



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

**TUGEVUS- JA JÄIKUSOMADUSTE HINDAMINE
KONSTRUKTSIOONIPUIDU TAASKASUTAMISEL
ASSESSMENT OF STRENGTH AND STIFFNESS
PROPERTIES IN THE REUSE OF STRUCTURAL TIMBER
MAGISTRITÖÖ**

Üliõpilane: Tõnu Saarelaan

Üliõpilaskood: 182207EAEI

Juhendaja: Professor Alar Just

Kaasjuhendaja: Vanemlektor Eero Tuhkanen

Tallinn 2024

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

"" mai 2024

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

"" mai 2024

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

".....".....2024

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Tõnu Saarelaan (sünnikuupäev 03.03.1999)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Tugevus- ja jäikusomaduste hindamine konstruktsioonipuidu taaskasutamisel“, mille juhendaja on Alar Just,

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

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

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

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

_____ (kuupäev)

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

Ehituse ja arhitektuuri instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Tõnu Saarelaan, 182207EAEI

Õppekava, peaariala: EAEI02/17 Ehitiste projekteerimine ja ehitusjuhtimine, ehitiste projekteerimise suund

Juhendaja(d): Professor Alar Just, Vanemlektor Eero Tuhkanen

Lõputöö teema:

Tugevus- ja jäikusomaduste hindamine konstruktsioonipuidu taaskasutamisel

Assessment of strength and stiffness properties in the reuse of structural timber

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Taaskasutatava puidu visuaalse sorteerimise standardite hindamise võrdlus
2. Purustavad ja mittepurustavad katsed
3. Taaskasutatava puidu tugevus- ja jäikusomaduste võrdlus katsetulemustega

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Visuaalne tugevussorteerimine	24.03
2.	Purustavad ja mittepurustavad katsed saepuiduga	24.03
3.	Analüüs ja järeldused	01.05
4.	Töö vormistamine	23.05

Töö keel: eesti

Lõputöö esitamise tähtaeg: "27" mai 2024.a

Üliõpilane: Tõnu Saarelaan "....." mai 2024.a

/allkiri/

Juhendaja: Alar Just "....." mai 2024.a

/allkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

EESSÕNA	7
Lühendite ja tähiste loetelu.....	8
1 SISSEJUHATUS.....	10
2 KIRJANDUSE ÜLEVAADE	12
2.1 Puidu ehitus	12
2.1.1 Puidu tüvi	12
2.1.2 Puidu keemiline koostis	13
2.1.3 Harilik kuusk.....	14
2.2 Puidu füüsilis- mehaanilised omadused.....	14
2.2.1 Tihedus	14
2.2.2 Niiskus	15
2.2.3 Paindetugevus ja elastsusmoodul	16
2.2.4 Akustilised omadused.....	17
2.2.5 Puidu kahjustused ja rikked	18
2.3 Purustavad ja mittepurustavad meetodid	20
2.4 Varasemad uuringud	20
3 MATERJAL JA TÖÖMETOODIKA	24
3.1 Materjali iseloomustus	24
3.2 Katsekehade märgistamine ja mõõtmised	24
3.3 Visuaalne tugevussorteerimine	25
3.3.1 Oksakohad	26
3.3.2 Aastaringid	28
3.3.3 Puidu kaldkiulus	28
3.4 Katsekehade füüsiliste omaduste määramine	29
3.4.1 Niiskussisalduse määramine.....	29
3.4.2 Tiheduse määramine.....	30
3.5 Globaalse paindeelastsusmooduli määramine	31
3.6 Lokaalse paindeelastsusmooduli määramine.....	33
3.7 Paindetugevus pikikiudu	35
3.8 Dünaamilise elastsusmooduli mõõtmine ultraheli lainete abil	37
3.9 Katseandmete statistiline analüüs	39
4 TULEMUSED JA JÄRELDUSED	41
4.1 Visuaalse hindamise tulemused	41
4.1.1 UNI 11119 standard.....	41
4.1.2 INSTA 142 standard.....	43
4.1.3 prNS 3691-3 standard.....	44

4.2	Purustavad ja mittepurustavad katsed.....	45
4.2.1	Katsekehade niiskussisaldus	45
4.2.2	Katsekehade tihedus.....	46
4.2.3	Staatiline elastsusmoodul	47
4.2.4	Dünaamiline elastsusmoodul	50
4.2.5	Paindetugevus.....	51
4.3	Paindetugevuse ja staatilise elastsusmooduli seos.....	52
4.4	Paindekatsete ja visuaalse sorteerimise tulemuste võrdlus	54
4.4.1	Paindetugevused	54
4.4.2	Staatilised paindeelastsusmoodulid	55
4.5	Staatiline ja dünaamiline elastsusmoodul	57
	KOKKUVÕTE	59
	SUMMARY	61
5	KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	63
	LISA 1 Tervilike katsekehade visuaalse tugevussorteerimise tulemused.....	66
	LISA 2 Purustavas tsoonis katsekehade visuaalse tugevussorteerimise tulemused	67
	LISA 3 Purustava ja mittepurustava meetodi katsetulemuste andmed	68

EESSÕNA

Lõputöö teema on sõnastatud Tallinna Tehnikaülikooli professori Alar Justi algatusel. Magistritöö on osa ehitiste projekteerimise ja ehituse juhtimise integreeritud õppekavast. Antud teema olulisus seisneb puidu taaskasutamiseks vajalikke protseduuride (visuaalne tugevussorteerimine, katsed) analüüsimisel. Lõputöös kasutatud materjal on saadud *Drastic* projekti raames Norra iduettevõttelt OmTre AS. Kõik uuringuks vajalikud katsed on sooritatud Tallinna Tehnikaülikooli Ehituse Mäemaja laboriruumides.

Tänan kõiki kaasosalisi, kes on aidanud ja suunanud mind antud magistritöö koostamisel. Lõputöö juhendaja Alar Just aitas erinevate probleemide ja küsimustega, kaasas mind projektidesse ning hoidis teemal fookust. Katsete sooritamisel oli mulle suureks abiks kaasjuhendaja Eero Tuhkanen, kes aitas ja võimaldas mul laboriruumides katseid läbi viia. Hea sõber Mihkel Hõlpus abistas mind katsekehade markeerimisel, sest katsekehasid oli palju ja Eestis said need olla vaid limiteeritud aja. Maarja Kauniste, kes teostas katsekehadele terviklikku visuaalset tugevussorteerimist. Madis Ratassepp, kes sooritas ultraheli mõõtmised katsekehadele ning jagas katsetulemusi. Kõigi panused on olnud äärmiselt olulised lõputöö kirjutamisel.

Võtmesõnad: visuaalne tugevussorteerimine, mittepurustavad ja purustavad katsed, taaskasutatud puit, magistritöö.

Lühendite ja tähiste loetelu

Ladina suurtähed

A	ristlõike pindala [mm^2];
$E_{m,g}$	globaalne paindeelastsusmoodul [N/mm^2];
$E_{m,l}$	lokaalne paindeelastsusmoodul [N/mm^2];
E_{dyn}	on dünaamiline elastsusmoodul, väljendatuna paskalites [Pa];
F	koormus [njuutonites; N];
F_{max}	maksimaalne koormus [njuutonites; N];
$F_{max,est}$	hinnatud maksimaalne koormus [njuutonites; N];
G	nihkemoodul [N/mm^2];
V_l	on piki helilaine kiirus [m/s];
V_t	on nihkelaine kiirus [m/s].

Ladina väiketähed

a	kaugus koormuse rakenduspunkti ja lähima toe vahel paindekatsel [mm];
a_f	kahe koormuspunkti omavaheline kaugus paindekatsel [mm];
b	ristlõike laius paindekatsel või ristlõike vähim mõõde [mm];
h	ristlõike kõrgus paindekatsel või ristlõike suurem mõõde [mm];
f_k	tugevuse 5-protsentiili normväärtus [N/mm^2]
f_m	paindetugevus [N/mm^2];
$f_{m,k}$	paindetugevuse 5-protsentiili normväärtus [N/mm^2];
k_h	paindetugevuse korrigeerimise tegur, kui testimiseks kasutatud ristlõike kõrgus on alla 150 mm või tihedus alla 700 kg/m^3 ;
k_l	paindetugevuse korrigeerimise tegur kui katsekeha sildeava või koormuspunktide kaugus ei ole vastavalt $18h$ ja $6h$;
k_{mod}	koormuse kestuse ja niiskuse mõju arvestav modifikatsioonitegur;
l	katsekeha sildeava testimisel [mm];
l_{et}	effektiivne katsepikkus [mm];
m_0	proovitüki mass enne kuivatamist [g];
m_1	proovitüki mass peale kuivatamist [g];
w	läbipaine või hälve [mm];

Kreeka väiketähed

ω	proovikehade absoluutne niiskussisaldus [%];
σ_A	lubatud pinge [N/mm ²];
γ_M	Materjali omaduse osavarutegur, mis võtab arvesse mudeli määramatusi ja mõõdete varieeruvust;
ρ	katsekeha tihedus [kg/m ³];

1 SISSEJUHATUS

Puit on taastuv looduslik materjal, mida on ehituses kasutatud juba aastatuhandeid, kuid puidu füüsikaliste omaduste teadusliku uurimiseni jõuti alles 18. sajandi teisel poolel. Puidu struktuur on võrreldes teiste ehitusmaterjalidega, nagu raudbetoon, teras või tellis, keerulisem, kuid samas on sellel palju eeliseid, mistõttu on puit leidnud ehituses palju kasutust. Puidu eeliseks on hea töödeldavus, puitkonstruktsioonide ehitamise lihtsus, väike soojuserijuhtivus võrreldes eelpool nimetatud materjalidega, vastupidavus keemilistele mõjutustele ja suur tugevuse suhe võrreldes materjali tihedusega. Puudustena saab loetleda puidu anistroopsuse, niiskusest sõltuvad mahumuutused, tuleohtlikkuse ja liigniiskuse toimet bioloogilised kahjustused. Puuduste ja eelistega arvestamine võimaldab puitu efektiivselt ja kauakestvalt ära kasutada. [1]

Tänapäeva ühiskonnas räägitakse aina enam kliimaneutraalsusest, materjalide läbimõeldud tarbimisest ja taaskasutusest. Kui mõned aastad tagasi oli veel mõistlik rääkida looduslike ja taastuvate materjalide kasutamisest, siis praegusel ajal ei rahulda see enam jätkusuutliku arengu eesmärgi. Aina rohkem tuleb keskenduda sellele, kuidas toodetud materjale (sh ka puitu) suudetakse peale oma elutsükli uue eesmärgi põhiselt kasutusse võtta, sealjuures vältides materjali täielikku ümbertöötlemist. Puidu korduskasutamisel erinevates konstruktsioonides on oluline, et suudetaks kindlaks määrata materjali seisukord ning vajaduse tekkides puitmaterjal konstruktsioonist demonteerida suuremaid kahjusid tegemata. Puidu seisukorda ja tugevusomadusi on võimalik hinnata erinevatel viisidel nagu visuaalne hindamine, masinsorteerimised ja purustavad katsed. Viimane variant ei ole sobiv, kui eesmärk on materjali taaskasutada.

Antud lõputöö eesmärgiks oli uurida taaskasutatava puidu mehaanilisi ja füüsikalisi omadusi mittepurustavate ja purustavate meetodite abil. Lisaks oli eesmärk võrrelda, kuidas visuaalse tugevussorteerimise standardid üksteisest erinevad ning kui usaldusväärseid tulemusi nendega on võimalik määrata. Sellel teemal on sooritatud varasemalt mitmeid erinevaid uuringuid ja katseid, kuid järelustes on üldjuhul välja toodud, et katsetega leitud seosed vajavad rohkem uurimist ning selleks tuleks sooritada rohkem katseid. Uuritavaks materjaliks oli tugevussorteeritud harilikust kuusest saepuit, mis pärines Norrast, kus seda kasutati betoonitöödel. Materjal jõudis Tallinna Tehnikaülikoolile katsetamiseks läbi *Drastic* projekti partneri OmTre AS, kes keskendub vana konstruktsioonipuidu taaskasutusele ning eelnimetatud projekti raames esimese ajutise hoone ehitamisele taaskasutatud puidust. Katsekehasid oli kokku 56, ristlõike suurusega 98x48 mm.

Kõik lõputöös sooritatud katsed on tehtud Tallinna Tehnikaülikooli Ehituse Mäemaja katsehallis. Visuaalsel sorteerimisel on kasutatud kolme standardit: Skandinaavias kasutusel olev uue puidu hindaise standard INSTA 142:2009, Itaalia vana puidu hindamiseks mõeldud UNI 11119 standard ja Norra standard prNS 3691-3, mis on samuti mõeldud vana puidu hindamiseks. Mittepurustavad ja purustavad paindekatsed on tehtud universaalse paralleelhaaratsitega elektromehaanilise katseseadmega, mille abil määrati staatilised elastsusmoodulid ja paindetugevused vastavalt standardile EVS-EN 408:2010. Dünaamiliste elastsusmoodulite leidmiseks on kasutatud ostsillooskoopi ja lainesignaali generaatorit, et määrata katsekehas helilaine levimise kiirust.

Uurimistöö jaguneb kolme osasse. Esmalt antakse ülevaade puidu ehitusest, tähtsamatest puidu omadustest ja varasematest uuringutest. Järgmises osas kirjeldatakse uuritava materjaliga sooritatud katsekäike ja vajalikke valemeid tulemuste arvutamiseks. Viimaks analüüsitakse katsetulemusi, võrreldakse varasemalt tehtud uuringutega ja tehakse järeldused.

2 KIRJANDUSE ÜLEVAADE

2.1 Puidu ehitus

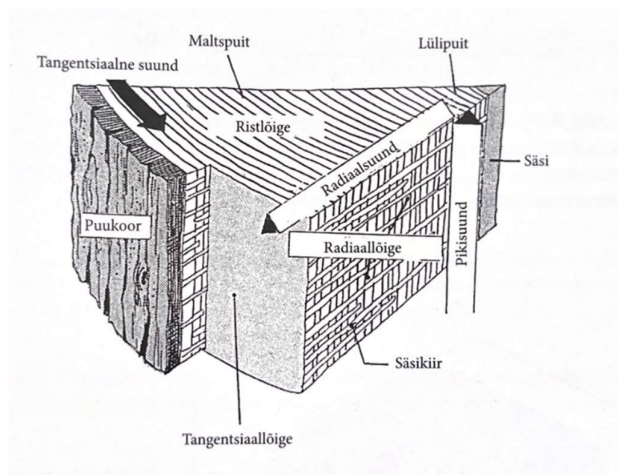
Puit on keeruline bioloogiline materjal, mis koosneb paljudest keemilistest elementidest ja rakutüüpidest, et täita taimele eluks vajalikud funktsioonid. Puu kolm põhifunktsiooni on vedelike transport, puu mehhaaniline tugi (tugevus) ja biokemikaalide säilitamine. Need põhifunktsioonid on mõjutanud enam kui 150000 erineva puittaimede omadusi, kasutust ja võimalusi nii taimede kui ka inimeste seisukohast vaadatuna. Mõistes kuidas need funktsioonid puud mõjutavad, saame paremini aru puu tugevustest ja piirangutest, et seda materjalina ära kasutada. [2]

Puud jaotatakse kahte rühma: okaspuud (inglise keeles *coniferous trees*) ja lehtpuud (inglise keeles *deciduous trees*). Okaspuud kuuluvad paljasseemnetaimede ja lehtpuud katteseemnetaimede hulka. Lehtpuu on palju keerulisema struktuuriga kui okaspuu. Okaspuu puit koosneb 90-95% ulatuses trahheiididest (piklikud ja õõnsad kuni 10 mm pikkusega juhtkoe rakud), mis annavad sellele tugevuse ning juhivad toitelahuseid. Väiksemas koguses esineb õhukese seinaga pehmeid rakke (parenhüümrakud), mille ülesandeks on toitainete vahendamine ja säilitamine. Okaspuu puidul on võrreldes lehtpuuga üldiselt suurem vastupanuvõime seenkahjustustele ja parem korrosioonikindlus keemiliste ainete suhtes. Kuna okaspuu puit on moodustabiilsem kui lehtpuu (kahaneb kuivamisel vähem) ja omab paremaid töötlemisomadusi, sobib ta hästi ehitusmaterjaliks. [2], [3]

2.1.1 Puidu tüvi

Puit on anisotroopne materjal: kõigis kolmes suunas on selle anatoomilised ja füüsikalised omadused erinevad. Puidu põhisuundadeks on pikisuund, radiaalne ja tagentsiaalne suund. Kõige paremad puidu omadused avalduvad pikisuunas. Tüve keskelt väliskihtide suunas kulgeb radiaalsuund ning piki aastarõngaid moodustub tagentsiaalsuund. Puutüve ristlõikes saab eristada säsi, aastarõngaid, koort, malts- ja lülipuitu (joonis 2.1). Enamike puuliikide puhul on lülipuit (tüve sisemine osa) äratuntav tumedama värvuse poolest. Maltspuit (tüve sisemine osa) on heledam. Näiteks hariliku kuuse lüli- ja maltspuit ei ole silmaga eristatavad. Maltspuit koosneb vedelikke juhtivatest rakkudest ning seetõttu sisaldab rohkem niiskust kui lülipuit, mis koosneb surnud rakkudest. Lülipuit annab puule tugevuse, on vastupidavam kahjuritele ja kahaneb kuivamisel vähem. Säsi on puutüve keskosa, kust saab alguse puu kasv. Aastaringid on ümmargused puidu tekstuuri jooned, mille teke sõltub aastaegadest ja

kliimast. Aastarõngad koosnevad kahest osast: sügis- ja kevadpuidust. Kevadpuidu ajal toimub intensiivne puu kasv, siis moodustuvad õhukeste seintega rakud, mis kergendavad juurdekasvuks vajaminevate toitainete transporti. Sügispuut on võrreldes kevadpuiduga kordades tugevam. [1] [3],



Joonis 2.1 Puit kolmes lõikes [3]

2.1.2 Puidu keemiline koostis

Keemiliselt on puidu koostis järgnev: 50% süsinikku, 43% hapnikku, 6% vesinikku ja 0,1-0,2% lämmastikku. Lisaks orgaanilistele ühenditele leidub puidu keemilises koostises veel marginaalses koguses mineraalaineid, mis põlemisel moodustuvad tuha (0,4-0,8%). Nendest algkomponentidest moodustuvad põhiühendid, milleks on tselluloos, hemitselluloos (polüsahhariidid) ja ligniin (puitaine). Tselluloosi osakaal puidus on 43-56%. Tselluloosist moodustuvad puidus fibrillid, mis koos ligniini ja vaikudega moodustavad puitainerakkude seinad. Ligniini osakaal puidus on 20-30% ja hemitselluloosi on 25-35%. Ligniin on termoplastiline aine – külmaga on kõva ja soojenedes pehmeneb. Sellel omadusel põhineb puidu plastilisus. Ligniini toimeel rakuseintes rakkude struktuur tugevneb (rakud kleepuvad ligniini toimeel üksteise külge) ning rakkude vastupanu survejõududele suureneb. [1], [3]

2.1.3 Harilik kuusk

Hariliku kuuse (*Picea Abies*) puitmaterjali kasutati antud lõputöö raames katseteks. Selles alapunktis on esitatud põhilised hariliku kuuse tunnused.

Harilik kuusk kasvab Euroopas (v.a Lõuna-Euroopas) ja Venemaal. See leiab kasutust ehitus-, konstruktsiooni kui ka tisleripuiduna. Selle malts- ja lülipuit on kollakasvalged ning neid on pea võimatu eristada. Aastarõngad on nähtavad. Võrreldes männipuiduga on hariliku kuuse vaigusisaldus väiksem. Kuuske on kerge lõhestada, viimistleda ja töödelda. Selle vastupidavus mädanikele ja putukakahjustusele on väike, kuid värskelt raiutult on kuuse maltspuit võrreldes männi maltspuiduga vähem tundlikum sinetus- ja hallitusseentele. Kuuse tüvepuidu ligikaudne keemiline koostis on 41% tselluloosi, 25% hemitselluloosi, 29% ligniini ja 3% ekstraktiivaineid. [3]

Hariliku kuuse füüsikalised ja mehaanilised omadused: [3]

- tihedus õhukuivalt jääb vahemikku 390-480 kg/m³;
- 12% niiskussisalduse juures on tihedus 445 kg/m³; [4]
- kahanemine kuni 12%;
- tõmbetugevus pikikiudu kuni 88 N/mm²;
- survetugevus pikikiudu 35-44 N/mm²;
- paindetugevus 66-84 N/mm²;
- elastsusmoodul varieerub vahemikus 8300-13000 N/mm².

