



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOI

INSENERITEADUSKOND

Tartu kolledž

**LOODUSLIKE JA SÜNTEETILISTE MATERJALIDE
LAGUNEMINE KOMPOSTIMISEL
LABORITINGIMUSTES**

**DEGRADATION OF NATURAL AND SYNTHETIC MATERIAL
DURING COMPOSTING UNDER LABORATORY CONDITIONS**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane:	Anneli Sūgis
Üliõpilaskood:	204140NAEM
Juhendajad:	Nele Nutt, PhD Mari Ivask, PhD

Tartu 2024

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

10.01.2024

Autor: Anneli Sügis (allkirjastatud digitaalselt)

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

10.01.2024

Juhendajad: Nele Nutt, Mari Ivask (allkirjastatud digitaalselt)

Kaitsmisele lubatud

10.01.2024

Kaitsmiskomisjoni esimees: Jane Raamets (allkirjastatud digitaalselt)

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Anneli Sūgis

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Looduslike ja sünteetiliste materjalide lagunemine kompostimisel“ , mille juhendajad on Nele Nutt ja Mari Ivask

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli (TalTech) 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.

10.01.2024

1 Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingulise tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtjaks 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: Anneli Sügis, 204140NAEM

Õppekava, peeriala: Tööstusökoloogia

Juhendajad: Vanemõppejõud, Nele Nutt; Emeriitprofessor, Mari Ivask;

Lõputöö teema:

Looduslike ja sünteetiliste materjalide lagunemine kompostimisel laboritingimustes.

Degradation of natural and synthetic material during composting under laboratory conditions.

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Selgitada välja kas ja millises ulatuses esineb katsekehadel massikadu.
2. Leida millise kompostimisviisi tulemusel lagunevad katsekehad kõige rohkem.
3. Hinnata looduslike ja sünteetiliste kiudude lagunemise erinevust ning leida millised kiud lagunevad rohkem, kas looduslikud või sünteetilised.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Kirjanduse ülevaate koostamine	31.10.2023
2.	Katse ettevalmistamine	10.02.2023
3.	Katse läbiviimine	31.05.2023
4.	Töö tulemuste analüüsimine	31.11.2023
5.	Töö vormistamine	10.01.2024

Töö keel: eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: 10.01.2024

Üliõpilane: Anneli Sügis (allkirjastatud digitaalselt)

Juhendajad: Nele Nutt (allkirjastatud digitaalselt)
Mari Ivask

Programmijuht: Jane Raamets (allkirjastatud digitaalselt)

SISUKORD

EESSÕNA	6
SISSEJUHATUS	7
1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE	8
1.1. Tekstiilisektori negatiivne mõju	8
1.2. Looduslikud ja keemilised kiudained	9
1.3. Tekstiilmaterjalide lagunemine	11
1.4. Kompostimine ja lagunemisprotsessi mõjutavad tingimused	12
1.5. Vermikompostimine	14
1.6. Efektiivsed mikroorganismid	16
2. MATERJAL JA METOODIKA	18
2.1. Materjal	18
2.2. Katse kirjeldus	18
2.3. Meetodid	19
2.4. Andmetöötlus	22
3. TULEMUSED.....	23
3.1. 100% lambavill katsekehade massikadu	25
3.2. 50% puuvill + 50% polüster katsekehade massikadu.....	26
3.3. 100% puuvill katsekehade massikadu	27
3.4. 100% akrüül katsekehade massikadu	29
3.5. 100% polüester katsekehade massikadu	30
3.6. 65% akrüül+ 35% nailon katsekehade massikadu	31
3.7. Erinevate materjalide massikadu vermikompostis.....	32
3.8. Substraadi niiskusesisaldus	33
3.9. Substraadi temperatuur	33
3.10. Substraadi happesus.....	34
3.11. Substraadi elektrijuhtivus.....	35
3.12. Substraadi mikroobne hingamisaktiivsus ja mikroobne biomass	36
3.13. Katse jooksul mõõdetud parameetrite omavaheliste seoste analüüs.....	38
4. ARUTELU JA JÄRELDUSED	40
KOKKUVÕTE	43
SUMMARY.....	44
KASUTATUD KIRJANDUS	46
LISAD	50

EESSÕNA

Magistritöö teema sõnastati juhendaja Nele Nutt poolt ning formuleeriti juhendaja Mari Ivaski abil.

Käesolev magistritöö käsitleb tekstiiljätmete kasvavat probleemi, tarbetekstiilide tarbimine võib suureneda 2030. aastaks ligikaudu 60% ulatuses (Euroopa Komisjon, 2020), kui jäätmetekke vähendamiseks lahendusi ei leita, siis tulevikus võib tekstiiljätmete hulk kasvada tohutus koguses ning tekib vajadus lahenduste järele, mille abil oleks võimalik tekstiiljätmeid taaskasutada või vähendada. Töös uuritakse tekstiilmaterjalide kompostimist alternatiivse jäätmekäitlusviisina.

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli selgitada välja looduslike ja sünteetiliste tekstiilmaterjalide lagunemise aste, leida efektiivseim kompostimisviis ning hinnata looduslike ja sünteetiliste kiudude lagunemise erinevust. Töö koostati ja tekstiilmaterjalide kompostimiskatse viidi läbi TalTech Tartu Kolledži laboratooriumis 2023. aastal. Kompostimiskatses kasutati kuut erinevat looduslikku ja sünteetilist materjali ning nelja erineva töötlusega substraati. Tulemuste tõlgendamiseks viidi läbi statistiline andmeanalüüs ning töö lõpus arutleti tulemuste üle ning tehti järeldusi ja anti soovitusi edasi uurimist vajavate teemade osas.

Avaldan tänu töö juhendajatele Mari Ivaskile ja Nele Nuttile toetuse ja juhendamise eest katse läbiviimisel ning magistritöö koostamisel. Ühtlasi soovin tänada Tallinna Tehnikaülikooli Tartu kolledži projektijuhti Ellen Hiidet.

Võtmesõnad: tekstiilmaterjal, kompostimine, lagunemine, magistritöö.

SISSEJUHATUS

Tekstiilisektori negatiivne mõju tuleneb peamiselt rahvastiku kasvu ja elatustaseme tõusuga seotud tootmis ja tarbimissüsteemidest, seejuures kiirmoetööstuse kasv on aidanud kaasa suures koguses madala kvaliteediga tekstiiljäätmete tekkele (Christis et al., 2019; Euroopa Komisjon, 2020; Keskkonnaministerium, 2021). Tekstiiltoodete nõudlusest, tootmisest ja tarbimisest tulenev jäätmeteke koormab keskkonda ning avaldab mõju vee- ja energiakasutusele ning kliimale (Euroopa Komisjon, 2020). Seejuures Euroopa tarbijate jaoks ei ole enamuse tekstiilisektori negatiivsetest keskkonna- ja sotsiaalsetest mõjudest otseselt nähtav (Christis et al., 2019).

Tekstiilitööstuses on kangad muutunud aja jooksul kergemaks ja õhemaks ning see on mõjutanud tarbijate ootusi tarberõivaste kvaliteedile ja hoogustanud kiirmoetööstuse arengut (Tervonen, 2016). Tarberõivaste tarbimine võib suureneda 2030. aastaks ligikaudu 60% ulatuses (Euroopa Komisjon, 2020), kui tekstiiljäätmete tekke vähendamiseks midagi ette ei võeta, siis tulevikus võib tekstiiljäätmete hulk kasvada tohutus koguses ning tekib vajadus lahenduste järele, mille abil oleks võimalik tekstiiljäätmelid taaskasutada või vähendada. Tekstiiljäätmete probleemi lahendamiseks ja keskkonnamõjude vähendamiseks on tarvis strateegiaid ning üheks alternatiiviks võib olla tekstiiljäätmete kompostimine.

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli selgitada välja looduslike ja sünteetiliste tekstiilmaterjalide lagunemise aste, leida efektiivselt kompostimisviisi ning hinnata looduslike ja sünteetiliste kiudude lagunemise erinevust. Eesmärgi täitmiseks püstitati järgnevad uurimisküsimused:

1. Kas ja millises ulatuses esineb katsekehadel massikadu?
2. Millise kompostimisviisi tulemusel lagunevad katsekehad kõige rohkem?
3. Millised kiud lagunevad rohkem, kas looduslikud või sünteetilised?

Käesoleva töö esimeses peatükis antakse ülevaade tekstiilisektori negatiivsetest mõjudest ning tekstiiljäätmete probleemi olemusest, looduslikest ja keemilistest kiududest, tekstiilmaterjalide lagunemisega seotud varasematest uuringutest ja olulisematest tulemustest ning kompostimisest ja kompostimisprotsessi mõjutavatest tingimustest. Teises peatükis kirjeldatakse tekstiilmaterjalide lagunemiskatse materjali ja meetodikat. Kolmandas peatükis antakse ülevaade katse tulemustest ning neljas peatükk koosneb arutelust ja järeldustest. Töö lisa on leitavad substraadina kasutatud Biolan Aiamaa Must Muld tooteandmed ning katse tulemuste koondtabel.

1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

1.1. *Tekstiilisektori negatiivne mõju*

Tootmis ja tarbimissüsteemid koos maailma rahvastiku kasvu ja elatustaseme tõusuga on seoses tekstiiltoodete nõudluse suurenemisega (Keskkonnaministeerium, 2021), andes seejuures sisendi kiirmoetööstusele (Yalcin Enis et al., 2019). Madala kvaliteediga kiirmoetööstuse toodang, koos kasvava tarbimisega on kaasa aidanud tekstiilitööstuse negatiivse mõju suurenemisele ning tekstiiljätmete tekkele (Keskkonnaministeerium, 2021). Pidev uute tekstiiltoodete nõudlus ning sellest tulenev tootmine ja jäätmete ke suurendab koormust keskkonnale, avaldab mõju vee- ja energiakasutusele ning kliimale (Euroopa Komisjon, 2020).

Euroopas loetakse kasutuskõlbmatuks 5.8 miljonit tonni tekstiiltooteid igal aastal ning suur osa tekstiiljätmeid ladestatakse või põletatakse (Christis et al., 2019; Euroopa Komisjon, 2020). Eestis tekkis tekstiiljätmeid 2021. aastal 22 785 tonni, millest ligikaudu 4190 tonni koguti liigiti, ülejäänud läks segaolmejäätmete hulka, millest 5.81% moodustasid tekstiiljätmed (Keskkonnaministeerium, 2023b).

Euroopa Liidu säästva ja ringse tekstiili strateegias toodi välja, et rõivaste ja jalatsite tarbimine võib suurenedada 2030. aastaks ligikaudu 60% ulatuses, 62 miljonilt tonnilt 102 miljonile tonnile (Euroopa Komisjon, 2020). Antud prognoosi järgi tekib tulevikus tohutus koguses tekstiiljätmeid ning kasvab vajadus efektiivsete lahenduste järele, mis aitaksid taaskasutada või vähendada tekstiiljätmete hulka.

Eesti riigi jäätmekava 2022-2028 eelnõu põhimõtted seavad eesmärgiks jäätmete vähendamise ja korduvkasutamise, suunates fookuse ressursimahukatele valdkondadele, sealhulgas tekstiili ja tekstiiljätmete käitlemisele (Keskkonnaministeerium, 2023a).

Enamus tekstiilisektori negatiivsetest keskkonna- ja sotsiaalsetest mõjudest jääb Euroopa tarbijale nähtamatuks (Christis et al., 2019). 2017. aastal kasutati Euroopas tarbitud tekstiilide tootmiseks 53 000 miljonit kuupmeetrit vett ning üle 90 protsendi veekasutusest toimus väljaspool Euroopat (Christis et al., 2019). Veekasutus on peamiselt seotud kiukultuuride tootmisega (Christis et al., 2019) ning ülemaailmne puuvillatoodete tarbimine moodustab 2,6% ülemaailmsest veekasutusest (Chapagain et al., 2006). 2018. aastal moodustas tekstiilitoodangust 51% polüester ja 25% puuvill (Niinimäki et al., 2020). Polüester kuulub sünteetiliste materjalide hulka, mis

pärinevad fossiilsetest kütustest ning mille tootmise energiakasutus ja süsinikuheide on kõrgem kui looduslike kiudude tootmisel. (Niinimäki et al., 2020).

Tekstiilisektori maakasutuse mõjud tulenevad puuvilla kasvatamisest, suurimad tootjad on Hiina ja India (Christis et al., 2019). Puuvilla kasvatamine vähendab toiduainete tootmiseks vajamineva maa kättesaadavust ning tekstiilitööstuse nõudlus kiukultuuride järele võib suurendada seeläbi toidupuudust (Christis et al., 2019). Tekstiilisektori energiamahukad tootmisprotsessid ja pikad tarneahelad annavad kuni 10% ülemaailmselt süsinikuheitmest (Unites Nations Climate Change, 2018), kiudude tootmine on kümne aasta jooksul (2010-2020.a. vahemikus) 58-lt miljonilt tonnilt tõusnud 109-le miljonile tonnile (Textile Exchange, 2021).

Ühtlasi on rõivatööstuses kangad aja jooksul muutunud kergemaks ning sünteetiliste kiudude ja nende segude kasutamine on võimaldanud õhematel kangastel säilitada paksemate kangastega sama tugevust (Tervonen, 2016). Eelnevalt mainitu seejuures on muutnud ootusi tarberõivaste kvaliteedile ja andnud hoogu kiirmoetööstusele (Tervonen, 2016) ning sellest tulenevale järjest kasvavale tekstiiljäätmete probleemi tekkele. Keskkonnamõjude vähendamiseks ja tekstiiljäätmete probleemi lahendamiseks on tarvis strateegiaid ning üheks alternatiiviks võib olla tekstiiljäätmete kompostimine. Tekstiilkiudude lagunemise mõistmine on muutunud olulisemaks ka tootjate jaoks, kes püüavad reageerida tekstiiljäätmete probleemile ning parandada tekstiiltoodete jätkusuutlikkust (Egan & Salmon, 2021).

1.2. Looduslikud ja keemilised kiudained

Tekstiilkiud jagunevad päritolu järgi looduslikeks ja keemilisteks kiudaineteks (Tervonen, 2016). Looduslike alla kuuluvad taimsed, loomsed ja mineraalkiud, taimsed jagunevad omakorda varrekiulised (lina, kanep, džuu, ramjee), seemnekiulised (puuvill, kapok), lehekiulised (sisal, abaka, tupp-villpea), viljakiulised (kookskiud) (Tervonen, 2016). Loomsete kiudude alla kuuluvad villa- ja karvakiud (lambavill, kitsevill, kaamellaste vill) ning siid ehk kultuur- ja metsikutelt siidiussidelt saadavad kiud (Tervonen, 2016). Looduslikud kiud on taastuvad ning loomulikult kujul biolagunevad (Egan & Salmon, 2021).

Keemilised kiudained jagunevad tehis-, sünteetilisteks- ja anorgaanilisteks kiudaineteks. Tehiskiudained võivad olla kas tsellulooskiud nagu viskoos, modaal, kupro, lyocell või tselluloosestrid nagu atsetaat või triatsetaat. Sünteetiliste kiudainete alla kuuluvad polüamiid (nailon ja kapron), polüester, polüakrüül, kloorkiud,

polüolefiinid (polüeteen, polüpropeen, elastodieen) ning polüuretaankiud nagu elastaan. (Tervonen, 2016)

Lambavilla kiu pikkus sõltub lamba tõust, jäädes vahemikku 35-400mm (Tervonen, 2016). Villa lagunemist mõjutab kiudude struktuur, mikroobidel on keeruline kinnituda kiudude pinnal olevatele ebataasustele, hüdrofoobne pind ja kompaktne struktuur takistab seente ja bakterite tegevust ning pidurdab lagunemist (Broda et al., 2016). Ühtlasi ei toeta villa suur vee imamisvõime mikroorganismide kasvu, sest vett absorbeerivad villakiud muudavad keskkonna ebasoodsaks ning villa lagunemine toimub aeglaselt (Broda et al., 2016). Villase materjali lagunemise kiirust mõjutavad ka kanga tihedus, paksus ja struktuur ning keskkonnateguritest temperatuur, asukoha niiskustingimused ja ultraviolettkiirgus (Broda et al., 2016).

Puuvilla kiud saadakse puuvillapõõsalt (*Gossypium*), kiu pikkus sõltub sordist, jäädes 18-40 mm vahemikku, pikemad kiud on peenemad (Tervonen, 2016). Puuvill on vastuvõtlik seenkahjustustele ja läheb kergesti hallitama. Puuvilla kasutatakse rõivakangaste, sisustustekstiilide ja õmblusniitide valmistamiseks (Tervonen, 2016). Puuvillakiud on puhtaim tselluloosi vorm, koosnedes 90% ulatuses tselluloosist (Hsieh, 2007).

Süntetilised kiud valmistatakse peamiselt naftast, maagasist ja kiviõest ning nende omaduste muutmiseks lisatakse ketruslahusele matistavaid-, tulekindlaks muutvaid ühendid, värvipigmente või optilisi valgendajaid (Tervonen, 2016). Süntetilised kiud võivad olla väga pikad ning looduslike ja tehiskiududega segatud kiud lõigatakse looduslikest kiududest veidi pikemad, et lihtsustada ketramist (Tervonen, 2016). Süntetilised kiud on tugevad ja kerged, ei ima niiskust, ei lähe hallitama, samas ei hoia ka sooja, kuid kuivavad kiiresti ja ei tõmbu kokku (Tervonen, 2016).

Polüester talub hästi ilmastiku mõju ja on UV- kiirtele vastupidav, samas on ka hästi segatav kõikide looduslike kiudainetega ning sellest valmistatakse rõivakangaid, sisustustekstiile ja purjeid (Tervonen, 2016).

Polüamiidkiud ehk nailon on süntetilistest kiududest suurima niiskuseimamisvõimega 3,0-8,5% ning parima soojapidavusega, kuid UV-tundlik (Tervonen, 2016). Nailonist valmistatakse niiti, seda leidub lõngade, vaipade koostises (Tervonen, 2016).

