



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
TalTech Tartu Kolledž

**BIOPLASTIST KILEKOTTIDE JA ALFA-
TSELLULOOSI LAGUNEMINE ERINEVATES
LOODUSKESKKONDADES**

**DEGRADATION OF BIOPLASTIC BAGS AND ALPHA-
CELLULOSE IN DIFFERENT NATURAL ENVIRONMENTS**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Gerda Aas

Üliõpilaskood 182766NAEM

Juhendaja: Jane Raamets, lektor

Tartu 2020

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 2020

Autor: allkirjastatud digitaalselt

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

“25” mai 2020

Juhendaja: allkirjastatud digitaalselt

Kaitsmisele lubatud

“25” mai 2020

Kaitsmiskomisjoni esimees Annely Kuu, allkirjastatud digitaalselt

/ nimi ja allkiri /

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Gerda Aas, 182766NAEM

Õppekava, peeriala: NAEM06/18, Tööstusökoloogia

Juhendaja: Lektor Jane Raamets, +372 55 61 33 44

Lõputöö teema:

Bioplastist kilekottide ja alfa-tselluloosi lagunemine erinevates looduskeskkondades

Degradation of bioplastic bags and alpha cellulose in different natural environments

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Uurida erinevate bioplastist valmistatud kilekottide lagunemist erinevates looduslikes keskkondades ning võrrelda neid naftal baseeruva kilekoti lagunemisprotsessiga.
2. Uurida alfa-tselluloosi lagunemist samades keskkondades

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Materjali läbitöötamine, kirjanduse ülevaate koostamine	10.04.20
2.	Tulemuste kirjeldamine, arutelu koostamine	20.05.20
3.	Lõputöö esitamine	25.05.20

Töö keel: eesti

Lõputöö esitamise tähtaeg: "25" mai 2020

Üliõpilane: Gerda Aas allkirjastatud digitaalselt "25" mai 2020

Juhendaja: Jane Raamets allkirjastatud digitaalselt "25" mai 2020

Programmijuht: Annely Kuu allkirjastatud digitaalselt "25" mai 2020

SISUKORD

EESSÕNA.....	5
SISSEJUHATUS	6
1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE	8
1.1 Naftal baseeruvad kilekotid	8
1.2 Bioplastid.....	10
1.3 Bioplastide sertifikaadid ja märgised	11
1.4 Bioplastide lagunemisviisid	13
1.5 Levinumad bioplastidest valmistatud kilekottide materjalid.....	16
1.6 Tselluloos.....	18
2. MATERJAL JA METOODIKA	20
2.1 Proovialade kirjeldus	20
2.2 Lagunemisekatse materjal	20
2.3 Lagunemiskatse meetoodika	21
2.4 Analüüside meetoodika	21
3. TULEMUSED	24
3.1 Massikadu	24
3.2 Happesuseparameeter	26
3.3 Elektrijuhtivus	27
3.3 Kuivaine sisaldus.....	27
3.4 Mikroobikoosluse hingamisaktiivsus.....	28
3.5 Mikroobne biomass	29
4. ARUTELU	30
KOKKUVÕTE	34
SUMMARY	36
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	38
LISAD.....	43

EESSÕNA

Käesoleva magistritöö teema ning sõnastuse pakkus autorile välja juhendaja Jane Raamets. Töö jaoks kogutud proove analüüsiti Tallinna Tehnikaülikooli Tartu Kolledži laboris.

Töö autor tänab enda juhendajat Jane Raametsa, kelle abiga sai töö valmis. Lisaks tänab autor maaomanikku, kes võimaldas katseteks proovivõtukohad.

Märksõnad: kilekotid, bioplast, alfa-tselluloos, biolagunemine, magistritöö

SISSEJUHATUS

Järjest suureneva rahvaarvuga suureneb ka jäätmete hulk Maal. Lisaks mõjutab jäätme hulga suurenemist ka inimeste tarbimisharjumused. (Abdel-Shafy ja Mansour, 2018) Plastmass on laialt levinud materjal, mida kasutatakse paljude toodete valmistamisel ning samuti pakendamisel. Materjali kergus, odavus ning lihtsasti vormitavus muudab selle atraktiivseks tootjatele. Suur osa toodetud plastist kasutatakse pakendamiseks, mistõttu on materjali kasutusaeg üsna lühike ning võib kiiresti sattuda prügilasse. (Alam, Billah, Yaije, 2018) Plasti satub ka loodusesse, kus see võib ohustada ümbritsevat keskkonda ning samuti mõjutada esteetikat (Plastic bag environmental impact, 2019). Plastist kilekottide lagunemine võtab aega kuni 1000 aastat, mistõttu on nende mõju loodusele väga pikk (Asmuni, Hussin, Khalili, Zain, 2015). Seetõttu on vaja leida alternatiivseid lahendusi, mis oleksid keskkonnasõbralikumad. Üheks variandiks on bioplastist kilekotid, mis soodsates tingimustes peaksid lagunema täielikult palju lühema perioodi jooksul.

Käesoleva magistritöö eesmärgiks on uurida erinevate bioplastist valmistatud kilekottide lagunemist erinevates looduslikes keskkondades ning võrrelda neid naftal baseeruva kilekoti lagunemisprotsessiga. Lisaks soovis autor uurida α -tselluloosi lagunemist samades keskkondades.

Töö eesmärgi saavutamiseks püstitas autor järgnevad uurimisülesanded:

- 1) anda kirjandusele tuginedes ülevaade naftal baseeruvatest plastidest ja bioplastidest, nende lagunemisviisidest ning levinumatest materjalidest;
- 2) viia läbi lagunemiskatse, mille käigus uurida nelja erineva biolaguneva kilekoti ja ühe naftal baseeruva kilekoti lagunemisprotsessi kolmel erineval alal;
- 3) hinnata katse tulemuste alusel materjalide biolagunemise kiirust.

Magistritöö teema on aktuaalne, kuna järjest enam pööratakse rõhku keskkonnaprobleemidele ning kuidas neid lahendada ja vältida. Üha enam on ühiskonnas tõstatunud ka teema ühekordsete kilekottide kasutamise osas, mis tekitab vastakaid arvamusi. Bioplastidest valmistatud pakendimaterjal on alternatiiviks ning neist on võimalik toota ka kilekotte. Bioplastide tootmiseks kasutatakse suures osas kultuure, mida saab kasutada ka inimtoiduks. Seetõttu on oluline uurida ja anda hinnang, kas bioplastil baseeruvad kilekotid on võrreldes naftal baseeruvate kilekottidega keskkonnasõbralikum valik.

Töö on jaotatud neljaks peatükiks. Esimene peatükk annab kirjandusallikatele tuginedes ülevaate naftal baseeruvatest kilekottidest, bioplastidest, bioplastide sertifikaatidest ja märgistest, bioplastide tüüpidest ja lagunemisviisidest. Teises peatükis kirjeldatakse töö materjali ja meetodikat, kuidas uuriti katsetükkide massikadu ning milliseid meetodeid kasutades teostati laborianalüüse. Kolmandas peatükis on välja toodud saadud tulemused ning neljandas peatükis arutleb autor saadud tulemuste üle ning põhjendab neid tuginedes kirjandusallikatele.

1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

1.1 Naftal baseeruvad kilekotid

Tänapäeval kasutatakse plastmassi materjalina igal pool, nagu näiteks majapidamistes, tööstustes, erinevates asutustes, ehitustel jne. Samuti on see asendanud mitmeid harjumuspäraseid materjale ja tooteid. Plastmassi tootmine kasvab iga aasta järjest rohkem ning prognoositakse, et aastaks 2025 peaks bioplastide tootmise tõttu nafta tarbimine plastitootmises vähenema umbes 20%. (Ashter, 2016) Euroopas kasutatakse suur osa (39%) naftal baseeruvatest plastidest pakendamiseks. Plastkottide kasutamine on saanud väga populaarseks, kuna need on kerged, odavad, tugevad ning aitavad säilitada hügieenilist kauba käsitlemist transportimisel. (Alam jt, 2018) Lisaks on plastid vastupidavad kemikaalidele ning bakteritele ja omavad head soojusisolatsiooni (Kriipsalu, Maastik, Truu, 2019). Plasti kasutamine on saanud väga tavaliseks viisiks tarbekaupade, toidu, ravimite ja kemikaalide pakendamisel (Ashter, 2016). Plastkottide eluiga on üsna lühike, keskmiselt kasutatakse neid 20 minutit kuni 1 aasta (Alam jt, 2018).

Plastist kilekotte valmistatakse taastumatute maavarade nagu nafta, maagaasi ja kivisöe kõrvalproduktidest. Kogu maailmas toodetud naftast kulub 4% ainult plastist kilekottide tootmiseks. Plastid koosnevad pikkadest polümeermolekulide ahelatest, millest kõige levinumaks kilekottide valmistamise puhul on polüetüleen (kõrge- ja madalatihedusega). (Muthu, Hu, Mok, 2009; Rajmohan, Ramya, Viswanathan, Varjani, 2019) Plastide tootmine on sõltuvuses nafta, maagaasi ja kivisöe kaevandamisest ning nendest toormaterjali valmistamisest. Nende taastumatute maavarade saadavuse vähenemise korral tekitab see probleeme samuti plasti tootmisele, kuna pole enam nii palju kõrvalprodukte, millest plaste toota. (Stevens, 2002) Plastist kilekottide valmistamisel kasutatakse erinevaid polümeere, mille puhul lisatakse koostisesse raskmetalle ja metallorgaanilisi ühendeid, et optimeerida selle koostist ning vähendada tootmise hinda. Need erinevad lisandid võivad plastist kilekottidest sattuda loodusesse päikesevalguse ja soojuse mõjul. (Alam jt, 2018)

Plastid jagunevad otstarbe järgi ehitus-, eri- ja laiatarbeplastideks. Koguseliselt moodustavad laiatarbeplastid 80% kõikidest plastidest. Plastpakenditest on kolmandik kõrgtihedast polüetüleenist, kolmandik madaltihedast polüetüleenist ja kolmandik teistest plastidest. Plasti jagunemist eri plastiliikideks iseloomustab tabel 1, lisas 1. Polüetüleentereftalaat (PET) on toormeks karastusjooji –ja toiduõlitaara, vee-, ketšupi- ja salatikastmepudelite, veekindlate pakendite ning samuti fliisi tootmisel. Kõrgtihedast polüetüleenist (HDPE) toodetakse gaseerimata jookide, toiduõli- ja mahlataarat,

kodukemikaalitaarat, pudelikorke, kilekotte ja mänguasju. Polüvinüülkloriid (PVC) on toormeks dreanaaži- ja kanalisatsioonitorude, kaabliisolatsiooni, aknaraamide, vihmaveetorude, toiduainealuste ja olmekemikaalipudelite tootmisel. Pakkekile, kile -ja prügikottide, pudelite ja torude tootmiseks kasutatakse toormena madaltihedat polüetüleen (LDPE). Polüpropüleenist (PP) toodetakse pudelikorke ja -silte, kuivainepurke, pakkekilet, filmilinti, võikarpe ning samuti kodumasinakeresid. Polüstüreen (PS) on toormeks kiirtoidupakendite, kodumasinakerede, topside ja ravimipurkide, samuti kaitseümbriste, soojustusmaterjali ja ühekordsete toidunõude tootmisel. Eristatakse ka muid plaste, mis koosnevad näiteks mitmest plastiliigist korruga ning millest valmistatakse mitmekihilisi pakendid ja eriplastist esemed. (Kriipsalu jt, 2016)

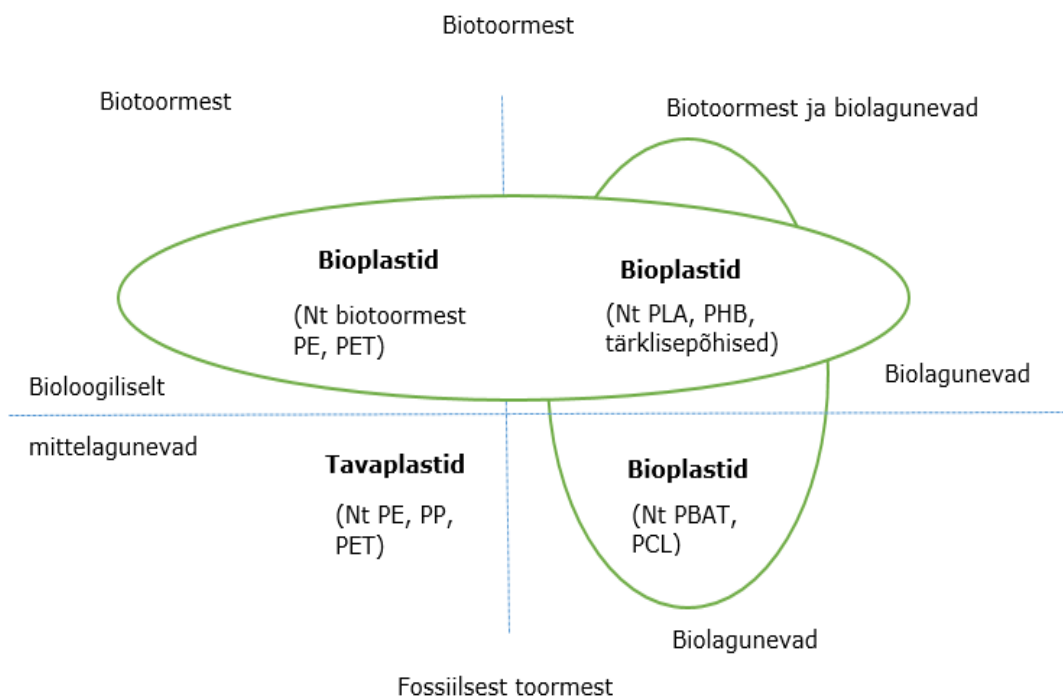
Plastist kilekotid lagunevad prügilasse ladestamisel 400-1000 aastat (Asmuni jt, 2015). Lagunemine toimub fotolagunemise käigus, mille puhul kott laguneb väiksemateks tükkideks. Plasti lagunedes looduskeskkonnas satuvad väikesed osakesed mulda ja vette ning omakorda mikroplasti kujul toiduahelasse. Plastist kilekotid põhjustavad igal aastal üle 100 000 merikilpkonna ja teiste mereloomade surma. (Plastic bag environmental impact, 2019)