2.2 Puidu füüsikalis- mehaanilised omadused

2.2.1 Tihedus

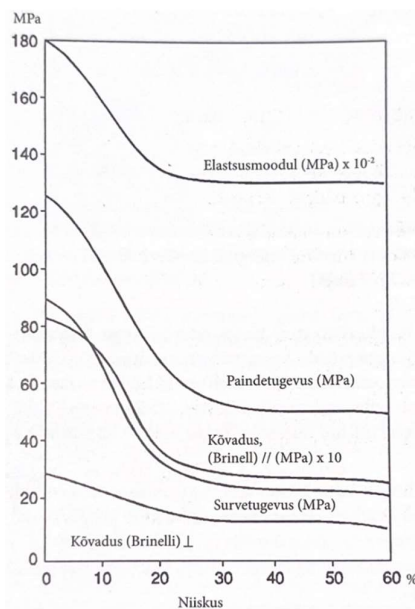
Tihedus on füüsikaline suurus aine massi ja mahu suhtest, mida väljendatakse SI mõõtühikuna kilogramm kuupmeetri kohta (kg/m³). Puit on ehituselt poorne materjal, milles on eri suuruses õõnsuseid. Kuna puit on hügrokoopne materjal, siis mass ja ruumala on tugevalt mõjutatud niiskussisaldusest. Seetõttu on oluline leida puidu niiskussisaldus, et oleks võimalik erinevate puuliikide korral nende tihedusi võrrelda. Üldjuhul esitakse tihedused 12% niiskussisalduse juures. [5], [6]

Puidu tihedus sõltub temas olevast puidusubstantsi (puiduaine) kogusest. Seejuures on puitaine tihedus olenemata puuliigist kõigil sarnane – keskmiselt $1,53 \text{ g/cm}^3$. See tähendab, et mida vähem on poore, seda suurema osa moodustab puidust puidusubstants ning sellest tingituna on puit tihedam. Sellest sõltuvalt on mõjutatud mitmed mehaanilised omadused nagu näiteks tugevus, kõvadus ja kulumiskindlus. Suurema tihedusega on puidul paremad mehaanilised omadused. [3]

Puidu tihedus ei ole kogu ristlõike ulatuses ühtlane. Kevadel, kui algab kasvuaeg, moodustuvad puukoes poorsed õhukeste seintega rakud. Sügisel, kui puu kasv on aeglustunud, moodustuvad väiksemad paksuseinalised rakud, mis mõjutavad rohkem tüve tugevust. Näiteks okaspuude puhul võib olla sügispuidu tihedus lausa 3 korda suurem kui kevadpuidul [3] ning vastavalt sügis- ja kevadpuidu osakaalule puidus määrab see tiheduse, rohkem sügispuitu tähendab suuremat tihedust. [2] Seetõttu on aastarõngaste lugemine hea indikaator tiheduse määramiseks, mis omakorda annab hea hinnangu puidu tugevusele. [7]

2.2.2 Niiskus

Puit on hügrokoopne materjal – ta imab niiskust ümbritsevast keskkonnast. Niiskuse muutus puidus oleneb õhus sisalduvast niiskusest (suhtelisest õhuniiskusest) temperatuurist ning samuti puidu enda niiskussisaldusest. Niiskussisaldus mõjutab oluliselt puidu omadusi, alates 30% niiskussisaldusest (väiksemaks) hakkavad enamike puiduliikidel füüsikalised ja mehaanilised omadused muutuma, osadel varieerub see mõne protsendi piires. [2] Seda piiri nimetatakse küllastuspunktiks, mis tähendab, et puidu rakusein on end vett täis imenud ning niiskuse suurenemisel koguneb üleliigne vesi raku õõnsustesse ehk lumenisse. [3] Joonisel 2.2 on kirjeldatud puidu mehaaniliste omaduste muutust sõltuvalt niiskussisaldusest.



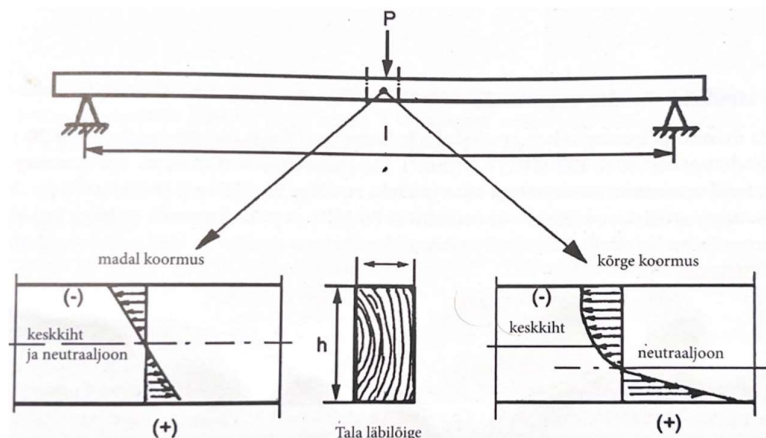
Joonis 2.2 Puidu kuivamisel alla rakuseina küllastuspunkti (30%) muutuvad puidu mehaanilised omadused [3]

Puidu niiskust saab nimetada kahel viisil: absoluutseks ja suhteliseks (relatiivne) niiskuseks. Esimesel juhul väljendab see puidus leiduvat vett absoluutselt kuiva puidu massi kohta. Relatiivse niiskuse korral võrreldakse vee hulka niiske puidu massiga. Kuivkaalu järgi väljendamisel võib niiskussisalduse väärtus ulatuda üle 100-200%, aga kui niiskussisaldust arvestatakse niiske puidu suhtega, saab suhteline puidu niiskus olla 60-70%. [3]

Niiskussisalduse muutused toovad puidus esile mahupaisumised- ja kahanemised. Puit kahaneb kui ta kuivab ning paisub kui rakkude seinad täituvad veega. Kuna puit on anisotroopne materjal (omadused erinevad sõltuvalt suunast) siis deformatsioonid ei ole igas suunas ühesugused. Okaspuidu täielikul kuivamisel on pikisuunaline lühenemine 0,1-0,4%, radiaalsuunas 4,4-5,3% ja tangentsiaalsuunas ligi kaks korda suurem lühenemine kui radiaalsel. [1]

2.2.3 Paindetugevus ja elastsusmoodul

Paindetugevus on kombinatsioon tõmbe- ja survepingest (lisaks ka nihketugevusest), mis on tõmbetugevusest väiksem ja survetugevuse väärtusest suurem (väärtuse mõttes jääb tõmbe- ja survetugevuse vahele). Lihttala, mida surutakse keskelt välisjõuga tekitab ülemisespinnas survepingeid (surutakse kokku) ja alumisespinnas tõmbepingeid (venitatakse pikemaks). Tala ristlõike keskel on nulljoon, kus mõõdukate koormuste juures on minimaalne või null pinge. (pingete diagramm lineaarne). Suuremate koormuste rakendamisel nihkub neutraaljoon tõmbetsooni suunas (tõmbepinge suurem survepingest, joonis 2.3), tekib plastne staadium ja kuna tõmbepinge on oluliselt suurem survepingest, järgneb purunemine tõmbetsoonis. [3], [1]



Joonis 2.3 Näide koormusest talale ja skeem paindepingete jaotusest. Vasakpoolne diagramm näitab olukorda madala koormuse korral ja parempoolne pingediagramm kehtib suuremate koormuste korral. (+) tähistab tõmbepinged ja (-) survepinget [3]

Elastsusmoodul iseloomustab materjali võimet avaldada välisjõududega deformeerimisele vastupanu elastuspiiride ulatuses, kusjuures koormuse mõju kadumisel taastub esialgne kuju. See tähendab, et suurema elastsusmooduli väärtuse juures deformeerub keha vähem. Puidu elastsusmoodul pikikiudu koormamise puhul jääb keskmiselt vahemikku 7000-12000 N/mm², ristikiudu vahemikku 200-500 N/mm². [3]

Mõlemad omadused (lisaks veel ka puidu tihedus) on peamised tegurid puidu tugevuse hindamiseks. Paindetugevuse määramine annab täpse puidu tugevuse kuid miinuseks on katsekeha lõhkumine. Kui eesmärk on kasutada puitu, näiteks antud lõputöö raames taaskasutada puitu, siis purustav katse ei ole otstarbekas. Parema variant on elastsusmooduli määramine, see on küll mõnevõrra ebatäpsem, kuid siiski ennustab suhteliselt tugeva korrelatsiooniga puidu üldist tugevust (R^2 varieeruvus 0,51-0,73 vahemikus, tugev korrelatsioon [8]). [7]

Ehituspuidu liigitus tugevusklasside alusel on leitav standardist EVS-EN 338. Standardis on välja toodud tugevused, jäikused ja tihedused tugevusklassidele C14-C50 (okaspuud). Number tähistab servpaine- või tõmbetugevus väärtust. [9]

2.2.4 Akustilised omadused

Akustika on õpetus helist, selle tekkimisest, omadustest ja levimisest materjalides. Heli levimine puidus on olenevalt puiduliigist ja levimise suunast erinev. Näiteks pikikiudu levib heli puidus kiirusega 3800-4800 m/s, kuid ristikiudu vahemikus 500-1500 m/s. Üldine heli levimise kiiruse vahetegur puidus on 14:5:3 suundade järgi (vastavalt pikikiudu, ristikiudu ja tangentsiaalselt). [3]

Elastsusmoodul ja tihedus mõjutavad tugevalt puidu akustilisi omadusi, muidugi ka puidu defektid ja seisukord. Heli levib kiiremini kui materjal on suure elastsusmooduliga ja väikse tihedusega. Toores (suur niiskussisaldus) ja mäda (madal elastsusmoodul) puit juhib heli tunduvalt vähem, see tähendab madalamaid helisid, kui kuiv ja rikketeta puit. Seda teadmist ära kasutades on võimalik akustilise mõõtmisega hinnata puidu mehaanilisi omadusi ja puidu seisukorda (defektid, lõhed oksad). [3] Akustika abil on võimalik leida dünaamiline elastsusmoodul, selleks läheb tarvis mõõta helilevimise kiirust puidus ning puidu tihedust. [10]

2.2.5 Puidu kahjustused ja rikked

Puit on vastupidav materjal kui teda kasutada soodsates keskkonnatingimustes, ebasoodsates oludes hävib puit kergesti. Kahjustusi saab vältida sellega kui teatakse, millistes bioloogilistest ja kliimaatilistes oludes need tekivad. Samuti puidu taaskasutuse vaatest on oluline tunda erinevaid kahjustusi, nende ulatust ja mõju puidule, et hinnata kasutusvõimalusi. Puidu bioloogiliseid kahjustajad on bakterid, seened ja putukad. Osad kahjustused nagu näiteks sinetus-, hallitusseened ja bakterid ei mõjuta suurel määral puidu tugevusomadusi, küll, aga muudavad puidu välimust ja võivad eritada spetsiifilist lõhna (hallitusseened, bakterid). Puidu tugevusomadusi, värvust ja vormi kahjustavad oluliselt puitulagundavad seened, mis jaotatakse kahjustamisviisi järgi gruppidesse: pruun-, valge ja pehmemädanik.

- Pruuni mädaniku, mida iseloomustab pruun värvus, mõjul kaasneb puidu kokkutõmbumine ning rabenemine, mille lõppfaasis laguneb puit kuubikuteks.
- Valgemädanik lõhustab puidusubstanti, puit muutub kiulisemaks pehmememaks ja muutub järk-järgult heledamaks.
- Pehmemädanik kahjustab puidu pealiskihti, muutes selle pehmeks ja pragunemisel kuivab ruudukujuliseks.

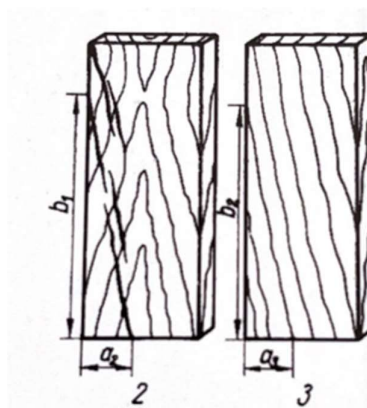
Putukad kahjustavad puitu sellesse käiguteid sisse närides. See vähendab efektiivset ristlõike pindala ja puit on selle võrra nõrgem. Putukkahjustused ei ole üldjuhul konstruktsioonipuidus lubatud. Kõige madalamates kvaliteedi klassides on kahjustused vähesel määral lubatud [2], [3]. Näiteks INSTA 142 standard lubab väheste kahjustusega puitu sorteerida C14 klaasi, kuid see leiab vähest kasutust ehitusel. [11] [12].

Puiduriketeks nimetakse erinevate mõjurite tõttu puidus tekkinud muudatusi ja kõrvalekaldeid puidu normaalsest ehitusest. Need alandavad puidu kvaliteeti või muudavad ta kasutuskõlbmatuks (osaliselt või täielikult). Tavapärasteks puiduriketeks loetakse:

- puukasvamisel tekkinud kõverus, kaldkiulisus, okslikkus jt.;
- seente, putukate või ilmastiku põhjustatud kahjustused
- niiskussisaldusega tekkivad rikked nagu lõhenemine, kaardumine ja kõmmeldumine
- töötlemisel tekkinud rikked nagu killu lahti murdumine, sisselõige, kaldlõige, kinnitusvahendite augud. [3]

Kõige enam puidurikestest mõjutab puidu tugevust oksakohad, eelkõige pikikiudu tõmb- ja paindetugevust. Survetugevusele avaldab oksakoht märksa väiksemat mõju. Näiteks vigadeta puidu tugevus võib olla ligi 4 kuni 5 korda suurem kui oksakohtadega puidul. Oksakohtade mõju tugevusele sõltub oksakoha suurusest, asukohast ja kujust. Oksakohtade ümber tekivad puidus ka suuremad kiudude kalded. [2] [3] Enamik visuaalse tugevussorteerimise standardid põhinevad oksakohtade suuruste mõõtmisel sealjuures oksakoha diameetri hindamine üksinda ei ole kõige parem tugevuse määraja vaid parema tulemuse saamiseks on vaja oksakoha suurust võrrelda ristlõike laiuse osakaaluga. [7]

Teine oluline mõjutaja on puidu kaldkiulisus (puidukiudude kõrvalekaldumine keha pikiteljest). Kiudude kalde suurusest olenevad saematerjalide mehaanilised omadused, eriti tõmbetugevus pikikiudu ja staatiline paindetugevus. Kaldkiulisus vähendab puidu töötlemist ja painduvust. Kaldkiulisus jaguneb olenevat kiudude suunast veel tangentsiaalseks (looduslik) ja radiaalseks (tehislik). Tangentsiaalne kaldkiulisus esineb kõikidel puuliikidel, kuid üldjuhul see ei ületa kõrvalekaldumist rohkem kui 4° ja visuaalse tugevussorteermise standardite hindamissüsteemis see tugevusklasse ei mõjuta. Radiaalne kaldkiulisus ilmneb puidu piki telge läbisaagimisel (kui ümarmaterjal on kõver ja koondeline) ja on nähtav radiaalsel küljel saematerjali serva ja aastaringide mitte paralleelsusega. Tangentsiaalsel küljel on seda näha väljakiilunud aastaringidena (joonis 2.4 kirjeldab olukorda). [3]



Joonis 2.4 Kaldkiulisuse näide: 2- tangentsiaalne kaldkiulisus saetud toodetes; 3 - radiaalne kaldkiulisus saetud toodetes [3]

2.3 Purustavad ja mittepurustavad meetodid

Purustavad katsed nagu ka nimi vihjab, on see kui testitakse katsekeha kuni tõrkeni ehk purunemiseni. Selle eelis mittepurustavate meetodide ees on katsekeha täpse tulemuse (näiteks tugevus, elastsusmoodul) määramisel. Negatiivne selle juures on katsekeha kasutuskõlbmatuks tegemine ning see lähenemine ei sobi materjali taaskasutuseks.

Mittepurustavate meetodite all peetakse silmas selliseid hindamisviise, kus konstruktsioonide seisukorra hindamisel ei kahjustata kattematerjale ja ei nõrgestata kandekonstruktsioone (sealjuures maksimaalselt 15 mm suurused kontrollpuurimised on lubatud). Kõige levinum lähenemine mittepurustavate meetodite jagamiseks on kasutada mõõdetavaid omadusi nagu mehaanilised, elektrilised, akustilised, termilised omadused ja elektromagnetlained. Need omadused põhinevad erinevatel füüsikalistel printsiipidel, mille kaudu on võimalik leida vajalikke mõõtetulemusi. Selles lõputöös katsetati puidu mehaanilisi ja akustilisi omadusi, et leida katsekehade elastsusmoduleid ja paindetugevusi. Samuti loetakse visuaalset tugevussorteerimist mittepurustava meetodi hulka, kuid siis toimub hindamine etteantud reeglite alusel ning otseselt materjali omadusi ei testita. [13] Mittepurustavate meetodite puhul peab arvestama teatava ebatäpsusega s.t, et määratavad tulemused annavad ligikaudse hinnangu ning kohati võib esineda ka suuremaid erinevusi reaalsete tulemustega. Seda mõjutab näiteks katsete iseloom – on võimalik teha väga lokaalseid teste (näiteks ultraheli mõõtmisega) kui ka globaalseid teste (vibratsiooni baasil meetodid, paindekatsed). Kuna puit on anisotroopne materjal, siis tuleks keskenduda katsetele, mis hõlmab suuremat või täielikku katsekeha piirkonda. Üldiselt saadakse parimaid tulemusi mitme mõõteviisi koos kasutamisel. [14], [15]

2.4 Varasemad uuringud

Varasemaid uuringuid puidu mehaaniliste omaduste kohta erinevate meetodikatega on tehtud nii Eestis kui ka välismaal. Eestis on mitmed lõputööd kirjutatud sellel teemal Eesti Maaülikoolis ning Tallinna Tehnikaülikoolist.

Tallinna Tehnikaülikoolis on Martin Püssa varasemalt bakalaureusetöö raames uurinud saematerjali tugevusomadusi visuaalse sorteerimisega (kasutati Suurbritannia BS4978 standardit) ja akustikal põhineva meetodiga (Timber Grader MTG 920 seadmega), kokku hinnati selles lõputöös 12 erineva ristlõikega 6513 harilikust kuusest puitprussi. Tema tulemustest järeldus, et akustiline tugevussorteerimine on tõsiseltvõetav alternatiiv visuaalsele sorteerimisele, sest nii suudeti ühel juhul 11,5 % materjali paremasse tugevusklassi (C24) sorteerida ning teise seadistuse järgi lausa 22,4% rohkem materjali C24 klassi paigutada kui visuaalsel sorteerimisel. Esimese seadistuse korral jagati materjal kolme erinevasse klassi: praak, C16 ja C24. Teisel seadistusega jagati materjal kahte klassi: praak ja miinimum nõuetele vastav C24 tugevusklass. Meetodide erinevus seisneb selles, et esimesel juhul kui materjal on näiteks lähedal C24 tugevusklassile, siis seade loeb selle nõrgemasse klassi. Teisel juhul arvestatakse piirnormidega ning tulemused, mis jäävad napilt alla C24 tugevusklassi võidakse siiski lugeda C24 klassi. [16]

Maarja Kauniste magistritöö "Vana konstruktsioonipuidu tugevus- ja jäikusomaduste hindamine" fookus oli umbes 120 aasta vanuse hariliku kuuse puidu visuaalsel hindamisel ja purustavate ja mitte-purustavatel katsetel. Kokku uuriti 19 katsekeha füüsikalisi ja mehaanilisi omadusi. Visuaalne tugevussorteerimine on tehtud kolme erineva standardi järgi: UNI 11119, UNI 11035 ja INSTA 142. Tema järeldustes selgub, et kõikide eelnimetatud standardite järgi alahinnatakse puidu tugevust 47,6-53,6% ulatuses ning kõige paremad tulemused on saadud Skandinaavia standardi INSTA 142 põhjal, mis tegelikult on mõeldud uue puidu hindamiseks. M. Kauniste on toonud välja, et oksakohad on otsustanud materjali tugevuse 86,7% juhtumitest. Staatilise elastsusmooduli ja paindetugevuse vaheliseks seoseks on selles uurimistöös saadud 0,67, see on tugev keskmine seos. Valimi väiksuse tõttu ei ole võimalik teha põhjapanevaid järeldusi ning järelduste kinnitamiseks tuleks sooritada rohkem katseid. [17]

Eesti Maaülikoolis on sarnast teemat uuritud rohkem. Näiteks Mirko Hani uuris aastal 2014 enda lõputöös kuuse- ja männipuidu tugevusparameetreid akustiliste mitte-purustavate ja purustava meetodiga. Kokku uuriti 100 katsekeha, mõlemast puuliigist 50. Ta lõi välja, et dünaamiliste elastsusmoodulite leidmisel (akustilised katsed) on puidutugevus tegelikkusest suurem ehk dünaamiline elastsusmoodul ülehindab staatilist elastsusmoodulit (purustav katse), kuid on siiski piisavalt usaldusväärne, et anda arvestatavaid tulemusi. Akustilise meetodiga, olenevalt mõõteseadmest, on võimalik määrata elastsusmoodulit konstruktsioonis 80% täpsusega. [18]

2015 aastal võrdles Lauri Ütsik enda magistritöös erinevaid tugevussorteerimise meetodeid: visuaalset tugevussorteerimist NS-INSTA 142 standardi alusel,

masintugevussorteerimist ja purustavat meetodi. Uuritav materjal oli männi- ja kuusepuit, mõlemast puuliigist 24 katsekeha. Väga tugevad seosed saavutati masintugevussorteerimisel (*Timber Grader* seade) ja purustava paindekatse vahel, kus männipuidust katsekehade korrelatsioonitegur oli $r = 0,96$ ja kuusepuidust katsekehadel $r = 0,90$. Akustikal põhineval otstest sooritatud mõõteviisiga saavutati männi puidu puhul tugevad seosed ja kuusepuiduga keskmised seosed. L. Ütsik on toonud oma magistritöös välja, et visuaalsel tugevussorteerimisel on suur vahe tekkinud reaalsel tugevuskatse tulemusel ja visuaalsel hindamisel. 81% katsetest olid alahinnatud ning 17% katsekehasid hinnati mitme tugevusklassi võrra kõrgemaks. Lauri Ütsik hindab visuaalset sorteerimist ebatäpseks ning aeganõudvaks võrreldes masintugevussorteerimisega, millega on võimalik puitu kõrgematesse tugevusklassidesse määrata. [19]

