekehade keskmiseks staatiliseks elastsusmooduliks 12% niiskussisalduse juures 13677 MPa, männipuidul vastavalt 12862 MPa. Võrreldes mõlema puuliigi staatiliste elastsusmoodulite standardhälvet, näeme, et männipuidust katsekehadel on tulemus ligi kolm korda suurem, mis viitab tulemuste suurele hajuvusele.

Võrreldes omavahel arvatud tihedust ja tihedust, mis leiti katsekehast lõigatud proovikeha järgi ning arvutati 12% niiskussisaldusele, näeme, et tulemused on küllaltki erinevad. Arvatud tiheduse hajuvus mõlemast puuliigist katsekehade korral on peaaegu olematu, see tähendab, et tulemuste hajuvus on väga väike. Vaadates aga proovikehast saadud tihedusi, näeme, et tulemuste varieeruvus on võrdlemisi suur. Kuusepuidust katsekehade tihedus jäi vahemikku 375,1...463,1 kg/m<sup>3</sup> ning männipuidust katsekehadel vastavalt 392,8...585,5 kg/m<sup>3</sup>.

### 3.3.2. Suurte katsekehade peamised statistilised karakteristikud

Järgnevat tabelites 6 ja 7 on välja toodud kuuse- ja männipuidust väikeste (ristlõige 50x100mm) katsekehade karakteristikute statistilised näitajad. Tabelis on näidatud erinevate mõõtmisviisidega saadud heli levimise kiirused (m/s), paindekatsel saadud maksimaalne paindetugevus (MPa) ja staatiline elastsusmoodul 12% niiskussisaldusel (MPa). Proovikeha arvutatud tihedus 12% niiskussisaldusel ( $\text{kg/m}^3$ ), proovikeha tihedus 12% niiskussisaldusel ( $\text{kg/m}^3$ ) ning absoluutne niiskussisaldus (%).

**Tabel 6.** Männipuidust suurte katsekehade statistilised näitajad (ristlõige 50x150mm)

Põhinäitajad/ tunnused	F-A, (m/s)	F-B (1), (m/s)	F-B (2), (m/s)	F-C (1), (m/s)	F-C (2), (m/s)	Max painde- tugevus, (MPa)	Staatiline elastsus- moodul, (MPa)	Arvutatud tihedus, ( $\text{kg/m}^3$ )	Proovi- keha tihedus, ( $\text{kg/m}^3$ )	Absoluutne niiskus- sisaldus, (%)
Keskmine	5236	5054	5173	5039	5124	38,18	11005	501,3	440,4	12,51
Mediaan	5199	5060	5164	5029	5128	37,50	10914	500,6	438,7	12,24
Standardhälve	212,9	216,2	294,8	233,1	232,5	13,58	1617	1,745	36,10	0,693
Miinimum	4877	4693	4707	4647	4729	15,55	7619	498,9	392,3	11,54
Maksimum	5705	5357	5700	5368	5575	67,47	13164	505,0	514,4	13,99

Märkused: Tabel on koostatud lisa 3 põhjal. Tähistused: F-A - Fakopp otstest pikikiudu, F-B (1) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha ühel ja samal serval (esimene serv), F-B (2) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha ühel ja samal serval (teine serv), F-C (1) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha vastasserval ja kumbki erinevas otsas (esimene variant), F-C (2) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha vastasserval ja kumbki erinevas otsas (teine variant).

**Tabel 7.** Kuusepuidust suurte katsekehade statistilised näitajad (ristlõige 50x150mm)

Põhinäitajad/ tunnused	F-A, (m/s)	F-B (1), (m/s)	F-B (2), (m/s)	F-C (1), (m/s)	F-C (2), (m/s)	Max painde- tugevus, (MPa)	Staatiline elastsus- moodul, (MPa)	Arvutatud tihedus, ( $\text{kg/m}^3$ )	Proovi- keha tihedus, ( $\text{kg/m}^3$ )	Absoluutne niiskus- sisaldus, (%)
Keskmine	5746	5716	5709	5518	5642	50,95	14201	446,9	443,3	12,86
Mediaan	5777	5773	5710	5533	5753	53,02	14316	446,9	446,8	12,86
Standardhälve	155,3	249,3	210,8	166,8	241,3	13,47	1329	1,524	28,50	0,679
Miinimum	5434	5267	5322	5172	5176	20,29	12479	444,4	399,8	11,73
Maksimum	5959	5987	5991	5720	5861	69,34	16263	449,7	498,1	14,09

Märkused: Tabel on koostatud lisa 4 põhjal. Tähistused: F-A - Fakopp otstest pikikiudu, F-B (1) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha ühel ja samal serval (esimene serv), F-B (2) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha ühel ja samal serval (teine serv), F-C (1) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha vastasserval ja kumbki erinevas otsas (esimene variant), F-C (2) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha vastasserval ja kumbki erinevas otsas (teine variant).

Võrreldes kuuse- ja männipuidust suurte katsekehade statistilisi näitajaid, näeme, et kuusepuidust katsekehadel on keskmised heli levimise kiirused kõikide mõõteviiside korral

suuremad kui männipuidust katsekehadel. Samasugune seaduspärasus esines ka väiksemate katsekehade (ristlõige 50x100 mm) korral. Samuti on suurema ristlõikega katsekehade keskmised heli levimise kiirused suuremad kui väiksema ristlõikega katsekehadel. See tulemus aga ei lange kokku varem tehtud uuringuga [48], kus väideti, et heli levimise kiirus sõltub ristlõike kõrguse ja laiuse suhtest. Suurim heli levimise kiirus saadi, kui katsekeha ristlõike kõrguse ja laiuse suhe oli 1...2 vahel. Võrreldes erinevate mõõteviisidega saadud helikiiruste miinimum- ja maksimumväärtusi, näeme, et männipuidust katsekehadel on tulemuste erinevus palju suurem kui kuusepuidust katsekehadel. Mõlemast puuliigist katsekehadel on mõõteviisi F-A korral kõige väiksemad standardhälbe väärtused, mis viitavad tulemuse väiksele hajuvusele. Samasugune tulemus esines ka väiksematel katsekehadel.

Suurte männipuidust katsekehade keskmiseks maksimaalseks paindetugevuseks saadi 38,18 MPa ja kuusepuidul vastavalt 50,95 MPa. Männipuidu korral on tulemus pisut madal, samas kuusepuidust katsekehadel on tulemus igati ootuspärane. Nimelt, riketeta männi- ja kuusepuidust proovikeha (ristlõige 20x20 mm ja pikkus 200...300 mm) paindetugevus on ligi 100 MPa. Kui määrata paindetugevus samasuguses puidus, kuid suuremate mõõtmetega talas (ristlõige 50x150 mm ja pikkus 3000...4000 mm), siis paindetugevuse väärtused jäävad suurusjärku 50 MPa [10]. Suurte männipuidust katsekehade korral keskmise maksimaalse paindetugevuse väärtus langes oluliselt võrreldes väiksemate männipuidust katsekehadega. Kuusepuidust katsekehadel jäi tulemus sisuliselt samaks. Mõlema puuliigi korral on valimis esindatud üksikud väga nõrgad ja tugevad katsekehad, selle viitavad paindetugevuse miinimum- ja maksimumväärtuste veel suurem vahe kui väikeste katsekehade puhul (männipuidul vastavalt 15,55 MPa ja 67,47 MPa ning kuusepuidul vastavalt 20,29 MPa ja 69,34 MPa).

Purustaval paindekatsel saadi suurte kuusepuidust katsekehade keskmiseks staatiliseks elastsusmooduliks 12% niiskussisalduse juures 14201 MPa, männipuidul vastavalt 11005 MPa. Männipuidust katsekehade staatilise elastsusmooduli miinimum- ja maksimumväärtused erinevad pea kaks korda, kuusepuidust katsekehadel on see näitaja palju väiksem. Antud tulemus langeb kokku ka väiksemate katsekehade tulemusega.

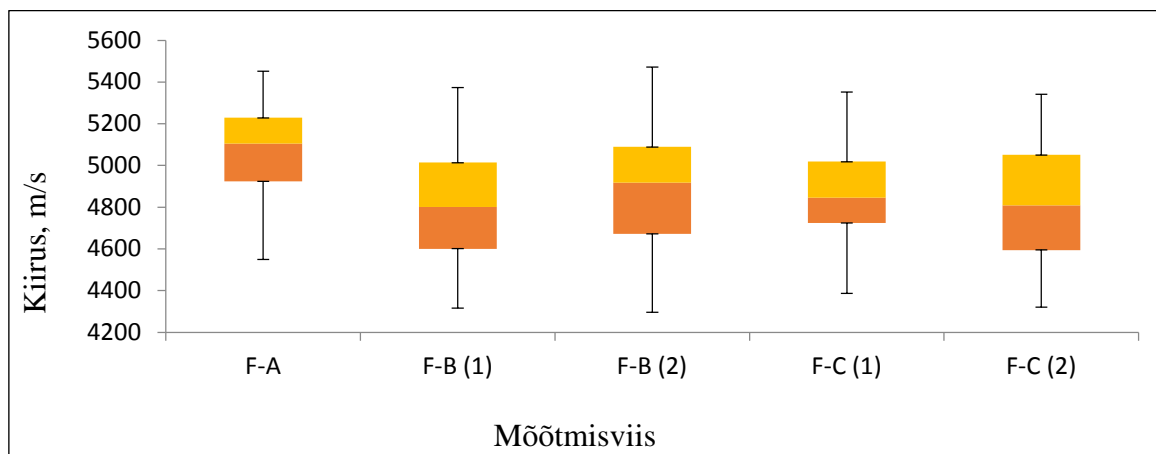
Kui võrrelda omavahel arvatud tihedust ja tihedust, mis leiti katsekehast lõigatud proovikeha järgi ning arvutati 12% niiskussisaldusele, näeme tulemustes samasuguseid seadus-

pärasusi, mida väikeste (ristlõige 50x100 mm) katsekehade korral. Arvutatud tiheduse hajuvus mõlemast puuliigist katsekehade korral on pea olematu, proovikehast saadud tiheduste tulemuste varieeruvus on võrdlemisi suur. Suurte kuusepuidust katsekehade tihedus jäi vahemikku 399,8...498,1 kg/m<sup>3</sup> ning männipuidust katsekehadel vastavalt 392,3...514,4 kg/m<sup>3</sup>.