Plastide puhul ohustavad keskkonda ja tervist nendes sisaldavad stabilisaatorid ja plastifikaatorid (Kriipsalu jt, 2016). Plastifikaatorid parandavad materjali elastsust ning töödeldavust. Nad on omaduselt kerge molekulaarkaaluga vedelikud või vaigud, mis suurendavad polümeeride ahelate vahel olevaid vahesid ning seeläbi vähendavad materjali jäikust. Plastifikaatorid peavad hästi ühilduma polümeeridega, näiteks taluma madalaid ja kõrgeid kuumuseid ning olema vastupidavad UV-kiirgusele. Plastifikatooritena kasutatakse laialt ftalaate, mis on estrite rühma kuuluvad kemikaalid. Neid kasutatakse tihti, kuna ftalaadid toodavad väga elastseid ühendeid, ühilduvad hästi teiste materjalidega ning samuti nende madala hinna tõttu. (Rahman ja Brazel, 2004) Stabilisaatorid muudavad plasti vastupidavamaks ja tugevamaks, et need ei laguneks kergelt. Stabilisaatoreid kasutatakse näiteks kuumakaitseks, et kuumuse mõjul materjal ei laguneks. Lisaks kasutatakse neid ka valguse ja ilmastiku eest vastupidavamaks muutmisel. (Hahladakis, Velis, Weber, Iacovidou, Purnell, 2018)

Plastifikaatorid võivad kahjustada hormonaalsüsteemi ning põhjustavad viljakuse vähenemist ja järeltulijate arenguhäireid. Tributüültina, mida kasutatakse stabilisaatori ja leegiaeglustina, on mürgine ning bioakumuleeruv ja looduses püsiv aine, mis põhjustab vastassootunnuste kujunemist ning väärarenguid. (Kriipsalu jt, 2016) Plastkotid ei ole ka visuaalselt looduskeskkonda sobivad. Samuti võivad need sattuda kanalisatsiooni ning tekitada seal ummistusi. (Moharam ja Maqtari, 2014)

1.2 Bioplastid

Bioplast on plast, mis on valmistatud biotoormest või/ja on biolagunev (joonis 1.1) (Karan jt, 2019). Joonisel 1.1 on näha bioplaste, mis on valmistatud biotoormest (biotoormest PE, PET), mis on valmistatud biotoormest ja on ka biolagunevad (PLA, PHB) ja biolagunevad plastid, mis on valmistatud fossiilsest toormest (PBAT, PCL). Biotoormest valmistatud plast on valmistatud osaliselt või täielikult biomassist, nagu näiteks maisist, suhkruroost või tselluloosist (European Bioplastics, 2020). Biolagunev plast laguneb täielikult bioloogilise aktiivsuse, eelkõige just mikroorganismide, kaasabil (Dilkes-Hoffman, Ashworth, Laycock, Pratt, Lant, 2019). Bioplaste on võimalik valmistada ka biomassist ja fossiilse toorme seguna. Sellisel juhul kasutatakse baasmaterjalina polüetüleeni või polüetüleentereftalaati. Materjali hulka lisatakse orgaanilist ainet, nagu näiteks tärklis või suhkrut. Mikroorganismid lagundavad orgaanilist ainet, ent plastitükid jäävad siiski loodusesse, kuna kogu materjal pole biolagunev. Lisaks aitab lagunemisele kaasa reaktsioon, mis tekib soojendamise ja UV-kiirguse mõjul. (Kriipsalu jt, 2016)



Joonis 1.1 Bioplastid plastisüsteemis (Ibid): PE on polüetüleen, PET polüetüleentereftalaat, PLA on polüpiimhappel põhinev plast, PHB on polü-3-hüdroksübutüraat, PP on polüpropüleen, PBAT on polübutüraat ja PCL on polükaprolaktoon

Bioplasti koostis sisaldab ühte või mitut biopolümeeri. Biopolümeerid on looduslikku päritolu ning neid toodavad taimed, loomad ja mikroorganismid läbi biokeemiliste reaktsioonide. (Stevens, 2002) Biopolümeeride hulka kuuluvad polüsahhariidid (nt tärklis), polünukleotiidid, tselluloos ja valgud ning nende derivaadid. Nendel polümeeridel põhinevad bioplastid lagunevad mikroorganismide – vetikate, bakterite ja seente toimel veeks, anorgaanilisteks ühenditeks, biomassiks ja süsinikdioksiidiks. (Kriipsalu jt, 2016) Biopolümeeride lagunemise tagavad lämmastiku või hapniku aatomite olemasolu polümeerides (Stevens, 2002). Biolagunevast materjalist tehtud toodete mõte ei ole asendada täielikult sünteetilisi plaste, aga pigem lühikese tarbimistsükliga pakendite ning toodete valmistamiseks (Kriipsalu jt, 2016).

Bioplastid aitavad vähendada keskkonnaprobleeme, mida tekitavad tavalisest plastist jäätmed. Bioplaste, mis on ka kompostitavad, on võimalik käidelda koos teiste orgaaniliste jäätmetega. Lisaks tekitavad probleemi keskkonda sattunud naftal baseeruvad kilekotid, mis ei lagune ning tekitavad ohtu loomadele, kes neid toiduga eksitavad. Bioplastist valmistatud kotid on mõeldud keskkonnas lagunema, mistõttu tekitaksid need vähem häiringuid kui tavalised kilekotid. Lisaks kui tavalised kilekotid määrduvad toidujäätmetega, siis pole neid võimalik enam taaskasutusse suunata, aga biolagunevast materjalist kilekotid saavad koos toidujäätmetega laguneda. Bioplastide kasutamine aitab vähendada fossiilsete kütuste kasutamist, kuna neid valmistatakse biomassist. Seetõttu aitab see vähendada fossiilsete kütuste mõju keskkonnale. Teisest küljest on bioplastidel ka negatiivseid külgi. Liigne bioplastidest kilekottide sattumine keskkonda mõjuda halvasti ümbritsevale. Bioplastid lagunevad küll looduslikult, aga siiski võivad need tekitada kahju, kui alles loodusesse satuvad, sest lagunemisprotsess võtab aega. Bioplastide tootmiseks kasutatava biotoorme kasvatamiseks on vaja maad, mida on vaja ka toidu kasvatamiseks, mistõttu tõstatab bioplastide tootmine ka eetilise küsimuse. (Gilbert ja Ricci, 2015)

1.3 Bioplastide sertifikaadid ja märgised

Kolm põhilist sertifitseerimisettevõtet on ISO (Rahvusvaheline Standardiorganisatsioon), CEN (Euroopa Standardikomitee) ja ASTM (Ameerika materjalide testimise ühing). Bioplastidel on märgised, et eristada neid tavalistest plastidest, kuna need võivad välimuselt väga sarnased olla. Märgiste abil on klientidel võimalik veenduda toote kvaliteedis ning see aitab kaasa hilisemale jäätmete õigele sorteerimisele, kui toote kasutusperiood on saanud läbi. (European bioplastics, 2016)

Materjali kompostitavuse näitamiseks on Euroopas olemas standardid EVS-EN 13432:2003 ja EVS-EN 14995:2007. Standard EVS-EN 13432:2003 on vastavuses

direktiiviga 94/96/EÜ, mis sätestab nõuded pakendi ja pakendijäätmete kohta (Batori jt, 2018). Standard käsitleb endas kompostimise ja biolagunemise teel taaskasutatavale pakendile nõudeid. Lisaks sisaldab see hindamiskriteeriumeid, et kuidas pakendit kõlblikuks tunnistada ning kuidas sobivust testida. (Eesti standardikeskus, 2003) Standard EVS-EN 14995:2007 on sarnane standardile EVS-EN 13432:2003, aga selle puhul laiendatakse kriteeriumeid ka laiemalt plastist valmistatud toodetele, kui seda ei kasutata ainult pakendina (European bioplastics, 2015).

Vastavalt Euroopa standardile EVS-EN 13432:2003/EVS-EN 14995:2007 peab pakend/plast vastama kindlatele kriteeriumitele (Ibid):

- materjali lagunemise määramine, mille jaoks on välja töötatud test EVS-EN 14045:2012. Testi puhul kompostitakse materjali koos orgaaniliste jäätmetega 3 kuud. Testi lõppedes ei tohi algmaterjalist alles olla rohkem kui 10 %;
- materjali biolagunemise toimumine mikroorganismide abil, mille tagajärjel muutub materjal CO₂-ks. Kontrollimiseks on välja töötatud test EVS-EN 14046:2003, mis nõuab, et 6 kuu jooksul peab lagunema vähemalt 90% testitavast materjalist;
- kompostimise jooksul ei tohi ilmned negatiivseid mõjusid;
- raskmetallide kontsentratsioon ei tohi ületada maksimaalseid lubatud suuruseid. Lisaks ei tohi raskmetallide kontsentratsioon mõjutada negatiivselt komposti kvaliteeti (ei tohi väheneda põllumajanduslik väärtus ning ei tohi olla ökotoksikoloogiline mõju taimede kasvule).

Materjali kompostitavuse näitamiseks on olemas *Seedling* märgis (joonis 1.2). Märgis näitab, et materjal on vastavuses EVS-EN 13432:2003 standardiga. Kompostimisjaamas on sobiv temperatuur, niiskus ning kindel ajaraamistik, mille möödudes laguneb materjal ning alles jääb vesi, biomass ja CO₂. *Seedling* märgiseid väljastavad eraldi sertifitseerimisettevõtted nagu DIN CERTO (Saksamaa ettevõtte) ja TÜV Austria. (European bioplastics, 2019)



compostable

Joonis 1.2 *Seedling* märgis (Ibid)

Materjali kompostitavuse näitamiseks kodustes tingimustes on olemas *OK compost HOME* märgis (joonis 1.3). Märgis ei seotud konkreetse standardiga vaid põhineb erivate standardite põhimõtetel. Märgise saamiseks peavad olema materjalil kindlad tehnilised omadused, mis tagavad selle kompostitavuse. (TÜV Austria, 2020) Märgise puhul peab materjal olema lagunenu vähemalt 90% ulatuses 12 kuu jooksul (European bioplastics, 2016).



Joonis 1.3 *OK compost HOME* märgis (TÜV Austria, 2020)

1.4 Bioplastide lagunemisviisid

Biolagunemine tähendab biokeemilist protsessi, mille käigus keskkonnas olevad mikroorganismid muudavad polümeerid veeks, süsinikdioksiidiks ja biomassiks. Lagunemise kiirus sõltub materjali koostisest ning tihedusest. Seetõttu ei pruugi pakendil olev biolaguneva toote märgi tähendada seda, et see on sobilik ka kompostimiseks või biogaasi jaamas käitlemiseks, kuna protsess võib aega võtta liiga kaua. (Gilbert ja Ricci, 2015) Euroopa Liidus kehtiv standard EVS-EN 13432:2003 sätestab, et tööstusliku kompostimise puhul peab 90% biolagunevast materjalist lagunema 90 päevaga. Seevastu USA-s kehtiv standard ASTM 6400 nõuab, et 180 päevaga peab lagunema ainult 60%. (Kriipsalu jt, 2016)

Bioplastide lagunemine võib toimuda fotolagunemise, mehaanilise lagunemise, kuumuse, oksü-lagunemise, vee või biolagunemise abil. Fotolagunemise käigus lisatakse materjali kiirgustundlikke ühendeid ning UV-kiirguse abil hakkab materjal lagunema. Mehaanilise lagunemise puhul kasutatakse löikejõudu, et vähendada plastide suurust. Kuumuse abil tekkiv energia aitab kaasa süsiniku oksüdeerumisele. Oksü-lagunemise käigus on ühendatud kuumuse abil lagunemine ning fotolagunemine. Lagunemine toimub hapniku abil. Vee abil lagunemise puhul on oluline hüdrofüülitavate ainete olemasolu materjalis nagu näiteks estrid, eetrid, anhüdriidid või amiidid. Need ained imenduvad keskkonnast niiskust, mistõttu võimaldavad nad polümeerahela lagunemist keemiliste ühendite või ensüümide abil. Biolagunemise puhul toimub lagunemine mikroorganismide toimetel. Protsessi mõjutab mikroorganismide hulk, mida omakorda mõjutab neid ümbritsev keskkond. (Krzan, Hemjinda, Miertus, Corti, Chiellini, 2006)