Aastal 2016 kirjutas Teele Toomjõe magistritöö teemal "Hariliku männi (*Pinus sylvestris* L.) puidu tugevusparameetrite uurimine mittepurustaval ja purustaval meetodil". T. Toomjõe võrdles visuaalset tugevussorteerimist (NS-INSTA 142:1997 põhjal), purustavaid katseid ja mittepurustavaid katseid (ultraheliga kiiruse mõõtmised). Kokku oli katsekehasid 236, mis kõik olid metsast toodud männipuud katsetuste tarbeks. Visuaalne sorteerimine teostati NS-INSTA 142 standardi kohaselt, kus kõige määravam oli oksakohtade osakaal katsekeha ristlõikepinnas, muud tunnused mõjutasid tulemusi vähe. Mittepurustava meetodina sooritati ultraheli levimise kiiruse katsed, kust järeldus, et heaks staatilise elastsusmooduli prognoosimise mudeliks on vaja lisaks ultraheli levimise kiiruse mõõtmisele ka materjali tihedust teada. Sellisel juhul on saadud mudel, mille järgi on võimalik kirjeldada 83,2% tulemustest. Purustavate katsete ja katsekehadelt mõõdetud erinevate tunnuste analüüsimisel leiti, et puu kõrguse kasvades vähenesid paljud puidu omadused: tihedus, sügispuidu osakaal, paindetugevus ja staatiline elastsusmoodul. [20]

Michela Nocetti jt teadusartikkel iidse puidu mehaaniliste omaduste uurimisest visuaalselt ja masintugevussorteerimisega on avaldatud aastal 2023. Uuritav materjal oli mitmest eri puuliigist: valge nulg, harilik kastan, pappel ja harilik kuusk. Katsekehasid oli kokku 51, nendest 38 moodustasid valge nulu katsekehad. Visuaalsel tugevussorteerimisel kasutati Itaalia standardeid UNI 11035 (uue puidu hindamisstandard) ja UNI 11119 (vana puidu hindamisstandard). Mõlema standardi sorteerimisreegleid kohandati, et reeglid ei oleks nii limiteerivad kvaliteediklassidesse hindamisel. Tulemustest järeldus, et UNI 11119 standard ülehindab valge nulu elastsusmoodulite väärtusi võrreldes katsetega saadud tulemustega, teistest puuliikidest katsekehasid oli liiga vähe, et hinnanguid anda. Masintugevussorteerimist sooritati kahel viisil: ultraheli lainemõõtmise kiirusega koos kohaliku tihedusega ja

loomulikul sagedusel vibratsiooni mõõtmisega koos terve katsekeha tihedusega. Michela Nocetti jt hinnangul oli vibratsiooni mõõtmise tehnika täpsem kui ultraheli lainemõõtmised, sest viimane ei olnud piisavalt efektiivne puidu kahjustuste tuvastamisel. Lisaks terve katsekeha tiheduse kasutamine lokaalse tiheduse asemel parandas mehaaniliste omaduste korrelatsiooni. Kokkuvõttes masintugevussorteerimine hindas puidu tugevusomadusi madalamatesse klassidesse kui visuaalne sorteerimine, kuid karakteristlike suuruste määramisel sobitusid katsekehad paremini tugevusklasside parameetritega. Samuti purustavad katsed andsid paremaid tulemusi kui masinsorteerimisega määratud tugevusklassid. [21]

Maurizio Piazza jt on uurinud Itaalia visuaalsete standarite (UNI 11119 ja UNI 11035) ja mitte purustavate katsetega vana puitu. Nende katsetulemustest selgus, et puidu paindetugevused on tugevalt alahinnatud, vastavalt 61% ja 50% ulatuses. Samas on nad leidnud, et standarditega leitud elastsusmooduli väärtused on keskmiselt pigem vähesel määral alahinnatud. Tulemustest selgus ka see, et oksakohad on kõige olulisemad tugevusklassi alandavad defektid. Antud uurimistöös on koostatud erinevate parameetrite vahelisi korrelatsioonigraafikuid, millest mitte ükski pole tugeva seosega. Kõige parem seos (keskmise tugevusega seos) on leitud UNI 11035 standardi paindetugevuse ja paindekatsede tulemuste vahel. Autorid mainivad oma järeldustes, et katsetulemustesse tuleb suhtuda kriitiliselt ja tulemused võivad olla mitmesuguselt mõistetavad. Samuti tuuakse välja, et vana puidu hindamisel tuleb teha mõningaid erandeid hindamiskriteeriumite osas ning lisaks peaks kasutama masinsorteerimise seadet (helilainete mõõtmise), et saaks materjali hinnata ka sisemiselt. [7]

Varasemalt on uuritud vana ja päästetud puidu tugevusomadusi aja möödudes. Mitmed uuringud on jõudnud järeldusele, et puidu paindetugevus ja elastsusmoodul aja möödudes püsib või muutub ainult vähesel määral. Kõige suuremad tugevusnäitajate vähenemised on leitud konstruktsioonipuidul, kus parameetrid on mõjutatud kasutustingimustest nagu koormuse kestvus, materjali kaitsmine keskkonna ja muude mõjurite eest ning demonteerimise käigus materjali kahjustamine. Need ei ole otsesed tagajärjed aja sõltuvusest. [22]

3 MATERJAL JA TÖÖMETOODIKA

3.1 Materjali iseloomustus

Lõputöös kasutatud uurimismaterjal pärineb Norra idufirmalt AS OmTre, kes on Tallinna Tehnikaülikooli koostööpartner Horizon projektis "Drastic" (*Demonstrating Real and Affordable Sustainable Building Solutions with Top-level whole life cycle performance and Improved Circularity*). Projekti eesmärk on vähendada süsiniku jalajälge ja ehitusega kaasnevat kliimamõju üle Euroopa, samal ajal parandada ning suunata ehitatud keskkonnas rohkem materjali ringlusesse. [23]

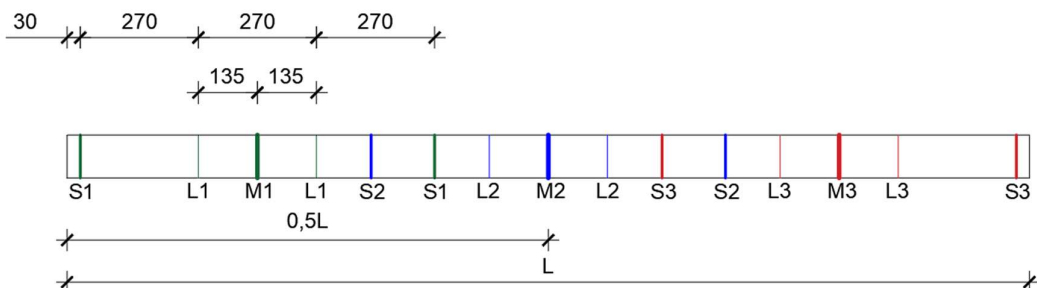
Uuritavat puitu kasutati varasemalt ehitusplatsil betoonitööde raketisena. Tegu on harilikust kuusest valmistatud 48x98 mm prussidega, tugevusklassiga C24. Materjali uuriti Rootsisis, kus tehti sellega kompuutertomograaf skannerimise katseid ning seejärel transporditi katsekehad Eestisse. Katsetused viidi läbi Ehituse Mäemaja laboris. Teostati mittepurustavad paindekatsed globaalse ja lokaalse paindeelastusmooduli määramiseks, osaliselt purustavad katsed ning niiskussisalduse mõõdistamised. Samuti said kõik katsekehad visuaalselt sorteeritud.

3.2 Katsekehade märgistamine ja mõõtmised

Antud uurimistöös oli katsekehasid kokku 56, ristlõike mõõtudega 45-48 mm laius ja 95-98 mm kõrgus. Pikkused jäid vahemikku 1,9-2,85 m, välja arvatud kaks prussi, mis olid otsast katkised, mistõttu oli vajalik lõigata need katkise osa võrra lühemaks. Kõik katsekehade mõõtmised on määratud vastavalt EVS-EN 408:2010+A1:2012 standardile, kus mõõtmised tuleb anda 1% täpsusega. Kuna laius ja kõrgus muutusid katsekehade piires, oli vajalik võtta mõõdud kolmest erinevast kohast, kuid otstele mitte lähemalt kui 150 mm. [24] Piisava täpsusega pikkuse määramiseks sobis mõõdulint ning ristlõike mõõtude määramiseks on kasutatud digitaalset nihikut mõõtetäpsusega 0,01 mm. Mõõtetulemused on avaldatud pikkuste puhul täisosa kümneliste täpsusega ning ristlõike korral murdosa kümnendike täpsusega. Kuna eesmärk oli ühtlasi teha ühe proovikehaga mittepurustavaid katseid kolmest eri lõigust, siis ristlõike mõõdud võeti iga lõigu keskelt, mis omakorda andis paindeelastusmooduleid arvutades täpsemad tulemused. Mõõtmiste asukohad olid katsekeha keskel ja ~44 cm kaugusel otstest (joonis 3.1 kirjeldatud märgistamisviis).

Kõik proovikehad on üles pildistatud neljast küljest, määratud tunnusnumbriga ja külgede eristamiseks on kasutatud tähtedega märgistust A kuni D. See on vajalik, et

hinnata katsekehade igat külge visuaalse tugevuse sorteerimisel – sellest saab järeldada kogu katsekeha tugevust või vaadata parameetreid ühes kindlas suunas ning võrrelda neid purustava või mittepurustava katsete tulemustega. Paindekatsete jaoks oli vajalik märgistada proovikehadele toe- ja koormuspunktide asukohad ning silde keskosa.



Joonis 3.1 Katsekehade märgistused paindekatsete tarbeks. M tähistab sildeava keskpunkti, L näitab koormuste asukohti ja S on tugi. Number tähistab katselõiku.

3.3 Visuaalne tugevussorteerimine

Antud lõputöö raames hinnati visuaalselt katsekehasid kolme standardi järgi: INSTA 142 (Skandinaavia standard), prNS-3691-3 (Norra uus standard, mis ei ole veel avaldatud) ja UNI 11119 (Itaalia standard). Erinevate standardite kasutamise eesmärgiks oli leida, milline neist on täpsem ja kuidas erineb uus Norra prNS-3691-3 standard eelkõige Skandinaavia INSTA 142 omast.

Katsekehade hindamine toimus kahel viisil. Esimesel juhul hinnati kõikide katsekehade igat külge ja määrati tervele katsekehale kõige halvema variandi järgi tugevusklass. Teise meetodiga hinnati visuaalselt neid katsekehasid, millele tehti purustav katse ja tugevusklass määrati ainult purustava katse tsoonis.

Tugevusklassidesse hindamisel lubab INSTA 142 standard määrata kõige kõrgemat klassi T3 ehk C30 ja Norra standardi puhul on see C24. Kokku on Põhjamaade standardil 4 tugevuskategooriat – T3 (C30), T2 (C24), T1 (C18) ja T0 (C14). Kui hinnatava puidu parameetrid ei suuda täita T0 nõuet, tuleb katsekeha praagiks lugeda. [11] Norra standard üle C24 ei luba puitu visuaalselt hinnata ning kui varasema dokumentatsiooni alusel on tugevusklassiks antud INSTA 142 standardi järgi T3 (C30) siis tuleb see kategooria langetada C24 peale. Ülejäänud kategooriad on prNS-3691-3 standardil samad, kuid tähistatud "O" tähega, mis viitab, et tegu on taaskasutatud puiduga, näiteks O24 (vastab C24 või C18 tugevusklassile). [25]

UNI 11119 standard ei anna ette tugevusklassse vaid määrab maksimaalsed lubatud pinged vastavalt puiduliigile mis võib vastava tugevuskategooria I, II või III korral olla (vaata tabelist 3.1).

Tabel 3.1 UNI 11119 standardi maksimaalsed lubatud pinged [26]

Puiduliik	Kategooria	Maksimaalne lubatud pinge (N/mm ²)					
		Surve		Staatiline paine	Tõmme pikikiudude suunas	Nihe pikikiudude suunas	Painde- elastsus- moodul
		Pikikiudu	Ristikiudu				
Harilik kuusk (Picea abies)	I	10	2,0	11	11	1,0	12 500
	II	8	2,0	9	9	0,9	11 500
	III	6	2,0	7	6	0,8	10 500

Lubatud pingete järgi saab tuletada normväärtused järgmise valemiga: [7]

$$\sigma_A = f_k \frac{k_{mod}}{1,5\gamma_M} \quad (3.1)$$

kus σ_A lubatud pinge [N/mm²];
 f_k tugevuse 5-protsentiili normväärtus [N/mm²];
 k_{mod} koormuse kestuse ja niiskuse mõju arvestav modifikatsioonitegur Eurokoodeks 5-s; [27]
 γ_M Materjali omaduse osavarutegur, mis võtab arvesse mudeli määramatusi ja mõõdete varieeruvust (Eurokoodeks 5 järgi võetakse saepuidul teguri väärtuseks 1,3). [27]

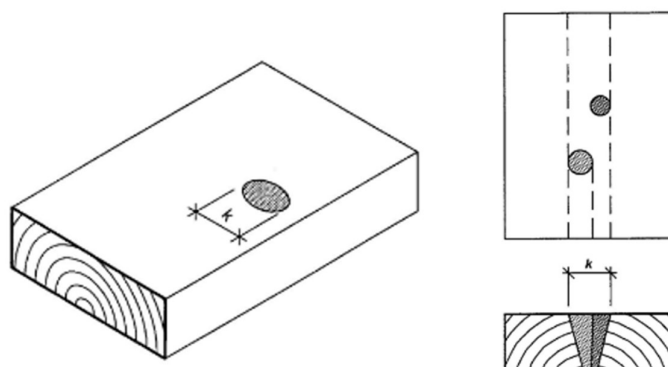
3.3.1 Oksakohad

Oksakohtade mõõtmised teostati järgides standardite INSTA 142 ja UNI 11119 nõudeid. Norra standard prNS 3691-3 järgib oksakohtade mõõtmisel INSTA 142 juhiseid. [25]
UNI 11119 standardi kohaselt tuleb mõõta üksiku oksakoha ja gruppi kuuluvate oksakohtade mõõtmeid. Üksikut oksakohta mõõtes leitakse selle minimaalne diameeter ning määratakse suhe ristlõike laiusega. Oksakohtade grupp moodustub 150 mm lõigule jäävatest oksakohtadest. Selles vahemikus leitakse iga üksiku oksakoha minimaalne diameeter ning määratakse suhe ristlõike laiusega. Tugevuskategooriatesse jagunemise on näidatud tabelis 3.2. [26]

Tabel 3.2 UNI 11119 standardi oksakohtade järgi tugevusklassidesse sorteerimise kriteeriumid [26]

Karakteristik	Kategooria		
	I	II	III
Üksik oksakoht	$\leq 1/5 \leq 50 \text{ mm}$	$\leq 1/3 \leq 70 \text{ mm}$	$\leq 1/2$
Oksakohtade grupp	$\leq 2/5$	$\leq 2/3$	$\leq 3/4$

INSTA 142 standardi järgi tuleb määrata oksakohad servale ja laiemale küljele eraldi. Üksiku oksakohta läbimõõd võetakse ristlõike laiussega samasuunaliselt (joonis 3.2a). Oksakohtade grupid on INSTA 142 standardis teisiti defineeritud – mõõdetakse siis kui puidukiulisuse häirete tõttu on oksakohad nii lähestikku, et neid on raske eristada või kui üksteisele lähestikku asetsevad oksakohad kattuvad üksteisega pikitelgi (joonis 3.2b). Selles standardis on kirjeldatud rohkem variante kuidas oksakohti mõõta, kuid antud lõputöö raames kirjeldatakse ainult neid, mida oli vajalik kasutada. Tugevuskategooriatesse jagunemine on näidatud tabelis 3.3. [11]



Joonis 3.2 a) vasakpoolsel joonisel kirjeldatakse üksiku oksakohta suuruse määramist; b) pikitelgi kattuvad oksakohad ning nende suuruse määramine [11]

Tabel 3.3 INSTA 142 standardi oksakohtade hindamiskriteeriumid. b tähistab laiemat külje mõõtu ja t serva külje mõõtu. [11]

Karakteristik	Tugevusklass			
	T3 (C30)	T2 (C24)	T1 (C18)	T0 (C14)
Lühema külje oksakoht	$t/3$	$t/2$	$4t/5$	t
Laiema külje oksakoht	$b/6$	$b/4$	$2b/5$	$b/2$
Oksakohtade summa	Summa maksimaalsest lubatud lühema ja laiema külje oksakohast			

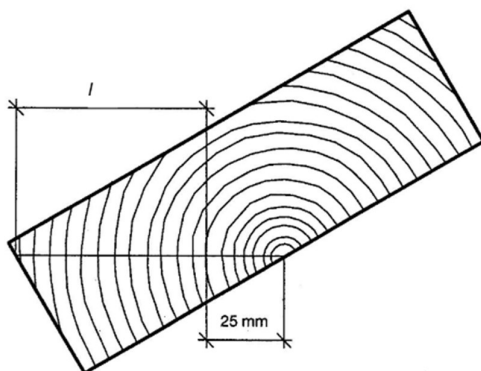
3.3.2 Aastaringid

Katsekehade aastaringide mõõtmist tehti vastavalt INSTA 142 standardile, mis juhendub EN 1310 standardi mõõtmismetoodikast. Tänapäevase seisuga on EN 1310 standard asendunud EN 1309-3:2018-ga. Norra standard prNS-3691-3 viitab INSTA 142 standardi tabel 1-le, kuid pole selge, kas seal all peetakse silmas ka aastase kasvu mõõtmist. Antud uurimistöö raames on otsustatud seda siiski arvestada.

Aastarõngaste mõõtmist tuleb alustada puusäsi keskelt 25 mm kaugusel ja sellest alates leida kõige pikem lõik (joonisel 3.3 pikkus l), mille vahel saab kokku lugeda kõik aastarõngad. Aastane keskmine kasv leitakse kui jagada pikkus l aastarõngaste arvuga selles lõigus. Tugevusklassid määratakse tabeli 3.4 põhjal. [11] [28]

Tabel 3.4 INSTA 142 tabel 1 standardist aastarõngaste mõju tugevusklassidele. [11]

Tugevusklass	T3 (C30)	T2 (C24)	T1(C18)	T0 (C13)
Lubatud keskmine aastane kasv	<4 mm	<6 mm	<8 mm	-



Joonis 3.3. Aastase kasvu mõõtmistehnika [11]

3.3.3 Puidu kaldkiulisus

UNI 11119 ja INSTA 142 standardis on hindamiskriteeriumid puidu kaldkiulisuse mõõtmiseks. Kaldkiulisuse mõõtmismetoodika on kirjeldatud standardis EVS-EN 1309-3, kuid antud lõputöö raames otsustati kaldkiulisust mitte kontrollida, sest visuaalselt katsekehasid vaadates ei hakanud silma ülemäära suuri defekte, mis mõjutaks katsekeha tugevust. [28]

3.4 Katsekehade füüsikaliste omaduste määramine

3.4.1 Niiskussisalduse määramine

Niiskussisaldust määrati kokku pooltel katsekehadel (28 proovitükki 56-st) pärast paindekatsete läbiviimist. Kuna materjal saabus Tallinna Tehnikaülikooli Ehituse Mäemaja laborisse Norrast ning katsetega tuli alustada koheselt, ei olnud võimalik katsekehasid konditsioneerida EVS-EN 408:2010+A1:2012 standardi kohaselt. [24] Katsete läbiviimise ajal oli laboris keskmine suhteline õhuniiskus $(25 \pm 5)\%$ ja temperatuur $(22 \pm 2)^\circ\text{C}$.

Standardi EVS-EN 408:2010+A1:2012 kohaselt peab ehituspuit olema täisristlõike suurune, oksteta ja vaigupesadeta. Purunemiskatsete puhul peab proovitüki lõikama purunemiskohale võimalikult lähedalt. [24] Niiskussisalduse proovitüki lõikamisel tuli lähtuda standardi EVS-EN 13183-1:2002 nõudest, st proovitüki suurus pidi olema vähemalt 2 cm paksune ning lõigatud tükk otsast vähemalt 300 mm kaugusel. [29] Viimast nõuet ei olnud võimalik kõikide katsekehadega täita, sest antud materjali on vaja tulevikus kasutada demokuuri või analoogse objekti ehitamiseks *Drastic* projekti raames ning seetõttu tuli säästa materjali pikkusest nii palju kui võimalik. Antud katsetuste puhul lõigati ainult kuivanud ots maha ning samuti välditi oksa- ja vaigukohti. Purustatavate katsete korral (15 tk 28-st) sai niiskussisalduse proovikeha võtta purunemiskoha lähedalt nagu nõutud.

Proovikehade massi leidmiseks kasutatud elektroonilise kaalu täpsuseks on 0,01 g tulenevalt standardi EVS-EN 13183-1:2002 nõudest: katsekeha, mille kaal on pärast kuivatamist alla 100 g, tuleb mõõta eelnimetatud täpsusega. Seejärel asetati katsekehad kuivatusahju temperatuuri $(102 \pm 3)^\circ\text{C}$ juurde kuivenema, kuni katsekehade mass ei muutunud rohkem kui 0,1% kahe mõõtmise järel 2-tunnise intervalli jooksul.