### 3.4. Katsekehade heli kiiruste analüüs

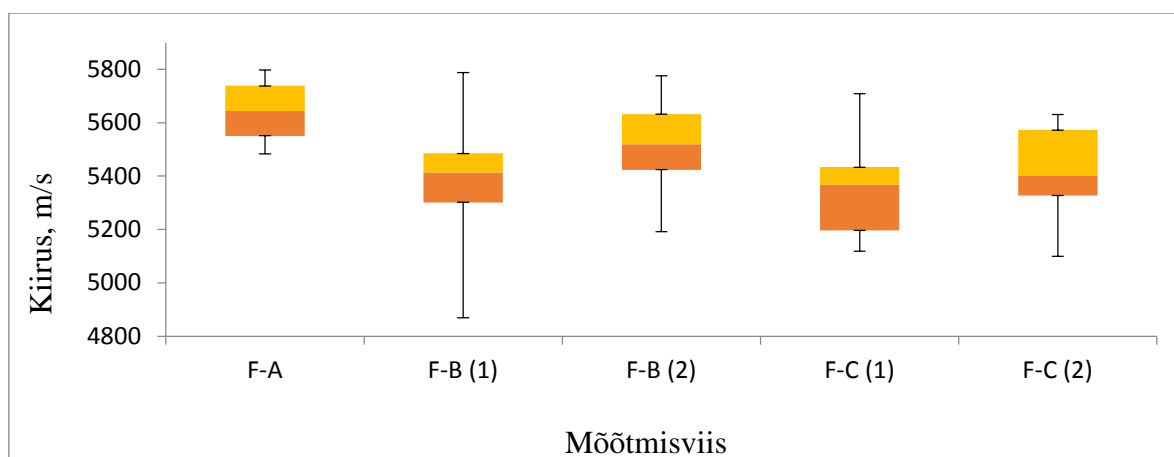
#### 3.4.1. Väikeste katsekehade heli kiiruste analüüs

Järgnevalt on ära toodud erinevate mõõtmisviisidega saadud heli kiiruste tulemused, mis on mõõdetud *Fakopp* seadmega (vt joonis 27). Esmalt on toodud karpdiagramm väikeste (ristlõige 50x100 mm) männipuidust katsekehade tulemustega. Võrreldes erinevaid mõõtmisviise, näeme, et tulemused ei erinegi väga suurel määral. *Fakopp* seadme eelised tulevad välja erinevate puitkonstruktsioonide ekspertiiside tegemisel, kus puitelemendi otsad on kaetud või neile ei pääse ligi, sellisel juhul on võimalik kasutada kaudseid mõõteviise.



**Joonis 27.** Väikeste (ristlõige 50x100 mm) männipuidust katsekehade heli kiiruse karpdiagramm. Märkused: Tabel on koostatud lisa 3 põhjal. Tähistused: F-A - Fakopp otstest pikikiudu, F-B (1) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha ühel ja samal serval (esimene serv), F-B (2) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha ühel ja samal serval (teine serv), F-C (1) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha vastasserval ja kumbki erinevas otsas (esimene variant), F-C (2) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha vastasserval ja kumbki erinevas otsas (teine variant).

Võrreldes väikeste (ristlõige 50x100 mm) kuusepuidust katsekehade saadud heli kiiruste tulemusi erinevate mõõtmisviiside korral, näeme, et kõige parem tulemus on saadud mõõtmisviisi F-A korral (vt8 joonis 28). Samuti on kuusepuidust katsekehade tulemus mõõteviisi F-A korral tunduvalt väiksema varieeruvusega kui männipuidust katsekehadel, samuti on miinimum- ja maksimumväärtuste vahe oluliselt väiksem. Silmapaistvalt suur ekstreemumite vahe esineb mõõteviisi F-B (1) korral. Võrreldes kõiki mõõteviise, on kuusepuidust katsekehade tulemuste varieeruvus tunduvalt suurem kui männipuidust katsekehadel.

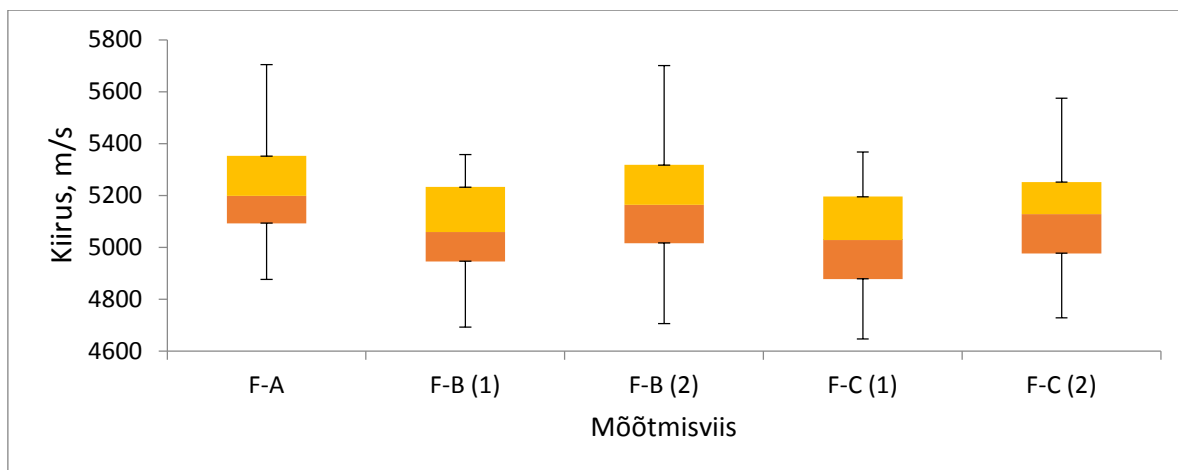


**Joonis 28.** Väikeste (ristlõige 50x100 mm) kuusepuidust katsekehade heli kiiruse karpdiagramm. Märkused: Tabel on koostatud lisa 4 põhjal. Tähistused: F-A - Fakopp otstest pikikiudu, F-B (1) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha ühel ja samal serval (esimene serv), F-B (2) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha ühel ja samal serval (teine serv), F-C (1) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha vastasserval ja kumbki erinevas otsas (esimene variant), F-C (2) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha vastasserval ja kumbki erinevas otsas (teine variant).

### 3.4.2. Suurte katsekehade heli kiiruste analüüs

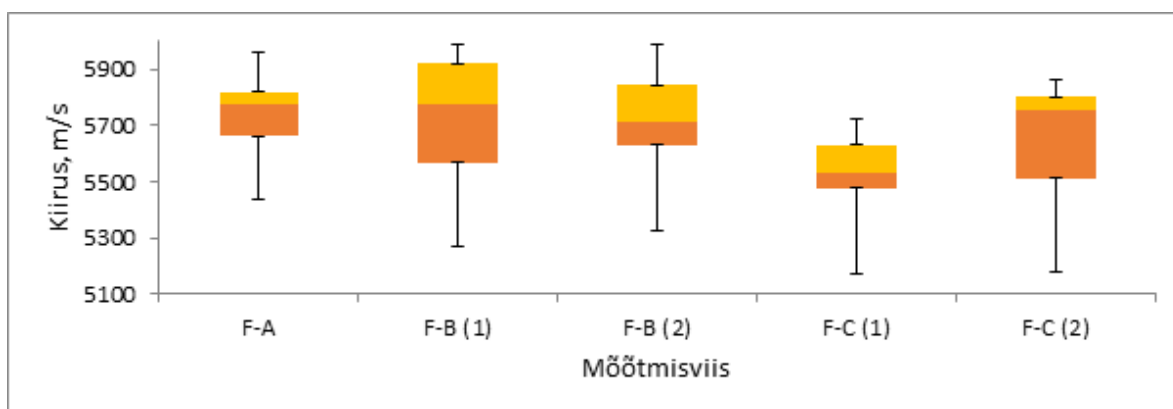
Esimesena on toodud karpdiagramm suurte (ristlõige 50x150 mm) männipuidust katsekehade tulemustega (vt joonis 29). Võrreldes erinevate mõõtmisviiside tulemusi, näeme, et need on sarnased väiksema ristlõikega männipuidust katsekehade tulemustega. Seetõttu on võimalik otsene mõõtmine vajaduse korral asendada kaudsega. Sarnastele järeldustele on oma uurimustöodes jõudnud ka Hani [29] ja Korsar [49]; mõlemad leidsid, et *Fakopp* seadme puhul on vajaduse korral võimalik otsene mõõtmisviis asendada kaudsega. Mõlemad järeldasid oma magistritöodes, et erinevate mõõtmisviiside vaheline hajuvus on suhteliselt väike ja tulemusi võib pidada usaldusväärseks.





**Joonis 29.** Suurte (ristlõige 50x150 mm) männipuidust katsekehade heli kiiruse karpdiagramm. Märkused: Tabel on koostatud lisa 3 põhjal. Tähistused: F-A - Fakopp otstest pikikiudu, F-B (1) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha ühel ja samal serval (esimene serv), F-B (2) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha ühel ja samal serval (teine serv), F-C (1) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha vastasserval ja kumbki erinevas otsas (esimene variant), F-C (2) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha vastasserval ja kumbki erinevas otsas (teine variant).

Suurte kuusepuidust katsekehade heli kiiruste tulemusi analüüsid näeme, et tulemuste hajuvus on suurem kui männipuidust katsekehadel (vt joonis 30). Sarnane seaduspärasus ilmnes ka väiksema ristlõikega katsekehade korral.



**Joonis 30.** Suurte (ristlõige 50x150 mm) kuusepuidust katsekehade heli kiiruse karpdiagramm. Märkused: Tabel on koostatud lisa 3 põhjal. Tähistused: F-A - Fakopp otstest pikikiudu, F-B (1) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha ühel ja samal serval (esimene serv), F-B (2) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha ühel ja samal serval (teine serv), F-C (1) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha vastasserval ja kumbki erinevas otsas (esimene variant), F-C (2) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha vastasserval ja kumbki erinevas otsas (teine variant).

### 3.5. Erinevate tunnuste korrelatsioonimaatriksid

#### 3.5.1. Väikeste katsekehade erinevate tunnuste korrelatsioonimaatriksid

Alljärgnevatel tabelitel iseloomustatakse väikeste (ristlõige 50x100 mm) männi- ja kuusepuidust katsekehade omavaheliste näitajate lineaarsete seoste tugevust korrelatsioonikordajate kaudu. Tulemused on toodud tabelites 8 ja 9.

**Tabel 8.** Männipuidust katsekehade korrelatsioonimaatriks (ristlõige 50x100 mm)

	<i>F-A,</i> (m/s)	<i>F-B (1),</i> (m/s)	<i>F-B (2),</i> (m/s)	<i>F-C (1),</i> (m/s)	<i>F-C (2),</i> (m/s)	<i>Max painde-</i> <i>tugevus,</i> (MPa)	<i>Staatiline</i> <i>elastsus-</i> <i>moodul,</i> (MPa)	<i>Arvutatud</i> <i>tihedus,</i> (kg/m <sup>3</sup> )	<i>Proovi-</i> <i>keha</i> <i>tihedus,</i> (kg/m <sup>3</sup> )	<i>Absoluutne</i> <i>niiskus-</i> <i>sisaldus,</i> (%)
<i>F-A, (m/s)</i>	1									
<i>F-B (1), (m/s)</i>	0,92	1								
<i>F-B (2), (m/s)</i>	0,95	0,84	1							
<i>F-C (1), (m/s)</i>	0,94	0,90	0,89	1						
<i>F-C (2), (m/s)</i>	0,95	0,92	0,95	0,85	1					
<i>Max painde-</i> <i>tugevus, (MPa)</i>	0,78	0,71	0,80	0,70	0,78	1				
<i>Staatiline</i> <i>elastsus-</i> <i>moodul,(MPa)</i>	0,85	0,78	0,87	0,74	0,91	0,92	1			
<i>Arvutatud</i> <i>tihedus,</i> <i>(kg/m<sup>3</sup>)</i>	0,43	0,32	0,44	0,34	0,44	0,81	0,73	1		
<i>Proovikeha</i> <i>tihedus,</i> <i>(kg/m<sup>3</sup>)</i>	0,62	0,53	0,65	0,54	0,70	0,76	0,89	0,77	1	
<i>Absoluutne</i> <i>niiskus-</i> <i>sisaldus, (%)</i>	0,44	0,32	0,44	0,34	0,44	0,81	0,74	1,00	0,77	1

Märkused: Tabel on koostatud lisa 3 põhjal. Oranžiga tähistatud väljad viitavad keskmise tugevusega seosele ( $0,3 \leq r \leq 0,7$ ); rohelisega tähistatud väljad viitavad tugevale seosele ( $r \geq 0,7$ ). Tähistused: F-A - Fakopp otstest pikikiudu, F-B (1) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha ühel ja samal serval (esimene serv), F-B (2) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha ühel ja samal serval (teine serv), F-C (1) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha vastasserval ja kumbki erinevas otsas (esimene variant), F-C (2) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha vastasserval ja kumbki erinevas otsas (teine variant).

