



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Tartu Kolledž

**REOVEESETTE KOMPOSTIMISTEHNOLOOGIA
EFEKTIIVSUSE TÕSTMISE VÕIMALUSTE
UURIMINE**

**DEVELOPMENT OF NOVEL SEWAGE SLUDGE
COMPOSTING TECHNOLOGIES**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Beata Nei

Üliõpilaskood: 176990NAEM

Juhendaja: Egge Haiba, vanemlektor

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad,

kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

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

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

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

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Beata Nei (sünnikuupäev: 25.02.1995)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

Reoveesette kompostimiskehnoloogia efektiivsuse tõstmise võimaluste uurimine,

mille juhendaja on

Egge Haiba.

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

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

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

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

¹*Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil.*

_____ (allkiri)

_____ (kuupäev)

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Beata Nei 176990NAEM

Õppekava, peeriala: NAEM06/15 - Tööstusökoloogia

Juhendaja: vanemlektor, Egge Haiba, +372 620 4806

Lõputöö teema:

Reoveesette kompostimistehnoloogia efektiivsuse tõstmise võimaluste uurimine

Development of novel sewage sludge composting technologies

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Reoveesette kompostimistehnoloogia edasiarendamine
2. Tõsta komposti valmimise kiirust
3. Tagada ravimijääkide kiirem ja täielikum lagunemine

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Kirjanduse läbitöötamine, katsetingimuste väljatöötamine	30.10.20
2.	Katse läbiviimine, tulemuste analüüs, arutelu koostamine	30.04.21
3.	Lõputöö vormistamine ja esitamine	20.05.21

Töö keel: eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "24" mai 2021a

Üliõpilane: Beata Nei ".....".....20.....a
/allkiri/

Juhendaja: Egge Haiba ".....".....20.....a
/allkiri/

Programmijuht: Annely Kuu ".....".....20.....a
/allkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

EESSÕNA	6
1. SISSEJUHATUS.....	7
2. KIRJANDUSE ÜLEVAADE	9
2.1 Reoveesete ja selle kasutamisega seotud probleemistik.....	9
2.2 Reoveesete kompostimine	10
2.3 Saasteained reoveesettes ja nende käitumine kompostimisel	13
2.4 Reoveesete kompostimissegude koostise mõjust saasteainete lagunemisele ..	14
3. MATERJAL JA METOODIKA	15
3.1 Katsetingimuste väljatöötamine.....	15
3.2 Kompostisegude valmistamine	16
3.3. Analüüsid.....	17
3.3.1. Kuivaine määramine.....	17
3.3.2. Happesuse ja elektrijuhtivuse määramine	17
3.3.3 Keemiliste parameetrite määramine	17
3.3.4 Mikrobioloogilised analüüsid.....	18
4. TULEMUSED JA ARUTELU	20
4.1 Katsetingimuste väljatöötamine.....	20
4.1.1 Katsed efektiivsete mikroorganismide lahusega.....	21
4.1.2 Katsed õllerabaga.....	21
4.1.3 Katsed etanooliga.....	22
4.1.4 Kompostimiskatseteks valitud lisandite võrdlus	27
4.2 Kompostimisprotsessi uurimine	27
4.2.1 Temperatuuri käik kompostimisprotsessi käigus	27
4.2.2 Kompostisegude pH ja elektrijuhtivus	28
4.2.3 Kompostisegude kuivainesisaldus	30
4.2.4 Kompostisegude mõningad olulisemad keemilised parameetrid	30
4.2.5 Kompostisegude mikrobioloogilised uuringud	32
4.3 Ravimijääkide lagunemisest reoveesete kompostimisprotsessi käigus.....	39
KOKKUVÕTE	42
SUMMARY.....	44
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	46

EESSÕNA

Käesolev magistritöö valmis ühe etapina Tallinna Tehnikaülikooli Tartu kolledži teadustööst, mis on seotud reoveesette kompostimise ja selles sisalduvate ravimijääkide lagunemisega ning liikumisega ahelas reoveesete – kompost – muld – taim – keskkond. Saadud tulemused omavad tähtsust keskkonnasäästliku reoveesette kasutamise seisukohalt.

Suur tänu minu juhendajale Egge Haibale, aga ka Jane Raametsale ja Laura Lokkole, kelle abi käesoleva töö valmimisel osutus hindamatuks. Eriline tunnustus kaasmagistrandile Sille Pragile, kellega koos me magistrikraadini püüdesime. Tahan kindlasti märkida ära ka seda, et jään oma ülikooliõpinguid meenutama suure soojusega ning tänutundega kõikide õppejõudude ja kaasüliõpilaste suhtes, kes minu headeks kaasteelisteks sellel eluetapil olid.

Kindlasti ei oleks ma oma õpingutega nii kaugemale jõudnud, kui mul oleks puudunud oma pere tugi. Aitäh kõigile, kes minusse uskusid ja mu õpinguid toetasid.

Võtmesõnad: *reoveesettekompost, kompostimistehnoloogia, mikroobikoosluse aktiivsus, ravimijääkide lagunemine, magistritöö.*

1. SISSEJUHATUS

Käesolev magistritöö on loogiliseks jätkuks Tallinna Tehnikaülikooli Tartu kolledžis selle asutamise algusest 2005. aastal kuni käesoleva ajani teostatud uurimistöödele, mis käsitlevad reoveesette kompostimist ja reoveesettes sisalduvate ravimijääkide käitumist ahelas reoveesete – reoveesette kompost – muld – taim. Valminud on kolm teemakohast doktoritööd [1-3] ning ilmunud hulgaliselt vastavasisulisi teadusartikleid [4-18]. Viidatud tööde käigus on välja töötatud uudsed ravimijääkide määramise metodikad, on uuritud ravimijääkide sisaldust ja lagunemist erinevates keskkondades, edasi arendatud kompostimistehnoloogiaid ning vaadeldud ravimijääkide liikumist reoveesette kompostiga väetatud mullast toidutaimedesse. Nende tööde põhjal võib kinnitada, et Eestis kasutuselolevate kompostimistehnoloogiate abil küll lagundatakse paljusid reoveesettes sisalduvaid ravimijääke suuremal või vähesemal määral, kuid paraku osade ravimite lagunemine toimub kas siis liiga aeglaselt või üldse mitte [4, 6], mistõttu tuleb keskkonna- ja toiduohutuse tõstmisele suunataud vastavasisulisi uuringuid intensiivselt jätkata. Samuti on tõsiseks puudujäägiks komposti liialt pikk valmimisperiood [3], mis ei sobi kokku Eesti kliimatingimustega.

Reoveesette näol on, arvesse võttes iga-aastaseid tohutuid tekkekoguseid, tegemist globaalse probleemiga [2]. Alates 1990-ndatest aastatest alates on Eestis märkimisväärselt vähenenud fosforväetiste kasutamine ja seetõttu võib väita, et meie taimekasvatus toimib suurel määral mulla fosforiresursi arvelt. Üheks mullaviljakuse tõstmise viisiks on toitaineerikka reoveesette kasutamine, kuid seejuures ei tohi unustada, et reoveesete sisaldab üldjuhul arvukalt bioloogilisi ja keemilisi saastajaid ning nende olemasolu võib reoveesetega väetamisel viia ebasoovitavate tagajärgedeni [9].

Varasemad uuringud annavad alust eeldada, et kompostimistehnoloogia valiku teel on võimalik kiirendada nii komposti valmimist kui ka selles sisalduvate saasteainete lagunemist [2, 3, 19]. Paraku on seni jõutud tulemusteni, mis küll võimaldavad kinnitada, et suurt rolli soovitud eesmärkide saavutamisel määrab kompostimisegu, kuid protsessi kiiruse ja efektiivsuse osas ei ole veel praktikuid rahuldavate tulemusteni jõutud. Siiani on parimate tulemusteni jõutud Egge Haiba doktoritöös [2], kuid paraku turba asemel tugiainena kasutatav saepuru ei ole reoveesette kompostimisega tegelevatele ettevõtetele meelepärane, kuna saadav mass on liialt tihe ja seetõttu on protsessi kulgemiseks vajalik hapniku juurdepääs takistatud ehk siis kompostisegu segamine on tehnoloogiliselt keerukam.

Käesoleva magistritöö kavandamisel püstitati järgmised hüpoteesid:

- reoveesette kompostimise efektiivsust on võimalik tõsta optimaalse kompostisegu ja kompostimistingimuste valiku abil;
- efektiivsete mikroorganismide lahuse, õlleraba ja etanooli lisamine komposti baassegule muudab mikroobide biomassi;
- sobivalt disainitud kompostimisprotsessi käigus toimub paljude orgaaniliste saasteainete lagunemine.

Toodust tulenevalt oli käesoleva töö peamiseks eesmärgiks liikuda edasi reoveesette kompostimistehnoloogia edasiarendamise teel eesmärgiga tõsta komposti valmimise kiirust ning uurida võimalusi tagada selles sisalduvate ravimijääkide kiirem ja täielikum lagunemine.

2. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

2.1 Reoveesete ja selle kasutamisega seotud probleemistik

Globaalne vajadus orgaaniliste väetiste järele kasvab pidevalt ja reoveesete võiks olla üheks sellel eesmärgil kasutatavaks oluliseks ressursiks. Reoveesete kasutamine mullaviljakuse tõstmisel on keskkonnasõbralikum ja majanduslikult tasuvam, kui selle ladustamine prügimäele [20]. Reoveesete näol on tegemist kodumajapidamiste ja linnade reovee või sarnase koostisega reovee töötlemisel veepuhastusettevõtetes tekkiva jääkmudaga [21]. Vastavalt Euroopa Nõukogu 1986. a. direktiivile [21] võib reoveesetel olla põllumajanduslikult väärtuslikke omadusi ning seetõttu on õige soodustada nende nõuetekohast kasutamist põllumajanduses, kuid seejuures ei tohi reoveesete kasutamine halvendada pinnase ega põllumajandustoodete kvaliteeti. See direktiiv määrab ära "raskemetallide" piirnormid, kuid ei sätesta teiste võimalike ohtlike saasteainete piirnorme. Euroopa Nõukogu direktiiv aastast 1991 [22] annab suunise reoveesete taaskasutamiseks tingimusel, et keskkonnaohutus on tagatud. Kacprzak ja kaasautorid soovivad kompostida reoveesetet ja kasutada saadud produkti saastatud alade rehabiliteerimisel ja energiataimede kasvatamisel [20].

Paljud uuringud on näidanud, et reoveepuhastamise käigus ei toimu ravimijääkide ja hügieenivahendite täielikku kõrvaldamist ning samas ei toimu ka nende täielikku lagunemist keskkonnas [14, 18, 23-28]. Kuigi nende kontsentratsioonid reoveesettes ja sellest valmistatud kompostis ning sealt edasi keskkonnas on madalad, siis nende pikaajalist toimet inimestele, loomadele ja taimedele ei saa ignoreerida [18, 29-32].

Põllumajanduses väetamiseks kasutatavas sõnnikus ei tohi summaarne ravimijääkide sisaldus ületada $100 \mu\text{g} \times \text{kg}^{-1}$ ja $10 \mu\text{g} \times \text{kg}^{-1}$ sõnnikuga väetatud mullas [33], kuid tänaseks päevaks on üldteada, et sellisel nivool piirangud on absoluutselt ebapiisavad seonduvalt üha kasvava ravimiresistentsusega ning negatiivse mõjuga keskkonnas, kusjuures arvesse võttes võimalikku mullabakterite resistentsuse arenemist, tuleks vastav piirväärtus langetada nivooni $0.01\text{--}0.1 \mu\text{g} \times \text{kg}^{-1}$ [34]. Reoveesete komposti jaoks vastavad piirnormid puuduvad.

Vaatamata toodud probleemidele ei saa eirata fakti, et inimtegevuse tõttu on rikutud ülemaailmselt ligikaudu 40% põllumaast [35]. See viitab ökoloogilise katastroofi

võimalikule saabumisele [36]. Eesti kõrgelt industrialiseeritud ja tsentraliseeritud põllumajandus varises 1980ndate lõpul ja 1990ndate algul kokku. Haritava maa pindala kahanes 1 miljonilt hektarilt 1990ndate algul 0,6 hektarile 2003. aastaks [37, 38]. Sellest tulenes ka märkimisväärne lämmastik- ja fosforväetiste kasutamise langus, kusjuures 1990ndate algul kasutati väetamiseks ainult 13% lämmastikväetisi, võrreldes aastatega 1987 ja 1988 [37, 38]. Aastatel 1994-2001 kasutati tööstuslikult toodetud väetisi $85 \text{ kg} \times \text{ha}^{-1}$ ja see näitaja jõudis aastateks 2009-2011 tasemeni $120 \text{ kg} \times \text{ha}^{-1}$ [37, 38]. Aastatel 2004-2009 oli fosfori defitsiit -10 kuni $-5 \text{ kg} \times \text{ha}^{-1}$. Põllumajanduslik tootmine toimub Eestis mulla fosforiressursi arvelt [39], mistõttu reoveesette laialdasem kasutuselevõtt mullaviljakuse tõstmise eesmärgil võib osutuda väljapääsuks tekkinud olukorrast.

2.2 Reoveesette kompostimine

Ülestähendused savitahvlitel annavad tunnistust, et sõnniku ja teiste biodegradeeruvate jäätmete kompostimist tunti juba Akadia impeeriumis 2300 aastat tagasi [40]. Arvatavasti on kompostimine ja komposti kasutamine taimekasvatuses sama vana kui põllumajandus [41]. Esimene tõsiseltvõetav kompostimisalane ja komposti kasutamist taimekasvatuseks eesmärkidel käsitlev uuring ilmus 1931. aastal [42]. Esimesed tööstuslikud kompostimisfirmad tekkisid 20. sajandi algul [41]. Üks varasemaid ettevõtteid, mis tegeles komposti turustamisega juba 1927. aastal, oli Kellogg Supply Kalifornias [41]. Hea ülevaade kompostimise arenguloost on kirja pandud Fitzpatricku ja kaasautorite 2005. aastal ilmunud artiklis [41].

