



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO
INSENERITEADUSKOND
Materjali- ja keskkonnatehnoloogia instituut

**KASE-, HAAVA- JA LEPASPOONIST TOODETUD
VEDRUDE SURVETUGEVUSE MÄÄRAMINE
ERINEVATE ÕHUNIISKUSTE JUURES**

**DETERMING THE COMPRESSIVE STRENGTH OF
SPRINGS MADE OF BIRCH, ASPEN AND ALDEN
VENEERAT DIFFERENT HUMIDITY LEVEL**

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Ott Kaarel Koiva

Üliõpilaskood 178889 EANB

Juhendajad : Anti Rohumaa, teadur
Heiko Kallakas, teadur

Tallinn 2023

(Tiitellehe pöördel)

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

"....." 20.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 20.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

".....".....20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Ott Kaarel Kõiva

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Kase- haava- ja lespaspoonist toodetud vedrude survetugevuse määramine erinevate õhuniiskuste juures.

mille juhendaja on Anti Rohumaa

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.

09.01.2023

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.

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Ott Kaarel Kõiva, 178889 EANB
Õppekava, peeriala: EANB, Materjalitehnoloogia
Juhendaja(d): teadur, Anti Rohumaa, 6202910
teadur, Heikko Kallakas, 6202910
Konsultant: Karl Partel, Raiku Packing OÜ; (+372) 55611770 ;
tebeniidu@hotmail.ee

Lõputöö teema:

Kase-, haava- ja lespaspoonist toodetud vedrude survetugevuse määramine erinevate õhuniiskuste juures

Determining the compressive strength of springs made of birch, aspen and alder veneer at different humidity level

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Kaardistada katsemeetodid pakkematerjalide omaduste välja selgitamiseks
2. Uurida sobilikke treimisparameetreid õhukeste spoonilehtede tootmiseks.
3. Töötada välja meetodika spoonist vedrude testimiseks
4. Uurida puitvedrude survetugevuse omadusi järgnevates tingimustes:
 - a. Erinevate puiduliikide korral
 - b. Erinevate paksuste juures
 - c. Erinevate niiskustasemete juures

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Teema valik	05.01.2022
2.	Kirjandusega tutvumine ja tegevusplaani koostamine	10.02.2022
3.	Spoonide treimise katsetused	10.03.2022
4.	Katse kava koostamine	15.04.2022
5.	Survekatsetused katsekehadega	20.10.2022
6.	Katsetulemuste jooksev analüüs	25.12.2022

7.	Koondjäreldeste tegemine, töö vormistamine ja esitamine	08.01.2023
----	---	------------

Töö keel: Eesti **Lõputöö esitamise tähtaeg:** ".....".....20....a

Üliõpilane: Ott Kaarel Kõiva ".....".....20....a
/allkiri/

Juhendaja: Anti Rohumaa ".....".....20....a
/allkiri/

Juhendaja: Heikko Kallakas ".....".....20....a
/allkiri/

Konsultant: Karl Partel.. ".....".....20....a
/allkiri/

Programmijuht: Tiia Plamus..... ".....".....20....a
/allkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

SISUKORD	6
EESSÕNA	7
Lühendite ja tähiste loetelu	8
SISSEJUHATUS	9
1 Teoreetiline osa	11
1.1 Ülevaade pakkematerjalidele	11
1.2 Ülevaade puiduliikide omadustest	12
1.3 Pakkematerjalide katsemeetodid	13
1.3.1 Vibratsiooni test.....	14
1.3.2 Survetest	14
1.3.3 Kliimatingimuste test.....	16
1.3.4 Põrutustest/Cushion curve	17
2 Materjalid ja katsemeetodid	19
2.1 Kasutatav puitmaterjal	19
2.2 Spooni valmistamine	19
2.3 Vedrude valmistus	20
2.4 Vedrude konditsioneerimine.....	21
2.5 Survekatse	22
3 Tulemused ja Analüüs	25
KOKKUVÕTE	35
Summary	37
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	39

EESSÕNA

Käesoleva lõputöö teema sai valitud ettevõtte Raiku algatusel. Töö eesmärgid ja protseduurid kooskõlastati ja teostati koostöös ettevõtte Raiku Packing OÜ-ga. Töö autor teostas tegevusplaani, töötas välja metoodika puidu kui pakkematerjali katsetamiseks ja teostas praktilised katsetused. Töö koostati ja põhilisemad andmed koguti TalTech Puidutehnoloogia laboris, kus töö autorit juhendasid dr. Heikko Kallakas ja dr. Anti Rohumaa.

Lõputöö sisuks on uurida katseliselt treimisparameetreid õhukeste puidulehtede tootmiseks. Töötada välja metoodika katsekehade testimiseks ja uurida puitvedrude survetugevuse omadusi erinevate puiduliikide, paksuste ja niiskustasemetega juures. Katse tulemustele tuginedes leitakse, milline materjal on kõige sobilikum edasiseks puit spoonvedru kanga ja mati tootmiseks.

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

CEAP- circular economy action plan, (ringmajanduse tegevuskava, eesti keeles)

EMC- Equilibrium moisture content (tasakaalu niiskus)

EPP- Expanded polypropylene (vahtpolüpropüleen)

EPE- Expanded polyethylene (vahtpolüetüleen)

EPS-Expanded polystyrene (vahtpolüstüreen)

PLA- polylactic acid (polüpiimhape)

ASTM- American Society for Testing and Materials

ISO- International Organization for Standardization

SISSEJUHATUS

Tarbimise ja virtuaalkaubanduse kasv on suurendanud vajadust erinevate pakkematerjalide järele, mis taas omakorda on suurendanud pakkematerjalidest jäätmete kasvu. Eurooplane toodab keskmiselt 180kg pakke jäätmeid aastas, millest 35kg moodustavad plastikust jäätmed ja kõigest 1/3 läheb ligikaudu ümbertöötlemisele [1]. Euroopa parlament on võtnud sihiks muuta Euroopa, aastaks 2050, kliimaneutraalseks. Sellega seoses võeti 2020 käiku ringmajanduse tegevuskava (CEAP- Circular economy action plan), mille üheks lüliks on pakendijäätmete vähendamine, keskkonnasõbralike alternatiivid soodustamine, kui ka polümeeridest pakendimaterjalide kasutuse vähendamine . [2]

Ettevõtte RAIKU PACKING OÜ puhul on tegemist start-up ettevõttega, kes alates 2021 aasta algusest on turule toomas puidust toodetud alternatiivi mullikilele ja plastikust täitegraanulitele. Raiku toode kujutab endas õhukesest puidulehest ehk spoonist toodetud vedru struktuuriga pakkematerjali, mis tänu oma struktuurile on hea painduvusega ja pakub head kaitset tootele. Toode on tehtud 100% naturaalsest puidust, tänu millele on ta biolagunev ja komposteeritav. Vedrusid omavahel põimides on võimalik toota kangaid ja matte, mida saab samuti pakkimisel pehmenusmaterjalina kasutada. Kodulehe põhjal sobib Raiku pakkematerjal kõige paremini keraamikast ja klaasist nõude ja erinevate pakendite pakendamiseks.

Antud töö eesmärgiks on uurida kase-, haavast ja lepast valmistatud spoonist vedrude sobivust pakendi täitematerjalina.

Töö eesmärgi saavutamiseks:

1. Kaardistati katsemeetodeid pakkematerjalide omaduste välja selgitamiseks
2. Uuriti katseliselt sobilike treimisparameetreid õhukeste spoonilehtede tootmiseks
3. Töötati välja meetodika spoonist vedrude testimiseks
4. Uuriti puitvedrude survetugevuse omadusi järgnevates tingimustes:
 - a. Erinevate puiduliikide korral
 - b. Erinevate paksuste juures
 - c. Erinevate niiskustasemete juures

Bakalaureusetöö eksperimentaalne osa hõlmab ülevaadet 0.5mm ja 0.3mm kase-, haava- ja lepaspooni treimisest ning ülevaadet treitud materjalist toodetud katsekehade surveomadustest nelja erineva õhuniiskuse taseme juures. Katsekehi hoiti 48h neljas erineva õhuniiskusega keskkonnas: 30%, 50%, 65% ja 90%.

Bakalaureusetöö on üles ehitatud kolme suurema peatükina. Töö üles ehitusel on lähtutud töö eesmärgist ja esitatud nõuetest. Töö esimeses osas antakse ülevaade laialt levinud pakkematerjalidest, tutvustatakse kolme Eestis levinuima puiduliigi omadusi ja erinevaid katsemeetodeid pakkematerjali omaduste välja selgitamiseks. Teises osas kirjeldatakse spoonist katsekehade valmistamist ning kasutatud katsemeetodit. Kolmandas osas tuuakse välja katsetulemused ja nende analüüs ning lisaks tulemustele põhinev kokkuvõte.

1 TEOREETILINE OSA

1.1 Ülevaade pakkematerjalidele

Toodete pakendamisel on kindlad nõuded, mis teevad selle toote turvalise transportimise võimalikuks. Näiteks kergesti riknevad toidud nagu liha, rikneks valesti pakendamisel väga kiirelt. Sama kehtib ka elektroonika toodetele, kus tuleb vältida nii staatilise elektri teket kui ka muid ohte, mis võivad tekkida selle teekonnal tarbijani. Aastatega on aina olulisemat rolli hakanud mängima ka toodete esteetilisus ja keskkonnasõbralikkus [3]

Antud töö keskendub lahtisele pakketäite materjalile. Lahtise pakkematerjali eesmärk on pakkuda suhteliselt kergetele toodetele kuluefektiivset kaitset põrutuse või vibratsiooni eest transportimisel ja käsitlemisel. [4]

Turul olevatest lahtistest pakketäite materjalidest on enim levinud purustatud papp, mullikile ja pehmendusgraanulid [5]. Igal aastal tekitab eurooplane keskmiselt 180kg pakendijäätmeid ja tegu on suureneva trendiga [1]. Murekohaks on tekkinud plastikust pakkematerjalide jäätmed, mis tihti lõpetavad looduses ja kahjustavad seal elukeskkonda [6], [7]. 2022 aasta andmetel on kümne aastaga inimesest tulenev plastikjäätmete hulk suurenenud 23% ehk umbes 6,5kg. Keskmiselt toodab keskmine Euroopa kodanik kokku 34,6kg plastikust pakkejäätmeid, millest 13kg läheb ümbertöötlemisele. [1] Euroopa parlament võttis aastal 2019 vastu otsuse, millega keelustati 2021 aastast Euroopa liikmesriikides ühekordsed plastist toodetud nõude müümine [8]. Euroopa liit on seadnud eesmärgiks olla 2050 aastaks kliimaneutraalne. Sellega seoses kinnitati 2020 märtsis ringmajanduse tegevuskava (CEAP), milles plaanitakse vähendada pakendijäätmeid, tuua turule rohkem keskkonnasõbralikemaid alternatiive ja vähendada polümeersete pakendmaterjalide kasutamist [2].

Mullikile on üks kasutatavamatest täite- ja kaitsematerjalidest, mida kasutatakse eriti elektroonika seadmete transportimisel. Tema eeliseks on odav hind, hea vastupidavus, kergus ja pakendi kaitse niiskuse vastu. Teoorias on mullikile ka korduvkasutatav, kuid inimeste harjumuste ja mittetoimiva ümbertöötlemise süsteemi tõttu need sinna väga ei jõua.[5] Keskkonnasõbralike alternatiividena on turul olemas ka üksikud ettevõtted nagu EcoBox ja GreenLiving, mis toodavad 100% biolagunevat mullikilet. Biolaguneva mullikile omadused sarnanevad tavalisele. Biolagunevaks muudab selle d2WTM ühendi (Symphony Environmental Technologies PLC, Inglismaa) lisamine tootmisel. Antud

ühend lagundab mullikile päikese- valguse, vee ja kuumuse abil veeks, süsihappegaasiks ning bio massiks. Kuna toode vajab lagunemiseks siiski väga kindlaid tingimusi, siis tavatingimustes võib see jääda siiski lagunemata. [5]

Enimlevinud täitematerjalina kasutatakse ka pehmendusgraanuleid, mida algselt toodeti vahtpolüstüreenist, kuid nüüd on ilmunud aina rohkem turule ka graanuleid mis on tehtud kas taaskasutatud polüstüreenist või siis maisi-, kartuli- või nisutärklisest [5]. Polüstüreen ei lahustu vees, kuna ta ei sisalda hüdroksüülrühmi. Polüstüreeni on võimalik lahustada atsetoonis, mis on aga tervisele ohtlik. Tähtsusest toodetud graanulid, mis on polaarsed ja sisaldavad hüdroksüülrühmi, lahustuvad vees ning lagunemisel tekib metaan [9].