Männipuidust katsekehade korrelatsioonimaatriksi analüüsimisel selgub, et erinevad mõõtmisviisid *Fakopp* seadmega on omavahel tugevas korrelatsioonis. Seetõttu võib väita,

et selle seadme puhul on otsesed ja kaudsed mõõtmisviisid omavahel tugevas seoses ning vajadusel võib üht teisega asendada. Mõõtmisviiside F-A ja F-B (1) ning F-B (2) vahel on korrelatsioon vastavalt  $r=0,92$  ja  $r=0,95$ . Samuti on tugev seos F-A ja F-C (1) ning F-C (2) vahel, korrelatsioon vastavalt  $r=0,94$  ning  $r=0,95$ .

Samuti on tugev lineaarne seos maksimaalse paindetugevuse ja staatilise elastsusmooduli vahel ( $r=0,92$ ), millest järeldub, et staatilist elastsusmoodulit saab vaadelda hea tugevusargumendina prognoosimaks puitmaterjali tugevust. Hani [29] magistritöös oli vastav näitaja  $r=0,93$ . Tugevad seosed esinevad ka erinevate mõõtmisviiside ja staatilise elastsusmooduli ning maksimaalse paindetugevuse vahel. Kõige parema seose paindetugevusega andis mõõtmisviis F-B (2), mille korral on korrelatsioon  $r=0,80$ . Kõige parema tulemuse staatilise paindeelastsusmooduliga andis mõõtmisviis F-C (2), mille korrelatsioon on  $r=0,91$ . Hani [29] töös andis kõige parema tulemuse maksimaalse paindetugevusega ja staatilise elastsusmooduliga mõõtmisviis F-A, mille korrelatsioon saadi vastavalt  $r=0,73$  ja  $r=0,80$ .

Eraldi vääriks väljatoomist tugev korrelatsioon proovikeha tiheduse ja staatilise elastsusmooduli vahel ( $r=0,89$ ). Samuti saadi tugev seos proovikeha tiheduse ja maksimaalse paindetugevuse vahel ( $r=0,76$ ). Sellest võib järeldada, et tihedust võib pidada heaks tugevusargumendiks. Veel on märkimisväärne arvatud tiheduse ja proovikeha tiheduse vaheline tugev korrelatsioon ( $r=0,77$ ). Sellest võib järeldada, et vajadusel on võimalik kaudsel teel arvutada puitelemendi tihedus, kui on teada tema niiskussisaldus.

Kui vaadata väikeste kuusepuidust katsekehade korrelatsioonimaatriksit (vt tabel 9), näeme, et tulemused on männipuidust katsekehade võrreldes drastiliselt erinevad. Kuusepuidust katsekehade korrelatsioonimaatriksi analüüsimisel selgub, et erinevad mõõtmisviisid on omavahel keskmises korrelatsioonis. Korrelatsioon jääb vahemikku  $r=0,35$ , mõõtmisviisi F-C (2) korral kuni  $r=0,54$  mõõtmisviisi F-B (2) puhul. Hani [29] sai seevastu oma töös kuusepuidust katsekehadel erinevate mõõtmisviiside korral tugevad seosed, korrelatsioon jäi vahemikku  $r=0,70...0,92$ . Kuna seos otseste ja kaudsete mõõtmisviiside vahel on keskmise tugevusega ning osadel ka keskmisest nõrgem seos, ei ole otstarbekas otsest mõõtmisviisi asendada kaudsega. Samas ei saa teha lõplikke järeldusi, kuna katsekehade arv on võrdlemisi väike ja tulemuste hajuvus on suur. Kindlasti

on vaja läbi viia edasisi uuringuid, et oleks võimalik täpsemalt öelda, kas otsese mõõtmisviisi asendamisel kaudsega on tulemused usaldusväärsed.

**Tabel 9.** Kuusepuidust katsekehade korrelatsioonimaatriks (ristlõige 50x100 mm)

	<i>F-A,</i> (m/s)	<i>F-B (1),</i> (m/s)	<i>F-B (2),</i> (m/s)	<i>F-C (1),</i> (m/s)	<i>F-C (2),</i> (m/s)	<i>Max</i> <i>painde-</i> <i>tugevus,</i> (MPa)	<i>Staatiline</i> <i>elastsus-</i> <i>moodul,</i> (MPa)	<i>Arvutatud</i> <i>tihedus,</i> (kg/m <sup>3</sup> )	<i>Proovi-</i> <i>keha</i> <i>tihedus,</i> (kg/m <sup>3</sup> )	<i>Absoluutne</i> <i>niiskus-</i> <i>sisaldus,</i> (%)
F-A, (m/s)	1									
F-B, (1) (m/s)	0,46	1								
F-B, (2) (m/s)	0,54	0,20	1							
F-C, (1) (m/s)	0,42	0,42	0,61	1						
F-C, (2) (m/s)	0,35	0,62	0,46	0,08	1					
Max painde- tugevus, (MPa)	0,42	0,46	0,45	0,39	0,43	1				
Staatiline elastsus- moodul,(MPa)	0,69	0,29	0,61	0,33	0,25	0,13	1			
Arvutatud tihedus, (kg/m <sup>3</sup> )	0,13	-0,39	0,45	-0,06	-0,18	-0,05	0,55	1		
Proovikeha tihedus, (kg/m <sup>3</sup> )	0,34	-0,04	0,32	0,26	-0,20	-0,43	0,67	0,54	1	
Absoluutne niiskus- sisaldus, (%)	0,13	-0,39	0,45	-0,06	-0,18	-0,05	0,55	1,00	0,54	1

Märkused: Tabel on koostatud lisa 4 põhjal. Oranžiga tähistatud väljad viitavad keskmise tugevusega seosele ( $0,3 \leq r \leq 0,7$ ); rohelisega tähistatud väljad viitavad tugevale seosele ( $r \geq 0,7$ ). Tähistused: F-A - Fakopp otstest pikikiudu, F-B (1) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha ühel ja samal serval (esimene serv), F-B (2) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha ühel ja samal serval (teine serv), F-C (1) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha vastasserval ja kumbki erinevas otsas (esimene variant), F-C (2) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha vastasserval ja kumbki erinevas otsas (teine variant).

Ka erinevate mõõtmisviiside ja maksimaalse paindetugevuse vahelised seosed on ligi kaks korda nõrgemad kui väikeste männipuidust katsekehade korral. Antud kuusepuidust katsekehadel on väga nõrk lineaarne seos maksimaalse paindetugevuse ja staatilise elastsusmooduli vahel ( $r=0,13$ ), millest järeldub, et staatilist elastsusmoodulit ei saa vaadelda hea tugevusargumentina prognoosimaks kuusepuidust materjali tugevust. Hani [29] magistriritöös oli vastav näitaja  $r=0,76$ . On raske öelda, millest on tingitud tulemuste nii

suur erinevus. Keskmised seosed esinevad ka mõõtmisviiside F-A, F-B (2) ja F-C (1) ning staatilise elastsusmooduli vahel. Ülejäänud mõõtmistulemused andsid nõrga korrelatsiooni. Kõige parema tulemuse staatilise paindeelastsusmooduliga andis mõõteviis F-A, mille korrelatsioon oli  $r=0,69$ . Hani [29] töös andis kõige parema tulemuse staatilise elastsusmooduliga samuti mõõtmisviis F-A, mille korrelatsioon saadi vastavalt  $r=0,86$ . Ka proovikeha tiheduse ja staatilise elastsusmooduli vahel jäi korrelatsiooni tugevus keskmiseks ( $r=0,67$ ). Tulemus jääb tugevasti alla männipuidust katsekehade omale. Märkimisväärne on arvatud tiheduse ja proovikeha tiheduse vaheline keskmine korrelatsioon ( $r=0,54$ ). Sellest võib järeldada, et vajadusel on võimalik kaudsel teel arvutada puitlemendi tihedus, kuid tulemustesse tuleb suhtuda teatava ettevaatusega, kuna tulemuste hajuvus on suur.

Kokkuvõtvalt võib öelda, et männi- ja kuusepuidust väikeste katsekehade tulemuste vahel on suured erinevused. Põhjused, millest antud olukord on tekkinud, ei ole teada. Kindlasti on vaja läbi viia edasisi uuringuid.

### **3.5.2. Suurte katsekehade erinevate tunnuste korrelatsioonimaatriksid**

Järgnevates tabelites on ära toodud suurte (ristlõige 50x150 mm) männi- ja kuusepuidust katsekehade omavaheliste näitajate lineaarsete seoste tugevus korrelatsioonikordajate kaudu. Tulemused on toodud tabelites 10 ja 11.

Analüüsides suurte männipuidust katsekehade korrelatsioonimaatriksit, näeme, et erinevate mõõtmisviiside vahel on tugev seos. Mõõtmisviiside F-A ja F-B (1) ning F-B (2) vahel on korrelatsioon vastavalt  $r=0,74$  ja  $r=0,89$ . Samuti on tugev seos F-A ja F-C (1) ning F-C (2) vahel, korrelatsioon vastavalt  $r=0,81$  ning  $r=0,92$ . Tulemused on ainult natuke madalamad kui väikeste katsekehade saadud tulemused. Siiski võib väita, et männipuidust katsekehade puhul võib vajaduse korral ühe mõõteviisi asendada teisega.

Maksimaalse paindetugevuse ja staatilise elastsusmooduli vahel on korrelatsioon ( $r=0,75$ ), millest järeldub, et staatilist elastsusmoodulit saab vaadelda hea tugevusargumendina prognoosimaks puitmaterjali tugevust. Sarnasele järeldusele jõuti ka väikeste (ristlõige 50x100 mm) katsekehade korral. Tugevad seosed esinevad ka erinevate mõõtmisviiside ja staatilise elastsusmooduli vahel, ainult mõõtmisviisi F-C (1) korral on seos keskmine

( $r=0,65$ ). Seosed mõõtmisviiside ja keskmiste maksimaalsete paindetugevuste vahel jäid kõikide mõõtmisviiside korral pea kaks korda madalamaks kui väikeste männipuidust katsekehadega saadud tulemused. Kõige parema tulemuse staatilise paindeelastsusmooduliga andis mõõteviis F-B (2), mille korrelatsioon oli  $r=0,78$ . Tugeva korrelatsiooni andis ka mõõtmisviis F-A ( $r=0,70$ ).

Samuti saadi arvutatud tiheduse ja proovikeha tiheduse vaheline tugev korrelatsioon ( $r=0,85$ ), mis on kõrgem kui väikeste männipuidust katsekehadega saadud tulemuste puhul. Niisiis võib öelda, et vajadusel on võimalik kaudsel teel arvutada puitelemendi tihedus.