Kompostimisprotsessi käigus tarvitavad aeroobsed mikroorganismid orgaanilisi ühendeid toitainetena [43]. Mikroorganismid lagundavad toiteaineid lihtsamateks ühenditeks [44, 45]. Süsinikku ja lämmastikku sisaldavad ühendid muudetakse mikroobide poolt stabiilsemaks orgaaniliseks massiks, mis meenutab huumust [46]. Ulatuslik tahkete biojäätmete kasutuselevõtt mulla omaduste parandamise eesmärgil sai alguse 20. sajandi algul [47]. Kasvav linnastumine ja tööstuse areng tõid kaasa dramaatilise tekkivate jäätmete koguste kasvu, millest märkimisväärse osa moodustab reoveesete [48]. Reoveesette kompostimisel 30-40% ebapüsivast tahkest aineist laguneb [49]. Lahustunud orgaaniline aine polümeriseerub ja sellele järgneb humiinainete moodustumine [50]. Komposti stabiilsus ja küpsus on need parameetrid, mille abil hinnatakse kompostimisprotsessi efektiivsust [51]. Nende kahe parameetri hindamisel kasutatakse erinevaid meetodeid, mida omakorda saab jagada nelja rühma (1) empiirilised näitajad, nagu temperatuur, värv, lõhn ja tekstuur annavad võimaluse

hinnata, kaugemale lagunemisprotsess on jõudnud [50, 52], kuid annavad vähe informatsiooni küpsusastme kohta; (2) peamiste komponentide füsiko-keemiline analüüs ning nende suhete määramine (C/N või $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$), mikroobne hingamine ning fermentaalne aktiivsus tahkes kompostis [50, 53]; (3) lahustuva orgaanilise aine määramine tahkest kompostist [50, 54]; (4) idanemisindeksi määramise test [50, 55]. Reoveesette kompostimisel valgud, tselluloosid ja hemitselluloosid lagunevad lihtsama struktuuriga ühenditeks nagu aminohapped ja karbohüdraatide monomeerid või dimeerid [56]. Tavaliselt lagunevad kõigepealt alifaatsed ühendid nagu näiteks hemitselluloosid ja sellel järgneb valkainete lagunemine [57]. Need ained leiavad kasutamist kas süsiniku või lämmastiku allikatena, mineraliseeruvad ja moodustub süsihappegaas ning ammoniaak, või siis on nad huumuse "ehituskivideks" [58]. Polüsahhariidisarnaste struktuuride ja karboksüül- ning fenüülrühmade C-O sidemete polümeriseerumine on huumuse moodustumise võtmefaktoriks [59]. Humiainete sisalduse tõus ning sellele vastav kergemini lagundatavate ühendite transformeerumine püsivateks ühenditeks võib kinnitada komposti küpsust [60].

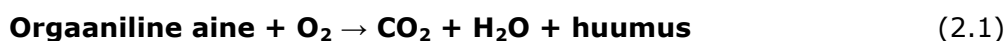
Reoveesette kompostimisel saab eristada kahte faasi: (1) orgaaniliste ühendite lagunemine ja (2) orgaaniliste ühendite polümeriseerumine. Esimeses faasis sellised kergemini lagunevad ühendid nagu glükoosid, aminohapped ja orgaanilised happed on kergesti bakterite poolt omastatavad [61]. Kergesti biodegradeeruvate ühendite lagunemine kestab 14 kuni 21 päeva [61]. Selles faasis genereeritakse orgaanilisi happeid peamiselt orgaaniliste ühendite lagunemise ja mikroorganismide abil metaboliseerumise teel. Orgaaniliste hapete akumulatsioon võib kaasa tuua pH languse ja inhibeerida mikroobide aktiivsust, mille tulemusena langeb komposti kui produkti kvaliteet [62]. Teises faasis hüdrolüüsivad või lagunevad tselluloosid, hemitselluloosid ja lipiidid. Lõpuks toimub orgaaniliste ühendite humifitseerumine, millega kaasneb polükondenseerunud ja huumusesarnaste ainete ühendite teke [60]. See protsess kestab 14 päeva, millele järgneb orgaaniliste ühendite stabiliseerumine ja mikroobse aktiivsuse langus [61].

Suhteliselt kõrge niiskusesisalduse tõttu ei kompostita reoveesetet tavaliselt ilma lisanditeta [50]. Tugiaine abil saab see probleem lahendada, tekitades osakestevahelisi tühimikke, mis aitavad vähendada niiskust ja tagada küllaldast õhuvahetust ning ära hoida substraadi liigset tihenemist [63]. Lisaks sellele võib tugiaine muuta kompostitava substraadi kvaliteeti, korrigeerides tema mehaanilist struktuuri, C/N suhet, tihedust, pH-d ja orgaanilise aine lagunemisprotsessi. Ingelmo ja kaasautorid [64] näitasid, et puidulaastude lisamine reoveesetetele toob kaasa humiinhapete polümeriseerumise, mis aitab kaasa huumuse formeerumisele.

Kompostimise käigus osa orgaanilistest ühenditest laguneb [60]. Zhu ja kaasautorid näitasid [65], et kompostimise käigus on peamisteks orgaanilisi ühendeid stabiliseerivateks mikroorganismideks *Prostheco bacter*, *Paenalcaligenes* ja *Solibacillus*, mis konverteerivad kõrgmolekulaarsed ühendid madalamamolekulaarseteks ühenditeks.

Robledo koos kaasautoritega [66] leidis, et *Pedomicrobium*, *Ureibacillus* ja *Tepidomicrobium* sobivad reoveesette kompostimisel orgaaniliste ühendite stabiliseerumise indikaatoriteks. Orgaanilise aine stabiilsus mõjutab ensümaatilist aktiivsust [67]. Erinevate bakterite domineerimine on seotud kompostimisprotsessi erinevate faasidega [67-70]. Orgaaniliste ainete sisalduse ja mikroobikoosluse järgi saab iseloomustada kompostimisprotsessi kulgemist [50].

Aeroobse protsessi ehk kompostimise korral transformeerub orgaaniline aine huumuseks, süsihappegaasiks ja veeks:



Anaeroobse metaankäärimise lõppsaadusteks on biogaas ja väetisena kasutatav käärimisjääk:



Kompostimine on kõige vähem investeringuid nõudev biolagunevate orgaaniliste jäätmete käitlusviis [71]. Kompostimisprotsessis osaleb suur hulk mikroorganisme: identifitseeritud on rohkem kui 2000 tuntud liiki baktereid ning vähemalt 100 seeneliiki [72, 73]. Mikroorganismide tegevusega seotud temperatuurikäik on kompostimisprotsessi kulgemise indikaatoriks [74]. Tavaliselt jaotatakse see protsess neljaks staadiumiks: mesofiilne (40°C), termofiilne (60°C), jahtumine (40°C) ja valmimine (kuni kompostisegu ja ümbritseva keskkonna temperatuuride vahe ei ületa 10°C) [75]. Eeldatavasti kiirenevad mikroobsed protsessid temperatuuride vahemikus 10°C kuni 50°C iga 10°C tõusu korral 2-3 korda [74]. Detailne ülevaade mikroobikoosluste koostisest kompostimisprotsessi erinevates staadiumites on toodud Nozhevnikova ja kaasautorite poolt 2019. aastal avaldatud ülevaateartiklis [74].

2.3 Saasteained reoveesettes ja nende käitumine kompostimisel

Reoveesette koguste pidurdamatu kasv on muutunud ülemaailmseks probleemiks [76]. Kuna reoveesete sisaldab hulgaliselt mullaviljakust tõstvaid toiteaineid, on selle näol tegemist potentsiaalselt olulise põlluväetisega, kuid tema laialdasemat kasutamist piiravad reoveesettes leiduvad saasteained. Näiteks ravimijäägid kujutavad endast tõsist ohtu reoveesette kasutamisel põldude väetamisel, kuna nad akumulieruvad toidutaimedes [76]. Viimase nähtusega kaasneb aga bakteriaalne ravimiresistentsus, mille ohtlikkust on raske üle hinnata. Ravimijääkidega seotud probleemidest annavad pildi hiljutised kajastused teadusajakirjades [76-80]. Mulla saastumine raskemetalliühendite ja orgaaniliste saasteainetega, sealhulgas ravimitega, kujutab endast väga suurt toiduohutusega seonduvat probleemi [76]. Õnneks on munitsipaalsete päritoluga reoveesetest tulenev raskemetalliline mullareostus madal [81]. Enamasti ei ole ka ravimijääkide kontsentratsioonid väetamisel kasutatavas reoveesettes või selle kompostis märkimisväärsed, jäädes $\mu\text{g kg}^{-1}$ tasemele [14, 18, 76], kuid ravimiresistentsuse ilmnemiseni viivad juba märkimisväärselt madalamad sisaldused. Tulemuseks on see, et bakteriaalsete haiguste ravimiseks kasutatavad ravimid kaotavad oma toime [82, 83]. Reoveesettes ja selle kompostis leiduvad mikroorganismid on tihti antibiootikumide suhtes resistentsed, kuna nad on viibinud pikema perioodi jooksul neid ravimeid sisaldavas keskkonnas [84, 85]. Selliste mikroorganismide levik põhjustab ravimiresistentsuse levikut. Mullabakterite antibiootikumiresistentsus kujutab endast ohtu inimeste ja loomade tervisele, sest resistentsust määravad geenid võivad transformeeruda ohututelt mullabakteritelt patogeensetele bakteritele horisontaalse geeniülekanne teel [86]. Toodud probleemi ei tohi reoveesette väetusainena kasutamisel eirata [76].

Reovett ja reoveesetet loetakse ohtlike saasteainete peamiseks allikaks [87-89]. Ohtlike saasteainete hulka kuuluvad näiteks hormoonid ja steroidid, keelatud narkootilised ained, paljud kemikaalid, tööstuslikult loodud nanoosakesed, ravimid, pestitsiidid, veterinaarproduktid, tööstuslikud kõrvalproduktid, toidulisandid, pindaktiivsed ained, patogeenid, jne [88, 90]. Tavaliselt on suure molekulaarmassiga orgaanilised ühendid halvasti biolagundatavad [88]. Reoveesette aeroobse kompostimise käigus võivad moodustuda uued toksilised vaheühendid [91]. Seetõttu tuleb reoveesette põllumaa väetamiseks kasutamise plussse võrrelda toiduahela võimaliku saastumisega seotud riskidega [89].

2.4 Reoveesette kompostimissegude koostise mõjust saasteainete lagunemisele

Saasteainete lagunemise kiirus ja täielikkus sõltub olulisel määral reoveesette kompostimistehnoloogiast [3]. Anaeroobselt kääritatud reoveesette korral, mida segati aeroobse kompostimise eesmärgil turbaga, lagunesid tsiprofloksatsiin, norfloksatsiin, ofloksatsiin, sulfadimetoksiin ja sulfametokasasool 12-kuuse kompostimisperioodi jooksul täielikult, kuid anaeroobselt töötlemata reoveesette kompostimisel koos puukoortega lagunes samal perioodil täielikult ainult sulfadimetoksiin; teised uuritud ravimid lagunesid 86–94% piires [3].

Varasemalt on uuritud erinevate ravimite lagunemist reoveesette kompostimisel koos saepuru, põhu, põlevkivituha või puukoorega [2, 9]. Egge Haiba doktoritöös [2] uuriti diklofenaki (DCF), karbamasepiini (CBZ), metformiini (MET), triklosaani (TCS), fluorokinoloonide ja sulfonamiinide lagunemist kompostimisel erinevate kompostimissegude korral. Parimaid tulemusi andis saepuru kasutamine tugiainena. Need segud valmistati Tallinna veepuhastusjaama reoveesetest. Reoveesette ja saepuru segamisel mahuvahekordades 1:2 lagunes ühekuuse kompostimisperioodi jooksul 92% DCF, 55% TCS ja 91% MET [5]. 1:3 segu korral olid need näitajad DCF korral 98%, TCS korral 81% ja MET korral 93% [5]. Läbiviidud eksperimentide käigus CBZ lagunemist ei täheldatud [5]. Sellest tulenevalt saab väita, et osad orgaanilisi aineid saab kompostimise abil lagundada, kuid teiste korral see ei õnnestu, mistõttu tuleb valida teisi, nagu näiteks fotokatalüütilisi meetodeid [92]. Kompostimisperioodi pikkuseks peaks olema vähemalt kuus kuud [2]. Saadud tulemused kinnitavad, et kompostimissegu valikust sõltub nii komposti valmimise kiirus kui võib sõltuda ka selles sisalduvate lisandite lagunemise kiirus ja lagunemisaste. Komposti kvaliteedi seisukohalt on oluline teada orgaanilise aine, lämmastiku-, süsiniku-, kaaliumi- ja fosforisisaldust ning pH-d ja elektrijuhtivust [93].

3. MATERJAL JA METOODIKA

3.1 Katsetingimuste väljatöötamine

Katsetingimuste väljatöötamisega alustati Tallinna Tehnikaülikooli Tartu Kolledži tööstusökoloogia laboris 28. septembril 2020. Nende katsete eesmärgiks oli selgitada välja kuidas, kas ja millistes kogustes erinevad lisandid mõjutavad reoveesetest valmistatud komposti mikroobikoosluse aktiivsust. Katsetingimuste väljatöötamisel kasutati materjalidena turvast, reoveesetet, õlleraba, efektiivsete mikroorganismide lahust ja etanooli (puhtuseaste 96,7%). Katsete ülesehitust ja kontsentratsioone kirjeldab Tabel 3.1.

Katse jaoks saadi reoveesete ning turvas AS Tartu Veevärgist. Turvas omakorda pärines AS Tootsi Turbast, mis saadi Ida-Virumaalt Puhatu rabast, Konsu külast. Lisandina kasutatud õlleraba saadi AS A. Le Coq tehastest Tartus, etanool telliti ettevõttest Estonian Spirit OÜ ja efektiivsete mikroorganismide lahus osteti firmalt OÜ Agri Partner.

Tabel 3.1 Eelkatsete materjalid ja katsetatud kontsentratsioonid

Kompostisegu kirjeldus	Lisand	Lisandi kogus, % kogu massi järgi
reoveesete + turvas	õlleraba	1; 2,5; 5; 10
reoveesete + turvas	EM lahus	1; 5; 10; 15
reoveesete + turvas	etanool	0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5; 5

Tartu Veevärgist toodud reoveesetet kasutati turbaga segamisel baassegude valmistamiseks samal ning järgmisel päeval alates kogumisest. Sete, mis oli seisnud üle 30 tunni alates selle saamisest, kõrvaldati ning seejärel toodi uus ning värske reoveesete. Turvas ja sete segati 1:1 mahu järgi vastavalt nii nagu teeb seda Tartu Veevärk. Selleks võeti nii turvast kui setet sama anumaga, mille mahutavus oli 1 liiter, 10 korda ja segati hoolikalt. Erinevate segude valmistamiseks ja mikroobikoosluse

aktiivsuse leidmiseks kaaluti turba ning sette segu ämbritesse 1 kg kaupa ning lisati etanooli, õlleraba ja EM lahust erinevates vahekordades massi järgi.

3.2 Kompostisegude valmistamine

Põhikatse viidi läbi Tallinna Tehnikaülikooli Tartu Kolledži tööstusökoloogia laboris ajavahemikus 18.11.2020-18.02.2021. Kompostisegud valmistati kahes korduses, lisaks valmistati kontrollkompost (kompost, kuhu ravimite lahuseid ei lisatud). Vahekorrad valiti tuginedes kirjandusele ja eelnevalt tehtud uurimustele [2, 94, 95].

Kokku valmistati kaheksa kompostisegu, mida piisava hapnikutaseme tagamiseks segati perioodiliselt. Kompostisegude niiskusesisaldus hoiti 60-70% kogu katse jooksul, seda mõõdeti 3-4 korda nädalas ning vajadusel komposte niisutati. Kompostisegude koostis on välja toodud Tabelis 3.2.

Kasutatud kompostisegu komponendid ja lisatud lisandid pärinevad samadest allikatest, mida kasutati ka katsetingimuste väljatöötamisel. Seega on nende kirjeldused ja päritolud välja toodud eelnimetatud peatükis. Eksperimentide detailne ülesehitus ning kasutatud materjale kirjeldus on toodud Sille Pragi magistritöös [96], mis käsitleb ravimijääkide lagunemist käesolevas töös uuritud kompostimisprotsessi käigus.

