



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO
INSENERITEADUSKOND
TalTech Tartu kolledž

MÜKOKOMPOSIITMATERJALI KASVATAMINE JA VÕRDLEMINE VAHTPOLÜSTÜREENI OMADUSTEGA

CULTIVATION OF MYCELIUM COMPOSITE MATERIAL AND COMPARISON WITH EXPANDED POLYSTYRENE

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Liisi Tampere

Üliõpilaskood: 183220NAEM

Juhendaja: Jane Raamets, vanemlektor

Kaasjuhendaja: Maidu Silm, nooremteadlane,
Eesti Maaülikool

Tartu 2022

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.

“25” mai 2022

Autor: Liisi Tampere
/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

“25” mai 2022

Juhendaja: Jane Raamets
/ allkiri /

Kaasjuhendaja: Maidu Silm
/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“25” mai 2022.

Kaitsmiskomisjoni esimees Egge Haiba
/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Liisi Tampere (sünnikuupäev: 06.09.1992)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Mükokomposiitmaterjali kasvatamine ja võrdlemine vahtpolüstüreeni omadustega“, mille juhendajad on Jane Raamets ja Maidu Silm,

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.

25.05.2022 (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 üks või enam isikut oma ühise loomingulise 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.

TalTech Tartu kolledž

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Liisi Tampere, 183220NAEM

Õppekava, peeriala: NAEM06/18 - Tööstusökoloogia

Juhendaja(d): Vanemlektor Jane Raamets, +372 55613344

Eesti Maaülikooli nooremteadlane Maidu Silm, +372 53765139

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Mükokomposiitmaterjali kasvatamine ja võrdlemine vahtpolüstüreeni omadustega

(inglise keeles) Cultivation of mycelium composite material and comparison with expanded polystyrene

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Eesmärk on leida, milline kasvatatud seene ja substraadi kombinatsioon on kõige sarnasemete omadusega vahtpolüstüreeni pakkematerjalina
2. Selgitada välja tiiger-hammashliku omadused mükokomposiitmaterjalina

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Kirjanduse ülevaate koostamine ja meetodika väljatöötamine	10.11.2021
2.	Katsete läbiviimine ja katsetulemuste vormistamine	31.03.2022
3.	Tulemuste analüüs ja arutelu	30.04.2022
4.	Lõputöö esitamine	24.05.2022

Töö keel: eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "25" mai 2022.a

Üliõpilane: Liisi Tampere "25" mai 2022a
/allkirjastatud digitaalselt/

Juhendajad: Jane Raamets "25" mai 2022a
Maidu Silm "25" mai 2022a
/allkirjastatud digitaalselt/

Programmijuht: Jane Raamets "25" mai 2022a
/allkirjastatud digitaalselt/

SISUKORD

EESSÕNA	6
Lühendite ja tähiste loetelu	7
SISSEJUHATUS	8
2 Kirjanduse ülevaade	10
2.1 Pakendid ja pakkematerjalid	10
2.2 <i>Polüstüreen</i>	11
2.2.1 Vahtpolüstüreen ehk EPS	13
2.3 <i>Seened</i>	14
2.3.1 Puitu lagundavad seened.....	15
2.3.2 Seente kasutusvaldkonnad	16
2.4 <i>Mükokomposiitmaterjali ehk seenematerjali olemus ning kasutusvaldkonnad</i>	17
2.4.1 Mükokomposiit.....	17
2.4.2 Kasutusnäiteid	20
3 Materjal ja meetodika	22
3.1 <i>Eelkatsed</i>	22
3.2 <i>Põhikatse</i>	24
3.2.1 Katsekehade kasvatamine	24
3.2.2 Katsekehade mõõtmisvahendid	27
3.2.3 Paindekatse meetodika	27
3.2.4 Survekatse meetodika	29
3.2.5 Mõõtmete stabiilsus meetodika	30
3.2.6 Andmeanalüüs	32
4 Tulemused ja arutelu	33
4.1 <i>Eelkatsete tulemused ja arutelu</i>	33
4.1.1 Eelkatsete arutelu	33
4.2 <i>Põhikatse tulemused ja arutelu</i>	35
4.2.1 Paindekatse tulemused	37
4.2.2 Survekatse tulemused	38
4.2.3 Mõõtmete stabiilsus tulemused	40
4.3 <i>Põhikatse arutelu</i>	42
KOKKUVÕTE	47
SUMMARY	49
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	51
LISAD	55
<i>Lisa 1. Esimese eelkatse seened ja substraadid</i>	55
<i>Lisa 2. Teise eelkatses kasvanud seened</i>	59
<i>Lisa 3. Paindekatse graafikud</i>	62
<i>Lisa 4. Paindekatse graafikute tabel</i>	68
<i>Lisa 5. Paindekatse tabel koos keskmiste tulemustega</i>	71
<i>Lisa 6. Survekatse graafikud</i>	72
<i>Lisa 7. Survekatse graafikute tabel</i>	79
<i>Lisa 8. Survekatse tabel koos keskmiste tulemustega</i>	81
<i>Lisa 9. Mõõtmete stabiilsus tabel koos keskmiste tulemustega</i>	82

EESSÕNA

Magistritöö on ajendatud autori isiklikust huvist antud teema vastu. Käesoleva magistritöö katsed viidi läbi Tallinna Tehnikaülikooli Tartu kolledži laboris ning Eesti Maaülikooli laborites.

Töö autor tänab oma juhendajaid Jane Raametsa ja Maidu Silma, kes olid suureks abiks lõputöö koostamisel. Lisaks tänab autor Eesti Maaülikooli dotsenti Regino Kaske, kes jagas juhiseid ning suunas katsete läbiviimist. Eraldi soovib autor tänada oma perekonda, kes innustas ja toetas teekonnal.

Märksõnad: mükokomposiit, seenematerjal, vahtpolüstüreen, magistritöö, pakke-
materjalid

Lühendite ja tähiste loetelu

PS – polüstüreen, standardpolüstüreen ka GPPS general purpose polystyrene

HIPS – high impact polystyrene ehk suure löögitugevusega polüstüreen

EPS – expanded polystyrene, vahtpolüstüreen ehk vahtplast

Ganoderma resinaecum – *G. resinaecum*

Katsekehade tähised:

1F – Põhu peal kasvanud tuletael *Fomes fometarius*

2F – Lepahakke peal kasvanud tuletael *Fomes fometarius*

3F – Saepuru peal kasvanud tuletael *Fomes fometarius*

1T – Põhu peal kasvanud libliktagel *Trametes versicolor*

2T – Lepahakke peal kasvanud libliktagel *Trametes versicolor*

3T – Saepuru peal kasvanud libliktagel *Trametes versicolor*

1G – Põhu peal kasvanud *Ganoderma resinaceum*

2G – Lepahakke peal kasvanud *Ganoderma resinaceum*

3G – Saepuru peal kasvanud *Ganoderma resinaceum*

1L – Põhu peal kasvanud tiiger-hammasleht *Lentinus Tigrinus*

2L – Lepahakke peal kasvanud tiiger-hammasleht *Lentinus Tigrinus*

3L – Saepuru peal kasvanud tiiger-hammasleht *Lentinus Tigrinus*

Mõõtühikud:

MPa – Megapascal (1 MPa=1 N/mm²)

N – Njuuton (10N = 1.01971621 kgf)

SISSEJUHATUS

Pakenditööstus sõltub nafta baasil toodetud plastikmaterjalidest, mis ühest küljest tekitab survet majandusele ning teisest küljest keskkonnasäästlikutele arenguvõimalustele (Geyer, Jambeck, & Law, 2017; Rabnawaz et al., 2017). Naftavarud on piiratud, nende suurenenud kasutamine põhjustab võimalikku varude vähenemist, mis mõjutab nafta kättesaadavust ja seeläbi suurendab toorainekulusid.

Enamik tehismaterjale põhjustavad kogu oma eluea vältel suuri ökoloogilisi ja ühiskondlikke negatiivsed mõjusid, alates nafta puurimisest kuni toote ringlusest kõrvaldamiseni. Juba toote enda valmistamine nõuab keerulisi tootmisprotsesse ja energiasisendeid, mis omakorda on seotud jäätmevoogudega. (Robertson et al., 2020)

Tooteid ümbritsevaid pakendeid kasutatakse tihtipeale vaid ühe korra ning muutuvad oma eluea lõpus jäätmeteks. Kuna naftapõhised plastmassist tooted nagu näiteks vahtpolüstüreen ei ole biolagunevad, on selle kõrvaldamine raskendatud, mis omakorda tekitab jäätmete kuhjumise keskkonda (van den Adel et al., 2021). Ökosüsteemide kaitseks ja säästva majanduse arengu edendamiseks on oluline biolagunevate pakkematerjalide arendamine.

Biolagunevate materjalide arendamisel tasub jäljendada loodust, täpsemalt seeni. Seened on üsna vähe uuritud organismide rühm, kuid juba praeguste uuringute järel on selge, et seentel on biotehnoloogiline potentsiaal tööstuslikus kasutuses (Hyde et al., 2019). Viimastel aastatel on biolagunevate materjalide seas esile kerkinud seeneniidistikust koosnev materjal. Mükokomposiit ehk seenematerjal on isekasvav, kahest komponendist – substraadist ja seeneniidistikust – koosnev materjal (Appels, 2020). Mükokomposiiti on võimalik sobitada erinevate vormidega, seega saab luua mitmesuguse kuju ja suurusega tooteid.

Magistritöö eesmärk on leida seene ja substraadi kombinatsioon, mis oleks kõige sarnasemete omadusega vahtpolüstüreenile. Teiseks eesmärgiks on välja selgitada tiigerhammaslehiku mükokomposiitmaterjali omadused. Biolaguneva materjali kasvatamisel püütakse leida jäätmevoogudele nagu põhk, saepuru ja hakkepuut uus väljund. Uurimisküsimus, millele soovitakse lõputöös vastus leida on järgmine: milline seitsme töö jaoks valitud seeneliigi ja kolme substraadi kombinatsioon saavutab vahtpolüstüreenile kõige sarnasemad omadused? Antud tööle eelnes hüpotees, et mükokomposiidid on oma omadustelt (survetugevus, paindetugevus ja mõõtmete stabiilsus) võrreldavad vahtpolüstüreeniga.

Käesolev magistritöö jaguneb kolmeks osaks: kirjanduse ülevaade, katsemetoodika ning katse tulemused ja arutelu. Kirjanduse ülevaate esimeses pooles antakse üldine ülevaade pakenditest, pakkematerjalidest ning põhjustest, miks on vaja leida alternatiivseid pakkematerjale, tutvustatakse polüstüreeni ajalugu ja liike, põhjalikumalt tuleb juttu vahtpolüstüreenist. Kirjanduse ülevaate viimases osas on ülevaade seene olemusest, puitu lagundavatest seentest, mükokompostiimaterjalidest ja nende kasutusvaldkondadest. Metoodika peatükis kirjeldatakse katsemeetodit, seadmeid ja uurimuse praktilist osa. Töö viimases osas esitatakse katsete tulemused ja analüüs.

2 KIRJANDUSE ÜLEVAADE

2.1 Pakendid ja pakkematerjalid

Pakend on ümbris, mis mahutab ja kaitseb kaupa tootjast tarbijani (Keskkonnaministeerium, 2018). Pakend säilitab toote omadusi, aitab hõlpsalt kaupa käsitleda, transportida ja ladustada, kaitstes samal ajal seda kahjulike välismõjude eest (Pfohl, 2017). Pakend vähendab toote kadu ja riknemist (Pfohl, 2017) ning kaitseb keskkonda tootepoolse saastumise või toodet keskkonnamõjude eest (van den Adel, Scagnetti, Lorenz, 2021). Pakendi vältimine ei ole sageli üldse võimalik, sest see on osa kaubast. Pakend teavitab tarbijat sellest, mida toode sisaldab, annab informatsiooni tootja ja toote kasutamise kohta ja pakub ka garantiiteavet (Ibid). Mida ahvatlevam on pakend, seda rohkem juhib see tarbija tähelepanu ning võib julgustada toodet ostma (Ibid).

Pakendiseadusest lähtuvalt liigitatakse pakendeid järgnevalt (Pakendiseadus, 2004):

1. Müügiapakend ehk esmane pakend – müügiühiku osa, mis on määratud tarbijale müügikohas üleandmiseks;
2. Rühmapakend ehk teisene pakend – pakendit on võimalik eemaldada ning see ei põhjusta toote omaduste muutust. Rühmapakendi eesmärgiks on teatud hulga müügiühikute liigitamine müügikohas;
3. Veopakend ehk kolmandane pakend – eesmärgiks on teatud arvu müügiühikute või rühmapakendis kaupade käsitsemiseks ning veoks, mille abil saab säilitada kauba füüsilisi kahjustusi veo ajal.

Pakendile on mitmed valmistamise ja kasutamise nõuded, mis on välja toodud pakendiseaduses (Pakendiseadus, 2004):

1. Pakendi eesmärgiks on võimalikult väikse mahu ja massi juures täita oma otstarve, selleks on ohutus- ja hügieenitaseme kindlustatus ja pakend peab olema sobiv pakendatavale kaubale ja vastuvõetav tarbijale.
2. Korduvkasutus ja pakendijäätmete taaskasutus peab olema juba pakendi loomisel kavandatud, et tagada selle ringlussevõtt. Seeläbi saab välistada pakendijäätmete või nende töötlemisel tekkivate jäätmete kõrvaldamisel negatiivse mõju keskkonnale.
3. Pakendi valmistamisel tuleb arvestada, et pakendimaterjalis ja pakendi muudes koostisosades leiduv ohtlike ainete sisaldus ja kahjulik toime oleks võimalikult minimaalne, et seeläbi saaks minimeerida nende olemasolu heitmetes, tuhas või nõrgvees kui pakend või tema jäägid põletatakse või ladestatakse prügilasse.

Eurostati andmetel toodeti Euroopa Liidus 2018. aastal 174 kg pakendeid inimese kohta (Eurostat, 2020). Peamised pakkematerjalide liigid on klaas, plast, metall, puit, paber ja papp ning muu materjal (Keskkonnaministeerium, 2018). Kõige enam kasutati paberit ja pappi – 31,8 miljonit tonni, sellele järgnes 14,8 miljonit tonni plastpakendeid ja 14,5 miljonit tonni klaaspakendeid (Eurostat, 2020). Eesti oli 2018. aasta andmetel Euroopa Liidus pakendite tekitamisega elaniku kohta kolmandal kohal – inimese kohta tekkis 41,9 kg pakendjäätmekogust (Statista, 2021).

Suurest osast Euroopas töödeldud plastmassist valmistatakse pakendeid (van den Adel et al., 2021). Plastmassi eeliseks on väike kaal, soodne hind ja lai valik erinevaid omadusi – pikaealisus, paindumus ja barjäärivõime (Ibid). Plastide taaskasutuse teeb keeruliseks nende rohkus ning füüsikaliste omaduste suhteliselt vähene erinevus (Kulu, Kübarsepp ja Laansoo, 2015). Taaskasutamiseks peab plastmaterjali eraldama lisaks polümeeriliikidele ka täiteainete, värvilisandite ja muude tunnuste põhjal (Ibid).

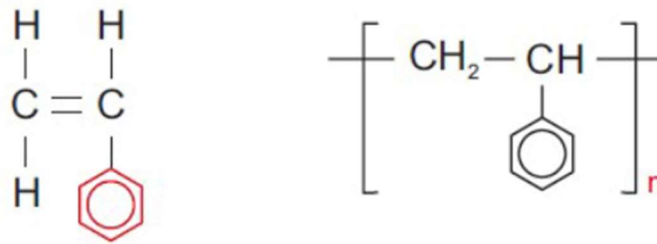
Plastid ei lagune täielikult looduses vaid muutuvad hapraks ning lagunevad väiksemateks fragmentideks, mikro- ning nanoosakesteks (Stöven, Jacobs, & Schnug, 2015). Mikroplastikuks nimetatakse osakesi, mille diameeter on väiksem kui 5 mm (Fok & Cheung, 2015). Mikroplastik on ohtlik kuna mereorganismid peavad neid ekslikult oma suuruse tõttu toiduks - planktoniks (Ibid).

Plastide keeruline lagunemisprotsess on tingitud nende lisanditest, mida kasutatakse plasti koosseisus: need teevad plastid vastupidavaks keskkonnamõjudele ja ei lase materjalidel laguneda (Kulu et al., 2015). Pakendina ja pakkematerjalina kasutatavad plastikud muutuvad oma lühikese kasutusaja lõpus jääkideks (van den Adel et al., 2021). Jäätmete kuhjumise probleemi leevendamiseks peab leidma lahendusi nii materjalide taaskasutamiseks kui ka üleliigsete jäätmete vältimiseks (Joshi, Meher, & Poluri, 2020).

2.2 Polüstüreen

Polüstüreen (PS) on jäik, kõva, läbipaistev sünteetiline vaik, mis on saadud stüreeni polümeriseerumisel (Kaiser, 2006). Stüreen on läbipaistev, madala viskoossusega magusalõhnaline vedelik (Ibid). Stüreeni avastas 1839. aastal Berliinis apteekrina töötanud Eduard Simon (van Schijndel et al., 2020), kes destilleeris auruga palsamit, mis pidi aitama sügeliste vastu ning destilleerimise käigus eraldus õline vedelik (Kaiser, 2006). Simon täheldas, et vedelik tahkus viskoosseks läbipaistvaks massiks. Stüreen on väga reaktsioonivõimeline, tema sulamistemperatuur on 146 °C. (Kaiser, 2006)

Joonisel 1 on näha stüreeni keemilise ühendi struktuurivalemit (Ibid). Stüreeni polümeerimisel on oluline tema süsinikuaatomite vaheline kaksikside (Ibid).



Joonis 1. Paremalt stüreeni struktuurivalem, vasakul polüstüreen (PS) struktuurivalem. (Kaiser, 2006)

PSile iseloomulikud omadused tulevad välja punasega markeeritud benseenirõngast. PS on paigutatud ataktiliselt (korratult), kuid benseenirõngas see-eest korrapäraselt. (Kaiser, 2006)

Taoline paigutus hoiab ära kristallide moodustumise ning muudab ataktilise PSi amorfseks (Kaiser, 2006). Lisaks ataktilisele PSile on olemas ka sündio- ja isotaktiline PS (Wünsch, 2000). Isotaktilisel PSil on kõrge sulamistemperatuur (240 °C), kuid kuna ta kristalliseerub väga aeglaselt, siis ei ole majanduslikult kasulik isotaktilist PSi kasutada (Ibid). Vastupidiselt sündiotaktilisele PS-ile, mis kristalliseerub koheselt ning mille sulamistemperatuur on 270 °C, klaasilise oleku saavutab temperatuuril 100 °C (Ibid).

Ataktiline PS on puhtal kujul amorfne, kristalliselge ja särava pinnaläikega. Ataktilise PSi klaasistumine toimub temperatuuril 90 °C, seetõttu on materjal toatemperatuuril rabe ja pind kõva. PSi tihedus on 1,05 g/cm³. PS sisaldab võrreldes teiste termoplastidega vähem lahusteid, sisaldades vaid orgaanilisi lahusteid nagu näiteks bensiini või benseeni. Sulades on PS väga viskoosne ning jahtudes on PS-il madal kokkutõmbumisaste, tänu nendele omadustele on PS väga hinnatud survealumaterjalina. (Kaiser, 2006)

PSi iseloomulikud omadused on tema mõõtmestabiilsus, materjal on kergesti töödeldav, odav, kõva, habras, hea läbipaistvusega ja väikese veeimavusega (Kulu et al, 2015). Lisaks on PSil teiste plastidega võrreldes parimad dielektrilised omadused ning head soojusisolatsiooniomadused (Ibid). Materjali kasutatakse laialdaselt toiduainetööstuses ühekordsete toidunõude, joogitopside valmistamisel (Kaiser, 2006). PS on üks levinumaid tarbeplaste, asetsedes toodangu mahult polüetüleen (PE), polüpropüleen (PP) ja polüvinüülkloriidi (PVC) järel neljandal kohal (Kulu et al, 2015).

PSi saab liigitada kasutusotstarbe järgi kolmeks (Kaiser, 2006):

1. Standardpolüstüreen (PS, ka GPPS *general purpose polystyrene*) – pakkekile, toiduainetopsid;
2. Suure löögitugevusega polüstüreen (HIPS *high impact polystyrene*) – dušikabiin, kodumasinatate korpused;
3. Vahtplastid (EPS *expanded polystyrene*) – pakkematerjal, hoonete ja torustike soojusisolatsioon

PS sobib hästi jäikust nõudvate pakendite valmistamiseks, näiteks toodetakse standardpolüstüreenist pakkekile ja toiduainetopse (Kaiser, 2006). Lisades PS-i modifitseerimisel kummi või elastomeeri, näiteks polübutadieenkummi või sütreenbutadieenkummi saadakse HIPS (Kulu et al, 2015). Nii tekib kahefaasiline mikrokomposiitmaterjal, kuna kummiosakesed ei lahustu PSis (Ibid). Materjalil paraneb löögisitkus, kuid samas muutub läbipaistmatuks (Ibid). HIPSist valmistatakse autotööstuses armatuurlaudude ja rooliümbriseid ning elektroonikatööstuses arvuti- ja monitorikorpused (Kaiser, 2006).

2.2.1 Vahtpolüstüreen ehk EPS

PS-i baasil loodud materjalidest on levinumad vahtpolüstüreenid ehk vahtplastid (EPS) (Kulu et al., 2015). EPS kasutatakse pakendimaterjalina kuna teda on lihtne käsitleda ning saab vormida pakendatava toote kuju järgi (Kaiser, 2006). EPS on ehitusvaldkonnas hinnatud materjal, kuna on kerge, lihtsasti käsitlev, hea soojusisolatsiooni, müra- ja helipidavusega ning samuti talub hästi niiskust (Ibid).

PSi toodete valmistamise negatiivseks aspektiks on neis sisalduv stüreen, mis on väga mürgine aine ning võib põhjustada lühiajalisel kokkupuutel naha- ja limaskestärritust, seetõttu on väga oluline jälgida tooraine päritolu ja kvaliteeti. (Kulu et al., 2015)

Materjali mehaanilised omadused sõltuvad tootmisprotsessidest, paisutatud EPSi tihedus jääb vahemikku 15-90 kg/m³. EPSil on võrreldes standardpolüstüreeniga madalam tugevus ja elastsus, kuid see ei mõjuta pakendatud kauba kaitsmisvõimet. EPSi iseloomustab 2-3 mm suuruste vahtkuulikestest pressitud struktuur, mis tulevad esile kui polüstreenplast puruneb. (DE-PACK, n.d)

EPSi kasutatakse laialdaselt isolatsiooni- ja pakkematerjalina (Mendez et al., 2016). Lühema elueana kasutatavad pakkematerjalidel on suurem potentsiaal sattuda keskkonda ning põhjustada selle reostust, nt. isolatsioonimaterjalil, sest selle kasutusiga on kuni 35 aastat (Waldschläger, 2019). Jäätmete akumulatsioon keskkonda põhjustab keskkonnareostust, inimestele terviseprobleeme ning ökosüsteemi muutusi materjali toksilisuse ja rabaduse tõttu (Hyde et al., 2019).

PSi kui materjali on võimalik täielikult taaskasutada, kuid PSi plast jõuab rohkem prügilatesse kui taaskasutusse. PS on vastupidav termoplast ning laialdaselt on levinud arusaam, et PS ei biolagune. PS biolaguneb küll, kuid looduslikus keskkonnas väga aeglaselt, mistõttu püsib ta väga pikka aega ühtse materjalina. (Ho, Roberts, & Lucas, 2018)

Polüstüreeni molekulaarne koostis mõjutab polümeeri pinna hüdrofoobsust, see omakorda mõjutab, kui lihtsalt saavad mikroorganismid selle pinna külge kinnituda (Ibid). Seega on PSi pikk lagunemisaeg tingitud tema hüdrofoobsusest (Ibid). Ühest küljest loob PSi rõngakujuline struktuur mikroobide jaoks lagundamiseks rasked tingimused, kuid teisest küljest on PS-il ideaalne kuju ning suurus, et püüda kinni teatud sagedusega päikesevalgus (Ward et al., 2019).

PSi erinevad lisandid neelavad erineva sagedusega päikesevalgust, mis mõjutab plasti lagunemise kiirust. On eeldatud, et PSi täielik fotoooksüdatsioon saab toimuda ainult mikroorganismide poolt, kes lagundavad orgaanilise süsiniku CO₂, kuid pole teada PSi vastuvõtlikkust CO₂ päikesevalguses. Kui võtta arvesse täielik ja osaline fotoooksüdatsioon, siis püsib PS keskkonnas oluliselt vähem aega kui varasemalt eeldati, praegune eeldatav ajavahemik ~ 10-450 aastat. (Ward et al., 2019)

Seega on vaja PSist tehtud tooteid võimalikult palju taaskasutada, kuid samal ajal leida asemele ka materjale, mis oleksid võrdväärsete omadusega ning täielikult biolagunevad (Turner, 2020).

2.3 Seened

Seened on eukarüoodid ehk päristuumsed organismid, kes tekkisid eelkambriumis vahemikus 760 miljonit kuni 1,6 miljardit aastat tagasi (Van Bael, 2020). Seeneriiki klassifitseeritakse kuueks hõimkonnaks – *basidiomycota* kandseened, *ascomycota* kottseened, *glomeromycota* krohmseened, *bastocladiomycota* e. jõnksviburseened, *chytridiomycota* e. viburseened, *neocallimastigomycota* ehk vatsavibursseened (Ibid). Seeneliike on kirjeldatud 130 000, kuid usutakse, et seeneriiki kuulub hinnanguliselt kokku umbes 3,8 miljonit liiki (Hawksworth & Lücking, 2017).

Seente energia- ja süsinikuallikaks on orgaanilised ühendid, mille saamiseks lagundavad nad surnud orgaanilist ainet või loovad patogeense, neutraalse või mõlemapoolselt kasuliku sümbioosi taimede, loomade või teiste mikroobidega. Mõned viljakehi moodustavad liigid toituvad taimsetest või loomsetest jäänustest, samas teised liigid

loovad patogeenseid või mõlemapoolselt kasulikud suhted, näiteks moodustavad mükoriisa. (Appels, 2020)

Enamik seeni koosnevad kahest osast: seeneniidistikust, mis omastab kasvusubstraadist toitained ning viljakehast (Niemelä, 2008). Viljakeha on seene nähtav osa ning see võimaldab seenel paljuneda (Ibid). Hüüf ehk seeneniit on niitjas rakk, mis kasvades ja harunedes moodustab mütseeli (Van Bael, 2020). Mütseel ehk seeneniidistik vajab kasvamiseks erinevaid makroelemente – süsinik, hapnik, lämmastik, fosfor, väävel, kaalium ja magneesium, samuti ka mikroelemente nagu vesinik, raud, kaltsium, vask, mangaan, tsink ja nikkel (Fallis, 2013).