**Tabel 10.** Suurte männipuidust katsekehade korrelatsioonimaatriks (ristlõige 50x150 mm)

	F-A, (m/s)	F-B (1), (m/s)	F-B (2), (m/s)	F-C (1), (m/s)	F-C (2), (m/s)	Max paindetugevus, (MPa)	Staatiline elastsusmoodul, (MPa)	Arvutatud tihedus, (kg/m <sup>3</sup> )	Proovikeha tihedus, (kg/m <sup>3</sup> )	Absoluutne niiskussisaldus, (%)
F-A, (m/s)	1									
F-B (1), (m/s)	0,74	1,00								
F-B (2), (m/s)	0,89	0,76	1,00							
F-C (1), (m/s)	0,81	0,94	0,85	1,00						
F-C (2), (m/s)	0,92	0,71	0,92	0,73	1,00					
Max paindetugevus, (MPa)	0,37	0,40	0,34	0,29	0,36	1,00				
Staatiline elastsusmoodul, (MPa)	0,70	0,70	0,78	0,65	0,71	0,75	1,00			
Arvutatud tihedus, (kg/m <sup>3</sup> )	0,39	0,41	0,22	0,22	0,32	0,58	0,64	1,00		
Proovikeha tihedus, (kg/m <sup>3</sup> )	0,17	0,36	0,10	0,13	0,15	0,66	0,62	0,85	1,00	
Absoluutne niiskussisaldus, (%)	0,39	0,41	0,22	0,22	0,32	0,58	0,64	1,00	0,85	1

Märkused: Tabel on koostatud lisa 3 põhjal. Oranžiga tähistatud väljad viitavad keskmise tugevusega seosele ( $0,3 \leq r \leq 0,7$ ); rohelisega tähistatud väljad viitavad tugevale seosele ( $r \geq 0,7$ ). Tähistused: F-A - Fakopp otstest pikikiudu, F-B (1) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha ühel ja samal serval (esimene serv), F-B (2) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha ühel ja samal serval (teine serv), F-C (1) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha vastasserval ja kumbki erinevas otsas (esimene variant), F-C (2) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha vastasserval ja kumbki erinevas otsas (teine variant).

Kui analüüsida suurte kuusepuidust katsekehade korrelatsioonimaatriksit (vt tabel 11), on selge, et ka siin esinevad erinevate mõõtmisviiside vahelised tugevad seosed. Aga kui võrrelda omavahel suuremate ja väiksemate kuusepuidust katsekehade erinevate mõõtmisviiside tulemusi, siis näeme, et tulemused suuremate katsekehade korral on ligi kaks korda paremad. Suurte kuusepuidust katsekehade korral võib mõõtmisviise asendada üksteisega, väiksemate katsekehade puhul ei ole see otstarbekas.

**Tabel 11.** Suurte kuusepuidust katsekehade korrelatsioonimaatriks (ristlõige 50x150 mm)

	<i>F-A, (m/s)</i>	<i>F-B (1), (m/s)</i>	<i>F-B (2), (m/s)</i>	<i>F-C (1), (m/s)</i>	<i>F-C (2), (m/s)</i>	<i>Max paindetugevus, (MPa)</i>	<i>Staatiline elastsusmoodul, (MPa)</i>	<i>Arvutatud tihedus, (kg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>Proovikeha tihedus, (kg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>Absoluutne niiskussisaldus, (%)</i>
<i>F-A, (m/s)</i>	1									
<i>F-B (1), (m/s)</i>	0,91	1								
<i>F-B (2), (m/s)</i>	0,75	0,59	1							
<i>F-C (1), (m/s)</i>	0,90	0,78	0,65	1						
<i>F-C (2), (m/s)</i>	0,78	0,80	0,81	0,52	1					
<i>Max paindetugevus, (MPa)</i>	0,47	0,58	0,17	0,39	0,26	1				
<i>Staatiline elastsusmoodul, (MPa)</i>	0,68	0,58	0,56	0,69	0,38	0,78	1			
<i>Arvutatud tihedus, (kg/m<sup>3</sup>)</i>	0,22	0,02	0,38	0,32	-0,01	0,38	0,74	1		
<i>Proovikeha tihedus, (kg/m<sup>3</sup>)</i>	-0,38	-0,45	-0,28	-0,10	-0,62	0,20	0,31	0,71	1	
<i>Absoluutne niiskussisaldus, (%)</i>	0,22	0,01	0,38	0,32	-0,01	0,38	0,74	1,00	0,71	1

Märkused: Tabel on koostatud lisa 4 põhjal. Oranžiga tähistatud väljad viitavad keskmise tugevusega seosele ( $0,3 \leq r \leq 0,7$ ); rohelisega tähistatud väljad viitavad tugevale seosele ( $r \geq 0,7$ ). Tähistused: F-A - Fakopp otstest pikikiudu, F-B (1) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha ühel ja samal serval (esimene serv), F-B (2) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha ühel ja samal serval (teine serv), F-C (1) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha vastasserval ja kumbki erinevas otsas (esimene variant), F-C (2) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha vastasserval ja kumbki erinevas otsas (teine variant).

Kui võrrelda väikeste ja suurte katsekehade maksimaalse paindetugevuse vahelisi seoseid, näeme, et tulemused on sisuliselt ühesugused, esineb keskmine korrelatsioon. Ainult

mõõtmisviiside F-B (2) ja F-C (2) korral on seosed nõrgad ( $r=0,17$  ja  $r=0,26$ ). Suurtel männipuidust katsekehadel on tulemuste jagunemine palju ühtlasem.

Suurte kuusepuidust katsekehade maksimaalse paindetugevuse ja staatilise elastsusmooduli vahel on korrelatsioon ( $r=0,78$ ), mis on sisuliselt võrdne männipuidust katsekehadega saadud tulemusega. Sarnasele järeldusele jõuti ka väikeste (ristlõige 50x100 mm) katsekehade korral. Erinevate mõõtmisviiside ja staatilise elastsusmooduli vahel saadi keskmine korrelatsioon. Kõige parema tulemuse staatilise paindeelastsusmooduliga andis mõõteviis F-C (1), mille korrelatsioon oli  $r=0,69$ . Sellele järgnes sisuliselt samasuguse tulemusega mõõtmisviis F-A, mille korrelatsiooniks saadi  $r=0,68$ . Suurtel kuuse- ja männipuidust katsekehadel saadi pea sarnane tulemus mõõteviisi F-A korral ( $r=0,68$  ja  $r=0,70$ ). Tulemus langeb kokku ka väikeste kuusepuidust katsekehade omaga ( $r=0,69$ ).

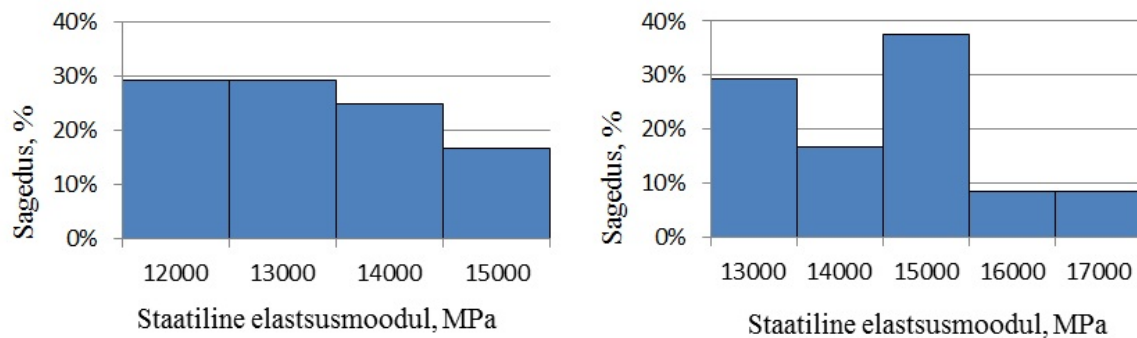
Võrreldes arvatud tiheduse ja proovikeha tiheduse vahelisi seoseid, näeme, et pea kõikide nii suurte kui ka väikeste kuuse- ja männipuidust katsekehade korral esineb tugev seos ( $r=0,71...0,85$ ). Ainult väiksema ristlõikega (50x100 mm) kuusepuidust katsekehade korral saadi keskmine seos ( $r=0,54$ ).

Üldiselt ei lange väikeste kuusepuidust proovikehade tulemused kokku ülejäänud katsekehade tulemustega.

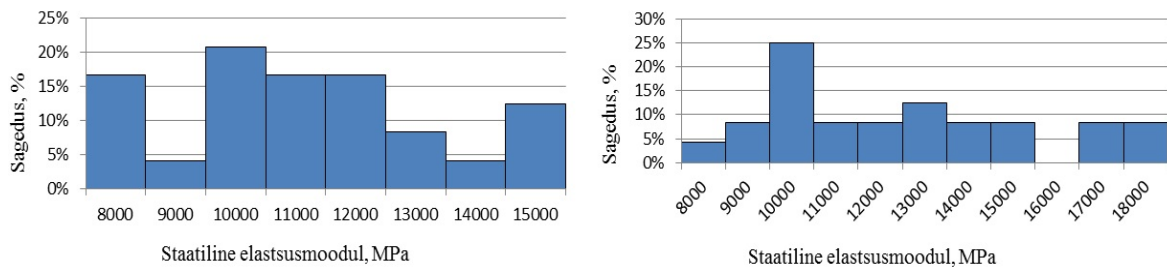
### **3.6. *Timber Grader*'i tulemuste analüüs**

Järgnevalt on toodud joonised 31 ja 32, millel on näidatud kuuse- ja männipuidust katsekehade staatilised elastsusmoodulid, mis on saadud *Timber Grader*'i ja purustava paindekatsega. Võrreldes tulemusi kuusepuidust katsekehade puhul, näeme, et *Timber Grader* seadmega saadud staatilised elastsusmoodulid on madalamad (12000...15000 MPa), kui purustaval paindekatsetel saadud staatilised elastsusmoodulid (13000...17000 MPa). Samasugune seaduspärasus esineb ka männipuidust katsekehade puhul. Sagedusdiagrammid on koostatud lisa 5 ja 6 põhjal.





**Joonis 31.** Vasakul *Timber Grader*'iga saadud staatilised elastsusmoodulid kuusepuidust katsekehadel. Paremalt kuusepuidust katsekehadel staatilised elastsusmoodulid, mis on saadud purustaval paindekatsel.



**Joonis 32.** Vasakul *Timber Grader*'iga saadud staatilised elastsusmoodulid männipuidust katsekehadel. Paremalt männipuidust katsekehadel staatilised elastsusmoodulid, mis on saadud purustaval paindekatsel.

Järgnevalt on esitatud kuuse- ja männipuidust katsekehade staatiliste elastsusmoodulite võrdlus, mis on saadud *Timber Grader*'i ja paindekatsel tulemuste vahel (vt tabel 12). Tabelis on välja toodud mõlema puuliigi staatiliste elastsusmoodulite aritmeetilised keskmised ning nende väärtuste erinevus protsentides, miinimum- ja maksimum väärtused, standardhälbed ja korrelatsioonid.