Tabel 3.2 Katses kasutatud kompostisegude koostis

Kompostisegu kirjeldus	Lisand	Lisandi kogus, % kogu kompostisegu massi järgi
reoveesete + turvas	õlleraba	7%
reoveesete + turvas	EM lahus	7%
reoveesete + turvas	etanool	0,3%
reoveesete + turvas	-	-

3.3. Analüüsid

Kõik keemilisteks ja mikrobioloogilisteks analüüsideks vajalikud kemikaalid ja reagendid osteti ettevõttest HNK Analüüsitehnika OÜ (Tallinn, Eesti). Kemikaalidest kasutati D-(+)-glükoosi ($\geq 99,5\%$, Sigma Aldrich), streptomütsiinsulfaati ($\geq 99\%$, Sigma Aldrich), tsükloheksimiidi ($\geq 94\%$, Sigma Aldrich).

Kemikaalid kaaluti analüütilise kaaluga ABJ 120-4M (mõõtetäpsus $\pm 0,2$ mg, tootja: Kern & Sohn, Balingen, Saksamaa). Destilleeritud vesi valmistati laboris kohapeal seadmega RO01033 (ROWA, Heimsheim, Saksamaa).

3.3.1. Kuivaine määramine

Turba, sette ning erinevate segude niiskusesisalduse mõõtmiseks kasutati massikao meetodit [97]. Selleks kaaluti umbes 10 grammi lisandit või segu mida inkubeeriti 24 tunni jooksul inkubaatoris 105°C juures. Peale seda proovid kaaluti ja saadi nende kuivainesisaldus ning saadud kuivainesisaldusest arvutati omakorda niiskusesisaldus. Kuivainesisaldus määrati 3-4 korda nädalas. Piisava õhutamise tagamiseks segati kompostisegusid perioodiliselt (2-3 korda nädalas).

3.3.2. Happesuse ja elektrijuhtivuse määramine

Happesuse ja elektrijuhtivuse määramine viidi läbi järgnevalt [98, 99]. Valmistatud kompostisegudest võeti 10 grammi segu ning destilleeritud vett lisati 50 grammi. Seejärel proovid segati ja lasti 24 tundi seista toatemperatuuril ning peale seda mõõdeti lahuse pH ja elektrijuhtivus. Happesuse määramiseks kasutati multimeetrit *WTW Multi 340i* koos elektroodiga *Sentix 41*, elektrijuhtivuse määramiseks kasutati elektroodi *Tetracon 325*. Täpsuse huvides tehti igast kompostisegust 2 proovi happesuse ja elektrijuhtivuse määramise jaoks.

3.3.3 Keemiliste parameetrite määramine

Igast anumast võeti 250g kompostisegu, mis pakendati hermeetiliselt suletud plastikust kotti ning saadeti Eesti Maaülikooli mullateaduse ja agrokeemia osakonna

laborisse. Laboris määrati kõikidest erinevatest proovidest kolmes korduses orgaanilise aine, lämmastiku-, süsiniku-, kaaliumi- ja fosforisisaldus. Antud parameetrid mõõdeti esmalt katse alguses, seejärel üks nädal, üks kuu ja kolm kuud peale ühendite lisamist.

3.3.4 Mikrobioloogilised analüüsid

Populaarseimaks meetodiks tahkete pinnaseproovide mikroorganismide uurimisel on pinnase hingamisaktiivsuse mõõtmine CO₂ eraldumise või O₂ neeldumise kaudu [100]. Pinnase mikroorganismide aktiivsuse määramiseks kasutati *OxiTop*® manomeetrilist mõõtmisüsteemi [101], mis on Saksamaa firma WTW toodang. Antud süsteem ja katsetingimused vastavad rahvusvahelistele standardmeetoditele. [102] Mikroobne hingamisaktiivsus määrati tuginedes ISO standardile 16072 [103]. Mikroobse biomassi määramine toimus ISO standardi 14240-1 [104] alusel. Lisaks mikroobsele hingamisaktiivsusele ja mikroobide biomassile määrati seente ja bakterite suhe, milleks kasutati modifitseeritud kujul selektiivse inhibitsiooni meetodit [105]. Selektiivset inhibitsiooni kasutatakse, et määrata kindlaks ökoloogilistes protsessides seente ja bakterite suhe. Need katsed on suhteliselt kiired, sest lisandina kasutatakse inhibiitorit ning tulemused saadakse mõne päeva jooksul [106]. Meetodi rakendamiseks võeti 50 grammi igast segust ning proove tehti kolmes korduses. Esimesse anumasse lisati tsükloheksimiidi (5 mg×g⁻¹, Sigma Aldrich), anumal lasti seista tund aega tõmbkapi all ning seejärel lisati anumasse glükoosi (2.5 mg×g⁻¹). Teise anumasse lisati samuti tsükloheksimiidi (5 mg×g⁻¹, Sigma Aldrich), anumal lasti seista tund aega tõmbkapi all, misjärel lisati anumasse veel glükoosi (2.5 mg×g⁻¹) ja streptomütsiinsulfaati (2,5 mg×g⁻¹, Fluka). Kolmandasse anumasse lisati streptomütsiinsulfaati (2,5 mg×g⁻¹) ja glükoosi (2.5 mg×g⁻¹). Anumad suleti peale kemikaalide lisamist, need jäeti toatemperatuurile üheks tunniks soojenema ning peale soojenemist asetati anumad kliimakambriisse 24 tunniks 22 kraadi juurde.

Bakterite ja seente osakaalu leidmiseks kasutati alltoodud valemeid [107]:

$$\text{Bakterite osakaal} = \left(\frac{A-B}{A-D} \right) \times 100 \quad (3.1)$$

$$\text{Seente osakaal} = \left(\frac{A-C}{A-D} \right) \times 100 \quad (3.2)$$

Kus

A - süsihappegaasi sisaldus ainult glükoosi lisamisel;

B - süsihappegaasi sisaldus glükoosi ja streptomütsiinsulfaadi lisamisel;

C - süsihappegaasi sisaldus glükoosi ja tsükloheksimiidi lisamisel;

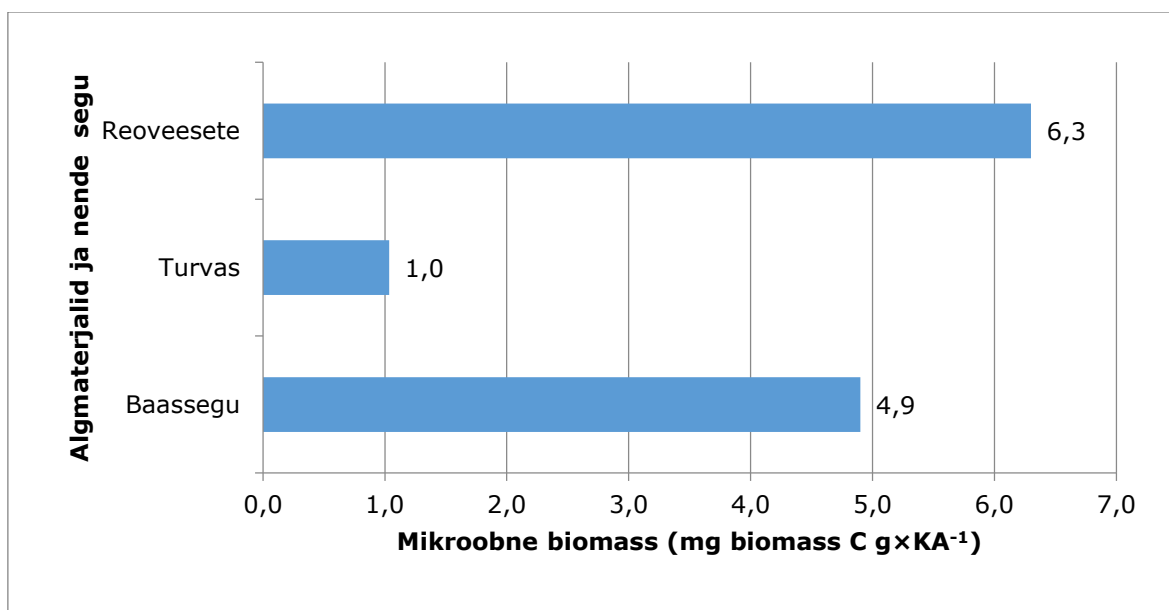
D - Süsihappegaasi sisaldus glükoosi, streptomütsiinsulfaadi ja tsükloheksimiidi lisamisel.

4. TULEMUSED JA ARUTELU

4.1 Katsetingimuste väljatöötamine

Katsetingimuste väljatöötamisel kasutati kolme erinevat lisanditi: õlleraba, efektiivsete mikroorganismide lahust ning etanooli. Neid lisati erinevates kontsentratsioonides baassegule (reoveesete + turvas), et leida kompostisegude optimaalsed mikrobikoosluse aktiivsuse näitajad. Selleks määrati kõikide materjalide ja segude kuivained, mille abil omakorda arvutati mikroobne biomass.

Joonis 4.1 kirjeldab reoveesette, turba ning nende omavaheliste segude (baassegude) keskmist mikroobset biomassi. Baassegusid kasutati eelnimetatud lisanditega katsete tegemisel. Võrdluseks on välja toodud kõigi baassegude keskmine tulemus.

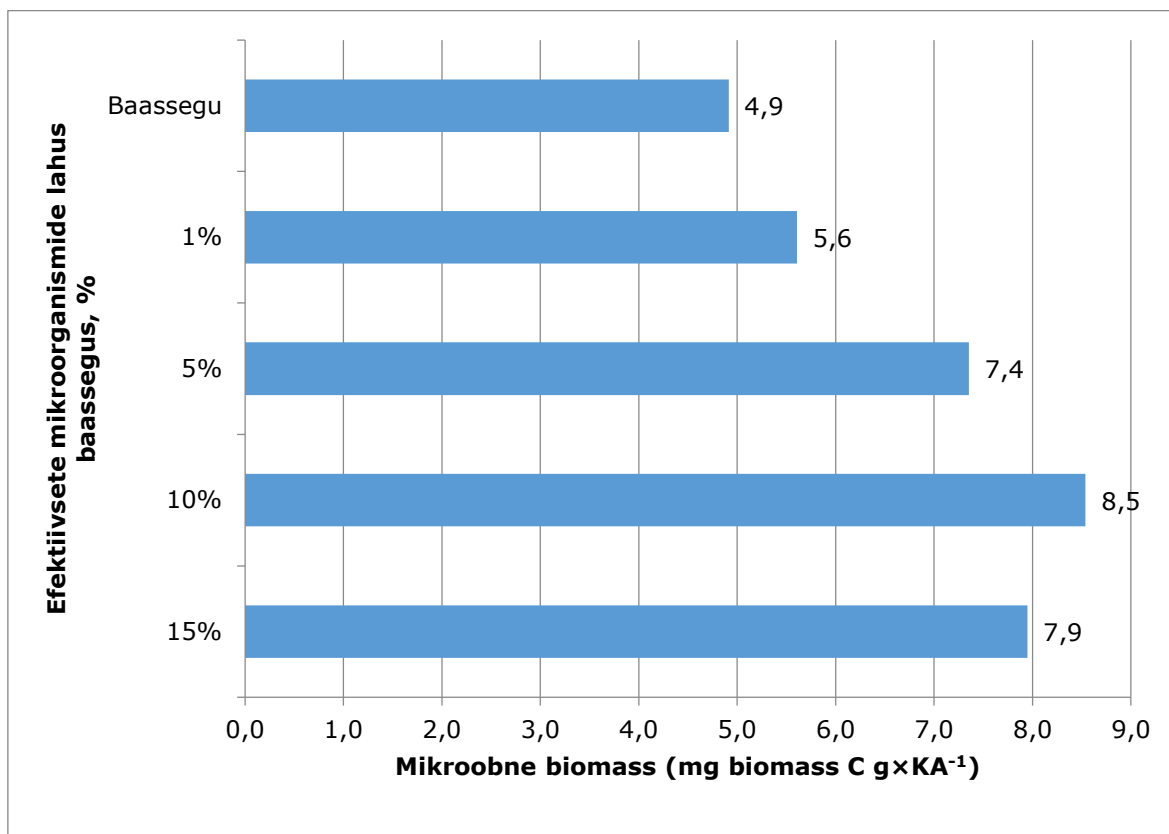


Joonis 4.1 Algmaterjalide ja nende segude (baassegude) mikroobne biomass

Jooniselt 4.1 on näha, et reoveesette mikroobne biomass on üle kuue korda kõrgem kui turba mikroobne biomass. Valmistatud turba ja reoveesette segu mikroobne biomass on seejuures lähedasem reoveesette vastavale näitajale.

4.1.1 Katsed efektiivsete mikroorganismide lahusega

Esimese lisandina kasutati baassegu efektiivsete mikroorganismide lahust ning saadud mikroobsete biomasside tulemusi kirjeldab Joonis 4.2.



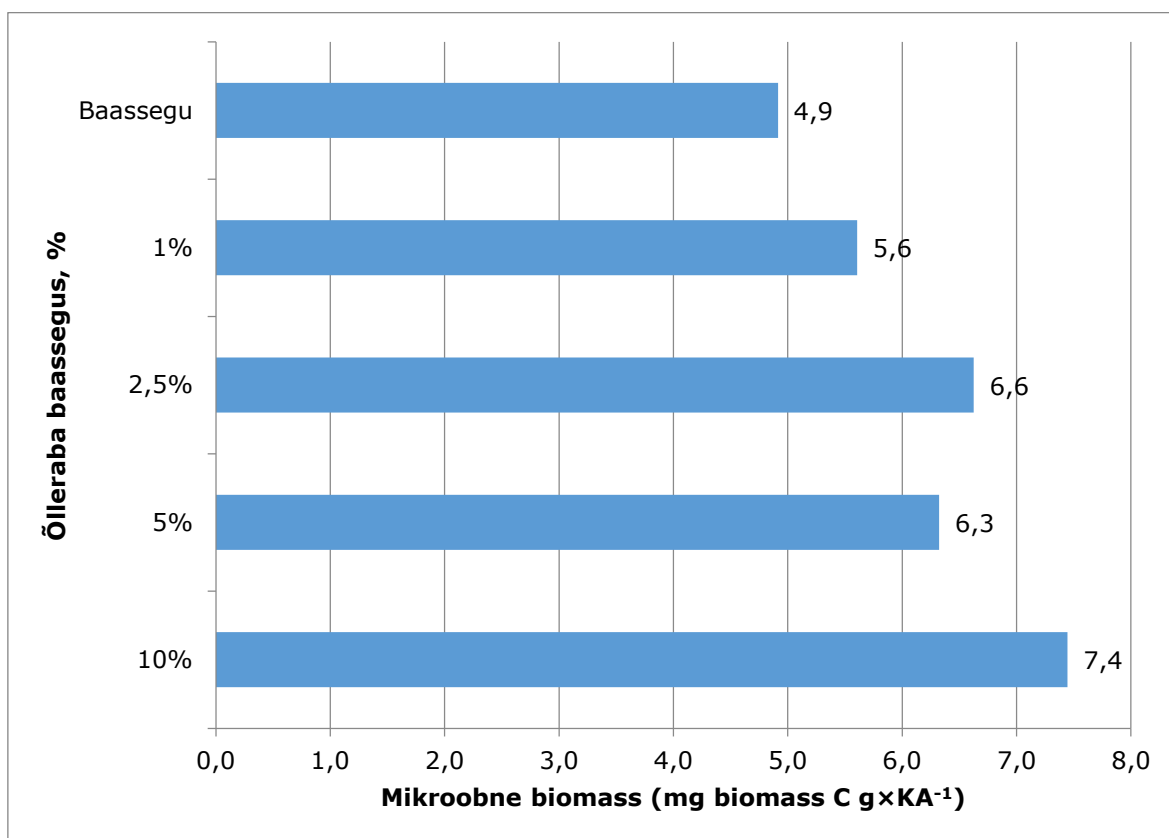
Joonis 4.2 Efektiivsete mikroorganismide lahuse kontsentratsioonide mõju kompostisegu mikroobe biomassile

Jooniselt on näha, et parima tulemuse saab, kui efektiivsete mikroorganismide lahuse moodustab 10% baassegu massist.