Kasutusele on tulnud ka mitmeid erinevaid biolagunevaid polümeere, millest populaarsemad on polüester 24%, PLA 27% ja tähtsuse segust toodetud polümeerid 42% [10]. Lisaks on populaarne ja keskkonnasõbralik alternatiiv ka pabermass, mille eeliseks on see, et seda on võimalik väga palju kordi ümber töödelda [5]. Viimastel aastatel on hakatud looma ka erinevaid alternatiivseid pakkematerjale seentest, vetikatest, suhkrust, lambavillast ja saepurust [11].

Puit ja erinevad puittooted on ajaloost ühed vanimad kasutatavad pakkematerjalid. Esimesed puidust tehtud pakkematerjalid olid 12 000 aastat tagasi puidu laastudest tehtud korvid [12]. Täitematerjalidena on puitu kasutatud eelkõige paber näol, purustatud papina, saepuruna või peenete puidu laastudena. Polümeersed pakketäite materjalid on oma odava hinna, homogeensemata omaduste ja kergusega aga need turult eemale tõrjunud. [13]

1.2 Ülevaade puiduliikide omadustest

51% Eestist on kaetud metsaga, sellest 30% on kasepuud, 9% lepu puud ja 4% haavapuud [14]. Võrreldes erinevate puuliikide tugevust ja jäikust on näha et kõige suurema rebenemis mooduliga on kask 114.3 M(Pa), sellele järgneb lepp 91.4 M(Pa) ja viimasele kohale jääb haavapuit 62.0 M(Pa) [15].

Niiskus ja vesi mõjutavad märkimisväärselt puidust toodete füüsikalisi ja mehaanilisi omadusi, vastupidavust bioloogilisele riknemisele ja mõõtmete stabiilsust [16]. Puidus toimub anisotroopsuse ja kiulise ehituse tõttu pundumine ja kuivamiskahanemine

erinevates suundades erinevalt. Puidu pikisuunas on kuivamiskahanemine vaevu märgatav ja jääb sõltuvalt puiduliigist vahemikku 0.1-0.35%, raadiuse suunas võib kuivkahanemine olla kuni 4% ja tangensiaalsuunas 8% [17]. Niiskussisalduse suurenemisel, 5%-lt kuni 25%-ni, võivad puidu tugevusomadused väheneda kaks korda [18]. Tabel 1.2 kirjeldab, kuidas olenemata puiduliigist suureneb puidu paindetugevus ja elastsusomadused märgatavalt puidu niiskuse vähenemisel.

Puidu töötlemine kõrgemal temperatuuril kui 100 °C, muudab selle vähem niiskusiavaks [19]. Seda on märgata termopuidu ehk kõrgel temperatuuril töödeldud puidu (220°C) korral, mille tasakaaluniiskuse sisaldus (EMC) on töötlemata puiduga võrreldes poole võrra väiksem. Suurema suhtelise õhuniiskuse korral on puidu niiskuse väärtuste erinevus veel suurem. [20]

Tabel 1.2 Puidu niiskuse mõju paindetugevusele ja elastsusmoodulile [21]

	Niiskuse sisaldus	Paindetugevus kPa	Elastsusmoodul (MPa)
Punane lepp (<i>Alnus rubra</i>)	Märg puit	45000	8100
	12%	68000	9500
Kollane Kask (<i>Betula alleghaniensis</i>)	Märg puit	57000	10300
	12%	114000	13900
Hübriidhaab (<i>Populus tremula</i>)	Märg puit	35000	5900
	12%	58000	8100

1.3 Pakkematerjalide katsemeetodid

Toote pakend ja kasutatud materjalid peavad tagama kaitse tootele ja tõenäolistele ohtudele, mis võivad tekkida transportimisel tehasest tarbijani. Ohud, mis toodet mõjutavad on põrutus, surve virnastades ja vibratsioon. Lisaks võib toodet mõjutada ka niiskus, kemikaalid, tolm ja staatiline elekter. Ohud, mille eest pakend toodet kaitsma peab, määravad ära toote iseärasused ja kriitilised kohad. Selleks, et transportimisel vältida sobimatuid üllatusi, on oluline õige pakendi valik ja pakendi omaduste testimine [3]

1.3.1 Vibratsiooni test

Vibratsiooni, kui nähtust, on võimatu välistada, kuna see esineb kõikides transpordi liikides. Transportimisel tekkiv vibratsioon võib põhjustada pakendi või toote liikumist, kahjustumist või hävimist. Üheks vibratsiooni ohuks on tootes tekkiv toote vibratsiooni resonants, mis tekitab materjalis lisa pingeid ja defekte. Virna transportimisel võib kogu virn minna resonantsi, mis suurendab dünaamilist koormust alumisel pakendil [3].

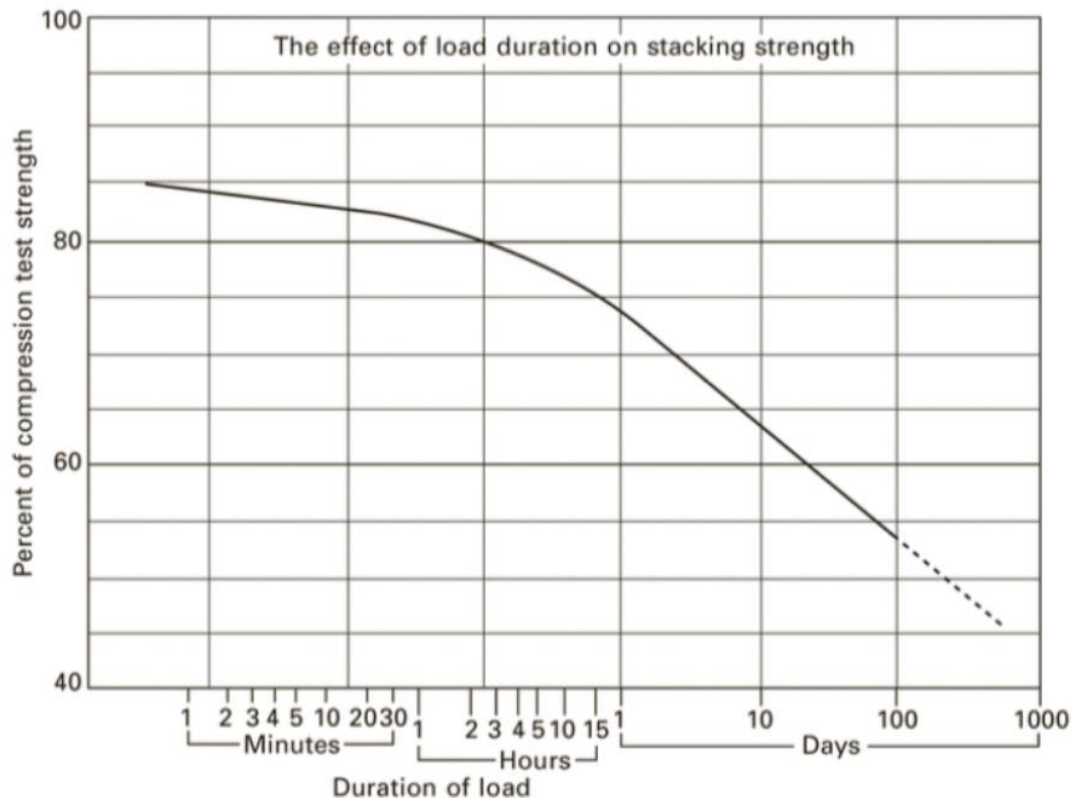
Pakendi vibratsiooni kaitseomaduste välja selgitamiseks saab kasutada standardit ASTM D999-08(2015), mis täiendab ISO standardeid ISO 8318 ja ISO 2247. Katse eesmärk on hinnata sisendpakendi ja sulguri tugevust. Pakendi testimiseks on kasutusel neli erinevat meetodit, millega simuleeritakse erinevaid vibratsiooni tasemeid, millega pakend võib transportimisel kokku puutuda. [22]

1. Meetod A- korduv pörutuskatse (vertikaalne liikumine)- sobib üksiku pakendi testimiseks, mida võidakse transportida kinnitamata
2. Meetod A2- korduv pörutuskatse (pöördliikumine)
3. Meetod B- ühe pakendi resonantsi test- testib üksiku konteineri ja selle sisepakendi võimet kaitsta selle sisu
4. Meetod C – kaubaaluste koormus, ühikukoormus või vertikaalse virna resonantsi test- testib konteinerite tugevust, et need taluksid virnastatud dünaamilisi koormusi.

1.3.2 Survetest

Pakendi sattumine surve alla on vältimatu nii pakendi hoiustamisel ladudes, kui ka transportimisel kliendini. Survet, mis võib ohustada pakendatud toodet võid liigitatakse kaheks: staatiliseks ja dünaamiliseks. Staatiline surve on omane pakenditele lao tingimustes, kus nad tavaliselt on hoiustamise eesmärgil asetatud üksteise peale. Dünaamilise surve juures mõjutab pakendit veel lisaks erinevad tingimused ja jõud nagu vibratsioon, tsentripetaaljõud, mis mõjutavad pakendi surveomadusi transportimisel.

Raamatus „Packing Technology- Fundamentals, materials and processes“ on kirjeldatud illustreerivat näidet, kus lainepapp, mille survetugevus on 100kg, peaks dünaamilise surve juures koormusega 85kg vastu 10 minutit, 60kg koormuse juures 10 päeva ja koormuse puhul, mis ei ole kõrgem kui 55% dünaamilisest tugevusest, peaks lainepapp vastu 100 päeva. [3] Antud protsessi kirjeldab ka joonis 1.3.2



Joonis 1.3.2 Lainepapi survetugevuse suhe ajaga [3]

Lisaks on papi puhul teada, et niiskus mõjutab märkimisväärselt katse tulemust. Suhtelise niiskuse tõusul 40%-90%-le langeb tavalise pakendi tugevus 50% [3]

Pakkematerjali survetugevuse välja selgitamiseks kasutatakse ka standardit ISO 12048 [23] või ASTM D642-20 [24]. ISO 12048 meetodit kasutatakse ainult täidetud pakendi survetugevuse hindamiseks. Selgitades välja, millist tugevust ja kaitset pakend terviklikuna tootele pakub juhul kui see peaks sattuma surve alla. Lisaks sobib antud meetod ka pakendi virnastus survetugevuse leidmiseks.

ASTM D642-20 standard lähtub nii ISO12048 standardile kui ka TAPPI T 804 standardile ja on mõeldud nii täidetud pakendi või siis pakendi ja tema komponentide eraldi testimiseks. Katse ei ole siiski mõeldud toote survetugevuse testimiseks. [24] Olenevalt sellest, kas testimiseks kasutatakse fikseeritud või pöörd plaadiga testimise seadet on võimalik mõõta pakendi survetugevust nii külgedelt, servadelt kui ka nurgast. Katse alustuseks on oluline määratleda katse lõpu kriteeriumid. Maksimaalse survekoormuse leidmiseks vajaminev piir määratletakse kas deformatsiooni piiriga või siis survekoormuse jõu vähenemisega. Katse alustamisel on oluline katsekeha asetada plaatide keskele ja määrata plaatide liikumiskiiruseks $12,7 \pm 2,5$ mm/min. Katse kestab kuni katsekeha murdumiseni või soovitud piirmäärani jõudmisel. [24]

Kaupo Leht on enda magistritöös „ Pakendi pehmendusmaterjalide efektiivsuse määramine „ kasutanud ISO 1856:2001 standardit ja välja selgitanud viie populaarsema pehmendusmaterjali survetugevuse. Kasutatud katsekehade parameetrid ja saadud keskmine survetugevus on välja toodud tabelis 1.3.2 Katsed viidi läbi temperatuuril 20°C.