Biolagunemine saab olla aeroobne või anaeroobne (Batori jt, 2019). Täieliku aeroobse lagunemisprotsessi puhul laguneb materjal süsinikdioksiidiks ja veeks ning anaeroobse puhul laguneb materjal metaaniks ja veeks (Volova, Gladyshev, Trusova, Zhila, 2007). Aeroobse lagunemise all mõeldakse enamjaolt tööstuslikes tingimustes toimuvat kompostimist. Protsess toimub keskkonnas, kus hapniku sisaldus on kõrgem kui 6%. Protsessi käigus lagundavad mikroorganismid polümeere, mis on nende jaoks süsiniku ja energia allikaks. Protsessi käigus tekib süsinikdioksiid ning vesi ja põhilise osana kompost. Tööstuslik kompostimine toimub soojas (60°C-70°C) ja niiskes (umbes 60%) kontrollitud keskkonnas, kus keskkonna happesuspärmeeter on aluseline (ligikaudu 8,5). (Batori jt, 2019)

Anaeroobne biolagunemine tähendab lagunemist hapnikuta keskkonnas. Protsess toimub mesofiilses (37°C) või termofiilses (55°C) biogaasi jaamas. Orgaaniline aine muudetakse mikroorganismide abil biogaasiks, süsinikdioksiidiks, veeks, vesiniksulfiidiks, ammoniaagiks ja vesinikuks. Alles jäänud osa nimetatakse kääritusjäätisiks. (Ibid)

Bioplaste lagundavad mikroorganismid, kes suudavad lagundada orgaanilist ainet. Mikroorganismid omavad ensüüme, mis võimaldavad neil keskkonnas olevaid reoaineid kasutada söögina. Mikroorganismid on väga väikesed, mistõttu on neil lihtne kokku puutuda reoainetega. Nad saavad orgaanilise aine lagundamisest energiat ning saavad seeläbi paljuneda. (Devi jt, 2015) Lagunemise puhul on olulised plasti keemilised ja füüsikalised näitajad. Nendeks näitajateks on näiteks hüdrofiilsus või hüdrofoobsus, keemiline struktuur, elastsuskoeffitsient, molekulmass, molekulmassi jaotus materjalis, sulamistemperatuur, kristallilisus ja kristalliline struktuur. (Batori, 2019) Lisaks on

oluline osa ka keskkonnal, kus lagunemine toimub. Lagunemist mõjutavad näiteks temperatuur, niiskussisaldus, happesusparameetri väärtus ja hapniku sisaldus mullas. (Adamcovj ja Vaverkovj, 2014)

Temperatuur

Kõrgem temperatuur mõjutab hüdroolüüsi toimumise kiirust positiivselt, mistõttu aitab see kaasa ka mikroorganismide aktiivsemale tegevusele (Devi jt, 2015). Lisaks saavad ka mikroorganismid enda tegevusega temperatuuri mullas tõsta. Biolagunemine seiskub 0°C juures. On välja toodud, et kõige parem temperatuur biolagunemiseks keskkonnas on 20°C -25°C. (Naturally Occurring Biodegradation..., 2004)

Niiskussisaldus

Niiskus mõjutab polümeeride lagunemist, kuna vesi on vajalik mikroorganismide kasvamiseks ja paljunemiseks. Seetõttu aitab piisav niiskus suurendada lagunemise kiirust, sest aitab kaasa mikroobide tegevusele. Lisaks toimub vee toimel hüdroolüüs, mis aitab samuti kiirendada polümeeride lagunemist. (Ahmed jt, 2018) Niiskussisaldus mõjutab ka mulla õhustatust ning pH-d. Optimaalne niiskussisaldus biolagunemiseks on 50-80%. (Naturally Occurring Biodegradation..., 2004)

Happesuseparameeter

Hüdroolüüsi toimumise kiirust mõjutab ka happesuseparameetri ehk pH tase, mis näitab kui aluseline või happeline on keskkond (Ahmed jt, 2018). Mulla pH on indikaatoriks vesinikioonide aktiivsusele. Biolagunemise puhul on pH sobilikus vahemikuks 5 kuni 9, aga kõige optimaalsemaks peetakse lagunemist, kui pH on vahemikus 6,5 kuni 8,5. (Naturally Occurring Biodegradation..., 2004)

Hapniku sisaldus

Paljude mikroorganismide jaoks on hapniku sisaldus mullas tähtis, kuna hapnik toimib metabolismis kui elektronide vastuvõtjana, mis aitab toota energiat. Hapniku sisaldus peab olema mikroorganismide jaoks vähemalt 0,2 mg/l. Hapnik levib mulda atmosfäärist. Mullapooride veega täitumise puhul, raskendab see õhu liikumist mullas. Vahepeal tarbitakse hapnik ära kiiremini, kui see jõuab uuesti mulda. Sellisel juhul võib muld muutuda anaeroobseks. Suurema koguse orgaanilise aine puhul saavad rohkem mikroorganismid levida ja paljuneda, mis võib omakorda kaasa tuua selle, et mikroorganismid võivad kõik hapniku mullast ära kasutada. Hapniku sisaldust leitakse mullaveest, aga ka mullagaasist. Mullagaasi puhul peab vähemalt 10% mullapooridest

täidetud olema hapnikuga, et lagunemine oleks optimaalne. (Naturally Occurring Biodegradation..., 2004)

1.5 Levinumad bioplastidest valmistatud kilekottide materjalid

Levinumateks materjalideks on tähtselt põhinevad plastid, glükoosist või pilliroosuhkrust toodetav polülaktiidil põhinev plast PLA, bakterite abil tähtselt või glükoosist toodetud polüester polü-3-hüdroksübutüraat PHB, looduslikest õlidest toodetav polüamiid PA 11, bioetanoolist valmistatud polüetüleen ning erinevatest orgaanilistest ainetest toodetav polühüdroksüalkonaat PHA. Lisaks segatakse bioplastide omaduste parandamiseks nende koostisesse erinevaid polüestereid nagu polübutüraati (PBAT) ja polükaprolaktooni (PCL). (Kriipsalu jt, 2016)

Tähtselt on laialt levinud polüsahhariid taimedes. Tähtselt on võimalik toota suurtes kogustes ning madala hinnaga, ent materjal on oma omadustelt õrn. Tähtselt on niiskustundlik ning lisaks on materjalil halb mehaaniline vastupidavus ning see võib kergesti puruneda. Peale selle on tähtselt põhinevatel plastidel kehvad töötlemisvõimalused, kuna see laguneb madalal kuumusel. Materjali omaduste parandamiseks lisatakse tähtselt juurde erinevaid plastifikaatoreid, et toode oleks vastupidavam. (Zhong, Godwin, Jin, Xiao, 2020)

PLA on biolagunev polüester, mis on saadud kääritamise teel piimhappest näiteks suhkruroost või maisist. Võrreldes PHA materjaliga on PLA puhul parem kuumusetaluvus, mis võimaldab kasutada erinevaid töötlemise vorme nagu survevalu, puhumisvormimine, termovormimine jne. Materjalil on keskmine vee ja hapniku läbilaskevõime ning see on omadustelt sarnane polüstüreeniga. (Ibid) Materjali kasutatakse enamjaolt toidu pakendamisel, nagu näiteks kommipaberid, veepudelid ja topsid. PLA on biopolümeeridest kõige tugevamate mehaaniliste omadustega ning kuumus- ja taluvusega. (Bajpai, 2019)

PHB on kõige levinum polühüdroksüalkonaatidest. Materjal on kõrge kristallilisusega ning see võib ulatuda kuni 70%-ni. Materjal on biolagunev ning see sobib hästi ka toidu pakendamiseks. Materjalil on hea lõhnabarjäär ja niiskuskaitse omadused, et kaitsta toitu pakendis. PHB sulamistemperatuur on sarnane PLA omaga, mis võimaldab neid materjale omavahel kokku sulatada ning teha komposiitmaterjal, millel oleksid veelgi paremad omadused. PHB puuduseks on selle halvad mehaanilised omadused nagu vastupidavus kuumusele materjali töötlemise käigus, materjali rabedus ning mitte

piisavalt küllaldased barjääriomaduse. Seetõttu katsetatakse erinevate materjalide kokkusegamist, et luua vastupidavamate omadustega materjali. (Zhong jt, 2020)

Polüamiid (PA) 11 on tehнопolümeer, mis on sünteesitud riitsinuseõlist. Materjal on poolkristalliline ning sellel on väike CO₂ emissioon ning globaalse soojenemise potentsiaal võrreldes teiste naftabaasil toodetud polümeeridega. Materjal on vastupidav kulumisele, hea keemilise vastupidavusega, hea vastupidavusega kuumusele ja väikese erikaaluga. Materjali on hea töödelda ning suudab säilitada enda omadusi erinevates keskkondades ning erinevate temperatuuride juures. Materjali heade omaduste tõttu, leiab see kasutust erinevates valdkondades nagu torude tootmisel, lumelaudade tootmisel, suuskade tootmisel ja voolikute tootmisel. Teisest küljest on PA 11 võrdluses teiste plastmaterjalidega kallis. (Patel, Ruehle, Dorgan, Halley, Martin, 2013)

Bioetanoolist valmistatud polüetüleen ei ole biolagunev materjal, aga seda on võimalik taaskasutada. Bioetanooli valmistamiseks kasutatakse suhkruroogu. Kääritamise teel saadud etanool dehüdrateeritakse ning seeläbi saadakse etüleen. Peale suhkruroo on võimalik etanooli valmistada samuti kääritamise abil ka suhkrupeedist, maisist ning puidust. Bioetanoolist valmistatud polüetüleen on enda keemiliste ja füüsikaliste omadustelt sarnane naftabaasil valmistatud polüetüleenile. Materjali kasutatakse näiteks pakendamiseks, põllumajanduses ja erinevate tarbeesemete valmistamiseks. (Bajpai, 2019)

PHA on biopolüestrite grupp, mis on erinevate mikroorganismide poolt sünteesitud ning materjal on biolagunev. PHAd on mittemürgised ning bioühilduvad polüestrid, mis sobivad asendama naftabaasil plaste. PHAd on materjalina termoplastid ning neid on võimalik sünteesida tavaliste sulatamisprotsesside abil. Omadused sõltuvad PHA keemilisest koostisest ning materjal võib olla habras või paindlik. Võrreldes PLAgaga on materjal vastupidav UV-kiirgusele. Materjali kristallilisus võib ulatuda 70%-ni. (Tarrahia, Fathi, Seydibeyoğlu, Doustkhah, Khataee, 2019)

PBAT on kopolüester, mis on omadustelt sarnane LDPE materjaliga. Materjal on fossiilset päritolu, ent sellele otsitakse võimalusi ka biomassist valmistamiseks. Materjal saadakse adipiinhappe, 1-4 butaadioli ja dimetüül tereftalaadi kopolümerisatsiooni käigus. Lagunemine toimub ensüümide abil, mis lõhustavad materjali. Materjalist toodetakse näiteks pakendamise kilet ja kilekotte. PBAT on materjalina küll elastne ja sitke, aga siiski pole see piisavalt tugev, et sellest saaks pikaajalisemaks kasutamiseks mõeldud tooteid toota. Seetõttu segatakse seda teiste materjalidega nagu näiteks PLA-ga ja tärglisega, et parandada nende omadusi. (Zhao, Cornish, Vodovotz, 2020)

PCL on biolagunev polüester. Materjal võib laguneda paari kuu kuni mõne aasta jooksul. Lagunemine sõltub ümbritsevatest tingimustest, molekulmassist ja kristallilisuse astmest. Materjalil on võime kergesti seguneda teiste erinevate polümeeridega. Antud bioplasti kasutatakse pakkematerjalide valmistamisel ning lisaks näiteks mikroelektronikas, meditsiinis ja liimainete valmistamisel. (Labet ja Thielemans, 2009) Materjali kasutatakse tihti teiste materjalide (näiteks tärklise) omaduste parandamiseks. PCL on vastupidav veele, mistõttu aitab see parandada tärklise niiskustundlikust. Lisaks aitab PCL parandada tärklise töödeldavust ning vähendab materjali jäikust. (Liu, Koranteng, Wu, Xiao, Wu, 2017)

1.6 Tselluloos

Tselluloos on kõige levinum biopolümeer looduses ning seda leidub taimede rakukestas. See täidab struktuurset rolli, andes taimetele tugevuse. (Gupta jt, 2018) Tselluloos, valemiga $(C_6H_{10}O_5)_n$, on D-glükoosi lineaarne polümeer ning on seotud omavahel β -1-4 glükosiidsete sidemetega (Mohamed jt, 2017). Valemis olev n näitab polümerisatsiooniastet ehk ahela pikkust. See võib puidu puhul olla näiteks 300-700 ning puuvilla puhul 800-10 000. (Klemm, Heublein, Fink, Bohn, 2005) Tselluloosi võib leida erinevates taimedes nagu näiteks puuvill ja riis ning lisaks on võimalik saada seda bakterite abil. Tegu on taastuva loodusliku polümeeriga, mistõttu peetakse seda heaks alternatiivseks naftabaasil polümeeridele. (Mohamed jt, 2017)

Tselluloos leidub taimerakkudes koos hemitselluloosi ning ligniiniga. Tselluloosi on võimalik ka sünteesida erinevatest vetikatest ja seentest. Mitmed bakterid on võimelised sünteesima bakteriaalset tselluloosi süsivesikutest nagu glükoosist. Lisaks on olemas ka sünteetiline tselluloos, mille puhul on kiud eraldatud looduslikust tselluloosist. Sünteetilisest tselluloosist on näiteks viskoos, atsetaadist kangas ja lyocell kangas. Tselluloosi on võimalik leida ka loomade taimerakkudes. (Gopi, Balakrishnan, Chandradhara, Poovathankandy, Thomas, 2019)