4.1.2 Katsed õllerabaga

Katseid erinevate õlleraba kogustega iseloomustab Joonis 4.3. Maksimaalne uuritud kontsentratsioon tulenes saadud lisandi kogusest (õlleraba on teadaolevalt hinnatud loomatoidu koostisosa, mistõttu tema suures koguses hankimine ja lisamine kompostisegule osutub kulukaks ettevõtmiseks). Käesolevas töös läbiviidud katsed näitasid (vt. Joonised 4.2 ja 4.3), et efektiivsete mikroorganismide lahuse ning õlleraba

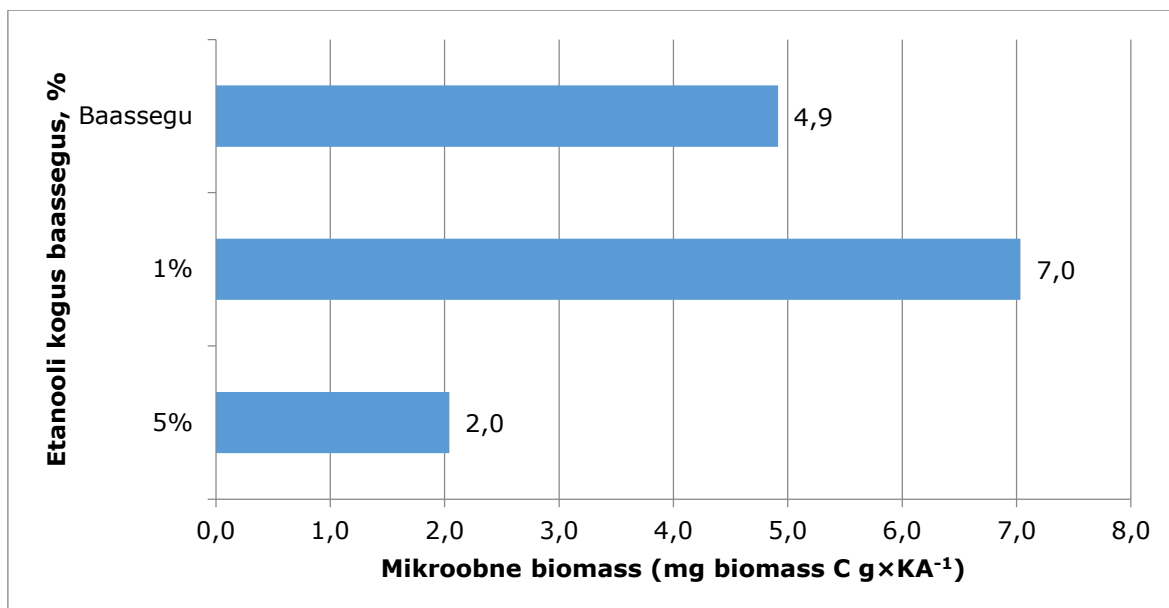
mõjutavad kompostisegude mikroobse biomassi sisaldust sarnaselt. Jooniselt on näha, et õlleraba sisalduse tõstmine kompostimissegus tõstab mikroobse biomassi sisaldust.



Joonis 4.3 Õlleraba erinevate kontsentratsioonide mõju kompostisegu mikroobsele biomassile

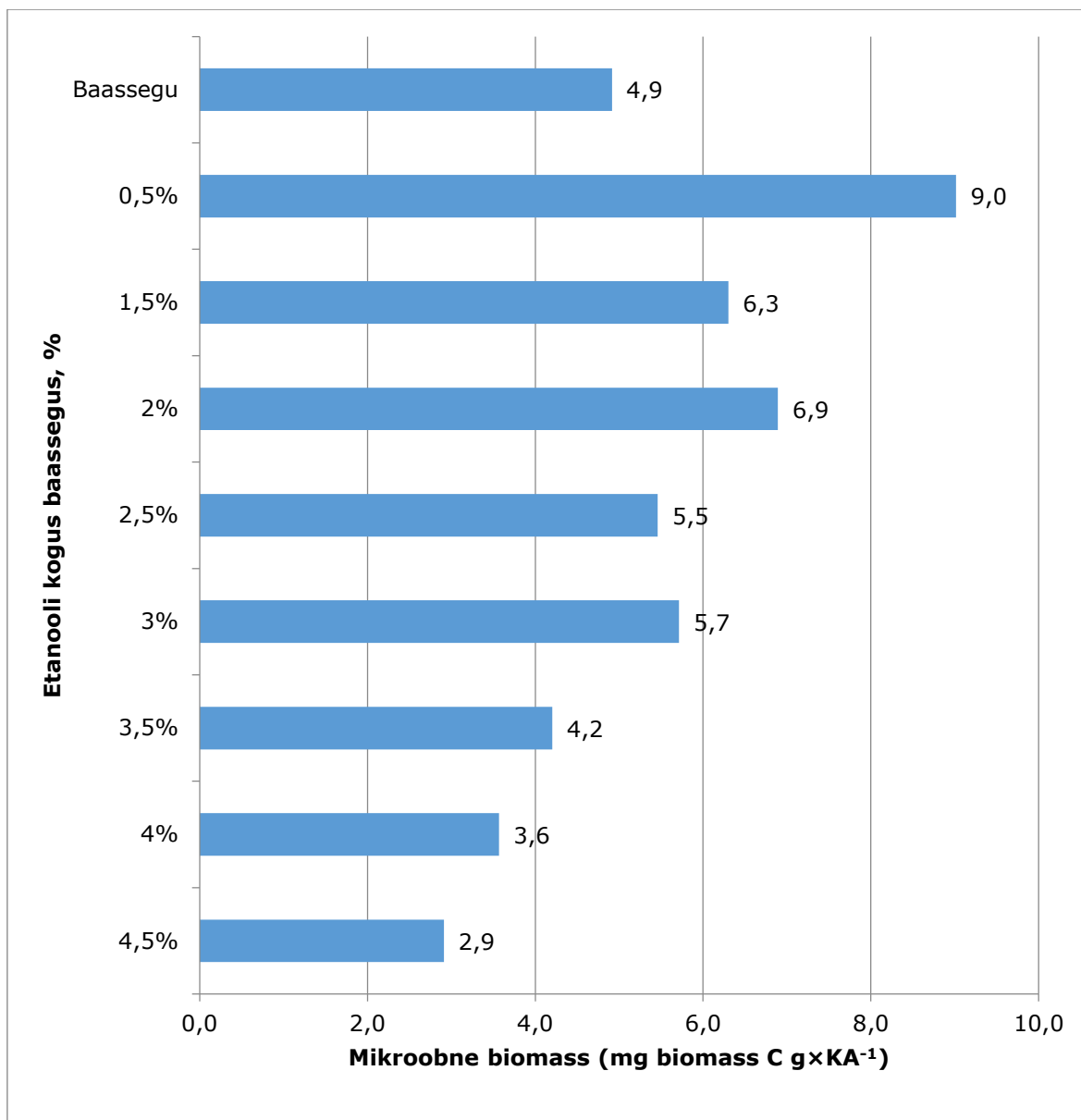
4.1.3 Katsed etanooliga

Katsetingimuste väljatöötamise kõige olulisemaks osaks oli leida optimaalne etanooli kogus kompostisegu jaoks. Eelnevalt tehtud katsetuste põhjal lisati esmalt baassegule 1% ja 5% etanooli ning saadud tulemused on näha Joonisel 4.4.



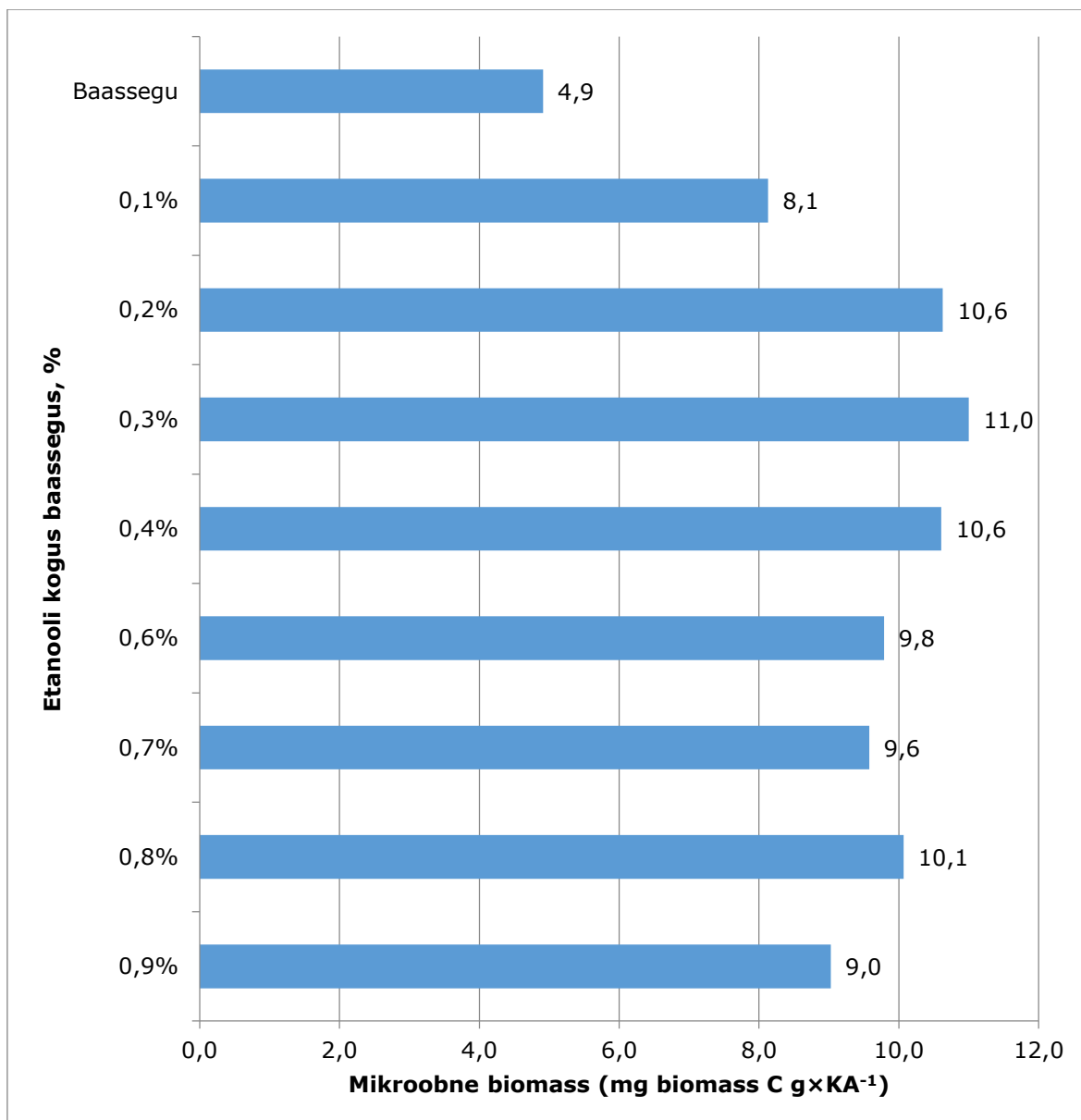
Joonis 4.4 Etanooli mõju kompostisegu mikroobsele biomassile

Kuna 5% etanooli lisamine baassegule mõjus mikroobide biomassile inhibeerivalt, siis järgnevalt katsetati koguseid mis jäid 1% ja 5% vahele ning lisaks uuriti ka 0,5% etanooli katsesegule lisamise mõju (vt. Joonis 4.5).



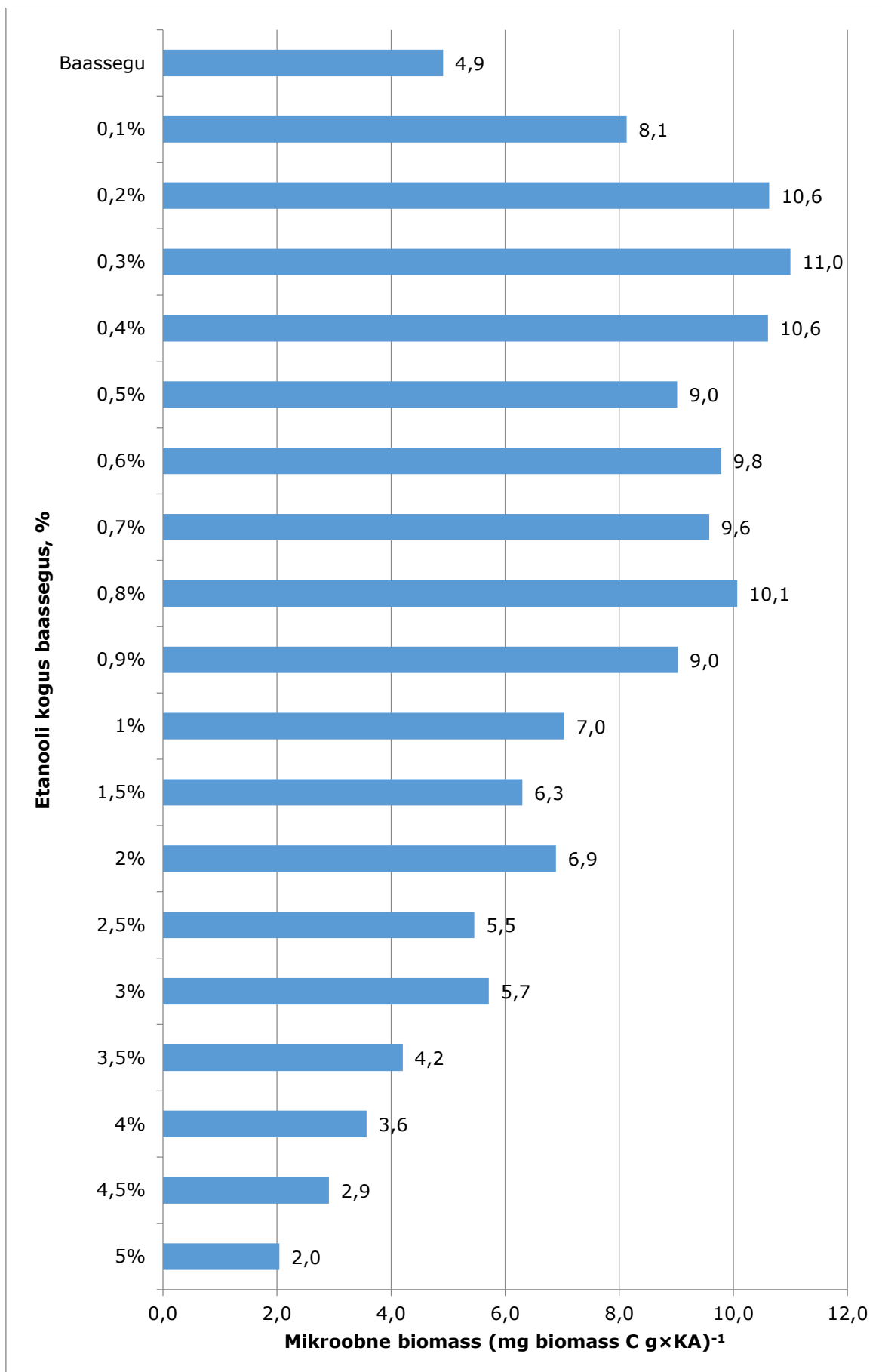
Joonis 4.5 Erinevate etanooli kontsentratsioonide mõju kompostisegu mikroobe biomassile

Saadud tulemustest (vt. Joonis 4.5) selgus, et 0,5% etanooli lisamine baassegule tõstis mikroobset biomassi enim. Seega oli selge, et optimaalne kontsentratsioon peab jääma 0,1% ja 0,9% vahele. Joonis 4.6 esitleb selles vahemikus etanooli kontsentratsioonidega saadud mikroobse biomassi määramise tulemusi ning ühtlasi näitab ära etanooli optimaalse koguse baassegus.