2.3.1 Puitu lagundavad seened

Kandseente hõimkonna *Agaricomycotina* alamhõimkonna *Agaricomycetes* klassi kuuluv torikulaadsete (*Polyporales*) selts on tuntud kui puidu lagundajad (Niemelä, 2008). Seltsi *Polyporales* (torikulaadsed) tegevus puidu lagundajatena on metsaökosüsteemide tervise jaoks eluliselt tähtis (Van Bael, 2020).

Torikseente hulka võivad kuuluda jäigalt korkjad või puitkövad eoslehekestega liigid, kuid samuti ka haprad, pehmed ning puidul õhukese kihina kasvavad liigid. Torikseentele iseloomulikud omadused on nende tugevad viljakehad, pikk eluiga ning viljakehade eoseid produtseeriv osa, mis koosneb püstistest torukestest. Selline kohastumine on kujunenud seetõttu, et suurem osa liikidest kasvavad puudel. Torikseente seeneniidistikul on lihtsam kasvada enda piiritletud kasvuruumis, kui lehikseentel mullas, kus piire pole. (Niemelä, 2008)

Puitu lagundavad seened jagunevad lagundatavate molekulide osas kaheks: valgemädanikuks ja pruunmädanikuks (Niemelä, 2008). Valgemädanik tekib, kui puidus kasvav seeneniidistik lagundab oma ensüümidega kõik puidu koostisained (tselluloosi, ligniini, hemitselluloosi), mille tagajärjel tekib valge puderjas lagupuidumass (Ibid). Pruunmädanik tekib tselluloosi ja hemitselluloosi lagundamisel (Schmidt, 2006). Sitkest tselluloosist jääb järgi ainult ligniin (Ibid), puit värvub pruuniks ning muutub hapraks (Niemelä, 2008). Sõrmede vahel hõõrudes laguneb see puudritaoliseks tolmuks (Ibid). Seeneperekonnale on mädanikutüüp iseloomulikuks tunnuseks ehk igas torikseente perekonnas on kas ainult valge- või pruunmädanikku tekitavad liigid (Ibid).

Torikseente valgemädaniku tekitajate hulka kuuluvad libliktagel *Trametes versicolor*, tuletael *Fomes fomentarius*, lakkvaabik *Ganoderma lucidum*, *Ganoderma resinaceum*, nabatorik *Grifola umbellata*, ja tiiger-hammaslehek *Lentinus Tigrinus* (Ibid).

Seene kasv ja koloniseerimise efektiivsus määravad substraadi füüsikalised omadused ja keskkonna kasvutingimused – seeneliik, temperatuur, niiskus ning pH (Meyer et al.,

2020). Kasvukiirus võib erineda sama liigi erinevate tüvede suhtes (Kalaw et al., 2021). Samuti võivad erineda tingimused seeneniidistiku arenguks ja viljakeha moodustamiseks (Kalaw et al., 2021). Seente kasvatamiseks on vaja steriilseid tingimusi, selleks peab steriliseerima nii kasvusubstraati kui ka pindasid, et eemaldada neis olemasolevad bakterite ja seente mikrobioloogiline konkurents (Jones et al., 2020).

Libliktagla seeneniidistiku kasvuks sobilik temperatuur jääb vahemikku 20-22°C, õhuniiskus ruumis peab jääma 90 - 95% juurde ning niidistiku arenguks kulub umbes 19-22 päeva (Mycelia, 2022). Lakkvaabik *Ganoderma lucidum* sobilik kasvutemperatuur jääb vahemikku 21 - 25°C, õhuniiskus ruumis 90 - 95% ning keskmiselt kulub kasvuks 10 - 20 päeva (Ibid). Nabatoriku sobilik kasvutemperatuur on 23 °C ning kasvuks kulub 18-25 päeva (Ibid). Tiiger-hammastele kulub kasvuks keskmiselt 16 päeva (Kalaw et al., 2021).

Austerservik *Pleurotus ostreatus* paikneb samuti klassis *Agaricomycetes* kuid asub seltsis *Agaricales* šampinjonilaadsed (Van Bael, 2020; Niemalä, 2008). Austerserviku seeneniidistiku sobilik kasvutemperatuur on 24°C, õhuniiskust ruumis peab olema vähemalt 85 - 95% ning kasvuks kulub umbes 12 - 21 päeva (Mycelia, 2022).

2.3.2 Seente kasutusvaldkonnad

Müko-bioteaduseid ootab ees suur tulevik, kuna nad loovad jätkusuutlikke lahendusi erinevate tööstuste ja turgude jaoks (Hyde et al., 2019). Seeni kasutatakse erinevatel otstarvetel laialdaselt toiduainetööstuses (nii otseselt toiduks kasutades kui ka kaudselt nt. leiva ja pagaritoodete, õlu, juustu ja veini valmistamisel), põllumajanduses (loomasöödaks ja söödalisandina), meditsiinis (antibiootikumide tootmisel) ja tekstiilitööstuses (kangakiudude värvimiseks) (Ibid).

Seentega seotud uurimisvaldkondades on toimunud viimastel aastakümnetel mitmekülgseid ja huvitavaid arenguid nii uute protsesside, toodete kui ka lahenduste leidmisel samuti on toimunud suurem mõistmine seeneriigi kontseptsioonist (Lange, 2014). Enamik seente molekulaarseid uuringuid on keskendunud seene olemusele, kuid vähem sellele, mida seened teevad või kuidas nad suhtlevad teiste organismidega (Ibid).

Liigid, kes moodustavad niitjaid struktuure on leidnud kasutust mitmesugustes metaboliitide, ensüümide valmistamistel kui ka materjalide arendamisel (Hyde et al., 2019). Lisaks saab seeni kasutada väetisena, biokütusena aga ka bioremediatsioonist (Ibid). Mükoriisat moodustavaid seeni kasutatakse laialdaselt põllumajanduses, kuna nad moodustavad taimejuurtega sümbiootilisi suhteid ja pakuvad seega palju eeliseid: paremaid kasvu- ja arengutingimusi, kergemat toitainete omastamist ning taimede jaoks paremat vastupanuvõimet haigustele (Hyde et al., 2019).

Kandseened on tuntud oma võime poolest lagundada polüstsüklilisi aromaatsid süsivesinikke, neid seeni kasutatakse saastunud pinnase ja vedelike bioremediatsioonis (Meyer et al., 2020). Kuid leitud on ka plastikut lagundavaid seeni: laboratoorsetes tingimustes on kasutatud plastide nagu PETi ja polüuretaani lagundamiseks seente perekondi nagu näiteks *Aspergillus* (kerahallikut) või *Penicillium* (pintselhallik) (Meyer et al., 2020).

2.4 Mükokomposiitmaterjali ehk seenematerjali olemus ning kasutusvaldkonnad

2.4.1 Mükokomposiit

Komposiit on liitmaterjal, mis koosneb kahe või enama erinevate omadustega liidetud materjalist (Arensburger, 2005). Mükokomposiitmaterjal on isekasvav materjal, mille tootmiseks on vaja seeneniidistikku ja kasvusubstraati (Appels & Wösten, 2021; Haneef et al., 2017; M. Jones et al., 2018). Teadaolevalt kasutatakse seenematerjali tootmiseks ainult viljakehi moodustavaid seeneliike (Appels et al., 2018) Viljakehi moodustavad seeneliigid on tuntud oma võime poolest lagundada lignotselluloosi sisaldavaid jäätmeid nagu saepuru või põhku (Appels et al., 2018; Grimm & Wösten, 2018). Seeneniidistik eritab ensüüme, mis muudavad substraadis olevad polümeerid laguproduktideks ning neid kasutavad seened omakorda toitainetena (Appels, 2020). Orgaaniline materjal laguneb ning asendub seene biomassiga (Ibid). Hüüfid kasvavad substraadist välja ja moodustavad õhulise kompaktse kihi, mida kutsutakse seenenahaks (Ibid). Nii saab luua kaks erinevat materjalitüüpi: puhast seenematerjali ja seenekomposiitmaterjali (Karana, Blauwhoff & Hultink, 2018).

Puhas seenematerjal saadakse vedelast seeneniidistiku kultuurist (Appels & Wösten, 2021). Seeneoste vedel käärimine võib toimuda staatilistes või masinaga raputatud anumates (Haneef, Ceseracciu ja Canale, 2017; Appels et al., 2020). Staatilises vedelkultuuris moodustavad niitjad seened vedeliku pinnal hüüfikogumiku (Appels, 2020). Puhast seenematerjali kasutatakse naha- ja tekstiiliasendajana ning seenekomposiite pakke-, ehitus-, ja isolatsiooniasendajana (Ibid).

Kui lisada kasvamise lõpus lisaaineid (nt. glütserool või etanool) võib tulemuse värvus, läbipaistvus ja jäikus varieeruda (Karana et al., 2018). Puhta seenematerjali omadused sõltuvad nii seeneliigist, kasvusubstraadist ja kasvutingimustest kui ka edasisest töötlemisest (Appels et al., 2018). Seeneniidistiku komposiitmaterjalidel, mis sisaldavad põllumajandusjääke, on madalam tihedus ja elastsus kui puhtal seeneniidistikul ning

viimaseid klassifitseeruvad tugevuselt vahtudeks ehk vahtplastideks (Jones, 2020; Appels et al., 2019)

Materjali kuivatades saab selle omadusi varieerida ning tekitada sarnasus naha, paberi või plastikuga (Meyer et al., 2020). Seene kasvu saab peatada kas seenesubstraadi kuivatamise või kuumutamise käigus (Yang, Park, & Qin, 2021). Kuumutamine tapab seene, kuivatamine aga jätab seene nõ talveune staadiumisse (Appels et al., 2019; Appels & Wösten, 2021). Viimasel juhul on võimalik kasvu taaskäivitada ning selleks peab materjali niisutama (Appels & Wösten, 2021).

Materjali omadusi on võimalik muuta ka kuum- ja külmpressimise abil (Appels et al., 2019; Girometta et al., 2019). Kuumpressides muutub vahtplastlaadne seenekomposiit korgi- ja puidutaoliseks (Appels et al., 2019). Materjali pressimise teiseks eeliseks on hüdrofoobsete omaduste parandamine (Joshi et al., 2020). Nii kuumpressimine kui ka külmpressimine vähendab niiskuse absorptsiooni materjalil, vastavalt massiprotsendile ~250% ning võrreldes kuivatatud materjaliga ~580% (Jones et al., 2020).

Jiang et al., 2016 aasta teadusartiklist selgus, et materjali omadusi saab mõjutada ka kasvuperioodiga. Pikem kasvuperiood loob jäigemad ja tugevamad struktuurid ning siledama pinna (Jiang et al., 2016).

Seenematerjalil on mitmed eelised tavapärase pakkematerjalide ees:

1. Tootmine on madala energiatarbega, kasutatakse rohkelt põllumajanduslikke kõrvalsaadusi ning jäätmete ringlusesse võtmine muudab tootmise odavaks ja keskkonnasõbralikuks (Jones et al., 2020).
2. Võrreldes traditsiooniliste pakkematerjalidega on seenmaterjal on väikese tihedusega, konkurentsivõimelise tugevuse, hea tõmbetugevuse ja löögitugevusega (Jiang et al., 2016).
3. Seenematerjal on biolagunev, mis annab sellele väga suure eelise sünteetiliste pakkematerjalide ees (Jiang et al., 2016).
4. Seenematerjal on oma olemuselt allergeenivaba, kui töödelda materjali kõrgetel temperatuuridel (200-400°C kraadi), ultraviolettkiirgusega või takistada viljakehade kasvu, mis hävitavad allergiat põhjustavad spoorid (Jiang et al., 2016).
5. Tulekindlus ja head isolatsiooniomadused (Wösten, Krijgheld, & M. Montalti, 2018).

Seenematerjali laiemat kasutamist piiravad järgnevad tegurid:

1. Niisketes tingimustes ei ole materjal vastupidav. (Jones et al., 2020)
2. Seentel ei ole atraktiivne kuvand, kuna nad põhjustavad inimestele, loomadele ja taimedele erinevaid haiguseid, mistõttu on inimeste meelsus pigem negatiivne (Hyde et al., 2019).
3. Kasvuperioodiks vajavad seened kindlaid tingimusi – õhuniiskus, temperatuur, CO₂ ja O₂ (Wösten et al., 2018).
4. Materjali kasvatamine vajab aega - sõltuvalt liigist ja kasvutingimustest võib kuluda materjali kasvuks 7-30 päeva (Jiang et al., 2016; Lelivelt, 2015)
5. Materjali kasvamist ei saa päris lõpuni kontrollida ehk materjali lõplikke omadusi on raske määratleda (Wösten et al., 2018).

Mükokomposiidi loomisel kasutatakse kirjanduse järgi kõige enam järgnevat liike: *Ganoderma lucidum* (lakkvaabik), *Pleurotus ostreatus* (austerservik), *Trametes versicolor* (libliktagel) ja veel teisi liike perekonnast *Trametes* (Attias et al., 2020; Yang et al., 2021). Populaarsemate seeneliikide hulka kuuluvad austerservik ja lakkvaabik, sest neid on lihtne kasvatada, nad kasvavad kiiresti ning need liigid on kergesti kättesaadavad. Lisaks on austerservik kiirekasvuline, vähenõudlik ja kahjurite vastu küllaltki resistentne liik (Sánchez, 2010).

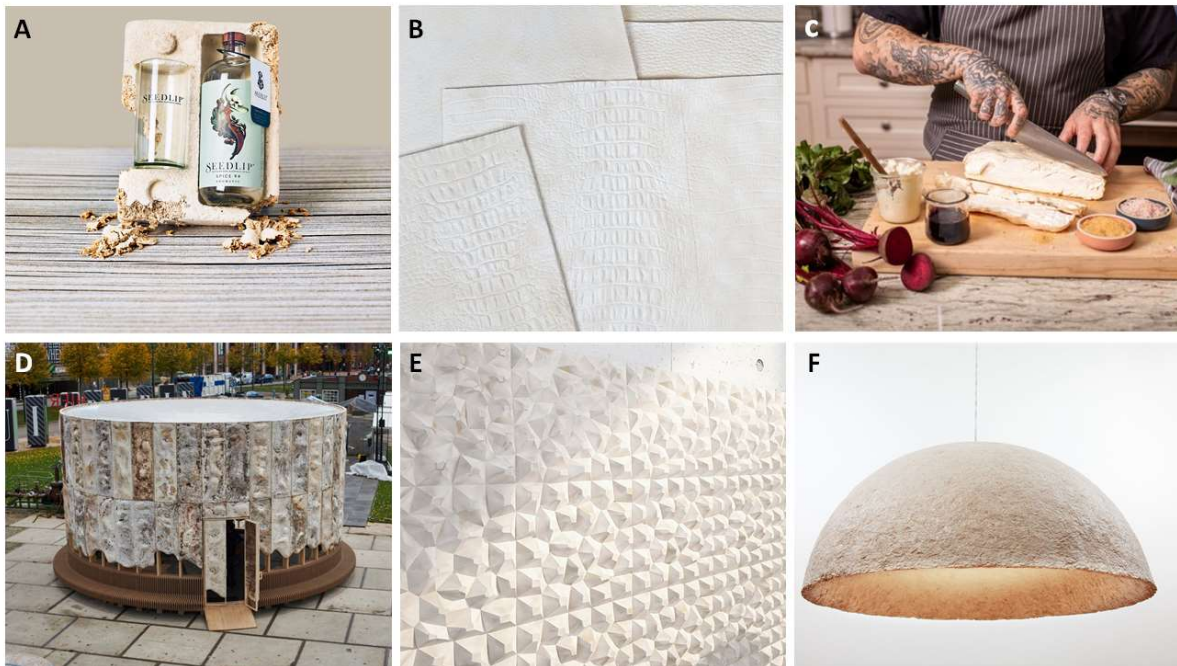
Yang et al. 2021. aasta uuringust selgus, et ligi 32% teaduskirjanduses puudub märke liikidest, mida materjali loomisel kasutati, selline olukord muudab materjali taasloomise keeruliseks.

2019. aasta K.Cerim et al., „Seened kui uus biomaterial: patendi teadustöö“ uuringus selgus, et ettevõtted, kes toodavad seenematerjalist tooteid on patendis maininud enam *Trametes versicolor* libliktagelit ja *Pleurotus ostreatus* austerservikut. Viimastel aastatel on tõusnud liikide *Ganoderma lucidum* lakkvaabiku ja *G. Orogene*, *P. ostreatus* austerserviku osakaal (Cerimi et al., 2019). Perekonda *Polyporus*, *Fomes* ja *Ganoderma* kuuluvatel liikidel on võime moodustada karge meenutavaid struktuure, neil on hea paindetugevus (Ibid).

Seenekomposiitmaterjali laialdasemat kasutamist piiravaks teguriks on tema hüdrofiilsus ehk materjal ei ole niisketes tingimustes väga vastupidav (Jones et al., 2020). Appels ja tema kaasautorite 2019. aasta teadusartiklis juhtis tähelepanu, et seene tüvest võib sõltuda komposiitmaterjali veeimavuse omadused. Libliktagel moodustab hüdrofoobse kihi substraadi pinnale, mis takistab materjali veeimavust (Ibid).

2.4.2 Kasutusnäiteid

Seenematerjali on arendatud ja toodetud ligi 15 aastat – kõige vanem ja laialdasema tootevalikuga ettevõtte on Ecovative Design, kes tegutseb Ameerika Ühendriikides. Ettevõtte kasutab toodete loomisel kahte tehnoloogiat: MycoComposite ja AirMycelium. MycoComposite puhul luuakse seenekomposiidist pakkematerjale (joonis 2, A), kuid toodet saab kasutada ka ehitusmaterjalina. AirMycelium on puhas seenematerjal, millest saab luua nahka (joonis 2, B), tekstiili ning toitu. (Ecovative, 2022)



Joonis 2. A – Seenematerjal pakkematerjalina (Seedlipdrinks, 2022), B – AirMycelium nahk (Ecovative, 2022), C - Seeneniidistikust loodud lihaasendus (MyForest Foods, 2022), D - Isekasvav paviljon 2019. aasta Hollandi disaininädalal (DDW) Ketelhuisplein Eindhovenis, Foto Oscar Vinck (Vliet, 2020), E - Heliisolatsiooni plaadid (Green product award, 2020), F – Seenematerjalist laelamp (Danielle Trofe, 2022)

Ecovative tütarettevõtte MYForest Foods pakub lihaasendavaid tooteid seenest (joonis 2, C) (Ecovative, 2022).

Lisaks pakkematerjalile ja lihaasendajale saab seenekomposiiti kasutada ehitusvaldkonnas soojusisolatsiooni- ja ehitusmaterjalina (Girometta et al., 2019). 2019. aastal rajasid kaks kunstnikku Pascal Leboucq ja Eerik Klarenbeek Hollandi disaininädala raames „The Growing Pavilion“ ehk isekasvava paviljoni seeneniidistikupaneelidest (joonis 2, D) (Vliet, 2020). Avaratesse ruumidesse paigutatuna annavad seenematerjalist paneelid (joonis 2, E) lisaks silmailule ka heliisolatsioonina erakordset lisaväärtust, kuna selgus, et materjalil on head helineeldumisomadused (Appels, 2020).

Vaatamata materjali suurele potentsiaalile on seenematerjali kasutuselevõtt olnud küllaltki aeglane (Jones et al., 2020). Paljud tuntud ettevõtted nagu Dell, IKEA, Adidas, Kering (kelle tütarfirmadeks on Yves Saint Laurent ja Gucci) ja Lush teevad koostööd seenematerjalide arendajatega (Haines, 2021). Kuigi seenematerjal on olnud kommertslikult kättesaadav üle 15 aasta, siis on see jäänud alakasutatuks ning on olnud siiani kasutusel pigem nišitootena (Jones et al., 2020). Materjali eelistavad kunstnikud ja disainerid, kes loovad sellest sisustust – toole ja lambikupleid (joonis 2, F) (Ibid).

Seenematerjal on saavutanud kuulsust ka Eestis: 2021. aasta roheidee konkursi Negavati võitja oli seenematerjalist tooteid arendav ettevõtte Myceen (Negavatt, 2021). Nende tootevalikusse kuuluvad akustilised paneelid, valgustid ning taburetid (Ibid).

3 MATERJAL JA METOODIKA

Käesoleva magistritöö eesmärk on selgitada välja, milline seeneliik, millise substraadiga annab EPSi omadustele kõige sarnasema tulemuse. Magistritöö jaoks viidi läbi kaks eelkatset Tallinna Tehnikaülikooli Tartu kolledži laboris vahemikul 7.06.2021-10.11.2021 ning põhikatses toimus Eesti Maaülikooli laborites vahemikul 10.11.2021-1.03.2022.

3.1 Eelkatsed

Esimese eelkatse eesmärgiks oli leida vastused küsimusele kas ja kui kiiresti seeneniidistik laboritingimustes kasvab ning selgitada välja parimad seeneliigid, mida kasutada põhikatses. Teise eelkatse eesmärgiks oli teada saada, kas seeneniidistikuga nakatunud substraat kasvab vormis edasi ning moodustab kompaktsed materjali.

Materjali arenguks on valitud liigid kultiveerimise lihtsuse, mütseeli kättesaadavuse ja mütseeli tugevuse järgi. Autor soovis materjali arenguks katsetada kodumaist liiki tuletaela ning tiiger-hammaslehit kuna teadaolevalt pole antud liiki varasemalt teadusartiklites mainitud.

Eelkatsete jaoks kasutati seitset erinevat seeneliiki:

1. Lakkvaabik *Ganoderma lucidum*
2. Austerservik *Pleurotus ostreatus*
3. Libliktagel *Trametes versicolor*
4. *Ganoderma resinaceum*
5. Tuletael *Fomes fomentarius*
6. Nabatorik *Grifola umbellata*
7. Tiiger-hammaslehit *Lentinus Tigrinus*

Eelkatse jaoks soetas töö autor teramütseeli ja kasvukotid ettevõttelt SeeneSeeme OÜ. Liigid pandi kasvama kolme erineva struktuuriga substraatidel: lepuuuhakk, okaspuu saepurul ja rukkipõhul. Substraate eelnevalt ei peenestatud. Esimene eelkatse toimus ajavahemikul 7.06-9.07.2021.

Substraadid lisati 2 l substraati mahutavasse kasvukotti, kuhu lisati 60% vett, üleliigne vesi valati välja. Kasvatuskotid autoklaaviti (autoklaav HMT HMC260) temperatuuril 121 °C 20 minutit (Elsacker, Søndergaard et al., 2021) Autoklaavitud substraat jahutati

toatemperatuurini (22 °C) ning sellele lisati 10% teramütseeli. Kasvukotid tähistati vastavalt tabelis nr 1 tähe ja numbrikombinatsiooni järgi. Seeneniidistik kasvas kuni 35 päeva kliimakambris (RUMED 3401) 60% õhuniiskuse juures temperatuuril 22 °C. Katsekehade kasvutulemusi hinnati visuaalsel vaatlusel.

Tabel 1. Esimese eelkatse katsekehade tähistused

Substraat	Substraadi tähis	Seeneliik	Liigi tähis
Põhk	A	Lakkvaabik <i>Ganoderma lucidum</i>	1
Lepahake	B	Austerservik <i>Pleurotus ostreatus</i>	2
Saepuru	C	Libliktagel <i>Trametes versicolor</i>	3
		<i>Ganoderma resinaceum</i>	4
		Tuletaelik <i>Fomes fomentarius</i>	5
		Nabatorik <i>Grifola umbellata</i>	6
		Tiiger-hammasleht <i>Lentinus Tigrinus</i>	7

Teine eelkatse toimus ajavahemikul 29.09-10.11.2021.

Katses kasutati nelja eelkatses paremini kasvanud seeneliiki: libliktagel, *G. resinaceum*, tuletael ja tiiger-hammasleht. Substraadidena kasutati leppapuu haket, okaspuu saepuru ja rukkipehku. Eelnevalt lõigati põhk 2-4 cm tükkideks. Substraadid lisati kaussi ning peale valati 22 °C vesi, substraate niisutati 30 min, üleliigne vesi pigistati välja. Substraadid lisati I eelkatses kasutatud kasvatuskottidesse, need autoklaaviti (autoklaav HMT HMC260) temperatuuril 121 °C 20 minutit. Autoklaavitud substraat jahutati toatemperatuurini (22 °C) ning seejärel lisati 10% teramütseeli. Esimese eelkatse tulemustest lähtudes valiti seenematerjali kasvuks lühem kasvuperiood. Seenematerjal kasvas kasvatuskottis 23 päeva, visuaalsel vaatlusel hinnati kasvu ning paremini kasvanud seenesubstraat valiti välja ja lisati 24x6x2 suurusesse vormi. Vormidesse läksid ainult need liigid koos substraatidega, millel polnud näha hallitust – tähisega A2, B1, B2, C1, kordusi oli kolm. Koostati tabel 2, kus on täha katsekehade tähistusi. Hästi läbikasvanud substraadil on väiksem tõenäosus nakatuda võõrliigiga. Seejärel kasvas materjal 13 päeva (kliimakambris RUMED 3401). Katsekehi hinnati visuaalsel vaatlusel – hinnati seeneniidistikuga kasvu substraadis.

Tabel 2. Teise eelkatse katsekehade tähistused

Substraat	Substraadi tähis	Seene liik	Liigi tähis
Põhk	A	Libliktagel <i>Trametes versicolor</i>	1
Lepahake	B	<i>Ganoderma resinaceum</i>	2
Saepuru	C	Tuletael <i>Fomes fomentarius</i>	3
		Tiiger-hammasleht <i>Lentinus Tigrinus</i>	4

3.2 Põhikatse

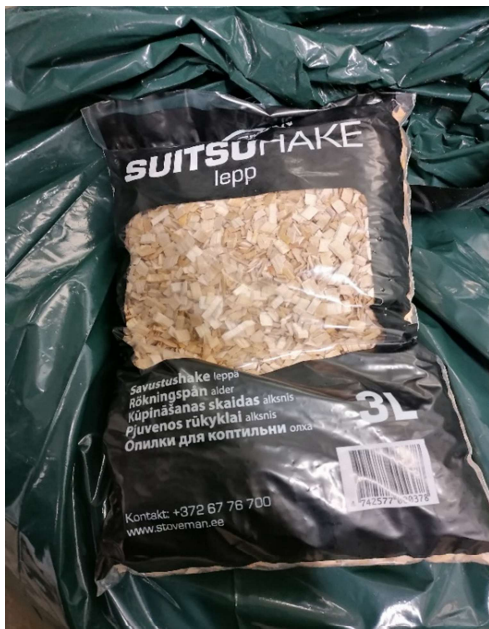
Põhikatse viidi läbi Eesti Maaülikooli laboris vahemikul 10.11.2021-1.03.2022. Põhikatses kasutatud teramütseel ja vajalikud seadmed saadi Eesti Maaülikooli laborist.