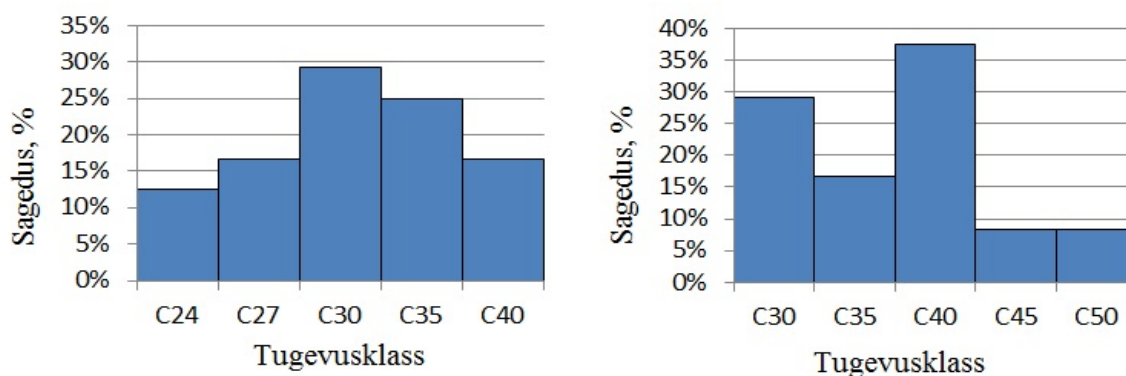
Võrreldes *Timber Grader*'i ja purustaval paindekatsel saadud staatiliste elastsusmoodulite aritmeetilisi keskmisi, näeme, et *Timber Grader* seade alahindab paindekatsel saadud staatilisi elastsusmooduleid. Kuusepuidust katsekehade puhul on tulemus täpsem, keskvaartuste erinevuse protsent on väiksem kui männipuidust katsekehade puhul. Analüüsidest männipuidust katsekehade tulemusi, näeme, et *Timber Grader*'i ja purustava paindekatsel saadud staatiliste elastsusmoodulite vahel on tugev seos  $r=0,96$ . Kuusepuidust katsekehade korral oli tulemus pisut madalam, esines siiski tugev seos  $r=0,90$ .

**Tabel 12.** Männi- ja kuusepuidust katsekehade staatiliste elastsusmoodulite võrdlus

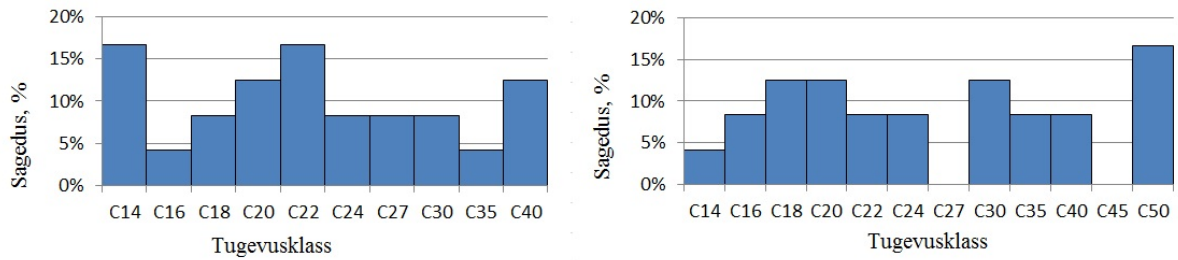
Tunnused	Kuusk		Mänd	
	$TG MoE_{stat}$ , MPa	$MoE_{stat}$ , MPa	$TG MoE_{stat}$ , MPa	$MoE_{stat}$ , MPa
Aritmeetiline keskmine, MPa	12703	13939	10726	11934
Keskväärtuste erinevus, %	9,73		11,26	
Miinumum, MPa	11036	12048	7587	7619
Maksimum, MPa	14350	16263	14682	17502
Standardhälve, MPa	1056	1233	2109	2968
Korrelatsioon	0,90		0,96	

Märkused: Tabel on koostatud lisa 5 ja 6 põhjal.  $TG MoE_{stat}$  – *Timber Grader* staatiline elastsusmoodul,  $MoE_{stat}$  – purustaval paindekatsel saadud staatiline elastsusmoodul

Alljärgnevatel joonistel on toodud kuuse- ja männipuidust katsekehade tugevusklasside sagedusdiagrammid (vt joonis 33 ja 34). Võrreldes *Timber Grader*'i ja purustava paindekatsel saadud tugevusklasside, on selgelt näha, et esimesel puhul hindab kuusepuidust katsekehade korral tugevusklassi ühe või kahe võrra madalamaks. Samasuguse järelduse saab teha ka männipuidust katsekehade korral. Jooniselt on selgelt näha, et männipuidust katsekehade tugevusklasside varieeruvus on suurem kui kuusepuidust katsekehadel. Võrreldes masintugevussorteerimise tulemusi visuaalse tugevussorteerimise tulemustega, on selgelt näha masintugevussorteerimise eelised. Puitmaterjali on võimalik sorteerida kõrgematesse standardis [21] toodud tugevusklassidesse. Niisiis, võimaluse korral peaks eelistama masinsorteerimist.



**Joonis 33.** Vasakul *Timber Grader* seadmega saadud tugevusklassid ja paremal purustaval paindekatsel saadud tugevusklassid kuusepuidust katsekehadel puhul



**Joonis 34.** Vasakul *Timber Grader* seadmega saadud tugevusklassid ja paremal purustaval paindekatsel saadud tugevusklassid männipuidust katsekehadel puhul

### 3.7. Elastsusmoodulite prognoos

Peatükk vaatleb kuuse- ja männipuidust katsekehade staatilise elastsusmooduli prognoosimise seoseid erinevatel mõõtmisviisidel saadud dünaamiliste elastsusmoodulite kaudu. Lisaks on ära toodud *Timber Grader* seadmega mõõdetud staatilise elastsusmooduli ning purustaval paindekatsel saadud elastsusmooduli seosed. Dünaamilised elastsusmoodulid on antud 12% niiskussisalduse juures, mis on arvatud vastavalt standardile [43]. *Timber Grader* seade arvutab staatilise elastsusmooduli ise 12% niiskussisalduse peale. Samuti on purustava paindekatsel saadud staatilised elastsusmoodulid ümber arvatud 12% niiskussisaldusele vastavalt standardile [43].

Esimesena võtame vaatluse alla männipuidust katsekehade staatilise elastsusmooduli prognoosimise erinevate argumentide kaudu individuaalselt (vt tabel 13). Argumentideks (x) sai valitud *Fakopp* seadmega saadud dünaamilised elastsusmoodulid erinevate mõõtmisviiside korral ning *Timber Grader* seadmega saadud staatilised elastsusmoodulid.

Männipuidust katsekehade regressioonanalüüsi tulemustest selgub, et parima tulemuse andsid *Timber Grader* seadmega tehtud mõõtmised ( $R^2=0,92$ ). *Fakopp* seadmega andis parima tulemuse otstest pikikiudu mõõtmine ( $R^2=0,90$ ). Hani [29] töös on vastav näitaja ( $R^2=0,79$ ). Märkimisväärsed seosed esinesid ka kaudsete mõõteviiside (F-B ja F-C) puhul, vastavalt  $R^2=0,85\dots0,88$  ja  $R^2=0,86\dots0,89$ . Hani [29] magistritöös olid vastavad tulemused  $R^2=0,76$  ja  $R^2=0,78$ .

**Tabel 13.** Männipuidust katsekehade staatilise elastsusmooduli (y) prognoosimine erinevate argumentide (x) kaudu individuaalselt

Argument (x), (MPa)	Regressioonvõrrand	Determinatsioonikordaja, R <sup>2</sup>
MoE <sub>dyn</sub> F-A	$y = 1,3223x - 5383,5$	0,90
MoE <sub>dyn</sub> F-B (1)	$y = 1,3191x - 3892,9$	0,85
MoE <sub>dyn</sub> F-B (2)	$y = 1,1758x - 2777,2$	0,88
MoE <sub>dyn</sub> F-C (1)	$y = 1,4694x - 5756,3$	0,89
MoE <sub>dyn</sub> F-C (2)	$y = 1,2467x - 3338$	0,86
MoE <sub>stat</sub> TG	$y = 1,3517x - 2564$	0,92

Märkused: Tabel on koostatud lisa 5 põhjal. Kõik regressioonvõrrandid on statistiliselt olulised ( $p < 0,05$ ). Tähistused: F-A - Fakopp otstest pikikiudu, F-B (1) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha ühel ja samal serval (esimene serv), F-B (2) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha ühel ja samal serval (teine serv), F-C (1) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha vastasserval ja kumbki erinevas otsas (esimene variant), F-C (2) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha vastasserval ja kumbki erinevas otsas (teine variant), TG - Timber Grader.

Järgnevalt võtame vaatluse alla kuusepuidust katsekehade staatilise elastsusmooduli prognoosimise erinevate argumentide kaudu individuaalselt (vt tabel 14). Argumentideks (x) sai valitud *Fakopp* seadmega saadud dünaamilised elastsusmoodulid erinevate mõõtmisviiside korral ning *Timber Grader* seadmega saadud staatilised elastsusmoodulid.

Kuusepuidust katsekehade regressioonanalüüsi tulemustest selgub, et parima tulemuse andsid *Timber Grader* seadmega tehtud mõõtmised ( $R^2=0,80$ ). Tulemus jääb alla männipuidust katsekehade tulemusele. Fakopp seadmega andis parima tulemuse otstest pikikiudu mõõtmine ( $R^2=0,72$ ). Hani [29] töös on vastav näitaja ( $R^2=0,78$ ). Keskmised seosed esinesid kaudsete mõõteviiside (F-B ja F-C) puhul, vastavalt  $R^2=0,58...0,68$  ja  $R^2=0,54...0,63$ . Antud tulemused jäävad samuti tunduvalt alla männipuidust katsekehade tulemustele. Hani [29] magistritöös olid kaudsete mõõteviiside (F-B ja F-C) tulemused vastavalt  $R^2=0,63$  ja  $R^2=0,77$ . Varasemas Itaalias läbi viidud masintugevussorteerimise uuringus [17] saadi *MiCROTEC GoldenEye 706* seadmega mõõdetud dünaamilise painde-elastsusmooduli ja ja purustava katsega saadud staatilise elastsusmooduli tulemuste vahel tugev seos, korrelatsioon harilikul kuusel  $R^2=0,89$ .

**Tabel 14.** Kuusepuidust katsekehade staatilise elastsusmooduli (y) prognoosimine erinevate argumentide (x) kaudu individuaalselt

Argument (x), (MPa)	Regressioonvõrrand	Determinatsioonikordaja, R <sup>2</sup>
MoE <sub>dyn</sub> F-A	$y = 0,9164x + 497,16$	0,72
MoE <sub>dyn</sub> F-B (1)	$y = 0,6085x + 5461,9$	0,58
MoE <sub>dyn</sub> F-B (2)	$y = 0,74x + 3424,7$	0,68
MoE <sub>dyn</sub> F-C (1)	$y = 0,7075x + 4493,6$	0,54
MoE <sub>dyn</sub> F-C (2)	$y = 0,8476x + 2232,3$	0,63
MoE <sub>stat</sub> TG	$y = 1,0462x + 648,67$	0,80

Märkused: Tabel on koostatud lisa 6 põhjal. Kõik regressioonvõrrandid on statistiliselt olulised ( $p < 0,05$ ). Tähistused: F-A - Fakopp otstest pikikiudu, F-B (1) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha ühel ja samal serval (esimene serv), F-B (2) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha ühel ja samal serval (teine serv), F-C (1) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha vastasserval ja kumbki erinevas otsas (esimene variant), F-C (2) – Fakopp pikikiudu otsikud (30...45°) asuvad katsekeha vastasserval ja kumbki erinevas otsas (teine variant), TG - Timber Grader.