Tselluloosist materjale kasutatakse erinevates valdkondades nagu näiteks puitmaterjali ehitussektoris ning paberitööstuses; puuvilla, rayoni ja lina tekstiilitööstuses; atsetaadist kangas kilede tootmisel ning nitrotselluloosi lõhkeainete tootmisel. Toiduainetööstuses kasutatakse seda näiteks tekstuuri andmisel, emulgaatorina ja rasva asendajana. (Lavanya jt, 2011)

Tselluloos ei lagune vees, vaid orgaanilistes lahustes. Tselluloosi molekulid reageerivad tugevalt leeliseliste ainetega. Vastavalt tselluloosi reageerivusele leelistega, jaguneb tselluloos kolme gruppi: alfa-, beeta- ja gamma-tselluloos. Jagunemine sõltub

lahustumises 17,5%-lises NaOH lahuses. (Gopi jt, 2019) Tselluloos laguneb hüdrolüütilise tsellulaasi ensüümi abil, mida osad mikroorganismid suudavad eritada. Ensüümidega rünnatakse tselluloosi struktuuri ning seeläbi saab toimuda materjali lagunemine. (Beguin, 1990)

2. MATERJAL JA METOODIKA

2.1 Proovialade kirjeldus

Katse läbiviimiseks valiti kolm erinevat tüüpi keskkonda: heinamaa, lodu ja mets. Proovialad valiti selliselt, et võrrelda kilekottide lagunemist erinevate keskkonnatingimustega aladel. Proovialad paiknesid (joonis 2.1) Elia talu krundil, Odivere külas, Mustvee vallas, Jõgeva maakonnas. Üleval vasakus nurgas asus lodu prooviala, taluhoone juures asus heinamaa prooviala ning all paremal asus metsa prooviala.



Joonis 2.1 Proovialade paiknemine kaardil (möötkava 1:2402) (Maa-ameti geoportaal, 2020)

2.2 Lagunemisekatse materjal

Autor kasutas katse läbiviimiseks viie erineva tootja kilekotti. Nendest neli olid bioplastidest valmistatud (COOP, Prisma, Rainbow BL ja McLean) ning üks naftapõhine (Rainbow PE). Kõik neli olid vastavuses standardiga EVS-EN 13432:2003, mis nõuab, et tööstusliku kompostimise puhul peab 90 päeva jooksul lagunema vähemalt 90% biolagunevast materjalist. COOPi puhul oli kilekoti peal *OK Home compost* märgis, mis näitab, et materjal laguneb ka kodustes kompostimistingimustes. Prisma kotil oli

Seedling märgis (kompostitav materjal) ning *OK Home compost* märgis. Rainbow kilekotile oli trükitud peale, et tegu on 100% biolaguneva ja kompostitava materjaliga. McLeani kilekoti puhul oli välja toodud, et see peaks lagunema 10-45 päeva jooksul tööstuslikus kompostimises. Illustratiivne materjal katseks kasutatud kilekottidest asub lisas 2, joonis 1.

2.3 Lagunemiskatse meetodika

Kilekottide lagunemise uurimiseks kasutas autor lagunemiskottide meetodit (*litter-bag*). Igast kilekotist lõigati 60 katsetükki suurusega 5x5 cm ning õmmeldi need võrkottidesse suurusega 7x7 cm (võrgu silma suurus 2 mm²). Seejärel kinnitati kottidesse pandud katsetükid klambritega heinapallinööri külge. Igal proovialal olid ühe liigi kotid ühe nõõri küljes. Katse toimus vahemikus 26.06.2019 kuni 05.05.2020 ning kõikidel välitöödel võeti korraga üles kolm katsetükki igast kilekotivariandist. Lisaks võeti üles ka alfa-tselluloosi katsetükke. Välitöödel käidi 2019. aastal augustis, septembris, oktoobri alguses ning oktoobri lõpus. Samuti teostas autor välitöid 2020. aasta maikuu alguses. Materjalide puhul uuriti nende massikadu ning kaalumised teostati Tallinna Tehnikaülikooli Tartu Kolledži laboris autori poolt. Saadud tulemusi analüüsiti programmiga Excel 2016.

2.4 Analüüside meetodika

Analüüsid teostati Tallinna Tehnikaülikooli Tartu Kolledži laboris töö autori poolt. Analüüsitavateks näitajateks olid mulla happesusparameeter, elektrijuhtivus, kuivaine sisaldus, mikroobide hingamisaktiivsus (BA) ja mikroobne biomass (SIR). Saadud tulemusi analüüsiti programmiga Excel 2016.

Happesusparameeter

Mullaproovide happesusparameetri mõõtmiseks kaalus autor igasse kolbi 10 g mulda ning sellele lisati 50 ml destilleeritud vett. Seejärel segu loksutati ning kolb suleti fooliumiga ja jäeti ööpäevaks toetemperatuurile. Järgmisel päeval mõõdeti tulemused kasutades multimeetrit *WTW Multi 340i* ja elektroodi *SenTix 41*.

Elektrijuhtivus

Elektrijuhtivuse analüüsiks kasutas autor samu proove, millest analüüsiti happesuseparameetrit. Elektrijuhtivuse määramiseks kasutati multimeetrit *WTW Multi 340i* ning elektroodi *TetraCon 325*.

Kuivaine sisaldus

Muldade kuivaine sisalduse määramiseks kasutas töö autor massikao meetodit. Esmalt kaaluti tühjad tiigid ning seejärel lisati nendesse 10 g mulda. Seejärel asetati tiigid kuivatuskappi *Memmert 100-800*, kus kuivatati proove 105°C juures 24 tundi. Peale seda kaaluti proovid uuesti koos tiigluga ning arvutati välja kuivaine sisaldus.

Arvutamiseks kasutas töö autor järgnevaid valemeid (Schinner, Öhlinger, Kandeler, Margesin, 1996):

$$N = \frac{a - p}{p} \times 100 \quad (2.1)$$

$$KA = 100 - N, \quad (2.2)$$

kus,

N – proovi niiskusesisaldus, %;

KA – proovi kuivainesisaldus, %;

p – proovi mass enne kuivatamist, g;

a – proovi mass pärast kuivatamist, g.

Mikroobikoosluse basaalne hingamisaktiivsus

Hingamisaktiivsuse määramiseks kasutati OxiTop® manomeetrilist mõõtmisüsteemi, mis vastab rahvusvahelistele standardmeetoditele. (Reuschenbach, Pagga, Strotmann, 2003)

Analüüsiks kaalus autor igast proovist 100 g mulda, mis asetati liitristesse mõõteanumatesse ning absorvendina kasutati natroonlupja. Seejärel suleti mõõteanumad klambritega, monteeriti mõõtepead külge ning proovid pandi seisma 96 tunniks 25°C temperatuuri juurde. Mõõteanumates toimuvat fikseerivad spetsiaalsed mõõtepead, mis jälgivad hapniku tarbimisest tingitud rõhu langust. Tulemused kanti peale 96 tundi *ACHAT OC* tarkvara kasutades arvutisse.

Hapnikutarve arvutamiseks kasutati järgnevat valemit (Platen, Witz, 1999):

$$BA = \frac{M_R(O_2)}{R \times T} \times \frac{V_{\text{õhk}}}{m_{Bt}} \times \Delta p, \quad (2.3)$$

kus,

BA - hapnikutarve, mg O₂/kg KA;

M_R(O₂) – hapniku molaarmass, 32 000 mg/mol;

R – universaalne gaasikonstant, 83,14 L×mbar/mol⁻¹×K⁻¹;

T – mõõtmistemperatuur kelvinites (K);

V_{õhk} – õhu ruumala mõõtmisanumas, liitrites (l);

M_{Bt} – kuivaine mass mõõtmisüsteemis, kg KA;

Δ_p – rõhu langus mõõtmisüsteemis, mbar (1 mbar = 1hPa).

Mõõtmisanumas oleva õhu ruumala arvutati, kasutades järgnevat valemit (O'Malley, 2006):

$$V_{\text{õhk}} = V_{\text{üld}} - V_{\text{pinnas}}, \quad (2.4)$$

kus,

V_{õhk} – õhu ruumala mõõtmisanumas, l;

V_{üld} – mõõtmisanuma üldruumala, l;

V_{pinnas} – pinnaseproovi ruumala, l.

Mikroobne biomass

Mikroobide biomassi hindamise aluseks kasutas autor substraadi poolt indutseeritud hingamise (SIR) meetodit. Antud metoodika põhineb eeldusel, et glükoosi lisamisel on maksimaalne hapniku tarbimine mikroorganismide poolt proportsionaalne nende biomassiga. (Schinner jt, 1996)

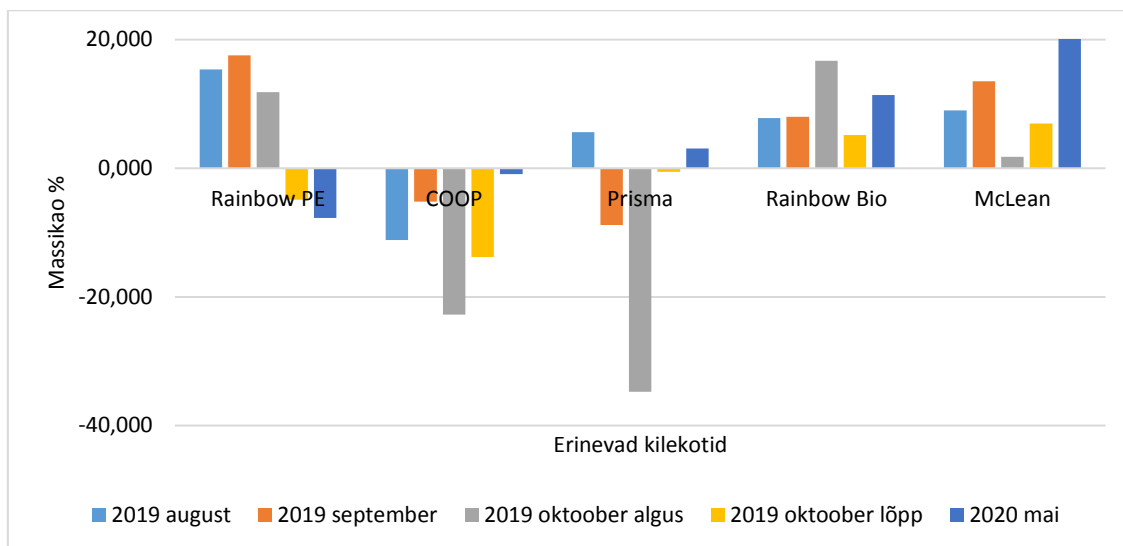
Analüüsiks kaaluti igast mullaproovist 50 grammi mulda ning lisati sinna 0,25 grammi glükoosi. Peale seda segati proovid korralikult, mõõteanumad suleti klambritega, mõõtepead monteeriti külge ning proovid pandi 24 tunniks 22°C juurde.

Mikroobide biomassi süsiniksisalduse arvutamiseks kasutati järgnevat seost:

$$1 \text{ mgO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ h}^{-1} = 28 \text{ mg biomass Cg}^{-1} \quad (2.5)$$