Joonis 4.6 Etanooli mõju kompostisegu mikroobsele biomassile

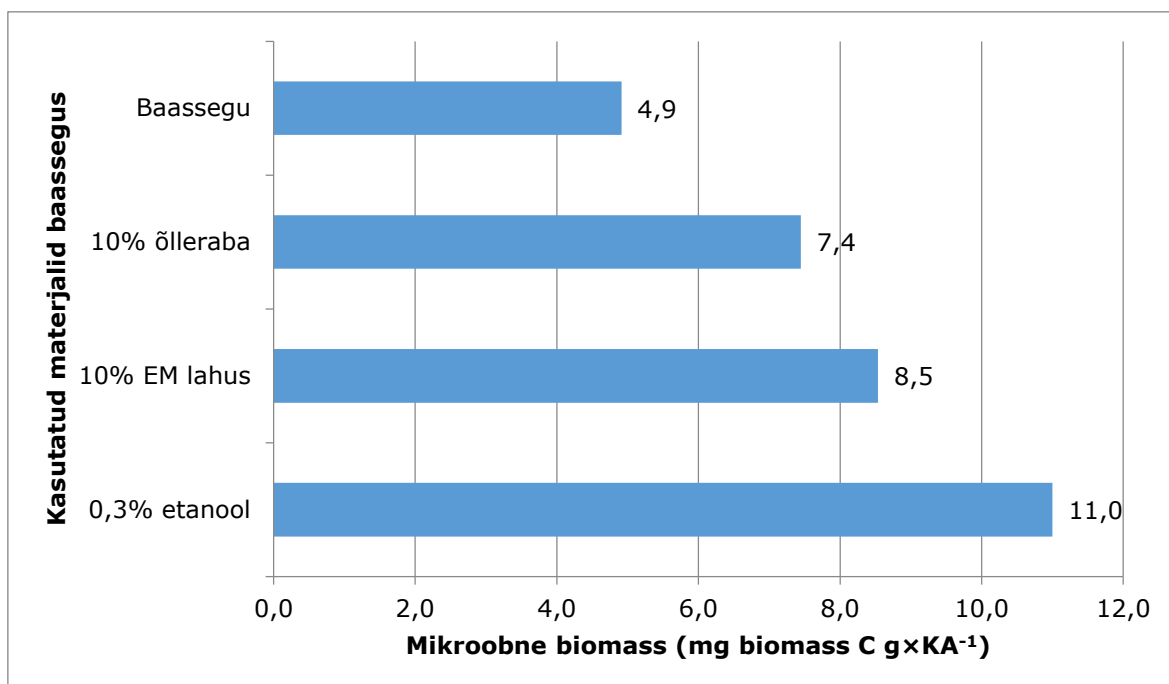
Joonis 4.7 võtab kokku kõik erinevad etanooli kontsentratsioonide tulemused ning näitab ära, millised kogused etanooli tõstavad mikroobset biomassi ja millisest kontsentratsioonist alates mõjub etanool mikroobsele biomassile inhibeerivalt. Saadud tulemuste kohaselt oli käesoleva töö eesmärke silmas pidades optimaalseks etanooli kontsentratsiooniks kompostimissegus 0,3%. Ka kõrgemad etanooli kontsentratsioonid (kuni 0,9%) tagavad uuritavas kompostisegus praktiliselt samaväärse koguse mikroobset biomassi, kuid käesolev uuring näitab, et 0,3%-st kõrgema etanooli sisalduse tekitamine ei ole vajalik (silmas pidades täiendavaid kulusid).



Joonis 4.7 Etanooli mõju kompostisegu mikroobsele biomassile (kõik katsed)

4.1.4 Kompostimiskatseteks valitud lisandite võrdlus

Optimaalsed lisandite kontsentratsioonid võtab kokku Joonis 4.8. Kui lisada õlleraba või EM lahust baassegule 10%, tõstab see mikroobset biomassi antud lisandite puhul enim. Perspektiivikaimaks uuritud kompostisegu lisandiks osutus aga etanool koguses 0,3% baassegu kogumassist.

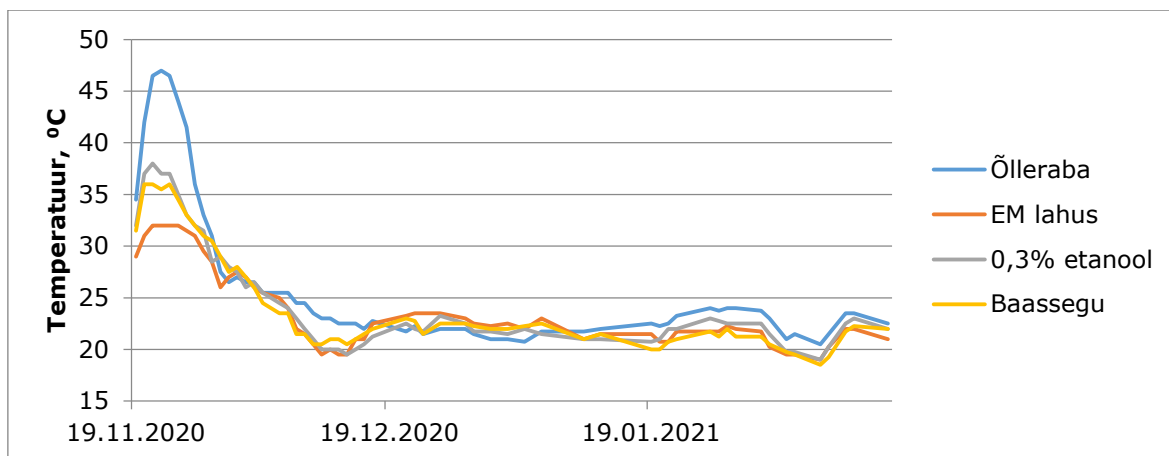


Joonis 4.8 Erinevate lisandite mõju kompostisegu mikroobsele biomassile

4.2 Kompostimisprotsessi uurimine

4.2.1 Temperatuuri käik kompostimisprotsessi käigus

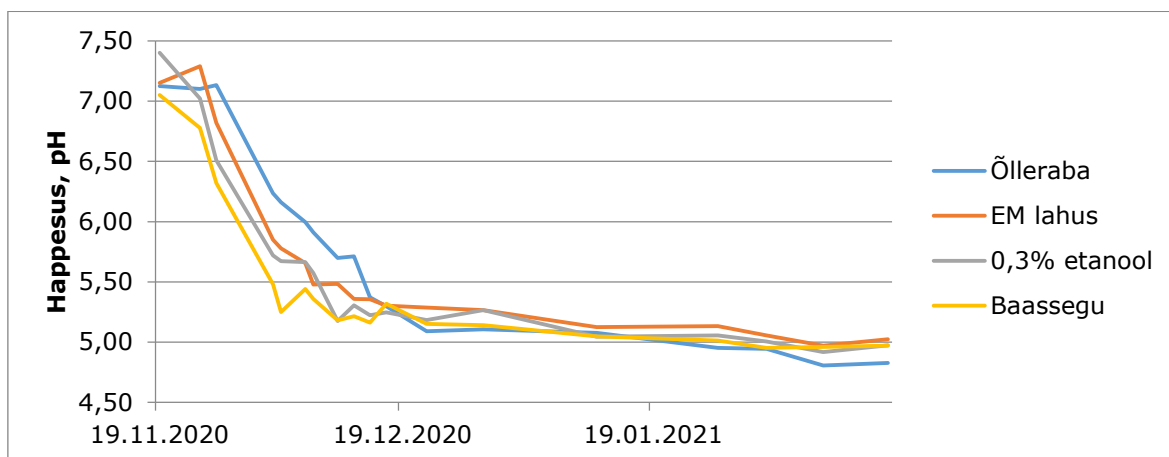
Joonisel 4.9 on toodud kompostisegude temperatuuri käik kolme kuu jooksul. Reoveesette kompostimisel peab temperatuur kümne päeva jooksul olema vähemalt 55 °C, et tagada patogeenide hukkumine [93]. Nagu näha, siis ühelgi juhul sellist temperatuuri uuritavad kompostisegud ei saavutanud. Biolagunemine on intensiivseim temperatuuride vahemiksu 45–55 °C [93]. Selline temperatuur saavutati õlleraba kasutamisel lisandina. Peale esimese kuu möödumist jäid temperatuurid stabiilseks kõikide kompostisegude puhul.



Joonis 4.9 Erinevate lisandite mõju kompostisegu temperatuurile

4.2.2 Kompostisegude pH ja elektrijuhtivus

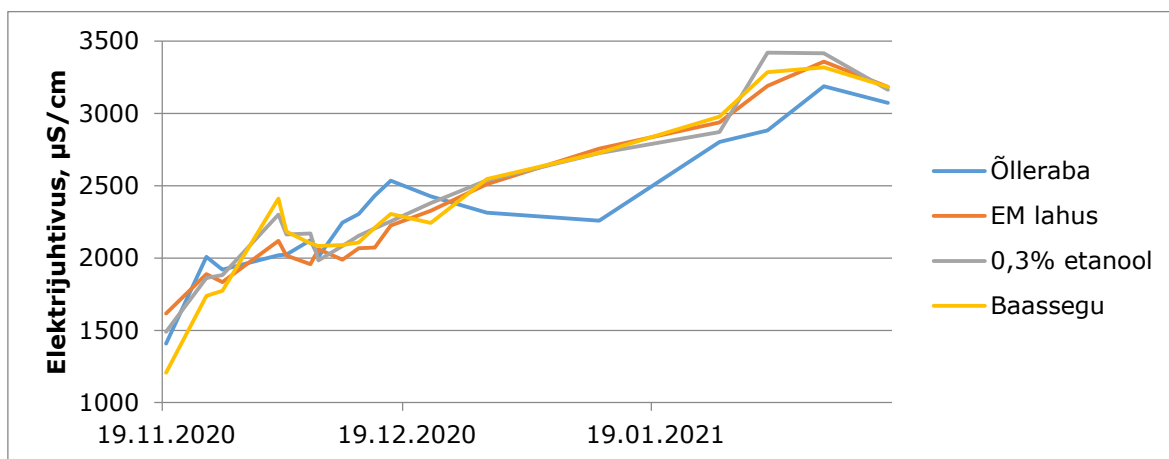
Joonisel 4.10 on toodud uuritavate kompostisegude pH väärtuste muutus kompostimisprotsessi käigus. Bakteritele sobib enamasti pH vahemik 6–7,5 ja seentele 5,5–8 [93]. Antud juhul on näha, et keskkond võiks olla vähem happeline. See on ilmselt tingitud turba kasutamisest kompostisegu valmistamisel.



Joonis 4.10 pH muutus kompostimisprotsessi käigus

Parim pH vahemik kompostimisprotsessil on 6,5–7,2. Kui pH langeb alla 6, siis biolagunemise kiirus aeglustub ning komposti temperatuur ei tõuse, sest mikroorganismide toitumine ei toimu efektiivselt enne, kui neutraalselähedane pH on saavutatud. Valmiskomposti pH peaks soovituslikult jääma vahemikku 7,5–8,5 [108].

Joonis 4.11 kirjeldab elektrijuhtivust erinevates kompostisegudes kolme kuu vältel. Katse esimesel päeval oli elektrijuhtivus kõikides proovides võrdlemisi madal. Kõige madalam $1206 \mu\text{S}\times\text{cm}^{-1}$ oli baassegu kompostis kuhu lisandeid ei lisatud ning kõige kõrgem $1616 \mu\text{S}\times\text{cm}^{-1}$ kompostisegus kuhu lisati EM lahust. Järgneva viie päeva jooksul kasvas elektrijuhtivus stabiilselt kõikides proovides. Seejärel jätkus kasv vahepealsete langustega ning haripunktid saavutati katseperioodi eelviimasel nädalal. Kompostisegus, kuhu oli lisatud etanooli oli elektrijuhtivuse kõrgeim tase 02.02.21 väärtusega $3420 \mu\text{S}\times\text{cm}^{-1}$. Ülejäänud proovide kõrgeim väärtus saavutati kuupäeval 09.02.21 vastavalt: õlleraba $3187,5 \mu\text{S}\times\text{cm}^{-1}$, EM lahus $3357,5 \mu\text{S}\times\text{cm}^{-1}$ ning baassegu $3317,5 \mu\text{S}\times\text{cm}^{-1}$. Viimasel nädalal hakkas elektrijuhtivus vaikselt langema.