Puidu absoluutne niiskussisaldus ω arvutati järgneva valemiga kasutades standardit EVS-EN 13183-1:2002 [29]:

$$\omega = \frac{m_1 - m_0}{m_0} * 100\% \quad (3.2)$$

kus	ω	on absoluutne niiskussisaldus, protsentides;
	m_1	on proovitüki mass enne kuivatamist, grammides;
	m_0	on proovitüki mass peale kuivatamist, grammides.

3.4.2 Tiheduse määramine

Antud lõputöös leiti uuritavale materjalile kaks tihedust. Esimese variandina määrati kõikidele katsekehadele tihedus, kus mõõdeti nende kogupikkus, laius ja kõrgus ning seejärel kaaluti. Teisel juhul määrati tihedus neile katsekehadele, mida kasutati ka niiskussisalduse leidmiseks. Proovitüki mõõdud ja kaal on võetud enne kuivatusahju panemist.

Proovikehade tiheduse ρ_w leidmiseks on kasutatud järgnevat valemit:

$$\rho_w = \frac{m}{V} \quad (3.3)$$

kus ρ_w on tihedus, kg/m³;
 m on katsekeha mass enne kuivatamist, kg;
 V on katsekeha või proovitüki ruumala enne kuivatamist, m³.

Proovikehade niiskuse järgi korrigeeritud tiheduse ρ leidmiseks on kasutatud standardi EVS-EN 384:2016+A2:2022 kohaselt järgnevat valemit: [30]

$$\rho = \rho_w (1 - 0,005(\omega - \omega_{ref})) \quad (3.4)$$

kus ρ on korrigeeritud tihedus, kg/m³;
 ω on katsetulemustest saadud niiskussisaldus ($8\% \leq \omega \leq 18\%$);
 ω_{ref} on puidu niiskussisalduse referentsväärtus, üldjuhul 12%.

Enamike puidust proovikehade, mida on hoitud õigetes konditsioneerimistingimustes 20°C ja 65% relatiivse õhuniiskuse juures, niiskussisaldus on 12%. [30]

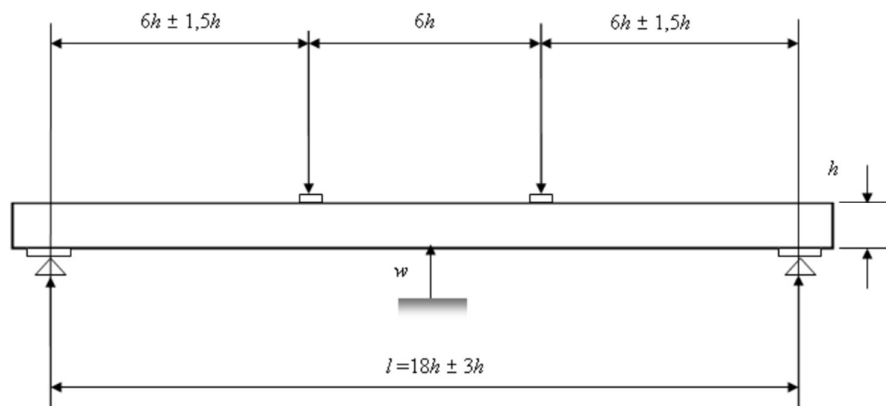
Katsekehad, mille tihedus on leitud täismõõtmete järgi on vastavalt standardi EVS-EN 384 soovitusel jagatud 1,05, et väärtused sarnaneksid väikse defektivaba proovitükiga. [30]

3.5 Globaalse paindeelastusmooduli määramine

Globaalse paindeelastusmooduli määramine toimus EVS-EN 408:2010+A1:2012 standardi järgi, mille kohaselt peab katsekeha minimaalne pikkus olema (19 ± 3) ristlõike kõrgust ning sildeavaks peab jääma (18 ± 3) ristlõike kõrgust. [24] Sildeava oli 810 mm ning kõik katsed kolmest eri lõigust viidi läbi ainult katsekehade lapikul küljel. Katseskeemi kirjeldab joonis 3.4. Lisaks on koormuspeade all kasutatud 50 mm laiuseid terasplaate, et vähendada kohalikke muljumisi.

Maksimaalne koormus, mida tohib katsekäigus rakendada, on $0,4 F_{\max, \text{est}}$. Koormamiskiirus peab olema $0,003h$ (mm/s), kus h tähistab ristlõike kõrgust. [24] 30 katsekeha on tehtud arvestusega, et $0,4F_{\max, \text{est}} = 3$ kN ning ülejäänute (26 tk) puhul on 40% piiriks võetud 5 kN. Koormuse suurendamine toimus peale purustavaid katseid, kus keskmine purustav jõud oli ligilähedale 14 kN, sh üks katsekeha, mis purunes 5,2 kN juures. Sellest tulenevalt oli otsus jätkata 5 kN-ga, et vältida ebavajalikke purunemisi mittepurustavate katsete korral.

Läbipainde w määramiseks piisab siirde mõõtmisest tala keskosas. Vastavalt standardile EVS-EN 408:2010+A1:2012 on siirde mõõtmiseks kasutatud neutraaltelge, mille korral peab mõõtma läbipainet mõlemal küljel ning kasutama nende keskmist tulemust. [24]



Joonis 3.4 Katseskeem globaalse paindeelastusmooduli määramisel [24]

Paindekatsed viidi läbi universaalse paralleellhaaratsitega elektromehaanilise katseseadmega LFM-600 kN, mis oli ühenduses arvutitarkvaraga *Dion 7 (walter+bai ag)*. Selle tarkvara abil seadistati kõik vajalikud katsetingimused: maksimaalse peale laaditava koormuse, koormamiskiiruse ning materjali pingelanguse korral (näiteks 10%) kohese katse lõpu. Antud programmi eesmärk oli juhtida koormamist. Tarkvaraga

Catmaneasy koguti katse vältel siirde ja koormamise andmeid. Seega lõpptulemuse, milleks oli koormus (kN) ja sellele vastav siire (mm) kindlal ajahetkel (s), andis *Catmaneasy*. Siirdeid mõõdeti LVDT sensoritega, mis võimaldasid maksimaalselt 50 mm siirdeid mõõta. Selleks et andmeid seadmetelt tarkvarasse edastada oli vaja need ühendada andmetöötlusseadmetega QuantumX MX840B või MX 1615B (HBM). Saadud andmed teisaldati tabelarvutusprogrammi *Microsoft Excel*.

Globaalse elastsusmooduli $E_{m,g}$ arvutamiseks standardi EVS-EN 408:2010+A1:2012 kohaselt peab graafiku piirkonda vahemikus $0,1 F_{max,est} - 0,4 F_{max,est}$ kasutama regressioonanalüüsiks. Selles vahemikus tuleb leida pikim lõik, mis annab korrelatsiooniteguri 0,99 või enam, et katseandmetega globaalset elastsusmoodulit $E_{m,g}$ arvutada. Minimaalseks tingimuseks on, et vähemalt piirkonnas $0,2 F_{max,est}$ kuni $0,3 F_{max,est}$ peab korrelatsioonitegur olema suurem kui 0,99, vastasel juhul ei ole katse edukas ning proov tuleb kõrvaldada. Globaalse elastsusmooduli arvutusvalem on järgmine [24]:

$$E_{m,g} = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gb^2h} \right)} \quad (3.5)$$

kus

$F_2 - F_1$ on koormuse juurdekasv njuutonites regressioonjoonel korrelatsiooniteguriga 0,99 või enam;

$w_2 - w_1$ on $(F_2 - F_1)$ -le vastav läbipainde juurdekasv millimeetrites (vt joonist 3.5);

G on nihkemoodul, mille võib okaspuude korral võtta 650 N/mm².

Korrigeeritud globaalne elastsusmoodul $E_{m,g(uref)}$ leitakse EVS-EN 13183-1:2002 standardi abil järgneva valemiga [30]:

$$E_{m,g(uref)} = E_{m,g(u)} \left(1 + 0,01(u - u_{ref}) \right) \quad (3.6)$$

kus

$E_{m,g(uref)}$ on globaalne elastsusmoodul referents niiskussisalduse juures, tavaliselt 12%;

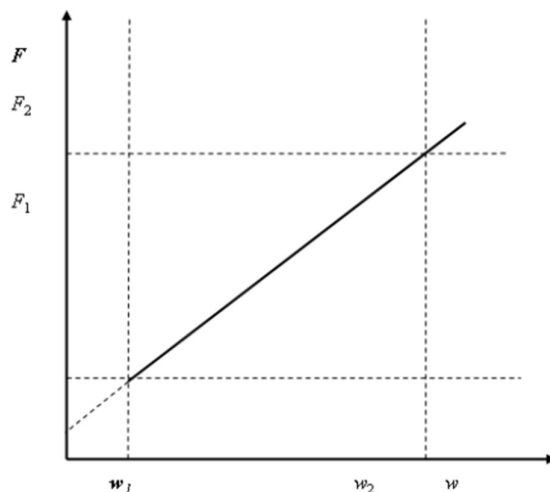
$E_{m,g(u)}$ on globaalne elastsusmoodul katsekeha niiskussisalduse juures;

u on katsetulemustest saadud niiskussisaldus ($8\% \leq \omega \leq 18\%$);

u_{ref} on puidu niiskussisalduse referentsväärtus, tavaliselt 12%.

Pikikiududega paralleelse korrigeeritud elastsusmooduli E_0 arvutamiseks vajalik valem standardi EVS-EN 13183-1:2002 järgi on [30]:

$$E_0 = E_{m,g(uref)} * 1,3 * -2690 \quad (3.7)$$



Joonis 3.5 Koormuse-läbipainde graafik elastse deformatsiooni piires. [24]

3.6 Lokaalse paindeelastsusmooduli määramine

Lokaalse paindeelastsusmooduli määramine toimus EVS-EN 408:2010+A1:2012 standardi järgi, mille kohaselt peab katsekeha minimaalne pikkus olema (19 ± 3) ristlõike kõrgust ning sildeavaks peab jääma (18 ± 3) ristlõike kõrgust. Sildeavad olid vastavalt 810 mm (lapiku külje jaoks) ja 1400 mm. Katsekeha toestatakse lihttalana ja koormus talale asetatakse kahest punktist, mille omavaheline kaugus on 6 ristlõike kõrgust ning mis peavad jääma silde keskelt võrdselt samale kaugusele nagu on kirjeldatud joonisel 3.7. [24] Lisaks on koormuspeade all kasutatud 50 mm laiuseid terasplaate, et vähendada kohalikke muljumisi.

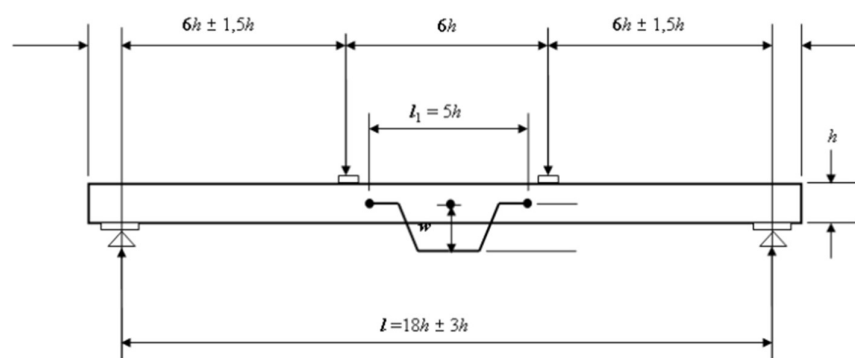
Maksimaalne koormus, mida tohib katsekäigus rakendada, on $0,4 F_{max,est}$. $F_{max,est}$ tähistab hinnangulist maksimaalset koormust, mis saadakse vastava puiduliigi, selle mõõtmete ja sordi vähemalt kümne proovikeha katsetest või katseandmetest. Lokaalse paindeelastsusmooduli määramise katsed olid uuritava materjaliga seoses kõige viimased katsed. Selleks hetkeks sai kasutada 15 purustatud katsekeha andmeid keskmise maksimaalse koormuse kasutamiseks, et leida 40% hinnangulisest koormusest. Katsekehad koormati 5 kN (lapiku küljega) ja 6 kN (serva küljega)

koormusega. Kokku on tehtud 3 katsekehaga 6 katset – 3 paindekatset serval ja 3 lapikul küljel. Koormamiskiiruseks oli määratud $0,003h$ (mm/s), kus h tähistab ristlõike kõrgust. [24]

Läbipainde määramiseks mõõdeti siirdeid kolmes kohas – silde keskel ja keskosast 2,5 ristlõike kõrguse kaugusel mõlemal pool, vahemik kokku on 5 ristlõike kõrguse pikkust. (skeem kirjeldatud joonisel 3.7). [24] Võrreldes katseskeemiga on erinevus selles, et mõõtekellade punktid olid katsekeha all, keskel. Siirdekellad ühendati proovikehaga kruvi ja magneti abil (vt jooniselt 3.6).



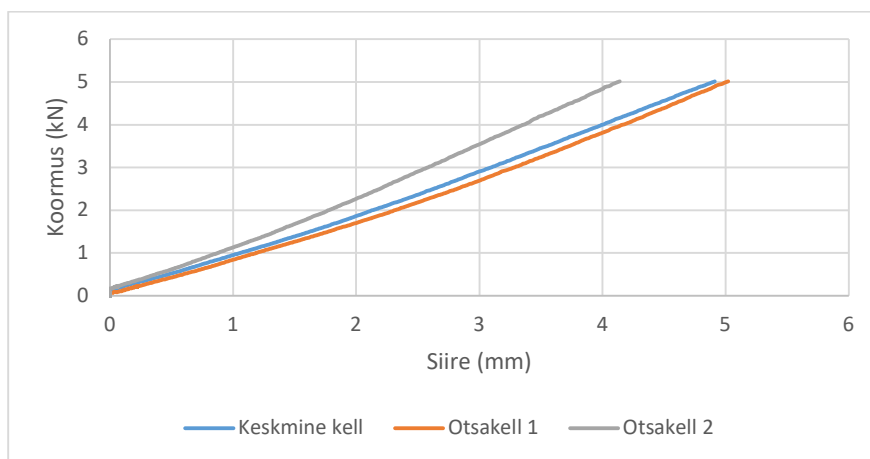
Joonis 3.6 Siirdekellade kinnitused ja paiknemise asukohad



Joonis 3.7 Katseskeem lokaalse paindeelastsusmooduli määramiseks [24]

Paindekatsed viidi läbi universaalse parallellhaaratsitega elektromehaanilise katseseadmega LFM-600 kN, mis oli ühenduses arvutitarkvaradega *Dion 7* (survejõu andmiseks) ja *Catmaneasy* (andmete kogumiseks). Kogutud andmete väljavõte teisaldati tabelarvutusprogrammi *Microsoft Excel*.

Katsetulemuste töötlemisel selgus, et tehtud katsetused ebaõnnestusid – siirete erinevus oli minimaalne või otsakella siire isegi suurem (joonis 3.8) ja see andis lõpptulemuseks ebatõenäolised elastsusmooduli väärtused. Sellest tulenevalt antud meetodiga tulemusi pole esitatud.

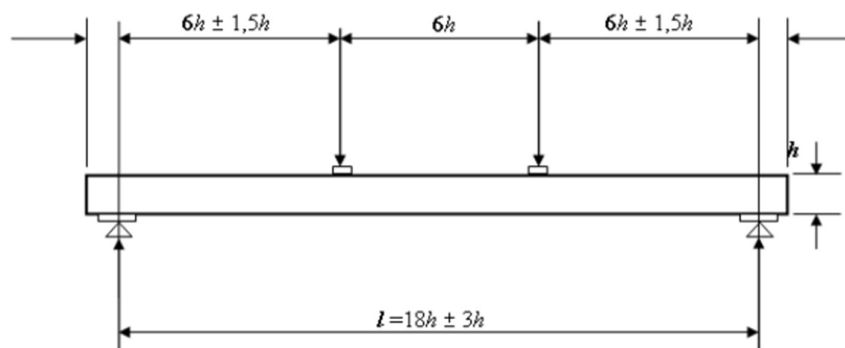


Joonis 3.8 Otsakella siire suurem kui silde keskel oleva mõõtekella siire

3.7 Paindetugevus pikikiudu

Puidu paindetugevuse leidmine pikikiudu toimus standardi EVS-EN 408:2010+A1:2012 kohaselt, kus katsekehade pikkus peab olema minimaalselt (19 ± 3) ristlõike kõrgust ning sildeava pikkus (18 ± 3) ristlõike kõrgust. Kõik katsekehad koormati lapiti ning sildeava pikkuseks võeti 810 mm. Koormuspunktide all on kasutatud terasplaate vältimaks kohalikke mujumisi. Katsekehadele rakendatud koormus peab olema ühtlane ning rahuldama tingimust, et maksimaalkoormus saavutatakse (300 ± 120) sekundiga [24]. Kõikide katsete puhul jäi koormamise kiirus 0,003h (m/s) tingimuse piiresse. Katseskeem on kirjeldatud joonisel 3.9.

Purustavad katsed on läbiviidud universaalse parallellhaaratsitega elektromehaanilise katseseadmega LFM-600 kN. Maksimaalsed purustavad jõud on saadud elektrooniliselt arvutitarkvaraga *Dion 7*, mis mõõdab automaatselt käimasoleva katse koormusi (andmeedastus masinast tarkvarasse toimus QuantumX MX840B või MX 1615B (HBM) andmetöötlusseadme abil).



Joonis 3.9 Paindetugevuse mõõtmise katsekorraldus [24]

Paindetugevus f_m on avaldatav järgneva vörrandiga [24]:

$$f_m = \frac{3Fa}{bh^2} \quad (3.8)$$

Kus

- F on koormus njuutonites [N];
- A on kaugus koormuse rakenduspunkti ja lähima toe vahel paindekatsel [mm];
- b on ristlõike laius paindekatsel või ristlõike vähim mõõde [mm];
- h on ristlõike kõrgus paindekatsel või ristlõike suurim mõõde [mm].

Korrigeeritud paindetugevus tuleb leida juhul kui:

- 1) katsekeha kõrgus ei ole vähemalt 150 mm ja tihedus jääb alla 700 kg/m³. Selleks tuleb leida tegur k_h , mis tuleb jagada läbi katsega saadud paindetugevusega. k_h arvutatakse valemiga: [30]

$$k_h = \min \left\{ \left(\frac{150}{h} \right)^{0,2}, 1,3 \right\} \quad (3.9)$$

kus h on katsekeha kõrgus millimeetrites.

- 2) Paindekatsel on sooritatud standardi EVS-EN 408 lubatud piirides, aga tuge omavaheline kaugus ei ole täpselt 18 ristlõike kõrgust või koormuste mõjumine üksteisest 6 ristlõike kõrguse kaugusel. Sellisel juhul tuleb tulemus jagada läbi teguriga k_l , mis leitakse järgneva valemiga: [30]

$$k_l = \left(\frac{48h}{l_{et}} \right)^{0.2} \quad (3.10)$$

$$l_{et} = l + 5a_f \quad (3.11)$$

kus l_{et} on efektiivne katse pikkus millimeetrites;

l katsekeha ava (sille) testimisel, millimeetrites;

a_f kahe koormuspunkti omavaheline kaugus, millimeetrites.

Antud katsekehadega tuli mõlemat korrigeerimistegurit kasutama, sest testitava suuna ristlõike kõrgus oli 45-48 mm ning sildeava määrati 45 mm ristlõike kõrguse põhjal.

3.8 Dünaamilise elastsusmooduli mõõtmine ultraheli lainete abil

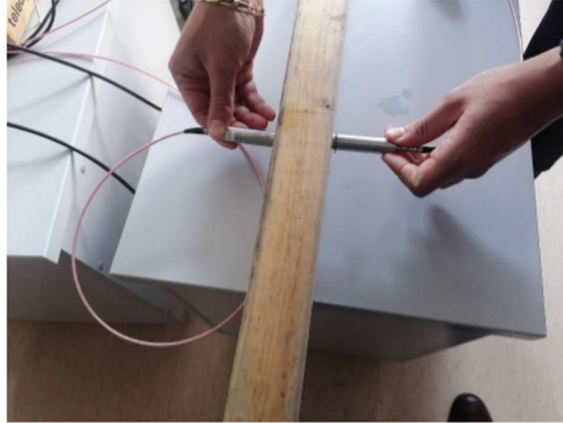
Ultraheli lainemõõtmised on teostatud standardi EVS-EN 12504-4:2021 katseskeemide alusel nagu on näidatud joonisel 3.10 ja 3.11. [31] Tulemused on mõõdetud ristikiudu ja katsed on sooritatud sama süsteemi järgi nagu paindekatsed ehk siis ühe katsekeha puhul kolmes lõikes (sildeava keskel), välja arvatud üksikud erandid, mis olid juba liiga lühikesed või katkised, et kolmest asukohast mõõta.