3.2.1 Katsekehade kasvatamine

Põhikatse jaoks valiti neli paremini eelkatses kasvanud liiki, millest kõik kuuluvad torikseente hulka. Valitud liigid olid järgnevad:

1. Libliktagel *Trametes versicolor*
2. *Ganoderma resinaceum*
3. Tuletael *Fomes fomentarius*
4. Tiiger-hammastelehk *Lentinus Tigrinus*

Kasvatamiseks valiti kolm erineva struktuuriga substraati: lehtpuu hake tootjalt Stoveman (joonis 3), lehtpuu saepuru (joonis 4) ja Biohansa OÜ põhugraanul (joonis 5). Eelkatses kasutatud rukkipoõhu asemel otsustati põhikatses kasutada nisu põhugraanulit, kuna eelkatses kasutatud põhk jäi lõigatuna ebaühtlase struktuuriga ning seetõttu oli ka seene kasv pärsitud. Põhikatses valiti kolmandaks substraadiks nisugraanul, kuna rukkist toodetud graanulit polnud saadaval.



Joonis 3. Substraat: leppahake. Autori foto



Joonis 4. Substraat: saepuru. Autori foto



Joonis 5. Substraat: põhugraanul OÜ Biohansa. Autori foto

Substraadid kaaluti ning seejärel lisati 60% vett. Põhugraanul ja vesi segati kokku segumasinaga, hake pandi kurnamiskotti ning seejärel uputati vees 1h, üleliigne vesi kurnati välja. Saepurule ja vesi segati käsitsi plastmassist kastis. Substraatidelt võeti proov, millest määrati kuivkaal ning veesisaldus. Selleks asetati substraadiproov 48h temperatuuril 43°C kondensatsioonkuivatisse. Põhugraanul sisaldas vett 68,38%, hake 56,43% ja saepuru 65,90%.

Vastavalt katsete standarditele lõigati vormid Maaülikooli puidulaboris niiskuskindlast vineerist, mille küljed kinnitati kruvidega. Vormid valmistati vastavalt standardites määratud mõõtude järgi: paindetugevuse määramise katsekehade jaoks vorm 38x10x2,5 cm, survetugevuse määramise katsekehade jaoks vorm 10x10x2,5 cm. Mõõtmete stabiilsuse katsekehade mõõdud erinevad standardist. Katsekehad olid mõõtudega 19x10x2,5 cm, soovituslik oli 10x10x2,5 cm. Mõõtude erinevus tuleneb sellest, et peale katsekehade valmimist otsustati vahetada katse standardit. Töö eesmärgiks oli leida sobivam materjal, millega saaks asendada pakkematerjalina kasutuses olevat EPSi. Kuna

pakkematerjal peab toote kaitsmiseks säilitama oma kuju, valiti Mõõtmete stabiilsus standard, et vaadelda, kas materjal püsib kompaktsena ka õhuniiskuse käes.

Painde- ja survetugevust ning mõõtmete stabiilsuskatses võrreldi seenematerjali omadusi EPSiga – EPS 60. Selleks lõigati katsete läbiviimiseks sama suured katsekehad.

Nii töövahendid kui ka substraadid steriliseeriti autoklaavis 121°C 25 minutit. Autoklaavitud substraat jahutati temperatuurini 21°C, seejärel lisati 10% teramütseeli. Põhikatses kasvatati seeneniidistikku kasvukottides 14 päeva. Põhikatses valitud kasvuaeg tulenes eelkatses nähtud tulemustest ning kuna Eesti Maaülikoolis olevas laboris olid seenekasvuks steriilsemad tingimused, sai kasvuaega lühendada ega tekkinud saastust. Seeneniidistikuga läbikasvanud substraat lisati vormidesse, vorm asetati niiskuskindla vineeri peale ning vormid kiletati (joonis 6).



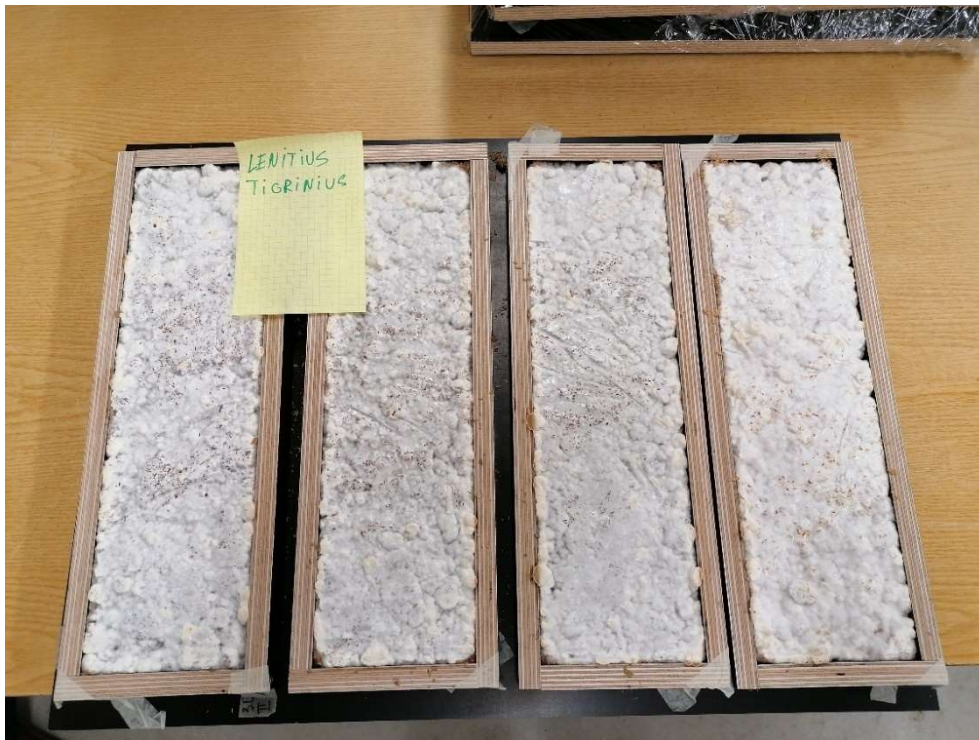
Joonis 6. Seenematerjal kasvamas Maaülikooli laboris. Foto. Maidu Silm

Igast liigist ja substraadist kasvatati ühe omaduse testimiseks (painde-, surve- ja niiskuskatse) neli katsekeha - kokku oli katsekehi 144. Katsekehad märgistati vastavalt tabelis nr 3 numbri/tähe kombinatsiooni järgi. Liigi tähis tähistab ladinakeelse nime esitähte.

Tabel 3. Katsekehade grupeering

Substraat	Substraadi tähis	Seene liik	Liigi tähis
Põhk	1	Libliktagel <i>Trametes versicolor</i>	T
Lepahake	2	Ganoderma resinaceum	G
Saepuru	3	Tuletael <i>Fomes fometarius</i>	F
		Tiiger-hammasleht <i>Lentinus Tigrinus</i>	L

Materjal kasvas vormis 7 päeva ning siis eemaldati vormist. Joonisel 7 on näidatud kuivatamata materjali. Seene kasvu peatamiseks kuivatati katsekehad kontsentraat kuivatuskapis temperatuuril 43.5 °.



Joonis 7. Paindekatse katsekehad enne kuivatamist (liik tiiger-hammasteleht). Autori foto

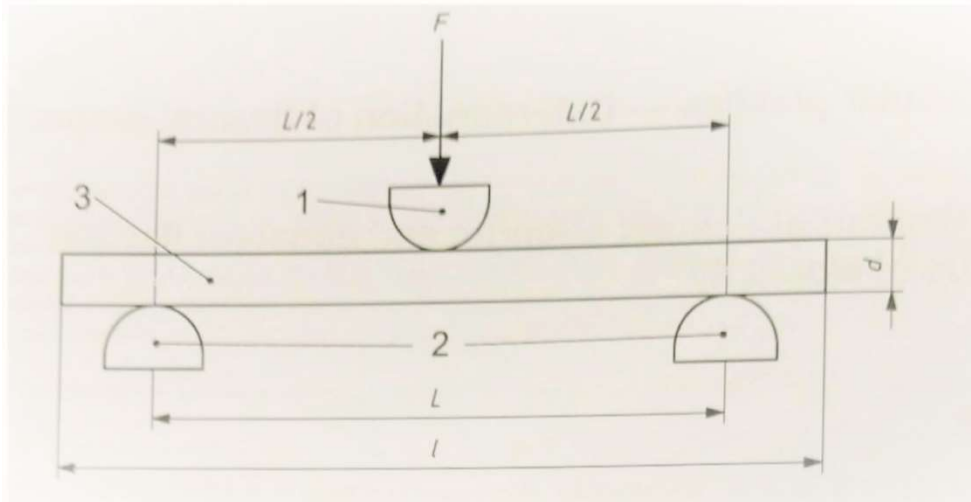
3.2.2 Katsekehade mõõtmisvahendid

Katsekehade laiuse ja kõrguse määramiseks kasutati digitaalselt nihikmõõdikut Colant cal ip67, mõõtevahemik on 0 – 150 mm, mõõtetäpsus 0,01 mm. Pikkuse mõõtmiseks kasutati joonlauda. Kaal määrati digitaalse kaaluga KERN EMB-S, mõõtevahemik 0,1g- 500g ning mõõtetäpsus 0,01g.

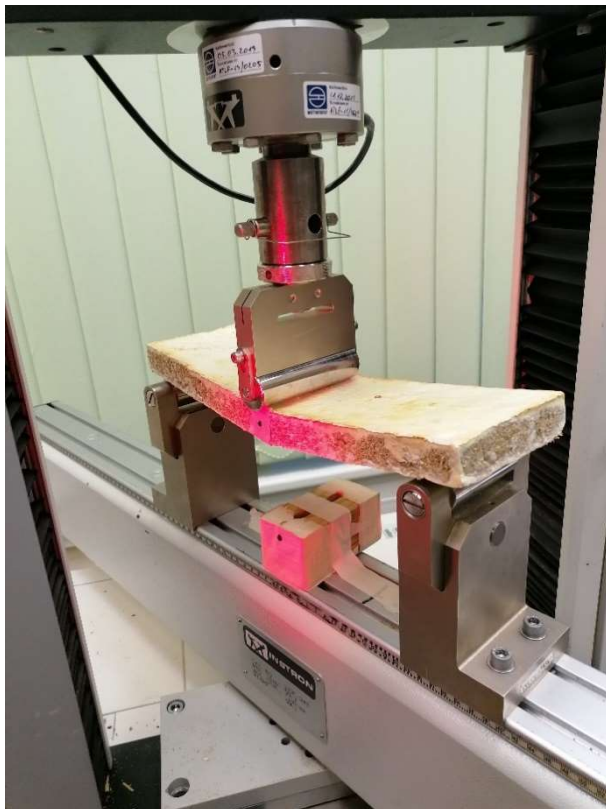
3.2.3 Paindekatse metoodika

Paindetugevuse määramiseks kasutati Maaülikooli puiduteaduse laboris olevat masinat INSTRON 3369, maksimaalne paindejõud määrati standardiga ISO 1209-2:2007 (ISO, 2007). Läbipainde mõõtmine toimus optilise videotensomeetriga, INSTRON 3369, katsekehade küljele märgistati keskkohat punktiga, et videotensomeeter mõõdaks läbipainde. Katsekehade koormamine toimus kolme punkti paindekatses joonisel 8. Katsekehad mõõdeti ja kaaluti enne paindekatse teostamist. Katsekehi koormati kuni purunemiseni. Masina juhtimine toimus arvutiprogrammiga Bluehill® Universal, mis edastas automaatselt esialgse andmetöötluse salvestatud failidest (vt. lisa 4, tabel 5), algraafikud on toodud lisa nr 3. Näide kolme punkti paindekatses on esitatud joonisel

9. Paindekatse käigus saadud keskmised katsetulemused ja katsekehade tihedused on kantud paindekatse tabelisse (vt. lisa 5, tabel 6).



Joonis 8. Kolme punkti paindekatse skeem (International Organization for Standardization (ISO,2007)).



Joonis 9. Paindekatse näidis seadmega INSTRON 3369. Autori foto

Paindekatses tugevus R arvutusvalem (ISO, 2007):

$$R = 1,5F_R \frac{L}{bd^2} \times 10^6, \quad (3.1)$$

kus F_R on suurim koormus kN;

L - tugirullide telgede vahe mm;

b - katsekeha laius mm;

d - katsekeha kõrgus mm.

Tihedus ρ (ühik g/cm³) arvutati valemiga (Jose, Sreenadh, & Deepak, 2021):

$$\rho = \frac{M}{(Lxwxxt)}, \quad (3.2)$$

kus L on pikkus

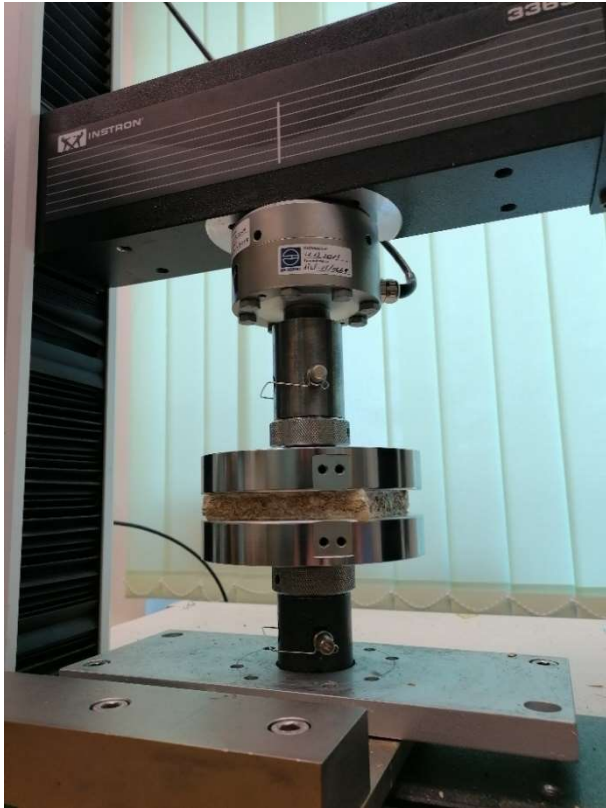
w on laius

t on kõrgus.

3.2.4 Survekatse meetodika

Survetugevuse määramiseks kasutati samuti Maaülikooli puiduteaduse laboris olevat masinat INSTRON 3369, mis salvestas arvutisse jõu ja deformatsiooni. Masina juhtimine toimus arvutiprogrammiga Bluehill® Universal, mis edastas automaatselt esialgse andmetöötluse salvestatud failidest (lisa nr 7, tabel 7), alggraafikud on toodud lisa nr 6. Survetugevus määrati standardiga EVS-EN ISO 844:2021 (ISO, 2021). Algandmetes arvutatud keskmised tulemused ja tihedused on lisa nr 8, tabel 8.

Eelkatsega tehti kindlaks materjali käitumine survekatsel. Selle põhjal otsustati katsed lõpetada 15 mm deformatsiooni juures. Materjal oli selleks ajaks oma tugevuse piiri ületanud. Enne katsete algust katsekehad mõõdeti ja kaaluti. Näide survekatsest on esitatud joonisel 10.



Joonis 10. Survekatse seadmega INSTRON 3369. Autori foto

Survetugevus σ_m arvutusvalem (ühik mPA) (ISO, 2021):

$$\sigma_m = \frac{F_m}{A_0} \quad , \quad (3.3)$$

kus F_m on maksimaalne jõud, N
 A_0 katsekeha ristlõike pindala m^2

Survekatse käigus saadud keskmised katsetulemused ja katsekehade tihedused on kantud survekatsete tabelisse (vt. tabel 3).

Tihedus ρ (ühik g/cm^3) arvutati valemiga (Jose et al., 2021):

$$\rho = \frac{M}{(Lxwxt)} \quad , \quad (3.4)$$

kus L on pikkus
w on laius
t on kõrgus.

3.2.5 Mõõtmete stabiilsus meetodika

Katse eesmärgiks oli välja selgitada, millised liigid, millise substraadiga imavad endasse kõige enam niiskust ning muudavad oma mõõtmeid. Katse viidi läbi Maaülikooli

puiduteaduse laboris, kasutati kliimakambrit RUMED 3401 (joonis 11). Käesolevas töös kasutati niiskuskatse jaoks standardit ISO 2796:1986 (ISO, 1986), mille järgi valiti katse temperatuuriks 40°C ning õhuniiskuseks 90%. Katsekehad mõõdeti ja kaaluti enne kambrisse asetamist. Näide katsekehast konditsioneerikapis (joonis 12).



Joonis 11. Kliimakamber RUMED 3401. Autori foto



Joonis 12. Katsekehad kliimakambris, katse algus. Autori foto

Katsekehi mõõdeti ja kaaluti peale 20h ning 48h möödumist.

Pikkuse muutuse leidmiseks (%) kasutati valemit (ISO, 1986):

$$100 \times \frac{l_t - l_o}{l_o}, \quad (3.5)$$

Laiuse muutuse leidmiseks (%) kasutati valemit (ISO, 1986):

$$100 \times \frac{b_t - b_o}{b_o}, \quad (3.6)$$

Kõrguse muutuse leidmiseks (%) kasutati valemit (ISO, 1986):

$$100 \times \frac{\delta_t - \delta_o}{\delta_o}, \quad (3.7)$$

kus l_t , b_t ja δ_t on esialgsed mõõdud ja l_o , b_o ja δ_o on katsekehade mõõdud peale 20h ja 48h möödumist.

Arvutati katsekehade pikkuse, laiuse ja kõrguse muutused ning koostati joonised. Lisas nr 9 on näha tabelis nr 9 ja 10 katsekehade mõõtmete muutused peale 20h ja 48h.

3.2.6 Andmeanalüüs

Puiduteaduse laboris läbi viidud surve- ja paindekatse masinaga INSTRON 3369 arvutiprogrammi Bluehill® Universal edastas esialgsed andmetöötlusfailid, tulemused on toodud lisas 1. Edasine andmetöötlus viidi läbi programmiga MS Excel 2016, millega koostati erinevad joonised. Niiskuskatse andmed sisestati MS Excel 2016 käsitsi, seejärel viidi läbi edasine andmetöötlus. Arvutati iga katse kohta keskmised tulemused ning koostati tabelid ja joonised.

4 TULEMUSED JA ARUTELU

4.1 Eelkatsete tulemused ja arutelu

Seened kasvasid kõikidel substraatidel, kuid silma hakkas libliktagel, kelle kasv oli kõikidel substraatidel ühtlane (lisa 1, L1.1). Austerservik, keda peaks olema kirjanduse järgi kõige lihtsam kultiveerida, oli katses üks halvemini kasvanud liike (lisa 1, L1.2), visuaalselt hinnates tundus talle kõige paremini sobivat substraadiks põhk. Ka *Ganoderma resinaecum* kasvas kõikidel substraatidel ühtlaselt (lisa 1, L1.3), kuid hakke peal moodustas tugeva struktuuri.

Lakkvaabik kasvas kõige paremini hakke peal, teiste substraatide peal jäi kasv kesiseks (lisa 1, L1.4). Tuletael kasvas hästi põhul ja saepurul, moodustades kasvukotti nahkja struktuuri (lisa 1, L1.5). Nabatorik kasvas küll kõikidel substraatidel, kuid visuaalsel vaatlusel tundus niidistik võrreldes teiste liikidega liiga nõrk (lisa 1, L1.6). Tiigerhammaslehe kasvu oli kõige parem hakke peal, teiste substraatide peal oli kasv pigem kesine (lisa 1, L1.7).

Teises eelkatses kasvas põhul kõige paremini *G.resinaecum* ning libliktagel, teistel liikidel oli näha vaid seeneniidistiku algmeid (lisa 2, L2.1). Hakke substraadil oli samuti enim koloniseerinud *G.resinaecum* ja libliktagel, tuletaela ja tiigerhammaslehe kasvu tekkis hallitus. Saepuru substraadil kasvades jäi kõikidel liikidel kasv kehvaks (lisa 2, L2.3). Libliktagel, *G. resinaecumil* ja tiigerhammaslehel oli niidistiku arengu alget näha, kuid samalaadset koloniseerimist nagu eelkatses ei tekkinud. Saepuru substraadil tekkis kõikide liikidega hallitus.

Vormi pandi ainult substraadis kasvanud liigid: A2, B1, B2, C1. Nendeks oli *Ganoderma resinaecum* põhul ja hakke peal kasvanud, põhul ning saepuru peal kasvanud libliktagel. Teistel kasvukotis kasvanud liikidel oli hallitus, seega sooviti vältida vormis kasvava materjali nakatumist hallitusseentega.

Kompaktse seenematerjali sai ainult *Ganoderma resinaecumist*. Lisas 2, L2.4 on näha seenematerjali hakke peal kasvanud *Ganoderma resinaecumit*. Materjal püsis ainsana katses kasutatavatest liikidest ühes tükis.

4.1.1 Eelkatsete arutelu

Esimeses eelkatses oli kehvem kasv põhul tingitud fraktsiooni suuruselt ja ka niiskusest. Suure fraktsiooniga põhk ei imanud vett endasse ning kasvatuskoti põhja moodustus

veekogum. Sama probleem tekkis ka hakkel: niiskus kogunes kasvukoti põhja ning võis mõne liigi puhul kasvu pärssida.

Esimeses eelkatses saadud tulemused näitasid, et kasv sõltus substraadist: substraadi suurusest, niiskusest ja ka liigist. Põhk sobis kasvuks libliktaglale, austerservikule ja *Ganoderma resinaecum*´le. Seened saavutasid substraatidel keskmiselt nelja nädalaga oma maksimaalse kasvu.

Teises eelkatses oli seente kasv võrreldes esimese katse kasvuga kesisem. Kõige paremini kasvas põhu peal liikidest *G.resinaecum* ja libliktagel (lisa 2, L2.1). Nii libliktaglal, tuletalal ja tiiger-hammaslehikul tekkis kasvukotti hallitus (lisa 2, L2.1), see viitab asjaolule, et substraat ei olnud piisavalt steriilne või teramütseeliga substraadiga nakatamine ei toimunud piisavalt steriilsetes tingimustes.

Hakke peal kasvades oli kõige parem tulemus – nii nagu esimeses eelkatseski – *G.resinaecumil* ja libliktaglal (lisa 2, L2.2). Tuletaela ja tiiger-hammaslehe kasvu ei saa antud katses põhu peal arvestada, kuna substraadile tekkis hallitus (lisa 2, L2.2).

Esimese eelkatse eesmärk – leida vastus küsimusele, kas ja kui kiiresti seeneniidistik laboritingimustes kasvab – sai saavutatud. Esimeses eelkatses leiti, et seeneniidistik kasvab laboritingimustes ning 35-päevase kasvuperioodi asemel saab kasutada lühemat kasvuperioodi. Kasvuperiood kasvukotis sobib 35 päeva asemel 14-25 päeva.

Teise eelkatse kehvemat kasvu saab selgitada ebapiisava steriilsusega. Kuna kõikidele substraatidele tekkis hallitus, siis pidi olema nakatamisprotsess mütseeliga ebasteriilne. Kasvu võis pärssida, nii nagu esimeses eelkatses, ka substraadi niiskus. Hake jäi liiga niiskeks: ka peale mitmekordset kurnamist jäi kasvukoti põhja vesi. Samas oli saepuru teises eelkatses osaliselt liiga kuiv. Kasvu võisidK pärssida ka okaspuu saepurus leiduvad eeterlikud õlid, mis takistavad seeneniidistiku kasvu (Minova et al., 2015).

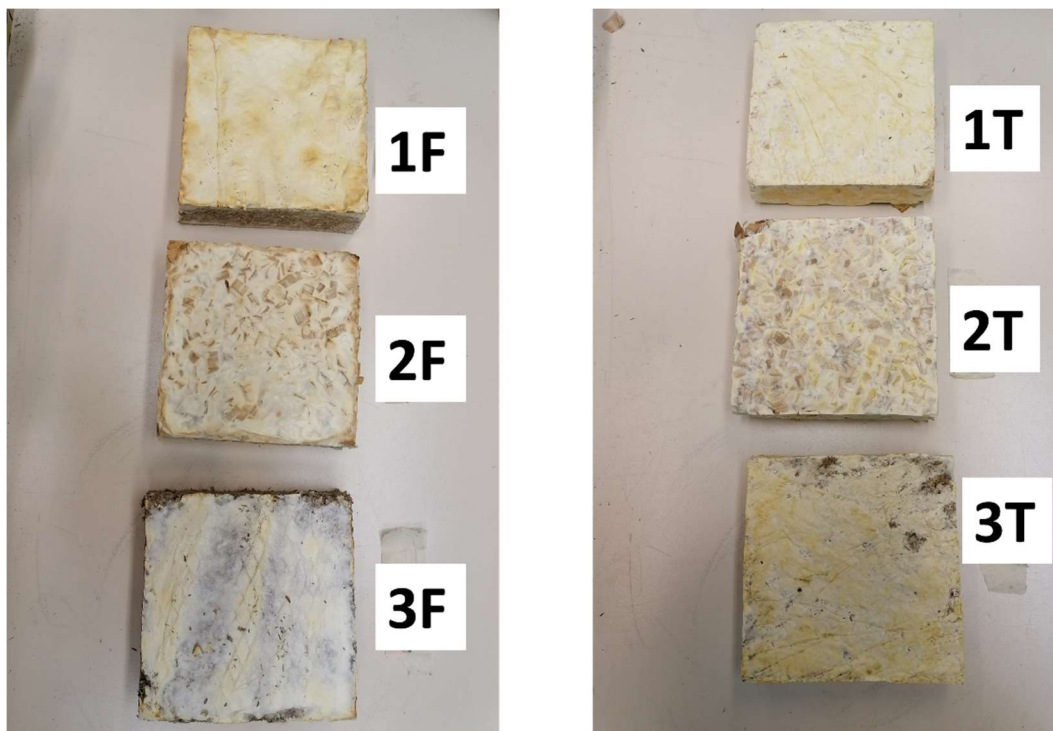
Teise eelkatse eesmärgid said saavutatud. Valitud seeneliikidest läksid kõik kasvama, kuid kasv oli sõltuvalt liigist ja substraadist ebaühtlane. 12st seene-substraadi katsekehast 4 kasvasid ilma hallitusest ning sobisid seetõttu vormipanekuks. Paremini kasvanud seeneliigid olid libliktagel ja *G.resinaecum*. Vormi pandud seeneniidistikuga nakatunud substraat kasvas vormis edasi, kuid kompaktsel materjalil moodustas ainult *G.resinaecum*.