Tabel 1.3.2 Erinevate pakkematerjalide survetugevused [25]

Katsekeha nimetus	Pikkus (mm)	Laius (mm)	Paksus (mm)	Tihedus (kg/m³)	Katsekehade arv	Survetugevus (kPa)
Kärgpapp (honeycomb cardboard)	100	100	20	N/A	5	410
EPP	100	100	45	35	5	200
EPE	100	100	45	30	4	200
Õhuke mullikile	100	100	40	N/A	3	200
Suur mullikile	130	60	45	N/A	4	97

1.3.3 Kliimatingimuste test

Pakendi transportimisel võivad pakendi paiknemise keskkonningimused märkimisväärselt muutuda. Pakkematerjal peab suutma kaitsta pakendit ka erinevates keskkonningimustest.

Pappmaterjali puhul, mida kasutatakse enamik toodete pakendamisel, on teada, et niiskus mõjutab märkimisväärselt materjali survetugevust. Nimelt suhtelise niiskuse muutuse juures 40%-90%-le langeb tavalise pakendi tugevus 50% [3]

Pakendi tugevus ja kaitseomaduste välja selgitamiseks hoitakse pakendit enne katse algust 72h soovitud kliimatingimustel. Sobivad katsetingimused, mis vastavad standardile ASTM D4332-22 on välja toodud tabelis 1.3.3 [26]

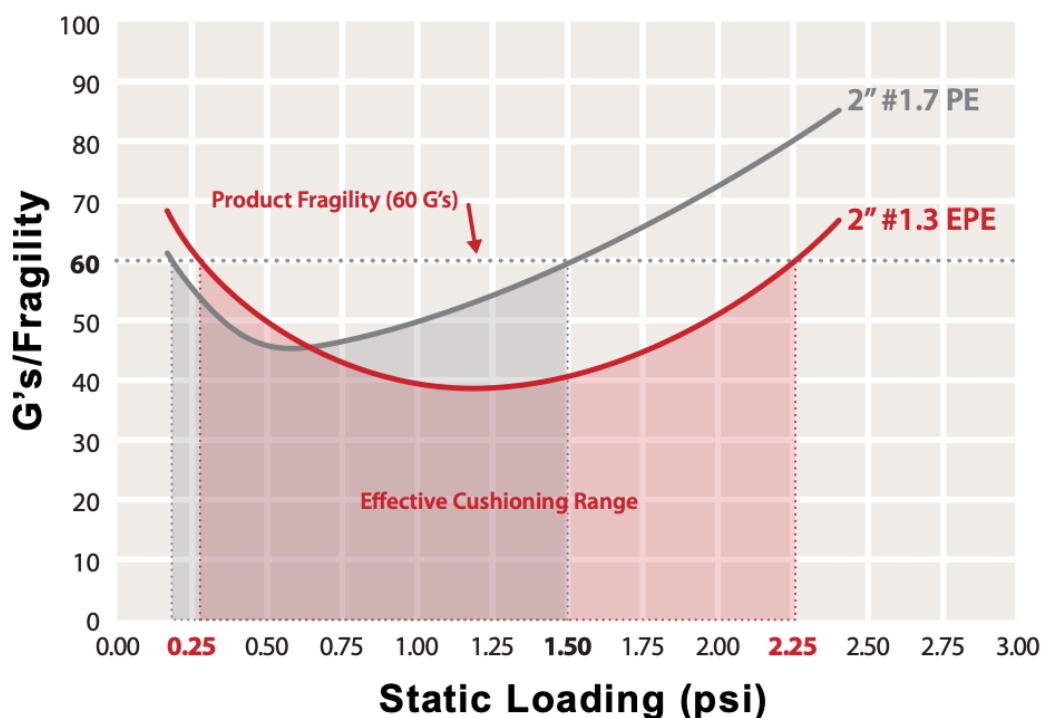
Katsekehade nappuse tõttu me tootele kõiki kliimakatseid ei teinud, vaid testisime katsekehi toatemperatuuril neljal erineva niiskustingimusega: 30%, 50%, 65% ja 90%

Tabel 1.3.3 ASTM D4322-22 standardi kliimakatse tingimused[26]

Keskkonnatingimus	Temperatuur °C	Suhteline niiskus %
Krüogeenne	-55 ± 3 °C	...
Ekstreemne külm	-30 ± 2 °C	...
Külma ladu	-18 ± 2 °C	...
Külmkapp	5 ± 2 °C	85 ± 5
Parasvööde kõrge niiskusega	20 ± 2 °C	90 ± 5
Troopika	40 ± 2 °C	90 ± 5
Kõrb	60 ± 2 °C	15 ± 5

1.3.4 Põrutustest/Cushion curve

Pakendi üheks põhilisemaks eesmärgiks on pakkuda kaitset ka potentsiaalse kukkumise eest. Selleks, et osata valida õigeid pehmendusmaterjale ja nende kogust kasutatakse nn. Cushion curve graafikuid. Graafik moodustatakse katsete seeriaga, kus kindla suurusega raskused kukutatakse kindlaks määratud kõrguselt katsekeha peale. Katse käigus mõõdetakse katsekeha neeldunud löögienergia suurus. Saadud andmete tulemused kuvatakse graafikul, mis on välja toodud graafiku joonisel 1.3.4 Vertikaaltelg märgib erinevaid toote harpustasemeid ja horisontaaltelg staatilisi koormusi. [27]



Joonis 1.3.4 Cushion curve illustreeriv graafik [28]

Selleks et graafikut kasutada tuleb eelnenvalt tuvastada kaitset vajava toote haprus ja potentsiaalne kukkumiskõrgus. Toote haprust märgitakse kas „fragility” nimega või „g-faktor”. Toote haprus märgistatakse üldiselt g ühikutes, mis näitab maksimaalset aeglustumist, mida toode võib kahjustamata taluda. Mida hapram on toode seda madalam on tema g-faktor [28]. Toote hapruse hindamiseks kasutatakse ASTM standardit D3332-99 (2016).

Toote hapruse tase mõjutab otseselt ka toote kaitseks valitud pakkematerjali ja selle paksust. Kui toote g-ühik on märgitud kõrgemana kui tegelik, tähendab see, et toode ise ei suuda taluda sellist koormust nagu ennustati, mis tähendab et toode on alapakitud ja selle tulemusel võib transportimisel tekkida rohked kahjud. Kui g-tegur on hinnatud aga madalamalt, on toode aga üle pakitud, mis tähendab, et toote pakend on tarbetult kallis ning suurte koguste korral tähendab suurt rahalist kahju. [28]

2 MATERJALID JA KATSEMEETODID

2.1 Kasutatav puitmaterjal

Antud töös kasutati Eestis levinud puiduliike: haava, leppa ja kaske. BC kvaliteediga haava-, leppa- ja kasepalgid tarniti sisse RMK-lt 2021 aasta sügisel. Kõik palgid vastasid RMK palkide standardile. Puidulehed toodeti TalTech puidutehnoloogia laboris kasutades spoonitreimispinki, lisaks katsetati ettevõtte Raiku poolt pakutud 0,2mm kasespooni. Ettevõtte Raiku tootis spoonidest kõik katsetamisel vajalikud vedrud.

Ettevõttel oli soov leida optimaalne spooni paksus, millest tulevikus vedrusid toota. Teda oli, et mida õhem on spoon, seda rohkem on võimalik ühest palgist materjali toota. Optimaalse puiduliigi ja materjali paksuse leidmiseks teostati survetugevuskatsed neljas erinevas kliimatingimuses: 30%, 50%, 65% ja 90% (RH) niiskuse juures. Testiti erinevat liiki ja erineva paksusega vedrusid.

2.2 Spooni valmistamine

TalTech puidutehnoloogia laboris on kasutusel RAUTE spoonitreimispink Raute 3HV66 (Raute Oyj), millega tavaliselt treitakse spooni paksusega 0.5-3.2 mm. Antud töö eesmärgiks oli treida kasest, lepast ja haavast 0.3-0.5 mm paksust spooni.

Kasest õnnestus sobiva paksusega spooni toota muretult. Lepa ja haava puhul katsetati erinevaid palgi eeltöötlus tingimusi 0.3mm ja 0.5mm paksusega spooni treimiseks. Palkide erinevad eeltöötlus tingimused on välja toodud tabelis 2.2

Lepa ja kase puhul toodeti nii 0.3 mm kui ka 0.55 mm paksusi ja kase puhul kasutati ka Hiina ettevõtte Linyi Bait Wood Industry Co toodetud 0.2 mm kasespooni, millest samuti vedrusid katsetuseks toodeti.

Tabel 2.2 Tehtud palgi eeltöötlus tingimused enne treimist puiduliikide lõikes.

Materjal	Katsekehade grupi number	Materjali eeltöötlus enne treimist
Kasepalgid	1.	10 °C leotus 24h
	2.	45 °C leotus 48h
Leppa palgid	3.	10 °C leotus 24h
	4.	45 °C leotus 48h
Haavapalgid	5.	10 °C leotus 24h
	6.	45 °C leotus 48h
	7.	Konditsioneeritud 20°C juures 7 päeva
	8.	-2 °C juures väli tingimustes konditsioneeritud
	9.	-2 °C väli tingimustest toodud ja 24h 20 °C juures konditsioneeritud.

2.3 Vedrude valmistus

Treimiselt saadud materjal transporditi kilesse pakitult ettevõttele Raiku, kes tootis materjalist vedrud ehk katsekehad. Vedrusid toodeti kahel erineval ajaperioodil ja erinevate parameetritega. Tabelis 2.3 on välja toodud üldine tootmis parameetrite erinevus kahel erineval perioodil toodetud katsekehade suhtes. Esimesed katsekehad said toodetud aprillis 2022. Esialgsed vedrud toodeti kuivast spoonist ja madalamal temperatuuril. Hilisemad vedrud toodeti novembris 2022. Kõik katsekehad toodeti samast materjalist. Sama partii kvaliteet oli väga erinev. Sama materjali minimaalse ja maksimaalse paksuse vahe oli 0.08mm. Treimiste vahel hoiustati materjali laos 20 °C ja 38% õhuniiskuse juures. Hoiustamisel olid lepa- ja kase spoonid kuivamisel muutunud hapramaks. Selle tulemusel toodeti lepa- ja 0.2mm ja 0.3mm kase katsekehad niisutatult ja kõrgemal temperatuuril. Hilisemad 0.5mm kase katsekehad toodeti endiselt kuivast materjalist kuid võrreldes varasemalt toodetud katsekehadega olid need toodetud kõrgemal temperatuuril ja kiirema kiirusega. Mõlemal tootmisel olid erinevused ka masina seadistusel, täpsemad parameetrid jäävad avalikustamata.

Tabel 2.3 Mai ja novembri kuus toodetud katsekehade tootmis parameetrite erinevus.

Periood	Liik	Paksus	Materjal (kuiv/ märg)	Pressi kuumus (madalam/ kõrgem)	Masina kiirus (kiirem/ aeglasem)
Periood 1 (Mais toodetud katsekehad)	Lepp	0.3mm	Kuiv	Madalam	
		0.5mm	kuiv	Madalam	
	Kask	0.2mm	Kuiv	Madalam	
		0.3mm	Kuiv	Madalam	
		0.5mm	Kuiv	Madalam	Aeglasem
Periood 2 (Novembris toodetud katsekehad)	Lepp	0.3mm	märg	Kõrgem	
		0.5mm	märg	Kõrgem	
	Kask	0.2mm	Märg	Kõrgem	
		0.3mm	Märg	Kõrgem	
		0.5mm	Kuiv	Kõrgem	Kiirem

2.4 Vedrude konditsioneerimine

Testitavaid katsekehi hoiti neljas erinevas keskkonnas 24-72h.

- 1) Tava keskkond 30% RH ja 20-23°C
- 2) Climacell conditioning chamber 50% RH 20°C
- 3) ILKA conditioning chamber 65% RH 20°C
- 4) Niiske veekamber 90% RH ja 22°C

Tabel 2.4 Katsekehade arv erinevates niiskuskeskondades

Materjal	Spoonipaksus	30% RH ja 20°C	50%RH/20°C	65% RH/ 20°C	90% RH 22°C
Kask	0.2mm	10	10	10	10
Kask	0.3mm	10	10	10	10
Kask	0.5mm	10	10	10	10
Lepp	0.3mm	10	10	10	10
Lepp	0.5mm	10	10	10	10

90% niiskusega keskkonna loomiseks asetati katsekehad penoplast peale, mis asetati veega täidetud tunni. Anum suleti kaanega ja õhuavad täideti niiskusekindla teibiga (joonis 2.4). Kambri niiskustase mõõdeti katse lõppedes hügromeetriga.