Akrüülkiud ehk polüakrüülkiud on teiste süntetiliste kiududega võrreldes rebimisele ja hõõrdumisele vähem vastupidavad, kuid UV-kiirte, kahjurite, kõdunemise ja heitgaaside suhtes on eriti vastupidavad (Tervonen, 2016). Polüakrüülist valmistatakse lõngu, trikookangaid, kudumeid, seda segatakse villaga ning see sobib välitekstiilide tootmiseks (Tervonen, 2016).

1.3. Tekstiilmaterjalide lagunemine

Tekstiilmaterjalide lagunemist võib uurida kompostimise kaudu, looduslikud kiud ja looduslikul toorainel põhinevad kiud lagunevad tänu mikroorganismidele kättesaadavatele toitainetele paremini kui sünteetilised kiud (Szostak-Kotowa, 2004). Mikroorganismide kolooniate kasvuga kaasnevad kangas keemilised muutused, mis põhjustavad kanga tugevuse vähenemist ja lagunemist (Szostak-Kotowa, 2004).

Kanga lagunemist mõjutavad kanga ja niidi paksus ning tootmisprotsesside käigus lisatavad viimistlus- ja värvained, mis võivad lagunemist aeglustada või kiirendada (Szostak-Kotowa, 2004). Tselluloosikiudude struktuuril ja morfoloogial on oluline roll lagunemisprotsessis, kuid kangas sisalduvad hemitselluloosid, pektiinid ja muud süsivesikud on mikroorganismidele vastuvõtlikumad ning soodustavad nende kasvu (Szostak-Kotowa, 2004). Lisaks võivad kangaste viimistlusvahendid anda mikroorganismidele lisatoitained, mida nad suudavad kasutada tselluloosis sisalduvate süsinikuühendite tarbimisel (Szostak-Kotowa, 2004).

2016. aastal läbiviidud erosioonitõrjeks sobiva geotekstiili uuringus selgus, et lambavilla kiud lagunesid pinnases 12 kuulise perioodi jooksul järkjärguliselt (Broda et al., 2016). Leiti, et muutused kiududes olid mikroorganismide tekitatud, sest niiskes mullas puutusid kiud kokku ensüüme eritavate mikroorganismidega ning mullaga kokkupuutes toimus katsekehade lagunemine ka madalamatel temperatuuridel (Broda et al., 2016). 12 kuulise katseperioodi lõpus tuvastati, et villase lausriide vastupidavus ja torkekindlus oli vähenenud ning materjali oli võimalik käte vahel kergesti rebida (Broda et al., 2016).

2023. aastal avaldatud uuringu raames läbiviidud 15 nädala pikkuse kompostimiskatse käigus selgus, et villaste kangaste keemiline töötlemine mõjutab kompostimisprotsessi vähesel määral ehk töödeldud kangas on alguses lagunemiskindlam, kanga raskendatud lagunemine katse alguses võis olla seotud pH tasemega, sest nõrgalt happeline keskkond pärsib villa lagundavate mikroorganismide aktiivsust (Hodgson et al., 2023). 2010. aastal läbiviidud puuvilla- ja polüesterkanga biolagunevuse uuringus leiti, et välitingimustes kompostitud erineva töötlusega puuvillased kangad olid suurema lagunemisastmega kui polüestrist kangad (Li et al., 2010). 100% puuvillaste katsekehade massikadu oli 90 päeva möödudes 50-77%, seejuures samadel tingimustel kompostitud 100% polüester katsekehade massikadu oli 20% (Li et al., 2010).

Eelpool kirjeldatust lähtudes võib sobivates kompostimistingimustes looduslikel kiududel olla suurem lagunemise potentsiaal kui sünteetilistel kiududel. Seega

kompostimine kui jäätmete töötlemise võimalus võib olla üks viis tekstiilide lagunemise testimiseks (Li et al., 2010).

1.4. Kompostimine ja lagunemisprotsessi mõjutavad tingimused

Kompostimine ja vermikompostimine on tõhusad protsessid orgaaniliste jäätmete lagundamiseks ja stabiliseerimiseks, mis võimaldavad muuta orgaanilise algmaterjali huumuselaadseks saaduseks (Dominguez & Edwards, 2011b). Kompostimismeetodite valik sõltub olemasolevatest ressurssidest, kompostitavate materjalide omadustest ja eesmärkidest (Ayilara et al., 2020). Kompostimine on kontrollitud tingimustes mikroorganismide poolt orgaanilise aine kiirendatud lagundamine (Dominguez & Edwards, 2011b). Kompostimisel eristatakse kahte etappi, termofiilse ehk aktiivse etapi käigus toimub lagunemine intensiivsemalt, selle kestvus sõltub keskkonnatingimustest ja jäätmete omadustest ning kõrgemate temperatuuride juures toimuv termofiilses etapis on võimalik jäätmetest eemaldada patogeensed mikroorganismid (Dominguez & Edwards, 2011b). Seejuures komposti küpsemise etapis temperatuur langeb ja lagunemine toimub aeglasemalt (Dominguez & Edwards, 2011b).

Kompostimisega seotud keemiliste, bioloogiliste ja füüsikaliste protsesside toimimiseks peavad olema lagunemisprotsessi jaoks täidetud vajalikud tingimused, mis võivad erinevatel jäätmeliikidel erineda (Kriipsalu et al., 2016). Mikroorganismid vajavad elutegevuseks, kasvuks ja paljunemiseks piisavas koguses hapniku, vett, süsinikku ning makrotoitaineid nagu N, P, K ja mikroelemente, orgaaniliste jäätmete kompostimine aitab eelpool nimetatud mikroorganismide elutegevuseks vajalikke nõudeid täita (Dominguez & Edwards, 2011b). Orgaanilise aine lagunemist mikroorganismide poolt mõjutavad peamiselt niiskus, hapnik, pH ja toitained (Haj-a, 2017).

Kompostimisprotsessi jooksul on oluline hoida niiskuse tase ühtlasena, mikroorganismid vajavad elutegevuseks niisket keskkonda (sobivaim 45-65% vahemik), liigniiske keskkond muudab substraadi anaeroobseks (Diaz et al., 2011; Kriipsalu et al., 2016). Kompostimisprotsess võib lõppeda kui niiskusesisaldus langeb alla 12%, liiga kuiv keskkond pidurdab mikroorganismide aktiivsust (Diaz et al., 2011). Orgaanilise aine lagunemine võib toimuda ka anaeroobsetes tingimustes, seevastu aeroobsetes toimub lagunemine tõhusamalt (Ayilara et al., 2020; Kriipsalu et al., 2016). Hapnikutaseme vähenedes alla 15-20% suureneb anaeroobsete

mikroorganismide osakaal ning võimust võtavad käärimise ja anaeroobse hingamise protsessid (Diaz et al., 2011).

Mikroorganismide liigilist koosseisu, aktiivsust ja hulka mõjutavad mulla reaktsiooni muutused (Astover & Leedu, 2019), substraadi pH mõjutab kompostimise kiirust, liiga happelised tingimused võivad piirata mikroorganismide aktiivsust ja kasvu, aeglustades lagunemisprotsessi (Ayilara et al., 2020). Substraadi aluseline pH aitab seevastu kaasa mikroorganismide kasvule ja toetab lagunemisprotsessi (Ayilara et al., 2020). Mikroobide aktiivsuse ja efektiivsuse soodsaim pH vahemik on 6,0-7,5, ideaalne pH tase võib mikroorganismide jaoks olla küll parim, kuid mõõdukas kõrvalekalle (5,5-8,0 vahemikus) ei pruugi veel oluliselt kahjustada kompostimisprotsessi, kui muud keskkonnatingimused on sobivad (Diaz et al., 2011). Happesuse muutustele reageerivad kõige kiiremini õhulämmastikku siduvad bakterid ning happelises mullas lakkab nende tegevus (Astover & Leedu, 2019).

Mulla elektrijuhtivuse (Electrical conductivity- EC) abil on võimalik hinnata muldade soolsust, mis on seotud mulla niiskuse, temperatuuri ja struktuursusega (Grisso et al., 2009; Sanches et al., 2018). Mulla pH võib mõjutada soolade lahustuvust ja mulla niiskusesisaldust, madalama pH taseme juures võib lahustuvate soolade sisaldus olema kõrgem ning sellest tulenevalt esineda ka kõrgem elektrijuhtivus (Mohd-Aizat et al., 2014). Kõrge soolsus mõjutab mikrobioloogilisi protsesse ning kahjustab mulla füüsikalisi ja keemilisi omadusi (Lakhdar et al., 2009). Kõrge soolsuse korral on vesi mikroorganismidele vähem kättesaadav ning võib põhjustada nende kuivamist, seejuures võivad ka toitained olla mikroorganismidele vähem kättesaadavad ning mõjutada seeläbi mikroorganismide mitmekesisust ja rohkus (Haj-Amor et al., 2022). Kompostimisprotsess aitab vähendada lähteainega seotud elektrijuhtivust, seejuures peab arvestama erinevate lähteainete osakaalu ja keemiliste omaduste ning keskkonnatingimustega, sest suurem osakaal orgaanikat tõstab substraadis elektrijuhtivust (Gondek et al., 2020). Kõrgema elektrijuhtivusega lähteaine kompostimine tõstab substraadi üldist elektrijuhtivuse taset, mida on võimalik tasakaalustada õhutamise või täiteainete (nt saepuru, niidetud muru, puiduhakke) lisamisega (Gondek et al., 2020).

Bioloogilise aktiivsuse jaoks on oluline temperatuur, et hinnata kompostimisprotsessi segamisvajadust, küpsust või selle ohutust (Kriipsalu et al., 2016). Bakterite elutegevuse tõttu substraat soojeneb, madalamatel temperatuuridel (alla 5 °C) elutegevus aeglustub, optimaalseim temperatuur jääb 20 °C juurde (Kriipsalu et al., 2016). Temperatuuri tõus kompostis on hea indikaator mikroobse aktiivsuse kohta, kõrgem temperatuur näitab suuremat mikroobset aktiivsust (Jusoh et al., 2013). Mesofiilsed mikroorganismid kasvavad 20-40 °C vahemikus ja alustavad

kompostimisprotsessi, lagundades jäätmetes kergesti lagunevaid ühendeid, nende ainevahetus põhjustab kompostis kiire temperatuuri tõusu (Ayilara et al., 2020). Termofiilsed mikroorganismid kasvavad 40–70 °C vahemikus (Ayilara et al., 2020). Bioloogiline mitmekesisus saavutab substraadis kõrgeima taseme 25-45 °C vahemikus, biolagunemine on kõige intensiivsem 45-55 °C juures ning patogeenid hävivad kompostis kõige kiiremini siis, kui temperatuur tõuseb üle 55 °C (Ayilara et al., 2020; Kriipsalu et al., 2016). Kompostimisel tuleb jälgida, et temperatuur ei tõuseks liiga kõrgeks, sest temperatuuril 75-80 °C lakkab mikroorganismide tegevus ja kompostitav materjal kuivab (Kriipsalu et al., 2016). Komposti temperatuuri võib mõjutada ka töödeldavate jäätmete maht, kui jäätmete maht on vähene võib kõrgema temperatuuri saavutamine olla keeruline ning kompostis ei pruugi temperatuur tõusta 45°C-ni (Ayilara et al., 2020).

Süsiniku ja lämmastiku suhe mõjutab komposti kvaliteeti oluliselt (Guo et al., 2012), mikroorganismid vajavad orgaanilise aine lagundamiseks energiaallikana süsinikku ja valkude moodustamiseks lämmastikku sobivas vahekorras, ühe osa lämmastiku kohta 20-30 osa süsinikku (Diaz et al., 2011; Kriipsalu et al., 2016). Liigse lämmastiku korral tekib lagunemisprotsessi pärssiv ammoniaak, orgaanilise aine lagunemist pärsib ka ebapiisav lämmastiku kogus, mille tõttu ei tõuse temperatuur kompostis või tõuseb aeglaselt (Kriipsalu et al., 2016). Hästi juhitud kompostimisprotsessi jooksul väheneb substraadi süsiniku ja lämmastiku suhe stabiilselt (Diaz et al., 2011), valmiskomposti süsiniku ja lämmastiku suhe võiks jääda 12-20 vahemikku (Kriipsalu et al., 2016).

1.5. Vermikompostimine

Vermikompostimine on meetod, kus vihmaussid ja mikroorganismid lagundavad erinevaid orgaanilisi jäätmematerjale (Ayilara et al., 2020; Vuković et al., 2021), lõppsaaduseks on madala C:N suhtega, hea struktuuri, poorsuse ja niiskuse hoidmise võimega vermikompost (Dominguez, 2004). Vermikomposti on õigete meetodite ja kontrollitud tingimustega võimalik toota peaaegu kõikidest orgaanilistest jäätmetest, sel on taimekasvu soodustavad omadused ning seda saab kasutada mulla struktuuri ja toitainete parandamiseks (Edwards & Arancon, 2004).

Vermikompostis on mikroorganismidel oluline roll ensüümide tootmisel, seejuures vihmausside elutegevus aitab kaasa mikroorganismide aktiveerumisele ja orgaanilise materjali lagunemisele, selle lõhustamise, toiduks tarbimise ja väljutamise kaudu (Shanskiy et al., 2016; Vuković et al., 2021). Vihmaussid tegutsevad justkui

mehhaaniliste segajatena, kes aitavad substraati segada, õhustada ja orgaanilist ained peenestada, vähendades järk-järgult süsiniku ja lämmastiku suhte, muutes substraati soodamaks mikroobide aktiivsusele ja edasisele lagunemisele (Dominguez & Edwards, 2011b). Vermikompostimisel eristatakse samuti kahte etappi, esimeses aktiivses etapis vihmaussid töötlevad jäätmeid nõnda, et toimuvad muutused materjalide füüsikalises olekus ja mikroobide koosseisus ning küpsemiseetapis liiguvad vihmaussid substraadis töötlemata kihtide suunas, kus asuvad ka mikroorganismid jäätmeid lagundama (Edwards et al., 2011). Vermikompostis jääb temperatuur üldiselt mesofiilse etapi vahemikku, täielikult ei ole tagatud võimalike patogeenide hävimine (Edwards et al., 2011).

Vermikompostimiseks kõige sobilikumad vihmaussiliigid on *Eisenia andrei*, *Eisenia fetida* ja *Dendrobaena veneta* (Dominguez & Edwards, 2011a). Eelpool nimetatud epigeilised (mulla ülemist kihti asustavad) vihmaussiliigid on vastupidavad ja kõrge reproduktiivsusega, neil on hea taluvus keskkonnatingimuste suhtes ja nad on võimelised koloniseerima orgaanilisi jäätmeid ning neid tarbima ja seedima (Dominguez & Edwards, 2011a). Orgaaniliste jäätmete lagundamiseks kasutatakse maailmas kõige rohkem *Eisenia fetida* liiki, kes on tuntud hea taluvusega temperatuuri ja niiskusesisalduse suhtes (Edwards & Arancon, 2004). Isegi kui vermikompostimine algab erinevate liikide seguga, siis lõpuks hakkab *Eisenia fetida* domineerima (Edwards & Arancon, 2004).

Dendrobaena veneta on samuti vermikompostimise seisukohalt orgaanilise aine lagundamiseks sobilik liik, kes erinevalt *Eisenia fetida* liigist suudab ellu jääda ka mullas (Edwards & Arancon, 2004).

Vihmausside kasvu jaoks soodne temperatuuri vahemik on 15-25 °C, erinevad liigid taluvad temperatuuri erinevalt (Dominguez & Edwards, 2011a). Näiteks optimaalseim temperatuur *Eisenia fetida* jaoks on 25 °C ja taluvusvahemik on 0-35 °C, kuid *Dendrobaena veneta* taluvus ekstreemsete temperatuuride suhtes ei ole nii hea (Dominguez & Edwards, 2011a). Ühtlasi väheneb vihmausside toitumisaktiivsus kui temperatuur langeb alla 10 °C, ekstreemsete temperatuuride korral liiguvad vihmaussid alumistesse kihtidesse ning suudavad temperatuuride alanedes aklimatiseeruda ja üle elada talve, kuid seejuures ei talu nad pikalt madalaid temperatuure (Dominguez & Edwards, 2011a). Seevastu liiga kõrge temperatuur (30°C ja rohkem) suurendab substraadis keemilist ja mikroobset aktiivsust ning sellega seonduvalt suureneb hapnikutarbimine, mis mõjutab negatiivselt vihmausside ellujäämist (Dominguez & Edwards, 2011a).

Substraadi niiskusesisalduse ja vihamusside kasvumäära vahel esineb tugev seos, enamikule liikidele sobib 50-90% niiskusesisaldusega keskkond (Dominguez & Edwards, 2011a), liiga madal niiskusesisaldus pärsib vihmausside paljunemist (Dominguez, 2004). Näiteks loomsetes jäätmetes paljuneb *Eisenia fetida* 80-90% niiskusesisalduse juures ning optimaalseim on 70% (Dominguez, 2004). Seejuures *Eisenia andrei* kasvab kõige paremini 65-90% niiskusesisalduse juures ning 85% on kõige optimaalsem (Dominguez, 2004).

Epigeilised vihmaussiliigid eelistavad happelisemat substraati (5) ja taluvad pH-d vahemikus 5-9 (Dominguez & Edwards, 2011a). Vihmaussid väldivad alla 4.5 happelist substraati, sest pikaajalisel kokkupuutel võib madal happesus mõjuda surmavalt (Dominguez, 2004).

Substraadi ammoniaagi ja anorgaaniliste soolade sisalduse suhtes on vihmaussid väga tundlikud ja kõrgete näitajate korral võivad surra, kõrge ammoniaagi sisaldusega orgaanilised jäätmed tuleks eelkompostimise kaudu vihmaussidele sobivaks muuta (Dominguez & Edwards, 2011a).

Vihmaussidel puuduvad spetsiaalsed hingamiselundid, hapniku saadakse ja süsinikdioksiidi väljutatakse difusiooni teel läbi kehapiina (Dominguez, 2004). Anaeroobsetes tingimustes väheneb vihmausside hingamissagedus ning madala hapnikusisalduse korral võib vähendada söötmist (Dominguez, 2004). Seejuures *Eisenia fetida* osas on leitud, et nad võivad liikuda madala hapnikusisaldusega väga niiskesse substraati ning suudavad elada pikalt aereeritud vees, näiteks reoveepuhastite filtrites (Dominguez, 2004).