## KOKKUVÕTE

Töö eesmärgiks oli võrrelda visuaalse tugevussorteerimise tulemusi masintugevussorteerimiste tulemustega ning kontrollida neid purustaval meetodil saadud paindekatsede tulemustega kuuse- ja männipuidust elementide näitel. Selleks valmistati 48 kuuse- ja männipuidust katsekeha, mõlemast puuliigist 24 katsekeha. Kõigepealt teostati katsekehade visuaalne tugevussorteerimine vastavalt NS-INSTA 142:2009 standardile, seejärel teostati mõõtmised *Fakopp Microsecond Timer*'i ja *Brookhuis Timber Grader MTG*'ga. Viimaks teostati purustavad katsed *Lukas 250 kN* pressiga, mille korral katsekehasid koormati paindele sümmeetriliselt kahes punktis kuni purunemiseni.

Tulemused sõltusid valitud meetodist, masintugevussorteerimise puhul katseesadest. Kõige tugevamad seosed saadi purustaval paindekatsel mõõdetud staatilise elastsusmooduli ja *Timber Grader* seadmega mõõdetud staatilise elastsusmooduli vahel. Männipuidust katsekehadel oli vastav näitaja  $r=0,96$ , kuusepuidust katsekehadel aga  $r=0,90$ . Tugevaid seoseid andis ka *Fakopp* seade otseste mõõtmiste korral männipuidust katsekehade puhul ( $r=0,70...0,85$ ). Kuusepuidust katsekehade korral saadi otsestel mõõtmistel keskmised seosed ( $r=0,68...0,69$ ). Kaudsete mõõtmisviiside korral varieerusid tulemused puuliigiti, väga nõrgad seosed saadi 50x100 mm ristlõikega kuusepuidust katsekehade kaudsel mõõtmisel. Visuaalse tugevussorteerimisega saadud tulemused olid kõige kehvemad. Võrreldes tugevusklasside tulemusi purustaval paindekatsel saadud väärtustega, näeme, et nende vahel esines nõrk seos ( $R^2=0,06$ ). Visuaalsel tugevussorteerimisel ilmnes suur valedesse tugevusklassidesse sorteeritud katsekehade arv, 81% katsekehadest hinnati tegelikkusest madalamasse tugevusklassi ning 17% katsekehasid hinnati mitme tugevusklassi võrra kõrgemaks. Ainult 2% katsekehasid hinnati täpselt.

Võrreldes omavahel kuuse- ja männipuidust proovikehade tiheduse ning arvatud tiheduse korrelatsioone, näeme, et männipuidust katsekehade puhul esines tugev seos ( $r=0,77...0,85$ ). Ka 50x150 mm ristlõikega kuusepuidust katsekehade vahel esines tugev seos ( $r=0,71$ ), seevastu 50x100 mm ristlõikega kuusepuidust katsekehade korral esines ainult keskmine seos ( $r=0,54$ ). Üldiselt võib öelda, et vajadusel on võimalik puitelemendi

tihedus arvutada kaudselt, kui on teada tema niiskussisaldus. Antud meetodit saab edukalt kasutada ehitusobjektidel ekspertiisi läbiviimisel.

*Fakopp* seadmega saadud dünaamiliste elastsusmoodulite ja purustaval paindekatsel saadud staatiliste elastsusmoodulite regressioonanalüüs näitas kõikide mõõteviiside korral tugevat seost männipuidust katsekehade puhul. Otsesel mõõtmisel (F-A) saadi seoseks  $R^2=0,90$ . Kaudsetel mõõtmistel (F-B ja F-C) olid tulemused pisut madalamad, seos vastavalt  $R^2=0,85...0,88$  ja  $R^2=0,86...0,89$ . Kuusepuidust katsekehade puhul saadi tugev seos ainult otsesel (F-A) mõõtmisel  $R^2=0,72$ . Kaudsete mõõtmistel (F-B ja F-C) puhul saadi keskmine seos vastavalt  $R^2=0,58...0,68$  ning  $R^2=0,54...0,63$ . Eelnevalt läbi viidud uurimustes on individuaalsete argumentide regressioonanalüüside põhjal saadud tugevaid seoseid dünaamilise ja staatilise elastsusmooduli vahel katsekehade otsese mõõtmise puhul. Kaudsete mõõtmiste puhul jäävad tulemused madalamaks.

Uurimustöö põhjal võib öelda, et parim seade tugevussorteerimise läbiviimiseks on *Brookhuis Timber Grader MTG*. *Fakopp* seade on parim juhul, kui puitelemendi tugevusjäikuse omadusi on vaja hinnata ehitusobjektidel, kus puitelementide otsad on kaetud ning otseseid mõõtmisi pole võimalik teostada. Sellisel juhul on võimalik läbi viia kaudsed mõõtmised, mis *Timber Grader*'iga on välistatud. Võimaluse korral tuleks visuaalne tugevussorteerimine asendada masintugevussorteerimisega, sest visuaalselt ei ole võimalik sorteerida puitmaterjali kõrgematesse tugevusklassidesse ning lisaks suurele ajakulule on ka tulemus ebatäpne. Eestis on visuaalne tugevussorteerimine laialt levinud ning seetõttu sorteeritakse meil puitmaterjali madalamatesse klassidesse. Ettevõtted peaksid liikuma masintugevussorteerimise juurutamise suunas, mille korral on meil võimalik eksportida kõrge lisandväärtusega toodet – kõrgematesse tugevusklassidesse sorteeritud konstruktsioonipuitu.

Kokkuvõtvalt võib uurimustöö põhjal öelda, et tugevussorteerimise korral on vajalik katsekehade tulemusi vaadata puuliigipõhiselt. Erinevate puuliikide korral tuleb luua vastavale liigile omased elastsusmooduli prognoosvõrrandid. Kindlasti on selles valdkonnas vaja jätkata lisauuringute tegemisega.

## KASUTATUD KIRJANDUS

1. **Siikanen, U.** (2012). Puidust ehitamine. Tallinn: Ehitame kirjastus. 345 lk.
2. **Just, E.** (2012). Puitkonstruktsioonid. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool. 183 lk.
3. Aastaraamat Mets 2013. (2014). Tartu: Keskkonnaagentuur. 258 lk.
4. **Teder, M.** (2010). Puidu füüsikalise-mehaaniliste omaduste uurimine ultraheliga. (Magistritöö). Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu.
5. **Teder, M.** (2012). Kiire ja lihtne puidu tugevussorteerimine: uus tase puidutööstuses. Ehitaja. Nr 7 (169), lk 52 – 55.
6. Wood handbook: Wood as an engineering material.(2010). Madison: Forest Products Laboratory Forest Service U.S. Department of Agriculture. 508 lk.
7. NS-INSTA 142:2009. Nordic visual strength grading rules for timber. Oslo: Norway Standards. 28 lk.
8. EVS-EN 408:2010+A1:2012. (2012). Puitkonstruktsioonid: Ehituspuit ja liimpuit. Mõnede füüsikaliste ja mehaaniliste omaduste määramine. Tallinn: Eesti standardikeskus. 35lk.
9. **Veermeets, K.** (1962). Puidu määraja: makro- ja mikroskoopiliste tunnuste järgi. Tallinn: Eesti Riiklik Kirjastus. 128 lk.
10. **Saarman, E., Veibri, U.** (2006). Puiduteadus. Tartu: Vali Press OÜ. 560 lk.
11. **Sibul, Ivar, et al.** (2014). Mänd Eestis. Tartu: Eesti Maaülikool. 521 lk.
12. **Saarman, E.** (1998). Puiduteadus. Tartu: Vali Press OÜ. 248 lk.
13. **Allikas, L., Kulbach, V.** (1962). Puitkonstruktsioonid. Tallinn: Eesti Riiklik Kirjastus. 414 lk.
14. **Thörnqvist, T.** (1986). Kompendium i vedens byggnad och kemiska enenskaper. Uppsala: Sverigeslantbruksuniversitet, inst för virkeslära. Viidatud: Puiduteadus. 2006. Tartu:Vali Press OÜ, lk 61 vahendusel.
15. EVS-EN 338:2009. (2009). Ehituspuit: Tugevusklassid. Tallinn: Eesti Standardikeskus. 10lk.
16. **Rohusaar, J, et al.** (2012). Ehituskonstruktori käsiraamat. Tallinn: Ehitame kirjastus. 577 lk.
17. **Bacher, M.** (2008). Comparison of different machine strength grading principles.- *Conference COST E53*, Delft, The Netherlands. pp. 183-193.
18. **Skramtajev, B. G.** (1951).Ehitusmaterjalid. Tallinn: Eesti Riiklik kirjastus. 579 lk.
19. **Otsman, R.** (1976). Ehitusmaterjalid. Tallinn: Valgus. 590 lk.
20. EVS-EN 14081-1:2206+A1:2001. (2011). Puitkonstruktsioonid. Nelinurkse ristlõikega tugevussorditud ehituspuit. Osa 1: Üldnõuded. Tallinn: Eesti Standardikeskus. 22 lk.



21. EVS-EN 336:2013. (2013). Structural timber - Sizes, permitted deviations. Tallinn: Eesti Standardikeskus. 7 lk.
22. EVS-EN 14081-2:2010+A1:2012. (2012). Puitkonstruktsioonid. Nelinurkse ristlõikega tugevussorditud ehituspuit. Osa 2: Masinsortimine. Täiendavad nõuded esmasteks tüübikatsetusteks. Tallinn: Eesti Standardikeskus. 19 lk.
23. EVS-EN 14081-3:2012. (2012). Puitkonstruktsioonid. Nelinurkse ristlõikega tugevussorditud ehituspuit. Osa 3: Masinsortimine. Täiendavad nõuded tootmisohjele ettevõttes. Tallinn: Eesti Standardikeskus. 16 lk.
24. EVS-EN 14081-4:2009. (2009). Timber structures - Strength graded structural timber with rectangular cross section - Part 4: Machine grading - Grading machine settings for machine controlled systems. Tallinn: Eesti Standardikeskus. 69 lk.
25. **Benham, C., Holland, C. ja Engily, V.** (2003). Guide to machine strength grading of timber. London: Building Research Establishment. 12 lk.
26. Dynalyse AB. [WWW] <http://dynalyse.se>. (20.03.2015).
27. Introduction to timber grading. The European system of machine strength grading. [WWW] [http://www.forestry.gov.uk/pdf/SIRT\\_workshop\\_15Nov2011\\_grading\\_%28Ridley-Ellis%29.pdf/\\$FILE/SIRT\\_workshop\\_15Nov2011\\_grading\\_%28Ridley-Ellis%29.pdf](http://www.forestry.gov.uk/pdf/SIRT_workshop_15Nov2011_grading_%28Ridley-Ellis%29.pdf/$FILE/SIRT_workshop_15Nov2011_grading_%28Ridley-Ellis%29.pdf). (20.03.2015).
28. **Lepik, P.** (2011). Erineva veesisaldusega kasutusel mitte olnud puidu füüsikalise-mehaaniliste omaduste uurimine ultraheli ja nõelpüstoliga. (Magistritöö). Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu.
29. **Hani, M.** Kuuse- (*Picea abies*) ja männipuidu (*Pinus sylvestris*) tugevusparameetrite uurimine akustiliste mitte-purustavate ja purustavate meetoditega. (Magistritöö). Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu.
30. DIN 4074-1:2012-06. (2012). Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit, Nadelschnittholz. Berlin: DIN.
31. BS 4978: 2007+A1:2011. (2011). Visual strength grading of softwood. London: BSI.
32. NF B 52-001:2011. (2011). Règles d'utilisation du bois dans les constructions: Classement visuel pour employ en structure pour les. Saint-Denis: AFNOR.
33. SIA 265/1:2009. (2009). Holzbau – Ergänzende Festlegungen. Zürich: SIA.
34. EN 408:2010. (2010). Timber structures – Structural timber and glued laminated timber- Determination of some physical and mechanical properties. Brussels: CEN European Committee for Standardization. 35 p.
35. **Stapel, P, Kuilen, J ja Strehl, O.** (2012). Visual strength grading in Europe. – *International council for research and innovation in building and construction*. Växjö, Sweden. pp 115-131.
36. **Nocetti, M, et al.** (2010). Machine grading of Italian structural timber: preliminary results on different wood species. - *World Conference on Timber Engineering*, Trentino, Italy.