Joonis 2.4 90% niiskuskamber katsekehadele

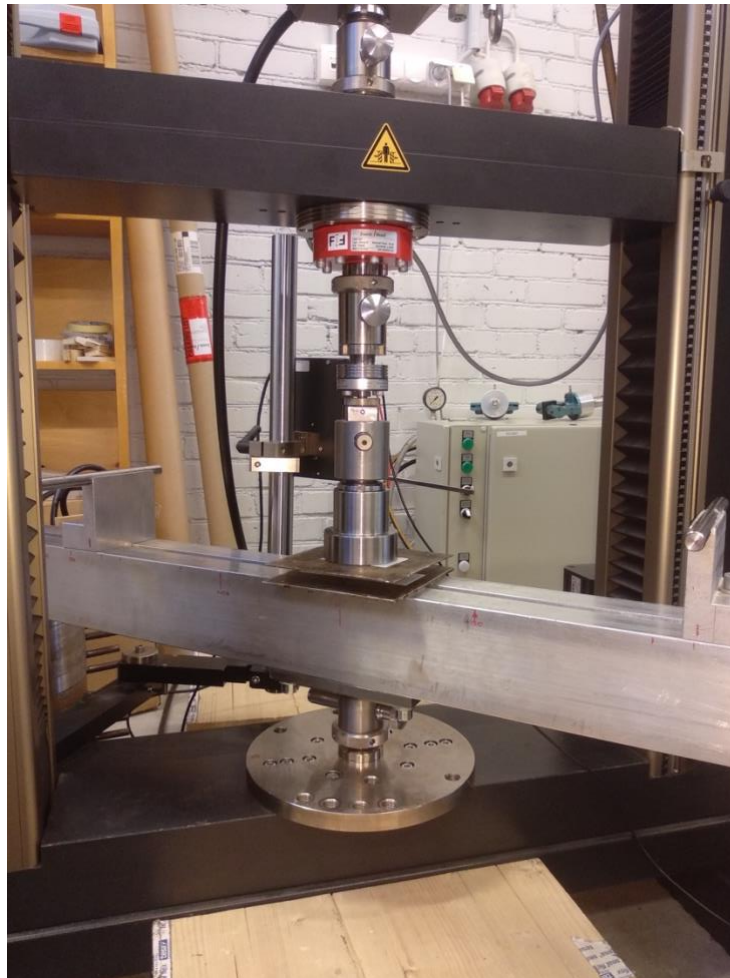
2.5 Survekatse

Raiku Packing OÜ poolt toodetud vedrudest lõigati käsitsi sobiva pikkusega katsekehad. Algselt lõigati katsekehad standardi ASTM D3501-05a järgi 100 mm pikkuseks. Seoses sellega, et iga vedru keerdude vahe oli erinev, siis lõplikult sai katsekehade pikkus määratud 11 keeru järgi.

Vedrude survetugevuse testimiseks kasutati Taltech puidutehnoloogia katseseadet ZwickRoell Z050 (Joonis 2.5). Soovitud tootele otsest standardit ei leitud, seega katsetustel lähtuti standarditest ASTM D642-20 ja ASTM D3501-05a. ASTM D642-20 on mõeldud pakkematerjalide ja nende komponentide survetugevuse leidmiseks, kuid antud standardis ei ole välja toodud katsekeha mõõtmed. ZwickRoell Z050 seadistati tabel 2.5 välja toodud parameetritega. Katsekeha kinnitati 150x150 mm suuruste katseseadme plaatide vahele. Alumise plaadi keskjoonele oli kinnitatud kahepoolne teip, kuhu peale asetati katsekeha.

Enne katsetust mõõdeti ära katsekeha pikkus, keerdude arv, spooni paksus, spooni riba laius, vedru kõrgus ja keermete vahe.

Saadud parameetreid kasutati valem 1.1 katsekeha pindala leidmiseks.



Joonis 2.5 ZwickRoell Z050

Spiraali pindala arvutamise valem:

$$A = n \times \sqrt{\pi \times D^2 \times P^2} \times l \quad (1.1)$$

Kus:

n - keerdude arv

D - Keskmine vedru kõrgus (mm)

P - keskmine keerme vahe (mm)

l - Spooniriba laius (mm)

A - Spiraali pindala (mm²)

Katsekehad, mis paiknesid ruumi niiskusest kõrgema niiskusega keskkonnas transporditi katseseadme juurde gripp kotis kahe kaupa. Katse kestis seni, kuni maksimaalne koormus oli saavutatud. Katse lõppes automaatselt, kui survetugevus

langes 15%. Saadud tulemustest leiti katsekeha survetugevus kasutades valem 1.2. Saadud tulemused teisendati kilopaskaliteks.

Survetugevuse valem

$$F = P \div A \quad (1.2)$$

Kus:

F - Surve tugevus M(PA)

P - Maksimaalne jõud F(max)

A - Katsekeha pindala (mm^2)

Tabel 2.5 ZwickRoell Z050 seadistuse olulised parameetrid

Parameetri nimetus	Parameetri näit
Katse kiirus	3 mm/min
Survekatse lõpetatakse automaatselt	15% langus Fmax
Surve pea nimijõud	500 N

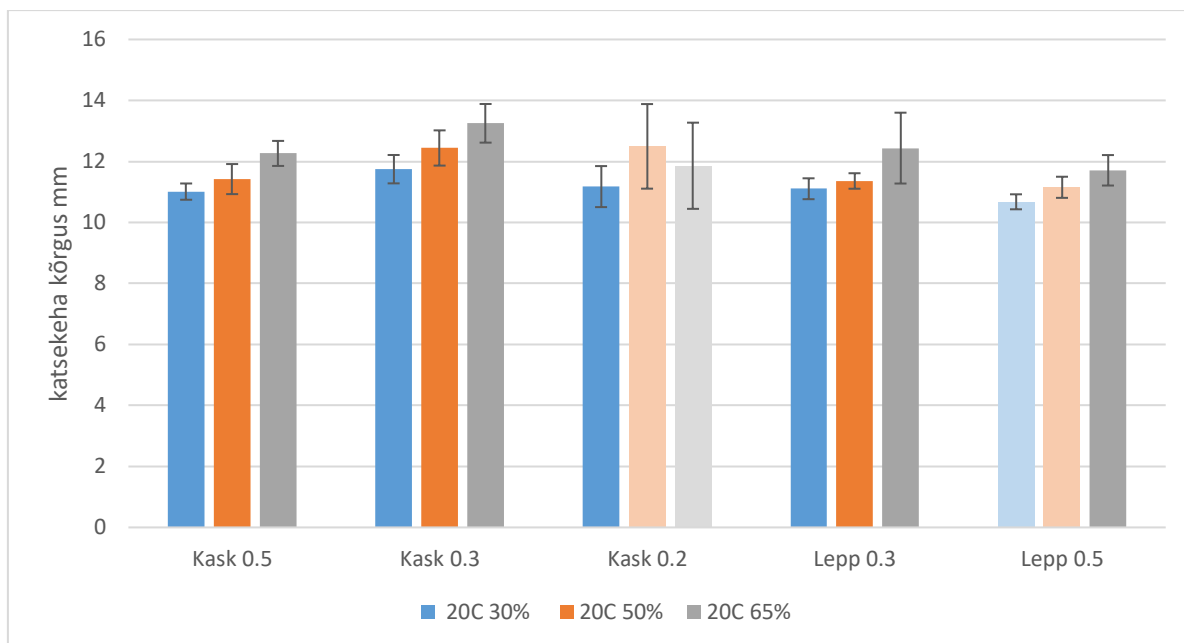
3 TULEMUSED JA ANALÜÜS

Kase ja leppa treides suudeti saada nii 0.3 mm kui ka 0.5 mm spooni. Haavapuiduga saadi 0.5 mm spoon, aga 0.3mm paksuse spooni treimine ebaõnnestus. Kui üldiselt leotatakse palke enne treimist 24h 40°C kraadises vees, siis antud meetodiga õnnestus saada 0.3 mm spoon ainult kase puhul. 10°C kraadise leotuse korral saadi 0.3mm spoon ka lepast. Haava palke prooviti lisaks leotamisele 10°C ja 45°C juures ka treida eeltöödelduna konditsioneerides 20°C ruumis 24h ja 7 ööpäeva. Lisaks sai proovitud treida palki mida oli konditsioneeritud väli tingimustest -2°C kraadi juures. Kõige väiksem paksus 0.45 mm saavutati väli tingimustes -2°C kraadi juures konditsioneeritud palgiga.

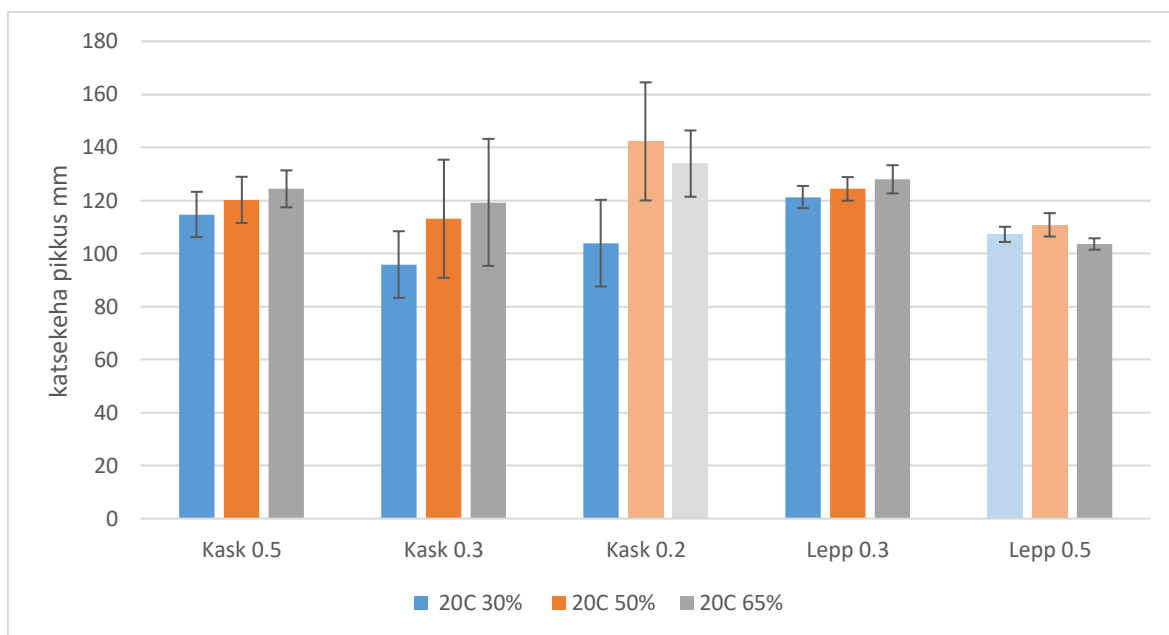
Kuna haava puhul 0.5 mm väiksemat spooni ei saadud siis haava puhul prooviti toota 0.5 mm paksusega vedrusid. Tootmisseedmega nendest aga edukalt vedrusid toota ei õnnestunud, mille tõttu haavapuidust katsekehi ei testitud.

Seoses sellega et katsekehi toodeti kahel erineval ajaperioodil erinevate tootmis parameetritega mille erinevus on välja toodud tabelis 2.3 siis joonistel tulbad mis on tuhmimad märgistavad periood 2 katsekehi.