1.6. Efektiiivsed mikroorganismid

Efektiiivsete mikroorganismide (EM) kontsentraat sisaldab suurt hulka kasulikke anaeroobseid ja aeroobseid, mittepatoogeenseid mikroorganisme (Abd El-Mageed et al., 2020), aidates lagundada orgaanilist materjali ning seda on võimalik kasutada kompostimisprotsessi aktiveerimiseks (Shanskiy et al., 2016). Efektiiivsete mikroorganismide kontsentraadis sisalduvaid mikroorganisme toodetakse loodusliku kääritamise teel (Abd El-Mageed et al., 2020), põhikoostisesse kuuluvad piimhappebakterid, fotosünteesivad bakterid, pärmid, aktinobakterid ja fermenteerivad seened, kasulikke mikroobe hoitakse happelises keskkonnas (pH 3,5) (Joshi et al., 2019; Shanskiy et al., 2016). Efektiiivsed mikroorganismid aitavad muuta mikroobset keskkonda selliselt, et kaasneb orgaanilise aine kiirem käärimine ja kompostimisperioodi lühenemine ning on leitud, et efektiiivsete mikroorganismide

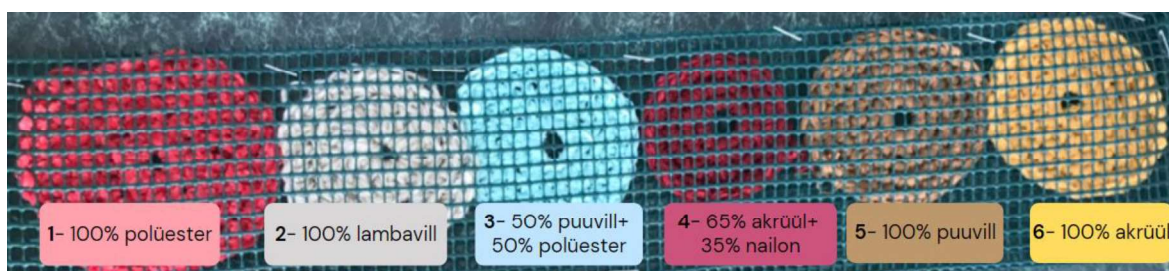
lahusega töödeldud kompostis on suurem N, P, K sisaldus kui kompostis, kus ei kasutatud efektiivseid mikroorganisme (Joshi et al., 2019). EM võib aidata kaasa mulla mikrobikooslusest toituvate vihmausside ainevahetusele ja paljunemisele (Shanskiy et al., 2016).

2. MATERJAL JA METOODIKA

Lagunemiskatse viidi läbi Tartu Kolledži laboratooriumis, ajavahemikul 07.02.2023 - 04.05.2023.

2.1. Materjal

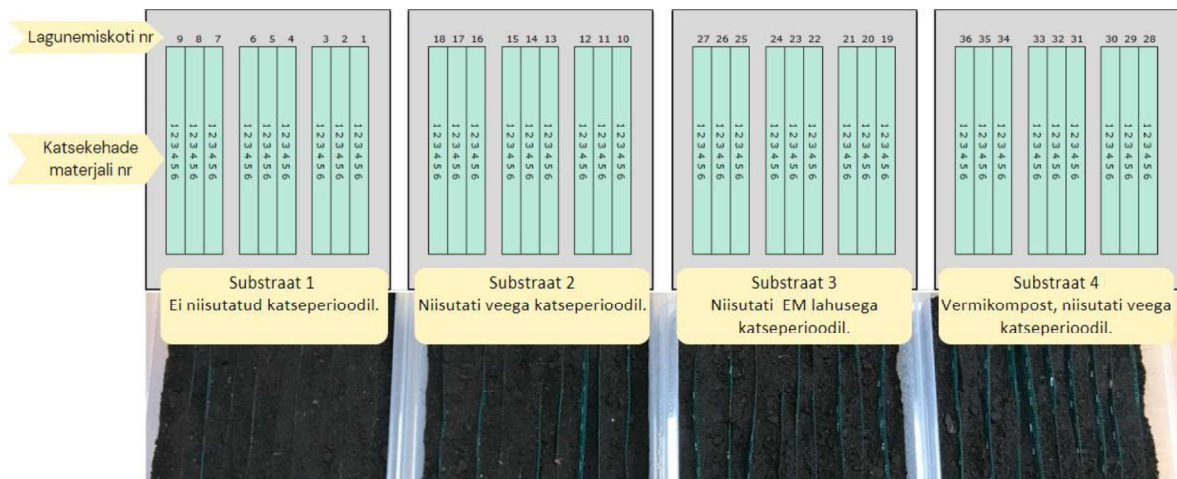
Katse läbiviimiseks kasutati kuuest erinevast materjalist lõnga (Joonis 1). Kompostimiskastidena kasutati nelja polüpropüleenist kasti (17x60x40cm), mahutavusega 30l. Drenaaži eesmärgil puuriti kastide põhja 10 auku (8mm), põhi kaeti kergkruusaga. Substraadina kasutati Biolani Aiamaa Musta Mulda (Lisa 1). Lagunemiskottide valmistamiseks kasutati 5x5mm silmaga polüetüleen võrku. *Dendrobaena veneta* vihmaussid suuruses nr 2 ja 3 hangiti kalastustarvete poest.



Joonis 1. Katsekeha materjali number ja koostis.

2.2. Katse kirjeldus

Lõngadest heegeldati ligikaudu 3 grammised katsekehad, mis süstematiseeriti ja kaaluti ning fikseeriti algkaal. Katsekehad kuivatati 40 °C juures 20 tundi ning fikseeriti katsekehade kuivkaal. Igast tekstiilmaterjalist asetati üks katsekeha nummerdatud lagunemiskotti, mille servad suleti klammerdajaga (Joonis 1). Lagunemiskotikesi valmistati kokku 36 tükki. Kompostritesse lisati kolmes korduses kolm lagunemiskotti, mis asetati teineteisest väikese vahega, et need omavahel kokku ei puutuks, sejärel lisati 15-20 cm paksune kiht Biolani aiamaa musta mulla substraati (Joonis 2).



Joonis 2. Kompostimiskatse skeem koos kompostritega.

Kompostrite esmane niisutamine teostati 07.02.23 ning jäeti 20 tunniks seisma. Esimest kompostrit katseperioodi jooksul rohkem ei niisutatud. 08.02.2023 lisati neljandasse kompostrisse 250 *Dendrobaena veneta* vihmaussi. Katse jooksul niisutati teist ja neljandat substraati veega ning kolmandat efektiivsete mikroorganismide (EM) lahusega (50 ml EM preparaati/ 5l vee kohta).

Lagunemiskatse kestis 3 kuud, iga kuu võeti neljast substraadist üles katsekehade üks kordus. Katsekehad puhastati üleliigsest orgaanilisest ainest ja asetati kuivatuskappi 20 tunniks 40 °C juurde. Inkubeerimise järgselt kaaluti katsekehad ning keskmine massikadu leiti arvutuslikult iga materjali kolme korduse kohta, väljavõtu aja järgi.

2.3. Meetodid

Katses kasutati nelja erineva töötusega komposti (Joonis 2):

- Substraat 1- katse alguses teostati üks niisutamine.
- Substraat 2- niisutati katseperioodil veega.
- Substraat 3- niisutati katseperioodil efektiivsete mikroorganismide lahusega (50 ml EM preparaati/ 5l vee kohta).
- Substraat 4- vermikomposti niisutati katseperioodil veega.

Substraatide niiskusesisalduse määramiseks võeti iga nädal 10 grammised mullaproovid ning kuivatati kliimakapis 105 °C juures 24 tundi, seejärel mullaproovid kaaluti ning mulla kuivaine leiti arvutuslikult järgneva valemi kaudu:

$$\text{Kuivaine [\%]} = \frac{\text{kuivatataud proovi mass [g]}}{\text{proovi algmass [g]}} * 100\% \quad (1)$$

Niiskusesisaldus leiti arvutuslikult järgneva valemi kaudu:

$$Niiskus [\%] = 100\% - Kuivaine [\%] \quad (2)$$

Katse jooksul mõõdeti substraatide temperatuuri iga nädal. Elektrijuhtivuse ja pH proovid võeti kord nädalas. Substraadi pH ja elektrijuhtivuse määramiseks kaaluti mõõteanumasse 10 grammi mulda ja lisati 50 ml destilleeritud vett, seejärel lahustati. Proovidel lasti seista toatemperatuuril 24 tundi ja seejärel mõõdeti lahuse pH elektrodid SenTix ja multimeeter WTW Multi 340i abil. Samast lahusest mõõdeti elektrijuhtivus Primo 5 mõõteseadmega. Enne järgmist mõõtmist loputati mõlemad elektrodid destilleeritud vees.

Mikroorganismide elutegevuse (BA- basal respiration activity) ja mikroobide hulga (SIR- substrate induced respiration) hindamiseks võeti kolm mullaproovi, enne katse algust üks alproov, katse keskel ja lõpus kõikidest substraaditest üks. Alproovi kuivaine mass oli määratud samaaegselt laboris läbi viidud kompostimiskatse raames (Teemus, 2023). Mikroorganismide basaalset hingamisaktiivsust (BA) ja mikroobide hulka (SIR) mõõdeti WTW OxiTop-C manomeetriliste seadme abil.

Basaalse hingamisaktiivsuse ehk mikroorganismide elutegevuse aktiivsuse mõõtmiseks kaaluti klaaspurki 100g mullaproovi, proovi pind tasandati. Ühest mullaproovist tehti kaks kordust. Seejärel lisati eraldi plasttopsi 0,5 tl natroonlubja pelleteid, mis asetati mõõtepea kandurile. Mõõtepea asetati klaaspurgile ja suleti klambrite abil. Hermeetiliselt suletud anum on võimalik mõõta rõhu muutumist, sest mikroobse hingamise käigus tarbitakse hapniku ja rõhk langeb, natroonlubja abil seotakse hingamise käigus eraldunud CO₂. Seeläbi eraldunud CO₂ ei mõjuta rõhku anumal. Mõõtepead aktiveeriti kontrolliga ja määrati mõõteperiood. Mullaproove hoiti pimedas inkubaatoris +25 °C juures 96 tundi, mõõtepea salvestas iga 16 minuti järel näidu. Mõõtmise lõppedes loeti kontrolliga tulemused mõõtepeadelt ning rõhulanguse kaudu arvutati mulla basaalne hingamisaktiivsus. (Platen & Writz, 1999)

BA leiti arvutuslikult vastavalt järgnevale valemile:

$$Hingamine(O_2) = \frac{M(O_2)}{R * T} * \frac{V(fg)}{m(KA)} * \frac{\Delta p}{t} \quad (3)$$

kus

Hingamine (O₂)- kuivainele taandatud basaalne hingamisaktiivsus ühikutes (mg - O₂ g - KA⁻¹h⁻¹).

M(O₂)- hapniku molaarmass 32 000 mg/mol

Δp- mõõdetud rõhumuutus (hPa)

R- universaalne gaasikonstant 83,14 hPa L mol⁻¹ K⁻¹

T- mõõtmistemperatuur 298.15 K

t- mõõtmise aeg 96 h

V(fg)- vaba gaasi ruumala (l), arvutatakse järgneva valemi kaudu:

$$V(fg) = V(tot) - V(topsik) - V(adsorbent) - V(muld) \quad (4)$$

kus

V(tot)- klaaspurgi koguruumala 1.07 l

V(topsik)- adsorbendi anuma ja kanduri ruumala 0.12 l

V(adsorbent)- topsikusse lisatud adsorbendi ruumala 0.003 l

V(muld)- mullaproovi ruumala 0.204 l

m(KA) mulla kuivaine mass (g) arvutatakse järgneva valemi kaudu:

$$m(KA) = m(mäg\ muld) * \frac{KA\%}{100\%} \quad (5)$$

kus

m(märgmuld) mõõtmiseks kaalutud mulla mass (100 g)

KA – mulla kuivaine sisaldus (%), arvutatakse valemist 1.

Mikroobse biomassi määramiseks lisati 100g mullaproovile 0,05 g glükoosi, saadud segu kaaluti kaheks 50 g osaks ja lisati klaaspurki. Glükoosi lisamisega aktiveeriti mikroobikoosluse hingamine. Plasttopsi lisati 0,5 tl natroonlubja pelleteid, mis asetati mõõtepea kandurile. Kandurid asetati klaaspurgile ja suleti hermeetiliselt. Proove inkubeeriti 22 °C juures 24 tundi ning mõõtmine toimus automaatselt, hingamisega seotud muutused registreeriti WTW OxiTop-C mõõtepeade abil, mõõtepea salvestas näidu iga 4 minuti järel. Rõhulanguse alusel arvutati mulla hingamisaktiivsus ja mikroobide hulk leiti süsiniku hulga seose kaudu. (Reuschenbach et al., 2003)

SIR leiti arvutuslikult vastavalt järgnevale valemile:

$$Hingamine(O_2) = \frac{M(O_2)}{R * T} * \frac{V(fg)}{m(KA)} * \frac{\Delta p}{t} \quad (6)$$

kus

Hingamine(O₂) - kuivainele taandatud hingamisaktiivsus ($mg - O_2 g - KA^{-1}h^{-1}$)

M(O₂) - hapniku molaarmass 32 000 mg/mol

Δp - mõõdetud rõhumuutus (hPa)

R - universaalne gaasikonstant 83,14 hPa L mol⁻¹ K⁻¹

T - mõõtmistemperatuur 295.15 K

t - mõõtmise aeg 24 h

V(fg) - vaba gaasi ruumala (l), arvutatakse järgnevast valemist:

$$V(fg) = V(tot) - V(topsik) - V(adsorbent) - V(muld) \quad (7)$$

kus

V(tot)- klaaspurgi koguruumala 1.07 l

V(topsik)- adsorbendi anuma ja kanduri ruumala 0.12 l

V(adsorbent)- topsikusse lisatud adsorbendi ruumala 0.003 l

V(muld) - mullaproovi ruumala 0.102 l

m(KA) mulla kuivaine mass (g) arvutatakse järgneva valemi kaudu:

$$m(KA) = m(\text{märgmuld}) * \frac{KA\%}{100\%} \quad (8)$$

kus

m(märgmuld) - mõõtmiseks kaalutud mulla mass (50 g)

KA - määratud kuivaine (%)

Mullaproovid mikroobne biomassi leiti arvutuslikult järgneva seose kaudu :

$$1 \text{ mg} - 0.2 \text{ g} - KA^{-1} h^{-1} = 28 \text{ mg} - C_{\text{Mikroobne}}^{-1} \quad (9)$$

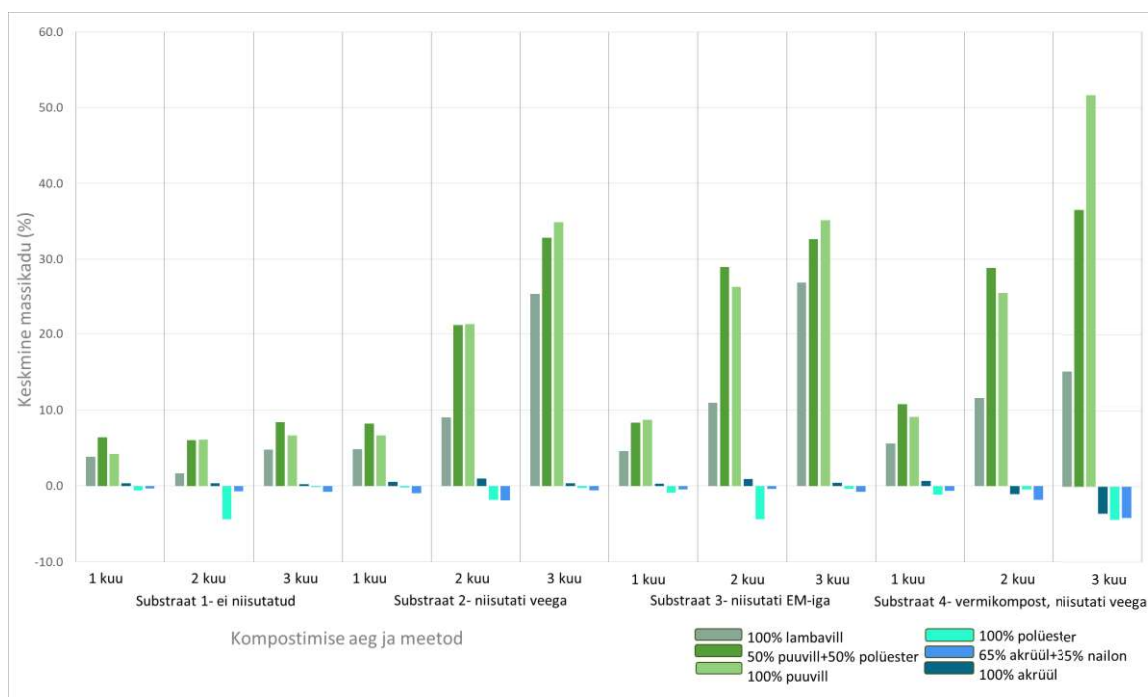
2.4. Andmetöötlus

Andmetöötluseks kasutati MS Excel ja Statistica 10 programme. Töös esitatud massikao graafikutel on toodud välja keskmised näitajad koos keskmise veaga. Materjalide massikadu võrreldi esimese ja teise, kolmanda, neljanda substraadi vahel t-testi (Paired Two Sample for Means) kaudu, et saada teada lagunemise astme usaldusväärsus ehk kas erinevus on seletatav juhuslikkusega või statistiliselt oluline. Statistilise olulisuse nivooiks võeti $p < 0,05$, kui p väärtus on väiksem olulisuse nivoost, siis tulemus on statistiliselt oluline ehk usaldusväärne, kui p väärtus on suurem, siis ei ole tegemist statistiliselt olulise erinevusega (Kaart, 2013).