Teises eelkatses kasutatud rukkipõhk oli liiga suure fraktsiooniga, seega otsustati põhikatses substraat välja vahetada peenema põhugraanuli vastu. Teises eelkatses oli seenekasv okaspuu saepurul halvem, siis otsustati põhikatses vahetada substraat lehtpuu saepuru vastu. Eelkatsete tulemustes selgus, et TTÜ Tartu kolledži laboris ei olnud külviks piisavalt steriilseid tingimusi seega otsustati põhikatse viia läbi Eesti Maaülikoolis laboris.

Põhikatses kasutatavat kasvuperioodi vähendati – 23 päeva asemel (kasvukotis) otsustati valida 14 päevani kasvuperiood. Valik tulenes asjaolust, et Eesti Maaülikooli laboris olid seenekasvuks steriilsemad tingimused.

4.2 Põhikatse tulemused ja arutelu

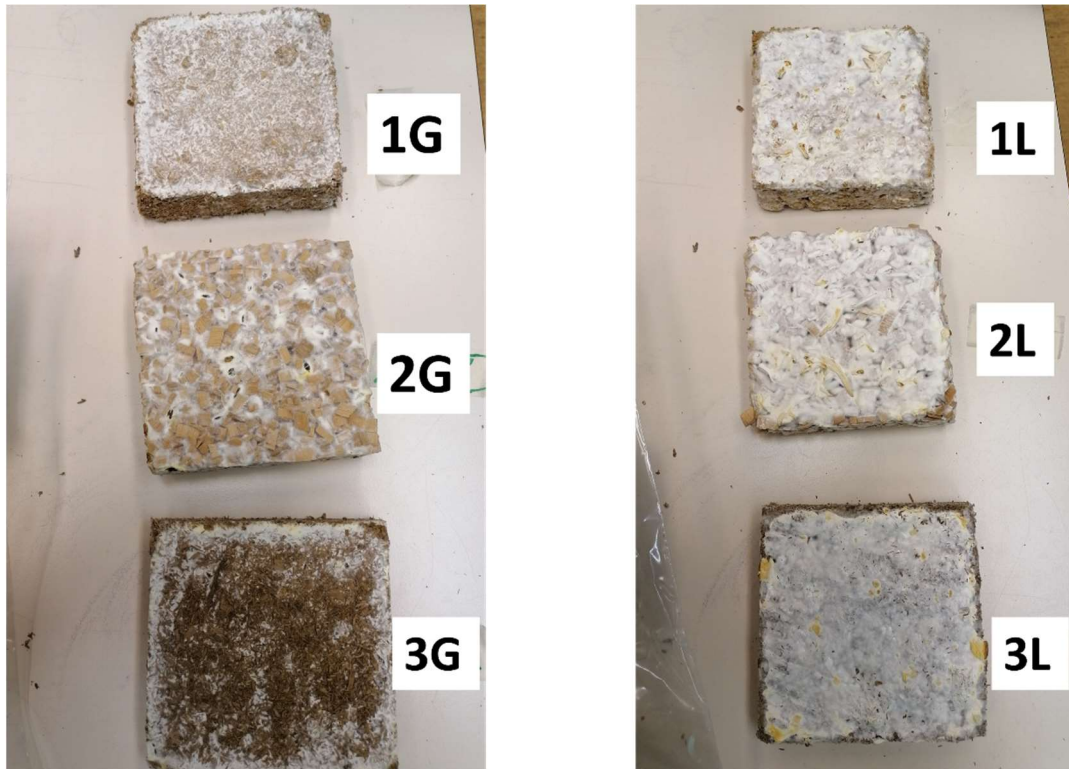
Põhikatses kasvatatud katsekehade kasv oli vormis erinev. Survekatse väikestes vormides kasvas seenematerjal kõige paremini: mida suuremaks läks vorm, seda raskem oli materjali ühes tükis välja saada. Seega oli ainult survekatses igast liigist ja substraadist katsekehi neli kordust (joonis 13 ja 14).



Joonis 13. Survekatse katsekehad. Paremalt tuletael, vasakul libliktagel. Vaata koos tabeliga 1. Autori foto

Põhjus, miks suuremates vormides seenematerjal halvemini kasvas, võis olla tingitud materjali paksusest ja vähesest hapnikust. Mida paksem seenematerjal, seda vähem jõuab kasvu soodustav hapnik materjali keskele ja seega pärsib kasvu (Lelivelt, 2015). Samuti mõjutab kasvu ka vormi enda materjal. Õhemast plastmassist vormis kasvab seeneniidistik paremini, kuna on tagatud kõikidele külgedele ühtlane hapnikuvool. Katses kasutatud veekindel vineer oli 15mm paks, seenematerjal asetse kasvades samast materjalist plaadi peal, seega sai seeneniidistik hapnikku pealt ja alusplaadi ning servade vahelt, põhi ei olnud osade katsekehade puhul peaaegu üldse läbikasvanud.

Seenekasvu mõjutas substraat, struktuur ja niiskus. Kuigi liigid kasvasid kõikides substraatides, siis ilmnis osa liikide ja substraatide puhul probleeme. Tuletael (tähis F) kasvas väikses vormis küll hästi, kuid suuremate vormidega vajab pikemat kasvuaega. Tuletael kasvas põhu peal paremini kui saepuru peal, kuid see võis olla tingitud saepuru niiskusest.



Joonis 14. Survekatse katsekehad. Paremäl *Ganoderma resinaecum*, vasakul tiiger-hammaseleht. Vaata koos tabeliga 1. Autori foto

Libliktageli (tähis T) saepuru ja põhuga vormist välja võtmise keeruline, niidistik oli vormi külge kinni kasvanud. Libliktagel moodustas kasvades mõlemale küljele nahkse struktuuri (vt. joonis 13), mis kasvas ka vormi külge (vt. joonis 15). Seega oli just peenema substraadiga saepuru ja põhuga materjali vormist välja võtmise keeruline. Niidistik haalus vormi külge ja rebenes, mistõttu oli suuremate vormide puhul (paine- ja mõõtmete stabiilsuse katses) kordusi vähem.



Joonis 15. Mõõtmete stabiilsuse vormid. Saepuru peal kasvanud libliktagel. Autori foto

Paindekatses ei saanud igast liigist ja substraadist neli kordust katsekehi. Materjal purunes vormist välja võttes: 2F, 3F, 3T, 2G, 3G, neid kordusi oli kolm, 1L katsekehi oli ainult kaks.

Ganoderma resinaceum kasvas kõigis kolmes substraadis, parim kasv oli hakke peal, veidi kehvem jäi materjal põhul peal kasvades. Vormis välja võtmine oli *G.resinaecumiga* lihtsam kui teiste liikidega, sest ta ei kasvanud vormi külge.

Tiiger-hammaslehek kasvas kõigis kolmes substraadis sama hästi ja kiiresti, kuid survekatses materjal andis kõige kergemini järgi (pudenes) nii põhul kui ka lepahakkega. Saepurusubstraadil kasvanud tiiger-hammaslehek säilitas ka peale pressimist oma kuju.

Mõõtmete stabiilsus katses oli kolm kordust 2F, 3F, 3G, 1L, 2L ja 3L. Puudu oli katsekehad 3T, kuna materjal purunes.

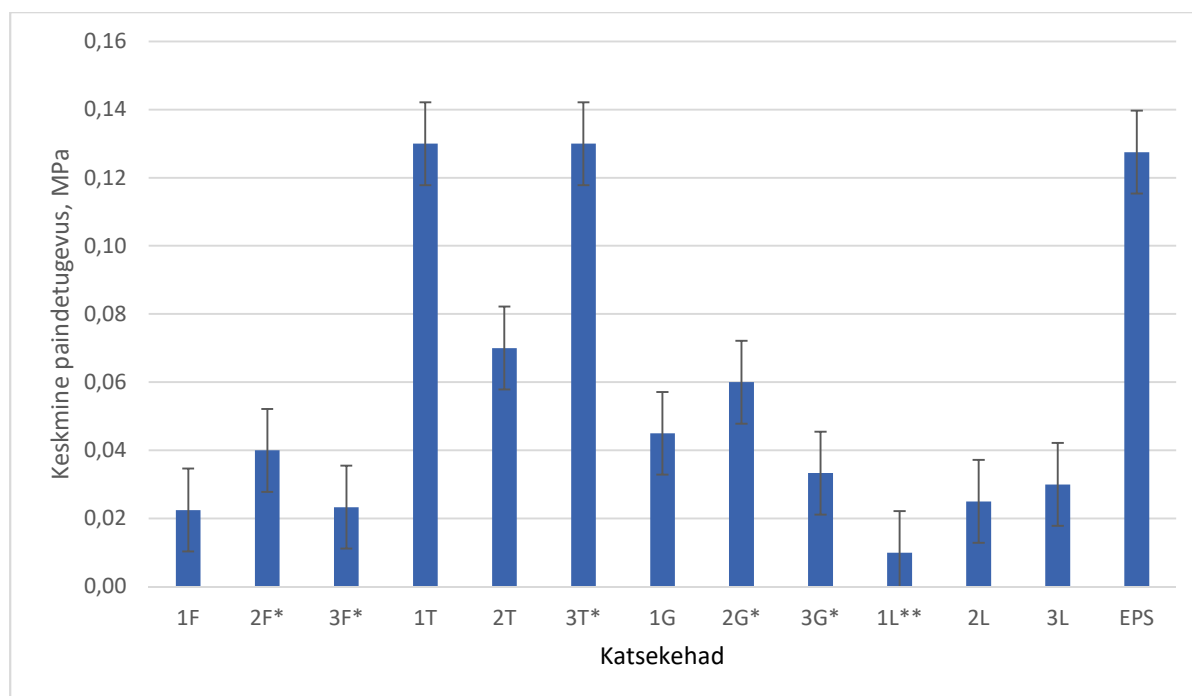
4.2.1 Paindekatse tulemused

EPSi paindetugevus oli $0,13 \pm 0,008$ MPa. Seenematerjalist saavutas võrreldava tulemuse katsekehad 3T ja 1T, mõlema paindetugevus oli 0.13 MPa (joonis 16 ja lisa 4 tabelit), 3T $0,13 \pm 0,008$ MPa ja 1T $0,13 \pm 0,039$. Väiksem paindetugevus oli katsekehadel 1L $0,01 \pm 0$ MPa, kuid antud katsekehade kordusi oli vaid kaks, seega ei saa tulemust usaldusväärsest arvestada (joonis 16). Katsekehade 3F tulemus oli $0,02 \pm 0,005$ MPa (väiksema paindetugevusega) (joonis 16).

Tulemustest kerkib esile katsekehade liigiline koosseis. Libliktaglal olid kõikidel substraatidega suurimad paindetugevused, põhul ja saepurul kasvades EPSiga sama tugev

- 0,13 MPa. Hakkel oli libliktagla paindetugevus ($0,07\pm 0,007$ MPa) EPSist kaks korda väiksem.

Liigiliselt paistab ka silma *G. resinaecum*, kes on oma tulemustega keskmiste seas. Katsekehad 2G, hakkel kasvanud *G.resinaecum* oli EPSist ligi kaks korda väiksema paindetugevusega ($0,06\pm 0,029$). 1G põhul ja 3G saepurul sama liigi katsekehad olid EPSist kolmandiku võrra madalamad kui EPS - $0,05\pm 0,015$ MPa ja $0,03\pm 0,012$ MPa. Väiksem paindetugevus oli katsekehadel tiiger-hammaslehhik substraadiga põhk ja tuletal kõikide substraatidega - 1L $0,01\pm 0$ MPa, 1F $0,02\pm 0,008$ MPa, 2F $0,04\pm 0$ MPa ja 3F $0,02\pm 0,005$ MPa (joonis 16). Liigiliselt olid madalamate paindetugevustega tuletalal $0,02-0,04$ MPa ja tiiger-hammaslehhikul $0,01 - 0,03$ MPa. Suurimad tugevused *G.resinaecum*il $0,03- 0,06$ MPa ja libliktaglal $0,07-0,03$ MPa.

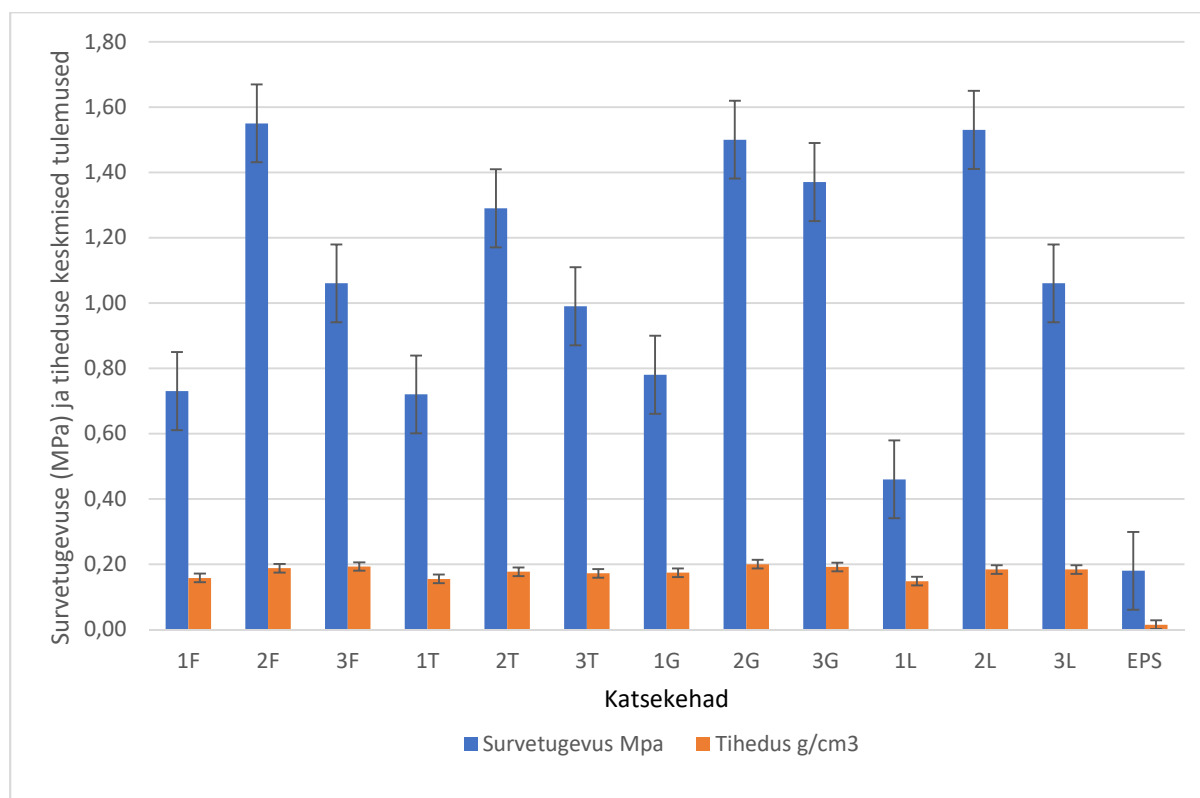


Joonis 16. Seenematerjali ja (EPSi) keskmised paindetugevused esitatuna koos keskmise veaga. * märgitud katsekehade kordusi oli kolm. ** tärniga märgitud katsekehasid kaks.

4.2.2 Survekatse tulemused

EPSi survetugevus oli $0,18\pm 0$ MPa. Suurim survetugevus oli katsekehadel 2F, 2L ja 2G - substraadiks lepahake. Katsekehad 2F ehk tuletala survetugevus oli $1,55\pm 0,078$ MPa (joonis 17). Väiksem survetugevus lisaks EPSile oli katsekehadel 1L, 1T, 1G ja 1F - substraadiks põhk. 1L ehk tiiger-hammaslehhiku survetugevus oli $0,46\pm 0,057$ MPa, 1T libliktagla $0,72\pm 0,080$ MPa, 1G *G.resinaecum* $0,78\pm 0,055$ MPa ja 1F $0,73\pm 0,052$ MPa (joonis 17).

Peale survekatset püsisid ühes tükis ainult katsekehad 1F, 1T, 3T, 1G, 2G ja EPS. Teised katsekehad purunesid ehk lagunesid laiali.



Joonis 17. Survetugevuse ja tiheduse võrdlus. Keskmised tulemused esitatuna koos keskmise veaga

EPSil oli kõige väiksem tihedus, $0,015 \pm 0,000 \text{ g/cm}^3$. Lepahaket sisaldavad katsekehad olid kõrgema tihedusega kui põhul kasvanud seemed. Kõrgem tihedus oli katsekehadel 2F (tuletael) $0,188 \pm 0,002 \text{ g/cm}^3$ ning 2L (tiiger-hammaslehhiku) tihedus $0,184 \pm 0,005 \text{ g/cm}^3$. Väiksema tiheduse ja survetugevusega olid katsekehad 1L (põhul kasvanud tiiger-hammaslehhik) $0,46 \pm 0,057 \text{ MPa}$, tihedus $0,148 \pm 0,008 \text{ g/cm}^3$ ning 1T (libliktagel) $0,72 \pm 0,080 \text{ MPa}$, tihedus $0,155 \pm 0,004 \text{ g/cm}^3$.

Kõigil saepurul kasvanud liikide peale *G.resinaecum* survetugevused jäid keskmiste hulka. *G.resinaecum* oli teistest põhu peal kasvanud liikidest kolmandiku võrra suurema tugevusega. EPSist on põhu peal kasvanud *G.resinaecum* ligi kaheksa korda suurema tugevusega. Katsekehade 3T (libliktagel) survetugevus oli $0,99 \pm 0,163 \text{ MPa}$, tihedus $0,172 \pm 0,008 \text{ g/cm}^3$, katsekehadel 3F (tuletael) $1,06 \pm 0,277 \text{ MPa}$, tihedus $0,193 \pm 0,008 \text{ g/cm}^3$ ja 3L (tiiger-hammaslehhikul) $1,06 \pm 0,158 \text{ MPa}$ ning tihedus $0,184 \pm 0,006 \text{ g/cm}^3$.

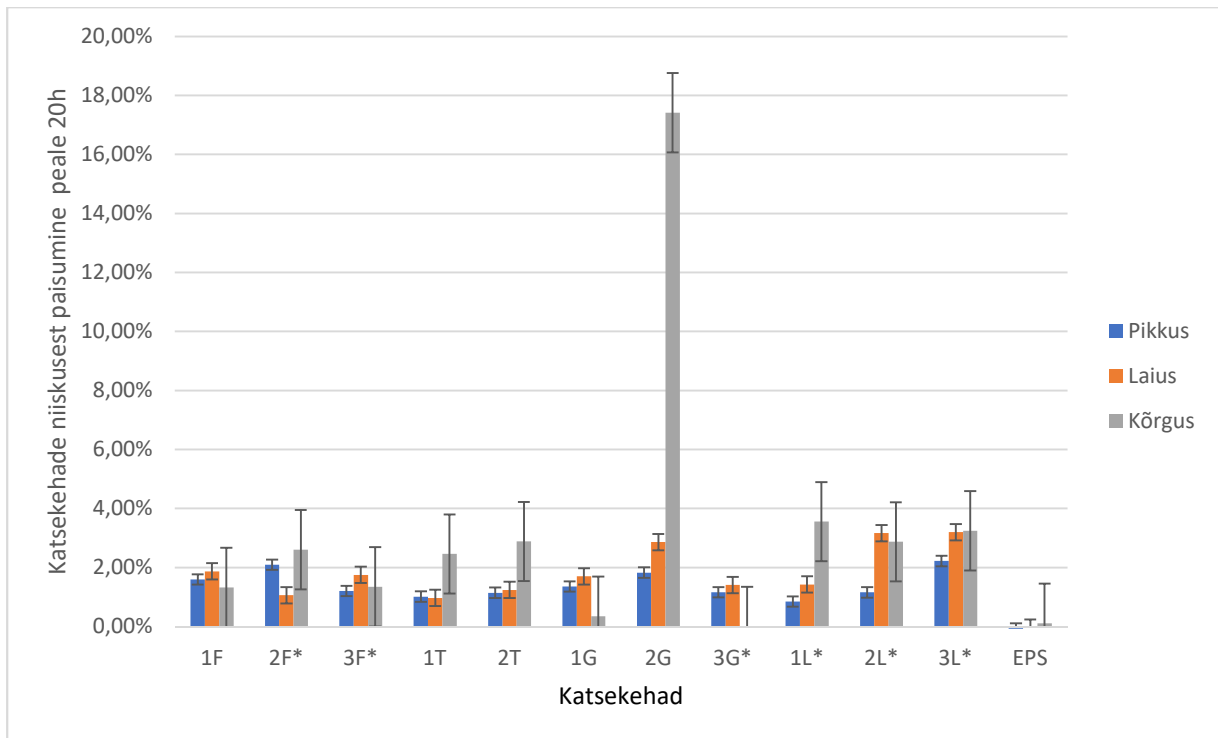
4.2.3 Mõõtmete stabiilsus tulemused

Kõik katsekehad säilitasid oma kuju ja vormi peale 20 h ning 48 h möödumist konditsioneerimiskapis olekut. Ka peale mõõtmist ja kaalumist ükski katsekeha ei lagunenu. Katsekehade näide konditsioneerimiskapis peale 48 h on näha joonisel nr 18.



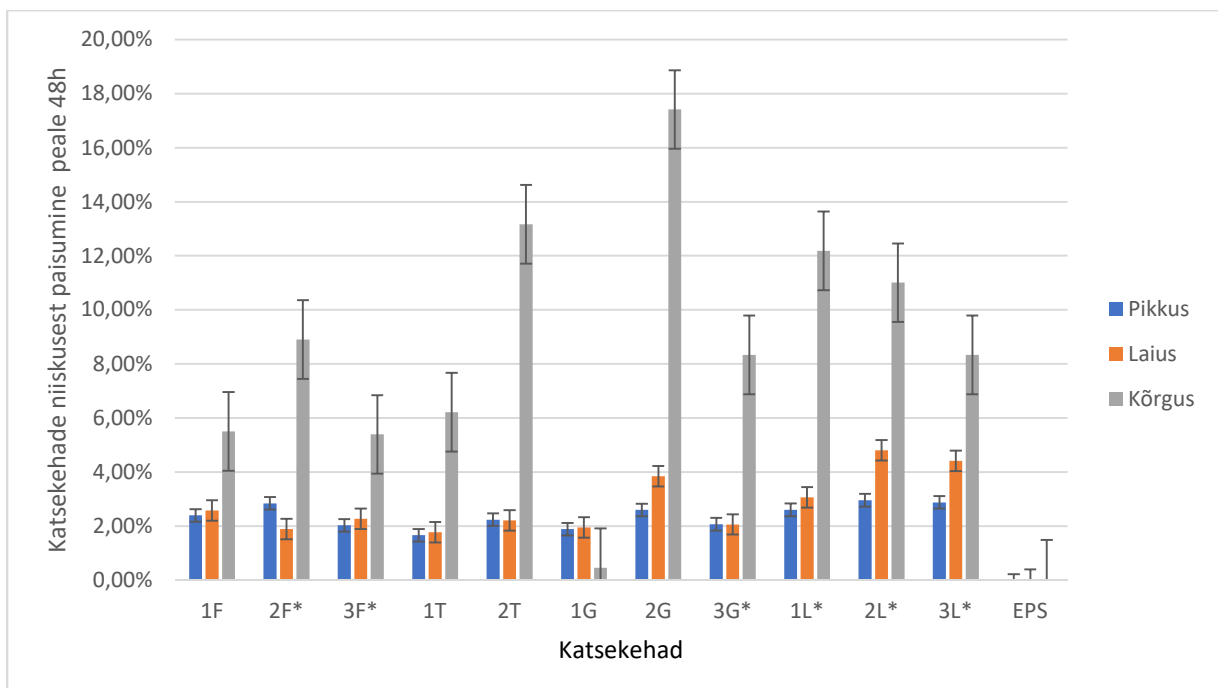
Joonis 18. Niiskuskatse katsekehad peale 48h. Autori foto

Peale 20 h konditsioneerimiskapis oli EPSile kõige sarnasema tulemusega katsekehadel 3G ja 1G (joonis 19). 3G suurenemine oli 1.16%, laius 1.41% ning kõrgus 0%, kogu muutus oli 0.86% (joonis 19). Grupi 1G pikkuse suurenemine oli 1.35%, laius suurenes 1.70% ning kõrgust 0.35%, kogu keskmine muutus oli 1.14% (joonis 19, tabel 9). Hea tulemusega olid ka katsekehad 3F ja 1T. Katsekehad 3F pikkuse suurenes 1.21%, laius 1.75% ning kõrgus 1.35%, Materjali keskmine veeauru absorptsioon oli 1.43%. 1T pikkus suurenes 1.01%, laius 0.97% ja kõrgus 2.46%, keskmine materjali muutus oli 1.48%.



Joonis 19. Mõõtmete stabiilsus peale 20h, mahu erinevus koos keskmise veaga. * tähistatud katsekehasid oli kokku kolm.

Kõige rohkem absorbeerisid katsekehadest veeauru 2G, 3L ja 1L. 2G pikkuse muutus oli 1,83%, laius 2,86% ning kõrgust tuli juurde 17.41%. Katsekehadel 3L pikkus suurenes 2,22%, laius 3,20% ning kõrgus 3,24%. 1L pikkuse muutus oli 0,84% ning laius suurenes 1,42%, kuid kõrguse muutus oli 3,55%.



Joonis 20. Mõõtmete stabiilsus peale 48h, koos keskmise veaga. * tähistatud katsekehasid olid kokku kolm.

Ka peale 48 h oli katsekehade suurim muutus oli kõrguse mõõtmetes. Väiksem muutus oli katsekehade pikkuses (joonis 20). Katsekehade keskmine pikkuse muutus oli peale 48h 2.18%, laius muutus 2.57% ning kõrgus 8.08% (joonis 20).

EPSi mõõtmete tulemuste järgi oleks materjal kahanenud, kuid nii nagu eelnevalt selgitati, siis muutuse põhjuseks oli mõõtmisel tehtud vead (materjali liiga tugev surumine).

EPSile kõige sarnasem tulemus oli katsekehadel 1G – pikkus suurenes peale 48 h 1,89%, laius 1,94% ning kõrgus 0,45%, Kõikide parameetrite muutus oli 1,43%, Teine EPSile sarnase tulemus oli katsekehadel 1T, mille pikkus suurenes 1,66%, laius 1,77% ning kõrgus 6,22%, kuid kogu muutus oli 3,22%, Kolmas sarnasema tulemus oli kehadel 3F, mille pikkus suurenes 2,03%, laius 2,27% ning kõrgus 5,39%, kogu parameetrite muutus oli 3,23%.