Katsekäigus on kasutatud kahte andurit, millest üks on saatev ja teine vastuvõttev andur. Saatva anduriga genereeritakse vibratsiooni impulss, mis peale katsekeha paksuse läbimist muudetakse teise ultrahelianduri abil elektriliseks signaaliks. Impulsi läbimiseks kulunud aega katsekehas mõõdeti otsilloskoobiga. Andurite võnkesagedused peavad jääma üldiselt vahemikku 20-150 kHz, antud katsete juures oli võnkesageduseks 50 kHz. Andurid asetati vastu katsekeha täisnurga all, üksteisega kohakuti nagu joonistel 3.10 ja 3.11, sellist ülekande viisi nimetatakse otseülekandeks. Täpsemad kaugused on kirjeldatud joonisel 3.1

Katsete sooritamiseks on kasutatud järgnevaid seadmeid:

- Otsilloskoop helilainete mõõtmiseks: *Keysight DSOS204A, Digital Storage Oscilloscope, 2GHz, 20GSa/s, 10-bit ADC*
- Lainesignaali generaator: *Tektronix AFG3252 Dual Channel Arbitrary Function Generator, 2 GSa/s, 240MHz*
- Pikilaine andurid: *Olympus Panametrics M1036 2.25MHz/0.5"*

- Nihkelaine andurid: *Olympus Panametrics V151 0.5MHz/1.0" Videoscan*



Joonis 3.10 Laine kiiruste mõõtmine läbi katsekeha õhema paksuse



Joonis 3.11 Näide katsekeha 29 põhjal, mõõtepunktid on paigutatud otseülekanne skeemi järgi,

Dünaamilised elastsusmoodulid on arvutatud standardi EVS-EN 843-2:2007 järgi:
[32]

$$E_{dyn} = \rho \left(\frac{3V_l^2 V_t^2 - 4V_t^4}{V_l^2 - V_t^2} \right) \quad (3.12)$$

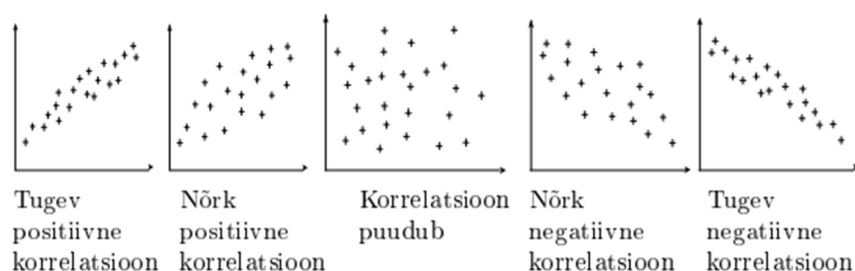
kus E_{dyn} on dünaamiline elastsusmoodul, väljendatuna paskalites (Pa);
 ρ on katsekeha tihedus, kg/m³;
 V_l on piki helilaine kiirus, väljendatuna m/s;
 V_t on nihkelaine kiirus, väljendatuna m/s.

3.9 Katseandmete statistiline analüüs

Katsetega kogutud andmed sisestati tabelarvutusprogrammi MS Excel, mida kasutati katseandmete töötlemiseks ja statistiliseks analüüsiks. Võrdlusesse on võetud visuaalse hindamise, purustava ja mitte purustava katsete tulemused ning ultrahelilainega mõõdetud tulemused.

Tulemusi ja omavahelisi seoseid ilmestavad järgnevad diagrammid ja statistilised näitajad: [33]

- jaotushistogramm - iseloomustab vaadeldava tunnuse jaotumist ette antud vahemike järgi;
- hajumisdiagramm – kahe tunnuse väärtuste ehk väärtuste paaride korrelatsiooni tugevuse visuaalseks hindamiseks mõeldud diagramm. Korrelatsioon on kahe juhusliku suuruse vahel esinev seos. Joonisel 3.12 on kirjeldatud kahe tunnuse omavahelisi seoseid;



Joonis 3.12 Korrelatsiooni suunda ja tugevust hindavad hajumisdiagrammid. [33]

- lineaarne ehk Pearsoni korrelatsioonikordaja r - kasutatakse seose tugevuse iseloomustamiseks, väärtuse ees olev märk näitab seose suunda. Korrelatsioonikordaja väärtus on vahemikus $-1 \leq r \leq 1$;
- determinatsioonikordaja R^2 - kirjeldab, millise osa moodustab regressioonhajuvus koguhajuvusest. Mudeli head kirjeldusvõimet näitab see kui regressioonhajuvus võrreldes koguhajuvusega on võimalikult suur.

Seoste tugevuse hindamiseks kasutatakse sageli järgmisi piire: [33]

- $r = 0$ – korrelatsioon puudub;
- $|r| \leq 0,3$ – nõrk seos
- $0,3 < |r| < 0,7$ – keskmise tugevusega seos
- $|r| \geq 0,7$ – tugev seos

Siiski tuleb täheldada, et seose tugevust ei näita ainult korrelatsioonikordaja suurus vaid palju sõltub ka sellest, milline on valimi maht. Ühel juhul võib korrelatsioonikordajaga 0,6 olla keskmise tugevuse seos, kui valimi maht on 100. Teisel juhul kui valimi maht on 10, ei pruugi see tõestada sama tugevat seost. [33]

4 TULEMUSED JA JÄRELDUSED

4.1 Visuaalse hindamise tulemused

Puidu visuaalseks hindamiseks kasutati Itaalia UNI 11119 standardit, Põhja-Euroopas kasutusel olevat INSTA 142 (Skandinaavia) standardit ja Norra valmivat standardit prNS-3691-3. Viimane on olemuselt Skandinaavia standardi eeskujul loodud kuid mõningate lisa hindamiskriteeriumitega. Tulemused on jaotatud kaheks: täispikkuses katsekeha hinnangud ja purustavas tsoonis leitud tulemused. Iga katsekeha täpsed tulemused on esitatud Lisas 1.

4.1.1 UNI 11119 standard

Visuaalsel hindamisel keskenduti peamiselt oksakohtadele. UNI 11119 standardi puhul hinnatakse lisaks oksakohtadele ka puidu poomkante, kaldkiulisust, erinevaid vigastusi ja pragusid. [26] Kuna katsekehad olid heas seisukorras (joonisel 4.1 katsekehad 32-36), siis need tunnused olid marginaalse väärtusega ning tugevussorteerimisel tulemusi ei mõjutanud.



Joonis 4.1 Katsekehade üldine seisukord (katsekehad 32-36)

Tabel 4.1 Terve katsekeha hinnangu tulemused UNI 11119 standardi järgi

UNI11119				
Puuliik	Katsekehade arv	Kategooria	Maksimaalne lubatud ping (N/mm ²)	
			Staatiline paine	Paindeelastsusmoodul
Norra kuusk (Picea abies)	5	I	11	12500
	15	II	9	11500
	26	III	7	10500
	10	Praak	-	-

Tabel 4.1 kirjeldab visuaalselt tugevussorteeritud katsekehade jagunemist kategooriatesse. Kokku hinnati 56 katsekeha, millest 10 (18% katsekehadest) sorteeriti praagiks. 5 katsekeha (9%) hinnati I, 16 katsekeha II (27%) ja 26 katsekeha III kategooriasse (46%). UNI 11119 standardi tulemused on antud küll maksimaalsete lubatud pingete kujul, kuid valemiga 3.1 saab avaldada tulemused vastavalt standardi EVS EN-338 ette antud tugevusklassidele [9]. I kategooria normatiivne paindetugevus on valemi 3.1 abil arvutatuna $f_{m,k} = 26,8 \text{ N/mm}^2$ (C24 tugevusklass), II kategooria puhul on väärtuseks $21,9 \text{ N/mm}^2$ (üle C18) ja III kategooria paindetugevus on $17,1 \text{ N/mm}^2$ (C16).

Tabel 4.2 Purustavas tsoonis hinnatud katsekehade tulemused UNI 11119 standardi järgi

UNI11119				
Puuliik	Katsekehade arv	Kategooria	Maksimaalne lubatud ping (N/mm ²)	
			Staatiline paine	Paindeelastsusmoodul
Harilik kuusk (Picea abies)	9	I	11	12 500
	7	II	9	11 500
	1	III	7	10 500

Tabel 4.2 kirjeldab purustavas tsoonis (ca 80-90 cm pikkusel lõigul) hinnatud tulemusi. Erinevusena kogu katsekehade tulemustega on näha, et ühtegi katsekeha ei loetud praagiks ning kõige rohkem oli I kategooria hinnanguid. Üle C24 tugevusklassi tulemused moodustasid 53% kogu hulgast ning 94% tulemustest olid paremad kui tugevusklass C18, samal ajal tervete katsekehade puhul oli selleks suuruseks 36%. See näitab, et katsekeha visuaalsel hindamisel lokaalselt ja globaalselt võib esineda suuri erinevusi.

4.1.2 INSTA 142 standard

INSTA 142 standardi tugevussorteerimise hindamiskriteeriumeid on UNI 11119-ga võrreldes palju rohkem, kuid ühe tähtsama kriteeriumi – oksakohtade hindamine on seejuures leebem. Lisaks oksakohtadele mõjutab aastane juurdekasv (aastaringid) ühel juhul 28-st katsekehast tugevusklassi. Ülejäänud tunnuste kontrollimise mõju arvestati vähetõenäoliseks.

Tabel 4.3 Täispikkuses katsekeha hinnangu tulemused INSTA 142 standardi järgi

INSTA 142		
Kategooria	Tugevusklass	Katsekehade arv
T3	C30	14
T2	C24	27
T1	C18	15
T0	C14	0

Tabel 4.4 Purustavas tsoonis hinnatud katsekehade tulemused INSTA 142 standardi järgi

INSTA 142		
Kategooria	Tugevusklass	Katsekehade arv
T3	C30	6
T2	C24	10
T1	C18	1
T0	C14	0

Tabelis 4.3 kirjeldatud tulemustes saavutasid kõik katsekehad vähemalt C18 tugevusklassi tulemuse, UNI 11119 järgi on see osakaal ainult 36%. Peaaegu pooltele (48%) katsekehadele määrati C24 tugevusklass standardi EVS-EN 338 kohaselt ning C18 ja C30 klassi jagunemine oli ka üsna võrdne (vastavalt 27% ja 25%). [9]

Tabeli 4.4 andmed iseloomustavad purustamistsoonis saadud tugevussorteerimise tulemusi INSTA 142 standardi järgi. Võrdluses UNI 11119 tabeli 4.2 andmetega on tulemused sarnased kuid kui võrrelda purustamistsooni tulemusi täispikkuses katsekehadega on INSTA 142 (tabelid 4.3 ja 4.4) tulemused ühtivamad kui UNI 11119 (tabelid 4.1 ja 4.2) standardi järgi. Näiteks üle C24 tugevusklassi tulemusi on tabeli 4.4 järgi 94% katsekehadest ja terve katsekeha hindamisel on see number 73%, kuid UNI 11119 standardis on see tulemus vastavalt 94% ja 36% (tugevusklass C18).

4.1.3 prNS 3691-3 standard

Norra standardi põhiline erinevus võrreldes Skandiaavia standardiga (INSTA 142) on C30 tugevusklassi puudumine, varasema dokumentatsiooni olemasolul sellega arvestamine, sisselõigete ja aukude hindamine ning ristlõike konstruktiivse tsooni määramine. [25] Uuritud materjali mõjutasid kõige rohkem oksakohad ning piirang maksimaalselt C24 klassi hindamisele, sest oksakohtade kontroll toimus INSTA 142 standardi nõuete järgi ning selle kohaselt vastasid kõik katsekehade kategooriad sarnaselt tabelitele 4.3 ja 4.4. T3 kategooriaga (C30 tugevusklass) tulemused liigitati O24 kategooria alla. Ülejäänud eelmainitud tegurid kategooriaid ei mõjutanud.

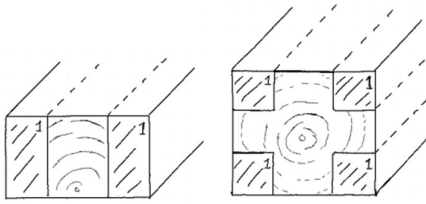
Tabel 4.5 Standardi prNS 3691-3 tugevussorteerimise tulemused terve katsekeha piires.

prNS-3691-3		
Kategooria	Tugevusklass	Katsekehade arv
O24	C24	41
O18	C18	15
O14	C14	0

Tabel 4.6 Standardi prNS 3691-3 tugevussorteerimise tulemused purustava tsooni piires.

prNS 3691-3		
Kategooria	Tugevusklass	Katsekehade arv
O24	C24	16
O18	C18	1
O14	C14	0

Tabelites 4.5 ja 4.6 on kirjeldatud tugevussorteerimise tulemused. Need sarnanevad peaaegu täielikult INSTA 142 tulemustega kui ühildada C30 tugevusklass C24-ga. Lõputöö autori hinnangul tuleneb sarnasus katsekehade iseloomust. Tegu on 48x98 mm prussidega, mida kasutati betoonitöödel raketisosana. Erinevused võrreldes Skandiaavia standardiga tekivad siis kui katsekehad oleksid rohkem konstruktsioonilise iseloomuga ja millel esineksid sisselõikeid (nt tapipesad), auke (naaglid, poldid) ja need asuksid ristlõike mõttes konstruktiivses tsoonis (joonis 4.2). Sellisel juhul hakkavad need hindamiskriteeriumid rohkem tugevussorteerimist mõjutama.



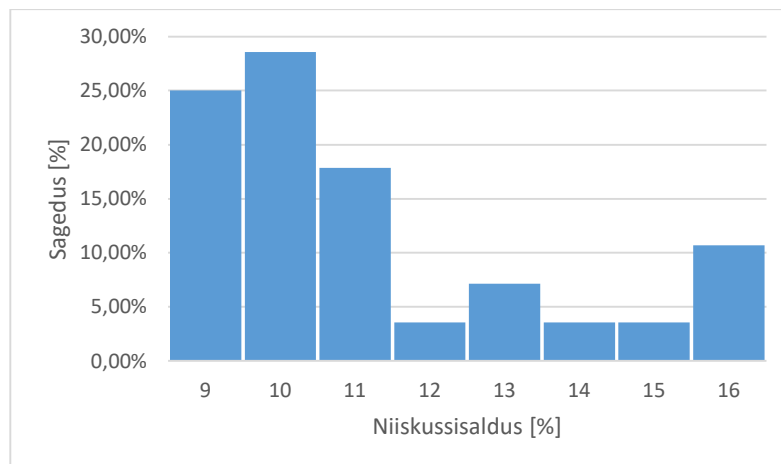
Joonis 4.2 Number 1 tähistab standardis prNS 3691-3 konstruktiivset ala (ääred). Suurim mõõdust 1/4b või 25 mm [25]

4.2 Purustavad ja mittepurustavad katsed

Katsekehade analüüsimiseks on esmalt antud ülevaade nende füüsikalise-mehaanilistest omadustest. Kõikide katsekehade puuliigiks on harilik kuusk (*Picea abies*, Norra kuusk). Tulemused on kirjeldatud sagedusgraafikutena tihedusest, niiskussisaldusest, staatilisest elastsusmoodulist ja purustaval katsel saadud paindetugevusest. Katsekehade andmed, millest on graafikud koostatud leiab lisa 3 tabelitest.

4.2.1 Katsekehade niiskussisaldus

Absoluutset niiskussisaldust mõõdeti 28 katsekehal ehk pooltel katsekehadel. Niiskussisalduse määramise vajadus seisneb katsetatud puidu omaduste väärtuste kohandamisel võrdsetele alustele (niiskussisaldusele 12%) nagu näiteks tihedus ja elastsusmoodul. [9] Jooniselt 4.3 on näha, et mõõdetud tulemused varieeruvad 9-16% vahel. Üle 70% katsekehade niiskussisaldus oli alla 12%, ainult üks proovikeha vastas standardniiskussisaldusele ja 25% olid suurema niiskussisaldusega. Tulemuste suur varieeruvus on osaliselt tingitud sellest, et katsekehasid ei saadud konditsioneerida vaid tuli kohe alustada katsetega kui need Eestisse jõudsid.



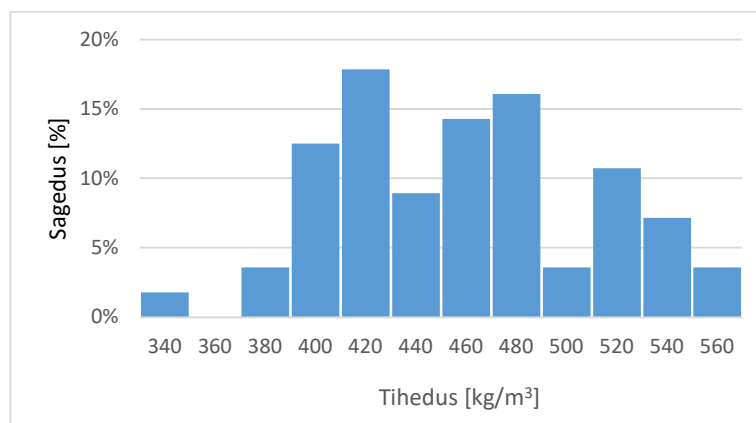
Joonis 4.3 Proovitükkidelt mõõdetud niiskussisaldused

4.2.2 Katsekehade tihedus

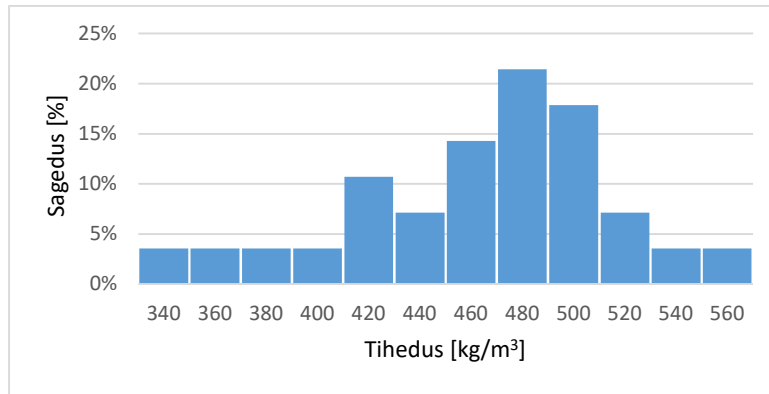
Katsekehade tihedusi on määratud kahel erineval viisil – kõikidele katsekehadele leiti tihedus kogu pikkuse ja kaalu järgi (joonis 4.4). Teisel juhul on tihedust määratud niiskussisalduse proovikehadele enne kuivatamist (joonis 4.5). Mõõtmised on tehtud kolmest eri lõigust ning leitud sellest aritmeetiline keskmine.

Joonisel 4.4 näidatud tulemused on saadud tervetest katsekehadeist, sealjuures on neid jagatud väärtusega 1,05, mis tuleneb standardi EVS 384:2016 nõudest kui tiheduse määramised on tehtud enne kui täispikk proovikeha on katsetamise käigus katki tehtud. [30] Võrreldes joonisega 4.5, kus on lõigatud uuritavast materjalist proovitükid, on tervete katsekehade tiheduse normaaljaotuse kõrver kehvem kui lõigatud tükide omal. Mõlemal juhul on tiheduste varieerumine suur: vahemikus 340-560 kg/m³, kuid lõigatud proovitükide väärtused on rohkem konsentreeritumad ja jäävad suures osas vahemikku 460-500 kg/m³. Tervete katsekehade korrigeeritud keskmine tihedus on 449 kg/m³ ja väikeste tükide keskmine tihedus on 452 kg/m³ (erinevus on alla 1%). Kõige suurem tiheduste erinevus ühe ja sama katsekeha osas oli 5%.

Hariliku kuusepuidu keskmine tihedus jääb üldjuhul vahemikku 450-470 kg/m³ [4] ning 12% niiskussisalduse juures on tihedus 445 kg/m³. [3] Lõputöö raames uuritud materjali tihedused jäid enamjaolt samasse suurusjärku.



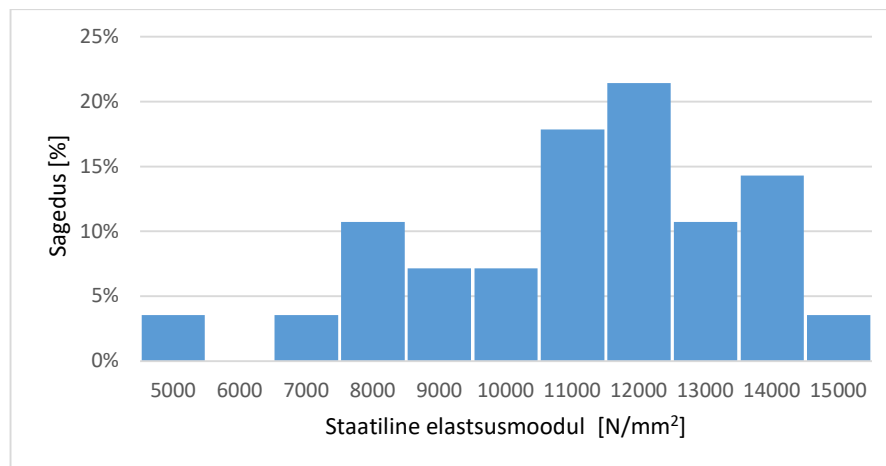
Joonis 4.4. Tervete katsekehade tihedused



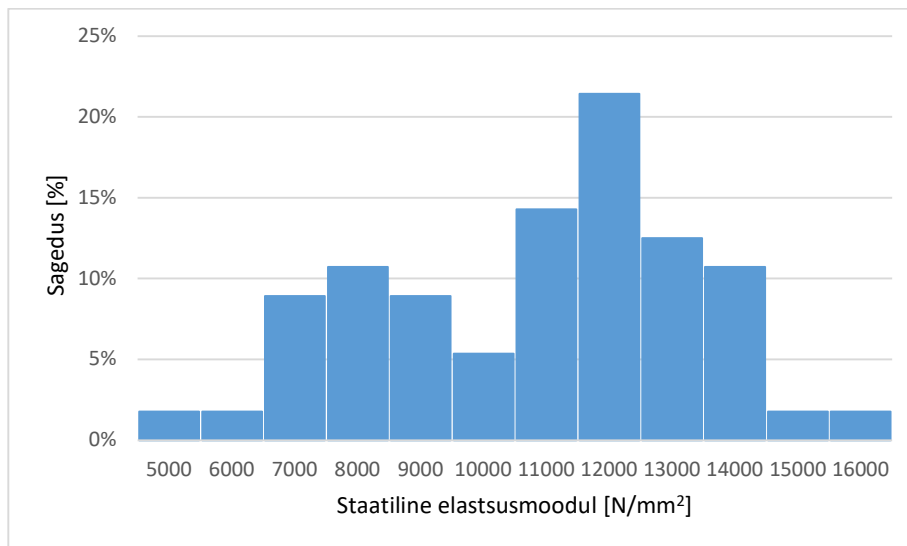
Joonis 4.5. Niiskussisalduse proovitükkidelt määratud tihedused

4.2.3 Staatiline elastsusmoodul

Staatilise elastsusmooduli leidmiseks tehti iga katsekeha kohta 3 mitte purustavat paindekatset, kõik ühel küljel, aga kolmes erinevas lõigus. Saadud tulemuste esimene pool (28 katsekeha, millel mõõdeti niiskussisaldus, joonis 4.6) on esitatud 12% niiskussisalduse juures ning korrigeeritud standardi EVS-EN 384 nõuetele vastavaks, eespool mainitud valemitega 3.6 ja 3.7. [30] Teisel joonisel (joonisel 4.7) on tulemused esitatud kujul, kus 28 katsekeha on korrigeeritud standardi EVS-EN 384 järgi ja ülejäänud katsekehade puhul on leitud niiskussisaldusega katsekehade keskmine protsentuaalne muutus (-1,62%) ning kohandatud neid vastavalt sellega (kokku 56 katsekeha). Sagedustabelites on esitatud katsekehade keskmised väärtused. Selline lähenemine muudab jaotusdiagrammi ebatäpsemaks (koondab väärtuseid ühele poole, väiksemaks), aga annab ülevaate üldisest keskmisest väärtusest.