Spearmani korrelatsioonianalüüsiga hinnati katseperioodil mõõdetud parameetrite omavahelist seost. Spearmani korrelatsioonikordajaga on võimalik mõõta arvtunnuste vahelise seose olemasolu, tugevust ja suunda, ühtlasi ei eelda see normaaljaotust ning ei ole tundlik erindite suhtes (Kaart, 2013). Spearmani korrelatsiooni puhul on korrelatsioonianalüüsi väljundiks ρ (rho), mille väärtused jäävad -1 ja 1 vahemikku ning $\rho = 1$ näitab positiivset seost ja $\rho = -1$ negatiivset seost ning 0 tähendab, et seos puudub väärtuste vahel (Karba, 2022). Tulemused on statistiliselt olulised kui olulisuse tõenäosus $p < 0,05$.

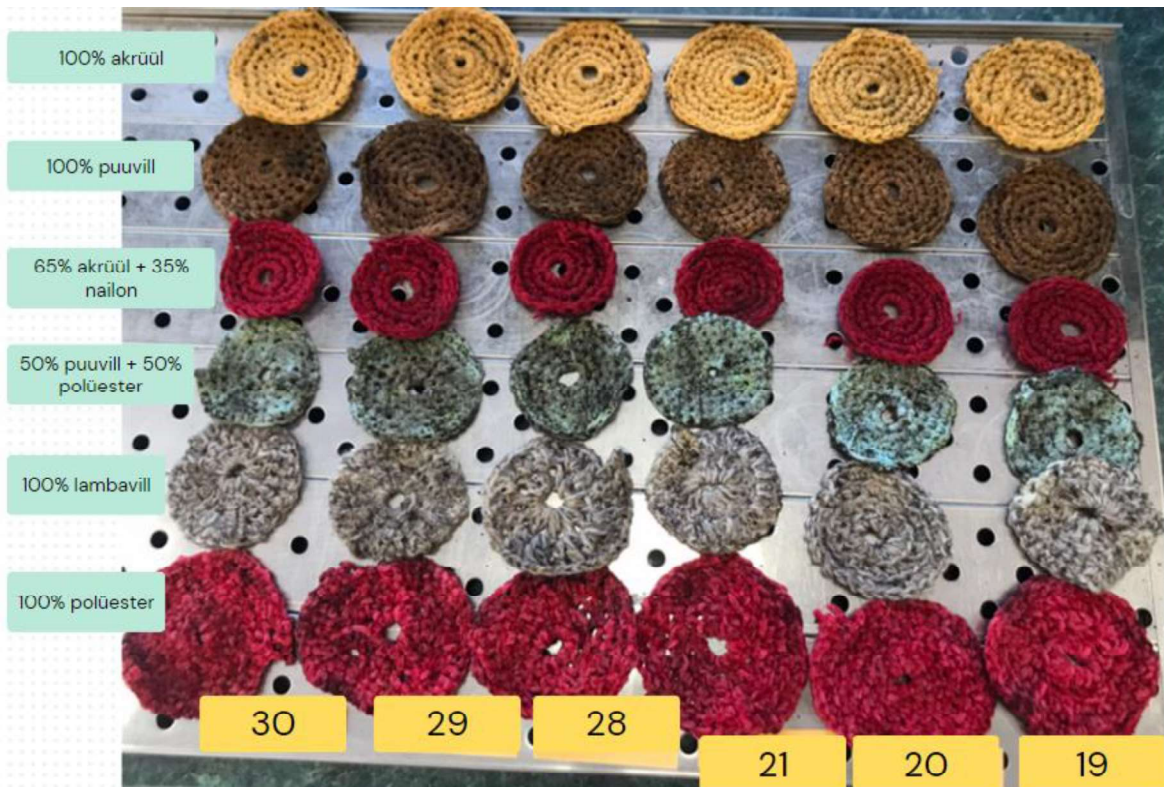
3. TULEMUSED

Massikadu esines kolme kuu jooksul kõikides substraatides 100% lambavill, 50% puuvill + 50% polüester, 100% puuvill katsekehadel. Katseperioodi jooksul ei esinenud massikadu 100% polüester ja 65% akrüül + 35% nailon katsekehadel ning 100% akrüüli katsekehadel esines massikadu kolmes esimeses substraadis ja neljandas esimesel kuul, teisel ja kolmandal kuul oli toimunud massitõus. (Joonis 3). Tulemuste koondtabel materjalide massikao ja katseperioodil mõõdetud parameetrite kohta leitav lisade all (Lisa 2).

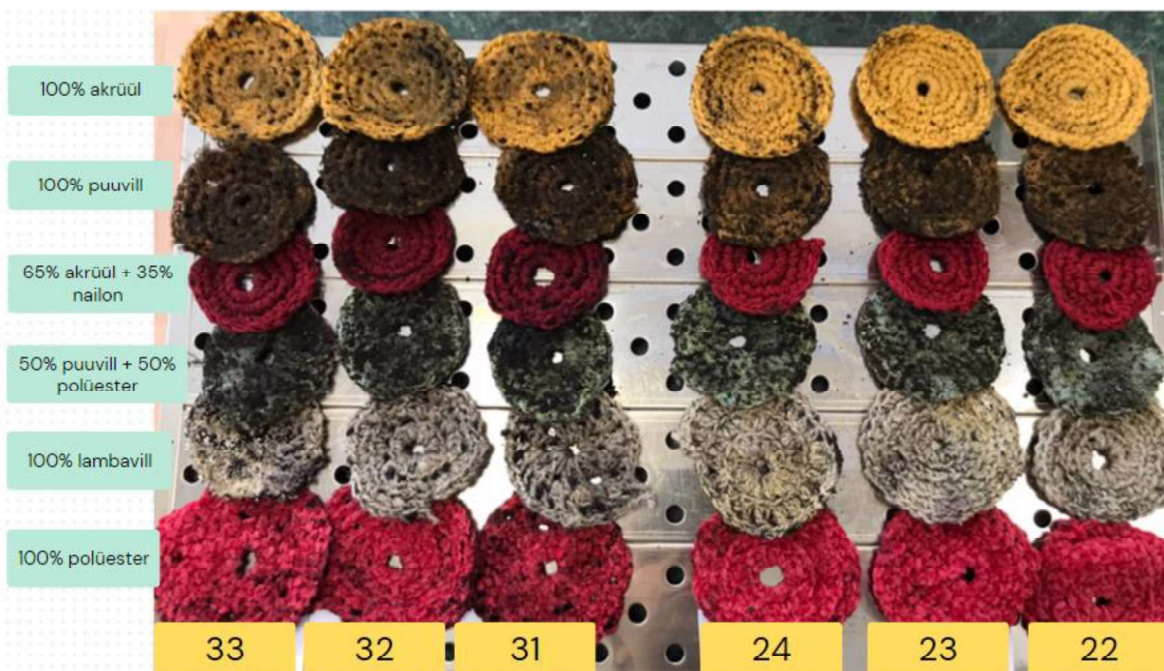


Joonis 3. Keskmine massikadu katseperioodi jooksul.

Esimese kuu lõpus ülesvõetu katsekehadel ei täheldanud visuaalseid muutusi (Joonis 4). Teise kuu lõpus, neljandast substraadist ehk vermikompostist üles võetud katsekehadel olid vähesed visuaalselt märgatavad lagunemisetunnused (100% puuvillastel katsekehadel lagunemiskottides nr 32 ja 33) (Joonis 5).



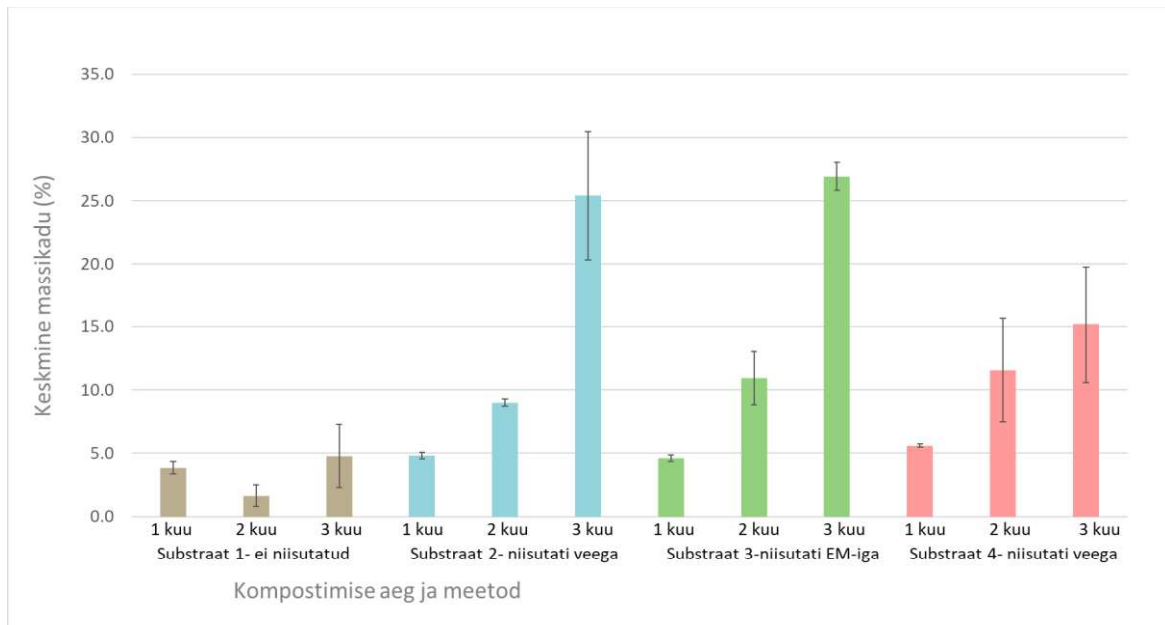
Joonis 4. Esimese kuu lõpus ülesvõetud lagunemiskotid nr 19, 20, 21 kompostrist 3 ja lagunemiskotid nr 28, 29, 30 kompostrist 4.



Joonis 5. Teise kuu lõpus ülesvõetud lagunemiskotid nr 22, 23, 24 kompostrist 3 ja lagunemiskotis nr 31, 32, 33 kompostrist 4.

3.1. 100% lambavill katsekehade massikadu

100% lambavilla katsekehadel esines kõige suurem massikadu teises, kolmandas ja neljandas substraadis kolmanda kuu lõpus. Esimest substraati katseperioodil ei niisutatud, ülesvõetud katsekehade keskmine massikadu esimese kuu lõpus oli $3,8 \pm 0,51\%$, teise kuu lõpus $1,6 \pm 0,83\%$, kolmanda kuu lõpus $4,8 \pm 2,49\%$. Teist substraati niisutati katseperioodil veega, ülesvõetud katsekehade keskmine massikadu esimese kuu lõpus oli $4,8 \pm 0,26\%$, teise kuu lõpus $9,0 \pm 0,28\%$, kolmanda kuu lõpus $25,4 \pm 5,05\%$. Kolmandat substraati niisutati efektiivsete mikroorgansimide lahusega, ülesvõetud katsekehade keskmine massikadu esimese kuu lõpus oli $4,6 \pm 0,24\%$, teise kuu lõpus $10,09 \pm 2,11\%$, kolmanda kuu lõpus $26,9 \pm 1,11\%$. Neljandat ehk vermikomposti niisutati katseperioodil veega, esimese kuu lõpus oli ülesvõetud katsekehade keskmine massikadu $5,6 \pm 0,12\%$, teise kuu lõpus $11,6 \pm 4,09\%$, kolmanda kuu lõpus $15,2 \pm 4,59\%$. (Joonis 6)

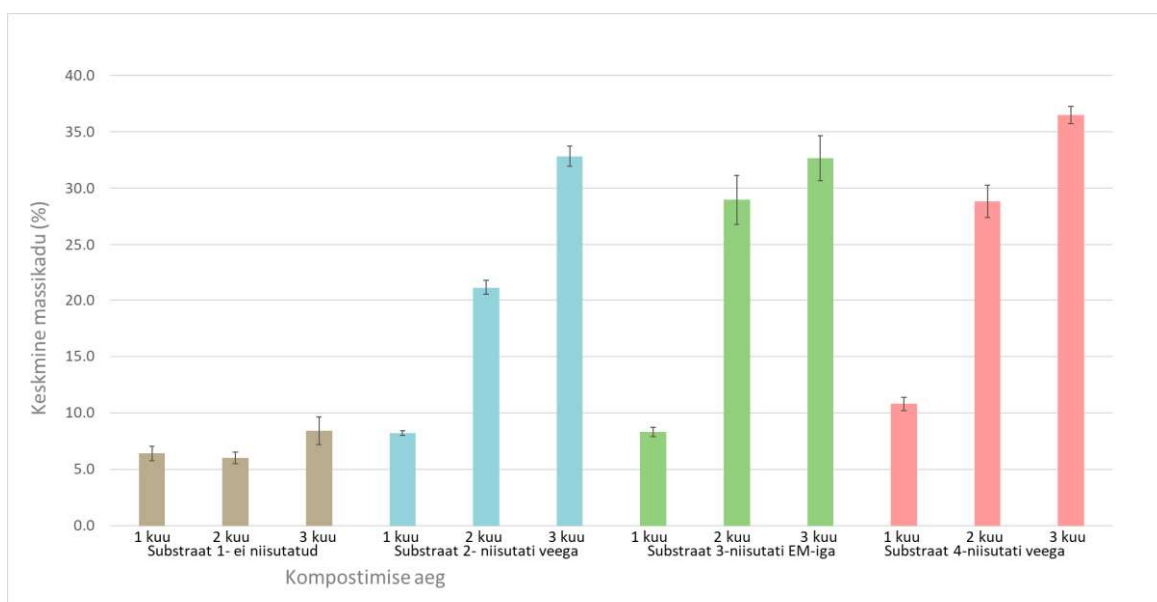


Joonis 6. 100% lambavill keskmine massikadu katseperioodi jooksul.

100% lambavill lagunes võrreldes 100% puuvill ja 50% puuvill+ 50% polüester materjalidega vähem. Kolmanda kuu lõpuks oli lambavill lagunenu teises ja kolmandas substraadis ligikaudu 10% ning neljandas 37% vähem kui 100% puuvill. 100% lambavill materjali massikao osas substraadis 1 ja substraadis 2 esines statistiliselt oluline erinevus ($p=0,03$; $p<0,05$) ning substraadis 2 oli 100% villa massikadu statistiliselt oluliselt kõrgem kui substraadis 1 ($p=0,01$; $p <0,05$). Samuti esines statistiliselt oluline erinevus lambavilla massikaol substraadis 1 ja 3 ($p=0,012$; $p<0,05$) ning 1 ja 4 substraadis ($p=0,023$; $p<0,05$), substraadis 3 oli 100% villa massikadu statistiliselt oluliselt kõrgem kui substraadis 1 ($p=0,006$; $p <0,05$) ning samuti ka substraadis 4 ($p=0,012$; $p <0,05$).

3.2. 50% puuvill + 50% polüester katsekehade massikadu

50% puuvill + 50% polüester kõige suurem keskmine massikadu esines kolmandal kuul teises, kolmandas ja neljandas substraadis olunud katsekehadel. Esimesest substraadist väljavõetud katsekehade keskmine massikadu esimesel kuul oli $6,4 \pm 0,64\%$, teisel kuul $6,0 \pm 0,52\%$, kolmandal kuul $8,4 \pm 1,23\%$. Teisest substraadist väljavõetud katsekehade keskmine massikadu oli esimese kuu lõpus $8,2 \pm 0,36\%$, teise kuu lõpus $21,2 \pm 0,67\%$, kolmanda kuu lõpus $32,8 \pm 0,89\%$. Kolmandast substraadist ülesvõetud katsekehade keskmine massikadu esimese kuu lõpus oli $8,3 \pm 0,41\%$, teise kuu lõpus $29,0 \pm 2,17\%$, kolmanda kuu lõpus $32,7 \pm 1,99\%$. Vermikompostist väljavõetud katsekehade keskmine massikadu esimese kuu lõpus oli $10,8 \pm 0,60\%$, teise kuu lõpus $28,8 \pm 1,44\%$, kolmanda kuu lõpus $36,5 \pm 0,77\%$. (Joonis 7)



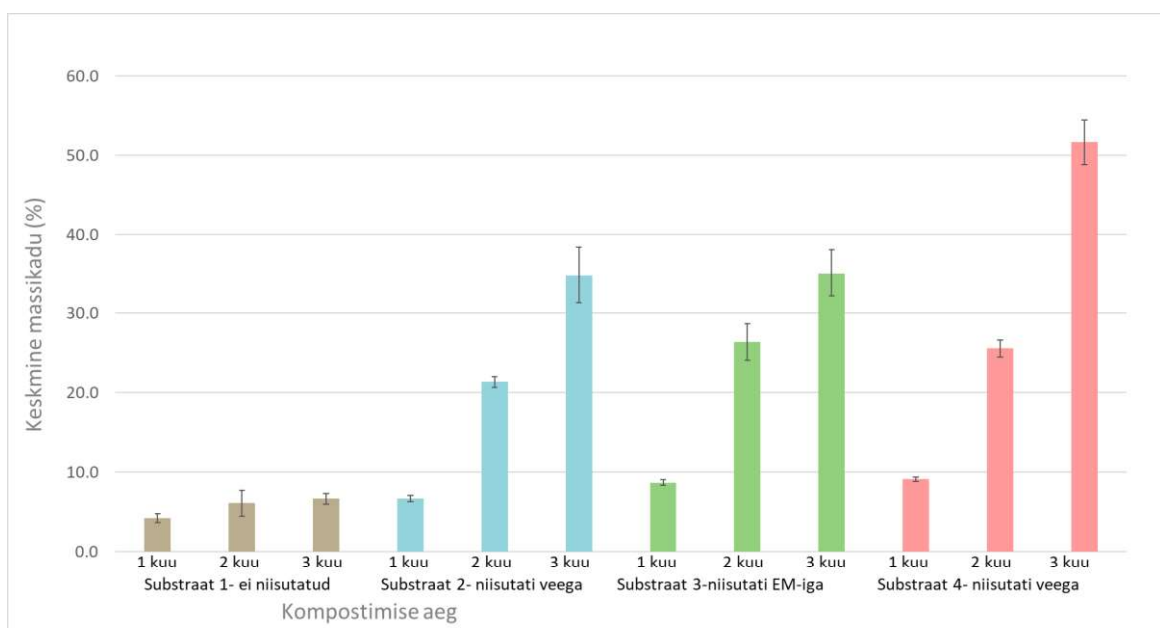
Joonis 7. 50% puuvill + 50% polüester keskmine massikadu katseperioodi jooksul.