Kõige rohkem absorbeerisid veeauru katsekehad 2G, 2L ja 1L. Katsekehade 2G pikkus suurenes 2,59%, laius 3,84% ning kõrgus ei muutunud vaid jäi samaks nagu peale 20h 17,41% - kogu muutus 7,95%. Katsekehadel 2L pikkus suurenes 2,95%, laius 4,80% ning kõrgus 11% - kogu muutus 6,25%, 1L pikkus suurenes 2,60%, laius 3,06% ning kõrgus 12,18% - kogu muutus 5,95%.

4.3 Põhikatse arutelu

Koostati koondtabel (tabel nr 4), kus toodi välja EPSile kõige ligilähedasema tulemusega mükokomposiidi. Katses oli EPSi paindetugevus $0,13 \pm 0,008$ MPa, survetugevus oli $0,18 \pm 0$ MPa, EPS veeauru ei absorbeerunud. Tabelisse märgiti x-ga need katsekehad, mille paindetugevus oli vähemalt 0.06 MPa, survetugevus suurem kui EPSil ning mõõtmete stabiilsuse protsent ei tõusnud peale 48 tundi kõrgemale kui 3,5%.

Tabel 4. Katsetulemuste koondtabel, EPSile kõige sarnasemate tulemustega mükokomposiidid

Tähis	Liik	Substraat	Paindetugevus	Survetugevus	Mõõtmete stabiilsus
1F	Tuletael	Põhk		X	X
2F	Tuletael	Hake		X	
3F	Tuletael	Saepuru		X	X
1T	Libliktagel	Põhk	X	X	X
2T	Libliktagel	Hake	X	X	
3T	Libliktagel	Saepuru	X	X	
1G	<i>G.resinaecum</i>	Põhk		X	X
2G	<i>G.resinaecum</i>	Hake	X	X	
3G	<i>G.resinaecum</i>	Saepuru		X	
1L	<i>Tiiger-hammaslehhik</i>	Põhk		X	

Tähis	Liik	Substraat	Paindetugevus	Survetugevus	Mõõtmete stabiilsus
2L	<i>Tiiger-hammaslehik</i>	Hake		X	
3L	<i>Tiiger-hammaslehik</i>	Saepuru		X	

Paindekatses selgus, et libliktagel moodustas kõikide substraatidega suurimad paindetugevused. Suurim paindetugevus oli libliktaglal ühenduses põhu ($0,13 \pm 0,039$ MPa) ja saepuru substraadiga ($0,13 \pm 0,008$ MPa), seega sama, mis EPSil. Hakke peal kasvades oli libliktagla tulemus $0,07 \pm 0,007$ MPa, seega poole väiksem kui EPSil. Peale libliktagla oli liigiliselt suurimate paindetugevutega *Ganoderma recinaecum*. Hakke peal kasvanud määrati tugevuseks $0,06 \pm 0,029$ MPa ehk poole väiksem tugevus kui EPS ning põhul oli $0,05 \pm 0,015$ MPa. Väiksema paindetugevusega olid tiiger-hammaslehik ja tuletael põhu ja saepuru peal kasvades, need jäid vahemikku 0,01-0,04 MPa.

Sarnased paindekatses tulemused on saadud ka teistes teadustöodes, Appels et al. 2019 pressimata seenematerjali paindetugevus jäi vahemikku 0,05 – 0,29 MPa. Holt et al. 2012.aasta paindekatses tulemustes oli pressimata liigi *Ganoderma* (substraat puuvill) seenematerjal paindetugevusega 0,007-0,026. Appels et al. 2019 toob ka välja kül- ja kuumpressitud seenematerjali paindetugevused, külmpressitud materjali paindetugevus jäi vahemikku 0,06 – 0,21 MPa ja kuumpressitud materjalil jäi see vahemikku 0,22-0,87 MPa.

Pressitud materjalil moodustab seeneniidistik nahkse struktuuri, mis on elastsem kui pressimata koloniseeritud substraat, seega puruneb elastsem materjal suurema koormuse juures (Appels, 2020). Antud asjaolu selgitab libliktagla head paindetugevust, kuna liik moodustas substraadile nahkse kihi.

Seenematerjali tootvad ettevõtted on enam patentides maininud liike *Trametes versicolor* libliktagelit ja *Pleurotus ostreatus* austerservikut (Cerimi et al. 2017). Lelivelt et al., 2015. aasta uuringus olid need liigid jäigemad ja suure survetugevusega, libliktagla survetugevus oli vahemikus 0,024-0,093 MPa.

Survekatses tulemustes nähtus, et suurimad survetugevused olid neil katsekehadel, mis olid kasvanud lepahakke peal. Väiksemad survetugevused olid põhu peal kasvanud seeneliikidel. Lepahakke kasvanud olid kõrgema substraadi tihedusega kui põhul kasvanud katsekehad, sellest saab järeldada, et tihedusest sõltub survetugevus. EPSi madalat tulemust saab selgitada katsekeha väikse tihedusega, mis oli vaid $0,015 \pm 0$ g/cm³.

Teise järeldusena saab tuua, et ka struktuurist sõltub survetugevus. Lepahake oli suurema struktuuriga kui põhk ja saepuru. Survekatses ei saa liigilist eripära välja tuua, tulemused

sõltusid rohkem substraadist. Katses olid suurima survetugevusega hakked kasvanud tuletael $1,55 \pm 0,078$ MPa ja tiiger-hammasleht $1,53 \pm 0,139$ MPa.

Katses selgus, et mükokomposiitidel on EPSist 4-8 korda suurem survetugevus. Sarnased tulemused on olnud ka teises uuringus. EPSist 5-6 korda suurema survetugevusega on olnud Joshi et al. (2020) uuringus katsetatud mükokomposiit.

Materjali paremat survetugevust saab selgitada ka sellega, et seeneniidistik ei olnud orgaanilist substraati täielikult lagundanud, seega säilitas valmis materjal substraadis sisaldavatele puidukiududele sarnased omadused. Kauem kasvanud seeneniidistik muudab lignotselluloosi sisaldust ning seega muutub materjali lõpptulemus (Attias et al., 2020). Pikema kasvuperioodiga (30-45 päeva) tarbib seen substraadis olevad toitained ning see põhjustab materjalil madalama survetugevuse kui lühema kasvuperioodi puhul (Matos et al., 2019).

Mitmed uuringud on näidanud substraadi toiteväärtuse mõju erinevatele materjali omadustele. Haneef et al. (2017) uuris kahte seeneliiki, mida kasvatati kahel substraaditüübil: üks sisaldas mikrokristallilist tselluloosi (MCC), millele on lisatud kartulidekstroosi, ja teine, mis koosnes ainult MCC-st, mis on seente jaoks vähem seeditav substraat. MCC substraadist valmistatud komposiit oli jäigem, mis näitab substraadi mõju mehaanilistele omadustele (Ibid). Teise järeldusena võib tuua, et ensüümilise seedimismehhanismi kokkusobimatus põhjustab muutusi seene rakuseina koostises, mis mõjutab materjali lõplikku jõudlust (Attias et al., 2020; Haneef et al., 2017).

Mõõtmete stabiilsus katses selgus, et katsekehad, mis sisaldasid lepahaket absorbeerisid veeauru rohkem kui teised substraadid. Liigist endast tingitud erinevusi ei täheldatud, pigem oli mõõtmete protsendiline muutus tingitud substraadist.

Lepahakke suurim absorbeerumine oli tingitud hakke poorsusest, seetõttu oli niiskusel kergem imenduda materjali. Homogeensema materjali ja peenema fraktsiooni korral nagu põhu ja saepuru puhul oli liigil võimalik kasvatada hüdrofoobne kiht. Hakke puhul oli peale 20h möödumist paisumise protsendiline tõus kõige märgatavam, see jäi vahemikku 2,40-7,37%. Kõige rohkem paisus hakke *G.resinaecum* peale 20h lisandus 7,37%, kuid 48h möödudes järsk paisumine lakkas, materjal absorbeerus veeauru ainult 0,6%. Peale 48h teiste substraatide peal kasvavad liigid jõudsid paisumise protsendiliselt hakkele järgi, mükokomposiitmaterjal absorbeerus veeauru 1,43-7,95%. Liigist tingitud erinevusi ei täheldatud, pigem oli mõõtmete protsendiline muutus tingitud substraadist.

G.resinaceum oli põhul kasvades kõige sarnasem EPSile, kuid sama liik lepahakel imas veeauru kõikidest liikidest enam. Tuletael oli nii saepuru kui ka põhu peal kasvades

väiksema veeauru absorptsiooniga – 3,23%. Tuletaela vähest mõõtmete stabiilsust võib selgitada sellega, et kasvades moodustas pinnale nahkse kihi.

Kõigi kolme katse peale leiti, et libliktagel põhu peal kasvades on EPSile kõige sarnasemate tulemustega. Paindetugevus oli sama nagu EPSil (0,13 MPa), survetugevus oli EPSist 4x suurem (0,72 MPa), niiskust absorbeeris 3x rohkem kui EPS (3,22%).

Suurima paindetugevusega olid libliktagel kõikide substraatidega ja *G.resinaecum* hakke ning põhu peal kasvades. Survetugevusega ei täheldatud liigilist eripära, tulemus sõltus substraadist ning sellest tingitud tihedusest. Suurim survetugevusega olid tuletael, tiigerhammaslehtik ja *G.resinaecum*. *G.resinaecum* andis põhusubstraadiga kõige ligilähedasema tulemuse EPSile. Ka tuletael oli saepuru ja põhu substraadil oma tulemuste poolest EPSile kõige ligilähedasem ehk väiksema veeauru absorptsiooniga.

Mükokomposiidi kasvatamine pakkematerjalina tuleb arvestada ka seeneliigi kasvatamise lihtsuse, kiiruse, vormist väljasaamise, kuid ka substraadi kättesaadavuse ja stabiilsusega.

Suuremas koguses pakkematerjali tootmiseks on vaja kiirekasvulist ja lihtsamaid tingimusi vajavat liiki. Kuigi antud katsetes tiigerhammaslehtiku painde-ja mõõtmete stabiilsus tulemused olid võrreldes teiste liikidega madalamad, siis liigi eeliseks võib tuua kultiveerimis lihtsuse ja ka kiiruse. Tuletaela eelis teiste liikide ees on tema nahkne niidistikukiht, mis tagab väiksema niiskuse absorbeerumise. Tuletaela puuduseks on see, et ta vajab kasvamiseks pikemat aega ning kasvades võib oma nahkse struktuuri tõttu vormi külge kinni jääda. Libliktagla eeliseks ja puuduseks on tema nahkne struktuur. Ühest küljest annab nahkne kiht libliktaglale suurimad surve-ja paindetugevused, kuid teisalt võib ta kasvada vormi külge ning seega rebeneda. *G.resinaecum* leppis kasvades lihtsamate tingimustega st. kasvuks sobisid kõik substraadid. Samas on tema puuduseks põhul ja saepurul kasvades paindetugevus ning hakke substraadiga oli kõige kõrgema veeimavusega liik.

Pakkematerjalina kasutades, saab kasvatada materjali sobiliku kuju ja suurusega vormis. Libliktagla ja tuletaela puuduseks võib osutada niidistiku vormi külge kinni kasvamine. *G.resinaecumi* ja tiigerhammaslehtiku eeliseks on ka nende vormist väljasaamise lihtsus.

Selleks, et pakkematerjal kaitseks kaupa tootjast tarbijani, peab olema tagatud ühtne kvaliteet. Substraatide valikus tuleb jälgida nende stabiilsust. Sõltuvalt aastast võib substraadi kvaliteet erineda, seda eelkõige põhu puhul.

Painde-ja survetugevuse katsed näitasid, et mükokomposiitmaterjalil on potentsiaal leida kasutust EPSi asendamiseks pakkematerjalina. Kõikidel liikidel olid survetugevused suuremad kui EPSil ning libliktagel oli paindekatses sama suure paindetugevusega. Sellest

saab järeldada, et materjalil on potentsiaal nii müügipakendina, rühmapakendi kui ka veopakendina. Tuleb arvestada veeauru absorptsiooniga, sest mükokomposiitmaterjalid imendavad veeauru erinevalt. Osade liigi-substraadi kombinatsiooni puhul näiteks *G.resinaecum* hakkel võib olla oht, et pakendi paisudes võib toode kahjustada saada. Lõpliku järelduse tegemiseks on vaja rohkem katseid.

Mükokomposiitmaterjal täidaks pakendiseadusest tulenevaid pakendile seatud valmistamise ja kasutamise nõudeid – materjal on väikese mahu ja massiga, kasvatada saab vastavalt kaubale vajamineva suuruse ja mõõtmetega pakendi. Mükokomposiit on 100% biolagunev kuna koosneb ainult seeneniidistikust ja substraadist, seega ei teki kõrvaldamisel negatiivset mõju keskkonnale. Tehtud katsete põhjal võib järeldada, et materjal täidab oma eesmärgi.

Töös seatud teine eesmärk, selgitada välja tiiger-hammaslehiku mükokomposiitmaterjali omadused sai täidetud. Hakke substraadil oli liigil üks suurimaid survetugevusi (1,53 Mpa) seega 8x tugevam kui EPS. Paindetugevus oli võrreldes teiste liikidega väiksem (0,01-0,03 Mpa). Veeauru absorbeerus võrreldes teiste liikidega ja EPSiga enam (5,21%-6,29%).

Antud tööd on võimalik veel edasi uurida ja arendada järgmistes suundades:

1. Mükokomposiitmaterjali vormist välja võttes lasta teiselt poolt läbi kasvada ning katsetada samu näitajaid
2. Valida vormi jaoks õhem materjal
3. Segada substraate omavahel
4. Kasutada peenema struktuuriga substraate
5. Materjali külm-ja kuumpressimine

KOKKUVÕTE

EPSist pakkematerjalid ei ole biolagunevad, seega on vaja leida materjale, mis oleksid võrdväärsete omadustega, kuid ei koormaks keskkonda. Mükokokomposiitmaterjal on viimastel aastatel nii erasektoris kui ka teaduses populaarsust kogunud. Seenematerjalil on lai kasutusvaldkond – ehitusmaterjal, liha- ja nahaasendaja, pakkematerjal jms. Materjal on biolagunev ja isekasvav – seega ei koorma eluea lõpus tekkinud jäätmed keskkonda.

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli uurida, milline kasvatatud seene ja substraadi kombinatsioon on kõige sarnasemate omadustega vahtpolüstüreenist pakkematerjalidele. Teiseks eesmärgiks oli välja selgitada tiiger-hammasleheku omadused mükokokomposiitmaterjalina.

Teema uurimiseks viidi läbi kaks eelkatset Tallinna Tehnikaülikooli Tartu kolledžis. Valiti seitse seeneliiki: lakkvaabik *Ganoderma lucidum*, austerservik *Pleurotus ostreatus*, libliktagel *Trametes versicolor*, *Ganoderma resinaceum*, tuletael *Fomes fomentarius*, nabatorik *Grifola umbellata* ja tiiger-hammaslehek *Lentinus Tigrinus*. Substraatideks valiti leppu hake, lehtpuu saepuru ja rukkipõhk.

Esimese eelkatse eesmärgiks oli leida vastused küsimusele kas ja kui kiiresti seeneniidistik laboritingimustes kasvab ning selgitada välja parimad seeneliigid, mida kasutada põhikatses. Teise eelkatse eesmärgiks oli teada saada, kas seeneniidistikuga nakatunud substraat kasvab vormis edasi ning moodustab kompaktsed materjali. Eelkatse tulemustest selgus, et põhikatses tuleb kasutada rukkipõhu asemel peenema struktuuriga substraati, seega vahetati substraat põhugraanuli vastu. Okaspuu saepuru vahetati põhikatse jaoks välja leppu saepuru vastu. Eelkatse tulemustest selgus, et seeneniidistik kasvas planeeritud 35 päeva asemel 14 päevaga, seega sai steriilsemates laboritingimustes toimunud põhikatses vähendada kasvuaega kaks korda. Paremini kasvasid libliktagel (*Trametes versicolor*), *Ganoderma resinaceum*, tuletael (*Fomes fomentarius*), tiiger-hammaslehek (*Lentinus Tigrinus*), neid kasutati põhikatses.

Põhikatse jaoks kasvatati mükokokomposiitmaterjal Eesti Maaülikooli laboris, kus teostati painde-, surve-, ja mõõtmete stabiilsuse katsed vastavalt ISO-standarditele (ISO 1209-2:2007, ISO 844:2021, ISO 2796:1986). Seened kasvasid kolme erineva substraadi peal: põhugraanul, leppuuhake ja lehtpuu saepuru. Antud tööle eelnes hüpotees, et mükokokomposiidid on võrreldavad oma omadustelt (survetugevus, paindetugevus ja mõõtmete stabiilsus) vahtpolüstüreeniga.

Uurimise tulemusena selgus, et kolme katse peale leiti EPSile kõige sarnasemate omadustega olevat põhu substraadil kasvanud libliktagel: paindetugevus oli sama nagu EPSil (0,13 MPa), survetugevus oli EPSist 4x suurem (0,72 MPa), niiskust absorbeeris 3x rohkem kui EPS (3,22%). Suurima paindetugevusega olid libliktagel kõikide substraatidega (0,07-0,13 MPa) ja *G.resinaecum* hakke (0,06 MPa) ning põhu peal kasvades (0,05 MPa). Survetugevus oli mükokomposiitmaterjalidel suurem kui EPSil, kõige suurema tugevusega olid tuletael (1,55 MPa), tiiger-hammasleht (1,53 MPa) ja *G.resinaecum*il (1,50 MPa). Pakkematerjal peab kaitsma kaupa tootjast tarbijani, seega on oluline materjali, et püsiks kompaktsena ega paisuks. Mõõtmete stabiilsuse katses muutis kõige vähem oma mõõtmeid *G.resinaecum* põhuse substraadil (1,43%) ning oli seega kõige lähedasem EPSile.

Uurimise tulemusena selgusid tiiger-hammaslehtiku mükokomposiitmaterjali omadused. Hakke substraadil oli liigil üks suurimaid survetugevusi (1,53 MPa) seega 8x tugevam kui EPS. Paindetugevus oli võrreldes teiste liikidega üks väiksemaid (0,01-0,03 MPa). Veeauru absorbeeris võrreldes teiste liikidega ja EPSiga enam (5,21%-6,29%). Teadaolevalt pole tiiger-hammaslehtikut mükokomposiitmaterjalina uuritud, seega oleks vaja tulemuste kontrollimiseks täiendavaid uuringuid.

Töö alguses seatud hüpotees sai kinnitust. Mükokomposiidid on võrreldavad oma omadustelt (survetugevus, paindetugevus ja mõõtmete stabiilsuse) vahtpolüstüreeniga. Katsed näitasid, et mükokomposiitmaterjalil on potentsiaali leida kasutust EPSi asendamiseks pakkematerjalina.

SUMMARY

Packaging is designed to protect the product from damage during shipping or warehousing. A commonly used packaging material is expanded polystyrene (EPS). However, EPS is non-biodegradable - the disposal and reuse of the material is difficult, creating plastic accumulation in the environment. To reduce the environmental impact of packaging materials biodegradable alternatives need to be developed.

In recent years, fungal filamentous material has emerged among the biodegradable materials. Mycelium composite is a self-growing material consisting of two components – substrate and fungal filament. The mycelium composite can be adapted to different shapes, so products of different shapes and sizes can be created.

The aim of the thesis was to research which combination of cultivated mushroom and substrate has the most similar properties to expanded polystyrene (EPS) packaging. The secondary objective was to find out the properties of *Lentinus Tigrinus* as mycelium composite material.

To investigate the topic, two preliminary experiments were performed in the laboratory of Tartu College of Tallinn University of Technology. Seven fungal species were selected: *Ganoderma lucidum*, *Pleurotus ostreatus*, *Trametes versicolor*, *Ganoderma resinaceum*, *Fomes fomentarius*, *Grifola umbellata* and *Lentinus Tigrinus*. Alder chips, hardwood sawdust and rye straw were chosen as substrates.

The aim of the first preliminary experiment was to find answers to the question whether and how fast the mycelium grows under laboratory conditions and to find out the best fungal species to use in the main experiment. The objective of the second preliminary experiment was to find out whether the mycelium infected substrate continues to grow in the mould and form a compact material. The results of the preliminary experiment showed that in the main experiment a substrate with a finer structure should be used instead of rye straw, so the substrate was changed to a straw pellet. For the main experiment conifer sawdust was replaced by hardwood sawdust. The results of the preliminary experiment showed that the mycelium grew by 14 days instead of the planned 35 days, so in the main experiment, performed under sterile laboratory conditions, the growth time could be reduced twice. *Trametes versicolor*, *Ganoderma resinaceum*, *Fomes fomentarius*, *Lentinus Tigrinus* grew better and were used in the main experiment.

For the main experiment, the mycocomposite material was grown in the laboratory of the Estonian University of Life Sciences, where flexural, compressive and dimensional stability tests were performed according to ISO standards (ISO 1209-2: 2007, ISO 844: 2021, ISO

2796: 1986). The fungi grew on three different substrates: straw pellets, alder chips and hardwood sawdust. This work was preceded by the hypothesis that myco-composites are comparable in their properties (compressive strength, flexural strength and dimensional stability) to expanded polystyrene.

The conducted research concluded that the most similar properties to EPS were found with *Trametes versicolor* in straw-pellet substrate. The flexural strength was the same as EPS (0.13 MPa), the compressive strength was 4x higher than EPS (0.72 MPa), the moisture absorption was 3x higher than EPS (3.22%). *Trametes versicolor* had the highest flexural strength with all three substrates (0.07-0.13 MPa) and *G.resinaecum* with alder-chips substrate (0.06 MPa) and growing on straw (0.05 MPa). All mycelium composite specimens had higher compressive strength than EPS – *Fomes fomentarius* (1.55 MPa), *Lentinus Tigrinus* (1.53 MPa) and *G.resinaecum* (1.50 MPa) had the highest strengths of all species. In the dimensional stability test, *G.resinaecum* changed its dimension the least on the substrate straw-pellet (1.43%) and was therefore closest to EPS.

The study revealed the properties of *Lentinus Tigrinus* as mycelium composite. The combination with alder-chip substrate had one of the highest compressive strengths of all the species (1.53 MPa), 8x stronger than EPS. The flexural strength was lower compared to other species (0.01-0.03 MPa). Dimensional stability was higher compared to other species and EPS (5.21% - 6.29%). There are no studies of *Lentinus Tigrinus* as mycelium composite material, so further studies would be needed to verify the results.

The hypothesis set at the beginning of the work was confirmed. Mycelium composites are comparable in their properties (compressive strength, flexural strength and dimensional stability) to expanded polystyrene. Experiments have shown that mycelium composite material has the potential to be used as a replacement material for EPS.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- Appels, F. V. W. (2020). *The use of fungal mycelium for the production of bio-based materials* (University of Utrecht). (lk 5, 7) Kättesaadav <https://dspace.library.uu.nl/bitstream/handle/1874/390884/5e1c62cd1b0f1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Appels, F. V. W., Camere, S., Montalti, M., Karana, E., & Jansen, K. M. B. (2018). Fabrication factors influencing mechanical, moisture- and water-related properties of mycelium-based composites. *Materials & Design*, 161(November), 64–71. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.11.027>
- Appels, F. V. W., Camere, S., Montalti, M., Karana, E., Jansen, K. M. B., Dijksterhuis, J., ... Wösten, H. A. B. (2019). Fabrication factors influencing mechanical, moisture- and water-related properties of mycelium-based composites. *Materials and Design*, 161, 64–71. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.11.027>
- Appels, F. V. W., & Wösten, H. A. B. (2021). Mycelium Materials. In *Encyclopedia of Mycology* (lk. 710–718). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-809633-8.21131-x>
- Arensburger, D. (2005). *Komposiitmaterjalid*. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus.(lk 9)
- Attias, N., Danai, O., Abitbol, T., Tarazi, E., Ezov, N., Pereman, I., & Grobman, Y. J. (2020). Mycelium bio-composites in industrial design and architecture: Comparative review and experimental analysis. *Journal of Cleaner Production*, 246, 119037. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119037>
- Cerimi, K., Akkaya, K. C., Pohl, C., Schmidt, B., & Neubauer, P. (2019). Fungi as source for new bio-based materials: A patent review. *Fungal Biology and Biotechnology*, 6(1), 1–10. <https://doi.org/10.1186/s40694-019-0080-y>
- Danielle Trofe. (2022). Allikas: Reconnecting to nature through design: <https://danielletrofe.com/>
- DE-PACK. (n.d). Kasutamise kuupäev: 20. 01 2022. a., allikas Über EPS-Partikelschäume: <https://eps-verpackungen.de/ueber-eps-partikelschaeume>
- Ecovative. (2022). Kasutamise kuupäev: 19.10.2021.a., allikas: MycoComposite™: <https://ecovative.com/mycocomposite>
- Ecovative. (2022). Kasutamise kuupäev: 19.10.2021.a., allikas: Leather: <https://ecovative.com/leather>
- Elsacker, E., Søndergaard, A., Van Wylick, A., Peeters, E., & De Laet, L. (2021). Growing living and multifunctional mycelium composites for large-scale formwork applications using robotic abrasive wire-cutting. *Construction and Building Materials*, 283, 122732. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122732>
- Eurostat. (18. 12 2020. a.), allikas: Packaging waste statistics: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Packaging_waste_statistics#Waste_generation_by_packaging_material
- Fallis, A. . (2013). Development and Testing of Mycelium-Based Composite Materials for Shoe Sole Applications. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.
- Fok, L., & Cheung, P. K. (2015). Hong Kong at the Pearl River Estuary: A hotspot of microplastic pollution. *Marine Pollution Bulletin*, 99(1–2), 112–118. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.07.050>
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), 3–8. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- Girometta, C., Picco, A. M., Baiguera, R. M., Dondi, D., Babbini, S., Cartabia, M., ... Savino, E. (2019). *Physico-Mechanical and Thermodynamic Properties of Mycelium-Based Biocomposites: A Review*. <https://doi.org/10.3390/su11010281>
- Green product award. (2020). Allikas: Conceptos ecológicos 2020: <https://www.gp-award.com/es/producte/Myamo>
- Grimm, D., & Wösten, H. A. B. (2018). Mushroom cultivation in the circular economy.