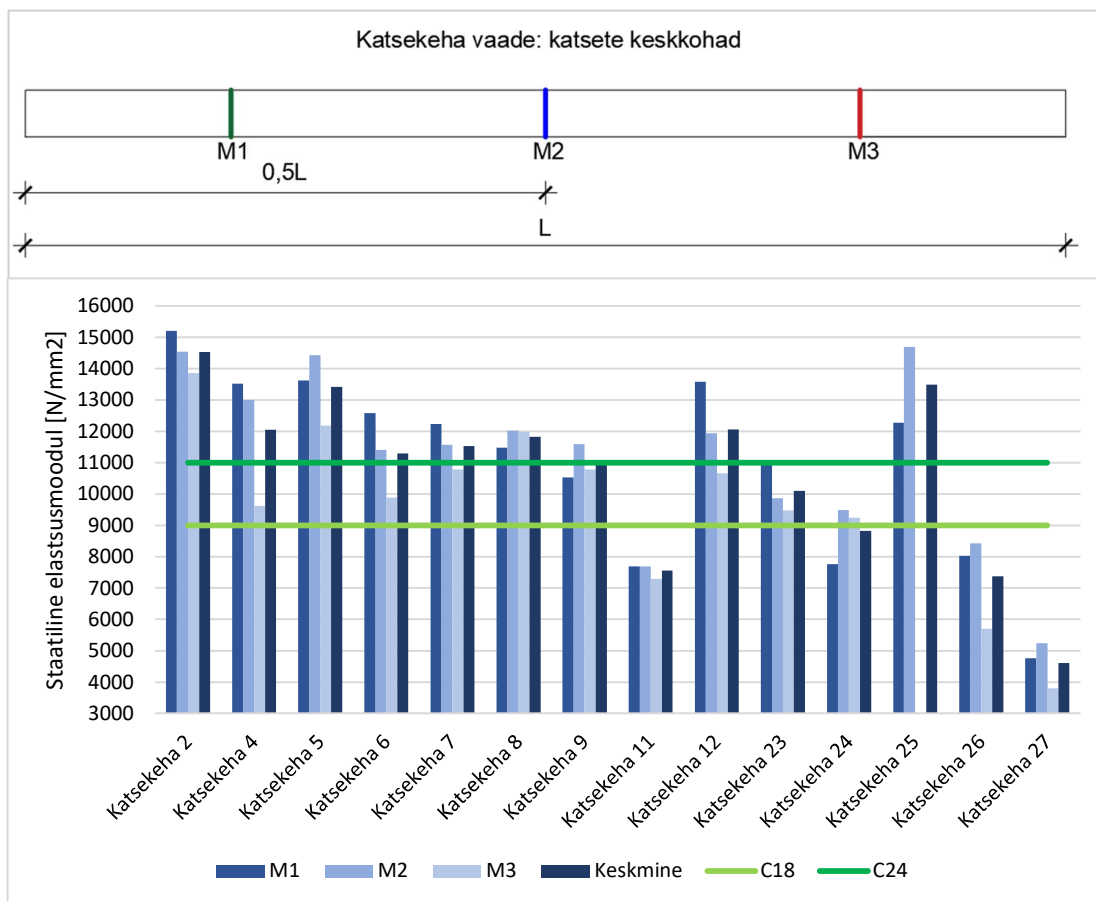


Joonis 4.6 Katsekehade staatiliste elastsusmoodulite sagedustabel, millel mõõdeti niiskussisaldust.

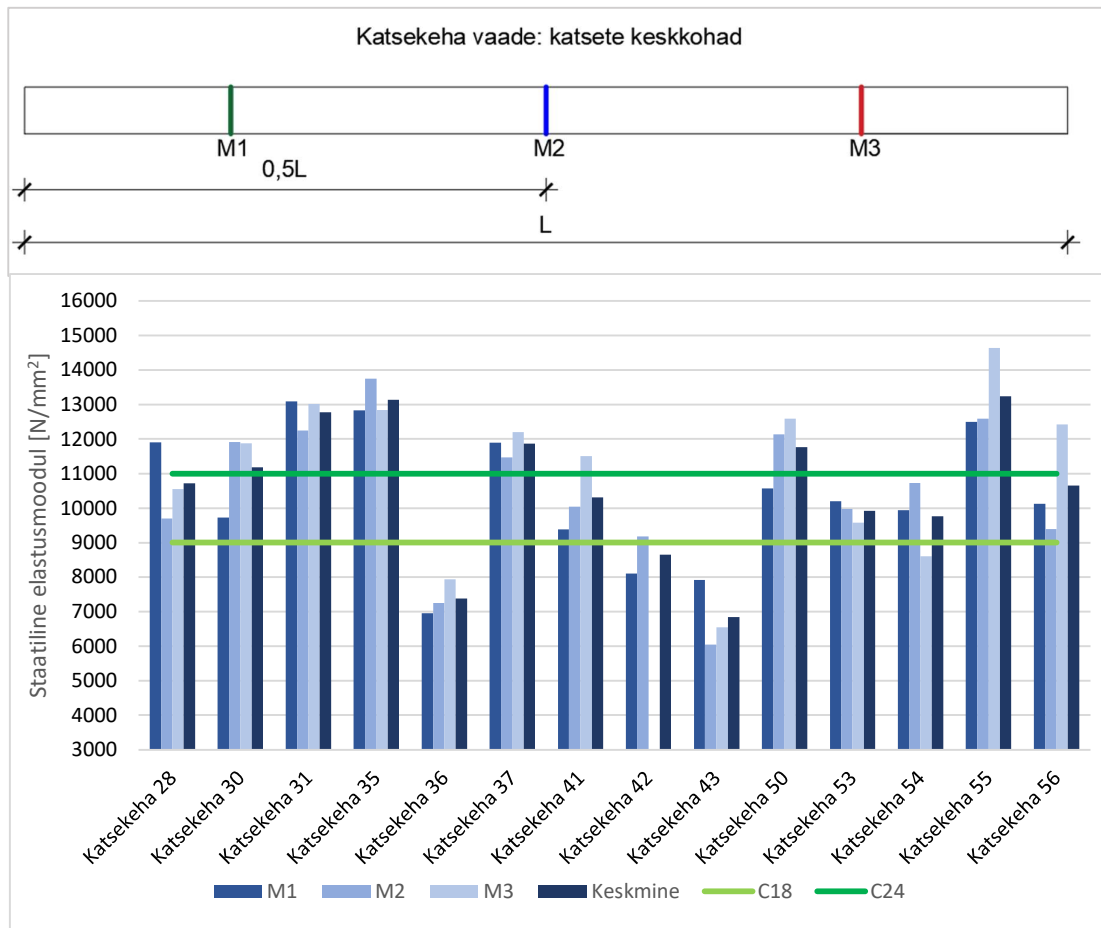


Joonis 4.7 Kõikide katsekehade staatilised elastsusmoodulid sagedustabelina

Graafikutelt on näha, et tulemuste varieeruvus on suur: vahemikus 5000-15000 N/mm² joonisel 4.6 ja 5000-16000 N/mm² joonisel 4.7. Kõige sagedamini esinevad väärtused jäävad vahemikku 10001-14000 N/mm² ja väärtused, mis on üle 10001 MPa moodustavad valimist 68% (joonisel 4.6) ning 62,5% (joonisel 4.7, need tulemused on tagavara kasuks). Kõikide katsekehade keskmine elastsusmoodul on (10314±2493) N/mm². Mediaanväärtuseks on 10980 N/mm² ning kui võrrelda väärtuste paiknemist keskväärtuse suhtes võib väita, et sagedusjaotus läheneb normaaljaotuse kõverale.



Joonis 4.8. Katsekehade (mõõdetud niiskussisaldus) kolmest lõigust mõõdetud elastusmoodulid, katsekeha vaade illustreerib mõõtepunktide asukohti (keskkohad)



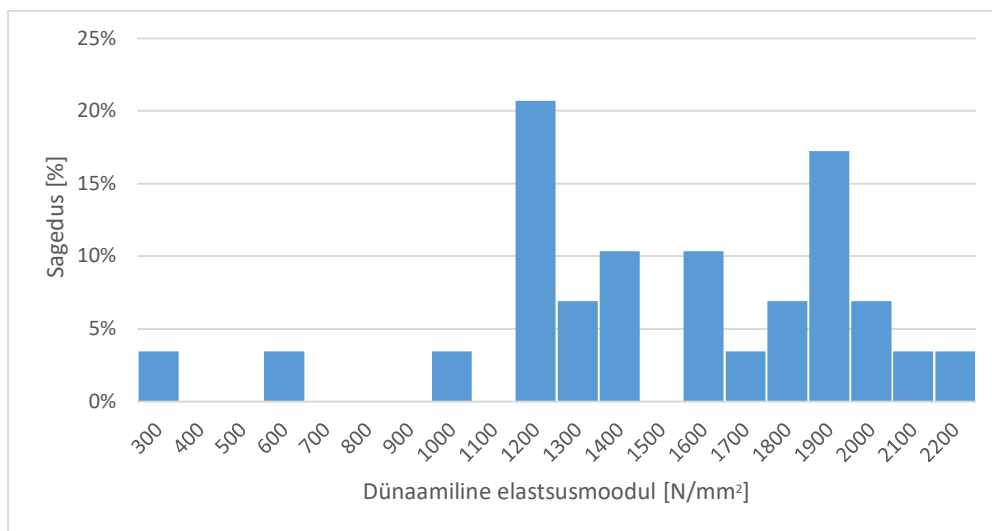
Joonis 4.9 Katsekehade (mõõdetud niiskussisaldus) kolmest lõigust mõõdetud elastsusmoodulid, katsekeha vaade illustreerib mõõtepunktide asukohti (keskkohad)

Joonistel 4.8 ja 4.9 on avaldatud mõõdetud niiskussisaldusega katsekehade staatilised elastsusmoodulid (arvutatud valemitega 3.6 ja 3.7). Kõige suurem tulemuste kõikumine ühe katsekeha piires on 3900 N/mm^2 . Keskmine varieeruvus ühe katsekeha piires on ligikaudu 1760 N/mm^2 (moodustab 16,5% 28 katsekeha keskmisest tulemusest). Selline tulemuste erinevus näitab, et materjali mõjutavad erinevad tegurid ning ühest lõigust on raske ennustada kogu materjali tugevusnäitajaid.

4.2.4 Dünaamiline elastsusmoodul

Joonisel 4.10 on kirjeldatud dünaamilised elastsusmoodulid ristikiudu, mis on leitud ultrahelilainete mõõtmisel põhineva meetodiga valemi 3.12 abil. Tulemused varieeruvad suures vahemikus: $260\text{--}2156 \text{ N/mm}^2$. 82,8% väärtustest jäid vahemikku $1101\text{--}2000$

N/mm². Katsekehade keskmiseks ristikiudu dünaamiliseks elastsusmooduliks on saadud 1462±454 N/mm². Ühe katsekeha piires on väärtuste kõikumus keskmiselt 347 N/mm² (23,7% keskmisest tulemusest), sealjuures kõige suurem erinevus on 891 N/mm² (77,4% väiksem suurimast tulemusest) ja minimaalsem 49 N/mm² (4% väiksem suurimast tulemusest). Tehtud mõõtmised on lokaalsed ning ristkiudu, mis tähendab, et tulemusi mõjutab palju puidu seisukord mõõtekohas (defektid, kahjustused jms), seetõttu võivad esineda ka suured erinevused ühe katsekeha puhul.



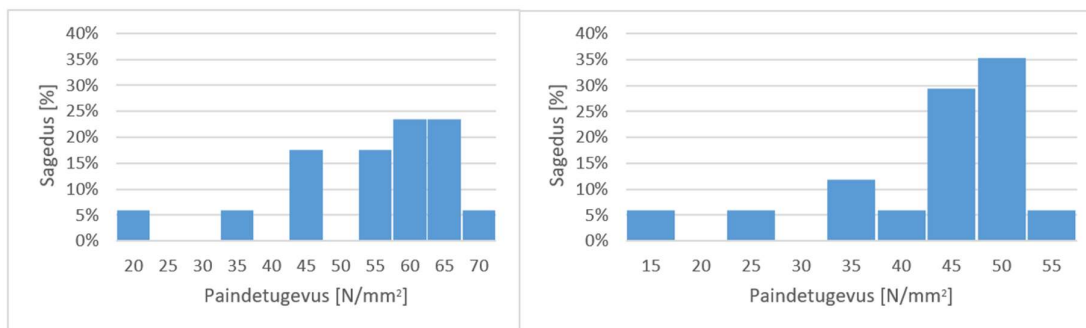
Joonis 4.10 Ristikiudu mõõdetud ultrahelilaine dünaamilised elastsusmoodulid

4.2.5 Paindetugevus

Joonisel 4.11a on esitatud paindetugevused, mis on leitud purustaval meetodil kasutades standardi EVS-EN 408 katsemeetodi ning joonisel 4.11b on paindekats tulemusi korrigeeritud katsetingimuste erinevuse tõttu. [24] Paindekatseteks sobivad katsekehad valiti kõige pikemate prusside hulgast, et peale purustamist oleks võimalik ülejäänud materjali kasutada seoses peatükis 3.1 kirjeldatud projekti (*Drastic*) raames. Kokku 15 katsekehale tehti 17 katset. Kõik katsed sooritati lapikul küljel.

Alloleval joonisel 4.11a. on näha, et peamiselt koondusid tulemused 40-65 N/mm² vahemikku (88% tulemusest). Esines üksikuid erandeid nagu näiteks alla 20 MPa saavutanud katsekeha (katsekeha nr 27, joonisel 4.12). Seda proovikeha iseloomustas väga madal tihedus (336 kg/m³), elastsusmoodul (korrigeerituna ja nihkedeformatsiooni arvesse võttes 4610 N/mm²), kiire kasv (aastane juurdekasv üle 6 mm) ja oksakohtade tihe esinemine purustavas tsoonis (vt joonist 4.12). Ka visuaalne hindamine andis sellele katsekehale tugevuseks C18 (UNI 11119 järgi 17 MPa), mille ta katseliselt saavutas, küll aga peale purustava katse tulemuse korrigeerimist valemitega 3.9 ja 3.10 langes tugevus alla C18.

Keskmiseks katseliseks paindetugevuseks saavutati $51,6 \pm 12,2 \text{ N/mm}^2$, maksimaalne tulemus on $65,4 \text{ N/mm}^2$ ja minimaalne $18,4 \text{ N/mm}^2$. Esitatud tulemused ei kajasta kogu katsekeha tugevusi vaid lokaalseid suuruseid. Korrigeeritud paindetugevuse keskmine väärtus on $40,6 \pm 9,6 \text{ N/mm}^2$, minimaalse väärtusega $14,7 \text{ N/mm}^2$ ja maksimaalse väärtusega $51,4 \text{ N/mm}^2$.



Joonis 4.11 a) 4-punkti purustaval katsel saadud paindetugevused; b) paindetugevused korrigeeritud vastavalt standardile EVS-EN 384.



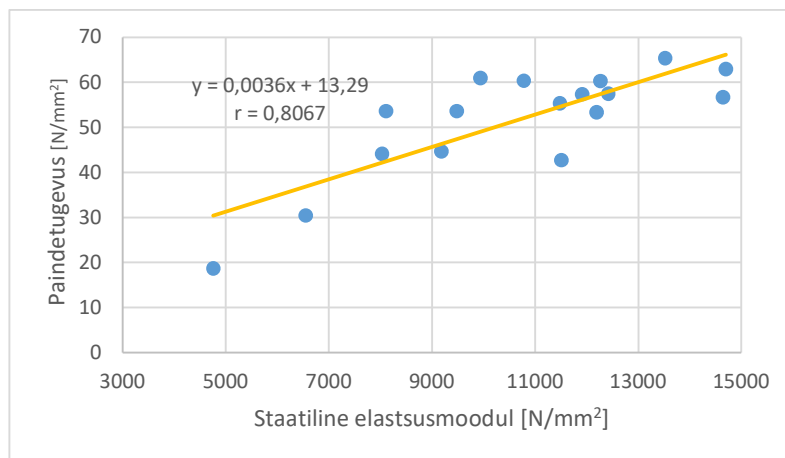
Joonis 4.12 Katsekeha nr 27 purunemispilt

4.3 Paindetugevuse ja staatilise elastsusmooduli seos

Paindetugevuse ja staatilise elastsusmooduli vaheline seos on avaldatud alloleval hajumisgraafikul (joonis 4.13). Võrdluses on katsega saadud paindetugevus, mis on arvutatud valemi 3.8 abil ning korrigeeritud staatiline elastsusmoodul (valem 3.7), kus on arvestatud nihkedeformatsiooni mõjuga (valemis 3.5). Omavahelise sõltuvuse kirjeldamiseks on kasutatud elastsusmooduli väärtust, mis on leitud samas lõikes, kus on tehtud purustav katse, et leida maksimaalset paindetugevust.

Kahe tunnuse omavahelise lineaarse seose korrelatsioonikordaja on $r = 0,81$, statistiliselt on tegu tugeva positiivse korrelatsiooniga (joonis 3.13), mis tähendab seda, et kui ühe tunnuse väärtused kasvavad, võib eeldada ka teise tunnuse väärtuste

suurenemist lineaarselt. Nende andmete põhjal võib väita, et elastsusmoodul on hea tugevusargument, mille abil hinnata puidu paindetugevust. M. Hani magistritöös oli sama seose korrelatsioonitegur 0,76 (tugev seos, harilikult kuusest 50 katsekeha) [18] ja M. Kauniste töös 0,67 (keskmine seos, katsete arv 11) [17]. Võrreldes eelviidatud magistritöödega, on näha, et saadud korrelatsioonitegurid ei erine suurel määral üksteisest ning pigem kinnitavad tugeva seose esinemist. Antud lõputöö ja Kauniste tulemuse natuke suurem erinevus võib olla tingitud katsete sooritamise arvust ning tuleks arvesse võtta asjaolu, et ühel juhul on tegu uue materjaliga (Hani katsekehad) ning teisel juhul 120 aastat vana kasutatud materjaliga (Kauniste katsekehad). Samuti nii M. Kauniste magistritöös kui ka antud lõputöös on valim väiksem (11 ja 17 katset) kui Hani magistritöös ning seetõttu mõjutab iga eraldiseisev tulem rohkem korrelatsioonitegurit. Kokkuvõttes saab kasutada staatilist elastsusmooduli leidmist puidu paindetugevuse hindamiseks.