50% puuvill+ 50% polüester segumaterjali massikadu suurenes kompostimisperioodi jooksul kõikides substraatides. Kolmanda kuu lõpus oli 50% puuvill+ 50% polüestermaterjali massikadu teises ja kolmandas substraadis kõigest 2% madalam kui 100% puuvillasel materjalil. Kuid neljandas, vermikompostis 15,2% madalam. Järelikult 100% puuvillane materjal laguneb vermikompostis oluliselt paremini kui 50% puuvill+ 50% polüester segumaterjal. 50% puuvill+ 50% polüester segumaterjali massikaol esines statistiliselt oluline erinevus substraadi 1 võrdluses substraadiga 2 ($p=0,003$; $p<0,05$) ja 3 ($p=0,003$; $p<0,05$) ning substraadiga 4- ($p=0,001$; $p<0,05$). Substraadis 2 oli 50% puuvill + 50% polüester segumaterjali massikadu oluliselt kõrgem kui substraadis 1 ($p=0,002$; $p<0,05$), samuti ka substraadis 3 ($p=0,001$; $p<0,05$) ning substraadis 4 oli eksimistõenäosus 0 ($p=0,000$;

$p < 0,05$), mis kinnitab, et substraadis 4 lagunes 50% puuvill+ 50% polüester paremini kui substraadis 1. 50% puuvill + 50% polüester segumaterjali kompostimisel substraadis 2 ja 3 ning 3 ja 4 ei esinenud statistiliselt olulist erinevust ($p > 0,05$) materjali massikao osas. Kuid substraadis 2 ja 4 esines massikao osas statistiliselt oluline erinevus ($p = 0,003$; $p < 0,05$) ning substraadis 4 oli massikadu kõrgem kui substraadis 2 ($p = 0,001$; $p < 0,05$).

3.3. 100% puuvill katsekehade massikadu

Katse suurim massikadu esines kolmanda kuu lõpus neljandas substraadis olnud 100% puuvillasel materjalil. Massikadu suurenes kompostimisperioodi jooksul igas substraadis ning kolmanda kuu lõpuks oli substraadis 2 ja 3 kompostitud 100% puuvillase materjali massikadu 28% kõrgem kui esimeses kuivas substraadis ning neljandas ehk vermikompostis 45% kõrgem kui esimeses substraadis. Esimesest kuivast kompostist väljavõetud katsekehade keskmine massikadu esimesel kuul oli $4,2 \pm 0,57\%$, teisel kuul $6,1 \pm 1,63\%$, kolmandal kuul $6,6 \pm 0,68\%$. Teisest veega niisutatud substraadist väljavõetud katsekehade keskmine massikadu oli esimese kuu lõpus $6,7 \pm 0,37\%$, teise kuu lõpus $21,3 \pm 0,68\%$, kolmanda kuu lõpus $34,9 \pm 3,54\%$. Kolmandast efektiivsete mikroorganismide lahusega niisutatud substraadist võetud katsekehade keskmine massikadu esimese kuu lõpus oli $8,7 \pm 0,38\%$, teise kuu lõpus $26,3 \pm 2,3\%$, kolmanda kuu lõpus $35,1 \pm 2,96\%$. Neljandast ehk vermikompostist väljavõetud katsekehade keskmine massikadu esimese kuu lõpus oli $9,1 \pm 0,28\%$, teise kuu lõpus $25,5 \pm 1,1\%$ ja kolmanda kuu lõpus $51,7 \pm 2,84\%$ (Joonis 8, Joonis 9)



Joonis 8. 100% puuvill keskmine massikadu katseperioodi jooksul.

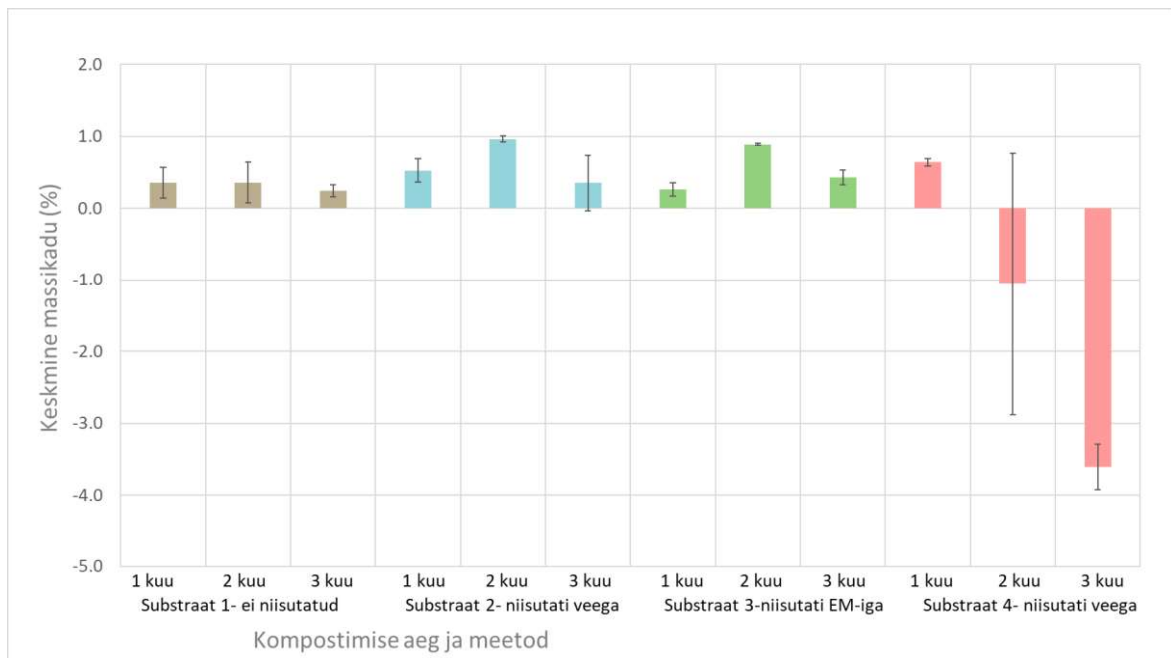
100% puuvill materjali massikadu katseperioodil substraadis 1 ja substraadis 2 oli statistiliselt oluliselt erinev ($p=0,005$; $p<0,05$) ning substraadis 2 oli 100% puuvilla massikadu oluliselt kõrgem kui substraadis 1 ($p=0,002$ $p<0,05$). Statistiliselt oluline erinevus esines ka puuvilla massikaol substraadi 1 ning substraadi 3 ($p=0,001$; $p<0,05$) ja 4 ($p=0,005$; $p<0,05$) võrdlusel. Substraadis 3 oli 100% puuvilla massikadu oluliselt suurem kui substraadis 1 ($p=0,001$; $p <0,05$) ning samuti ka substraadis 4 ($p=0,002$; $p <0,05$). Seevastu 100% puuvillase materjali kompostimisel substraadis 2 ja 3 ning 3 ja 4 ei esinenud statistiliselt olulist erinevust ($p>0,05$) materjali massikao osas. Kuid substraadis 2 ja 4 esines massikao osas statistiliselt oluline erinevus ($p=0,025$; $p<0,05$) ning substraadis 4 oli massikadu kõrgem kui substraadis 2 ($p=0,013$; $p<0,05$).



Joonis 9. Kolmanda kuu lõpus vermikompostist (substraat 4) ülesvõetud 100% puuvill katsekehad.

3.4. 100% akrüül katsekehade massikadu

100% akrüül esimesest substraadist väljavõetud katsekehade keskmine massikadu esimese kuu lõpus $0,4 \pm 0,21\%$, teise kuu lõpus $0,4 \pm 0,28\%$, kolmanda kuu lõpus $0,2 \pm 0,08\%$. Teisest substraadist väljavõetud katsekehade keskmine massikadu oli esimese kuu lõpus $0,5 \pm 0,16\%$, teise kuu lõpus $1,0 \pm 0,04\%$, kolmanda kuu lõpus $0,4 \pm 0,38\%$. Kolmandast substraadist võetud katsekehade keskmine massikadu esimese kuu lõpus oli $0,3 \pm 0,09\%$, teise kuu lõpus $0,9 \pm 0,01\%$, kolmanda kuu lõpus $0,4 \pm 0,10\%$. Vermikompostist väljavõetud katsekehade keskmine massikadu esimese kuu lõpus oli $0,6 \pm 0,05\%$, teise kuu lõpus mass tõusis $1,1 \pm 1,84\%$, kolmanda kuu lõpus mass tõusis $3,6 \pm 0,32\%$. (Joonis 10).



Joonis 10. 100% akrüül keskmine massikadu katseperioodi jooksul.

3.5. 100% polüester katsekehade massikadu

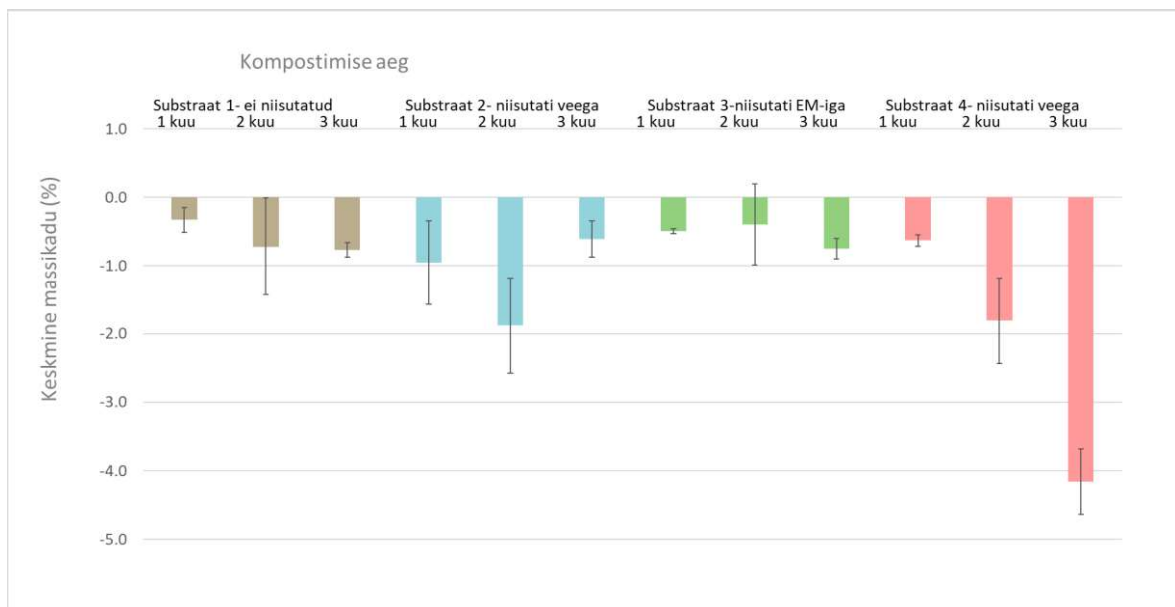
100% polüester katsekehade suurim massitõus toimus esimeses, teises ja kolmandas substraadist teisel kuul ning neljandas substraadist kolmandal kuul. Esimesest substraadist väljavõetud katsekehade keskmine massitõus esimesel kuul oli $0,6 \pm 0,1\%$, teise kuu lõpus $4,4 \pm 1,7\%$, kolmanda kuu lõpus $0,2 \pm 0,1\%$. Teisest substraadist väljavõetud katsekehade keskmine massitõus oli esimese kuu lõpus $0,2 \pm 0,1\%$, teise kuu lõpus $1,8 \pm 1,1\%$, kolmanda kuu lõpus $0,3 \pm 0,1\%$. Kolmandast substraadist võetud katsekehade keskmine massitõus esimese kuu lõpus oli $0,9 \pm 0,15$, teise kuu lõpus $4,4 \pm 1,6\%$, kolmanda kuu lõpus $0,4 \pm 0,1\%$. Vermikompostist võetud katsekehade keskmine massitõus esimese kuu lõpus oli $1,2 \pm 0,2\%$, teise kuu lõpus $0,5 \pm 1,6\%$, kolmanda kuu lõpus $4,4 \pm 0,7\%$. (Joonis 11)



Joonis 11. 100% polüester keskmine massitõus katseperioodi jooksul.

3.6. 65% akrüül+ 35% nailon katsekehade massikadu

65% akrüül+ 35% nailon katsekehade suurim massitõus toimus kolmandal kuul vermikompostis. Esimesest substraadist väljavõetud katsekehade keskmine massitõus esimese kuu lõpus oli $0,3\pm 0,18\%$, teise kuu lõpus $0,7\pm 0,71\%$, kolmanda kuu lõpus $0,8\pm 0,11\%$. Teisest substraadist väljavõetud katsekehade keskmine massitõus oli esimese kuu lõpus $1,0\pm 0,62\%$, teise kuu lõpus $1,9\pm 0,70\%$, kolmanda kuu lõpus $0,6\pm 0,26\%$. Kolmandast substraadist võetud katsekehade keskmine massitõus esimese kuu lõpus oli $0,5\pm 0,03\%$, teise kuu lõpus $0,4\pm 0,59\%$, kolmanda kuu lõpus $0,7\pm 0,15\%$. Vermikompostist võetud katsekehade keskmine massitõus esimese kuu lõpus oli $0,6\pm 0,08\%$, teise kuu lõpus $1,8\pm 0,63\%$, kolmanda kuu lõpus $4,2\pm 0,48\%$.(Joonis 12)



Joonis 12. 65% akrüül+35% nailon keskmine massitõus katseperioodi jooksul.

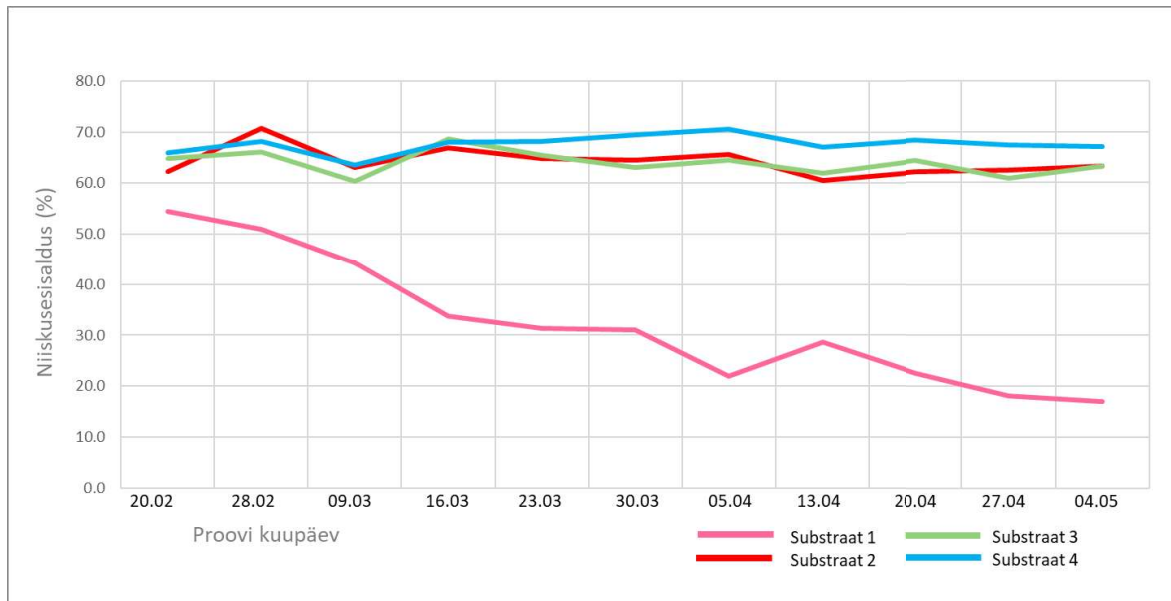
Katseperioodi jooksul ei esinenud massikadu 100% polüester ja 65% akrüül + 35% nailon katsekehadel üheski substraadis. Võimalik, et 90 päevane katseperiood ei olnud piisav ning lagunemist tuleks uurida pikema perioodi jooksul, sest 100% polüester materjalil toimus esimeses kolmes substraadis teisel kuul massitõus ning kolmandaks kuuks oli massitõus vähenenud sisuliselt nulli lähedale. Seevastu 65% akrüül + 35% nailon käitus katseperioodil kõikides substraatides sarnaselt, iga kuuga oli massitõus suurenenud.

3.7. Erinevate materjalide massikadu vermikompostis

Katseperioodi alguses lisati neljandasse substraati 250 *Dendrobaena veneta* vihmaussi suuruses 2 ja 3. Katse lõpus oli kompostis alles 197 vihamussi. Katse tulemused näitasid, et neljandas substraadis ehk vermikompostis lagunesid 100% vill, 50% puuvill+50%polüester segumaterjal ja 100% puuvill rohkem kui esimeses, teises ja kolmandas substraadis (Joonis 6, 7, 8). Katseperioodil neljandas substraadi niiskusesisaldus oli 63,5%-70,5% vahemikus, seejuures kõrgem kui esimeses kolmes substraadis (Joonis 13) ning mulla pH oli katseperioodil vermikompostis mõõdukalt happeline, kõikumine toimus 5,2-5,5 vahemikus (Joonis 15), antud näitajate põhja oli vihmausside elutegevuseks keskkond sobilik. Dominguez & Edwards (2011a) on samuti leidnud, et epigeilised vihmaussiliigid eelistavad happelisemat substraati (5). Seejuures Diaz (2011) on märkinud, et mikroobidele soodsaim pH vahemik on 6,0-7,5, kuid mõõdukas kõrvalekalle (5,5-8,0 vahemikus) ei pruugi veel oluliselt kahjustada kompostimisprotsessi. Mikroobne biomass oli vermikompostis teisel ja kolmandal kuul substraadi 2 ja 3-ga võrreldes ligikaudu 10% madalam (Joonis 17-18). Kolmandal kuul oli vermikomposti mikroobne biomass substraadiga 2 sarnasel tasemel (erinevus 1%) ja 5% kõrgem kui substraadis 3. Seega arvatavasti vihmaussid võisid aidata luua mikroorganismide tegevusele soodsamad keskkonnatingimused ning mõningad looduslikud materjalid võivad vermikompostimisel laguneda rohkem kui teistel kompostimisviisidel.