- Applied Microbiology and Biotechnology*, 102(18), 7795–7803.
<https://doi.org/10.1007/s00253-018-9226-8>
- Haines, A. (15. April 2021. a.). *Forbes*. Allikas: Fungi Fashion Is Booming As Adidas Launches New Mushroom Leather Shoe:
<https://www.forbes.com/sites/annahaines/2021/04/15/fungi-fashion-is-booming-as-adidas-launches-new-mushroom-leather-shoe/?sh=178514ea788c>
- Haneef, M., Ceseracciu, L., Canale, C., Bayer, I. S., & Heredia-, J. A. (2017). Advanced Materials From Fungal Mycelium: Fabrication and Tuning of Physical Properties. *Nature Publishing Group*, (December 2016), 1–11.
<https://doi.org/10.1038/srep41292>
- Hawksworth, D. L., & Lücking, R. (2017). Fungal diversity revisited: 2.2 to 3.8 million species. *The Fungal Kingdom*, 79–95. <https://doi.org/10.1128/9781555819583.ch4>
- Ho, B. T., Roberts, T. K., & Lucas, S. (2018). An overview on biodegradation of polystyrene and modified polystyrene: the microbial approach. *Critical Reviews in Biotechnology*, 38(2), 308–320. <https://doi.org/10.1080/07388551.2017.1355293>
- Hyde, K. D., Xu, J., Rapior, S., Jeewon, R., Lumyong, S., Niego, A. G. T., ... Stadler, M. (2019). The amazing potential of fungi: 50 ways we can exploit fungi industrially. *Fungal Diversity*, 97(1), (lk 3-4; 33) <https://doi.org/10.1007/s13225-019-00430-9>
- Jiang, L., Walczyk, D., McIntyre, G., & Chan, W. K. (2016). Cost modeling and optimization of a manufacturing system for mycelium-based biocomposite parts. *Journal of Manufacturing Systems*, 41, 8–20. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2016.07.004>
- Jones, M., Bhat, T., Huynh, T., Kandare, E., Yuen, R., Wang, C. H., & John, S. (2018). Waste-derived low-cost mycelium composite construction materials with improved fire safety. *Fire and Materials*, 42(7), 816–825. <https://doi.org/10.1002/fam.2637>
- Jones, M., Mautner, A., Luenco, S., Bismarck, A., & John, S. (2020). Engineered mycelium composite construction materials from fungal biorefineries: A critical review. *Materials and Design*, 187, 108397. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108397>
- Jones, M. P. (2020). *Waste-derived Mycelium Materials for Non-structural and Semi-structural Applications*. Vienna.(lk 3)
- Jose, J., Sreenadh, K. N. U. T. S., & Deepak, A. V. (2021). Investigations into the Development of a Mycelium Biocomposite to Substitute Polystyrene in Packaging Applications. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 46(3), 2975–2984. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-05247-2>
- Joshi, K., Meher, M. K., & Poluri, K. M. (2020). Fabrication and Characterization of Bioblocks from Agricultural Waste Using Fungal Mycelium for Renewable and Sustainable Applications. *ACS Applied Bio Materials*, 3(4), 1884–1892. <https://doi.org/10.1021/acsabm.9b01047>
- Kalaw, S. P., De Leon, A. M., Damaso, E. J., Ramos, J. C., Del Rosario, M. A. G., Abon, M. D., ... Reyes, R. G. (2021). Cultivation of different strains of *lentiginus tigrinus* from selected areas of luzon island, Philippines. *Studies in Fungi*, 6(1), 299–306. <https://doi.org/10.5943/sif/6/1/20>
- Karana, E., Blauwhoff, D., Hultink, E. J., & Camere, S. (2018). When the material grows: A case study on designing (with) mycelium-based materials. *International Journal of Design*, 12(2), 119–136.
- Kaiser, W. (2006). *Kunststoffchemie für Ingenieure. Von der Synthese bis zur Anwendung*. München: Carl Hanser Verlag. (lk 279, 288, 298, 479-484)
- Keskkonnaministeerium*. (03. 22 2018. a.). Allikas: Pakendid:
<https://www.envir.ee/et/eesmargid-tegevused/jaatmed/pakendid>
- Kulu, P., Kübarsepp, J., Laansoo, A., & Veinthal, R. (2015). *Materjalitehnika I*. (lk 243, 255)
- Lange, L. (2014). The importance of fungi and mycology for addressing major global challenges. *IMA Fungus*, 5(2), 463–471.
<https://doi.org/10.5598/imafungus.2014.05.02.10>
- Lelivelt, R. (2015). *The mechanical possibilities of mycelium materials — Eindhoven University of Technology research portal*. Kättesaadav
<https://research.tue.nl/en/studentTheses/the-mechanical-possibilities-of-mycelium-materials>

- Matos, M. P., Teixeira, J. L., Nascimento, B. L., & Griza, S. (2019). *Production of biocomposites from the reuse of coconut powder colonized by Shiitake mushroom*.
- Mendez, J., Autónoma, U., Antonio, A., & Uaaan, N. (2016). *Assessment of Edible Fungi and Films Bio-Based Material Simulating Assessment of Edible Fungi and Films Bio-Based Material Simulating Expanded Polystyrene*. (April). <https://doi.org/10.1080/10426914.2015.1070420>
- Meyer, V., Basenko, E. Y., Benz, J. P., Braus, G. H., Caddick, M. X., Csukai, M., ... Wösten, H. A. B. (2020). Growing a circular economy with fungal biotechnology: A white paper. *Fungal Biology and Biotechnology*, 7(1), 1–23. <https://doi.org/10.1186/s40694-020-00095-z>
- Minova, S., Seškēna, R., Voitkane, S., Metla, Z., Daugavietis, M., & Jankevica, L. (2015). Impact of pine (*Pinus sylvestris* L.) and spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) bark extracts on important strawberry pathogens. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences, Section B: Natural, Exact, and Applied Sciences*, 69(1–2), 62–67. <https://doi.org/10.1515/prolas-2015-0008>
- Mycelia*. (2022). Allikas: Mycelia NV: <https://mycelia.be/>
- Mycelia*. (2022). Allikas: M9832 *Grifola umbellata*: <https://mycelia.be/shop/m9832-grifola-umbellata/>
- MyForest Foods*. (2022). Allikas: From the forest, to the fork, for the future.: <https://myforestfoods.com/>
- Negavatt*. (2. 8 2021. a.). Allikas: Parim Negavati roheidee on seenematerjalist tooteid arendav Myceen: <https://www.negavatt.ee/parim-negavati-roheidee-seenematerjalist-tooteid-arendav-myceen>
- Niemelä, T. (2008). *Torikseened Soomes ja Eestis*. (K. Jürgens, & I. Sell, Tõlk.) Helsinki: Finnish Museum of Natural History. (lk 9, 13, 17, 105, 111, 218, 268)
- Pakendiseadus*. (2004). Kasutamise kuupäev: 2021, allikas Riigiteataja: <https://www.riigiteataja.ee/akt/104042012006>
- Pfohl, H.-C. (2017). *Logistiksysteme: Betriebswirtschaftliche Grundlagen*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg. 151-167. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-662-56228-4_7
- Rabnawaz, M., Wyman, I., Auras, R., & Cheng, S. (2017). A roadmap towards green packaging: The current status and future outlook for polyesters in the packaging industry. *Green Chemistry*, 19(20), 4737–4753. <https://doi.org/10.1039/c7gc02521a>
- Rigid cellular plastics -- Determination of flexural properties -- Part 2: Determination of flexural strength and apparent flexural modulus of elasticity* (lk. 1–5). (2007). International standard.
- Rigid cellular plastics - Determination of compression properties (ISO 844:2021)* . Eesti standardikeskus. (lk. 1-5) (2021)
- Rigid cellular plastics. Test for dimensional stability.*(lk. 1-5) International Organization for Standardization.(1986)
- Sánchez, C. (2010). Cultivation of *Pleurotus ostreatus* and other edible mushrooms. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85(5), 1321–1337. <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2343-7>
- Schmidt, O. (2006). Wood Rot. *Wood and Tree Fungi: Biology, Damage, Protection, and Use*, 2, 135–159. https://doi.org/10.1007/3-540-32139-x_7
- Seedlipdrinks*. (2022). Allikas: We Grow Our Packaging using Mushrooms!: <https://www.seedlipdrinks.com/en-gb/journal/mycelium-technology/>
- Statista* . (5. 03 2021. a.). Allikas: Generation of plastic packaging waste in the European Union (EU-28) in 2018, by country: <https://www.statista.com/statistics/972604/plastic-packaging-waste-generated-per-capita-countries-eu/>
- Sterling, L. S. (2009). *The Art of Agent-Oriented Modeling*. London: The MIT Press.
- Stöven, K., Jacobs, F., & Schnug, E. (2015). Mikroplastik: Ein selbstverschuldetes Umweltproblem im Plastikzeitalter. *JOURNAL FÜR KULTURPFLANZEN*, 67(7), 241–250. <https://doi.org/10.5073/JFK.2015.07.01>
- Turner, A. (2020). Foamed Polystyrene in the Marine Environment: Sources, Additives,

- Transport, Behavior, and Impacts. *Environmental Science and Technology*, 54(17), 10411–10420. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c03221>
- Van Bael, S. A. (2020). Fungal diversity. In *Diversity* (Vol. 12). <https://doi.org/10.3390/d12110437>
- van den Adel, F., Scagnetti, C., Lorenz, M., Krieg, H., & Albrecht, S. (2021). Plastik-Index PLIX macht Verpackungen vergleichbar: Kunststoffe und Umwelt. *Chemie in Unserer Zeit*, 55(3), 192–198. <https://doi.org/10.1002/ciuz.202000049>
- van Schijndel, J., Molendijk, D., van Beurden, K., Canalle, L. A., Noël, T., & Meuldijk, J. (2020). Preparation of bio-based styrene alternatives and their free radical polymerization. *European Polymer Journal*, 125(January), 109534. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2020.109534>
- <https://www.architectuur.nl/design/bouwen-met-mycelium/>
- Waldschläger, K. (2019). *Mikroplastik in der aquatischen Umwelt: Quellen, Senken und Transportpfade*. Wiesbaden: Springer Vieweg Wiesbaden. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-658-27766-6>
- Ward, C. P., Armstrong, C. J., Walsh, A. N., Jackson, J. H., & Reddy, C. M. (2019). *Sunlight Converts Polystyrene to Carbon Dioxide and Dissolved Organic Carbon*. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.9b00532>
- Wösten, H. A. B., Krijgsheld, P., & M. Montalti, H. L. (2018). *Growing Fungi Structures in Space*.
- Wünsch, J. (2000). *Polystyrene: Synthesis, Production and Applications*. Shawbury: Rapra Technology Ltd. (lk 15) Allikas: https://books.google.ee/books?id=9Oal8DG_7GAC&printsec=frontcover&hl=et#v=onepage&q&f=false
- Yang, L., Park, D., & Qin, Z. (2021). Material Function of Mycelium-Based Bio-Composite: A Review. *Frontiers in Materials*, 8(September), 1–17. <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.737377>

LISAD

Lisa 1. Esimese eelkatse seemed ja substraadid



L1.1 Liik libliktagel, vasakult hake, saepuru ja põhk. Autori foto



L1.2 Liik austerservik, vasakult substraadid hake, saepuru ja põhk. Autori foto



L1.3 Liik *Ganoderma resinaecum*, vasakult hake, saepuru ja põhk. Autori foto



L1.4 Liik lakkvaabik, vasakult hake, saepuru ja põhk. Autori foto



L1.5 Liik tuletael, vasakult hake, saepuru ja põhk. Autori foto



L1.6 Liik nabatorik, vasakult hake, saepuru ja põhk. Autori foto



L1.7 Liik tiger-hammasehik, vasakult hake, saepuru ja põhk. Autori foto

Lisa 2. Teise eelkatses kasvanud seened



L2.1 Põhu peal kasvanud seeneliigid vasakult ülevalt libliktagel, *Ganoderma resinaecum*, vasakult alt tuletael ja tiiger-hammasehik. Autori foto



L2.2 Hakke peal kasvanud seeneliigid vasakult ülevalt libliktagel, *Ganoderma resinaecum*, vasakult alt tuletael ja tiiger-hammasehik.



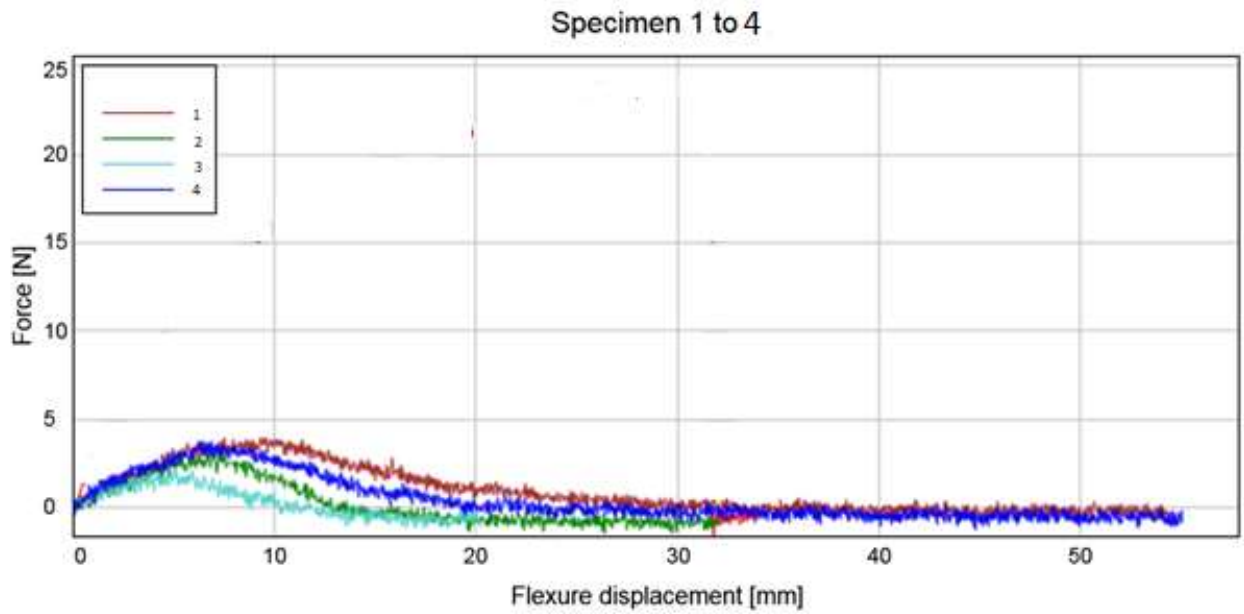
L2.3 Saepuru peal kasvanud seeneliigid vasakult ülevalt libliktagel, *Ganoderma resinaecum*, vasakult alt tuletael ja tiiger-hammasehik. Autori foto



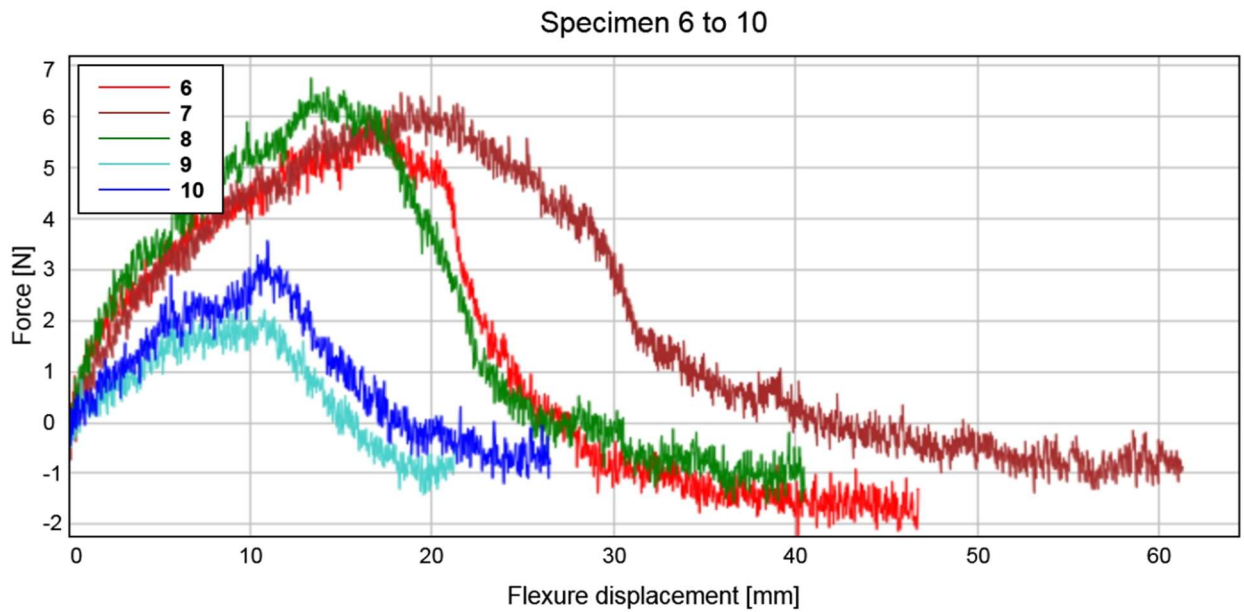
L2.4 *Ganoderma resinaecumi* seenematerjal. Autori foto

Lisa 3. Paindekatsed graafikud

Kuni lisa 3 lõpuni: x-telg deformatsioon (mm), y-telg jõud (N)

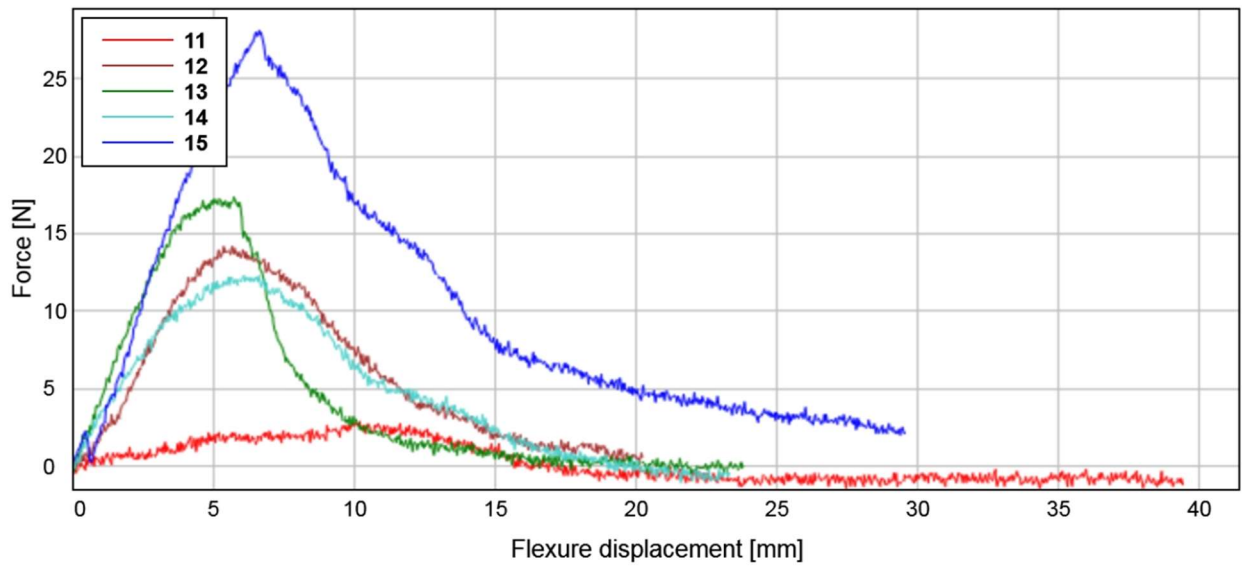


L3.1 Katsekehade tähised: 1- 1F1, 2- 1F2, 3-1F3, 4-1F4



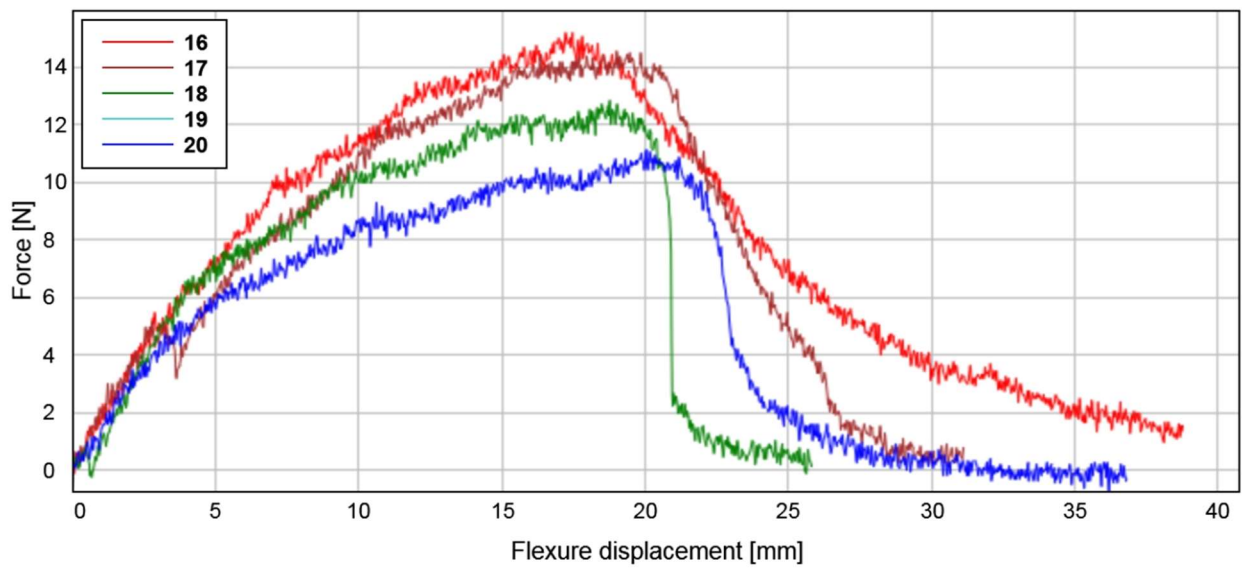
L3.2 Katsekehade tähised: 6- 2F1, 7- 2F2, 8- 2F3, 9- 3F1, 10- 3F2

Specimen 11 to 15



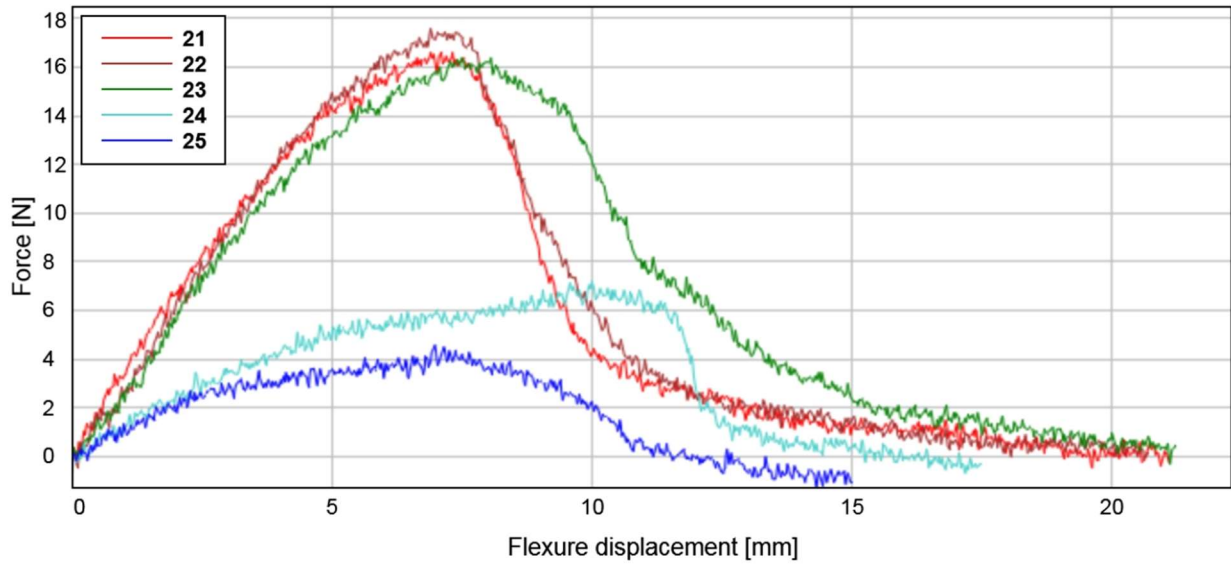
L3.3 Katsekehade tähised: 11- 3F3, 12- 1T1, 13- 1T2, 14- 1T3, 15- 1T4

Specimen 16 to 20



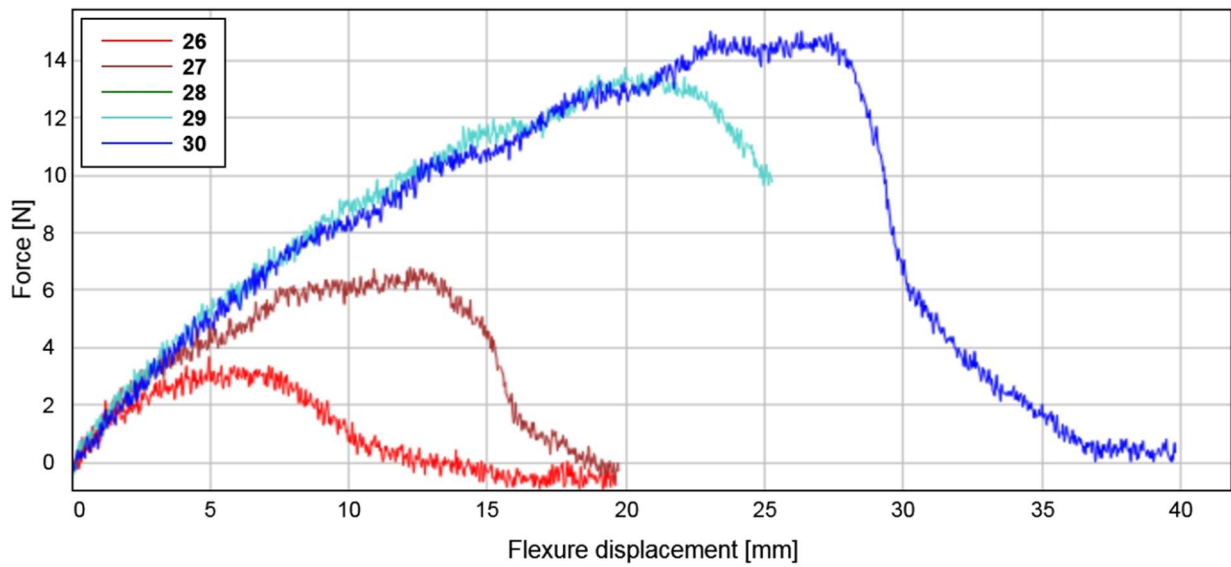
L3.4 Katsekehade tähised: 16- 2T1, 17- 2T2, 18- 2T3, 20- 2T4