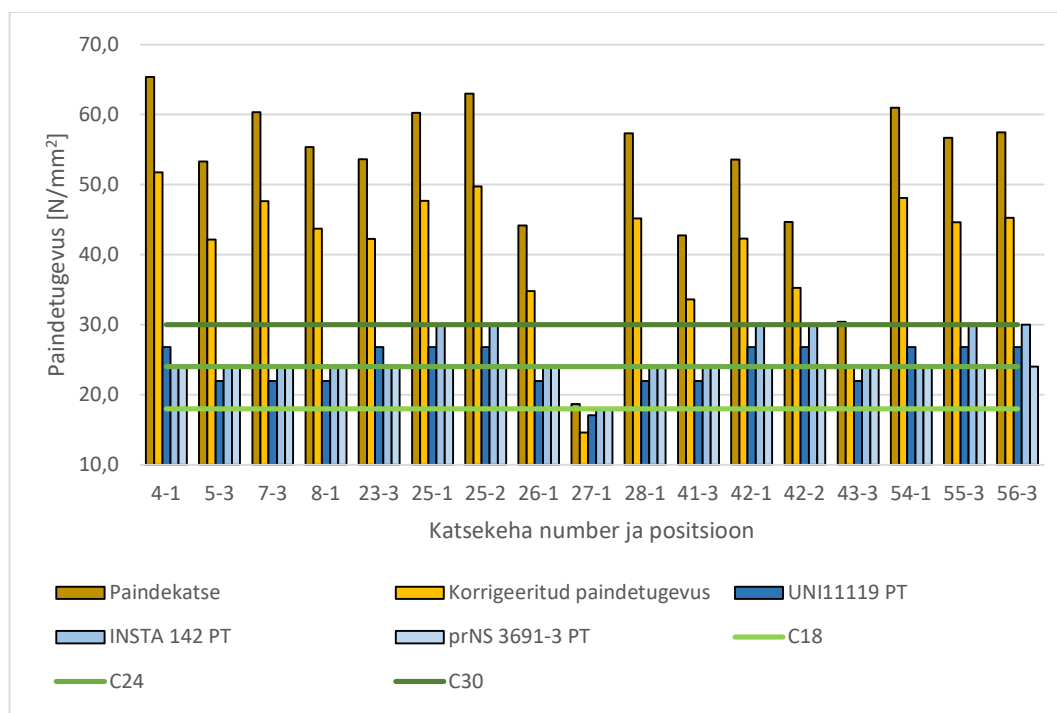


Joonis 4.13 Paindetugevuse ja staatilise elastsusmooduli seoseline hajumisdiagramm

4.4 Paindekatsete ja visuaalse sorteerimise tulemuste võrdlus

4.4.1 Paindetugevused

Joonis 4.14 võrdleb visuaalsel sorteerimisel saadud katsekehade tugevusklasside ja purustaval paindekatsetel leitud paindetugevust ja paindetugevust, mis on korrigeeritud valemitega 3.9 ja 3.10. Selleks, et andmed oleksid võrreldavad on kasutatud visuaalse hindamise tulemusi, mis on määratud samas tsoonis, kus on tehtud paindetugevuse katse. See välistab olukorrad, kus üldhinnang on madalam kui katsetatud lõigu visuaalse hindamise tulemus ning seeläbi esitab visuaalse tugevussorteerimise meetode ebatäpsemana kui need tegelikult on.



Joonis 4.14 Purustavas tsoonis visuaalselt hinnatud paindetugevused erinevate standardite järgi ja purustava katse võrdlus

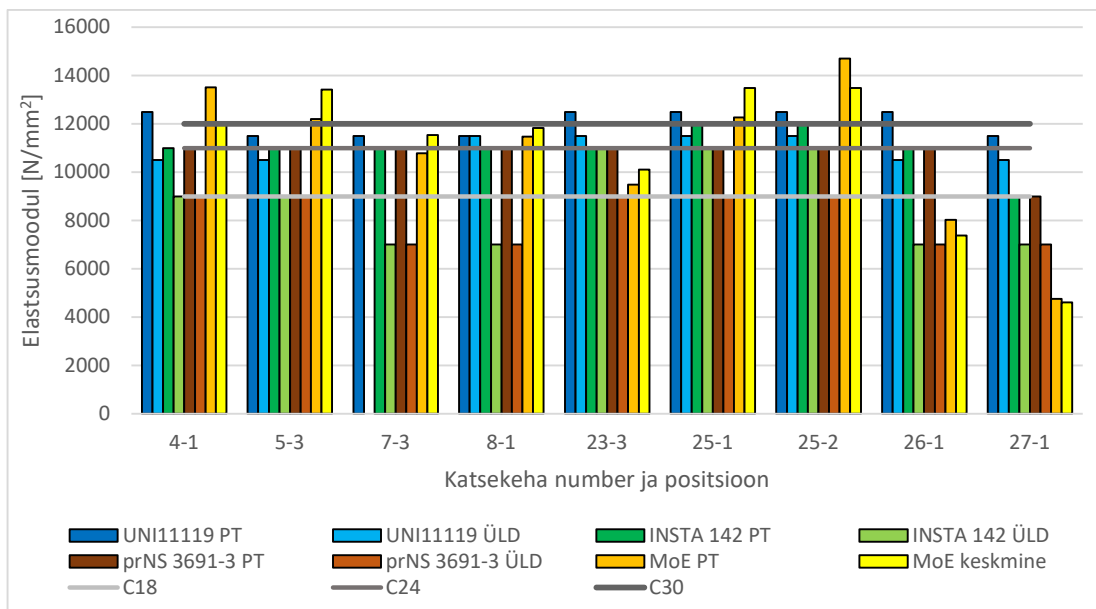
Kokku on võrreldud 17 katset, millest kõik paindekatse tulemused on ületanud visuaalsel hindamisel saadud tulemusi. Kui korrigeerida valemitega 3.9 (kui katsekeha kõrgus alla 150 mm) ja 3.10 (katseskeemi erinevused) paindekatseid, siis kahel juhul muutub korrigeeritud paindetugevus väiksemaks kui on visuaalne hinnang (14,7 ja 23,8 MPa). Kuigi katsekeha 27-1 oli küllatki erandlik (oksakoha osakaal, madal tihedus, laiad

aastarõngad, purunemispilt joonisel 4.12) siis sellistel juhtudel on õigustatud, et visuaalse tugevussorteerimise standardid on konservatiivsed. Näiteks Lauri Ütsiku magistritöös oli 48 katsekehast kokku 8 sellist tulemust, mis hindasid materjali visuaalselt tugevamaks kui paindekatsel selgus (17% kogu valimist, antud lõputöös 11,8%) ning ühel juhul samaks paindekatsel tulemusega (2% kogu valimist). [19] Tulemused jäävad sarnasesse vahemikku ning siit saab järeldada, et selliseid visuaalse hinnangu ja katseliselt leitud paindetugevuse hindamisvigu ja ligilähedseid tulemusi võib eeldada.

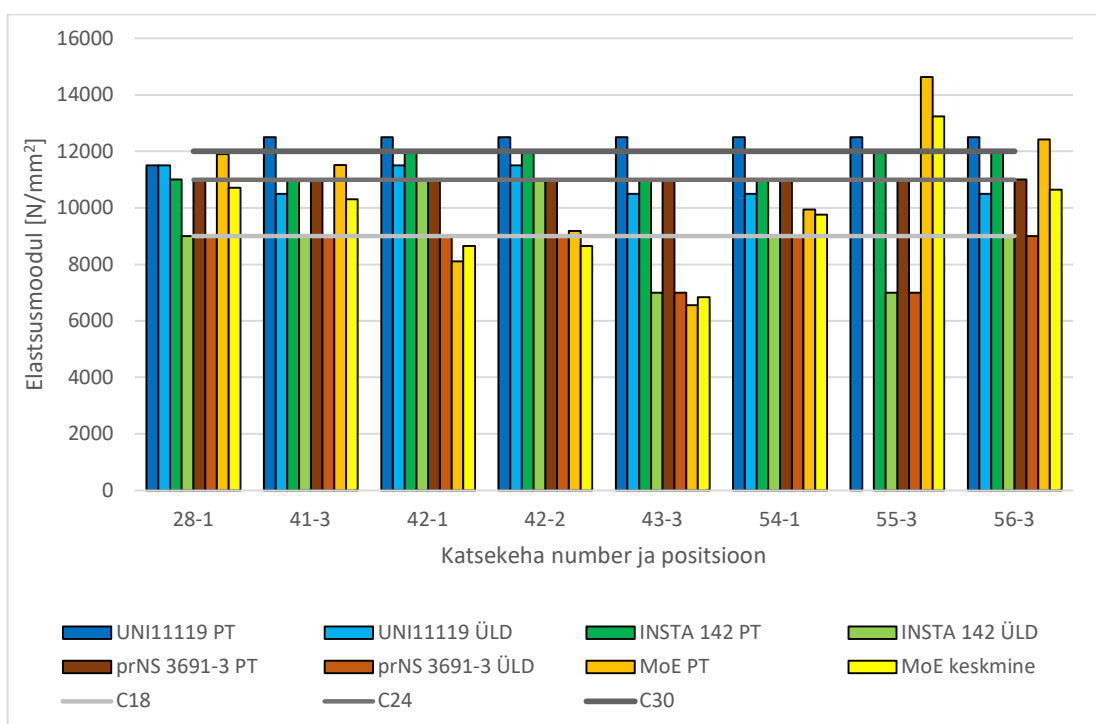
Üldpilti vaadates on joonisel 4.14 näha, et enamikel juhtudel on siiski maksimaalsed paindetugevused märgatavalt suuremad kui visuaalse tugevussorteerimise hinnangud. Ligi 70% katsekehade maksimaalsed paindetugevused oli paremad kui tugevusklass C50, korrigeeritud paindetugevusena kuulusid nad C40 tugevusklassi. Visuaalsed sorteerimisstandardid alahindavad keskmiselt 50-54% väiksemaks katsekehade tugevusi. Kõige rohkem alahindab Norra (prNS 3691-3) standard ja kolme standardi osas kõige paremad tulemused annab INSTA 142 standard. M. Piazza ja M. Riggio leidsid enda uurimistöös, et UNI 11119 standard alahindas paindetugevusi 61% (antud lõputöös oli see 53%). [7] Kokkuvõttes hindavad visuaalse tugevussorteerimise standardid materjali tugevust ebatäpsemalt kui purustava paindekatsel saadud tulemused, kuid see eest on visuaalselt sorteeritud tugevusklassid üldjuhul tagatud. Miinuseks selle juures on konstruktsioonide üledimensioneerimine ja materjali liigkulu. Taaskasutuse seisukohalt see muidugi ülekulu otseselt ei ole ning selline lähenemine võib kasutaja usaldust tõsta kui on teada, et tugevused on üldjuhul ülehinnatud.

4.4.2 Staatilised paindeelastsusmoodulid

Staatilised paindeelastsusmoodulid leiti visuaalsel hindamisel purustavas tsoonis ja üldise hinnanguga kogu katsekehale. Paindekatsel elastsusmooduli määramiseks on sooritatud kolmes eri lõigus. Joonistel 4.15 ja 4.16 on esitatud visuaalse sorteerimise tulemused kogu katsekeha kohta (ÜLD) ja purustavas tsoonis (PT). Staatilised elastsusmoodulid on antud purustava tsooni kohta (PT) ja keskmise tulemusena. Visuaalne tugevussorteerimise üldine hinnang ja purustava tsooni hinnang on teostatud erinevate hindajate poolt. Tühjad tulbad graafikul tähendavad standardi järgi mitte kõlblikku katsekeha ehk praaki, täpsemad andmed on lisas 1 ja 2.



Joonis 4.15 Visuaalse sorteerimise tulemuste võrdlus paindekatsetega. PT tähistab purunemistsoonis visuaalselt hinnatud tulemust; ÜLD näitab tervele katsekehale leitud visuaalset hinnangut

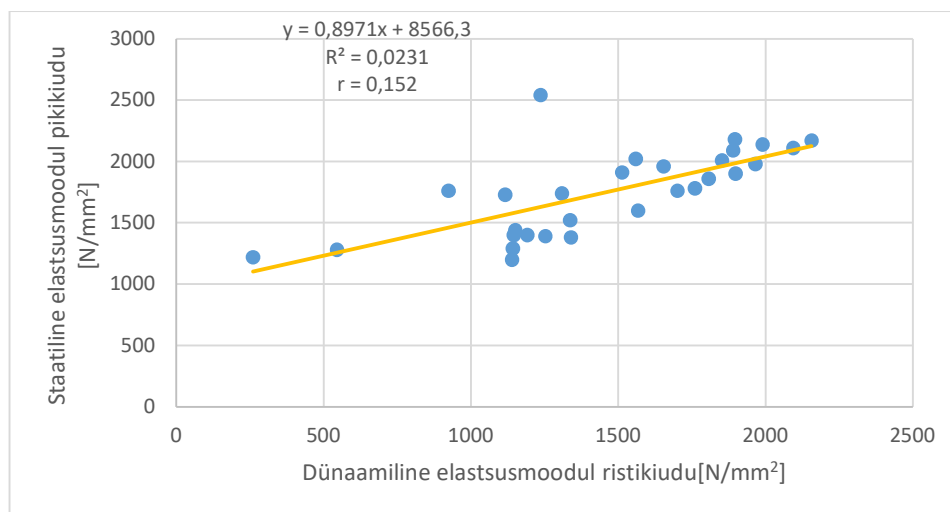


Joonis 4.16 Visuaalse sorteerimise tulemuste võrdlus paindekatsetega. PT tähistab purunemistsoonis visuaalselt hinnatud tulemust; ÜLD näitab tervele katsekehale leitud visuaalset hinnangut

Lokaalsed visuaalse sorteerimise tulemused on kõigil katsekehadel paremad või samaväärsed kui kogu katsekeha visuaalselt määratud tugevusklassid. See näitab, et kahe erineva hindaja poolt teostatud hindamised ei ole vastuolulised. Joonistelt 4.15 ja 4.16 on näha, et katsetulemused on visuaalse tugevussorteerimise tulemustest kohati väiksemad. Kõige rohkem ülehindab keskmiselt tulemusi UNI 11119 standard (24% purustavas tsoonis ja 14,3% tervele katsekehale). Selle on välja toonud ka M. Nocetti jt, et UNI 11119 standard annab liiga kõrged elastsusmooduli väärtused. [21] INSTA 142 ja prNS 3691-3 standardid hindavad terve katsekeha elastsusmoodulit tagavara kasuks (11,3% ja 17% väiksemad kui katsetulemused). Purustavas tsoonis vaadeldud tulemused on vähem ülehinnatud kui UNI 11119 standardil, vastavalt 12,6% ja 9,5%. Tulemustes esineb mõningaid ekstreemseid näiteid, näiteks katsekehad 27 ja 43, kus standardid on ülehinnanud elastsusmooduleid 68-140% ulatuses.

4.5 Staatileine ja dünaamiline elastsusmoodul

Eelnevates uurimistöödes (vt. peatükk 2.4) on täheldatud, et akustikal põhinevad mõõtmised annavad häid tulemusi puidu tugevuse hindamisel, sealjuures kõige parem on mõõtmisi teostada katsekeha otstest (tugevad seosed). Tegelikus olukorras mitte-purustavaid meetode kasutades ei pruugi olla alati võimalik konstruktsioonile täielikult ligipääseda, mistõttu ei saa otstest mõõtmisi teostada. Antud uurimistöös katsetati ristikiudu ultrahelilaine mõõtmisi, et leida, kas sellisel kujul esineb mingisugune seos pikikiudu staatilise elastsusmooduliga.



Joonis 4.17. Staatilise pikikiudu ja dünaamilise ristikiudu elastsusmooduli võrdlus

Joonis 4.17 kirjeldab seost pikikiudu staatilise elastsusmooduli ja ristikiudu dünaamilise elastsusmooduli vahel. On näha, et võrreldavad tunnused on suure hajuvusega ja korrelatsioon on nõrk, $r=0,15$. Sellest selgub, et antud meetodi ei saa kasutada hindamaks puidu tugevusparameetreid pikikiudu. Lisaks on selle meetodi juures miinuseks väga piiratud ehk lokaalne mõõdistamine. See tähendab, et ühes mõõtepunktis võib tulemusi mõjutada puidu defektid ning teisel juhul samas katsekehas ei esine puidurikkeid. Sellest tulenevalt tekivad suured väärtuste erinevused ühe ja sama katsekeha puhul. Antud juhul tehti lokaalsed ultrahelilaine mõõtmised paindekatses kasutatud sildeava keskel, kus kohalik mõju on eeldatavalt kõige suurem.

KOKKUVÕTE

Uurimistöö raames sooritati katseid 56 katsekehaga, mille ristlõike mõõtmeid olid 48x98 mm. Uuritav materjal oli vana harilik kuuse puit, mida kasutati betoonitöödeks. Eesmärgiks oli võrrelda kolme visuaalse tugevussorteerimise standardi (INSTA 142, UNI 11119 ja prNS 3691-3) tulemusi mittepurustavate ja purustavate katsetega. Samuti võrreldi purustavaid ja mittepurustavaid katseid üksteisega. Paindetugevuse ja staatilise elastsusmooduli leidmiseks sooritati 4-punkti katseid paralleelhaaratsitega elektromehaanilise katseseadmega. Ristikiudu dünaamiliste elastsusmoodulite arvutamiseks oli vajalik määrata puidus helilainete levimise kiirust, mida mõõdeti seadmete ostsilloskoobi ja lainesignaali generaator abil.

Mitme visuaalse tugevussorteerimise standardi kasutamise eesmärk seisnes kõige usaldusväärsema väljaselgitamises ja uue Norra väljaantava standardi prNS 3691-3 läbitöötamises. Visuaalset hindamist sooritati kahel viisil: üldine hinnang tervele katsekehale ja purustavatel katsetel lokaalse tsooni hindamine. Hindamisel keskenduti eelkõige oksakohtade mõõtmisele, kuna varasemates uuringutes on toodud välja, et see parameeter oli määravaks mõjuriks enamike katsekehade tugevussorteerimise hindamisel. Standardite metoodika omavahelises võrdluses on UNI 11119 kõige arusaadavam ja lihtsam, teised standardid on palju põhjalikumad ning kulutavad rohkem aega tugevussorteerimiseks.

Paindetugevuse osas andis parimad tulemused INSTA 142 standardi kasutamine, sest see lubas hinnata paindetugevust kõige suuremaks (kuni C30 tugevusklass), kuid tugevuse väärtused jäid siiski palju väiksemaks kui reaalsed katsetulemused. Keskmiselt alahindasid standardid paindetugevust 50-54% väiksemaks, kõige rohkem alahindas tulemusi Norra prNS 3691-3 standard. Keskmise katsekehade paindetugevus oli 50,6 N/mm² ning korrigeeritud keskmised tulemused vastavalt standardile EVS-EN 384:2016, olid 40,6 N/mm². Kahel juhul jäid korrigeeritud paindetugevuse väärtused väiksemaks kui visuaalsel hindamisel saadud tugevusklassid (11,8% valimist).

Staatilise elastsusmooduli visuaalsel hindamisel võrreldes paindekatsega andis kõige täpsemaid tulemusi Norra prNS 3691-3 standard purustavas tsoonis, kus tulemused olid keskmiselt 9,5% suuremad kui tegelik katse. INSTA 142 hindas keskmiselt 12,6% elastsusmoodulit suuremaks ja UNI 11119 24% suuremaks. Üldise hinnangu puhul olid Norra ja Skandinaavia standardite tulemused tagavara kasuks (vastavalt 17% ja 11,3% väiksemad kui katsetulemus), kuid UNI 11119 hindas ainukesena elastsusmooduli väärtuseid keskmiselt 14,3% võrra suuremaks. Seda kinnitavad ka teiste uuringute tulemused, et UNI 11119 ülehindab elastsusmooduli väärtuseid.

Katseliselt määratud staatilise elastsusmooduli ja paindetugevuse tulemuste vahel on saadud tugev seos korrelatsiooniteguriga $r = 0,81$. Kuigi valim oli väike (17 katset), siis teiste uuringutega võrreldes jäi seose väärtus sarnasesse vahemikku. Seega saab järeldada, et staatilise elastsusmooduli määramine mittepurustava paindekatsetega võimaldab prognoosida võrdlemisi täpselt puidu tugevust. Antud meetodi puudus on see, et konstruktsiooni ei ole võimalik ehitusobjektile hinnata.

Viimasena katsetati, kas ristikiudu dünaamilise elastsusmooduli ja pikikiudu staatilisel elastsusmooduli mõõtmisel on võimalik luua seos, mis võimaldab sellist mõõteviisi konstruktsiooni kohapealsel hindamisel kasutada, kui ligipääsetavus konstruktsioonile on piiratud. Seose tugevuseks saadi $r = 0,15$, mis näitab, et tegemist on nõrga seosega ning selline lähenemine ei sobi puidu tugevusomaduste prognoosimiseks.

Visuaalsete tugevussorteerimise standarditega saab suure varuga hinnata puitu tugevusklassidesse kuni C24 või C30. See on küll kindel meetod ning jätab eksimisruumi hindaja kasuks, kuid materjali optimeerimise seisukohast võib seetõttu olla konstruktsioon suurelt üledimensioneeritud. Masinsorteerimisega on võimalik see eest puitu kõrgematesse tugevusklassidesse hinnata, kuid see eeldab ka masinsorteerimiseks vajalikke seadmetesse investeerimist ja tuleb ka arvestada sellega, et alati ei ole võimalust objektile materjali hinnata. Kui eesmärk on tegeleda ainult vana puidu hindamisega ei pruugi investering ennast ära tasuda väiksemate mahtude tõttu.

Positiivse asjaoluna võib välja tuua, et taoliste uuringute tegemine vana puidu osas tõstab puidu taaskasutamise usaldusväärtust konstruktsioonides. Katsed on tõestanud, et varasemalt muudel eesmärkidel kasutatatud puitu saab edukalt sorteerida konstruktsioonide ehitamiseks vajalikesse tugevusklassidesse. Kuigi vana puidu füüsikalisi ja mehaanilisi omadusi on uuritud omajagu, tuleb siiski tõdeda, et valimid on üldjuhul väiksed ning järelduste kinnitamiseks tuleks analoogsete katsetega edasi minna.

Autor näeb suurt potentsiaali puidu tugevusomaduste täpsemaks hindamiseks võrreldes algse tugevussorteerimisega ja seoses sellega puitkonstruktsioonide optimeerimiseks nende taaskasutamisel.