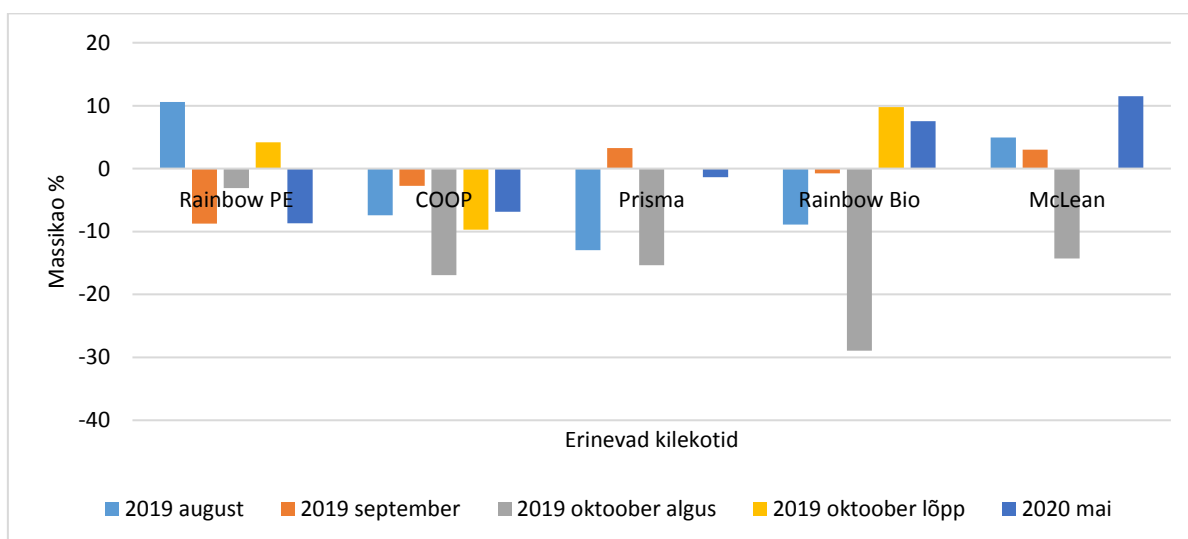
3. TULEMUSED

3.1 Massikadu



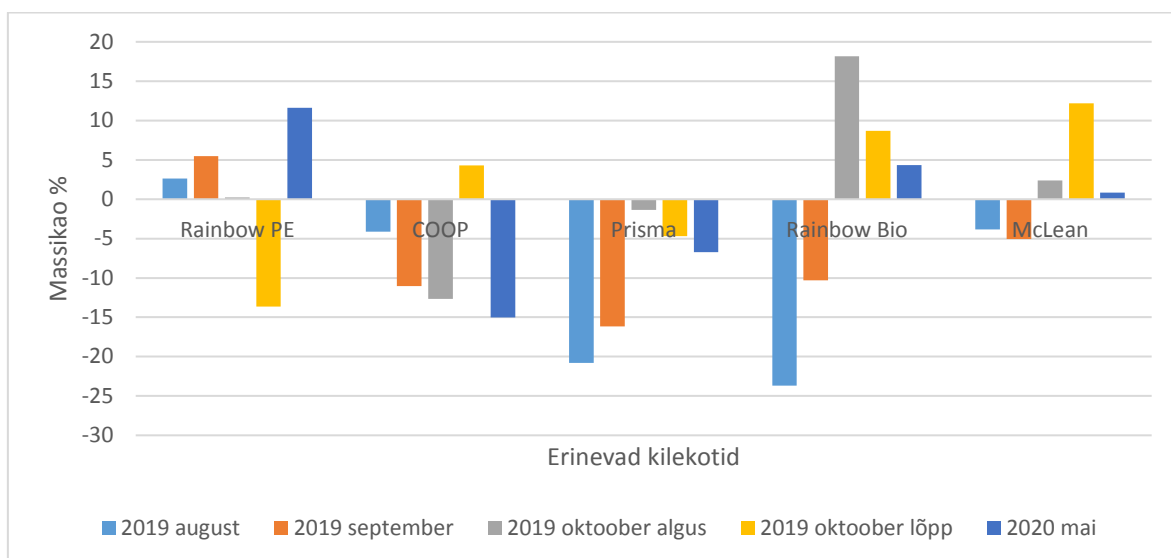
Joonis 3.1 Protsentuaalne massikadu heinamaal

Heinamaal oli biolagunevatest kilekottidest kõige suurem massikadu (joonis 3.1) Rainbow Bio ning McLeani katsetükkidel. Coopi ning Prisma katsetükkide puhul oli mass mitmel kuul protsentuaalselt tõusnud võrreldes algkaaluga. Lagunemiskatse lõpus oli Rainbow PE mass tõusnud 7,7%, COOPi mass tõusnud 0,9%, Prisma mass vähenenud 3,1%, Rainbow Bio mass vähenenud 11,4% ning McLeani mass vähenenud 23,7%. McLeani katsetüki lagunemine on visuaalselt näidatud joonisel 2, lisas 3 ning Rainbow PE katsetüki lagunemine on visuaalselt näidatud joonisel 3, lisas 4.



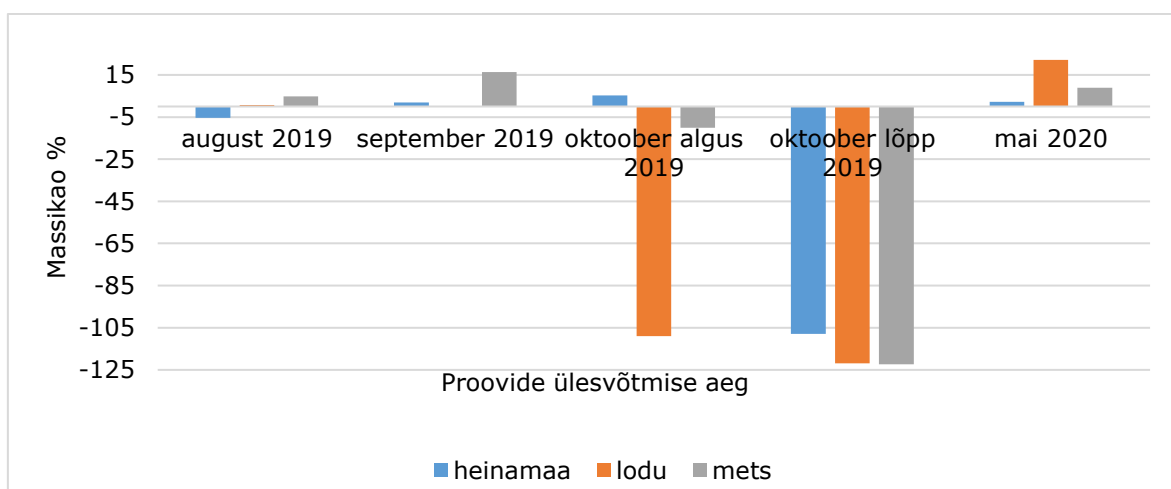
Joonis 3.2 Protsentuaalne massikadu lodus

Lodus oli biolagunevatest kilekottidest kõige suurem massikadu (joonis 3.2) samuti Rainbow Bio ning McLeani katsetükkidel. Coopi puhul oli igal kuul mass tõusnud ning samuti ka Prisma, Rainbow Bio ning McLeani puhul tõusis mass osade kuude vältel. Oktoobri lõpus oli Prisma mass suurenenud 0,01% ning McLeanil 0,05% ning väikeste tulemuste tõttu, ei kajastu need joonisel. Lagunemiskatse lõpus oli Rainbow PE mass tõusnud 8,7%, COOPi mass tõusnud 6,8%, Prisma mass tõusnud 1,4%, Rainbow Bio mass vähenenud 7,5% ning McLeani mass vähenenud 11,5%.



Joonis 3.3 Protsentuaalne massikadu metsas

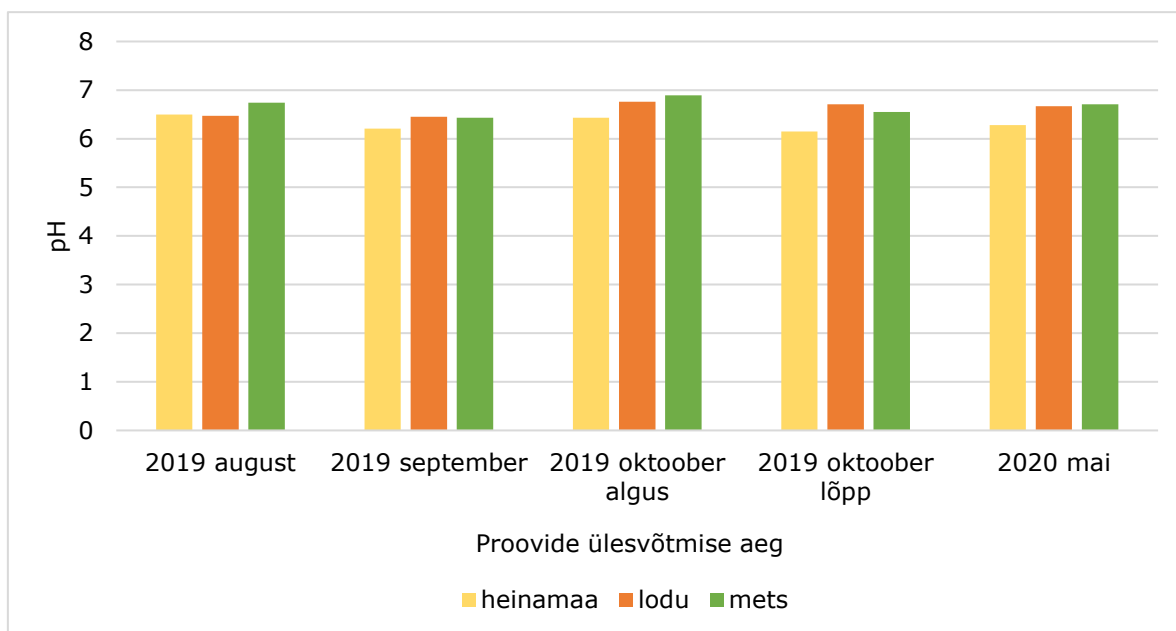
Biolagunevatest kilekottidest oli massikadu metsas (joonis 3.3) kõige suurem Rainbow Bio ning McLeani katsetükkidel. Prisma puhul oli mass ainult suurenenud ning samuti Coopi puhul enamikel kuudel. Lagunemiskatse lõpus võrreldes algkaaluga oli Rainbow PE mass tõusnud 11,6%, COOPi mass tõusnud 15%, Prisma mass tõusnud 6,7%, Rainbow Bio mass vähenenud 4,3% ning McLeani mass vähenenud 0,8%



Joonis 3.4 protsentuaalne α -tselluloosi lagunemine proovialadel

Kõige suurem oli on α -tselluloosi massikadu (joonis 3.4) lodus ja metsas. Kõige suurem massikadu registreeriti proovitükil, mis lagunes lodu tingimustes. Oktoobrikuu vältel on katsetükkide mass protsentuaalselt tõusnud nii heinamaal, lodus kui ka metsas. Katse lõppedes oli materjal massikadu heinamaal 2,2%, lodus 22,2% ja metsas 8,8%. Alfa-tselluloosi massikadu metsa katsekohas on visuaalselt toodud ka joonisel 4, lisas 5.

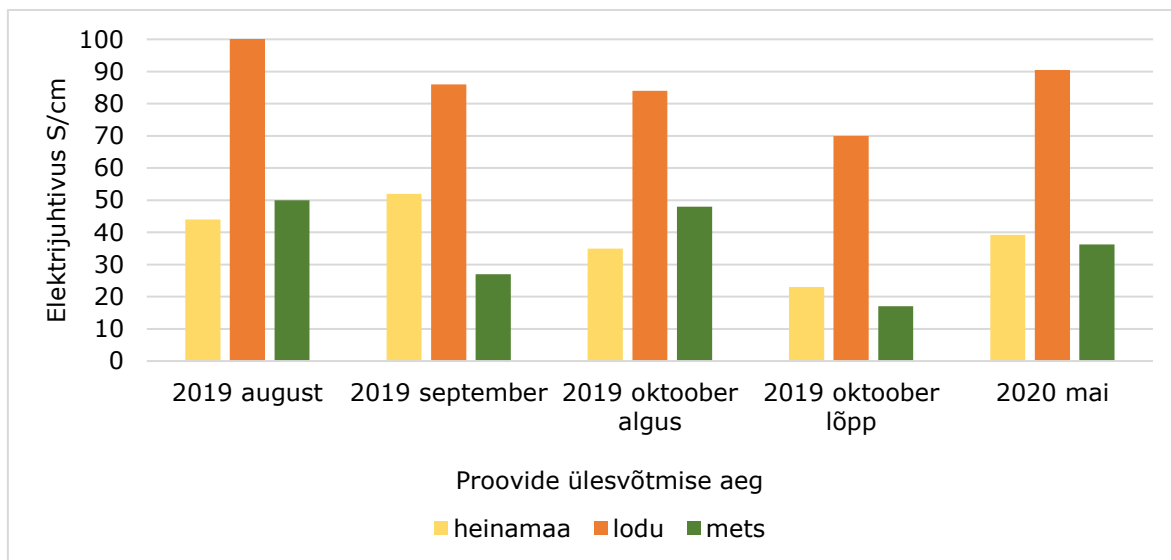
3.2 Happesuseparameeter



Joonis 3.5 Mulla happesuseparameetri tase erinevatel katsealadel

Mulla happesuseparameeter (pH) tase (joonis 3.5) oli erinevates proovikohtades üsna sarnane, jäädes vahemikku 6,15 kuni 6,89. Kõige madalam happesuseparameetri väärtus (6,15) mõõdeti 2019. aasta oktoobri lõpus heinamaal. Kõige kõrgem happesuseparameetri väärtus (6,89) registreeriti 2019. aasta oktoobri lõpus metsas. Heinamaa keskmine pH tase oli $6,3 \pm 0,07$, lodu keskmine pH tase oli $6,6 \pm 0,06$ ning metsa keskmine pH tase oli $6,7 \pm 0,08$.