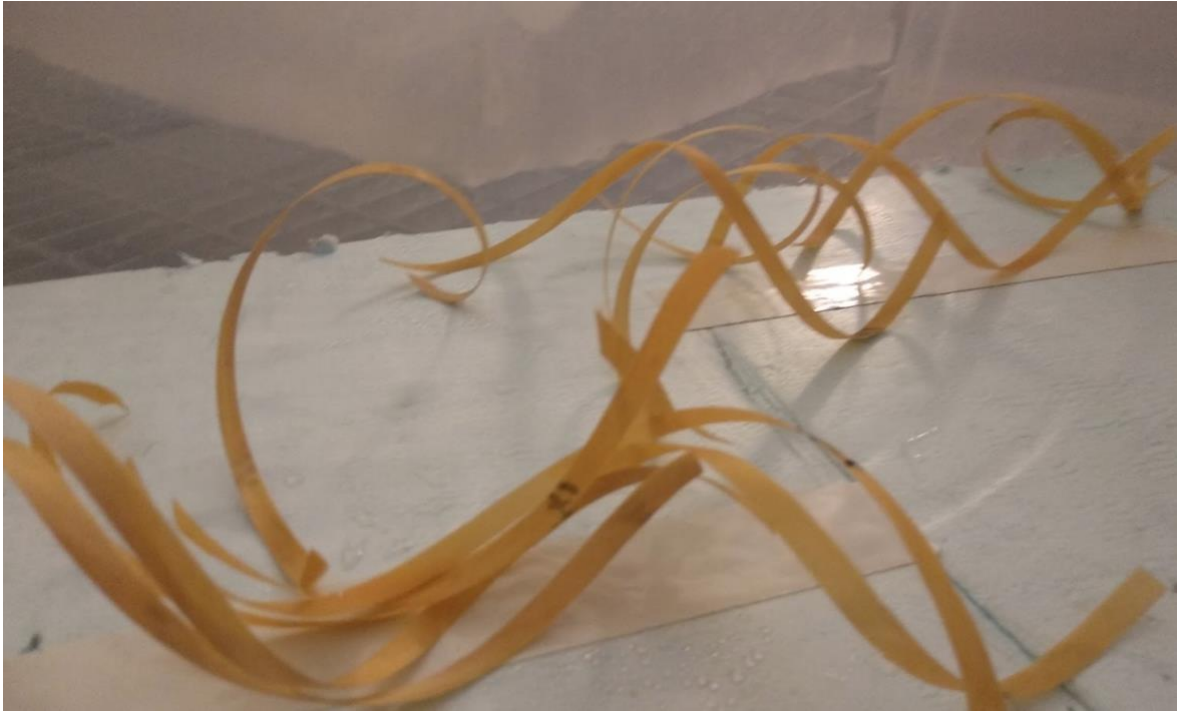
Hoides katsekehasid erinevates kliimatingimustest oli märgata, kuidas 90% RH juures konditsioneeritud katsekehade kaotasid täielikult oma vedru struktuuri ja mõõtmed suurenesid. Joonisel 3.1 on välja toodud katsekehade keskmine kõrgus olenevalt konditsioneerimise keskkonnast ja joonisel 3.2 on välja toodud katsekehade keskmine pikkus. Mida niiskem on keskkond, seda suurem oli katsekeha keskmine kõrgus ja pikkus, mis viitab sellele, et niiskes keskkonnas toimus materjali pundumine mis mõjutab vedru struktuuri jäikust ja mõõtmeid. Lisaks selgus, mida niiskem keskkond ja õhemast spoonist olid katsekehad toodetud, seda suurem oli ka saadud mõõtmete standardhälve. Joonisel 3.3 on näha milliseks muutusid katsekehad mis paiknesid 90% niiskusega keskkonnas. Need katsekehad kaotasid täielikult enda kuju ja nendega ei olnud võimalik tugevuskatseid teostada.



Joonis 3.1 Kase ja lepa spoonist toodetud vedrude kõrgused erineva niiskustasemete juures. Tumedama tooniga tulbad tähistavad perioodi 1 katsekehi ja heledama tooniga tulbad perioodi 2 katsekehi. Joonise number puiduliigi järel tähistab spooni paksust millimeetrites.



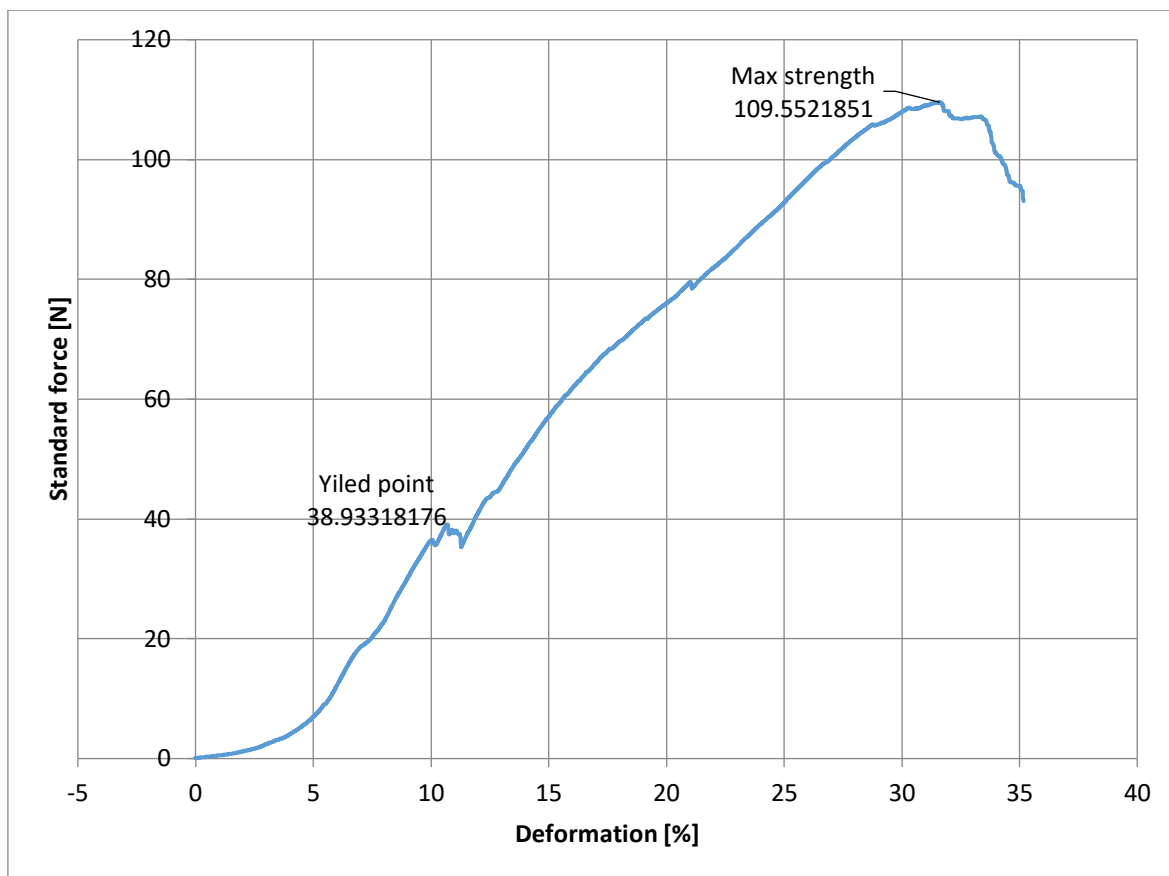
Joonis 3.2 Kase ja lepa spoonist toodetud 11 keeruliste vedrude pikkused erinevate niiskustasemete juures. Tumedama tooniga tulbad tähistavad perioodi 1 katsekehi ja heledama tooniga tulbad perioodi 2 katsekehi. Joonise number puiduliigi järel tähistab spooni paksust millimeetrites.



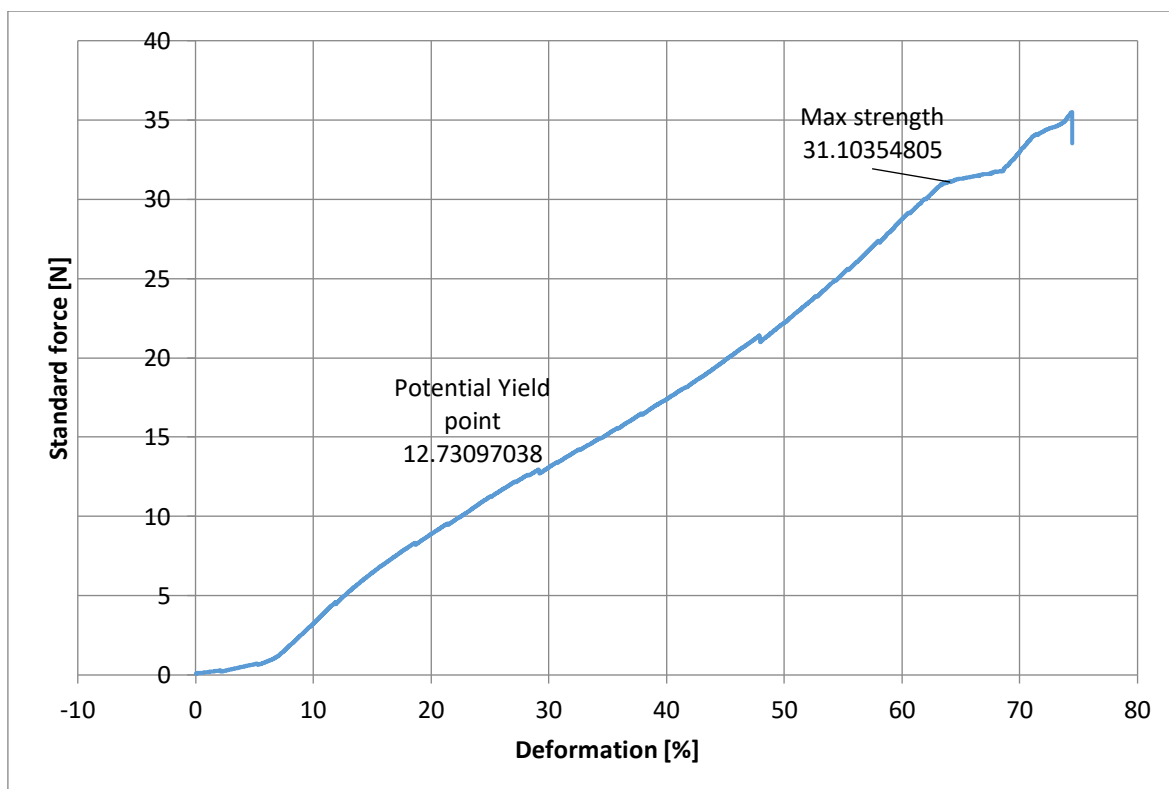
Joonis 3.3 Katsekehad pärast 72h 90% niiskusega keskkonnas.

Survekatse saadud tulemuste graafikud erinesid erinevat liiki katsekehade vahel. 0.5 mm ja 0.3 mm katsekehade survekatse graafikud olid selged ja kergesti loetavad. Joonisel 3.4 on välja toodud ühe 0.5 mm kase katsekeha graafik, kust arvestati maksimaalne tugevus. 0.2mm kase graafik nii selgesti loetav ei olnud. Joonisel 3.5 on välja toodud 0.2 mm kase tüüpiline graafik, kust võeti maksimaalne tugevus. Hetkel otsustati tugevuseks määrata viimane platoo, kuna enne seda surve kukkumist märgata ei ole. Joonistel 3.7 ja 3.8 on välja toodud katsekeha struktuur katse alguses ja lõppedes. Kinnitamaks kas maksimaalne tugevus sai õigest kohast arvestatud, tuleks tulevikus teostada antud katsekehade liigile survekatse koos videosalvestusega.