3.8. Substraadi niiskusesisaldus

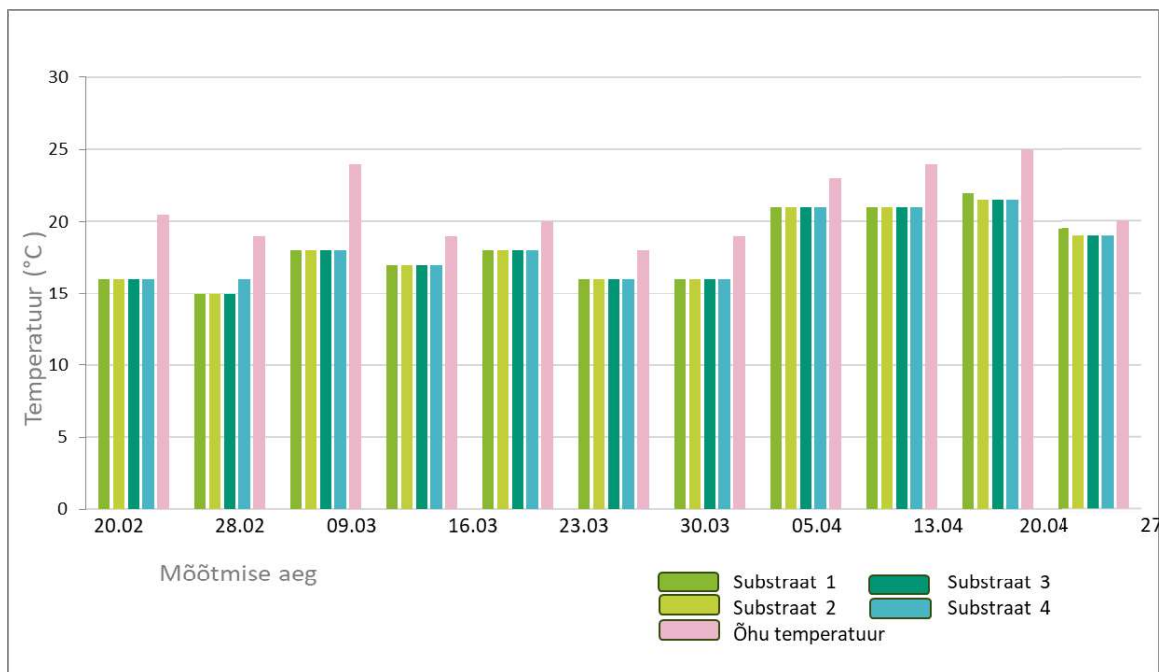
Esimese substraadi niiskusesisaldus langes katseperioodil üle kolme korra, esimesel mõõtmisel oli niiskusesisaldus 54,4%, katse lõpus 17%. Teises, kolmandas ja neljandas substraadist püsis niiskusesisaldus 60-70,8% vahemikus. Teise substraadi niiskusesisaldus oli katseperioodil 60,6% - 70,8% vahemikus, kolmandal 60,3%-68,7% vahemikus ja neljandal 63,5%-70,5% vahemikus. (Joonis 13)



Joonis 13. 1-4 substraatide niiskusesisaldus.

3.9. Substraadi temperatuur

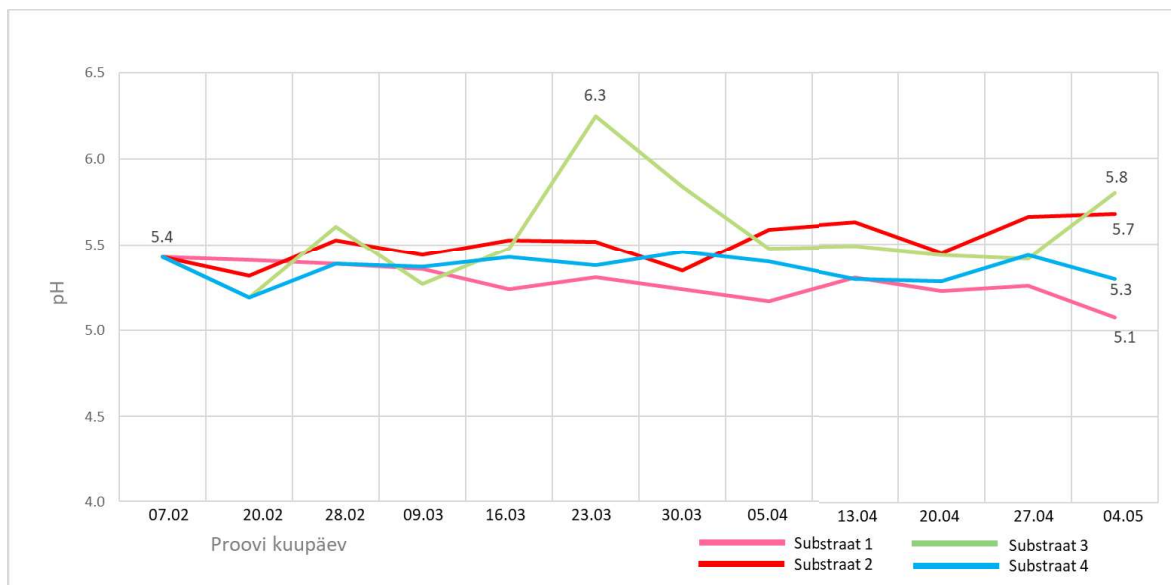
Substraatide temperatuurid jäid katseperioodil +15-22 °C vahemikku. Kõige madalam temperatuur mõõdeti neljandal nädalal esimeses, teises ja kolmandas substraadis +15°C ja neljandas substraadis +16 °C. Järgneval kolmel nädalal oli temperatuur +17-18 °C vahemikus ning kaheksandal ja üheksandal nädalal langes temperatuur kõikides substraatides +16 °C juurde. Katseperioodi viimasel kuul olid temperatuurid +19-22 °C vahemikus. Kõige kõrgemad temperatuurid mõõdeti üks nädal enne katse lõppu, esimeses substraadis +22 °C, teises, kolmandas ja neljandas 21,5 °C. Substraatide temperatuuride kõikumine on seletatav ruumi ebaühtlase temperatuuriga. Ruumi õhutemperatuur jäi katseperioodil 18-25 °C vahemikku. (Joonis 14)



Joonis 14. Substraatide temperatuuri ja õhutemperatuuri muutus.

3.10. Substraadi happesus

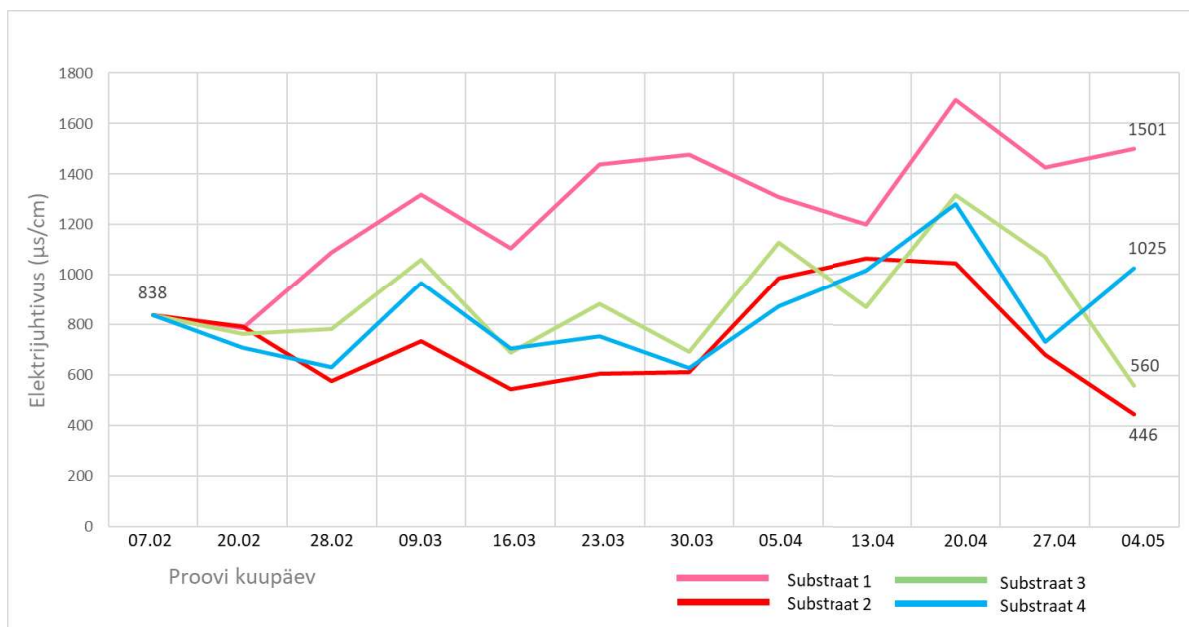
Substraatides kasutatud mullasegu pH oli katse alguses 5,4. Katseperioodi madalaim pH (5,1) mõõdeti katse lõpus esimeses kompostis, mida katseperioodil ei niisutatud, kõrgeim (6,3) tulemus mõõdeti teisel kuul kolmandas substraadis, mida niisutati efektiivsete mikroorganismide lahusega. Esimese substraadi mulla pH oli katseperioodil mõõdukalt happeline, kuid langes katse jooksul iga kuu, katse lõpus mõõdeti tulemuseks 5,1. Võrreldes teise, kolmanda ja neljanda substraadi tulemustega, langes esimeses substraadi pH katseperioodi lõpuks kõige madalamale. Teise ja kolmanda substraadi mulla happesuse osas esines katse jooksul kõikumist, kuid katse lõpuks olid lõpptulemused algtasemest kõrgemad. Teises substraadis oli katse lõpus mulla pH 5,7 ja kolmandas 5,8 ehk oli muutunud mõõdukalt happelisest nõrgalt happeliseks. Neljandas substraadis oli mulla pH katseperioodil mõõdukalt happeline, kõikumine toimus 5,2-5,5 vahemikus, katse lõpus mõõdeti tulemuseks 5,3. (Joonis 15)



Joonis 15. Substraatide happesuse näitajad (pH) katseperioodil.

3.11. Substraadi elektrijuhtivus

Katse alguses mullasegu üldproovi elektrijuhtivus oli 838 $\mu\text{s/cm}$. Katseperioodi madalaim elektrijuhtivus mõõdeti teises substraadis kolmanda kuu lõpus 446 $\mu\text{s/cm}$, kõrgeim tulemus leiti esimeses substraadis kolmanda kuu lõpus 1692 $\mu\text{s/cm}$. Võrreldes algtasemega, siis esimeses ja neljandas substraadis tõusis elektrijuhtivus katseperioodi lõpuks, teises ja kolmandas substraadis langes madalamale. (Joonis 16)

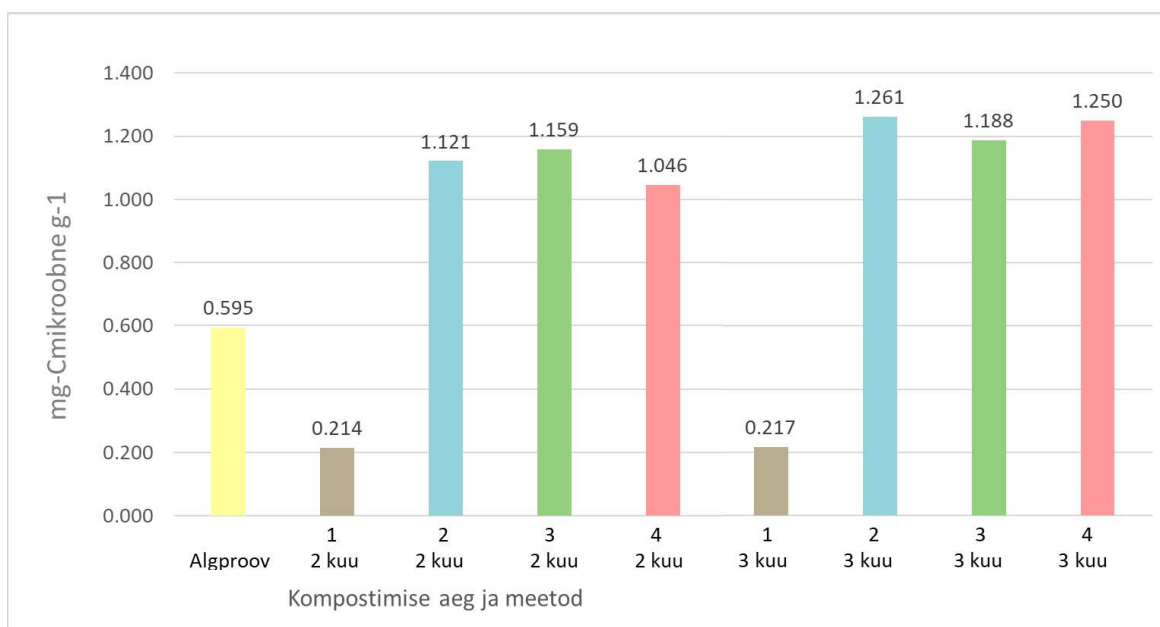


Joonis 16. Substraatide elektrijuhtivus ($\mu\text{s/cm}$) katseperioodil.

3.12. Substraadi mikroobne hingamisaktiivsus ja mikroobne biomass

Mikroobse biomassi algproov oli $0,595 \text{ mg-C}_{\text{Mikroobne}}^{-1}$ ning teise ja kolmanda kuu kõikide substraatide tulemused jäid $0,214 - 1,261 \text{ mg-C}_{\text{Mikroobne}}^{-1}$ vahemikku. Madalaim mikroobne biomass oli teisel kuul esimeses substraadis $0,214 \text{ mg-C}_{\text{Mikroobne}}^{-1}$ ja kolmandal kuul esimeses substraadis $0,217 \text{ mg-C}_{\text{Mikroobne}}^{-1}$. Teisel kuul oli veega niisutatud substraadi mikroobne biomass $1,121 \text{ mg-C}_{\text{Mikroobne}}^{-1}$, vermikompostis $1,046 \text{ mg-C}_{\text{Mikroobne}}^{-1}$. Teise kuu kõrgeim mikroobne biomass $1,159 \text{ mg-C}_{\text{Mikroobne}}^{-1}$ mõõdeti kolmandas substraadis. Kõrgeim mikroobne biomass $1,261 \text{ mg-C}_{\text{Mikroobne}}^{-1}$ mõõdeti kolmandal kuul veega niisutatud teises substraadis ja neljandas substraadis ehk vermikompostis $1,250 \text{ mg-C}_{\text{Mikroobne}}^{-1}$. Kolmanda kuu teise substraadi mikroobne biomass oli 11% kõrgem kui teisel kuul ja samas oli ligikaudu 83% kõrgem kolmanda kuu esimese substraadi tulemusest. Kolmanda kuu vermikomposti substraadi mikroobne biomass oli 16% kõrgem kui teisel kuul ja samas oli ligikaudu 83% madalam kolmanda kuu esimese substraadi tulemusest.

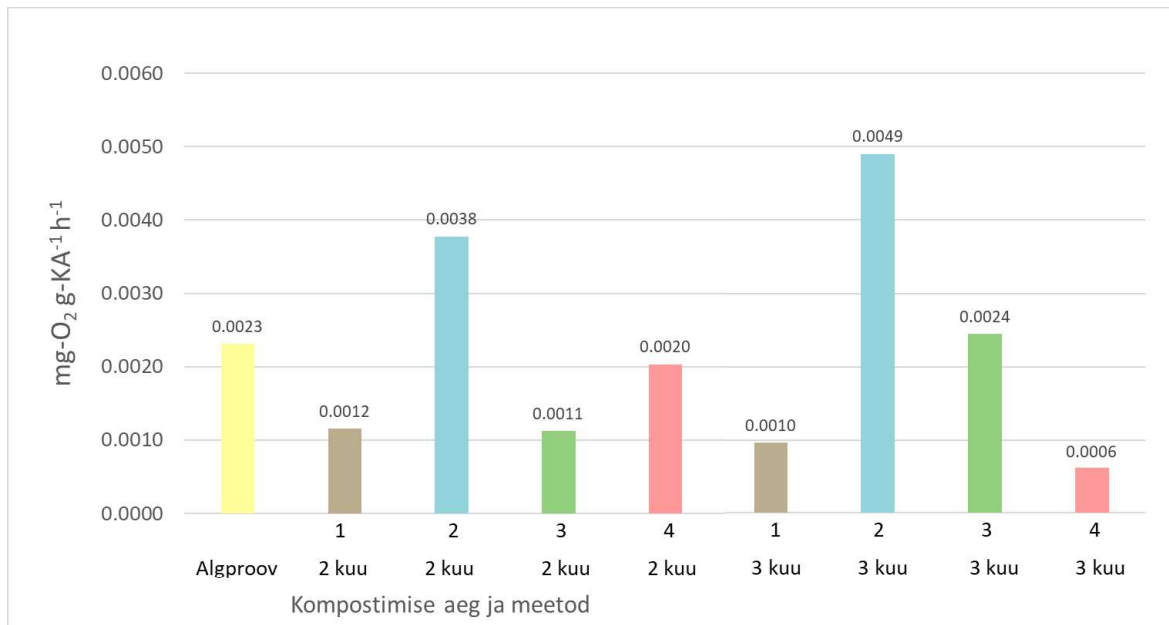
Kolmandal kuul efektiivsete mikroorganismide lahusega niisutatud substraadi mikroobse biomassi tulemus $1,188 \text{ mg-C}_{\text{Mikroobne}}^{-1}$ oli 2,4% kõrgem kui teisel kuul, seejuures 5% madalam katse kõrgemaist tulemusest kolmanda kuu teisest substraadist. (Joonis 17)



Joonis 17. Mikroobne biomass katseperioodil.