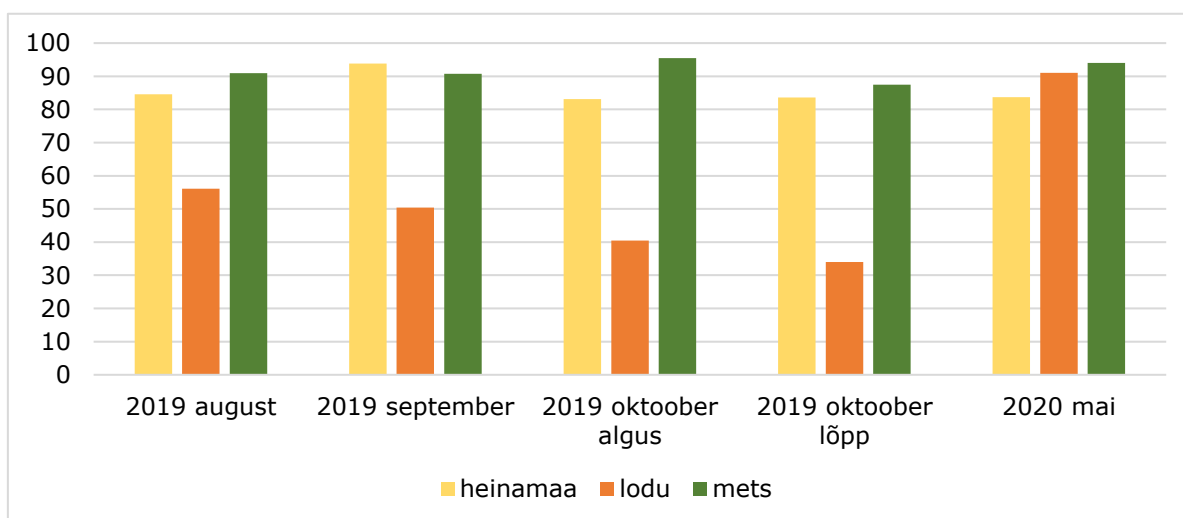
3.3 Elektrijuhtivus



Joonis 3.6 Elektrijuhtivus erinevatel katsealadel, $\mu\text{S}/\text{cm}$

Elektrijuhtivus (joonis 3.6) jäi erinevatel proovivõttudel vahemikku $17 \mu\text{S}/\text{cm}$ kuni $110 \mu\text{S}/\text{cm}$. Kõige madalam elektrijuhtivus ($17 \mu\text{S}/\text{cm}$) mõõdeti 2019. aasta oktoobri lõpus metsast kogutud substraadil ning kõige kõrgem elektrijuhtivus ($110 \mu\text{S}/\text{cm}$) mõõdeti 2019. aasta augustis lodus kogutud substraadil. Keskmine elektrijuhtivus heinamaal oli $38,6 \pm 4,8 \mu\text{S}/\text{cm}$, lodus $88,1 \pm 6,5 \mu\text{S}/\text{cm}$ ning metsas $35,6 \pm 6,3 \mu\text{S}/\text{cm}$.

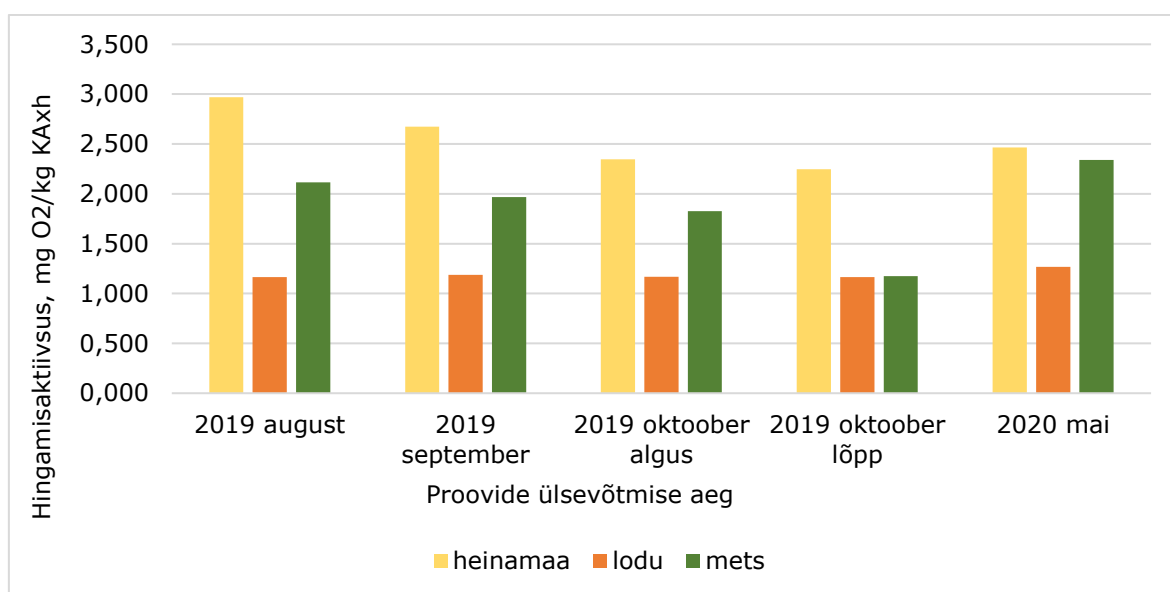
3.3 Kuivaine sisaldus



Joonis 3.7 Kuivaine sisaldus, %

Kuivaine sisalduse (joonis 3.7) tulemused varieerusid vahemikus 34% kuni 95,5%. Tulemustes kajastub, et vahemikus 2019. aasta august kuni 2019. aasta oktoobri lõpp on lodus võrreldes teiste katsekohtadega märgatavalt väiksem kuivaine sisaldus, ent 2020. aasta mais on kõikides katsekohtades kuivaine sisaldus sarnane. Kõige madalam kuivaine sisaldus oli 2019. aasta oktoobri lõpus lodus (34%) ning kõige kõrgem kuivaine sisaldus oli 2019. aasta oktoobri alguses metsas (95,5%).

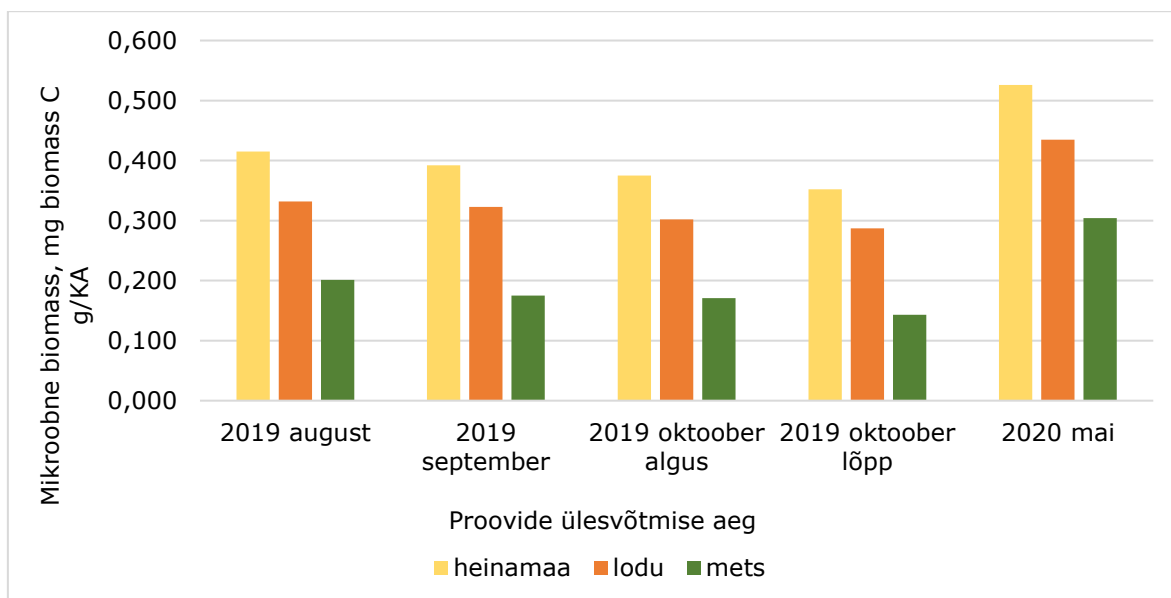
3.4 Mikroobikoosluse hingamisaktiivsus



Joonis 3.8 Mikroobikoosluse hingamisaktiivsus, (mg O₂/kg KA*h)

Mikroobikoosluse hingamisaktiivsuse (joonis 3.8) tulemused jäid vahemikku 1,2 mg O₂/kg KA*h kuni 2,97 mg O₂/kg KA*h. Kõige madalam tulemus saadi 2019. aasta oktoobri lõpus lodus (1,2 mg O₂/kg KA*h) ning kõige kõrgem tulemus 2019. aasta augustis heinamaal (2,97 mg O₂/kg KA*h). Keskmise hingamisaktiivsus heinamaal oli 2,5±0,1 mg O₂/kg KA*h, lodus 1,2±0,02 mg O₂/kg KA*h ja metsas 1,9±0,2 mg O₂/kg KA*h.

3.5 Mikroobne biomass



Joonis 3.9 Mikroobne biomass, mg biomass C g/KA

Mikroobne biomass (joonis 3.9) oli kõige madalam metsas ning kõige kõrgem heinamaal. Kõige kõrgem tulemus oli 2020. aasta mais heinamaal (0,5 mg biomass C g/KA) ning madalaim 2019. aasta oktoobri lõpus metsas (0,143 mg biomass C g/KA). Keskmise mikroobne biomass oli heinamaal $0,4 \pm 0,03$ mg biomass C g/KA, lodus $0,3 \pm 0,03$ mg biomass C g/KA ja metsas $0,2 \pm 0,03$ mg biomass C g/KA.

4. ARUTELU

Materjali lagunemise kiirus sõltub lagundatava materjali koostisest ning ka selle tihedusest (Gilbert ja Ricci, 2015). Lisaks on väga tähtsal kohal keskkonnatingimused, kus lagunemine toimub. Olulisteks teguriteks on temperatuur, niiskussisaldus, happesuseparameeter ning hapniku sisaldus. (Adamcovj ja Vaverkovj, 2014) Materjali lagundavad mikroorganismid, kelle hulk sõltubki neid ümbritsevatest keskkonnatingimustest (Devi jt, 2015).

Käesoleva töö raames uuriti massikadu heinamaal, lodus ja metsas ning analüüsiti proovikohtade mulda, et leida seoseid lagunemise kiiruse ja ümbritsevate tingimuste vahel. Saadud tulemused varieerusid erinevate kuude jooksul, mida võib autori arvates seostada ilmastikutingimuste muutustega, kuna katseperiood oli vahemikus 2019. aasta juuni kuni 2020. aasta mai.

Bioplastist kilekottide lagunemist uurides selgus, et katseperioodi jooksul oli kõige suurem massikadu heinamaal. Heinamaal oli kõikide kuude jooksul peale 2019. aasta augusti kõige väiksem pH ning samuti oli elektrijuhtivus olnud mitmel kuul kõige madalam. Kuivaine sisaldus oli enamikel kuudel heinamaal võrreldes teiste katsekohtadega keskmine (lodus valdavalt madalam ja metsas valdavalt kõrgem). Heinamaal oli kõige suurem mikroobikoosluse hingamisaktiivsus ning mikroobne biomass. Mikroobne biomass näitab, kui palju on mikroorganisme mullas (Richter jt, 2018). Mikroobikoosluse hingamisaktiivsus näitab, et milline on mikroorganismide potentsiaalne aktiivsus mullas (Ibid). Kõige suuremat massikadu heinamaal saab seostada kõige suurema mikroobikoosluse hingamisaktiivsusega ning mikroobse biomassiga võrreldes teiste katsekohtadega. Mikroorganismid lagundavadki materjali ning kõige arvukama ja aktiivsema mikroobikoosluse tõttu heinamaal saab seostada kõige kiiremat lagunemisprotsessi.

Happesuseparameeter ehk pH on oluline näitaja lagunemisekiiruse puhul. Kirjanduse ülevaates on välja toodud, et biolagunemise puhul on pH sobilikus vahemikuks 5 kuni 9, aga kõige optimaalsemaks peetakse lagunemist, kui pH on vahemikus 6,5 kuni 8,5. (Naturally Occurring Biodegradation..., 2004) Mulla keskmine pH jäi kõikides proovivõtukohtades vahemikku 6,3-6,7, mis näitab, et tegu on kergelt happeliste muldadega. Saadud tulemused jäävad kõik biolagunemise jaoks sobivasse vahemikku. Sarnaste tulemuste tõttu heinamaal, lodus ja metsas ei saa aga välja tuua, et pH oleks olnud oluline mõjutaja lagunemisprotsessi puhul.

Elektrijuhtivus on sõltuvuses mulla soolsusest. Varasemates uuringutes on leitud, et suurem soolsus mullas vähendab mikroorganismide aktiivsust ning mikroobset biomassi. Negatiivne mõju avaldub seetõttu, kuna soolad viivad vett rakkudest välja, mis omakorda võib hävitavalt mõjuda mikroorganismidele. Lisaks on ka leitud, et mikroobikoosluse hingamisaktiivsus väheneb kõrgema elektrijuhtivusega muldades. (Yan, Marschner, Cao, Zuo, Qin, 2015) Varasemalt on veel välja toodud, et niiskemate muldade puhul on elektrijuhtivus suurem ning kuivemate muldade puhul madalam (Shahid, Zaman, Heng, 2018). Heinamaal oli elektrijuhtivuse tulemus mitmel kuul kõige madalam või siis keskmine võrreldes teiste katsekohtadega. Elektrijuhtivuse tulemust saab omakorda seostada heinamaa mulla niiskussisaldusega, mis oli enamikel kuudel keskmine võrreldes teiste katsekohtadega. Mulla elektrijuhtivuse tase on aidanud kaasa mikroorganismide levikule ning aktiivsusele mullas, mille tagajärjel on ka katsematerjal rohkem lagunenu võrreldes teiste kohtadega.

Niisutatud mullad on sobivaks keskkonnaks mikroorganismidele. Liigne niiskussisaldus mullas võib aga vähendada mikroorganismide arvukust ning aktiivsust mullas. Liigne niiskus mõjutab hapnikku mullas, mida mikroorganismid vajavad. Väga kuivad mullad pole samuti ideaalseks keskkonnaks mikroorganismidele. Looduses võivad mulla omadused pidevalt muutuda tulenevalt ilmastikutingimustest. Sajuperioodidel on mullad niiskemad ning suvel kuumade ilmadega kuivemad. (Borowik ja Wyszowska, 2016) Heinamaal on olnud keskmine niiskussisaldus võrreldes teiste katsekohtadega. See tekitab sobivad tingimused mikroorganismidele, kuna muld polnud liiga niiske ega liiga kuiv.