SUMMARY

In this Master's thesis, experiments were conducted using 56 test specimens with cross-sectional dimensions of 48x98 mm. The researched material was previously used Norway spruce wood for concrete works. The aim was to compare the results of three visual strength grading standards (INSTA 142, UNI 11119 and prNS 3691-3) with non-destructive and destructive tests. Additionally, the destructive and non-destructive tests were compared with each other. To determine bending strength and static modulus of elasticity, 4-point bending tests were performed with an electromechanical testing machine. For calculating the dynamic moduli of elasticity across the grain, it was necessary to determine the speed of sound waves propagating through the wood, measured using oscilloscope and waveform generator equipment.

The purpose of using multiple visual strength grading standards was to determine the most reliable one and to acquaint with the new Norwegian standard prNS 3691-3. Visual assessments were conducted in two ways: a general assessment of the entire specimen and an assessment of the destructive zone based on destructive tests. The focus was primarily on measuring knots, as various studies have indicated that this parameter significantly affects the strength grading results of most specimens. Among the standards, UNI 11119 is the most straightforward and simple in methodology, while the others are much more comprehensive and require more time for strength grading.

The best bending strength results were provided by using the INSTA 142 standard, as it allowed for the highest estimation of bending strength (up to strength class C30), but the strength values still fell significantly lower than the actual test results. On average, the standards underestimated bending strength by 50-54%, with the Norwegian prNS 3691-3 standard underestimating the most. The average bending strength of the specimens was 50.6 N/mm², and the adjusted average results according to the standard EVS-EN 384:2016 were 40.6 N/mm². In two cases, the adjusted bending strength values were lower than the strength classes obtained from visual assessment (11.8% of the sample).

In the visual assessment of the static modulus of elasticity compared to the bending test, the Norwegian prNS 3691-3 standard provided the most accurate results in the destructive zone, with results averaging 9,5% higher than the actual test. INSTA 142 overestimated the modulus by an average of 12,6%, and UNI 11119 by 24%. In the general assessment, the results of the Norwegian and Scandinavian standards underestimated the modulus of elasticity values (respectively 17% and 11,3%), while UNI 11119 was the only one to overestimate the values by an average of 14,3%. The

overestimation of the modulus of elasticity by UNI 11119 has also been noted in other studies.

With the tests, a strong correlation was found between the static modulus of elasticity and bending strength with a correlation coefficient of $r = 0.81$. Although the sample size was small (17 tests), the value was similar to those found in other studies. Therefore, it can be concluded that determining the static modulus of elasticity with a non-destructive bending test allows for relatively accurate prediction of wood strength. The drawback of this method is that it is not possible to assess the structure on-site.

Finally, tests were conducted to determine whether a correlation could be established between the dynamic modulus of elasticity perpendicular to the grain and the static modulus of elasticity parallel to the grain for on-site structural assessment when accessibility to the structure is limited. The strength of the correlation was $r = 0.15$, indicating a weak correlation, suggesting that this approach is not suitable for predicting wood strength properties.

In conclusion, it can be stated that visual strength grading standards can conservatively estimate wood into strength classes up to C24 or C30. This method is reliable and leaves room for error in favor of the assessor but may result in the structure being significantly over-dimensioned from a material optimization perspective. Machine grading, on the other hand, can grade wood into higher strength classes, but this requires investment in the necessary equipment for machine grading and consideration of the fact that on-site material assessment may not always be feasible. If the goal is to focus solely on the assessment of old wood, the investment may not be justified due to smaller volumes.

A positive aspect is that conducting such studies on old wood enhances its credibility for reuse in structures. The tests have proven that wood previously used for other purposes can be successfully sorted into the strength classes required for construction. Although the physical and mechanical properties of old wood have been studied to some extent, the samples sizes are generally small, and further similar tests are needed to confirm the conclusions.

The author sees great potential in increasing the accuracy of the assessment of wood strength properties compared to the initial strength grading and related to this, in the optimization of timber structures in their reuse.

5 KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] E.-J. Just, K. Õiger ja A. Just, *Puit- ja puidupõhised konstruktsioonid*, Tallinn, Eesti: TTÜ kirjastus, 2015.
- [2] Forest Products Laboratory, *Wood Handbook — Wood as an Engineering Material*, Madison, WI, USA: Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2021.
[Online]. Available: <https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/62200>
- [3] E. Saarman ja U. Veibri, *Puiduteadus*, Tartu, Eesti: Vali Press OÜ, 2006.
- [4] E. Laas, *Okaspuud*, Tartu, Eesti: Atlex OÜ, 2004.
- [5] A. C. Wiedenhoeft and R. B. Miller, "2 Structure and Function of Wood," in *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*, Madison, WI, USA: CRC Press LLC, 2005, pp. 9-33. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/237823123_2_Structure_and_Function_of_Wood
- [6] Encyclopaedia Britannica, "Properties of wood," [Online]. Available: <https://www.britannica.com/science/wood-plant-tissue/Properties-of-wood>.
[kasutatud mai 2024].
- [7] M. Piazza and M. Riggio, "Visual strength-grading and NDT of timber in traditional structures," *Journal of Building Appraisal*, vol. 3, no. 4, pp. 267-296, Dec. 2008. doi: 10.1057/jba.2008.4
- [8] S. Thelandersson ja H. J. Larsen, *Timber Engineering*, Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd, 2003, p. 457.
- [9] *Ehituspuit. Tugevusklassid*, EVS-EN 338:2016, MTÜ Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus, Tallinn, Eesti, 2016.
- [10] D. F. Llana, G. Íñiguez-González, M. Plos and G. Turk, "Grading of recovered Norway spruce (*Picea abies*) timber for structural purposes," *Construction and Building Materials*, vol. 398, pp. 1-10, 2023. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132440>
- [11] *Träkonstruktioner - Konstruktionsvirke - Nordiskt T- och LT-virke - Visuella sorteringsklasser enligt*, INSTA 142, Svenska institutet för standarder, 2010.
- [12] Swedish Wood, „Wood Grades,” [Online]. Available: <https://www.swedishwood.com/wood-facts/about-wood/wood-grades/#:~:text=Strength%20class%20C14&text=C14%20is%20a%20strength%20class,the%20whole%20of%20its%20thickness..> [Kasutatud mai 2024].

- [13] K. Pilt, „Mittepurustavad meetodid puitkonstruktsioonide kestvuse uurimiseks kultuuriväärtuslikes hoonetes,” Tallinn, Eesti: 2010.
- [14] M. Zielińska and M. Rucka, "Non-destructive Testing of Wooden Elements," *Materials Science and Engineering*, vol. 1203, 2021.
doi: 10.1088/1757-899X/1203/3/032058
- [15] P. Palma and R. Steiger, "Structural health monitoring of timber structures – Review of available," *Construction and Building Materials*, vol. 248, pp. 2-23, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118528>
- [16] M. Püssa, „The Classification of Sawtimber by Visual and Acoustic Grading, Saematerjalide sorteerimine käsitsi ning akustikal põhineva meetodiga,” BA thesis, Department of Polymer Materials, Tallinn University of Technology, Tallinn, Estonia, 2015. [Online]. Available: <https://digikogu.taltech.ee/et/Item/14ba9e18-e9d8-4a57-a14f-a7a21b515eab>
- [17] M. Kauniste, „Assessment of Strength and Stiffness Properties of Aged Structural Timber, Vana konstruktsioonipuidu tugevus- ja jäikusomaduste hindamine,” M.S Thesis, School of Engineering, Tallinn University of Technology, Tallinn, Estonia, 2023. [Online]. Available: <https://digikogu.taltech.ee/et/Item/24efbe0d-5c02-4ee9-a5ef-d2068b6476d6>
- [18] M. Hani, „Kuuse- (Picea abies) ja männipuidu (Pinus sylvestris) tugevusparameetrite uurimine akustiliste mitte-purustavate ja purustavate meetoditega,” magistritöö, Maaehituse osakond, Eesti Maaülikool, Tartu, Eesti, 2014.
- [19] L. Ütsik, „Kuuse (Picea abies) ja männi (Pinus sylvestris) konstruktsioonipuidu tugevussorteerimine erinevate meetoditega,” magistritöö, Maaehituse osakond, Eesti Maaülikool, Tartu, Eesti, 2015.
- [20] T. Toomjõe, „Hariliku männi (Pinus sylvestris L.) puidu tugevusparameetrite uurimine mittepurustaval ja purustaval meetodil,” magistritöö, Maaehituse osakond, Eesti Maaülikool, Tartu, Eesti, 2016.
- [21] M. Nocetti, G. Aminti, M. Vicario and M. Brunetti, "Mechanical properties of ancient wood structural elements assessed by visual and machine strength grading," *Construction and Building Materials*, vol. 411, December 2023. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134418
- [22] A. Cavalli, D. Cibecchini, M. Togni and H. S. Sousa, "A review on the mechanical properties of aged wood and salvaged," *Construction and Building Materials*, vol. 114, pp. 681-687, 2016.
doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.001>

- [23] Horizon Europe, European Union, „Drastic,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.drasticproject.eu/home>. [kasutatud märts 2024].
- [24] *Puitkonstruktsioonid. Ehituspuit ja liimpuit. Mõnede füüsikaliste ja mehaaniliste omaduste määramine*, EVS-EN 408:2010+A1:2012, MTÜ Eesti Standardimis- ja akrediteerimiskeskus, Tallinn, Eesti: 2012.
- [25] *Evaluering av returtre – Del 3: Visuell styrkesortering*, prNS 3691-3, Oslo, Norway: Standard Norge, 2023. unpublished, publitseerimata
- [26] *Cultural heritage - Wooden artefacts - Load-bearing structures - On site inspections for the diagnosis of timber members*, UNI 11119, Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), 2004.
- [27] *Eurokoodeks 5: Puitkonstruktsioonide projekteerimine. Osa 1-1: Üldist. Üldreeglid ja reeglid hoonete projekteerimiseks*, EVS-EN 1995-1-1:2005+A1+NA+A2, MTÜ Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus, Tallinn, Eesti, 2015.
- [28] *Round and sawn timber - Methods of measurements - Part 3: Features and biological degradations*, EVS-EN 1309-3:2018, MTÜ Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, Tallinn, Eesti, 2018.
- [29] *Moisture content of a piece of sawn timber - Part 1: Determination by oven dry method*, EVS-EN 13183-1:2002, MTÜ Eesti Standardimis- ja akrediteerimiskeskus, Tallinn, Eesti, 2002.
- [30] *Structural timber - Determination of characteristic values of mechanical properties and density*, EVS-EN 384:2016+A2:2022, MTÜ Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus, Tallinn, Eesti, 2022.
- [31] *Konstruktsiooni betooni katsetamine. Osa 4: Ultraheliimpulsi kiiruse määramine*, EVS-EN 12504-4:2021, MTÜ Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus, Tallinn, Eesti, 2021.
- [32] *Advanced technical ceramics - Monolithic ceramics. Mechanical properties at room temperature - Part 2: Determination of Young's modulus, shear modulus and Poisson's ratio*, EVS-EN 843-2:2007, MTÜ Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus, Tallinn, Eesti, 2007.
- [33] A. Sauga, *Statistika õpik majanduseriala*, Tallinn, Eesti: TTÜ Kirjastus, 2020.

LISA 1 Tervilike katsekehade visuaalse tugevussorteerimise tulemused

Katsekeha	Lõplik tulemus UNI11119	Lõplik tulemus INSTA 142	Lõplik tulemus prNS- 3691-3	Katsekeha	Lõplik tulemus UNI11119	Lõplik tulemus INSTA 142	Lõplik tulemus prNS- 3691-3
1	praak	T1	O1	29	III	T2	O2
2	III	T2	O2	30	III	T2	O2
3	I	T3	O2	31	II	T2	O2
4	III	T2	O2	32	II	T3	O2
5	III	T2	O2	33	III	T2	O2
6	II	T2	O2	34	praak	T1	O1
7	praak	T1	O1	35	III	T2	O2
8	II	T1	O1	36	III	T1	O1
9	II	T3	O2	37	I	T3	O2
10	III	T2	O2	38	praak	T1	O1
11	II	T3	O2	39	III	T2	O2
12	II	T2	O2	40	II	T3	O2
13	III	T2	O2	41	III	T2	O2
14	I	T3	O2	42	II	T3	O2
15	praak	T1	O1	43	III	T1	O1
16	II	T3	O2	44	III	T2	O2
17	III	T2	O2	45	III	T2	O2
18	I	T3	O2	46	praak	T1	O1
19	II	T3	O2	47	III	T2	O2
20	praak	T1	O1	48	III	T2	O2
21	praak	T1	O1	49	I	T3	O2
22	II	T2	O2	50	III	T2	O2
23	II	T3	O2	51	praak	T1	O1
24	III	T2	O2	52	III	T2	O2
25	II	T3	O2	53	III	T2	O2
26	III	T1	O1	54	III	T2	O2
27	III	T1	O1	55	praak	T1	O1
28	II	T2	O2	56	III	T2	O2

Lisas 1 katsekehad, mis ei ole vastanud miinimum hindamiskriteeriumitele on tähistatud sõnaga „praak“.

LISA 2 Purustavas tsoonis katsekehade visuaalse tugevussorteerimise tulemused

Katsekeha	Lõplik tulemus UNI11119	Lõplik tulemus prNS 3691-3	Lõplik tulemus INSTA 142
4-1	I	O24	T2
5-3	II	O24	T2
7-3	II	O24	T2
8-1	II	O24	T2
23-3	I	O24	T2
25-1	I	O24	T3
25-2	I	O24	T3
26-1	II	O24	T2
27-1	III	O18	T1
28-1	II	O24	T2
41-3	II	O24	T2
42-1	I	O24	T3
42-2	I	O24	T3
43-3	II	O24	T2
54-1	I	O24	T2
55-3	I	O24	T3
56-3	I	O24	T3

Lisas 2 on katsekeha märgitud numbrikombinatsiooniga, näiteks 54-1, see tähistab esimene pool ehk 54 tähistab katsekeha numbrit ja teine pool näitab tsooni, kus hindamised on toimunud.

LISA 3 Purustava ja mittepurustava meetodi katsetulemuste andmed

Katsekeha	Pos.	Terve katsekeha tihedus (kg/m ³)	Proovitüki tihedus (kg/m ³)	Niiskussisaldus (%)	Em,g (MPa) nihkedeformatsiooniga	Keskmine	E _{dyn} (MPa)	Paindetugevus (MPa)	Korrigeeritud paindetugevus (MPa)
1	1	419,2			7060	7370			
	2				7300				
	3				7740				
2	1	537,2	509,1	10,8%	13930	13410			
	2				13420				
	3				12880				
3	1	525,7			8170	8380			
	2				8440				
	3				8530				
4	1	567,8	568,8	16,4%	11940	10860		65,4	51,4
	2				11560		13400		
	3				9070		9240		
5	1	503,8	492,7	14,8%	12220	12060			
	2				12820				
	3				11140			53,3	41,9
6	1	504,3	492,3	10,2%	11970	10960			
	2				11050				
	3				9850				
7	1	537,9	525,4	16,3%	11010	10490			
	2				10520				
	3				9940			60,4	47,5

Katsekeha	Pos.	Terve katsekeha tihedus (kg/m ³)	Proovitüki tihedus (kg/m ³)	Niiskussisaldus (%)	Em,g (MPa) nihkedeformatsiooniga	Keskmine	E _{dyn} (MPa)	Paindetugevus (MPa)	Korrigeeritud paindetugevus (MPa)
8	1	473,2	460,9	13,2%	10770	11030		55,4	43,5
	2				11180				
	3				11150				
9	1	466,4	465,6	9,2%	10460	10810			
	2				11300				
	3				10660				
10	1	412,5			8020	7760			
	2				7190				
	3				8060				
11	1	390,9	374,4	9,6%	8180	8080			
	2				8180				
	3				7870				
12	1	491,8	469,2	9,6%	12830	11630			
	2				11530				
	3				10520				
13	1	520,7			11130	11050			
	2				12090				
	3				9930				
14	1	572,3			15740	14340	18520		
	2				14030		18900		
	3				13260		17600		
15	1	562,4			7530	7060	18980		
	2				6850		18070		
	3				6800		17010		
16	1	563,3			13310	11950			
	2				11990				
	3				10540				

Katsekeha	Pos.	Terve katsekeha tihedus (kg/m ³)	Proovitüki tihedus (kg/m ³)	Niiskussisaldus (%)	Em,g (MPa) nihkedeformatsiooniga	Keskmine	E _{dyn} (MPa)	Paindetugevus (MPa)	Korrigeeritud paindetugevus (MPa)
17	1	414,2			7000	7130			
	2				7460				
	3				6930				
18	1	529,8			11280	10840			
	2				11420				
	3				9830				
19	1	400,8			8630	8670			
	2				8980				
	3				8410				
20	1	473,5			8960	8580			
	2				9310				
	3				7460				
21	1	432,4			7440	6340			
	2				5820				
	3				5750				
22	1	413,5			9250	8270			
	2				7400				
	3				8150				
23	1	475,5	459,5	15,9%	10110	9470			
	2				9290				
	3				9010			53,6	42,1
24	1	499,6	456,3	9,9%	8210	9050	5450		
	2				9570		11510		
	3				9370		2600		
25	1	477,2	455,9	8,8%	11890	12860		60,3	47,4
	2				13820			63,0	49,5

Katsekeha	Pos.	Terve katsekeha tihedus (kg/m ³)	Proovitüki tihedus (kg/m ³)	Niiskussisaldus (%)	Em,g (MPa) nihkedeformatsiooniga	Keskmine	E _{dyn} (MPa)	Paindetugevus (MPa)	Korrigeeritud paindetugevus (MPa)
26	1	501,6	476,2	13,8%	8100	7610		44,1	34,7
	2				8390				
	3				6340				
27	1	351,3	336,1	12,3%	5710	5590	11390	18,7	14,7
	2				6090		13090		
	3				4980		12530		
28	1	483,8	488,4	13,4%	11080	10180		57,3	45,1
	2				9400				
	3				10050				
29	1	429,5			9340	9220	21560		
	2				9510		20940		
	3				8800		19660		
30	1	539,9	530,2	10,6%	9690	10820			
	2				11400				
	3				11370				
31	1	461,9	446,3	9,5%	12450	12210			
	2				11790				
	3				12390				
32	1	469,9			5330	7440			
	2				7780				
	3				9210				
33	1	433,5			9220	10010			
	2				10370				
	3				10440				
34	1	546,6			12400	11830	15590		
	2				11590		12360		
	3				11490		18960		

Katsekeha	Pos.	Terve katsekeha tihedus (kg/m ³)	Proovitüki tihedus (kg/m ³)	Niiskussisaldus (%)	Em,g (MPa) nihkedeformatsiooniga	Keskmine	E _{dyn} (MPa)	Paindetugevus (MPa)	Korrigeeritud paindetugevus (MPa)
35	1	502,8	477,7	9,7%	12220	12470			
	2				12950				
	3				12230				
36	1	424,5	398,3	9,8%	7590	7920			
	2				7820				
	3				8360				
37	1	402,4	384,2	8,6%	11620	11590			
	2				11280				
	3				11860				
38	1	475,8			10840	10820			
	2				11270				
	3				10340				
39	1	446,2			10310	10690			
	2				11280				
	3				10490				
40	1	417,1			7920	7700			
	2				7940				
	3				7240				
41	1	430,6	397,3	9,5%	9520	10250	19900		
	2				10040				
	3				11200			42,7	33,6
42	1	422,5	410,9	10,2%	8460	8880		53,6	42,1
	2				9300			44,7	35,1

Katsekeha	Pos.	Terve katsekeha tihedus (kg/m ³)	Proovitüki tihedus (kg/m ³)	Niiskussisaldus (%)	Em,g (MPa) nihkedeformatsiooniga	Keskmine		Paindetugevus (MPa)	Korrigeeritud paindetugevus (MPa)
43	1	383,9	347,7	8,8%	8430	7570	15670		
	2				6940		11160		
	3				7340			30,4	23,9
44	1	494,4			10710	10390			
	2				10810				
	3				9640				
45	1	550,2			11810	12400			
	2				12010				
	3				13390				
46	1	535,3			11850	11180			
	2				10270				
	3				11410				
47	1	432,5			11550	11300			
	2				11440				
	3				10920				
48	1	457,4			10930	11160			
	2				10970				
	3				11590				
49	1	443,7			12090	12320	11910		
	2				12680		11420		
	3				12200		11460		

Katsekeha	Pos.	Terve katsekeha tihedus (kg/m ³)	Proovitüki tihedus (kg/m ³)	Niiskussisaldus (%)	Em,g (MPa) nihkedeformatsiooniga	Keskmine	E _{dyn} (MPa)	Paindetugevus (MPa)	Korrigeeritud paindetugevus (MPa)
50	1	438,1	420,8	10,9%	10320	11250	15130		
	2				11530		13360		
	3				11900		16540		
51	1	448,4			10640	11600			
	2				11340				
	3				12830				
52	1	469,6			12260	11790			
	2				11910				
	3				11210				
53	1	489,6	468,3	11,1%	10010	9790			
	2				9830				
	3				9530				
54	1	432,5	435,9	9,5%	9970	9820		61,0	47,9
	2				10590				
	3				8910				
55	1	499,1	493,8	11,2%	11770	12350			
	2				11840				
	3				13430			56,7	44,6
56	1	435,2	416,1	9,3%	10130	10550			
	2				9560				
	3				11950			57,5	45,2