Mikroorganismide hingamisaktiivsuse algproov oli $0,002 \text{ mg-O}_2 \text{ g-KA}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ning teise ja kolmanda kuu kõikide substraatide tulemused jäid vahemikku $0,001 - 0,005 \text{ mg-O}_2 \text{ g-KA}^{-1} \text{ h}^{-1}$. Teisel kuul esimeses ja kolmandas ning kolmandal kuul esimeses ja neljandas

substraadis oli hingamisaktiivse mõõtetulemus $0,001 \text{ mg-O}_2 \text{ g-KA}^{-1} \text{ h}^{-1}$. Algprooviga samal tasemel oli hingamisaktiivsus teisel kuul vermikompostis ja kolmandal kuul efektiivsete mikroorganismide lahusega niisutatud kolmandas substraadis. Teise ja kolmanda kuu kõrgeim hingamisaktiivsus oli veega niisutatud teises substraadis $0,004 \text{ mg-O}_2 \text{ g-KA}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ja kolmandal kuul $0,005 \text{ mg-O}_2 \text{ g-KA}^{-1} \text{ h}^{-1}$. (Joonis 18)



Joonis 18. Mikroobne hingamisaktiivsus katseperioodil.

3.13. Katse jooksul mõõdetud parameetrite omavaheliste seoste analüüs

Spearmani korrelatsioonianalüüsiga katse parameetrite omavaheliste seoste analüüsimisel ei leitud tugevaid statistilisi seoseid. Statistiliselt olulised näitajad on tabelis markeeritud punasega. Analüüs teostati kõikide substraatide (substraadi nr: 1,2,3,4) ning materjalide (materjali kood: 1, 2, 3, 4, 5, 6) ja kõikide katseperioodil (aja kood: 1, 2, 3 kuud) mõõdetud parameetrite kohta. (Tabel 1)

Tabel 1. Katse parameetrite Spearmani korrelatsioonimaatriks.

	Substraadi nr	Materjali kood	Aja kood	1 korduse keskmine maasikadu (%)	Niiskus (%)	Substraadi temperatuur (°C)	pH	EC	SIR	BA
Substraadi nr	1.00	0.00	0.00	0.07	0.78	-0.07	0.24	-0.45	0.22	-0.04
Materjali kood	0.00	1.00	0.00	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Aja kood	0.00	0.00	1.00	0.11	0.15	0.49	0.18	-0.12	-0.75	-0.78
1 korduse keskmine maasikadu (%)	0.07	0.11	0.11	1.00	0.09	0.06	0.18	-0.15	-0.04	-0.02
Niiskus (%)	0.78	0.00	0.15	0.09	1.00	-0.31	0.50	-0.50	0.09	-0.15
Substraadi temperatuur (°C)	-0.07	0.00	0.49	0.06	-0.31	1.00	-0.09	-0.14	-0.11	-0.15
pH	0.24	0.00	0.18	0.18	0.50	-0.09	1.00	-0.79	0.11	0.18
EC	-0.45	0.00	-0.12	-0.15	-0.50	-0.14	-0.79	1.00	-0.16	-0.34
SIR	0.22	0.00	-0.75	-0.04	0.09	-0.11	0.11	-0.16	1.00	0.72
BA	-0.04	0.00	-0.78	-0.02	-0.15	-0.15	0.18	-0.34	0.72	1.00

Analüüsi tulemused näitavad, et katsekehade massikao ning niiskuse ($\rho=0,09$, $p=0,05$), substraadi temperatuuri ($\rho=0,06$, $p=0,05$) ja pH ($\rho=0,18$, $p=0,05$) vahel esines nõrk positiivne seos. Katsekehade massikao ja elektrijuhtivuse (EC) ($\rho=-0,15$, $p=0,05$) vahel esines nõrk negatiivne seos. Katsekehade massikao ning mikroobse biomassi ($\rho=-0,04$, $p=0,05$) ja hingamisaktiivsuse ($\rho=-0,02$, $p=0,05$) vahel esines väga madal negatiivne seoses. Niiskuse ja mikroobse biomassi vahel esines väga nõrk positiivne seos ($\rho=0,09$, $p=0,05$) ning niiskuse ja basaalse hingamise vahel esines nõrk negatiivne seos ($\rho=-0,15$, $p=0,05$).

Substraatide niiskuse ja temperatuuri vahel esines statistiliselt oluline madal negatiivne seos ($\rho=-0,31$, $p=0,05$). Substraatide pH ja niiskuse vahel esines statistiliselt oluline mõõdukalt positiivne seos ($\rho=0,50$, $p=0,05$) ning elektrijuhtivuse ja niiskuse vahel esines statistiliselt oluline mõõdukalt negatiivne seos ($\rho=-0,50$, $p=0,05$). Elektrijuhtivuse ja pH vahel esines statistiliselt oluline mõõdukalt negatiivne seos ($\rho=-0,79$, $p=0,05$). Elektrijuhtivuse ja mikroobse biomassi vahel esines madal negatiivne seos ($\rho=-0,16$, $p=0,05$). Elektrijuhtivuse ja basaalse hingamise vahel esines statistiliselt oluline madal negatiivne seos ($\rho=-0,34$, $p=0,05$). Basaalse

hingamisaktiivsuse ja mikroobse biomassi vahel esines statistiliselt oluline mõõdukalt positiivne seos ($\rho=0.72$, $p=0,05$).

4. ARUTELU JA JÄRELDUSED

Lagunemiskatse kestis kolm kuud, kasutatud materjalide ja substraatide võrdlusel selgus, et looduslikud 100% puuvill, 100% lambavill ja loodusliku kiu sisaldusega 50% puuvill + 50% polüester materjalid lagunesid katseperioodil veega niisutatud teises substraadis, efektiivsete mikroorganismide lahusega niisutatud kolmandas substraadis ning veega niisutatud neljandas substraadis ehk vermikompostis. Szostak-Kotowa (2004) on märkinud, et looduslikul toorainel põhinevates kidudes on mikroorganismidele toitained paremini kättesaadavad ning lagunevad paremini kui sünteetilised kiud. Käesoleva katse tulemused kinnitavad eelnevat väidet, sest 100% polüester ja 65% akrüül + 35% nailon sünteetilised materjalid ei lagunenud katseperioodil üheski substraadis.

Tervonen (2016) on märkinud, et akrüülkiud on kõdunemise suhtes väga vastupidav. Seejuures kompostimisel 100% akrüül lagunes vähesel määral (massikadu kuni 1%) esimeses kolmes substraadis ning neljandas esines massitõus. Põhjuseks võib olla, et vermikompostis vihmaussid enda elutegevusega pärssisid 100% akrüül materjali lagunemist või teisalt muutisid keskkonna soodsamaks mikroorganismide jaoks, kes teisel ja kolmandal kuul koloniseerisid materjali.

Kõige kuivemas ehk esimeses substraadis olnud 100% looduslike ja loodusliku kiu sisaldusega materjalide massikadu katseperioodil oli tunduvalt madalam kui teistes substraatides ning materjalide massikadu ei suurenenud katseperioodil. Ühtlasi esimese substraadi niiskusesisaldus langes katse lõpuks 37,4% võrra. See näitab, et substraadi niiskusesisaldusel on otsene mõju kompostimisprotsessile, ka Diaz (2011) leidis substraadi niiskusesisalduse ja kompostimisprotsessi vahel seose, liiga kuiv keskkond pidurdab lagunemisprotsessi.

Teise, kolmanda ja neljanda substraadi niiskusesisaldus ja pH püsis katseperioodil kompostimiseks sobivas vahemikus. Elektrijuhtivus katseperioodil suurenes esimeses kuivas substraadis ja neljandas ehk vermikompostis ning langes teises ehk veega niisutatud ja kolmandas ehk EM lahusega niisutatud substraadis. Elektrijuhtivusel esines mõõdukalt negatiivne korrelatsioon niiskuse ja pH-ga. Substraadi pH võib olla seotud niiskusesisaldusega ning madalam pH võib suurendada elektrijuhtivuse taset (Mohd-Aizat et al., 2014). Substraatide temperatuuri osas esines kõikumisi +15-22°C vahemikus, mis on seletav ruumi ebaühtlase temperatuuri ja orgaanilise jäätmete väikse mahuga. Ka Ayilara (2020) on leidnud, et vähese jäätmete mahu korral võib kompostimisprotsessi kõrgemate temperatuuride saavutamine olla keeruline. Substraatide temperatuur oleks võinud olla ühtlasem ja kõrgem, sest bioloogiline

mitmekesisus on 25-45°C juures kõige kõrgem (Ayilara et al., 2020; Kriipsalu et al., 2016) ning lagunemine efektiivsem.

Veega niisutatud teises ja efektiivsete mikroorganismidega niisutatud kolmandas substraadis 100% puuvill ja 50% puuvill+ 50% polüester materjalide keskmine summaarne massikadu katseperioodil oli sarnasel tasemel, erinevust praktiliselt ei esinenud, seevastu 100% lambavill lagunes 9% vähem. Joshi (2019) on märkinud, et efektiivsed mikroorganismid aitavad muuta mikroobsest keskkonda selliselt, et orgaanilise aine lagunemine peaks toimuma kiiremini. Selgus, et efektiivsete mikroorganismide lahusega niisutamine ei suurendanud märkimisväärselt looduslike ja loodusliku kiu sisaldusega materjalide massikadu. 100% lambavilla madalam lagunemine võis olla tingitud kiudude spetsiifikast, mis ei toeta mikroorganismide tegevust ning lagunemine toimub aeglasemalt. Ka Broda (2016) leidis, et villa kiududele on mikroorganismidel keeruline kinnituda ning ebatasasused kiudude pinnal, hüdrofoobne pind ja kompaktne struktuur ei mõju hästi mikroorganismide tegevusele ja pidurdab seeläbi lagunemist.

Katses selgus, et neljas substraat ehk vermikompostimine mõjus positiivselt looduslike materjalide lagunemisele. Neljandas substraadis oli 100% puuvillase materjali keskmine summaarne massikadu katseperioodil 18% kõrgem kui 100% lambavillal ning 50% puuvill+ 50% polüesteri massikadu oli 15% kõrgem lambavilla massikaost. Ühtlasi 100% puuvilla lagunemine oli vermikompostis 5% kõrgem kui kolmandas substraadis ja 8% kõrgem kui teises substraadis. Samuti Li (2010) leidis, et 100% puuvillane materjal võib kolme kuulise perioodi jooksul kompostides laguneda 50-77% ulatuses. Eelnevast järeldub, et puuvillase materjalide lagunemine võib toimuda vermikompostis paremini kui teistes kompostimisviisides, sest vihmausside elutegevus võib aidata kaasa lagundavate mikroorganismide tegevusele.

Seejuures 100% lambavill materjali keskmine summaarne massikadu katseperioodil vermikompostis oli ligikaudu 3% madalam kui veega niisutatud teises ja EM lahusega niisutatud kolmandas substraadis. Põhjus võib olla selles, et villakiudude koostises sisalduvad ained ei sobinud vihamussidele ning nende elutegevus ei aidanud kaasa mikroorganismide aktiveerumisele ja orgaanilise materjali lagunemisele (Shanskiy et al., 2016; Vuković et al., 2021).

Li (2010) leidis, et kompostimist võib kasutada tekstiiljätmete lagunemise testimiseks. Käesoleva magistritöö raames läbiviidud lagunemiskatsega selgus, et sobivates keskkonnatingimustes võivad looduslikud kiud olla suurema lagunemise potentsiaaliga ning puuvillane materjal laguneb hästi vermikompostimisel, sellest

tulenevalt võiks kaaluda looduslike materjalide kompostimist jäätmete töötlemise viisina.

Tulevikus võiks edasi uurida sünteetiliste materjalide lagunemise potentsiaali pikema perioodi jooksul, et selgitada välja, kas ja kui suures ulatuses esineb massikadu. Ühtlasi tasuks uurida efektiivsete mikroorganismide lahuse erinevate kontsentratsioonide mõju looduslikele ja sünteetilistele materjalidele lagunemisele, sest käesolevas katses kasutatud lahus ei avaldanud tekstiilmaterjalide lagunemisele märkimisväärset mõju.

KOKKUVÕTE

Käesolevas magistritöös vaadeldi tekstiilmaterjalide kompostimist alternatiivse jäätmekäitlusviisina. Eesmärgiks oli selgitada välja looduslike ja sünteetiliste tekstiilmaterjalide lagunemise aste, leida efektiivseim kompostimisviis ning hinnata looduslike ja sünteetiliste kiudude lagunemise erinevust.

Töös viidi läbi kuue erineva materjaliga (100% polüester, 100% lambavill, 50% puuvill+50% polüester, 65% akrüül+35% nailon, 100% puuvill, 100% akrüül) kolme kuu pikkune lagunemiskatse, nelja erineva töötusega substraadis (esimene- ei niisutatud, teine-niisutati veega, kolmas- niisutati efektiivsete mikroorganismide lahusega, neljas- vermikompost).

Lagunemiskatse tulemusel selgus, et kõikides substraatides lagunes 100% puuvill, 100% lambavill ning 50% puuvill + 50% polüester materjalid ning sünteetilised 100% polüester ja 65% akrüül + 35% nailon materjalid ei lagunenu. 100% akrüüli katsekehadel esines vähene massikadu kolmes esimeses substraadis ja neljandas esimesel ning teisel ja kolmandal kuul oli toimunud massitõus.

Puuvillase materjalide lagunemine võib toimuda vermikompostis paremini kui teistes kompostimisviisides, suurim massikadu esines 100% puuvillasel materjalil vermikompostis. Ka visuaalsel vaatlusel oli vermikompostis olnud puuvillastel katsekehadel näha kõige rohkem lagunemise tunnuseid.

Substraadi niiskusesisaldusel on oluline mõju kompostimisprotsessile, kõige kuivemas esimeses substraadis olnud 100% looduslike ja loodusliku kiu sisaldusega materjalide massikadu katseperioodil oli tunduvalt madalam kui teistes substraatides.

Veega niisutatud teises ja efektiivsete mikroorganismidega niisutatud kolmandas substraadis 100% puuvill ja 50% puuvill+ 50% polüester materjali lagunemise osas suuri erinevusi ei leitud. Efektiivsete mikroorganismide lahusega niisutamine ei suurendanud märkimisväärselt looduslike ja loodusliku kiu sisaldusega materjalide massikadu. Ühtlasi 100% lambavill lagunes kõikides substraatides vähem kui 100% puuvill ja 50% puuvill+ 50% polüester materjalid.

Tulevikus tasuks sünteetiliste materjalide lagunemist uurida edasi pikemaajalise katsega sobivates keskkonnatingimustes ning efektiivsete mikroorganismide lahuse erinevate kontsentratsioonide mõju looduslikele ja sünteetilistele materjalidele lagunemisele.

SUMMARY

The negative effects of the textile industry are mainly due to production and consumption systems related to population growth and rising living standards, while the growth of the fast fashion industry has contributed to the generation of large amounts of low-quality textile waste (Christis et al., 2019; European Commission, 2020; Ministry of the Environment, 2021). In the textile industry, fabrics have become lighter and thinner over time, which has affected consumers expectations of the quality of clothing textiles and fueled the development of the fast fashion industry (Tervonen, 2016). The consumption of clothing textiles may increase by around 60% by 2030 (European Commission, 2020), if nothing is done to reduce the generation of textile waste, the amount of textile waste may increase in the future and solutions are needed, which can be used for recycling or reducing textile waste.

In this master's thesis, composting of textile materials was considered as an alternative option for waste management. The aim was to find out the degree of decomposition of natural and synthetic textile materials, find the most effective composting method and evaluate the difference in the decomposition of natural and synthetic fibers. To fulfill the aim of the work, the author set the following research tasks:

1. Are there mass losses in test specimens and to what extent?
2. Which composting process causes the test specimens to decompose the most?
3. Which fibers degrade more, natural or synthetic?

A three-month degradation test was performed with six different materials (100% polyester, 100% sheep wool, 50% cotton+50% polyester, 65% acrylic+35% nylon, 100% cotton, 100% acrylic), in four different treatment substrates (the first - not moistened, the second - moistened with water, the third - moistened with a solution of effective microorganisms, the fourth - vermicompost).

The degradation test showed that 100% cotton, 100% sheep wool and 50% cotton + 50% polyester materials degraded in all substrates, and synthetic 100% polyester and 65% acrylic + 35% nylon materials did not degrade. In the first three substrates, the 100% acrylic material showed a slight mass loss, in the vermicompost, the acrylic showed a mass increase.

Decomposition of cotton materials can take place in vermicompost better than in other composting methods, the highest mass loss occurred on 100% cotton material in

vermicompost. Visual inspection also showed the most signs of decomposition on the cotton samples in the vermicompost.

The moisture content of the substrate has a significant effect on the composting process, the mass loss of natural materials in the driest first substrate during the test period was lower than in the other substrates.

In the second substrate moistened with water and the third substrate moistened with effective microorganisms and water, 100% cotton and 50% cotton + 50% polyester of materials degradation were found no great differences. Moistening with a solution of effective microorganisms did not significantly increase the mass loss of natural and natural fiber content materials. 100% sheep wool degraded less in all substrates than other natural and natural content fiber materials.

In the future, it would be worthwhile to study the degradation of synthetic materials with a longer-term experiment under suitable environmental conditions. Also, the effect of different concentrations of the solution of effective microorganisms on the degradation of natural and synthetic materials.