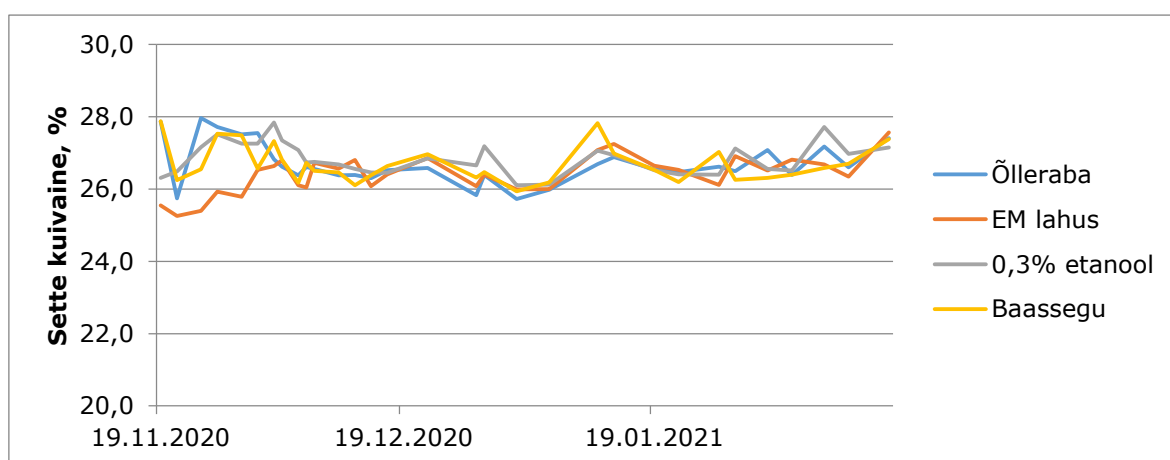


Joonis 4.11 Elektrijuhtivuse muutus kompostimisprotsessi käigus

Orgaanilise aine lagundamisel vabanenud mineraalsoolad ja ammoniumioonid tõstavad kompostisegu elektrijuhtivust [109]. Reoveesette kõrge elektrijuhtivus vähendab mikroobset aktiivsust ja biomassi ning pärsib taimede kasvu [110]. Komposti elektrijuhtivus on oluline parameeter, kuna see mõjutab taimede kasvu ning seemnete idanemist. Protsessi lõpuks peaks see jääma alla $2,5 \text{ mS}\times\text{cm}^{-1}$; kõrgem näitaja võib kahjustada taimede võimet mullast vett omandada, kuna liigne soolasisaldus vähendab mulla ja taimejuurte vahelist osmootset rõhku [19]. Antud katsetes jäi elektrijuhtivus aga üle $2,5 \text{ mS}\times\text{cm}^{-1}$. Seetõttu ei ole ükski kompostisegu peale kolmandat kuud alates kompostimisprotsessi algusest piisavalt madala elektrijuhtivusega.

4.2.3 Kompostisegude kuivainesisaldus

Kuivas kompostisegus mikroorganismid elada ei saa ning soodsaimaks kompostisegu niiskusesisalduseks loetakse 45–65% [93]. Nagu Jooniselt 4.12 näha, siis katse jooksul oli niiskuse sisaldus veidi suurem, keskmiselt — $26,7 \pm 0,1\%$. Kõrgem niiskusesisaldus oli tingitud turba omadusest säilitada rohkem vett. Selleks, et kuivaine sisaldust suurendada tuleks kindlasti lisada suurema süsiniku sisaldusega materjale.



Joonis 4.12 Kompostisegude kuivainesisaldus

4.2.4 Kompostisegude mõningad olulisemad keemilised parameetrid

Tabel 4.1 kirjeldab erinevates kompostisegudes leiduvate keemiliste parameetrite sisaldust. Uuritavad elemendid on fosfor, kaalium, lämmastik, süsinik ja orgaaniline aine. Lisaks sellele on tabelis arvatatud süsiniku ja lämmastiku suhe.

Bakterid vajavad orgaanilise aine lagundamiseks energiaallikana süsinikku ja valkude moodustamiseks lämmastikku suhtes $C/N=20-30$ ning valmiskomposti optimaalne $C/N=12-20$ [93]. Tabelis 4.1 toodu näitab, et meie katsetingimused sellele ei vastanud. Kõige madalamaks C/N suhteks oli 9,7, mis saadi efektiivsete mikroorganismide (edaspidi „EM“) lahusega kompostisegus katse alguses. Kõrgeim suhe saavutati samuti EM lahuses, peale ühte kuud katsete algusest ning selle väärtus oli 10,8. Selliste näitajate puhul saab väita, et komposti moodustumist tegelikkuses ei toimunud.

Kaalium ja fosfor on lämmastiku kõrval kaks kõige olulisemat toitelementi taimedele. Kaalium soodustab nt pungade teket, õitseda ja viljuda, fosforil on oluline roll juurestiku arengul.

Tabel 4.1 Uuritavate kompostisegude keemilised parameetrid

Kompostisegu		Elementide sisaldused proovis				C/N suhe	Orgaaniline aine (%)
		P (%)	K (%)	N (%)	C (%)		
Õlleraba	Katse algus	2 ± 0,1	0,2 ± 0,0	3,7 ± 0,1	37,6 ± 1,1	10,1 ± 0,2	74,8 ± 0,5
	1 nädal	2,1 ± 0,2	0,2 ± 0,0	3,6 ± 0,1	37,2 ± 0,3	10,4 ± 0,2	72,5 ± 0,6
	1 kuu	1,9 ± 0,2	0,2 ± 0,0	3,4 ± 0,1	36,8 ± 1,3	10,7 ± 0,2	73,5 ± 1,8
	3 kuud	1,8 ± 0,1	0,2 ± 0,0	3,3 ± 0,1	34,7 ± 2,7	10,5 ± 0,6	73,4 ± 1,5
EM lahus	Katse algus	2,0 ± 0,1	0,2 ± 0,0	3,7 ± 0,2	35,9 ± 2,1	9,7 ± 0,1	72,6 ± 2,6
	1 nädal	2,0 ± 0,1	0,3 ± 0,0	3,7 ± 0,0	36,6 ± 0,9	10,0 ± 0,2	71,4 ± 0,9
	1 kuu	2,1 ± 0,1	0,2 ± 0,0	3,4 ± 0,0	36,3 ± 0,3	10,8 ± 0,2	72,4 ± 0,6
	3 kuud	1,9 ± 0,1	0,2 ± 0,0	3,2 ± 0,2	34,4 ± 2,0	10,7 ± 0,2	72,6 ± 0,7
0,3% etanool	Katse algus	2,0 ± 0,2	0,2 ± 0,0	3,6 ± 0,2	34,7 ± 2,3	9,8 ± 0,2	74,2 ± 2,5
	1 nädal	2,2 ± 0,4	0,2 ± 0,0	3,4 ± 0,3	34,2 ± 2,3	10,0 ± 0,2	72,5 ± 4,2
	1 kuu	2,1 ± 0,1	0,2 ± 0,0	3,4 ± 0,0	35,8 ± 0,2	10,6 ± 0,1	71,9 ± 0,1
	3 kuud	1,9 ± 0,1	0,2 ± 0,0	3,2 ± 0,2	33,8 ± 1,2	10,4 ± 0,3	71,5 ± 1,3
Baassegu	Katse algus	1,9 ± 0,1	0,2 ± 0,0	3,5 ± 0,1	37,6 ± 1,0	10,6 ± 0,1	73,0 ± 1,4
	1 nädal	2,1 ± 0,1	0,2 ± 0,0	3,6 ± 0,1	36,3 ± 0,5	10,0 ± 0,2	71,9 ± 0,5
	1 kuu	2,2 ± 0,1	0,2 ± 0,0	3,4 ± 0,1	36,4 ± 0,2	10,6 ± 0,3	72,4 ± 0,2
	3 kuud	2,0 ± 0,4	0,2 ± 0,0	3,3 ± 0,1	34,7 ± 1,2	10,6 ± 0,4	72,3 ± 0,7

4.2.5 Kompostisegude mikrobioloogilised uuringud

Reoveesette kompostimine on bioloogiline protsess, kus komposti lähteained on ühed olulisemaid tegureid, kuna lagunemisega seotud aktiivsuse määravad ära mikroobides osakaal. Enamiku mikroobide arengu piiravaid parameetreid on seotud füüsikaliskemiliste omadustega, nagu süsiniku-lämmastiku suhe (C/N), niiskus ja temperatuur [66].

Kompostisegu hingamisaktiivsus iseloomustab aeroobsete mikroorganismide toimimist ning see võimaldab hinnata kompostimisprotsessi efektiivsust ning komposti valmimist [111]. Kui kompostisegu hingamisaktiivsus on kõrge, siis see näitab suurt mikroobset aktiivsust ning kergestilagundatavate ühendite kättesaadavust, mis on mikroorganismidele energiaallikaks [112].

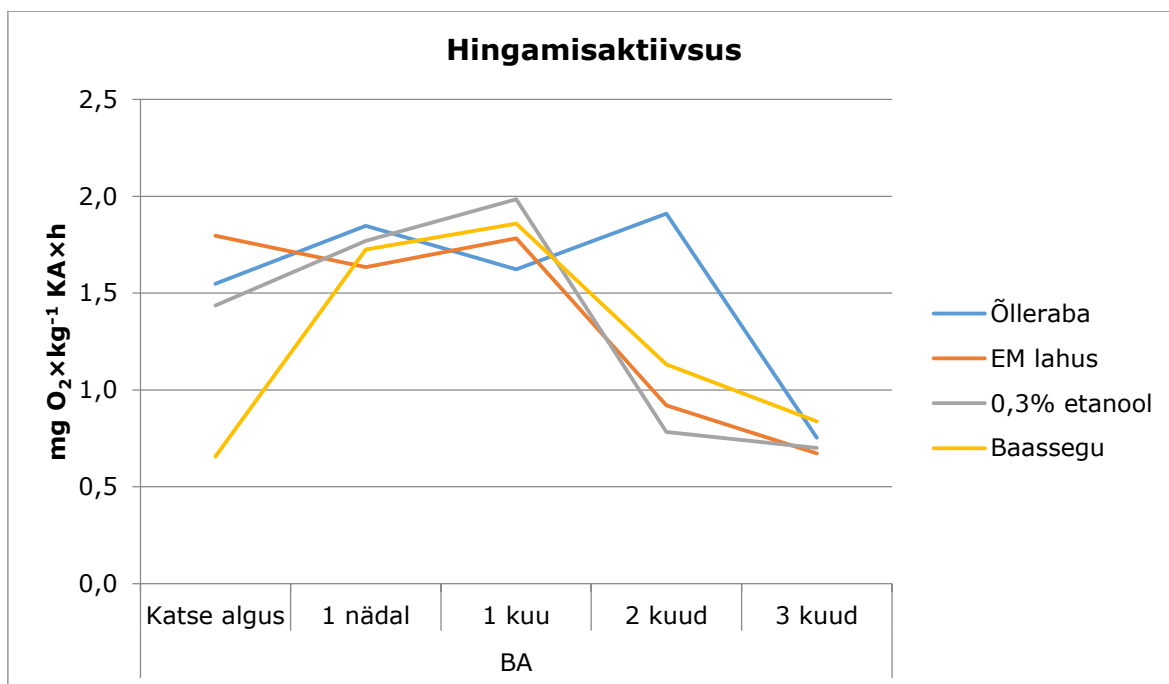
Tabelis 4.2 on esitletud erinevate kompostisegude hingamisaktiivsus katse alguses, peale esimest nädalat ning peale esimest, teist ja kolmandat kuud. Hingamisaktiivsuse alusel näeme ära mikroobikoosluse arengu ja kasvu - on näha, et kõikide segude puhul joonistub välja mikroobikoosluse elu iseloomustav kuju (vt. Joonis 4.13) - näitajad on madalamad alguses, tõusevad kompostimise keskel ja kompostimisprotsessi lõpus on languses ning madalamad kui alguses. Baassegu jäi samaks, sest sinna ei lisatud mikroobikoosluse aktiivsust ja biomassi mõjutavaid lisandeid.

Tabel 4.2 Kompostisegude hingamisaktiivsus ($\text{mg O}_2 \times \text{kg}^{-1} \text{KA} \times \text{h}$)

Kompostisegu	BA				
	Katse algus	1 nädal	1 kuu	2 kuud	3 kuud
Õlleraba	1,5	1,8	1,6	1,9	0,8
EM lahus	1,8	1,6	1,8	0,9	0,7
0,3% etanool	1,4	1,8	2,0	0,8	0,7
Baassegu	0,7	1,7	1,9	1,1	0,8

Joonis 4.13 näitab graafiliselt Tabelis 4.2 toodud tulemusi. Katse esimesel päeval oli ilma saasteaineteta komposti hingamisaktiivsus oluliselt madalam võrreldes

kompostisegudega kuhu lisati saasteaineid. Peale esimese nädala möödumist aga oli hingamisaktiivsus sarnane kõikides kompostides. Kolme kuu möödudes kõikide kompostisegude hingamisaktiivsus langes, jäädes väärtustesse 0,7 ja 0,8. Vaid baasseguga komposti hingamisaktiivsuse näitaja jäi peale kolmandat kuud kõrgemaks kui oli seda katse alguses. Tulemustest võib järeldada, et kergestilagundatavate ühendite kättesaadavus oli katse lõpuks vähenenud.



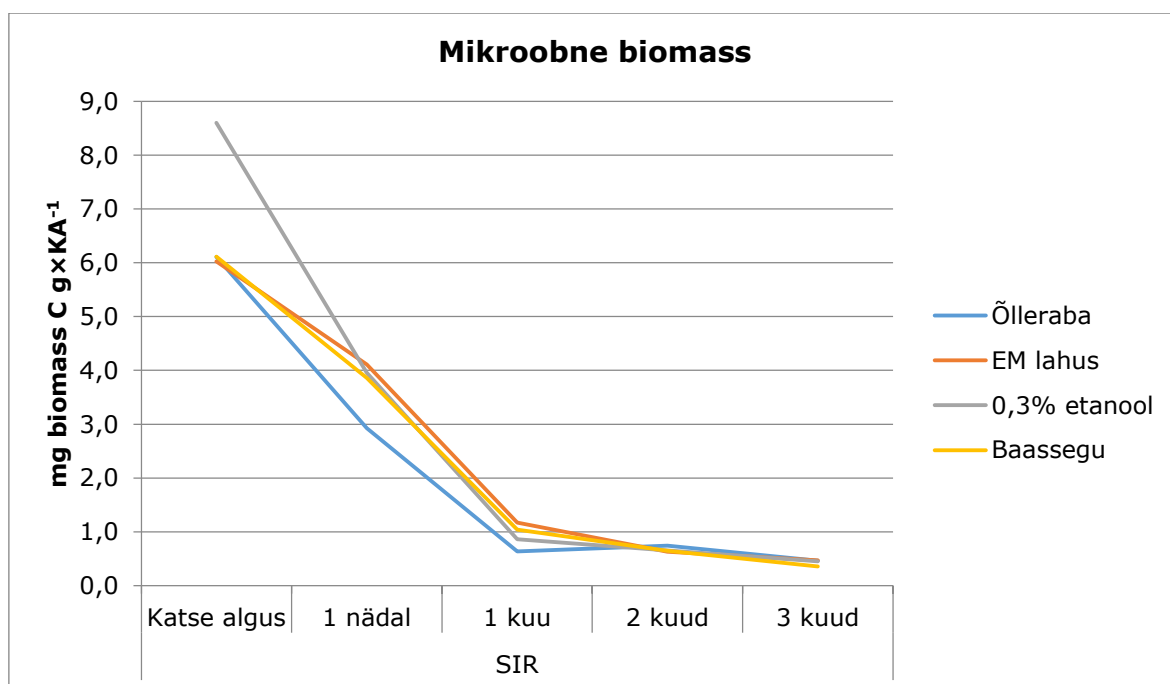
Joonis 4.13 Kompostisegude hingamisaktiivsus

Tabelis 4.3 toodud andmed näitavad, et kompostisegu mikrobioloogiline aktiivsus katse algul on kõrgeim, kui lisandina kasutada etanooli. Ölleraba ja efektiivsete mikroorganismide lahuse lisamine substraadi poolt indutseeritud hingamist ei mõjuta.