Specimen 21 to 25



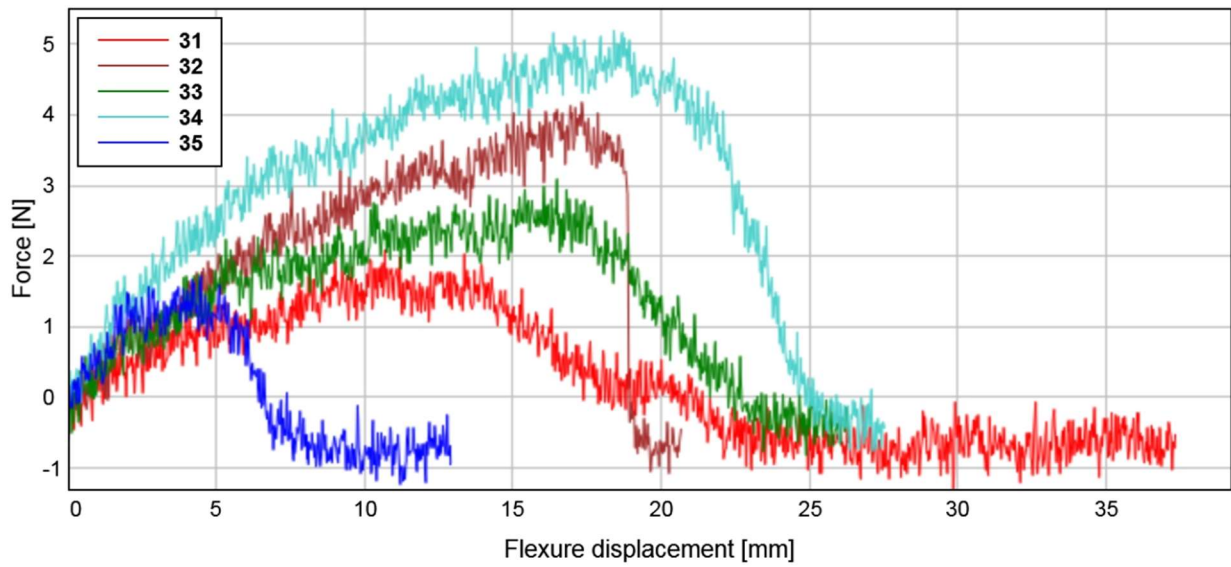
L3.5 Katsekehade tähised: 21- 3T1, 22- 3T2, 23- 3T3, 24- 1G1, 25- 1G2

Specimen 26 to 30



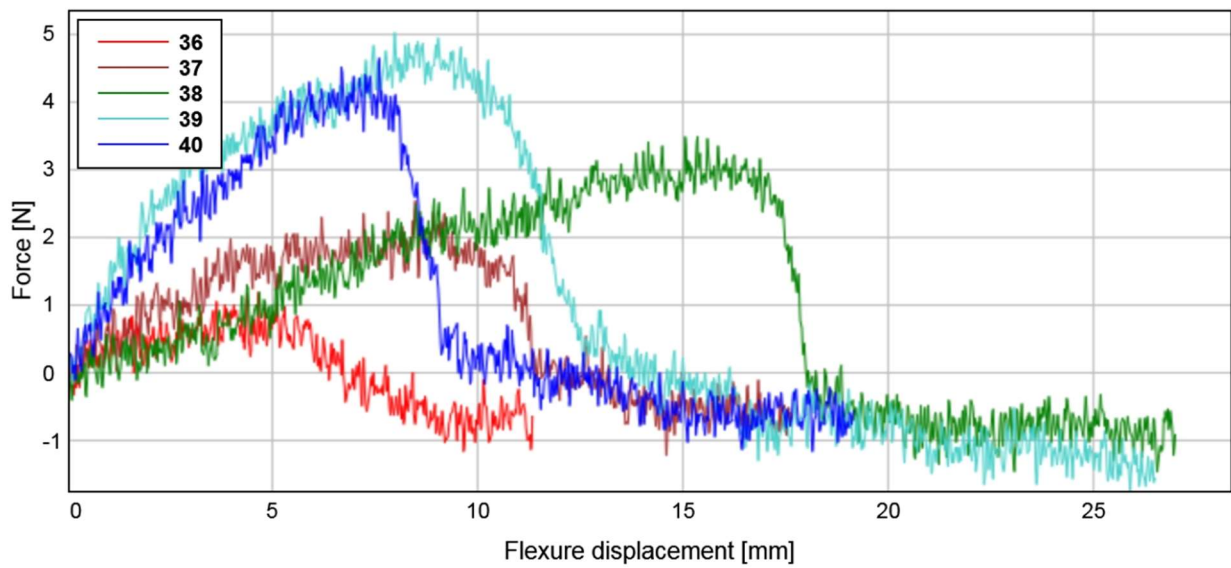
L3.6 Katsekehade tähised: 26- 1G3, 27- 1G4, 29- 2G1, 30- 2G2

Specimen 31 to 35



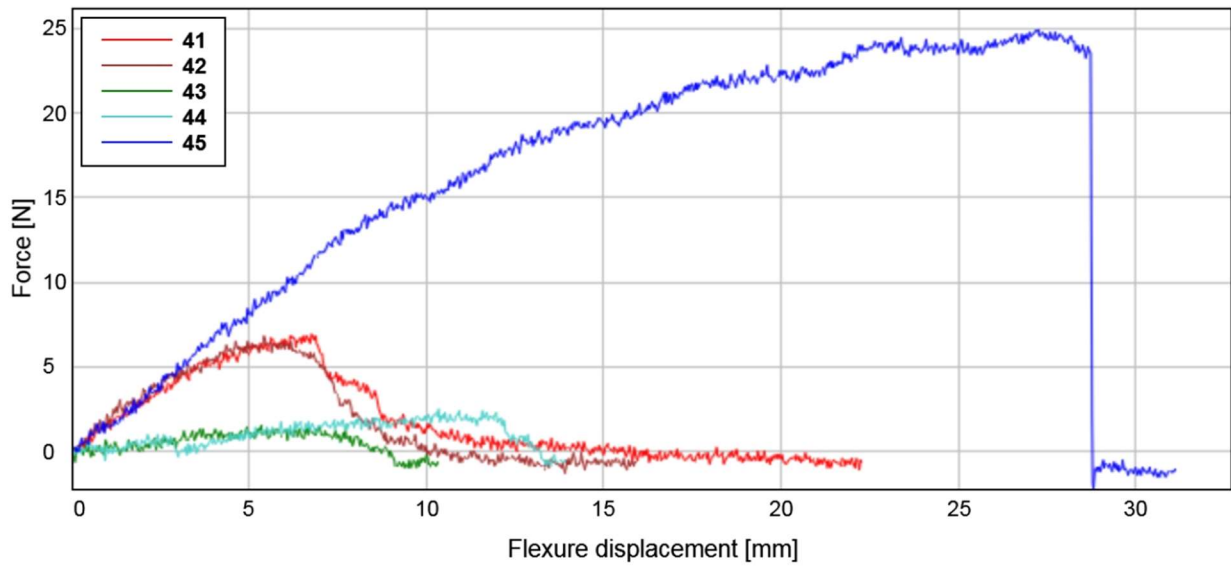
L3.7 Katsekehade tähised: 31- 2G3, 32- 3G1, 33- 3G2, 34- 3G3, 35- 1L1

Specimen 36 to 40



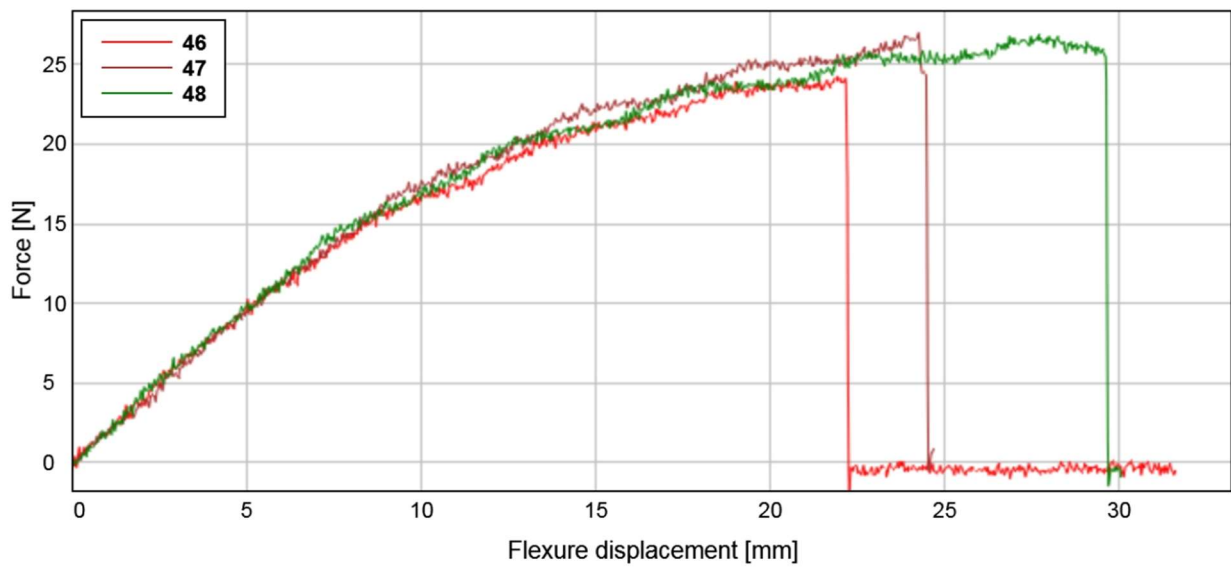
L3.8 Katsekehade tähised: 36- 1L2, 37- 2L1, 38- 2L2, 39- 2L3, 40- 2L4

Specimen 41 to 45



L3.9 Katsekehade tähised: 41- 3L1, 42- 3L2, 43- 3L3, 44- 3L4, 45- EPS1

Specimen 46 to 48



L3.10 Katsekehade tähised: 46- EPS2, 47- EPS3, 48- EPS4

Lisa 4. Paindekatse graafikute tabel

Tabel 5. Paindekatse algandmete graafikute tabel

Katsekeha nr.	Katsekeha tähis	Kõrgus (mm)	Deformatsioon maksimaalse jõuga (mm)	Painde deformatsioon maksimaalse jõu korral (mm)	Maksimaalne jõud (N)	Aeg maksimaalse jõu korral (s)	Paindetugevus (MPa)
1	1F-1	25,30	13,24	9,58	3,93	9,58	0,03
2	1F-2	25,00	8,52	6,96	3,29	6,96	0,02
3	1F-3	25,20	13,72	5,08	2,11	5,08	0,01
4	1F-4	25,30	13,36	6,38	3,74	6,38	0,03
6	2F-1	26,20	17,96	17,42	6,12	17,42	0,04
7	2F-2	25,60	25,41	18,34	6,48	18,34	0,04
8	2F-3	26,90	13,97	13,34	6,77	13,34	0,04
9	3F-1	25,15	11,92	8,82	2,27	8,82	0,02
10	3F-2	24,81	32,59	10,94	3,59	10,94	0,03
11	3F-3	24,86	14,94	10,52	2,87	10,52	0,02
12	1T-1	25,35	7,76	5,38	14,23	5,38	0,10
13	1T-2	24,04	6,15	5,76	17,44	5,76	0,14
14	1T-3	24,79	7,93	6,10	12,30	6,10	0,09
15	1T-4	25,47	9,86	6,64	28,10	6,64	0,19
16	2T-1	30,95	18,71	17,22	15,20	17,22	0,07

Katsekeha nr.	Katsekeha tähis	Kõrgus (mm)	Deformatsioon maksimaalse jõuga (mm)	Painde deformatsioon maksimaalse jõu korral (mm)	Maksimaalne jõud (N)	Aeg maksimaalse jõu korral (s)	Paindetugevus (MPa)
17	2T-2	28,97	23,60	19,00	14,54	19,00	0,08
18	2T-3	29,41	24,49	18,76	12,84	18,76	0,07
19	2T-4	27,90	30,22	20,04	11,13	20,04	0,06
20	3T-1	23,50	7,11	6,90	16,57	6,90	0,14
21	3T-2	24,89	9,10	6,90	17,57	6,90	0,13
22	3T-3	24,84	14,97	7,44	16,37	7,44	0,12
23	1G-1	24,14	16,54	10,00	7,17	10,00	0,06
24	1G-2	24,92	10,63	6,98	4,55	6,98	0,03
25	1G-3	22,91	7,42	4,96	3,68	4,96	0,03
26	1G-4	23,48	12,72	12,20	6,79	12,20	0,06
27	2G-1	28,88	20,36	19,96	13,75	19,96	0,07
28	2G-2	27,55	27,49	26,32	15,01	26,32	0,09
29	2G-3	24,57	18,11	10,68	2,09	10,68	0,02
30	3G-1	23,40	21,14	17,32	4,17	17,32	0,03
31	3G-2	23,70	32,11	16,48	3,09	16,48	0,02
32	3G-3	22,58	20,34	18,40	5,19	18,40	0,05
33	1L-1	22,77	22,61	4,48	1,72	4,48	0,01
34	1L-2	23,11	27,53	4,64	1,19	4,64	0,01
35	2L-1	26,55	16,57	8,46	2,53	8,46	0,02

Katsekeha nr.	Katsekeha tähis	Kõrgus (mm)	Deformatsioon maksimaalse jõuga (mm)	Painde deformatsioon maksimaalse jõu korral (mm)	Maksimaalne jõud (N)	Aeg maksimaalse jõu korral (s)	Paindetugevus (MPa)
36	2L-2	25,01	17,38	15,34	3,48	15,34	0,03
37	2L-3	28,45	8,41	7,96	5,02	7,96	0,03
38	2L-4	29,13	8,57	7,58	4,66	7,58	0,02
39	3L-1	27,01	14,51	6,78	7,07	6,78	0,04
40	3L-2	25,33	8,45	5,42	6,80	5,42	0,05
41	3L-3	23,80	13,44	5,34	1,47	5,34	0,01
42	3L-4	25,25	18,46	11,60	2,46	11,60	0,02
43	EPS-1	29,19	27,54	27,24	24,87	27,24	0,13
44	EPS-2	29,63	23,16	21,94	24,24	21,94	0,12
45	EPS-3	29,25	27,56	24,26	26,97	24,26	0,14
46	EPS-4	29,90	31,74	27,70	26,80	27,70	0,13

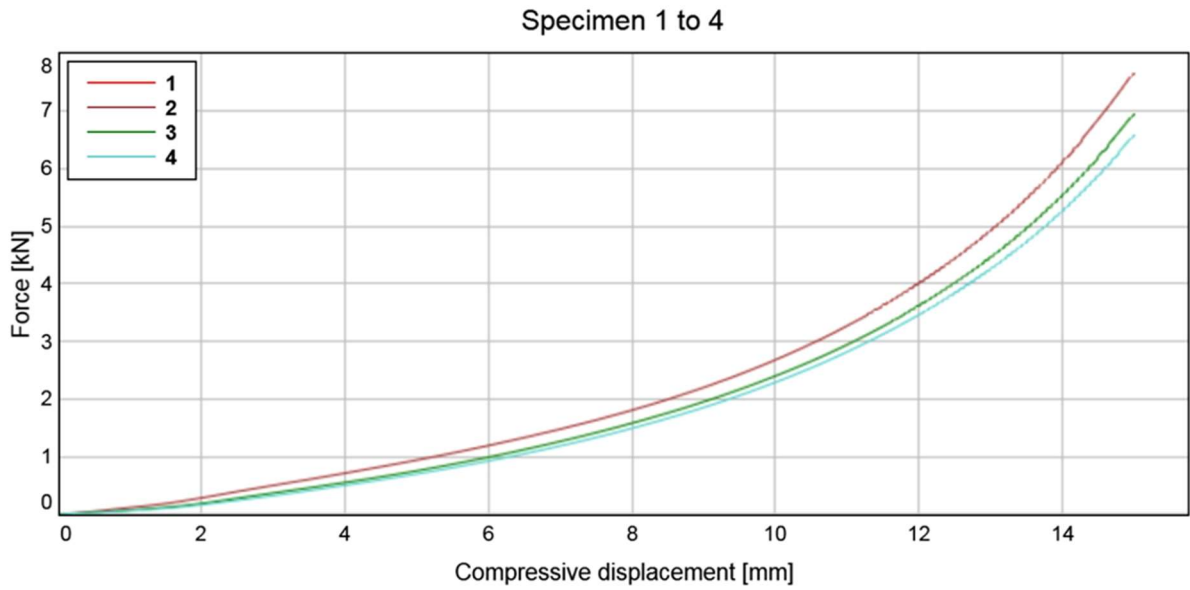
Lisa 5. Paindekatsede tabel koos keskmiste tulemustega

Tabel 6. Paindekatsede tabel. Arvväärtused koos tihedusega, keskmised tulemused koos keskmise veaga.

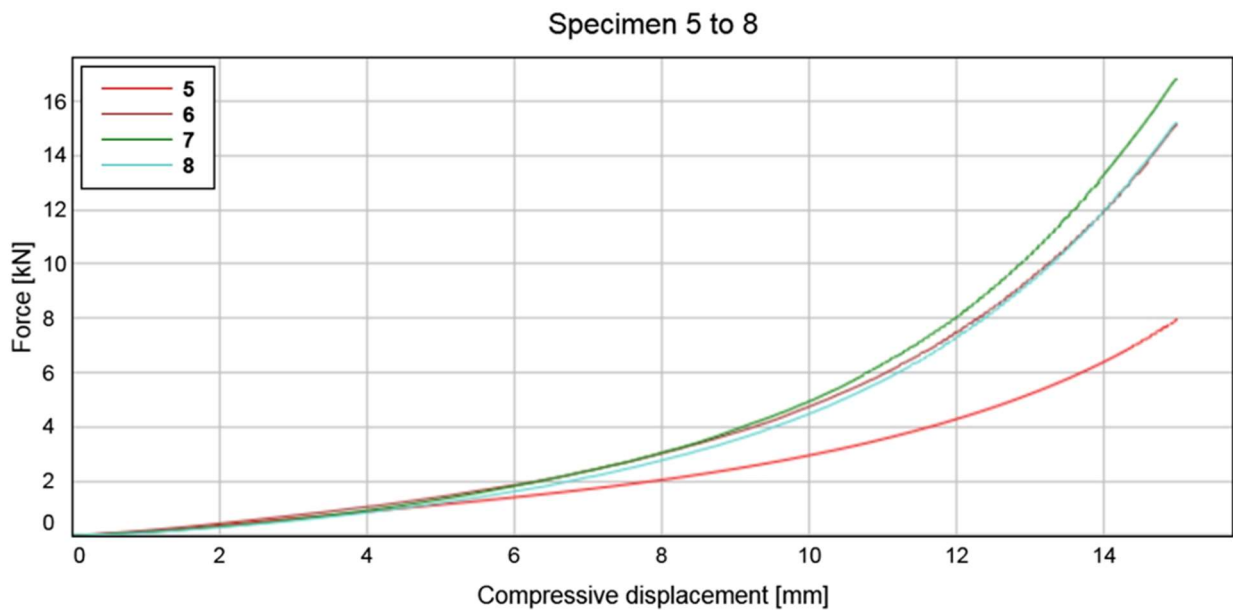
Katsekeha nimetus	Max jõud (N), ± keskmine viga	Paindetugevus (MPa), ± keskmine viga	Tihedus (g/cm ³) ± keskmine viga
1F	3,27±0,708	0,02±0,008	0,152±0,0059
2F	6,45±0,266	0,04±0	0,203±0,0005
3F	2,91±0,540	0,02±0,005	0,171±0,0015
1T	18,01±6,104	0,13±0,039	0,162±0,0089
2T	13,43±1,581	0,07±0,007	0,161±0,0089
3T	16,87±0,525	0,13±0,008	0,168±0,0119
1G	5,54±1,471	0,05±0,015	0,178±0,0043
2G	10,28±5,816	0,06±0,029	0,213±0,0035
3G	4,15±0,857	0,03±0,012	0,187±0,0138
1L	1,45±0,265	0,01±0	0,804±0,6647
2L	3,92±0,985	0,03±0,005	0,190±0,0029
3L	4,45±2,511	0,03±0,016	0,179±0,0134
EPS	18,44±1,165	0,13±0,008	0,014±0,0001

Lisa 6. Survekatse graafikud

Kuni lisa 6 lõpuni: x-telg deformatsioon (mm), y-telg jõud (kN)

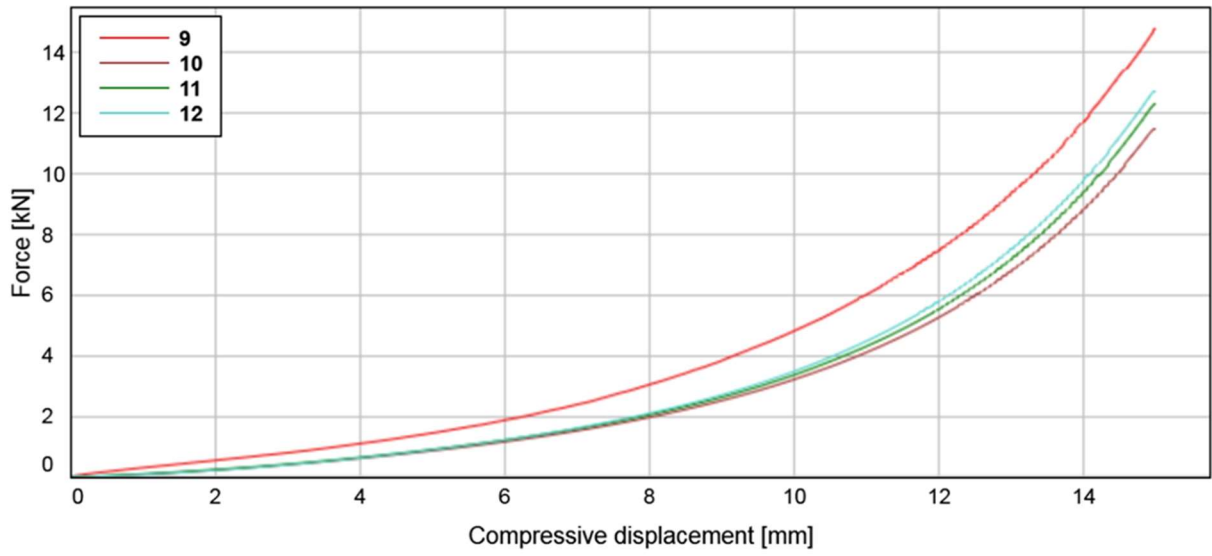


L6.1. Katsekehade tähised: 2 - 1F1 , 3 - 1F2 , 4 - 1F3



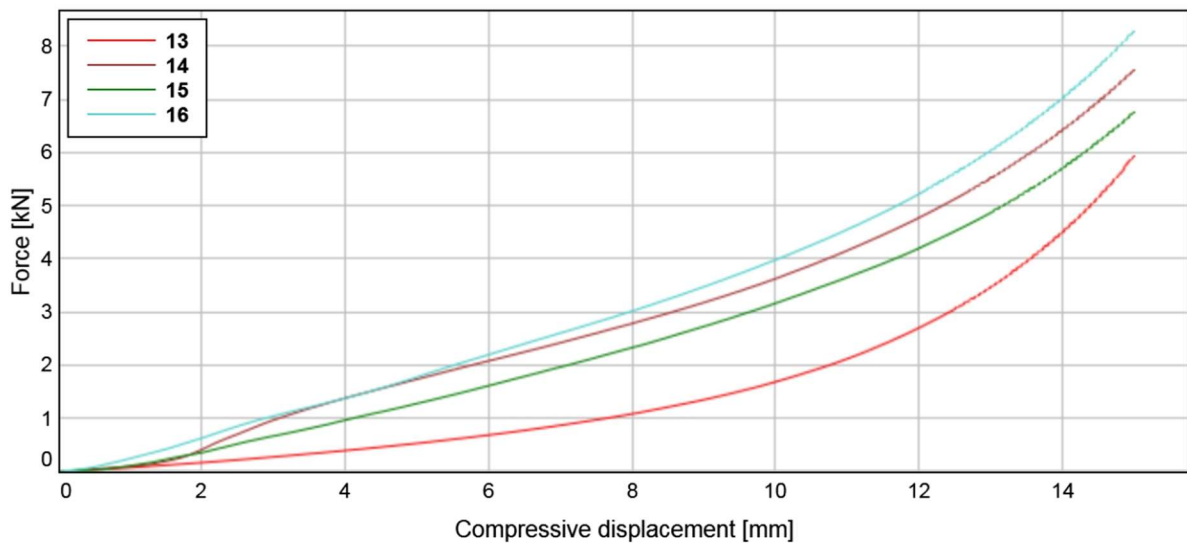
L6.2 Katsekehade tähised: 5 - 1F4, 6 - 2F1, 7 - 2F2, 8 - 2F3

Specimen 9 to 12



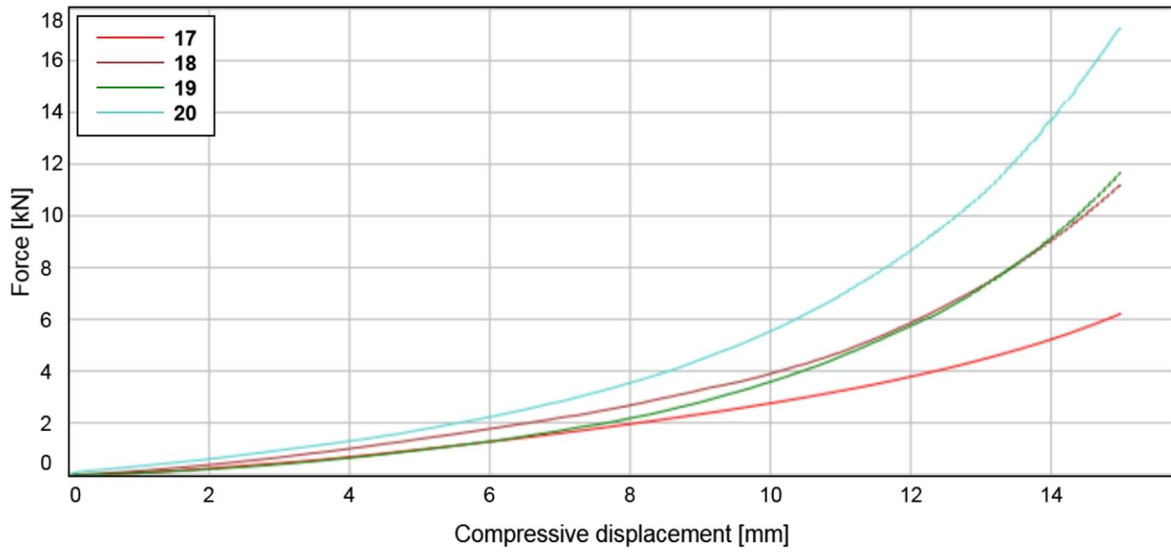
L6.3 Katsekehade tähised: 9 - 2F4, 10 - 3F1, 11 - 3F2, 12 - 3F3