KASUTATUD KIRJANDUS

- Abd El-Mageed, T. A., Rady, M. M., Taha, R. S., Abd El Azeam, S., Simpson, C. R., & Semida, W. M. (2020). Effects of integrated use of residual sulfur-enhanced biochar with effective microorganisms on soil properties, plant growth and short-term productivity of *Capsicum annuum* under salt stress. *Scientia Horticulturae*, 261, 108930. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108930>
- Astover, A., & Leedu, E. (2019). *Mulla ABC III osa* (Eesti Loodusfoto). Eesti Maaülikool. <https://www.pikk.ee/wp-content/uploads/2019/04/Mulla-ABC-III-osa.pdf>
- Ayilara, M. S., Olanrewaju, O. S., Babalola, O. O., & Odeyemi, O. (2020). Waste Management through Composting: Challenges and Potentials. *Sustainability*, 12(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/su12114456>
- Broda, J., Przybyło, S., Kobiela-Mendrek, K., Biniaś, D., Rom, M., Grzybowska-Pietras, J., & Laszczak, R. (2016). Biodegradation of sheep wool geotextiles. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 115, 31–38. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.07.012>
- Christis, M., Vercauteren, A., Arnold, M., Nicolau, M., Lafond, E., Mortensen, L., Coscieme, L., & Manshoven, S. (2019). *Textiles and the environment in a circular economy* (ETC/WMGE 2019/6). <https://www.eea.europa.eu/publications/eu-exports-of-used-textiles/eu-exports-of-used-textiles>
- Diaz, L. F., Bertoldi, M. de, & Bidlingmaier, W. (2011). *Compost Science and Technology*. Elsevier.
- Dominguez, J. (2004). State of the Art and new Perspectives on Vermicomposting Research. *Earthworm Ecology Edited by Clive Arthur Edwards* (CRC Press, lk 402–421).
- Dominguez, J., & Edwards, C. A. (2011a). Biology and Ecology of Earthworm Species Used for Vermicomposting. *Vermiculture Technology edited by Edwards, Clive. A., Arancon Norman Q, Sherman Rhonda* (CRC Press, lk 28–38). Taylor & Francis Group.
- Dominguez, J., & Edwards, C. A. (2011b). Relationship between Composting and Vermicomposting. *Vermiculture Technology* (CRC Press, lk 11–25). Taylor & Francis Group.
- Edwards, C. A., & Arancon, N. Q. (2004). The Use of Earthworms in the Breakdown of Organic Wastes to Produce Vermicomposts and Animal Feed Protein. *Earthworm Ecology Edited by Clive Arthur Edwards* (CRC Press, lk 346–371).
- Edwards, C. A., Arancon, N. Q., & Sherman, R. L. (2011). *Vermiculture Technology* (CRC Press). Taylor & Francis Group.
- Egan, J., & Salmon, S. (2021). Strategies and progress in synthetic textile fiber biodegradability. *SN Applied Sciences*, 4(1), 22. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04851-7>
- Epstein, E. (2017). *The Science of Composting*. CRC Press.

- Euroopa Komisjon. (2020). *ELi kestliku ja ringse tekstiili strateegia*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/?uri=CELEX:52022DC0141#footnote6>
- Gondek, M., Weindorf, D. C., Thiel, C., & Kleinheinz, G. (2020). Soluble Salts in Compost and Their Effects on Soil and Plants: A Review. *Compost Science & Utilization*, 28(2), 59–75. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2020.1772906>
- Grisso, R., Alley, M., Wysor, W. G., Holshouser, D., & Thomason, W. (2009). Precision Farming Tools: Soil Electrical Conductivity. Virginia Cooperative Extension. *Precision Farming Tools: Soil Electrical Conductivity, Virginia Cooperative Extension Publication*.
- Guo, R., Li, G., Jiang, T., Schuchardt, F., Chen, T., Zhao, Y., & Shen, Y. (2012). Effect of aeration rate, C/N ratio and moisture content on the stability and maturity of compost. *Bioresource Technology*, 112, 171–178. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.02.099>
- Haj-Amor, Z., Araya, T., Kim, D.-G., Bouri, S., Lee, J., Ghiloufi, W., Yang, Y., Kang, H., Jhariya, M. K., Banerjee, A., & Lal, R. (2022). Soil salinity and its associated effects on soil microorganisms, greenhouse gas emissions, crop yield, biodiversity and desertification: A review. *Science of The Total Environment*, 843, 156946. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156946>
- Hodgson, A., Leighs, S. J., & van Koten, C. (2023). Compostability of wool textiles by soil burial. *Textile Research Journal*, 93(15–16), 3692–3702. <https://doi.org/10.1177/00405175231163590>
- Hsieh, Y. L. (2007). 1—Chemical structure and properties of cotton. S. Gordon & Y.-L. Hsieh (Toim), *Cotton* (lk 3–34). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9781845692483.1.3>
- Joshi, H., Bishnoi, S., Choudhary, P., & Mundra, S. (2019). Role of Effective Microorganisms (EM) in Sustainable Agriculture. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8, 172–181. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2019.803.024>
- Jusoh, M. L. C., Manaf, L. A., & Latiff, P. A. (2013). Composting of rice straw with effective microorganisms (EM) and its influence on compost quality. *Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 10(1), 17. <https://doi.org/10.1186/1735-2746-10-17>
- Kaart, T. (2013). *Andmeanalüüs MS Excelis (MS Excel 2010 baasil)*. http://ph.emu.ee/~ktanel/andmeanalyys_excelis/index.php
- Karba, V. (2022). *Seosed tugevuste kasutamise organisatsiooni toetuse, usalduskliima, tööalase pingutuse ja läbipõlemise vahel ehituse projektimeeskonna liikmete seas* [Tallinna Tehnikaülikool]. <https://digikogu.taltech.ee/en/Item/a823f85a-f17f-4888-b6b0-9de0b393fcfd>
- Keskkonnaministeerium. (2021). *Tekstiil ringlusse*. <https://envir.ee/et/tekstiilringlusse#tekstiilitoostuse-ne>

Keskkonnaministeerium. (2023a). *Riigi jäätmekava 2022-2028 KSH programm*. <https://envir.ee/j%C3%A4%C3%A4tmekavaksh>

Keskkonnaministeerium. (2023b). *Tekstiilijäätmed*. <https://envir.ee/tekstiil>

Kriipsalu, M., Luik, A., & Peetsmann, E. (2016). *Abiks väiketootjale: Komposti valmistamine* (Ecoprint). Eesti Maaülikool. <http://hdl.handle.net/10492/3752>

Lakhdar, A., Rabhi, M., Ghnaya, T., Montemurro, F., Jedidi, N., & Abdelly, C. (2009). Effectiveness of compost use in salt-affected soil. *Journal of hazardous materials*, 171, 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.05.132>

Li, L., Frey, M., & Browning, K. J. (2010). Biodegradability Study on Cotton and Polyester Fabrics. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 5(4), 155892501000500406. <https://doi.org/10.1177/155892501000500406>

Mohd-Aizat, Sulaiman, W., Karam, D., & M.K, M.-R. (2014). The relationship between soil pH and selected soil properties in 48 years logged-over forest. *International Journal of Environmental Sciences*, 4. <https://doi.org/10.6088/ijes.2014040600004>

Niinimäki, K., Peters, G., Dahlbo, H., Perry, P., Rissanen, T., & Gwilt, A. (2020). The environmental price of fast fashion. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1, 189–200. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0039-9>

Platen, H., & Writz, 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. https://download.sechang.com/pds/2000/2000_18033a.pdf

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

Sanches, G., Thereza, M., Sérgio, P., Duft, D., Vitti, A., Kölln, O., Melo Montes Nogueira Borges, B., & Coutinho, H. (2018). Precision production environments for sugarcane fields. *Scientia Agricola*, 76, 10. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2017-0128>

Shanskiy, M., Karise, R., Kuusik, A., Mänd, M., & Astover, A. (2016). Application of effective microorganisms to the co-composting process with *Eisenia fetida* of organic wastes. *Вермикомпостирование и вермикультивирование как основа экологического земледелия в 21 веке: достижения, проблемы, перспективы*, 70–71.

Szostak-Kotowa, J. (2004). Biodeterioration of textiles. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 53(3), 165–170. [https://doi.org/10.1016/S0964-8305\(03\)00090-8](https://doi.org/10.1016/S0964-8305(03)00090-8)

Teemus, E. (2023). *Pehmepaberi lagundamine* [Tallinna Tehnikaülikool Tartu kolledž]. <https://digikogu.taltech.ee/et/item/b3632854-ca8e-4dbf-b32f-4812659d037a>

Tervonen, A. (2016). *Kangad* (Print Best). Argo.

Textile Exchange. (2021). *Preferred Fiber & Materials Market Report 2021*. https://textileexchange.org/app/uploads/2021/08/Textile-Exchange_PREFERRED-Fiber-and-Materials-Market-Report_2021.pdf

United Nations Climate Change. (2018). *UN Helps Fashion Industry Shift to Low Carbon | UNFCCC*. <https://unfccc.int/news/un-helps-fashion-industry-shift-to-low-carbon>

Vuković, A., Velki, M., Ečimović, S., Vuković, R., Štolfa Čamagajevac, I., & Lončarić, Z. (2021). Vermicomposting—Facts, Benefits and Knowledge Gaps. *Agronomy*, 11(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/agronomy11101952>

Yalcin Enis, I., Ozturk, M., & Sezgin, H. (2019). *Risks and Management of Textile Waste: The Impact of Embedded Multinational Enterprises* (1k 29–53). https://doi.org/10.1007/978-3-319-97922-9_2

LISAD

Lisa 1 Biolan Aiamaa Must Muld tooteandmed

Tüübi nimetus	Turba substraat
Toote nimi	Biolani Aiamaa Must Muld
Kasutusotstarve	Kasvupinnas
Tooraine	Must ja tume turvas
Väetis	N-P-K väetis 12-14-24+TE, 1kg/m ³
Lupjamisaine	Magneesiumi sisaldav lubjakivipulber (4 kg/m ³)
pH	6,0
Elektrijuhtivus (EC)	25 mS/m
Toitainete sisaldus	Lämmastik (N) vees lahust.100 mg/l
	Fosfor (P) lahustuv 60 mg/l
	Kaalium (K) lahustuv 200 mg/l
Niiskus	max kuni 65%
Turba fraktsioon	< 20 mm
Garanteeritud säilivusaeg24 kuud alates valmistamise kuupäevast	24 kuud alates valmistamise kuupäevast
Aegumistähtaeg	36 kuud
Hoiustamistemperatuur	-35°C - + 40°C
Pakendi maht	60 l

Lisa 2 Katse tulemuste koondtabel

Substraadi nr	Lagunemiskottide nr	Katsekeha nr ja materjal	Kompostimise aeg	1 korduse eskmine massikadu (%)	Niiskus (%)	Substraadi temperatuur (°C)	pH	EC (µs/cm)	SIR (mg-CMikroobne-1)	BA (mg-O2 g-KA-1 h-1)
1	1-3	1- 100% polüester	1 kuu	-0.6	44.32	18	5.36	1318	-	-
1	1-3	2- 100% vill	1 kuu	3.8	44.32	18	5.36	1318	-	-
1	1-3	3- 50% puuvill + 50% polüester	1 kuu	6.4	44.32	18	5.36	1318	-	-
1	1-3	4- 65% akrüül + 35% nailon	1 kuu	-0.3	44.32	18	5.36	1318	-	-
1	1-3	5- 100% puuvill	1 kuu	4.2	44.32	18	5.36	1318	-	-
1	1-3	6- 100% akrüül	1 kuu	0.4	44.32	18	5.36	1318	-	-
1	4-5	1- 100% polüester	2 kuu	-4.4	22	16	5.17	1476	0.214	0.001
1	4-5	2- 100% vill	2 kuu	1.6	22	16	5.17	1476	0.214	0.001
1	4-5	3- 50% puuvill + 50% polüester	2 kuu	6.0	22	16	5.17	1476	0.214	0.001
1	4-5	4- 65% akrüül + 35% nailon	2 kuu	-0.7	22	16	5.17	1476	0.214	0.001
1	4-5	5- 100% puuvill	2 kuu	6.1	22	16	5.17	1476	0.214	0.001
1	4-5	6- 100% akrüül	2 kuu	0.4	22	16	5.17	1476	0.214	0.001
1	7-9	1- 100% polüester	3 kuu	-0.2	17	19.5	5.08	1501	0.186	0.001
1	7-9	2- 100% vill	3 kuu	4.8	17	19.5	5.08	1501	0.186	0.001
1	7-9	3- 50% puuvill + 50% polüester	3 kuu	8.4	17	19.5	5.08	1501	0.186	0.001
1	7-9	4- 65% akrüül + 35% nailon	3 kuu	-0.8	17	19.5	5.08	1501	0.186	0.001
1	7-9	5- 100% puuvill	3 kuu	6.6	17	19.5	5.08	1501	0.186	0.001
1	7-9	6- 100% akrüül	3 kuu	0.2	17	19.5	5.08	1501	0.186	0.001
2	10-12	1- 100% polüester	1 kuu	-0.2	63.08	18	5.44	733	-	-
2	10-12	2- 100% vill	1 kuu	4.8	63.08	18	5.44	733	-	-
2	10-12	3- 50% puuvill + 50% polüester	1 kuu	8.2	63.08	18	5.44	733	-	-
2	10-12	4- 65% akrüül + 35% nailon	1 kuu	-1.0	63.08	18	5.44	733	-	-
2	10-12	5- 100% puuvill	1 kuu	6.7	63.08	18	5.44	733	-	-
2	10-12	6- 100% akrüül	1 kuu	0.5	63.08	18	5.44	733	-	-
2	13-15	1- 100% polüester	2 kuu	-1.8	65.6	16	5.59	985	1.121	0.003
2	13-15	2- 100% vill	2 kuu	9.0	65.6	16	5.59	985	1.121	0.003
2	13-15	3- 50% puuvill + 50% polüester	2 kuu	21.2	65.6	16	5.59	985	1.121	0.003
2	13-15	4- 65% akrüül + 35% nailon	2 kuu	-1.9	65.6	16	5.59	985	1.121	0.003
2	13-15	5- 100% puuvill	2 kuu	21.3	65.6	16	5.59	985	1.121	0.003
2	13-15	6- 100% akrüül	2 kuu	1.0	65.6	16	5.59	985	1.121	0.003
2	16-18	1- 100% polüester	3 kuu	-0.3	63.3	19	5.68	446	0.771	0.003
2	16-18	2- 100% vill	3 kuu	25.4	63.3	19	5.68	446	0.771	0.003
2	16-18	3- 50% puuvill + 50% polüester	3 kuu	32.8	63.3	19	5.68	446	0.771	0.003
2	16-18	4- 65% akrüül + 35% nailon	3 kuu	-0.6	63.3	19	5.68	446	0.771	0.003
2	16-18	5- 100% puuvill	3 kuu	34.9	63.3	19	5.68	446	0.771	0.003
2	16-18	6- 100% akrüül	3 kuu	0.4	63.3	19	5.68	446	0.771	0.003
3	19-21	1- 100% polüester	1 kuu	-0.9	60.31	18	5.27	1062	-	-
3	19-21	2- 100% vill	1 kuu	4.6	60.31	18	5.27	1062	-	-
3	19-21	3- 50% puuvill + 50% polüester	1 kuu	8.3	60.31	18	5.27	1062	-	-
3	19-21	4- 65% akrüül + 35% nailon	1 kuu	-0.5	60.31	18	5.27	1062	-	-
3	19-21	5- 100% puuvill	1 kuu	8.7	60.31	18	5.27	1062	-	-
3	19-21	6- 100% akrüül	1 kuu	0.3	60.31	18	5.27	1062	-	-
3	22-24	1- 100% polüester	2 kuu	-4.4	64.5	16	5.48	1130	1.086	0.001
3	22-24	2- 100% vill	2 kuu	10.9	64.5	16	5.48	1130	1.086	0.001
3	22-24	3- 50% puuvill + 50% polüester	2 kuu	29.0	64.5	16	5.48	1130	1.086	0.001
3	22-24	4- 65% akrüül + 35% nailon	2 kuu	-0.4	64.5	16	5.48	1130	1.086	0.001
3	22-24	5- 100% puuvill	2 kuu	26.3	64.5	16	5.48	1130	1.086	0.001
3	22-24	6- 100% akrüül	2 kuu	0.9	64.5	16	5.48	1130	1.086	0.001
3	25-27	1- 100% polüester	3 kuu	-0.4	63.2	19	5.8	560	1.083	0.002
3	25-27	2- 100% vill	3 kuu	26.9	63.2	19	5.8	560	1.083	0.002
3	25-27	3- 50% puuvill + 50% polüester	3 kuu	32.7	63.2	19	5.8	560	1.083	0.002
3	25-27	4- 65% akrüül + 35% nailon	3 kuu	-0.7	63.2	19	5.8	560	1.083	0.002
3	25-27	5- 100% puuvill	3 kuu	35.1	63.2	19	5.8	560	1.083	0.002
3	25-27	6- 100% akrüül	3 kuu	0.4	63.2	19	5.8	560	1.083	0.002
4	28-30	1- 100% polüester	1 kuu	-1.2	63.53	18	5.37	968	-	-
4	28-30	2- 100% vill	1 kuu	5.6	63.53	18	5.37	968	-	-
4	28-30	3- 50% puuvill + 50% polüester	1 kuu	10.8	63.53	18	5.37	968	-	-
4	28-30	4- 65% akrüül + 35% nailon	1 kuu	-0.6	63.53	18	5.37	968	-	-
4	28-30	5- 100% puuvill	1 kuu	9.1	63.53	18	5.37	968	-	-
4	28-30	6- 100% akrüül	1 kuu	0.6	63.53	18	5.37	968	-	-
4	31-33	1- 100% polüester	2 kuu	-0.5	70.05	16	5.4	874	0.523	0.002
4	31-33	2- 100% vill	2 kuu	11.6	70.05	16	5.4	874	0.523	0.002
4	31-33	3- 50% puuvill + 50% polüester	2 kuu	28.8	70.05	16	5.4	874	0.523	0.002
4	31-33	4- 65% akrüül + 35% nailon	2 kuu	-1.8	70.05	16	5.4	874	0.523	0.002
4	31-33	5- 100% puuvill	2 kuu	25.5	70.05	16	5.4	874	0.523	0.002
4	31-33	6- 100% akrüül	2 kuu	-1.1	70.05	16	5.4	874	0.523	0.002
4	34-36	1- 100% polüester	3 kuu	-4.4	67.1	19	5.3	1025	1.094	0.001
4	34-36	2- 100% vill	3 kuu	15.2	67.1	19	5.3	1025	1.094	0.001
4	34-36	3- 50% puuvill + 50% polüester	3 kuu	36.5	67.1	19	5.3	1025	1.094	0.001
4	34-36	4- 65% akrüül + 35% nailon	3 kuu	-4.2	67.1	19	5.3	1025	1.094	0.001
4	34-36	5- 100% puuvill	3 kuu	51.7	67.1	19	5.3	1025	1.094	0.001
4	34-36	6- 100% akrüül	3 kuu	-3.6	67.1	19	5.3	1025	1.094	0.001