Kõige aeglasem massikadu oli katseperioodil lodus. Lodus oli kõige suurem elektrijuhtivus võrreldes teiste katsekohtadega. Lodus oli kõige madalam kuivaine sisaldus, kuna tegu on alaga, mis sajustel perioodidel ujutab üle. Lisaks oli seal kõige madalam mikroobikoosluse hingamisaktiivsus, kuigi mikroobne biomass seal kõige madalam ei olnud. Madalam lagunemiskiirus võibki tingitud olla madalamast mikroobikoosluse hingamisaktiivsusest, mis näitab, et mikroorganismid ei ole nii aktiivsed võrreldes teiste katsekohtadega. Mikroobikoosluse hingamisaktiivsust mõjutab jällegi niiskussisaldus ja soolsus mullas (Yan jt, 2015; Borowik ja Wyszowska, 2016), mis lodus oli kõige suurem.

Massikadu metsas oli võrreldes teiste katsekohtadega keskmine. Metsas oli võrreldes teiste katsekohtadega kõige madalam mikroobse biomassi tulemus, ent mikroobikoosluse hingamisaktiivsuse tulemus oli seal katsekohtade suhtes keskmine. Mikroobikoosluse hingamisaktiivsuse kõrgem tulemus võrreldes loduga võibki põhjustada suurema massikao, kuigi lodus oli suurem mikroobne biomass. Mitmel kuul

oli metsas ka kõige madalam elektrijuhtivus, mis on samuti soodustavaks teguriks mikroorganismide levikule. Kõige suurem materjali massikadu metsas oli oktoobri lõpus, kui seal oli ka kõige madalam elektrijuhtivus, mis võis seda mõjutada.

Lagunemiskatse tulemusena on näha, et α -tselluloosi lagunes kõige paremini lodus. Lodus oli küll madalam mikroobne biomass ja mikroobikoosluse hingamisaktiivsus kui heinamaal, ent siiski on materjal heinamaal kõige vähem lagunenud. Lodus on keskkond olnud niiskem võrreldes heinamaaga, mistõttu võib niiskem keskkond olla sobivam α -tselluloosi lagundavatele mikroorganismidele. Varasemalt on samuti uuritud, et kuidas mõjutab niiskussisaldus mullas tselluloosi lagunemist ning on leitud, et materjali lagundavad mikroorganismid eelistavad niiskemaid muldi (Donnelly, Entry, Crawford, Cromack Jr, 1990). Seda kinnitas ka magistritöös läbiviidud katse.

Erinevatest bioplastide katsetükkidest lagunesid kõige rohkem RainBow Bio ning McLean ja kõige vähem Coopi ja Prisma kilekotid. Kõik neli olid vastavuses standardiga EVS-EN 13432:2003, mis sätestab lagunemise kiiruse tööstusliku kompostimise tingimustes (Eesti standardikeskus, 2003). McLeani puhul oli veel tootja poolt välja toodud, et kilekott peab lagunema tööstuslikes tingimustes 10-45 päeva jooksul. Materjalide esmasel võrdlemisel oli näha, et Coopi ja Prisma kotid olid õhemast materjalist, mistõttu tundus, et need kotid võivad laguneda kiiremini võrreldes teistega. Katse näitas aga vastupidist tulemust. Lagunemine sõltub ka materjali koostisest ning kuigi kõik kotid on tähtsusepõhised, siis võib McLeani ja Rainbow Bio kilekottide puhul koostises olla lisaks tähtsusele teistsuguseid aineid, mis tagavad materjali parema lagunemise.

Naftal baseeruva kilekoti puhul oli erinevate kuude vältel näha massi kasvamist ning ka massikadu. Massikao puhul võib tegemist olla ka materjali kahjustumisega looduskeskkonnas, mistõttu võib osa materjalist puruneda ja järele jääda mikroplastid. Lisaks mõjutab lagunemist ka päikesevalgus (Chamas jt, 2020), kuna peale lagunemiskatset oli visuaalselt märgata värvivahet algse materjali ning katses olnud vahel.

Töö tulemusena võib järeldada, et ümbritsev keskkond mõjutab lagunemise kiirust. Bioplastist kilekotid lagunesid kõige rohkem heinamaal, kus keskmise niiskusega ja madalama soolsusega mullad võimaldasid parema keskkonna materjali lagundavate mikroorganismide levikuks ja tegevuseks võrreldes teiste keskkondadega. Katse näitas, et bioplastist valmistatud kilekotid on võimelised lagunema ka looduslikes tingimustes. Lagunemise puhul on samuti oluliseks materjali koostis, kuna katses olevatel kilekottidel ei olnud ühtne protsentuaalne massikadu. Lisaks bioplastidele uuritud α -tselluloos näitas vastupidiselt kõige paremat lagunemist lodus, kus oli tegu niiskema keskkonnaga.

Sellest saab järeldada, et α -tselluloosi lagundatavate mikroorganismide jaoks on sobivamaks niiskema mullaga keskkonnad.

KOKKUVÕTE

Materjali lagunemise kiirust mõjutavad erinevad tegurid. Lagundajateks on mikroorganismid, kelle paljusus ja aktiivsus sõltub temperatuurist, mulla happesusest, niiskusest jne. Seetõttu sõltubki lagunemise kiirus sellest, et kui sobilikud elutingimused on mikroorganismidele, kes seda protsessi läbi viivad.

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli uurida erinevate bioplastist valmistatud kilekottide lagunemist erinevates looduslikes keskkondades ning võrrelda neid naftal baseeruva kilekoti lagunemisprotsessiga. Lisaks soovis autor uurida ka α -tselluloosi lagunemist samades keskkondades.

Teema uurimiseks viis autor läbi lagunemiskatse kolmes erinevas keskkonnas: heinamaa, lodu ja mets. Katse viidi läbi ajaperioodil 26.07.2019 – 05.05.2020. Lisaks lagunemiskatsele uuriti proovikohas olevat mulda, et leida seoseid ümbritseva keskkonna ja lagunemise kiiruse vahel. Mullast analüüsiti happesust, elektrijuhtivust, kuivaine sisaldust, mikroobikoosluse hingamisaktiivsust ning mikroobset biomassi. Lagunemiskatse puhul uuriti materjali massikadu erinevate kuude lõikes. Kõik proovid ja kaalumised teostati Tallinna Tehnikaülikooli Tartu Kolledži laboris.

Uurimise tulemusena selgus, et kõige paremini lagunesid bioplastist kilekotid heinamaal. Heinamaal oli kõige suurem mikroobikoosluse hingamisaktiivsus ning mikroobne biomass, mistõttu sai seostada seda kõige suurema massikaoga. Heinamaal oli peaaegu kõikide kuude jooksul kõige väiksem pH ning samuti oli elektrijuhtivus olnud mitmel kuul kõige madalam. Kuivaine sisaldus oli enamikel kuudel heinamaal võrreldes teiste katsekohtadega keskmine. Autor leidis seoseid lagunemise kiiruse ja niiskussisalduse ning elektrijuhtivuse vahel, ent pH tase oli erinevates katsekohtades sarnane, mistõttu sellega seoseid tekitada ei saa. Kõige halvemini toimus lagunemine lodus, kus oli ka kõige madalam mikroobikoosluse hingamisaktiivsus ja kõige kõrgem niiskussisaldus ning elektrijuhtivus. Väiksem lagunemine on seotud madalama mikroobikoosluse hingamisaktiivsusega, mis on omakorda seotud niiskussisalduse ja elektrijuhtivusega.

Alfa-tselluloosi lagunemise uurimisel samades katsekohtades selgus, et vastupidiselt bioplastist kilekottidele, toimus kõige suurem lagunemine lodus. Varasemates uuringutes on samuti välja toodud, et alfa-tselluloosi lagundavad mikroorganismid eelistavad niiskemaid muldasid, mistõttu saab mulla niiskussisaldust seostada lagunemise kiirusega.

Koostatud töö põhjal saab teha järelduse, et bioplastist valmistatud kilekotid on keskkonnasõbralikumad, kuna need on võimelised lagunema looduslikes keskkondades kiiremini võrreldes naftal baseeruva kilekotiga. Bioplastide lagunemise. Lisaks võivad bioplastist kilekotid valmistatud olla biotoormest, mistõttu vähendatakse fossiilsete kütuste kasutamist ning seeläbi keskkonnamõjusid, mida fossiilsete kütuste kasutamine tekitab.

SUMMARY

Degradation of material depends on different aspects. Diversity and activity of microorganisms, who degrade the material, is affected by the level of temperature, level of soil pH, level of soil moisture etc. For that reason, the rate of degradation depends on how appropriate are the environmental conditions for the microorganisms who degrade the material.

The aim of this master's thesis was to research the degradation of different bioplastic bags in different natural environments and to compare them with the degradation of conventional plastic bag. In addition, to research the degradation of alpha-cellulose in the same environments.

In order to analyse this subject, a degradation experiment was conducted in three different environments: a hayfield, a swamp and a forest. The experiment was carried out from 26.07.2019 until 05.05.2020. In addition to the degradation experiment, a sampling of soil was also conducted from the same places where the experiment took place. The sampling from soil was done in order to find connections between the surrounding environment and the rate of degradation. The taken samples were analysed in the laboratory of Tartu College of Tallinn University of Technology for pH, electrical conductivity, dry matter content, substrate-induced respiration and microbial biomass. In the degradation experiment, mass loss was studied during the different months of when the experiment took place.

The conducted research came to the conclusion that the best rate of degradation of bioplastic bags was in the hayfield. Compared to other sampling points, hayfield had the highest substrate-induced respiration and microbial biomass and the lowest pH and electrical conductivity in several months. The moisture content in the hayfield was average compared to other sampling spots. Connections were found between the rate of degradation and the moisture content and electrical conductivity. Soil pH was similar in different sampling points and because of that, it is not possible to make connections with the rate of degradation. The lowest degradation rate was in the swamp. It also had the highest moisture content in the soil and electrical conductivity. Lower rate of degradation is connected with lower substrate-induced respiration and microbial biomass which are also connected with moisture content and electrical conductivity.

Researching alpha-cellulose degradation in the same sampling spots showed that the highest degradation was in the swamp which was opposite from the degradation of bioplastic bags. Previous research has also shown that microorganisms who degrade

alpha-cellulose, prefer to live in soils with higher moisture content. Results from this master's thesis further confirms this.

The conducted research shows that bioplastic bags are more environmentally friendly than conventional plastic bags, because they are capable of degrading faster in natural environments. In addition, bioplastic bags can be produced from biomass which reduces the use of fossil fuels and thus decreases the environmental impacts that fossil fuels cause.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

Abdel-Shafy, H. I., Mansour, M. S. M. (2018). Solid waste issue: Sources, composition, disposal, recycling, and valorization. *Egyptian Journal of Petroleum*, 27(4), 1275-1290. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2018.07.003>

Adamcovi, D., Vaverkovi, M. (2014). Degradation of Biodegradable/Degradable Plastics in Municipal Solid-Waste Landfill. *Polish Journal of Environmental Studies*, 23(4), 1071-1078. 10.13140/2.1.2319.8400

Ahmed, T., Shahid, M., Azeem, F., Rasul, I., Shah, A. A., Noman, M., Hameed, A., Manzoor, N., Manzoor, I., Muhammad, S. (2018). Biodegradation of plastics: current scenario and future prospects for environmental safety. *Environmental Science and Pollution Research* 25(1), 1-12. 10.1007/s11356-018-1234-9

Alam, O., Billah, M., Yajie, D. (2018). Characteristics of plastic bags and their potential environmental hazards. *Resources, Conservation & Recycling* 132, 121-128. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.037>

Ashter, S. A. (2016). Introduction to bioplastics engineering. Oxford: Elsevier.

Asmuni, S., Hussin, N. B., Khalili, J. M., Zain, Z. M. (2015). Public Participation and Effectiveness of the no Plastic Bag Day in Program in Malaysia. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 168, 328-340. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.10.238>

Bajpai, P. (2019). Biobased Polymers: *Properties and Applications in Packaging*. Elsevier.

Batori, V., Åkesson, D., Zamani, A., Taherzadehllona, M. J., Horváth, S. (2018). Anaerobic degradation of bioplastics: A review. *Waste management*, 80, 406-413. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.09.040>

Borowik, A., Wyszowska, J. (2016). Soil moisture as a factor affecting the microbiological and biochemical activity of soil. *Plant Soil Environment*, 62(6), 250-255. doi: 10.17221/158/2016-PSE

Chamas, A., Moon, H., Zheng, J., Qiu, Y., Tabassum, T., Jang, J. H., Abu-Omar, M., Scott, S. L., Suh, S. (2020). Degradation Rates of Plastics in the Environment. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(9), 3494-3511. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b06635>

Devi, R. S., Kannan, V. R., Natarajan, K., Nivas, D., Kannan, K., Chandru, S., Antony, A. R. (2015). The Role of Microbes in Plastic Degradation. *Environmental Waste Management* (341-370). CRC Press. 10.1201/b19243-13

Dilkes-Hoffman, L., Ashworth, P., Laycock, B., Pratt, S., Lant, P. (2019). Public attitudes towards bioplastics – knowledge, perception and end-of-life management. *Resources, Conservation and Recycling*, 151, 104479
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104479>

Donnelly, P. K., Entry, J. A., Crawford, D. L., Cromack Jr, K. (1990). Cellulose and lignin degradation in forest soils: Response to moisture, temperature, and acidity. *Microbial Ecology*, 20, 289–295.