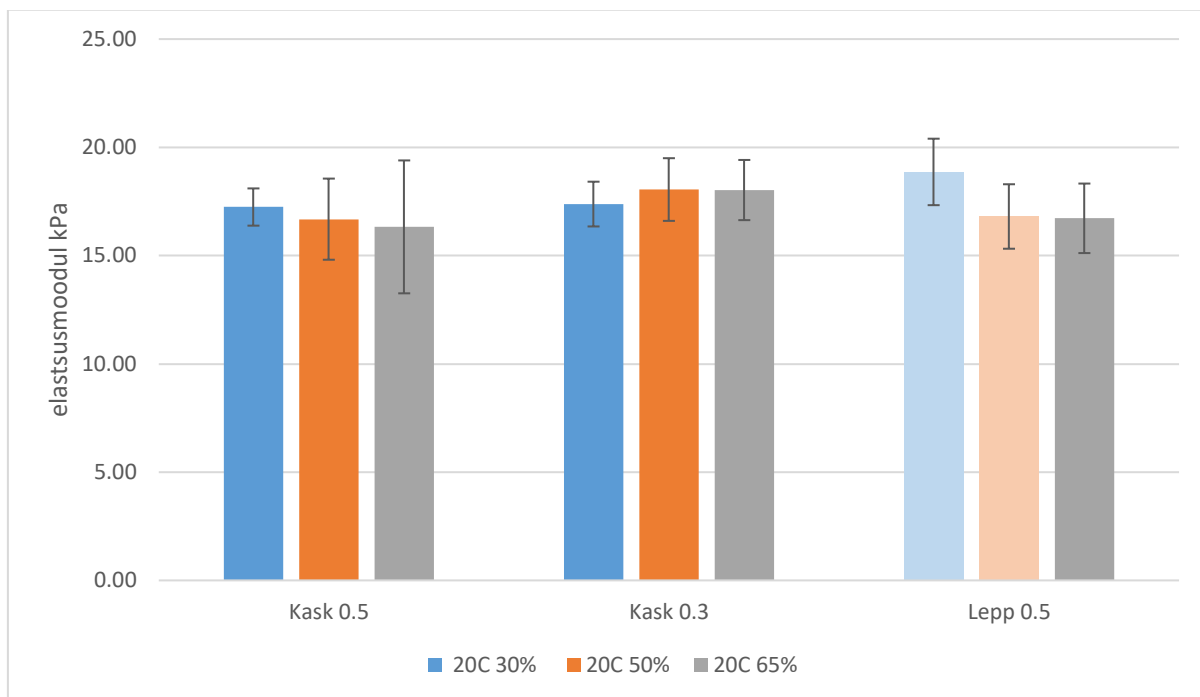
Kui maksimaalne voolavuspiir (Yield point) oli selgesti loetav nii kase kui ka lepa 0.5 mm ja 0.3 mm katsekehadel siis lepa 0.3 mm ja kase 0.2 mm katsekehade maksimaalne voolavuspiir nii kergesti loetav ei olnud. See on ka põhjus, miks joonisel 3.6 puuduvad lepa 0.3 mm ja kase 0.2 mm elastsusmooduli tugevused.



Joonis 3.4 0.5 mm lespooni vedru surve deformatsiooni graafik

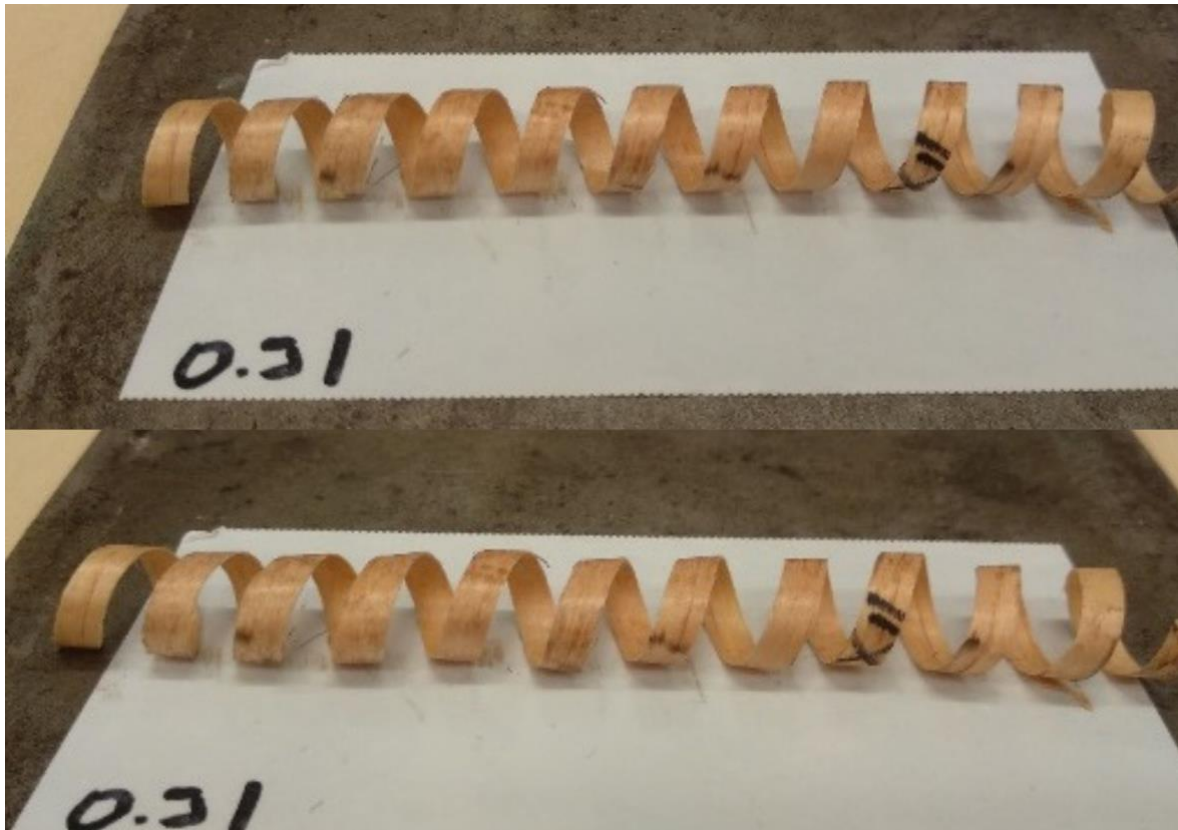


Joonis 3.5 0.2mm kasespoonide vedru surve deformatsiooni graafik

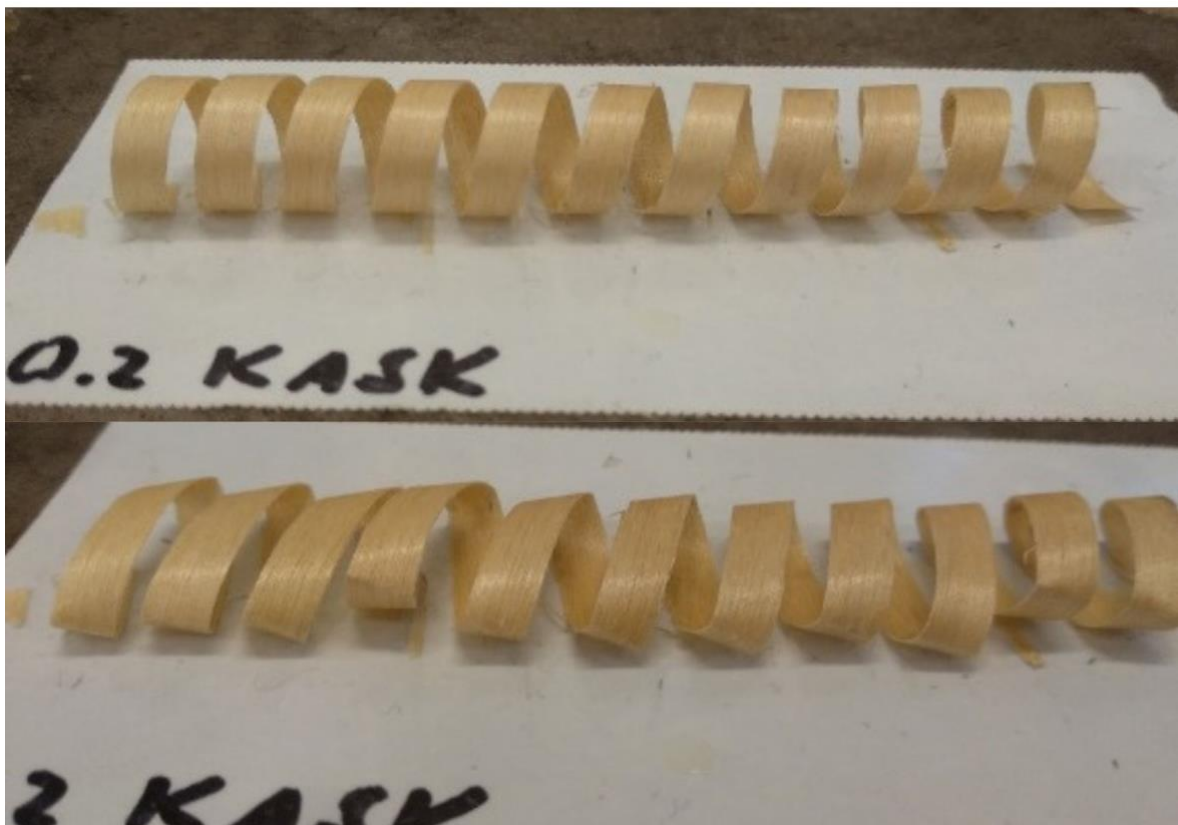


Joonis 3.6 Lepa ja kase spoonist toodetud vedrude elastsusmoodlid erinevate niiskuste juures. Tumedama tooniga tulbad tähistavad perioodi 1 katsekehi ja heledama tooniga tulbad perioodi 2 katsekehi. Joonise number puiduliigi järel tähistab spooni paksust millimeetrites.

Survekatse lõppedes oli katsekehade külgedel visuaalselt märgata murdjooni. Katsekehad paksusega suuremad kui 0.3 mm säilitasid suuremas joones ka enda algse vedru kuju. Joonisel 3.7 ja joonisel 3.8 on välja toodud katsekehad enne ja pärast katset.



Joonis 3.7 Lepa 0.3 mm katsekehad, enne (ülemine pilt) ja pärast katset (alumine pilt)