37. **Gonzalez, G, et al.** (2013). Preliminary results of a structural timber grading procedure in Spain based on nondestructive techniques. - *18th International nondestructive testing and evaluation of wood symposium*, Madison, Wisconsin, USA. pp 386-395.
38. UNE 56544:2007.(2007). Visual grading of sawn timber for structural use. Coniferous timber. Madrid: Madera de coníferas. 26 p.
39. **Hermoso, E, et al.** The classification of large cross section sawn timber in the structural use of *Pinus silvestris* L. using NDT together with visual grading. - *18th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium*, Madison, Wisconsin, USA. pp 386-395.
40. **Meier, P ja Rukki, H.** (2001). Saekavade koostamine ja arvutamine. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli kirjastus. 39 lk.
41. EVS-EN 13183-2:2002.(2002). Saematerjali üksuse niiskussisaldus. Osa 2: Määramine elektritakistuse meetodil. Tallinn: Eesti Standardikeskus. 8 lk.
42. EVS-EN 13183-1:2002. (2002). Saematerjali üksuse niiskussisaldus. Osa 1:Määramine kuivatusmeetodil. Tallinn: Eesti Standardikeskus. 6 lk.
43. EVS-EN 384:2010. (2010). Structural timber - Determination of characteristic values of mechanical properties and density. Tallinn: Eesti Standardikeskus. 19 lk.
44. Fakopp user's guide. [WWW] [http://www.fakopp.com/site/downloads/Fakopp\\_MT\\_Guide.pdf](http://www.fakopp.com/site/downloads/Fakopp_MT_Guide.pdf). (20.04.2015).
45. **Kiviste, A.** (2007). Matemaatiline statistika MS Exceli keskkonnas. Tartu: Greif. 86 lk.
46. **Laas, E.** (2004). Okaspuud. Tartu: Altex OÜ. 359 lk.
47. **Bengtsson, C.** (2009). Grading Structural Timber. Borås: SP Swedish National Testing and Research Institute.
48. **Bucar, V.** (2006). Acoustics of Wood. Berlin: Springer-Verlag. 393 lk.
49. **Korsar, T.** (2014). Musta lepa (*Alnus glutinosa*) ja haavapuidu (*Populus tremula*) tugevusparameetrite uurimine akustiliste mittepurustavate ja purustavate meetoditega. (Magistritöö). Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu.

# INVESTIGATION OF SPRUCE (*PICEA ABIES*) AND PINE (*PINUS SYLVESTRIS*) STRUCTURAL TIMBER WITH DIFFERENT STRENGTH GRADING METHODS

## SUMMARY

The present master thesis takes under observation the investigation of wood strength grading methods. The purpose of this work is to compare visual strength grading with machine strength grading and verification of these results by destructive tests with spruce and pine wood elements as an example.

The physical-mechanical properties of wood were carried out in a laboratory at  $20\pm 2$  °C and  $65\pm 5\%$  relative humidity according to a standard. In the research were used 48 pieces of pine and spruce beams, both 24 pieces. Visual strength grading were determined according to the standard NS-INSTA 142:2009. In machine strength grading were carried out using devices like *Timber Grader MTG* and *Fakopp Microsecond Timer*. The measurements were performed from the elements using direct and indirect methods. The bending strength of the test pieces was determined using an *Lukas 250kN* device, based on the standard EVS-EN 408:2010.

The results were dependent by the method chosen, by the test device and by the wood species. The strongest links were obtained to the destructively measured static bending modulus of elasticity and the *Timber Grader* static modulus of elasticity measured between the device; correlation in pine test species was  $r=0,96$  and  $r=0,90$  in test species of spruce. The correlation between *Fakopp* direct measurements and modulus of elasticity is fairly strong pine test species ( $r=0,70..0,85$ ). Spruce wood test species were obtained by direct measurements of the medium correlation ( $r=0,68..0,69$ ). The weakest results were in visual strength grading. The regression analyses carried out a strong positive correlation between the *Fakopp* direct dynamic modulus of elasticity and static modulus of elasticity, both test species. Similar regression analyses were conducted for indirect measurements.

In conclusion, the weakest results revealed in visual strength grading and the strongest results were in machine strength grading. The machine *Brookhuis Timber Grader MTG* predicted the highest results in machine strength grading, according to the determination coefficient of pine specimens ( $R^2=0,92$ ) and spruce specimens ( $R^2=0,80$ ). For more stable and better measurements results, there should be done additional researches in this field.

**LISAD**

## Lisa 1. Männipuidust katsekehade mõõtmistulemused

Katsekeha tähis	Kõrgus, (mm)	Laius, (mm)	Pikkus, (mm)	Kaal, (g)	Suure katsekeha tihedus, (kg/m <sup>3</sup> )	Proovikeha tihedus, (kg/m <sup>3</sup> )	Max paindetugevus, (MPa)	Staatiline elastsusmoodul, (MPa)	Niiskusisaldus käsi-seadmega, (%)	Absoluutne niiskusisaldus, (%)	Tugevusklass visuaalselt	Tugevusklass paindekatsuga
M-1.1	100	50	1950	4816	493,9	443,8	20,87	9421	12,6	12,56	C24	C18
M-1.2	100	50	1950	5660	580,5	585,5	54,19	17303	14,8	14,93	C24	C50
M-1.3	100	50	1950	5515	565,6	542,8	49,44	14190	15,1	14,07	C24	C40
M-1.4	100	50	1950	4600	471,8	436,7	26,68	8080	13,3	12,25	C18	C16
M-1.5	100	50	1950	4705	482,6	436,1	37,84	9274	13,4	12,74	C18	C18
M-1.6	100	50	1950	5646	579,1	540,2	51,56	16676	13,2	13,22	C18	C50
M-1.7	100	50	1950	5373	551,1	573,3	62,24	14442	13,9	13,93	C30	C40
M-1.8	100	50	1950	4132	423,8	419,9	34,65	9291	12,0	12,47	C30	C18
M-1.9	100	50	1950	4961	508,8	532,7	53,40	12964	11,7	12,79	C24	C30
M-1.10	100	50	1950	4093	419,8	392,8	42,60	8561	12,8	12,50	C18	C16
M-1.11	100	50	1950	5169	530,2	500,0	54,31	16639	13,5	13,34	C24	C50
M-1.12	100	50	1950	5742	588,9	561,8	64,74	17502	14,6	13,11	C24	C50
M-2.1	150	50	2900	9277	426,5	392,3	15,55	7619	11,4	12,16	C24	C14
M-2.2	150	50	2900	10861	499,4	514,4	53,65	12838	13,5	13,99	C18	C30
M-2.3	150	50	2900	10316	474,3	457,7	35,84	9902	14,1	12,50	C18	C20
M-2.4	150	50	2900	9649	443,6	440,3	40,56	13023	12,8	12,70	C24	C35
M-2.5	150	50	2900	9952	457,6	467,1	40,09	13164	12,7	13,29	C30	C35
M-2.6	150	50	2900	9441	434,1	439,4	25,48	9926	11,3	12,08	C24	C20
M-2.7	150	50	2900	9680	445,1	410,0	37,04	10801	11,9	12,19	C24	C22
M-2.8	150	50	2900	10862	499,4	485,5	67,47	12117	13,2	13,26	C24	C30
M-2.9	150	50	2900	10226	470,2	438,1	23,70	9783	11,9	12,21	C18	C20
M-2.10	150	50	2900	9916	455,9	419,9	43,74	11027	10,6	11,54	C14	C24
M-2.11	150	50	2900	9760	448,7	422,6	37,50	11096	13,1	12,26	C14	C24
M-2.12	150	50	2900	9343	429,6	397,6	37,50	10770	12,6	11,90	C24	C22

## Lisa 2. Kuusepuidust katsekehade mõõtmistulemused

Katse- keha tähis	Kõrgus, (mm)	Laius, (mm)	Pikkus, (mm)	Kaal, (g)	Suure katsekeha tihedus, (kg/m <sup>3</sup> )	Proovikeha tihedus, (kg/m <sup>3</sup> )	Max paine- tugevus, (MPa)	Staatiline elastsus- moodul, (MPa)	Niiskus- sisaldus käsi- seadmega, (%)	Absoluutne niiskus- sisaldus, (%)	Tugevus- klass visuaalselt	Tugevus- klass paine- katsega
K-1.1	100	50	1950	4418	453,1	436,5	52,00	14388	13,4	12,42	C24	C40
K-1.2	100	50	1950	4183	429,0	414,4	53,58	12318	12,8	12,52	C24	C30
K-1.3	100	50	1950	4888	501,3	460,4	39,07	14374	15,3	13,68	C18	C40
K-1.4	100	50	1950	4686	480,6	463,1	47,93	15649	13,1	12,39	C18	C45
K-1.5	100	50	1950	4532	464,8	457,4	29,54	14070	13,0	12,74	C24	C40
K-1.6	100	50	1950	4168	427,5	398,8	38,53	12048	12,4	11,93	C24	C30
K-1.7	100	50	1950	4242	435,1	399,1	62,07	12825	12,2	11,95	C24	C30
K-1.8	100	50	1950	4118	422,4	411,6	60,85	14467	12,8	12,26	C24	C40
K-1.9	100	50	1950	4464	457,8	451,4	61,73	14835	14,1	13,06	C24	C40
K-1.10	100	50	1950	4388	450,1	417,5	35,73	12552	12,1	11,45	C24	C30
K-1.11	100	50	1950	4090	419,5	390,3	57,12	13051	11,6	11,99	C24	C35
K-1.12	100	50	1950	4228	433,6	375,1	58,00	13551	13,0	12,41	C18	C35
K-2.1	150	50	2900	8780	403,7	399,8	50,23	13014	12,0	11,73	C24	C35
K-2.2	150	50	2900	8877	408,1	400,9	20,29	12479	12,5	12,01	C24	C30
K-2.3	150	50	2900	9983	459,0	425,3	60,73	13679	13,4	12,01	C18	C35
K-2.4	150	50	2900	9580	440,5	445,2	36,09	12615	12,2	12,75	C24	C30
K-2.5	150	50	2900	9952	457,6	465,9	41,27	12672	12,8	12,88	C24	C30
K-2.6	150	50	2900	11236	516,6	498,1	46,93	14378	14,5	13,40	C18	C40
K-2.7	150	50	2900	9740	447,8	458,1	56,48	16263	13,0	14,09	C30	C50
K-2.8	150	50	2900	10150	466,7	451,5	61,91	14880	14,3	13,22	C24	C40
K-2.9	150	50	2900	9445	434,3	417,8	62,14	15225	13,4	12,79	C24	C45
K-2.10	150	50	2900	9959	457,9	448,3	54,60	14804	13,2	13,26	C24	C40
K-2.11	150	50	2900	9412	432,7	444,2	51,43	14254	13,4	12,84	C24	C40
K-2.12	150	50	2900	10194	468,7	464,4	69,34	16144	14,6	13,34	C24	C50