Tabel 4.3 Kompostiaunade mikroobne biomass (mg biomass C g×KA⁻¹)

Kompostisegu	SIR				
	Katse algus	1 nädal	1 kuu	2 kuud	3 kuud
Õlleraba	6,1	2,9	0,6	0,7	0,5
EM lahus	6,0	4,1	1,2	0,6	0,5
0,3% etanool	8,6	4,0	0,9	0,7	0,5
Baassegu	6,1	3,9	1,0	0,7	0,4

Joonis 4.14 esitleb mikroobse biomassi andmeid. Proove võeti viiel korral: katse alguses, peale ühe nädala möödumist ning peale ühe, kahe ja kolme kuu möödumist.



Joonis 4.14 Kompostisegude mikroobne biomass

Kõige kiiremini langes mikroobne biomass esimese kuu jooksul kõigis proovides. Järgneva kahe kuu jooksul toimus langus väga vähesel määral. Vaid õllerabaga kompostisegus toimus teisel kuul võrreldes esimesega väike tõus, kuid peale seda langus jätkus. Mikroobse biomassi suurenemisega peaks kaasnema ka suurem biolagunemine [29], kuid kolme kuu jooksul oli olukord vastupidine, seda tõestavad

Tabelis 4.1 kompostisegude keemilised parameetrid. Tabelist on näha, et katseperioodi jooksul ei toimunud muutusi orgaanilise aine lagunemise ega ka teiste mõõdetud parameetrite osas. Antud katse korral ei ole märgata ka lisatud saasteainete mõju mikroobsele biomassile, seega põhjuseks võib olla kõrgem niiskusesisaldus, elektrijuhtivus, madalam temperatuur [19, 29, 94].

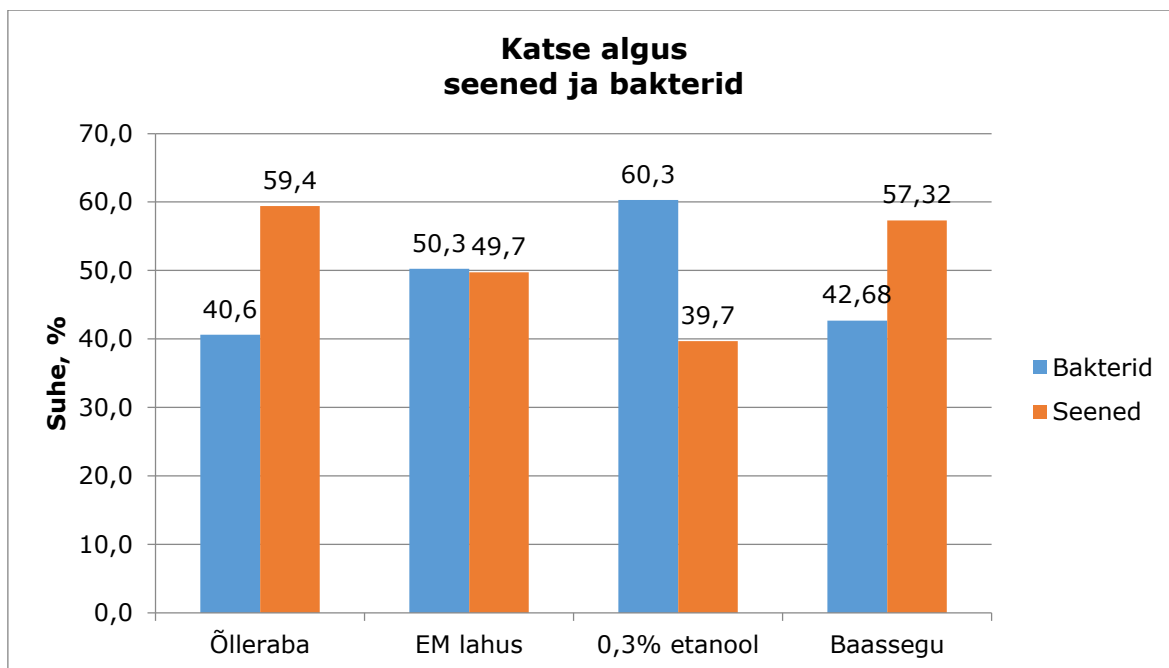
Seente ja bakterite biomassi mõõdeti kolmel korral (katse alguses, peale ühe kuu möödumist ja peale 3 kuu möödumist) ning tulemused on esitatud Tabelis 4.4.

Seente ja bakterite suhe on laialt kasutatav mõõdik, hindamaks keskkonnamõjusid mulla mikroobikooslusele [113]. Seened vajavad vähem toitaineid kui bakterid ning seetõttu olukorras, kus süsinikku on piisavalt, kuid lämmastikku mitte, domineerivad seened, vastupidises olukorras domineerivad bakterid [114]. Etanool võib olla bakteritele toksilisem kui seentele, mõjutades seega seente ja bakterite suhet [115]. Joonisel 4.10 on toodud uuritavate kompostisegude pH väärtuste muutus kompostimisprotsessi käigus. Bakteritele sobib enamasti pH vahemik 6–7,5 ja seentele 5,5–8 [93]. Antud juhul on näha, et keskkond võiks olla vähem happeline. See on ilmselt tingitud turba kasutamisest kompostisegu valmistamisel.

Tabel 4.4 Seente ja bakterite biomassi suhted

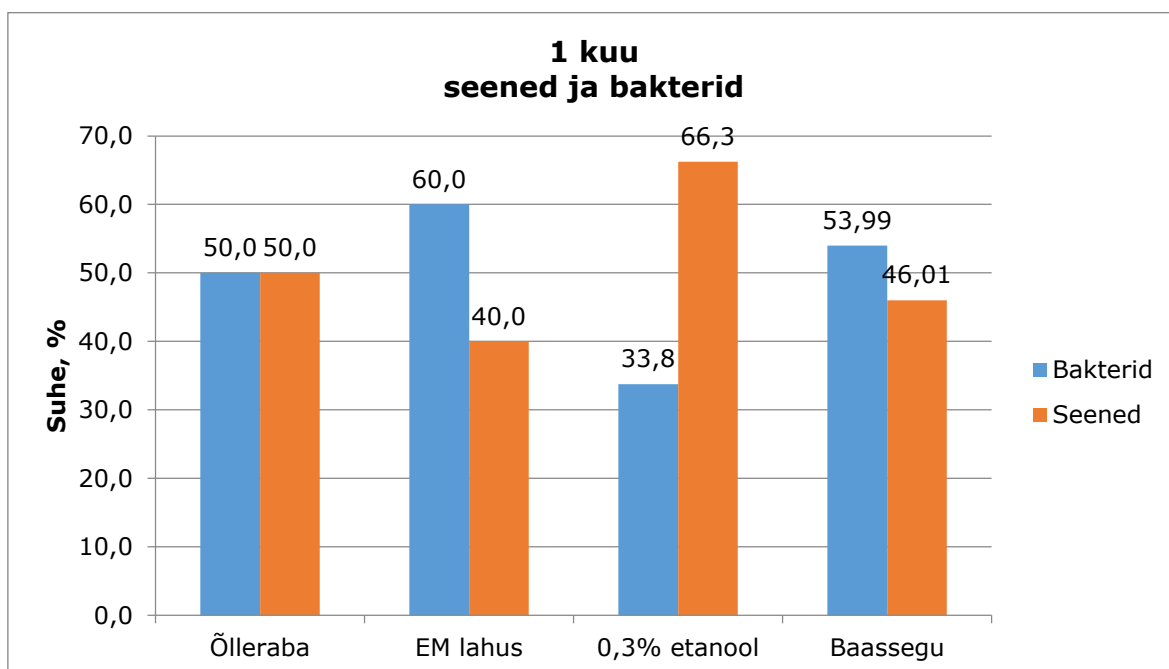
Kompostisegu		Bakterite suhe, %	Seente suhe, %
Õlleraba	Katse algus	40,6	59,4
	1 kuu	50,0	50,0
	3 kuud	33,3	66,7
EM lahus	Katse algus	50,3	49,7
	1 kuu	60,0	40,0
	3 kuud	60,7	39,3
0,3% etanool	Katse algus	60,3	39,7
	1 kuu	33,8	66,3
	3 kuud	50,7	49,3
Baassegu	Katse algus	42,68	57,32
	1 kuu	53,99	46,01
	3 kuud	56,09	43,91

Joonis 4.15 näitab bakterite ja seente suhet katse alguses. Etanooliga kompostisegus olid ülekaalus bakterid. Ilma lisanditeta ning õllerabaga kompostis domineerisid seened. Efektiivsete mikroorganismide lahust sisaldas kompostis oli seeni ja baktereid võrdselt. Tulemustest on näha, et enamasti domineerisid seened, mis viitab sellele, et toitaineid oli bakterite jaoks vähe. Bakterid vajavad rohkem toitaineid kui seened [94, 114]. Võrreldes Päivi Ojala läbiviidud katsetega [94], on näha, et C/N suhe ei olnud katse alguses optimaalses vahemikus (vt. Tabel 4.1). Kuivõrd Ojala töös mõjutas bakterikooslust ka lisatud ravimite kontsentratsioon, siis Joonis 4.15 seda ei toeta, sest baassegu (kuhu ravimeid ei lisatud) käitus sarnaselt segudega kuhu ravimeid lisati. Lisatud ravimite kontsentratsioonid võrreldes Ojala tööga olid 10 korda madalamad [94].



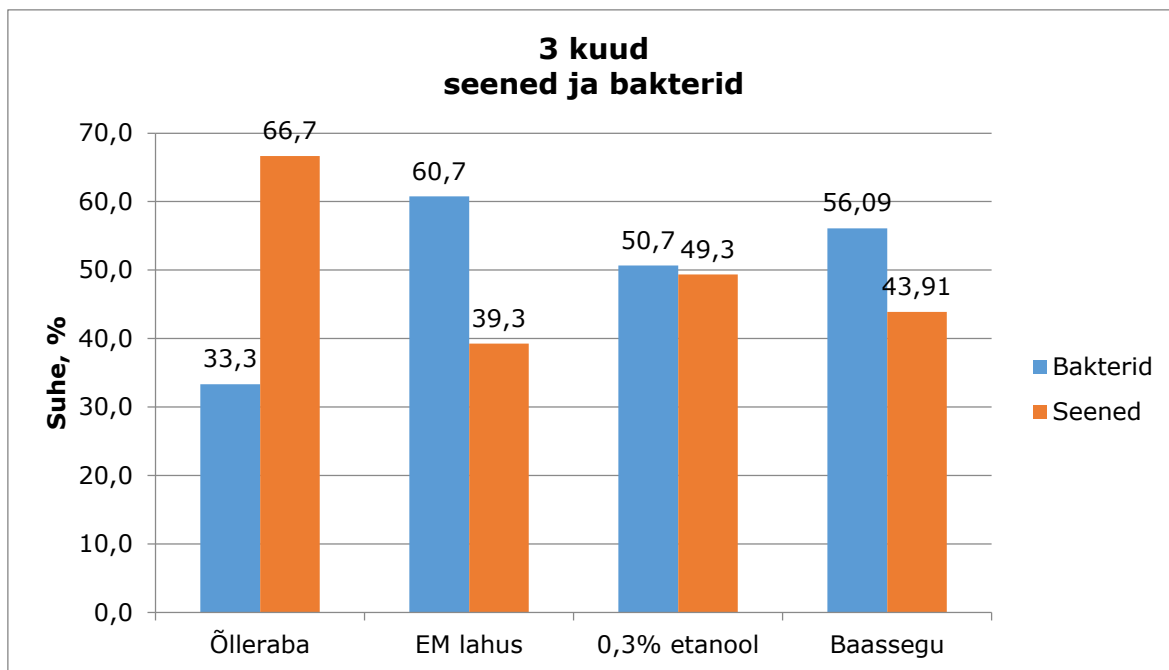
Joonis 4.15 Seente ja bakterite suhe kompostisegudes katse esimesel päeval

Joonisel 4.16 on näha tulemused seente ja bakterite suhete kohta peale ühe kuu möödumist. Etanooliga kompostis on näha seente ülekaalu, mis võib tuleneda etanooli toksilisest omadusest bakteritele. Baassegu ja EM lahusega kompostisegudes domineerisid peale ühe kuu möödumist aga bakterid ning öllerabaga kompostis oli seente ja bakterite osakaal võrdne.



Joonis 4.16 Seente ja bakterite suhe kompostisegudes peale esimese kuu möödumist

Joonisel 4.17 on näha katse tulemused peale kolmanda kuu möödumist. EM lahusega komposti ja baassegu puhul olid endiselt ülekaalus bakterid. Ka etanooli sisaldavas kompostisegus oli bakterite osakaal natukene kõrgem kui seente oma. Öllerabaga kompostis domineerisid selgelt seened.



Joonis 4.17 Seente ja bakterite suhe kompostisegudes peale kolmanda kuu möödumist

Ölleraba puhul oli algselt süsinikku ja lämmastikku võrdses koguses, kuid kolmanda kuu lõpuks on seente suhe kõrge võrreldes bakteritega. EM lahusega lisati baktereid juurde ning kolmanda kuu lõpuks on näha, et bakterite osakaal segus võrrelduna seente osakaaluga on kasvanud. Etanooliga segus on algselt ülekaalus bakterid, sest miskipärast soodustab see nende populatsiooni kasvu. Põhjus võib olla etanooli koostises - süsinik, mis koostisesse kuulub on bakteritele tähtsaks toiduallikaks. Etanooliga lisati juurde just süsinikku (C_2H_5OH). Peale ühe kuu möödumist on etanool andnud eelise seentele, kuid seejärel on osakaalud võrsustunud. Baassegu iseloomustab aga seda, et seeni ja baktereid on üldiselt võrreldavas koguses.

4.3 Ravimijääkide lagunemisest reoveesette kompostimisprotsessi käigus

Ravimijääkide lagunemise kiirus ja täielikkus sõltub olulisel määral reoveesette kompostimistehnoloogiast [2, 3]. Merike Lillenbergi doktoritöö [3] põhjal on teada, et anaeroobselt kääritatud reoveesette korral, mida segati aeroobse kompostimise eesmärgil turbaga, lagunesid tsiprofloksatsiin, norfloksatsiin, ofloksatsiin, sulfadimetoksiin ja sulfametokasasool 12-kuuse kompostimisperioodi jooksul täielikult, kuid anaeroobselt töötlemata reoveesette kompostimisel koos puukoortega lagunes samal perioodil täielikult ainult sulfadimetoksiin. Tsiprofloksatsiin, norfloksatsiin, ofloksatsiin ja sulfametokasasool lagunesid sama aja jooksul 86–94% piires [3], mis ilmselgelt ei ole soovitud tulemuseks. Varasemalt uuriti erinevate ravimite lagunemist reoveesette kompostimisel koos saepuru, põhu, põlevkivituha või puukoorega [2, 9]. Parimaid tulemusi andis saepuru kasutamine tugiaina. Juba ühe kuu jooksul peale kompostisegu valmistamist lagunes 90% nii diklofenakist kui ka metformiinist. Samas triklosaan lagunes halvemini ning karbamasepiin osutus püsivaks [2]. Probleemiks osutus ka praktikute soovimatus saepuru turba asemel tugiaina kasutada, kuna sel juhul on kompostisegu õhutamine takistatud.