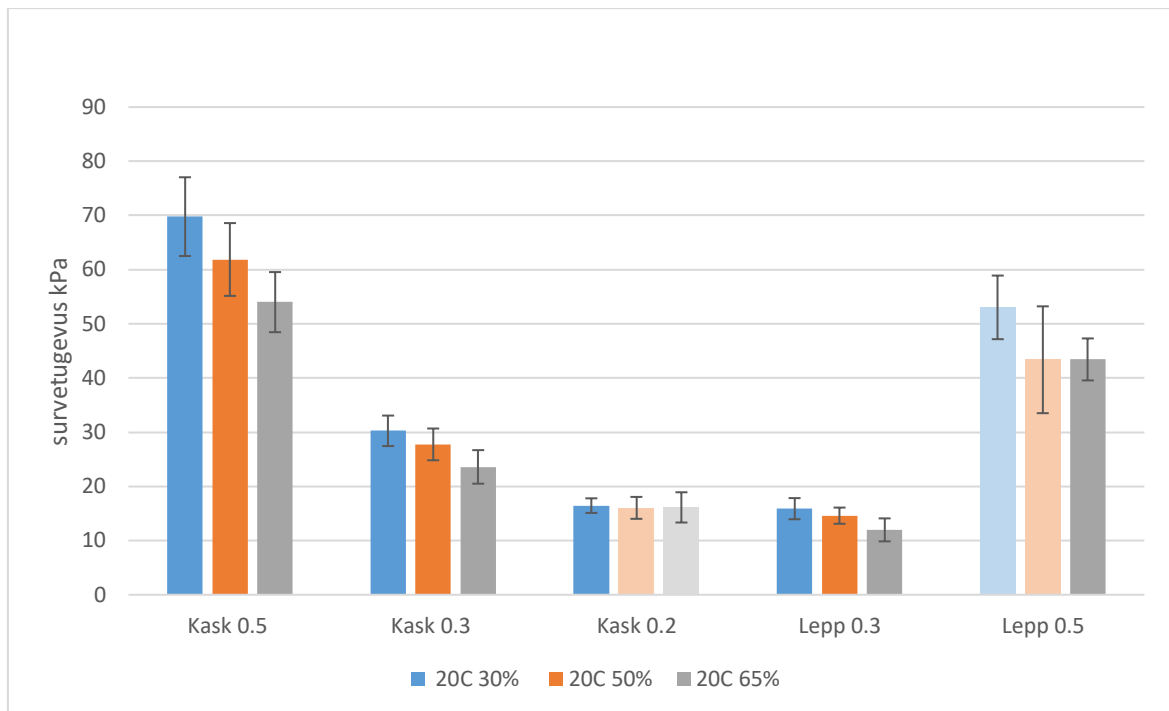


Joonis 3.8 0.2 mm kasest katsekeha, enne (üleval) ja pärast (all) survekatset

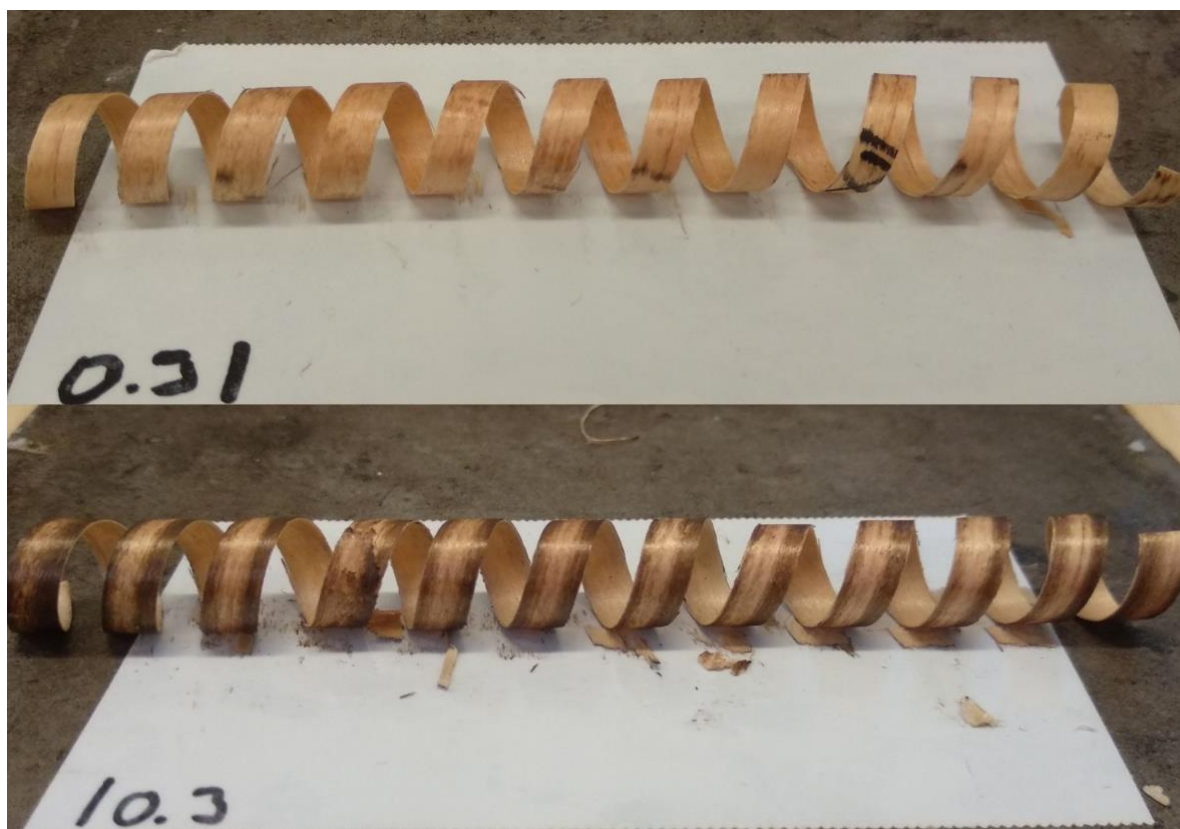
Joonisel 3.9 on välja toodud katsekehade survekatse tulemused erinevates niiskuse keskkondade juures. Katsetulemused kinnitasid tabel 1.2 väljatoodud kus parimad tugevuse omadused olid kase puidul. Kase katsekehad olid 1.3 ja 1.9 korda tugevamad kui 0.5 mm ja 0.3 mm lepapuidu spoonist katsekehad. 0.2 mm kasest katsekehad olid 1.04 korda tugevamate surveomadustega kui 0.3 mm lepa katsekehad. Kuna tootmisel on oluline tugevus ka materjali paksus siis kask tundub parem materjal vedrude tootmiseks.

Katsetulemused näitavad, et katsekehade survetugevused langesid keskkonna niiskuse tõustes. Ainsaks erandiks olid 0.2 mm paksusega kase katsekehad, kus 50% ja 65% niiskusega keskkonnas olnud katsekehad andsid sama survetugevuse, mis 30% niiskuse juures olnud katsekehad. Andmete lugemisel tuleb arvestada, et katsekehade transport, mõõtmine ja paigaldamine testseadmesse võttis ca. 5 minutit aega. Kuna tegu oli väga õhukesest puidulehest toodetud katsekehaga võib eeldada et katsekehad võisid selle aja jooksul saavutada ümbritseva keskkonnaga tasakaalu niiskuse.

Teiste katsekehade puhul niiskuse tõustes 30%-lt 65%-le vähenes 0.5 mm ja 0.3 mm kase katsekehade survetugevus 22%. 0.3 mm lepast toodetud katsekehade survetugevus langes niiskuse tõustes 24% ja 0.5 mm lepast toodetud katsekehade survetugevus langes kõigest 18%. 0.5 mm lepa katsekehadega saadud tulemusi võib mõjutada, et võrreldi perioodil 1 ja perioodil 2 toodetud katsekehade tulemusi. Survetugevuse poolest mida paksem oli katsekeha seda suurem oli ka katsetulemuste standardhälve.



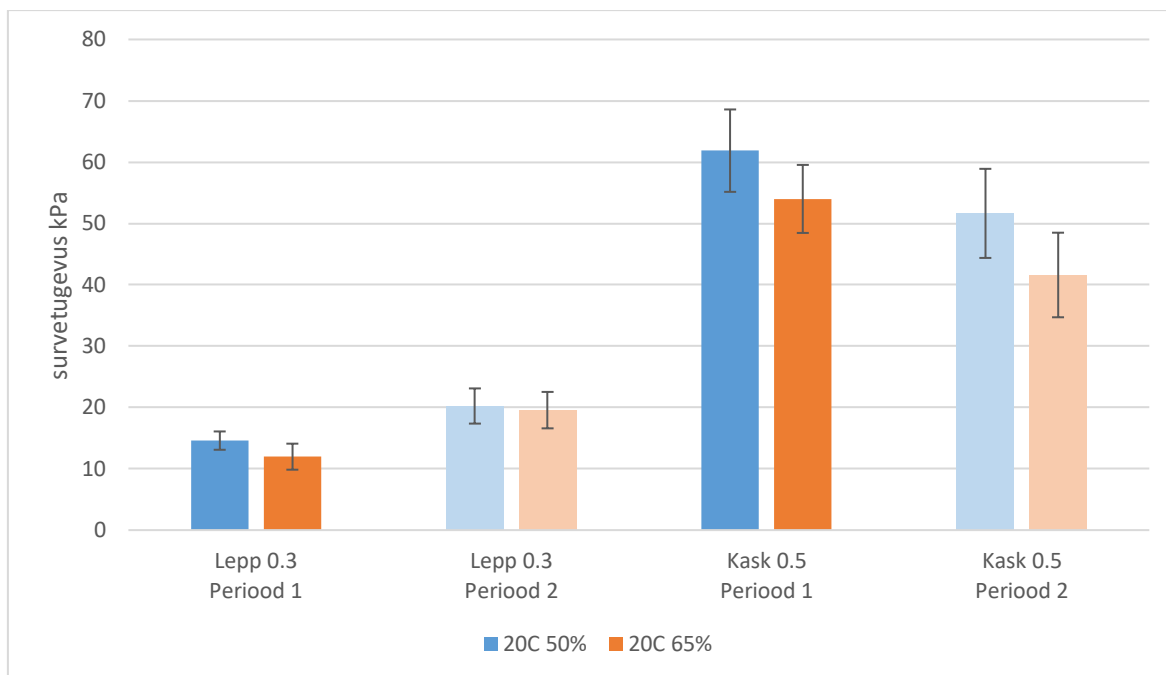
Joonis 3.9 Kase ja lepa spoonist toodetud katsekehade survetugevused erineva paksuse ja niiskustasemete juures. Tumedama tooniga tulbad tähistavad perioodi 1 katsekehi ja heledama tooniga tulbad perioodi 2 katsekehi. Joonise number puiduliigi järel tähistab spooni paksust millimeetrites.



Joonis 3.10 Lepa periood 1 katsekeha (üleväl), lepa periood 2 katsekeha (all)

Katsekehade tootmine oli ettevõtte vastutada. Katsekehad toodeti kahel erineval ajaperioodil, kuna tegu on kiiresti kasvava ettevõttega siis mõlema tootmise vahel uuenesid nii tootmis seadmed kui ka parameetrid millega vedrusid toodetakse. Tabelis 9 on väljatoodud mille poolest erinesid periood 1 ja periood 2 katsekehade tootmis parameetrid. Joonisel 3.11 on välja toodud kuidas erinevatel tingimustel toodetud katsekehade katsetulemused erinesid. 2 perioodil toodetud 0.3mm lepa katsekehad, mis toodeti niiskest spoonist ja suurema kuumusega andsid 50% ja 65% niiskusega keskkonnas 38% ja 63% suurema survetugevuse kui 1 perioodil toodetud katsekehad. Joonisel 3.10 on märgata kuidas periood 2 katsekehad on visuaalselt tumedamad kui periood 1 katsekehad, mis viitab samuti tootmisel kasutatavale kõrgemale temperatuurile. Võrreldes hilisema ja varajasema katsekehade tugevuse muutust niiskustaseme tõustes siis periood 2 katsekehade survetugevus vähenes niiskuse tõustes 50%-lt-65%-le ainult 3% kui periood 1 katsekehade survetugevus langes 18%.

Kui periood 2 katsekehad toodeti niiskest materjalist ja kõrgema temperatuuriga siis erandiks oli periood 2 ajal toodetud 0.5mm kase katsekehad, mis toodeti endiselt kuivast materjalist kuid kõrgema temperatuuri ja kiiremal kiirusel. Joonisel 3.11 on näha et tugevamad surveomadused on periood 1 toodetud 0.5mm kasest katsekehadel. Periood 2 katsekehade survetugevus oli 50% niiskuse juures 16% ja 65% niiskuse juures 22% madalam võrreldes periood 1 katsekehade tulemustega. Lisaks langes periood 2 katsekehade survetugevus 19% niiskuse tõustes 50%lt-65%le. Periood 1 katsekehade survetugevus langes niiskuse tõustes 50%lt-65%le 13%. Saadud tulemused, kinnitavad et puidu töötlemine kõrgemal temperatuuril muudab ta vähem niiskuseimavaks. Seoses sellega, et ettevõttel ei olnud võimalik avalikustada täpseid tootmis parameetreid on raske leida põhjust miks kõrgemal temperatuuril toodetud 0.5mm periood 2 katsekehad olid väikse survetugevusega niiskes keskkonnas kui periood 1 katsekehad. Hetkel saame oletada, et 0.5mm kase katekehade tulemust mõjutas kõrgema temperatuuriga kasutatav suurem kiirus, mille tõttu ei jõudnud pressi kuumus puidu struktuuri piisavalt mõjutada. Lisaks võib tulemuste erinevus pärineda ka materjali hapramaks muutumine hoiustamisel. Parema ülevaate saamiseks, kuidas mõjutavad erinevad tootmis parameetrid vedru struktuuri tugevust eri niiskuste juures tuleks teostada täiendavad katsetused.



Joonis 3.11 Erinevalt töödeldud Lepa ja kasest toodetud katsekehade survetugevuse erinevused eri niiskuste juures. Tumedama tooniga tulbad tähistavad perioodi 1 katsekehi ja heledama tooniga tulbad perioodi 2 katsekehi. Joonise number puiduliigi järel tähistab spooni paksust millimeetrites.

Võrreldes saadud tulemusi tabel 1.3.2 välja toodud tulemustega, siis üksik vedru jääb oma survetugevuse poolest teistele pakkematerjalidele alla. 0.5mm kask, mille survetugevus oli 69 kPa, on 28 kPa väiksema survetugevusega kui suur mullikile ja 121 kPa väiksema survetugevusega kui mullikile, EPP ja EPE. Vedrumati või kanga puhul võivad aga tulemused erineda. Mati ja Kanga tugevuse arvutamisel on võimalik pindalaks võtta toote pindala, mida kasutati ka tabel 1.3.2 välja toodud katsekehade survetugevuse arvutamisel. Antud töös leiti survetugevus jõu jagamisel vedruks kulunud spooni riba pindalaga. Parema hinnangu andmiseks oleks oluline teostada survetugevuse ja põrutuskatse kangale ja matile. Põrutustesti käigus on võimalik selgitada välja toote pehmendusparameetrid, mille alusel kliendid saavad hinnata toote materjali sobilikust toote kaitsmisel. Üksikute vedrude puhul annaks veel uurida, kuidas vedru töötlemise tingimused mõjutavad täpsemalt vedru tugevuse omadusi erinevate niiskustasemete juures. Lisaks soovib autor teostada ka kliimatestid, selgitamaks kas madalad temperatuurid võiks toote omadusi hilisemalt mõjutada. Üksikutest vedrudest täitematerjali paremaks hindamiseks oleks oluline teostada pakendi surve-, põrutus- ja vibratsioonitest.