**Lisa 3. Männipuidust katsekehade keskmiste tunnuste tabel**

Katse-keha tähis	Kiirus F-A (m/s)	Kiirus F-B (1) (m/s)	Kiirus F-B (2) (m/s)	Kiirus F-C (1) (m/s)	Kiirus F-C (2) (m/s)	Max paindetugevus, (MPa)	Staatiline elastsusmoodul, (MPa)	Arvutatud tihedus, (kg/m <sup>3</sup> )	Proovikeha tihedus, (kg/m <sup>3</sup> )	Absoluutne niiskussisaldus, (%)
M-1.1	4795	4733	4470	4635	4600	20,87	9421	501,4	443,8	12,56
M-1.2	5150	4982	4923	4821	4995	54,19	17303	507,4	585,5	14,93
M-1.3	5118	4615	4914	4809	4733	49,44	14190	505,2	542,8	14,07
M-1.4	4549	4317	4296	4387	4320	26,68	8080	500,6	436,7	12,25
M-1.5	4691	4317	4526	4415	4485	37,84	9274	501,8	436,1	12,74
M-1.6	5372	5167	5471	5104	5294	51,56	16676	503,1	540,2	13,22
M-1.7	5087	4712	5023	5009	4874	62,24	14442	504,9	573,3	13,93
M-1.8	5091	4869	4720	4869	4745	34,65	9291	501,2	419,9	12,47
M-1.9	5182	4972	4932	5047	4878	53,40	12964	502,0	532,7	12,79
M-1.10	4966	4553	4791	4754	4576	42,60	8561	501,3	392,8	12,50
M-1.11	5452	5373	5347	5352	5217	54,31	16639	503,4	500,0	13,34
M-1.12	5407	5114	5289	4991	5341	64,74	17502	502,8	561,8	13,11
M-2.1	5079	4701	4707	4751	4824	15,55	7619	500,4	392,3	12,16
M-2.2	5341	5233	5159	5085	5246	53,65	12838	505,0	514,4	13,99
M-2.3	5076	4988	4963	4865	5091	35,84	9902	501,3	457,7	12,50
M-2.4	5347	5233	5571	5332	5270	40,56	13023	501,8	440,3	12,70
M-2.5	5705	5263	5700	5305	5575	40,09	13164	503,3	467,1	13,29
M-2.6	5097	5196	5088	5159	4982	25,48	9926	500,2	439,4	12,08
M-2.7	5148	4960	5169	4882	5199	37,04	10801	500,5	410,0	12,19
M-2.8	5175	5015	5034	4951	4960	67,47	12117	503,2	485,5	13,26
M-2.9	4877	4693	4793	4647	4729	23,70	9783	500,5	438,1	12,21
M-2.10	5222	4903	5169	4972	5110	43,74	11027	498,9	419,9	11,54
M-2.11	5370	5357	5273	5368	5146	37,50	11096	500,6	422,6	12,26
M-2.12	5400	5104	5451	5153	5357	37,50	10770	499,8	397,6	11,90



**Lisa 4. Kuusepuidust katsekehade keskmiste tunnuste tabel**

Katse-keha tähis	Kiirus F-A (m/s)	Kiirus F-B (1) (m/s)	Kiirus F-B (2) (m/s)	Kiirus F-C (1) (m/s)	Kiirus F-C (2) (m/s)	Max paindetugevus, (MPa)	Staatiline elastsusmoodul, (MPa)	Arvutatud tihedus, (kg/m <sup>3</sup> )	Proovikeha tihedus, (kg/m <sup>3</sup> )	Absoluutne niiskussisaldus, (%)
K-1.1	5775	5466	5696	5378	5607	52,00	14388	445,9	436,5	12,42
K-1.2	5550	5347	5579	5357	5561	53,58	12318	446,2	414,4	12,52
K-1.3	5647	4869	5444	5192	5099	39,07	14374	448,8	460,4	13,68
K-1.4	5730	5788	5516	5510	5556	47,93	15649	445,9	463,1	12,39
K-1.5	5540	5192	5625	5416	5336	29,54	14070	446,7	457,4	12,74
K-1.6	5483	5320	5212	5118	5336	38,53	12048	444,8	398,8	11,93
K-1.7	5641	5449	5521	5708	5202	62,07	12825	444,9	399,1	11,95
K-1.8	5798	5422	5775	5488	5631	60,85	14467	445,6	411,6	12,26
K-1.9	5764	5579	5654	5389	5400	61,73	14835	447,4	451,4	13,06
K-1.10	5691	5405	5192	5243	5299	35,73	12552	443,8	417,5	11,45
K-1.11	5550	5243	5362	5197	5405	57,12	13051	445,0	390,3	11,99
K-1.12	5636	5544	5449	5187	5613	58,00	13551	445,9	375,1	12,41
K-2.1	5804	5969	5668	5556	5861	50,23	13014	444,4	399,8	11,73
K-2.2	5731	5613	5823	5510	5741	20,29	12479	445,0	400,9	12,01
K-2.3	5668	5664	5322	5393	5389	60,73	13679	445,0	425,3	12,01
K-2.4	5545	5364	5696	5280	5552	36,09	12615	446,7	445,2	12,75
K-2.5	5434	5267	5407	5172	5250	41,27	12672	447,0	465,9	12,88
K-2.6	5638	5436	5510	5621	5176	46,93	14378	448,1	498,1	13,40
K-2.7	5951	5870	5987	5720	5790	56,48	16263	449,7	458,1	14,09
K-2.8	5773	5773	5844	5510	5827	61,91	14880	447,7	451,5	13,22
K-2.9	5959	5965	5991	5708	5840	62,14	15225	446,8	417,8	12,79
K-2.10	5796	5773	5704	5506	5794	54,60	14804	447,8	448,3	13,26
K-2.11	5866	5987	5716	5664	5716	51,43	14254	446,9	444,2	12,84
K-2.12	5781	5908	5844	5579	5765	69,34	16144	448,0	464,4	13,34

## Lisa 5. Männipuidust katsekehade elastsusmoodulite andmed

Katsekeha tähis	Timber Grader staatiline elastsusmoodul, (MPa)	Timber Grader tugevus-klass	Dünaamiline elastsusmoodul F-A, (MPa)	Dünaamiline elastsusmoodul F-B (1), (MPa)	Dünaamiline elastsusmoodul F-B (2), (MPa)	Dünaamiline elastsusmoodul F-C (1), (MPa)	Dünaamiline elastsusmoodul F-C (2), (MPa)	Staatiline elastsusmoodul, (MPa)
M-1.1	7648	C14	11421	11126	9926	10672	10509	9421
M-1.2	13325	C35	15846	14828	14479	13890	14911	17303
M-1.3	12517	C30	15124	12299	13939	13350	12932	14190
M-1.4	7587	C14	9788	8813	8729	9102	8827	8080
M-1.5	7986	C14	10698	9058	9960	9477	9779	9274
M-1.6	14088	C40	16914	15652	17545	15269	16428	16676
M-1.7	11808	C27	14535	12472	14174	14095	13342	14442
M-1.8	9463	C18	11037	10095	9487	10095	9587	9291
M-1.9	11283	C24	13770	12680	12473	13062	12204	12964
M-1.10	8226	C16	10405	8747	9686	9533	8836	8561
M-1.11	14307	C40	15969	15510	15357	15388	14624	16639
M-1.12	14682	C40	17406	15570	16656	14831	16987	17502
M-2.1	7690	C14	11019	9441	9463	9642	9943	7619
M-2.2	11700	C27	14526	13944	13556	13167	14016	12838
M-2.3	9982	C20	12281	11858	11742	11282	12355	9902
M-2.4	10810	C22	12774	12232	13864	12703	12408	13023
M-2.5	12048	C30	15085	12839	15060	13042	14404	13164
M-2.6	9953	C20	11284	11727	11245	11563	10780	9926
M-2.7	9967	C20	11817	10971	11915	10630	12053	10801
M-2.8	11141	C24	13546	12721	12816	12397	12442	12117
M-2.9	9249	C18	11205	10377	10823	10175	10535	9783
M-2.10	10824	C22	12376	10910	12126	11220	11852	11027
M-2.11	10955	C22	12975	12912	12511	12963	11915	11096
M-2.12	10179	C22	12516	11179	12751	11394	12316	10770

## Lisa 6. Kuusepuidust katsekehade elastsusmoodulite andmed

Katsekeha tähis	Timber Grader staatiline elastsusmoodul, (MPa)	Timber Grader tugevus-klass	Dünaamiline elastsusmoodul F-A, (MPa)	Dünaamiline elastsusmoodul F-B (1), (MPa)	Dünaamiline elastsusmoodul F-B (2), (MPa)	Dünaamiline elastsusmoodul F-C (1) (MPa)	Dünaamiline elastsusmoodul F-C (2), (MPa)	Staatiline elastsusmoodul, (MPa)
K-1.1	13017	C35	15175	13593	14764	13163	14308	14388
K-1.2	11863	C27	13285	12328	13421	12377	13338	12318
K-1.3	12729	C30	16253	12086	15104	13742	13254	14374
K-1.4	14350	C40	15840	16163	14680	14650	14892	15649
K-1.5	12069	C30	14371	12624	14816	13737	13333	14070
K-1.6	11137	C24	12841	12092	11606	11192	12163	12048
K-1.7	12155	C30	13839	12912	13257	14170	11769	12825
K-1.8	12666	C30	14234	12447	14124	12752	13426	14467
K-1.9	13307	C35	15370	14399	14794	13438	13492	14835
K-1.10	11036	C24	14494	13077	12066	12302	12569	12552
K-1.11	11208	C24	12921	11529	12062	11330	12256	13051
K-1.12	11834	C27	13830	13384	12928	11716	13720	13551
K-2.1	11842	C27	13561	14344	12935	12426	13830	13014
K-2.2	12138	C30	13407	12861	13841	12393	13451	12479
K-2.3	12924	C30	14746	14728	13001	13350	13332	13679
K-2.4	11558	C27	13644	12769	14398	12372	13677	12615
K-2.5	12160	C30	13631	12803	13496	12349	12720	12672
K-2.6	14189	C40	16653	15480	15904	16551	14032	14378
K-2.7	14173	C40	16190	15751	16386	14960	15326	16263
K-2.8	13757	C35	15744	15745	16134	14343	16041	14880
K-2.9	13573	C35	15541	15571	15710	14261	14927	15225
K-2.10	13823	C35	15577	15454	15087	14059	15565	14804
K-2.11	13081	C35	15017	15639	14258	14000	14258	14254
K-2.12	14280	C40	15873	16580	16223	14781	15787	16144

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

Mina, \_\_\_\_\_,  
(*autori nimi*)

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_,  
(*lõputöö pealkiri*)

mille juhendaja on \_\_\_\_\_,  
(*juhendaja nimi*)

1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,

1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja

1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor \_\_\_\_\_  
(*allkiri*)

Tartu, \_\_\_\_\_  
(*kuupäev*)

---

**Juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Luban lõputöö kaitsmisele.

\_\_\_\_\_  
(*juhendaja nimi ja allkiri*)

\_\_\_\_\_  
(*kuupäev*)