Specimen 13 to 16



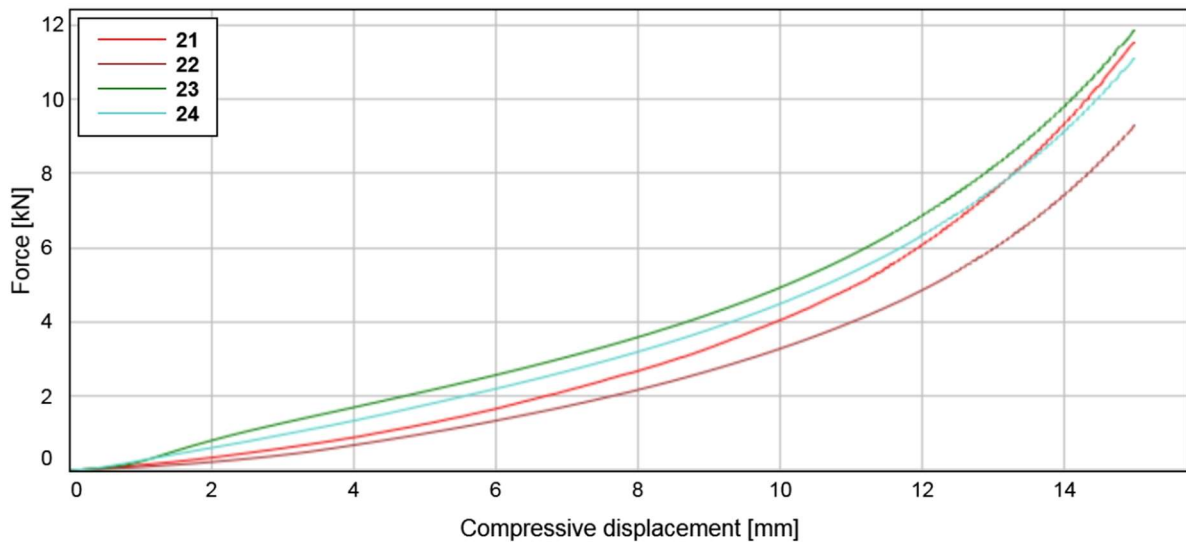
L6.4 Katsekehade tähised: 13 - 3F4, 14 - 1T1, 15 - 1T2, 16 - 1T3

Specimen 17 to 20



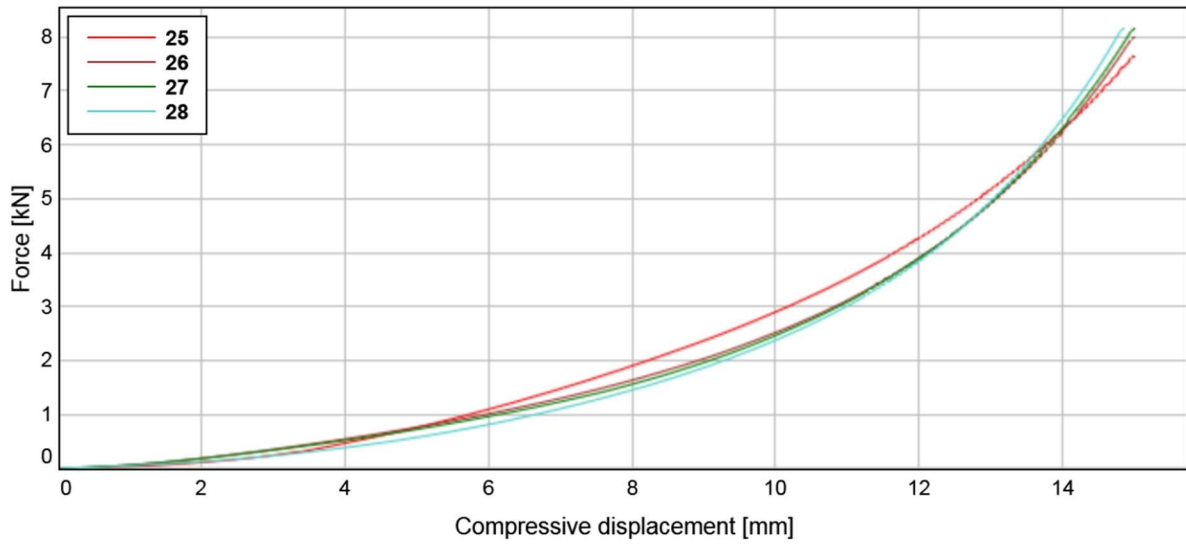
L6.5 Katsekehade tähised: 17 - 1T4, 18 - 2T1, 19 - 2T2, 20 - 2T3

Specimen 21 to 24



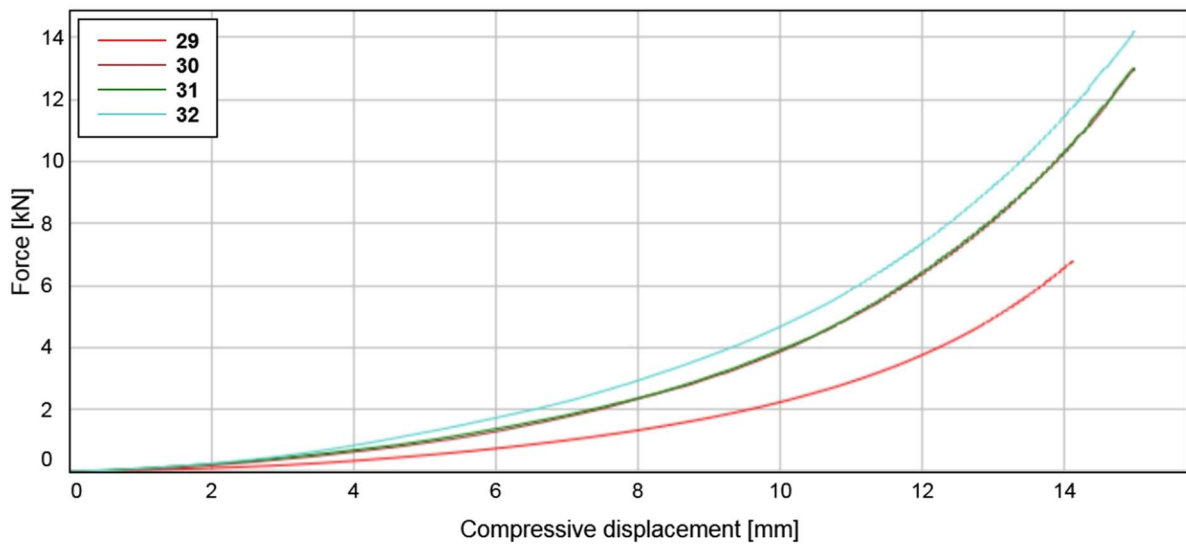
L6.6 Katsekehade tähised: 21 - 2T4, 22 - 3T1, 23 - 3T2, 24 - 3T3

Specimen 25 to 28



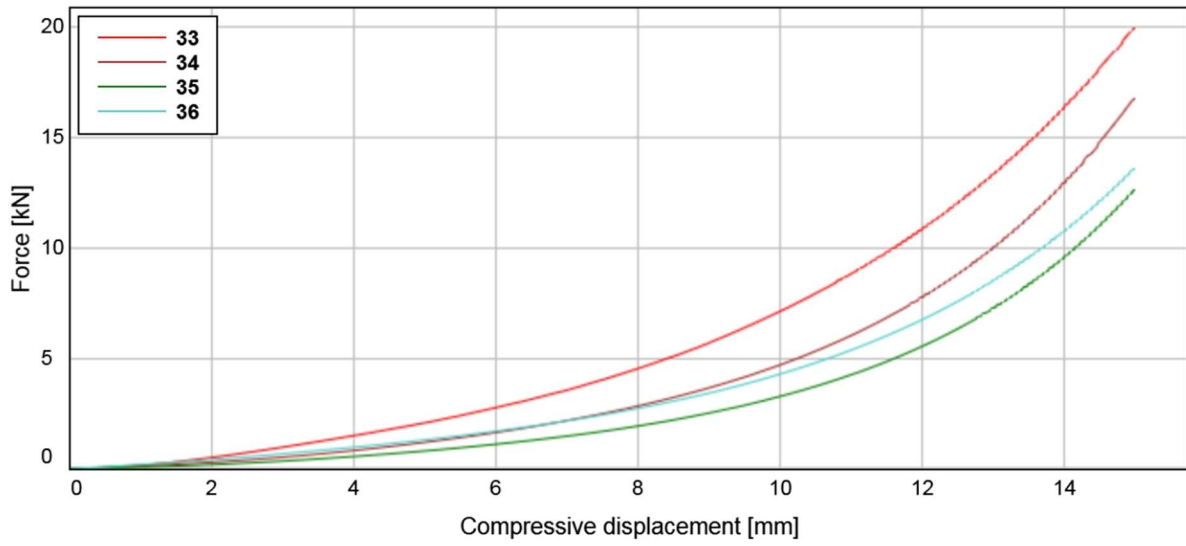
L6.7 Katsekehade tähised: 25 - 3T4, 26 - 1G1, 27 - 1G2, 28 - 1G3

Specimen 29 to 32



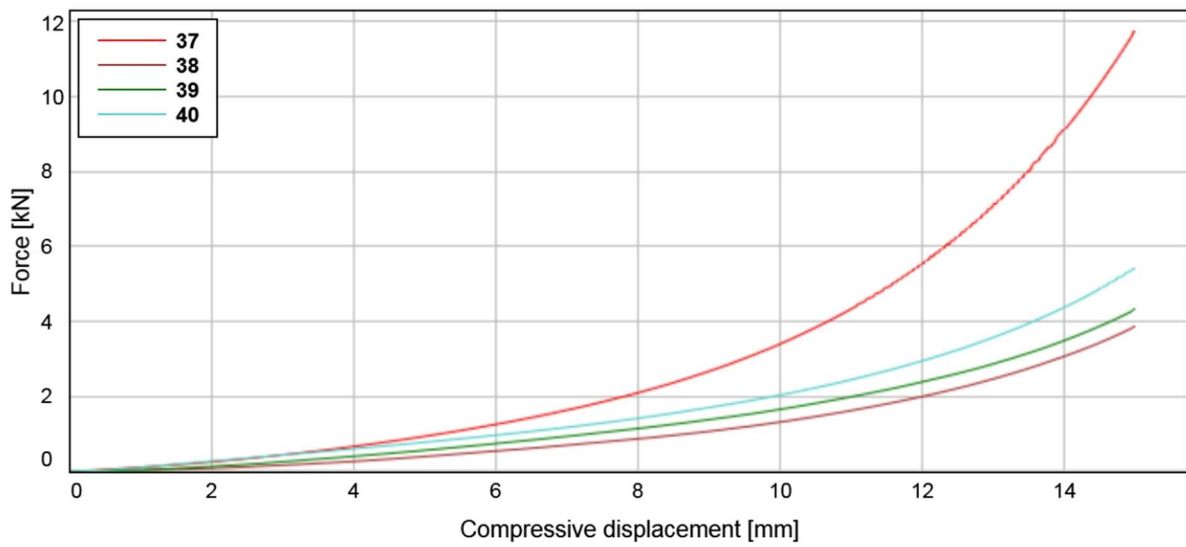
L6.8 Katsekehade tähised: 29 - 1G4, 30 - 2G1, 31 - 2G2, 32 - 2G3

Specimen 33 to 36



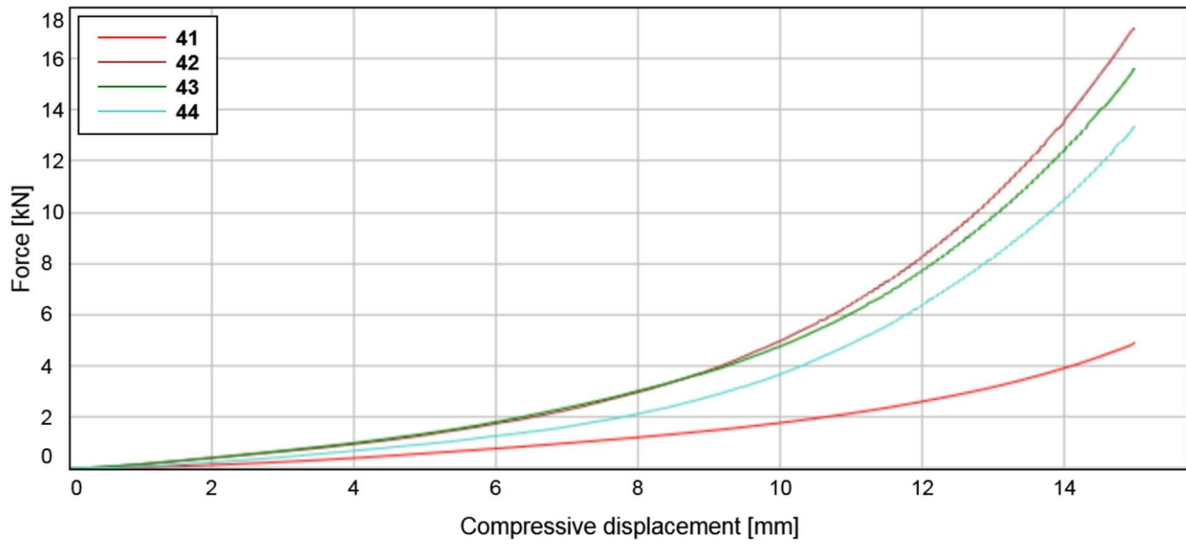
L6.9 Katsekehade tähised: 33 – 2G4, 34 – 3G1, 35 – 3G2, 36 – 3G3

Specimen 37 to 40



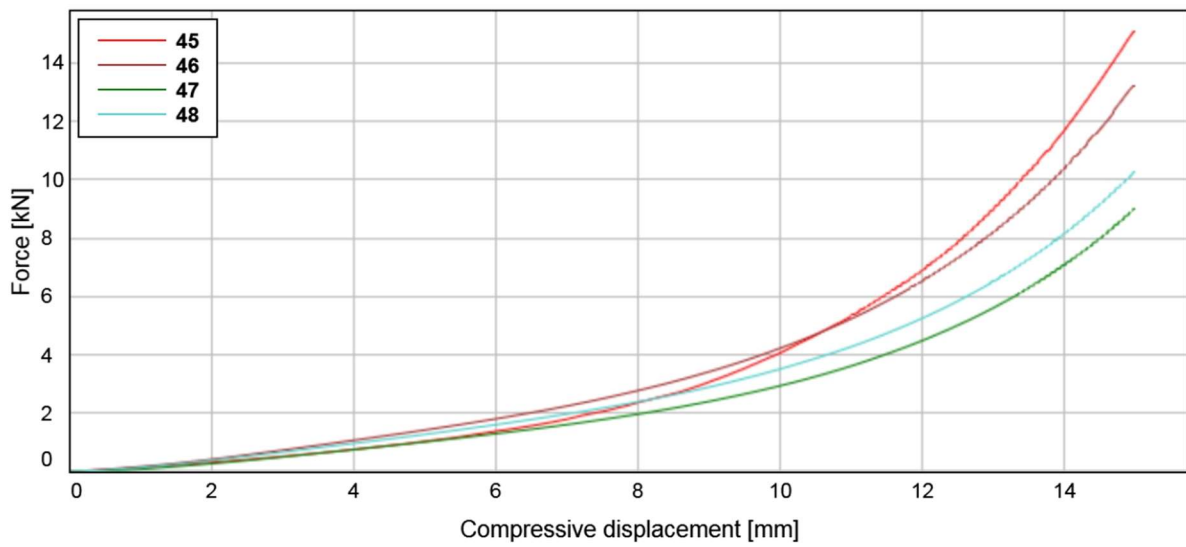
L6.10 Katsekehade tähised: 37 – 3G4, 38 – 1L1, 39 – 1L2, 40 – 1L3

Specimen 41 to 44



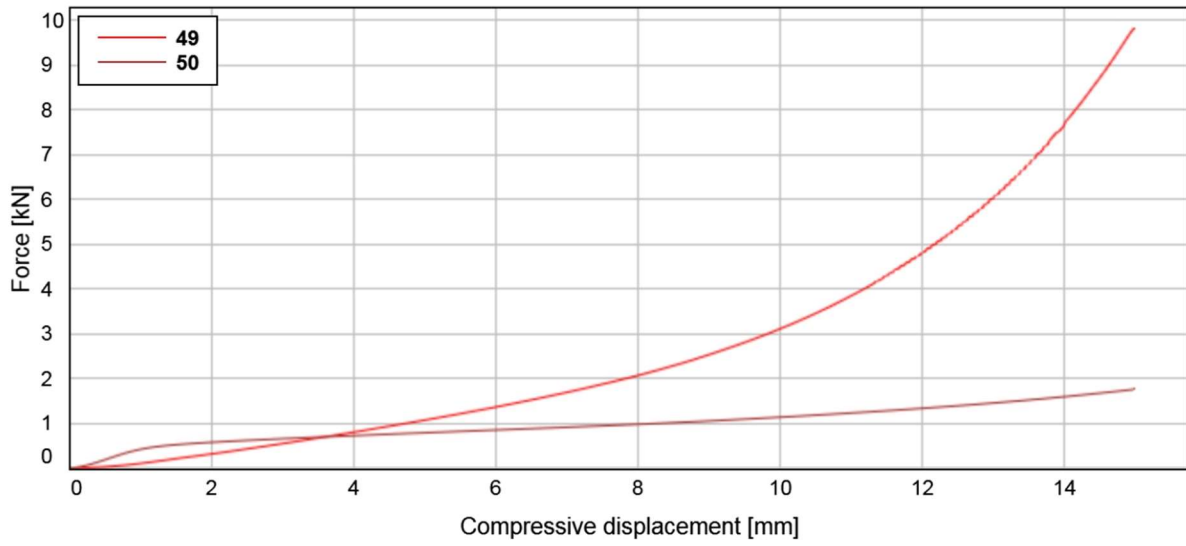
L6.11 Katsekehade tähised: 41 - 1L4, 42 - 2L1, 43 - 2L2, 44 - 2L3

Specimen 45 to 48



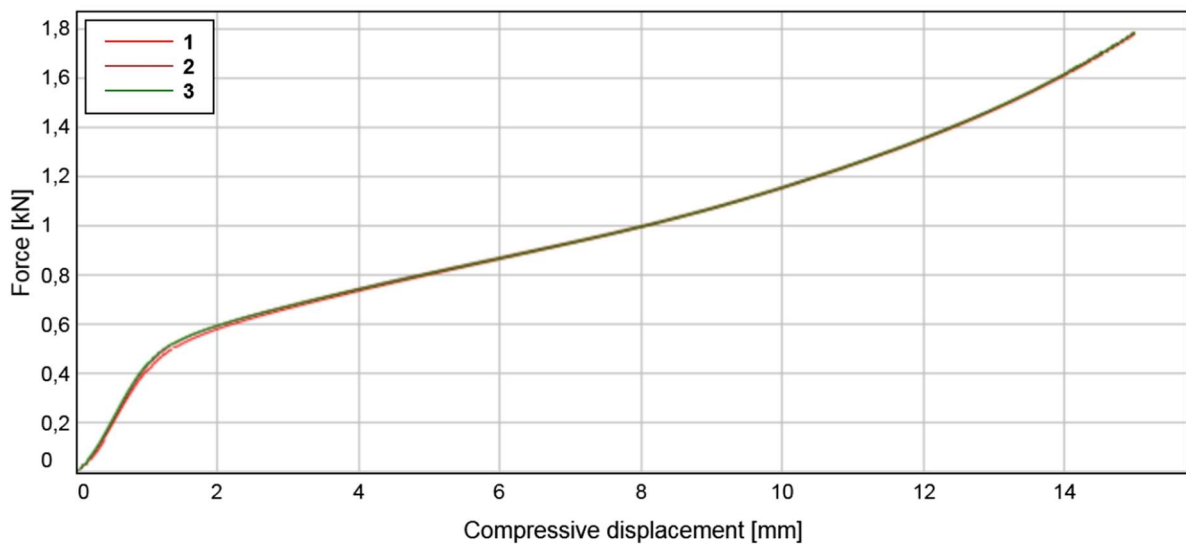
L6.12 Katsekehade tähised: 45 - 2L4, 46 - 3L1, 47 - 3L2, 48 - 3L3

Specimen 49 to 50



L6.13 Katsekehade tähised: 49 – 3L4, 50 – EPS1

Specimen 1 to 3



L6.14 Katsekehade tähised: 1 – EPS2, 2 – EPS3, 3 – EPS4

Lisa 7. Survekatse graafikute tabel

Tabel 7. Survekatse algandmete tabel

Katsekeha nr	Katsekeha tähis	Maksimaalne jõud (Kn)	Survetugevus (MPa)	Aeg maksimaalsel jõul (s)
2	1F-1	7,64	0,76	180,00
3	2F-2	6,93	0,69	180,00
4	3F-3	6,56	0,66	180,00
5	3F-4	7,93	0,79	180,00
6	2F-1	15,11	1,51	180,00
7	2F-2	16,81	1,68	180,00
8	2F-3	15,20	1,52	180,00
9	2F-4	14,79	1,48	180,00
10	3F-1	11,51	1,15	180,00
11	3F-2	12,30	1,23	180,00
12	3F-3	12,75	1,28	180,00
13	3F-4	5,91	0,59	180,00
14	1T-1	7,54	0,75	180,00
15	1T-2	6,74	0,67	180,00
16	1T-3	8,27	0,83	180,00
17	1T-4	6,22	0,62	180,00
18	2T-1	11,20	1,12	180,00
19	2T-2	11,64	1,16	180,00
20	2T-3	17,21	1,72	180,00
21	2T-4	11,52	1,15	180,00
22	3T-1	9,27	0,93	180,00
23	3T-2	11,85	1,18	180,00
24	3T-3	11,09	1,11	180,00
25	3T-4	7,64	0,76	180,00
26	1G-1	7,99	0,80	180,00

Katsekeha nr	Katsekeha tähis	Maksimaalne jõud (Kn)	Survetugevus (MPa)	Aeg maksimaalsel jõul (s)
27	1G-2	8,14	0,81	180,00
28	1G-3	8,15	0,81	178,20
29	1G-4	6,79	0,68	169,64
30	2G-1	12,96	1,30	180,00
31	2G-2	13,01	1,30	180,00
32	2G-3	14,19	1,42	180,00
33	2G-4	19,88	1,99	180,00
34	3G-1	16,69	1,67	180,00
35	3G-2	12,59	1,26	180,00
36	3G-3	13,56	1,36	180,00
37	3G-4	11,74	1,17	180,00
38	1L-1	3,86	0,39	180,00
39	1L-2	4,31	0,43	180,00
40	1L-3	5,42	0,54	180,00
41	1L-4	4,87	0,49	180,00
42	2L-1	17,17	1,72	180,00
43	2L-2	15,59	1,56	180,00
44	2L-3	13,33	1,33	180,00
45	2L-4	15,07	1,51	180,00
46	3L-1	13,23	1,32	180,00
47	3L-2	8,99	0,90	180,00
48	3L-3	10,25	1,03	180,00
49	3L-4	9,82	0,98	180,00
50	EPS1	1,77	0,18	180,00
51	EPS2	1,77	0,18	180,00
52	EPS3	1,78	0,18	180,00
53	EPS4	1,78	0,18	180,00

Lisa 8. Survekatse tabel koos keskmiste tulemustega

Tabel 8. Survekatsete tabel. Arvväärtused koos tihedusega, keskmised tulemused koos keskmise veaga.

Katsekeha nimetus	Max jõud (kN) ± keskmine viga	Survetugevus MPa ± keskmine viga	Tihedus (g/cm³) ± keskmine viga
1F	7,3±0,546	0,73±0,052	0,158±0,003
2F	15,5±0,784	1,55±0,078	0,188±0,002
3F	10,6±2,754	1,06±0,277	0,193±0,008
1T	7,2±0,780	0,72±0,080	0,155±0,004
2T	12,9±2,498	1,29±0,250	0,177±0,013
3T	10±1,636	0,99±0,163	0,172±0,008
1G	7,8±0,568	0,78±0,055	0,174±0,004
2G	15±2,854	1,50±0,286	0,200±0,004
3G	13,6±1,872	1,37±0,188	0,192±0,006
1L	4,6±0,587	0,46±0,057	0,148±0,008
2L	15,3±1,371	1,53±0,139	0,184±0,005
3L	10,6±1,600	1,06±0,158	0,184±0,006
EPS	1,8±0,005	0,18±0	0,015±0

Lisa 9. Mõõtmete stabiilsus tabel koos keskmiste tulemustega

Tabel 9. Mõõtmete stabiilsus: katsekehade mõõtmete muutus peale 20h.

20h				
Katsekeha nimetus	Pikkus	Laius	Kõrgus	Keskmine % kõikide mõõtmete muutus
1F	1,60%	1,87%	1,32%	1,60%
2F	2,09%	1,06%	2,60%	1,92%
3F	1,21%	1,75%	1,35%	1,43%
1T	1,01%	0,97%	2,46%	1,48%
2T	1,14%	1,24%	2,88%	1,75%
1G	1,35%	1,70%	0,35%	1,14%
2G	1,83%	2,86%	17,41%	7,37%
3G	1,16%	1,41%	0,00%	0,86%
1L	0,84%	1,42%	3,55%	1,94%
2L	1,16%	3,17%	2,87%	2,40%
3L	2,22%	3,20%	3,24%	2,89%
EPS	-0,07%	-0,04%	0,11%	0,00%
Keskmine	1,30%	1,72%	3,18%	

Tabel 10. Mõõtmete stabiilsus: katsekehade mõõtmete muutus peale 48h.

48h				
Katsekeha nimetus	Pikkus	Laius	Kõrgus	Keskmine mõõtmete muutus %
1F	2,39%	2,58%	5,50%	3,49%
2F	2,84%	1,89%	8,90%	4,55%
3F	2,03%	2,27%	5,39%	3,23%
1T	1,66%	1,77%	6,22%	3,22%
2T	2,24%	2,21%	13,17%	5,87%
1G	1,89%	1,94%	0,45%	1,43%
2G	2,59%	3,84%	17,41%	7,95%
3G	2,07%	2,06%	8,33%	4,15%
1L	2,60%	3,06%	12,18%	5,95%
2L	2,95%	4,80%	11,00%	6,25%
3L	2,87%	4,41%	8,33%	5,21%
EPS	-0,02%	0,02%	0,03%	0,01%
Keskmine	2,18%	2,57%	8,08%	