KOKKUVÕTE

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks oli uurida kase, haavast ja lepast valmistatud spoonist vedrude sobivust pakendi täitematerjalina.

Töö eesmärgi saavutamiseks:

1. Kaardistati katsemeetodeid pakkematerjalide omaduste välja selgitamiseks
2. Uuriti katseliselt sobilike treimisparameetreid õhukeste spoonilehtede tootmiseks
3. Töötati välja meetodika spoonist vedrude testimiseks
4. Uuriti puitvedrude survetugevuse omadusi järgnevates tingimustes:
 - a. Erinevate puiduliikide korral
 - b. Erinevate paksuste juures
 - c. Erinevate niiskustasemete juures

Esmalt anti töös ülevaade erinevatest pehmendustest ja pakke täitematerjalidest mida kasutatakse pakendamisel. Seejärel anti ülevaade puidu omadustest ja olulisematest pakkematerjalide katsetest.

Töö teine osa jaguneb kaheks osaks. Esimeses osas selgitatakse kust saadi materjalid katsekehade tootmiseks ja mis tingimustes teostati TalTech puidutehnoloogia laboris spooni treimised saamaks erineva paksusega puidulehti. Teine pool selgitab lahti teostatud survekatse ja mis standarditele lähtudes pandi paika katse kava. Ülevaadet katse käigust ja katsekehade ettevalmistusest. Töö viimane osa kujutab endas katsetulemuste analüüsi ja arutelu.

Katsetustest selgusid järgnevad tulemused:

- Lepast ja kasest on võimalik edukalt treida 0.3mm ja 0.5mm spooni
- Haava puidust erinevate eeltöötlustega 0.3mm puidulehte treida ei õnnestunud ja 0.5mm lehe treimine õnnestus väli tingimustes -2 °C konditsioneeritud eeltöötlustega.
- Niiskuse suurenedes suurenevad ka katsekehade mõõtmed.
- 90% suhtelise niiskuse juures kaotas toode täielikult enda vedru struktuuri.
- 0.3mm ja 0.5mm kasepuidust toodetud katsekehade survetugevus oli 1.3 ja 1.9 korda tugevam kui sama paksusega lepa puidust toodetud katsekehadel.
- Vedrude tootmisel kasutatav kõrgem temperatuur andis lepa vedrudele suurema survetugevuse kõrgemate niiskuste juures.

- Antud testi põhjal ei paku uuritud toode sarnast survetugevuse omadusi nagu EPS, papp ja mullikile, kuid on võimeline olema alternatiiviks, pakkudes peale pehmenduse ka esteetilist ja keskkonnasõbralikkuse väärtust.
- Antud töö näitas, et puidu liigil, spooni paksusel ning vedrude töötlemise parameetritel on oluline mõju vedrude omadustele. Nii on näiteks võimalik olenevalt pakendamise vajadusest toota erinevate omadustega vedrusid ja nendest valmistatud kangaid.
- Parema hinnangu andmiseks oleks oluline teostada survetugevuse ja põrutuskatse vedrudest valmistatud kangale ja matile.
- Üksikute vedrude puhul annaks veel uurida, kuidas vedru töötlemise tingimused mõjutavad vedru tugevuse omadusi erinevate niiskustasemete juures.
- Lisaks soovitab autor teostada ka kliimatestid, selgitamaks kas madalad temperatuurid võiks toote omadusi hilisemalt mõjutada.
- Üksikutest vedrudest täitematerjali paremaks hindamiseks oleks oluline teostada pakendi surve-, põrutus- ja vibratsioonitest.

SUMMARY

The aim of this bachelor's thesis was to investigate the suitability of veneer springs made of birch, aspen and alder as packaging filler material.

In order to achieve the objective of the thesis, the following tasks were carried out:

1. Mapping of the testing methods for evaluating the properties of the packaging material.
2. Experimentally investigating suitable turning parameters for the production of thin veneer sheets.
3. Developing a methodology for testing veneer springs.
4. Evaluating the compressive strength of wooden springs under the following conditions:
 - a. For different types of wood
 - b. At different thicknesses
 - c. At different humidity levels

First, an overview of different types of cushioning and packing fillers used in packaging is given. Then, an overview of the properties of wood and the most important tests of packaging materials is provided.

The second part of the thesis is divided into two: the first part explains where the materials for the production of the test pieces were obtained from and under what conditions veneer peeling was performed in the TalTech wood technology laboratory to obtain wood sheets of different thicknesses. The second part explains the performed compression test and the standards based on which the test plan was created and gives an overview of the course of the experiment and the preparation of the test specimens. The last part of the thesis contains the analysis and discussion of the test results.

The tests revealed the following results:

- It is possible to peel 0.3 mm and 0.5 mm veneer from alder and birch.
- It was not possible to peel 0.3 mm veneer from aspen and peeling 0.5 mm veneer was only successful in outdoor conditions at -2 °C with conditioning pre-treatments.
- As humidity levels increase, the dimensions of the test specimens increase.
- At 90% humidity, the springs completely lose their shape.
- The compressive strength of test specimens made of 0.3 mm and 0.5 mm birch wood was respectively 1.3 and 1.9 times better than that of test specimens produced from alder wood of the same thickness.

- The higher temperature used in spring production gave alder springs greater compressive strength at higher humidity.
- The studied product does not offer similar compressive strength properties as EPS, cardboard and bubble wrap, but can be an alternative, offering aesthetic and environmental value in addition to cushioning.
- Research showed the type of wood, the thickness of the veneer and the spring processing parameters have a significant effect on the properties of the springs. For instance, it is possible to produce springs and fabrics with different properties, depending on the need for packaging.
- To give a better assessment, it would be essential to perform compressive strength and shock testing on the fabric and mat.
- For individual springs, it would be necessary to investigate how the spring producing conditions affect the strength properties at different humidity levels.
- In addition, the author recommends performing climate tests to investigate whether low temperatures could affect the properties of the product.
- In order to get a better understanding of the filling material consisting of individual springs, compression, shock and vibration tests need to be performed on the product.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] Eurostat, "Packaging waste statistics," [Võrgumaterjal]
Available: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Packaging_waste_statistics#Conclusions. [Kasutatud 18 november 2022]
- [2] EUROPEAN COMMISSION, "A new Circular Economy Action Plan For a cleaner and more competitive Europe," [Võrgumaterjal]. Available: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:9903b325-6388-11ea-b735-01aa75ed71a1.0017.02/DOC_1&format=PDF [Kasutatud 18 november 2022]
- [3] Henry Emblem and Anne Emblem, "Packaging Technology - Fundamentals, Materials and Processes," Woodhead publisher, 2012, pp. 25–40.
- [4] D. B. Torok, *Cushioning: Protecting the product and environment*. 1990.
- [5] C. Ng, J. Oh, and S. Rahmanian, „An Investigation into Packing Materials for the New Student Union Building,” SEEDS) Student Report 2013.
- [6] N. J. Beaumont *et al.*, "Global ecological, social and economic impacts of marine plastic," *Mar Pollut Bull*, vol. 142, pp. 189–195, ScienecceDirect 2019
- [7] R. Geyer, J. R. Jambeck, and K. L. Law, "Plastic waste inputs from land into the ocean," *Science* (1979), pp. 768–771, Pubmed 2015.
- [8] European Parliament, "Parliament seals ban on throwaway plastics by 2021," [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20190321IPR32111/parliament-seals-ban-on-throwaway-plastics-by-2021>[Kasutatud 18 november 2022]
- [9] Dean Campbell and Dean J, "Microplastics, Liquid Nitrogen, and Iodine: Polystyrene vs. Starch Foam Packing Peanuts," *ChemEd X*, [Võrgumaterjal]
Available: <https://www.chemedx.org/blog/microplastics-liquid-nitrogen-and-iodine-polystyrene-vs-starch-foam-packing-peanuts> [Kasutatud 4 jaanuar 2023]
- [10] European Commission, Directorate-General for Environment, Hilton, M., Geest Jakobsen, L., Hann, S., et al. „Relevance of biodegradable and compostable consumer plastic products and packaging in a circular economy," Publications Office, 2020 [Võrgumaterjal] <https://data.europa.eu/doi/10.2779/497376> [Kasutatud 4 jaanuar 2023]
- [11] Jane Courtneil, "10 Eco-friendly Packing Alternatives for your business's shipping needs," *Green Business Bureau*, [Võrgumaterjal]
Available: <https://greenbusinessbureau.com/green->

- practices/products/packaging/8-eco-friendly-packaging-alternatives-for-your-businesss-shipping-needs/#ecofriendlypackaging6 [Kasutatud 4 jaanuar 2023]
- [12] Diana Twede and Susan E. M. Selke, *Cartons, Crates and Corrugated Board, Handbook of Paper and Wood Packaging Technology*, 2nd ed. 2015.
- [13] IvyPanda, "Materials Comparison About Packaging Essay," [Võrgumaterjal]. Available: <https://ivypanda.com/essays/materials-comparison-about-packaging/> [Kasutatud 4 jaanuar 2023]
- [14] Keskkonnaministeerium, "Eesti metsavarude ja raiemahu värsked, 2020 aasta andmed," [Võrgumaterjal]. Available: <https://infogram.com/21m-1h7z2l87x083x6o> [Kasutatud 4 jaanuar 2023]
- [15] Eric Meier, "The Wood database." [Võrgumaterjal] <https://www.wood-database.com/wood-filter/> [Kasutatud 4 jaanuar 2023]
- [16] R. B. Hoadley, *Understanding Wood: A Craftsman's Guide to Wood Technology*. Taunton Press, 2000.
- [17] Endel Saarman, *Puiduteadus*. Tartu: Eesti Põllumajandusülikooli kirjastus, 1998.
- [18] David William Green and David E. Kretschmann, *"Moisture Content and the Properties of Clear Southern Pine."* 1994.
- [19] Rubin Shmulsky and P. David Jones, *Forest Products and Wood Science: An Introduction*. Wiley Blackwell, 2019.
- [20] *ThermoWood® HANDBOOK*. International Thermowood Association.
- [21] W. Madison, "Mechanical Properties of Wood," in *Wood Handbook" Wood as an Engineering Material"* 2010.
- [22] ASTM International, "Standard Test Methods for Vibration Testing of Shipping Containers," ASTM D999-08 (2015) [Võrgumaterjal] [Kasutatud 4 jaanuar 2023]
- [23] E. standardikeskus "Packaging - Complete, filled transport packages - Compression and stacking tests using a compression tester ," (ISO 12048:2001. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-12048-2001> [Kasutatud 4 jaanuar 2023]
- [24] ASTM International, "Standard Test Method for Determining Compressive Resistance of Shipping Containers, Components, and Unit Loads ," (ASTM D642-20), [Võrgumaterjal]
Available: <https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CD0642-20%7Cen-US> [Kasutatud 18 november 2022]
- [25] K. Leht, "Department of mechanical and industrial engineering Performance of cushioning materials in packaging Pakendi pehmendusmaterjalide efektiivsuse määramine," 2016.

- [26] ASTM International, "Standard Practice for Conditioning Containers, Packages, or Packaging Components for Testing," (D4332-22, 2022) [Võrgumaterjal] [Kasutatud 4 jaanuar 2023]
- [27] ARPLANK sales, "Designing for optimal cushioning performance with arpro® EPP and arpak® EPE." [Võrgumaterjal] Available: https://arplankdirect.com/wp-content/uploads/2021/02/TechDataHome_SalesDesignDocument.pdf [Kasutatud 18 november 2022]
- [28] Quality foam packing, "Package Design Guide." [Võrgumaterjal] Available: <http://www.qualityfoam.com/package-design-guide-1.asp#:~:text=Ideally%2C%20the%20fragility%20of%20a,be%20the%20product's%20g%2Dfactor> [Kasutatud 18 november 2022]