Eesti standardikeskus. (2003). *Pakend. Kompostimise ja biolagunemise teel taaskasutatavale pakendile esitatavad nõuded. Pakendi lõplikult kõlblikuks tunnistamisel kasutatava testimise kord ja hindamiskriteeriumid.* (Standard nr 13432).
Loetud aadressil: <https://www.evs.ee/et/evs-en-13432-2003>

European Bioplastics. (2016). Bioplastics – Industry standards and labels. Loetud aadressil https://docs.european-bioplastics.org/2016/publications/fs/EUBP_fs_standards.pdf

European Bioplastics. (2015). EN 13432 certified bioplastics. Loetud aadressil https://docs.european-bioplastics.org/publications/bp/EUBP_BP_En_13432.pdf

European Bioplastics. (2019). Guidelines for the use of the seedling logo. Loetud aadressil https://docs.european-bioplastics.org/2016/publications/EUBP_Guidelines_Seedling_logo.pdf

Gilbert, J., Ricci, M. (2015). Biodegradable Plastics. An Overview of the Compostability of Biodegradable Plastics and its Implications for the Collection and Treatment of Organic Wastes. International Solid Waste Association.

Gopi, S., Balakrishnan, P., Chandradhara, D., Poovathankandy, D., Thomas, S. (2019). General scenarios of cellulose and its use in the biomedical field. *Materials Today Chemistry*, 13, 59-78. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2019.04.012>

Hahladakis, J. N., Velis, C. A., Weber, R., Iacovidou, E., Purnell, P. (2018). An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling. *Journal of Hazardous Materials*, 344, 179-199. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.10.014>

Karan, H., Funk, C., Grabert, M., Oey, M., & Hankamer, B. (2019). Green Bioplastics as Part of a Circular Bioeconomy. *Trends in Plant Science*, 24(3), 237-249. 10.1016/j.tplants.2018.11.010

Kriipsalu, M., Maastik, A., Truu, J. (2016). *Jäätmekäitlus ja pinnase tervendamise*. Tallinn: TTÜ kirjastus.

Krzan, A., Hemjinda, S., Miertus, S., Corti, A., Chiellini, E. (2006). Standardization and certification in the area of environmentally degradable plastics. *Polymer Degradation and Stability*, 91(12), 2819-2833. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2006.04.034>

Labet, M., Thielemans, W. (2009). *Chemical Society Reviews*, 38, 3484-3504. <https://doi.org/10.1039/B820162P>

Liu, T., Koranteng, E., Wu, Z., Xiao, W., Wu, Q. (2017). Structure and properties of a compatible starch-PCL composite using p-phthaloyl chloride-based prepolymer: ARTICLE. *Journal of Applied Polymer Science*, 134(41). <https://doi.org/10.1002/app.45400>

Maa-ameti Geoportaal. (2020). Loetud aadressil <https://xgis.maaamet.ee/xgis2/page/app/maainfo>

Moharam, R., Maqtari, M. A. A. (2014). The Impact of Plastic Bags on the Environment: A field Survey of the City Of Sana'a And The Surrounding Areas, Yemen. *International Journal of Engineering Research and Reviews* 2(4), 61-69.

Muthu, S. S., Li, Y., Hu, J.-H., Mok, P.-Y. (2009). An Exploratory Comparative Study on Eco-Impact of Paper and Plastic Bags. *Journal of Fiber Bioengineering and Informatics*, 1(4), 307-320. 10.3993/jfbi03200909

Naturally Occurring Biodegradation as a Remedial Action Option for Soil Contamination. (2004). Loetud aadressil <https://dnr.wi.gov/files/PDF/pubs/rr/RR515.pdf>

O'Malley, L.P. (2006). Evaluation and modification of the oecd 301f respirometrybiodegradation test method with regard to test substance concentration and inoculum. *Water, Air, and Soil Pollution*, 177, 251-265. <https://doi.org/10.1007/s11270-006-9163-5>

Patel, R., Ruehle, D., Dorgan, J. R., Halley, P., Martin, D. (2013). Biorenewable blends of polyamide-11 and polylactide. *Polymer Engineering & Science*, 54(7), 1523-1532. <https://doi.org/10.1002/pen.23692>

Plastic Bag Environmental Impact. (2019). Conserving now koduleht. Loetud aadressil <https://conservingnow.com/plastic-bag-environmental-impact/>

Platen, H., Witrz, A. (1999). Application of analysis no 1: Measurement of the respiration activity of soils using the OxiTop® Control measuring system. Basic principles and process characteristic quantities. Wissenschaftlich-Technische Werkstätten GmbH & Co. Germany.

Rahman, M., Brazel, C. S. (2004). The plasticizer market: an assessment of traditional plasticizers and research trends to meet new challenges. *Progress in Polymer Science*, 29(12), 1223-1248. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2004.10.001>

Rajmohan, K. V., Ramya, C., Viswanathan, M., Varjani, S. (2019). Plastic pollutants: effective waste management for pollution control and abatement. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 12, 72-84. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2019.08.006>

Reuschenbach, P., Pagga, U., Strotmann, U. (2003). A critical comparison of respirometric biodegradation tests based on OECD 301 and related test methods. *Water Research*, 37(7), 1571-1582. [10.1016/S0043-1354\(02\)00528-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00528-6)

Richter, A., Huallacháin, D. O., Doyle, E., Clipson, N., Van Leeuwen, J. P., Heuvelink, G. B., Creamer, R. E. (2018). Linking diagnostic features to soil microbial biomass and respiration in agricultural grassland soil: a large-scale study in Ireland. *European Journal of Soil Science*, 69(3), 414-428. <https://doi.org/10.1111/ejss.12551>

Rivai, H., Hamdani, A. S., Ramdani, R., Lalfari, R. S., Andayani, R., Armin, F., Djamaan, A. (2018). Production and Characterization of Alpha Cellulose Derived From Rice Straw (*Oryza sativa* L.). *International Journal of Pharmaceutical Sciences Review and Research*, 52(1), 45-48.

Schinner, F., Öhlinger, R., Kandeler, E. Margesin, R. (1996). *Methods in soil biology*. Springer-Verlag: Berlin.

Zaman, M., Shahid, S. A., Heng, L. (2018). *Guideline for Salinity Assessment, Mitigation and Adaptation Using Nuclear and Related Techniques*. Springer.

Stevens, E. S. (2002). *Green plastics: an introduction to the new science of biodegradable plastics*. New Jersey: Princeton University Press

Tarrahia, R., Fathi, Z., Seydibeyoğlu, M. Ö., Doustkhah, E., Khataee, A. (2019). Polyhydroxyalkanoates (PHA): From production to nanoarchitecture. *International Journal of Biological Macromolecules*, 146, 596-619. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.12.181>

TÜV Austria. (2020). OK compost & Seedling. Loetud aadressil <https://www.tuv-at.be/green-marks/certifications/ok-compost-seedling/#ankerOKcompostHOME>

Volova, T. G., Gladyshev, M. I., Trusova, M. Y., Zhila, N. O. (2007). Degradation of polyhydroxyalkanoates in eutrophic reservoir. *Polymer Degradation and Stability*, 92, 580-586. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2007.01.011>

Zhao, X., Cornish, K., Vodovotz, Y. (2020). Narrowing the Gap for Bioplastic Use in Food Packaging: An Update. *Environmental Science & Technology*, 54(8), 4712-4732. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b03755>








Zhong, Y., Godwin, P., Jin, Y., Xiao, H. (2020). Biodegradable polymers and green-based antimicrobial packaging materials: A mini-review. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 3(1), 27-35. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2019.11.002>

Yan, N., Marschner, P., Cao, W., Zuo, C., Qin, W. (2015). Influence of salinity and water content on soil microorganisms. *International Soil and Water Conservation Research*, 3(4), 316-323. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2015.11.003>

LISAD

Lisa 1 Levinumad plastiliigid ning nende kasutusala

Tabel 1. Levinumad plastiliigid ning nende kasutusala (Kriipsalu jt, 2016)

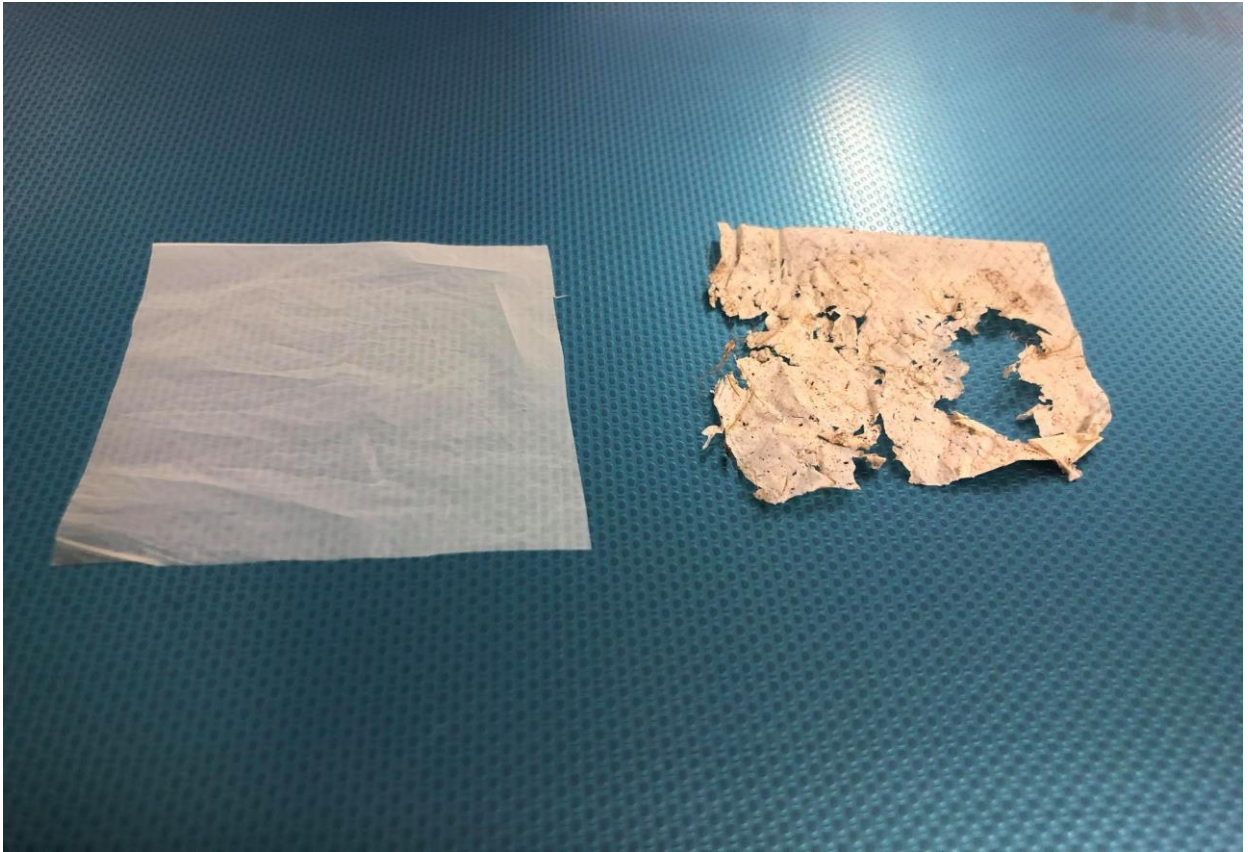
Plastiliik	Standard (EPME)	Tooted
Polüetüleentereftalaat		Gaseeritud karastusjoogi- ja toiduõlitaara; vee-, ketšupi- ja salatikastmepudelid; veekindlad pakendid; fliis.
Kõrgtihe polüetüleen		Gaseerimata jookide, toiduõli- ja mahlataara; kodukemikaalitaara; pudelikorgid; kilekotid; mänguasjad.
Polüvinüülkloriid		Drenaaži- ja kanalisatsioonitorud; kaabliisolatsioon; aknaraamid; vihmaveetorud; toiduainealused; olmekemikaalipudelid.
Madaltihe polüetüleen		Pakkekile; kilekotid; prügikotid; pehmed pudelid; torud.
Polüpropüleen		Pudelikorgid ja -sildid; kuivainepurgid; pakkekile; filmilint; võikarbid; kodumasinakered.
Polüstüreen		Kiirtoidupakendid; kodumasinakered; topsid; ravimipurgid; kaitseümbrised; soojustusmaterjal; toidunõud.
Muud plastid		Mitmekihilised ja mitmest plastiliigist pakendid, eriplastist esemed.

Lisa 2 Katses kasutatud kilekotid



Joonis 1. Katseks kasutatud kilekotid. 1 – Rainbow PE, 2 – COOP, 3 – Prisma, 4 -Rainbow Bio, 5 - Mclean

Lisa 3 McLeani kilekott katse alguses ja lõpus heinamaal



Lisa 4 Rainbow PE kilekott katse alguses ja lõpus heinamaal



Lisa 5 Alfa-tselluloos katse lõppedes metsas