Toodust tulenevalt oli käesoleva magistr töö eksperimentaalse osa planeerimisel silmas peetud vajadust kasutada tugiaina turvast (nagu seda Eesti vee-ettevõtted teevad) ning lisandite abil tõsta kompostimisprotsessi efektiivsust. Katsetingimuste väljatöötamise käigus (p 4.1) selgus, et nii õlleraba, efektiivsete mikroorganismide lahuse kui ka etanooli lisamine kompostisegule, mis koosnes turbast ja reoveesetest, tõstis kompostimisprotsessi efektiivsust. Parimad tulemused saavutati seejuures 0,3% etanooli sisaldusega kompostisegude korral.

Käesoleva magistr töö otseseks ülesandeks oli õlleraba, efektiivsete mikroorganismide lahuse ja etanooli lisandite mõju uurimine turbast ja reoveesetest valmistatud segu kompostimisprotsessile. Eelduseks võeti, et mida intensiivsem kompostimisprotsess, seda paremini lagunevad ka segus sisalduvad ravimijäägid. Mõningate ravimite (diklofenak, triklosaan ja karbamasepiin) lagunemist uuriti käesoleva magistr tööga paralleelselt valmiva Sille Pragi magistr töö [96] käigus, mistõttu siinkohal toome välja ainult lühikese kokkuvõtva tabeli, mis iseloomustab saadud tulemusi.

Tabelis 4.5 toodud tulemused näitavad, et uuritud ravimijääkide lagunemine toimub antud katsetingimustes äärmiselt vaevaliselt. Karbamasepiini kontsentratsioonide tõus

viitab sellele, et uuritava protsessi käigus orgaaniline aine mõningal määral siiski laguneb, mille tulemusena tahke aine hulk väheneb ja karbamasepiini kontsentratsioon tõuseb, kuna viimane ei lagune. See tulemus on kooskõlas Egge Haiba doktoritöös saadud tulemustega. Punktis 4.2.4 toodud andmed näitavad, et valmistatud turba ja reoveesette segude süsiniku ja lämmastiku suhe on liiga madal ning see ei muutu märkimisväärselt ka kolme kuu jooksul. Sellest tulenevalt on põhjendamatu eeldada, et Tartu Veepuhustusjaamas toimuks uuritud ravimijääkide kompostimisprotsessist tingitud lagunemine. Püsivate orgaaniliste ühendite lagundamine nõuab innovatiivset ja efektiivset kompostimistehnoloogiat [116]. Tartu kolledžis senini läbiviidud (eelnevalt viidatud) tööde põhjal saab väita, et reoveesette kompostimisel ainult turba kasutamisel tugiainena vajalikku tulemust ei saavuta. Kuna aga ainult saepuru kasutamine tugiainena ei ole kompostijatele nii saepuru kalliduse kui ka piisavat aereerimist pärssivate omaduste tõttu vastuvõetav, siis on mõttekas edaspidi proovida reoveesette kompostimisel erineva saepuru ja turba koostisega tugiaineid.

Tabel 4.5 Ravimijääkide lagunemine reoveesetest ja turbast valmistatud kompostisegudes ühe kuu jooksul

Ravim	Lisand	Ravimi lagunemisaste (%)
Diklofenak	õlleraba	53
	EM lahus	41
	etanool (0,3%)	45
Triklosaan	õlleraba	28
	EM lahus	14
	etanool (0,3%)	3
Karbamasepiin	õlleraba	14
	EM lahus	-9
	etanool (0,3%)	-7

Käesoleva magistritöö tulemused näitasid veenvalt, et nii etanooli, efektiivsete mikroorganismide kui ka õlleraba lisamine kompostisegule omab potentsiaali

kompostimisprotsessi efektiivsuse tõstmise seisukohalt. Kuna varasemalt on leidnud kinnitust, et kompostimisprotsessi teostamisel tehtud valikud mõjutavad ravimijääkide lagunemist [2, 9], siis on otstarbekas jätkata tööd nende lisandite mõju uurimisel ja optimaalsete kompostimistingimuste väljatöötamisel.

KOKKUVÕTE

Tallinna Tehnikaülikooli Tartu kolledži üks uurimissuundadest on seotud reoveesette kompostimistehnoloogiate efektiivsuse tõstmise ning reoveesettes sisalduvate orgaaniliste saasteaine, eelkõige enamlevinud ravimijääkide täielikuma ja kiirema lagunemise tagamist kindlustavate meetmete väljatöötamisega. Käesolev magistritöö võttis lühidalt kokku nii Tartu kolledžis seni tehtu kui rahvusvahelises teaduskirjanduses antud teemal avaldatu.

Töö käigus uuriti eksperimentaalselt reoveesette komposti valmimisaja lühendamise ja selle protsessi käigus reoveesettes sisalduvate ravimijääkide tõhusama lagundamise võimalusi ning see on jätkuks Tallinna Tehnikaülikooli Tartu kolledžis varasemalt teostatud uurimistöödele, mis käsitlevad reoveesette kompostimist ja reoveesettes sisalduvate ravimijääkide käitumist ahelas reoveesete – reoveesette kompost – muld – taim.

Katsed viidi läbi AS Tartu Veevärk poolt kasutusel oleva koostisega kompostimissegudega, mis koosnesid turbast ja reoveesetest mahulises vahekorras 1:1. Uuritavatele kompostisegudele lisati kompostimisprotsessi efektiivsuse tõstmise eesmärgil erinevas vahekorras erinevaid lisandeid. Nende lisandite mõju hinnati mikroobse hingamisaktiivsuse ja mikroobide biomassi ning seente ja bakterite suhte määramise teel. Kõik katsetatud lisandid teatud kontsentratsioonini viimise korral kasvatavad mikroobset biomassi.

Varasemate tööde ja käesoleva magistritöö tulemused näitavad üheselt, et reoveesette kompostimise efektiivsus ja paljudel juhtudel ka orgaaniliste reoainete lagunemiskiirus sõltuvad kompostisegu ja kompostimistingimuste valikust. Kiireima komposti valmimiseni ja parimate ravimijääkide lagunemiseni on siiani viinud saepuru kasutamine reoveesette komposti tugiainena. Paraku aga osutub siin puuduseks kompostisegu liialt suur tihedus, mis pärsib kompostimisprotsessi efektiivseks toimumiseks tarvilikku intensiivset aereerimist ja nõuab seetõttu kompostisegu sagedast ja energiamahukat segamist.

Teostatud eksperimentide tulemusena jõuti järeldusele, et mahus 1:1 valmistatud reoveesette ja turba segu, mis on kasutusel Tartu Veevärkis, ei taga komposti täielikku valmimist ja reoveesettes sisalduvate uuritud diklofenaki, triklosaani ja karbamasepiini efektiivset lagunemist. See on tingitud asjaolust, et juba katse algul oli kompostitavate segude süsiniku ja lämmastiku suhe (sõltumata lisatud lisandist) liiga

madal (vahemikus 9,7–10,6) ning see ei muutunud oluliselt 3 kuu jooksul, jäädes vahemikku 10,4–10,7), mistõttu efektiivset kompostimisprotsessi toimuda ei saanud.

Käesolev magistritöö võimaldab järeldada, et Tartu Veevärgis kasutuseleolevat reoveesette kompostimistehnoloogiat tuleks täiendada. Samas võiks osutada otstarbekaks kompostimisprotsessi parema toimumise kindlustamiseks kasutada tugianena saepuru ja turba segu, mis tagaks protsessi efektiivsuse kasvu ning samaaegselt kompostitava materjali parema aereerimise. Eeldatavasti jätkub töö paremini toimiva kompostisegu väljatöötamisel kui ka raskestilagunevate orgaaniliste saasteainete kahjutustamise uurimisel, mille tulemused võimaldaksid reoveesetet kui kõrge toitainetesisaldusega potentsiaalset põlluväetist laialdasemalt kasutusele võtta, maksmata lõivu toiduohutuse nõuetele.

SUMMARY

The aim of the current MSc work was to study the possibilities of developing a reliable composting technology leading to the widening the area of utilization of sewage sludge as a nutrient-rich matter in agriculture, horticulture, land reclamation. Without treatment it involves analytical work with literature and several original experiments with compost mixtures having different composition. The amount of sewage sludge generated globally is increasing extremely rapidly and that is why it turns out to be a severe problem world-wide. Without reliable treatment, sewage sludge poses a threat for human health due to the presence of a large number of different persistent organic pollutants in this matter.

Tartu College at Tallinn University of Technology has carried out several studies in the field indicated above. The outcomes of the relevant work are reflected and critically analyzed here. Based on our local studies and also on international knowledge, several experiments involving different compositions of compost mixtures with certain additives were designed and accomplished.

Importantly, sawdust turned out to be the best bulking agent in the sewage sludge compost mixture, assuring a reasonable duration of the maturation period of compost, and also sufficient degradation of several widely used pharmaceuticals that are present in sewage sludge and its compost. Still, some of the studied residues of pharmaceuticals, as for example carbamazepine, and also triclosan, did not show full degradation or even any degradation during different testing periods (lasting up to 12 months).

Peat is widely used as a bulking agent in sewage sludge compost by water treatment companies in Estonia. Peat is preferred by practitioners due to its ability to provide sufficient aeration in compost piles. Due to this phenomenon the current work was devoted to finding the ways of speeding up the sewage sludge composting process in the sewage sludge mixture with peat. The results of the preliminary experiments obtained when using the additives were promising, as the microbial biomass in the mixture increased remarkably.

The degradation rate of the studied pharmaceuticals – diclofenac, triclosan and carbamazepine – turned out to be poor or even negligible. This phenomenon was essential due to the fact that the C/N rate of the sewage sludge and peat mixture was only 10 in the beginning of the experiment, and during a 3-months period this

indicator remained unchanged. It is known from our previous studies, that triclosan and especially carbamazepine are persistent during different sewage sludge treatments. At the same time, diclofenac did not suffer from this drawback.

The results obtained as a result of the current study lead to the definition new tasks for the future. It is of utmost importance to find the ways of eliminating persistent organic pollutants from sewage sludge compost. The work should be continued in developing appropriate composting technologies. Both novel compost mixtures should be tested and the fate of different pollutants should be determined. We intend to combine different portions of both sawdust and peat together as a bulking agent in a mixture with sewage sludge. The current work is of practical importance in the view of the task that is directed to preparing safe sewage sludge compost by Tartu Waterworks.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] J. Järvis, Novel Technology for Utilization of Solid Organic Waste in Recultivation of Abandoned Mining Areas, Tallinn University of Technology School of Engineering, Tartu Collage, 2018.
- [2] E. Haiba, Optimization of Sewage Sludge Composting: Problems and Solutions, Tallinn University of Technology School of Engineering, Tartu Collage, 2017.
- [3] M. Lillenberg, Residues of some pharmaceuticals in sewage sludge in Estonia, their stability in the environment and accumulation into food plants via fertilizing, Estonian University of Life Sciences, Institute of Agricultural and environmental Sciences., 2011.
- [4] L. Nei ja E. Haiba, „Sewage Sludge, Pharmaceuticals and Composting,” *Journal of Biotechnology*, kd. 305S, p. S33, 2019. DOI: 10.1016/j.jbiotec.2019.05.120.
- [5] L. Nei, E. Haiba ja M. Lillenberg, „Minireview: Pharmaceuticals in sewage sludge and their degradation during composting - recent studies on Estonia,” *Agraarteadus*, kd. 1, pp. 47-52, 2020. DOI: 10.15159/jas.20.02.
- [6] E. Haiba, L. Nei, K. Herodes, M. Ivask ja M. Lillenberg, „On the degradation of metformin and carbamazepine residues in sewage sludge compost,” *Agronomy Research*, kd. 16 (3), pp. 696-707, 2018. DOI: 10.15159/AR.18.123 .
- [7] J. Järvis, M. Ivask, L. Nei, A. Kuu ja E. Haiba, „Preliminary Assessment of Afforestation of Cutover Peatland with Spot Allpication of Sewage Sludge Compost,” *BALTIC FORESTRY*, kd. 23 (3), pp. 644-657, 2017.
- [8] K. Kipper, M. Lillenberg, K. Herodes, L. Nei ja E. Haiba, „Simultaneous Determination of Fluoroquinolones and Sulfonamides Originating from Sewage Sludge Compost,” *The Scientific World Journal*, pp. 1-8, 2017. DOI: 10.1155/2017/9254072.
- [9] E. Haiba, L. Nei, M. Ivask, J. Peda, J. Järvis, M. Lillenberg, K. Kipper ja K. Herodes, „Sewage sludge composting and fate of pharmaceutical residues – recent studies in Estonia,” *Agronomy Research*, kd. 14 (5), pp. 1583-1600, 2016.
- [10] M. Ivask, L. Olle ja L. Nei, „Domestic organic waste treatment through vermitechnology,” *Waste, Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, kd. 31 (8), p. 878, 2013. DOI: 10.1177/0734242X13493730.
- [11] E. Haiba, M. Lillenberg, K. Kipper, A. Astover, K. Herodes, M. Ivask, A. Kuu, S.

- V. Litvin ja L. Nei, „Fluoroquinolones and sulfonamides in sewage sludge compost and their uptake from soil into food plants,” *African Journal of Agricultural Research*, kd. 8 (23), pp. 3000-3006, 2013. DOI: 10.5897/AJAR12.1539.
- [12] K. Kipper, K. Herodes, I. Leito ja L. Nei, „Two fluoroalcohols as components of basic buffers for liquid chromatography electrospray ionization mass spectrometric determination of antibiotic residues,” *Analyst*, kd. 136 (21), pp. 4587-4594, 2011.
- [13] M. Lillenberg, E. Haiba ja L. Nei, „Reoveesette sobivusest põlluväetiseks,” *Keskkonnatehnika*, kd. 8, pp. 16-18, 2011.
- [14] M. Lillenberg, S. Yurchenko, K. Kipper, K. Herodes, V. Pihl, R. Lõhmus, M. Ivask, A. Kuu, S. Kutti, S. V. Litvin ja L. Nei, „Presence of fluoroquinolones and sulfonamides in urban sewage sludge and their degradation as a result of composting,” *International journal of Environmental Science and Technology*, kd. 7 (2), pp. 307-312, 2010.
- [15] M. Lillenberg, S. V. Litvin, L. Nei, M. Roasto ja K. Sepp, „Enrofloxacin and Ciprofloxacin Uptake by Plants from Soil,” *Agronomy Research*, kd. 8 (1), pp. 807-814, 2010.
- [16] M. Lillenberg, K. Herodes, K. Kipper ja L. Nei, „Plant uptake of some pharmaceuticals from fertilized soils,” %1 *Proceedings of the 2010 International Conference on Environmental Science and Technol*, Bangkok, Thailand, 2010. DOI: 10.3850/978-981-08-5716-5_T066.
- [17] K. Kipper, K. Herodes, M. Lillenberg, L. Nei, E. Haiba ja S. V. Litvin, „Plant uptake of some pharmaceuticals commonly present in sewage sludge compost,” %1 *2nd International Conference on Chemical, Biological and Environmental Engineering*, Cairo, Egypt, 2010. DOI: 10.1109/ICBEE.2010.5653590.
- [18] M. Lillenberg, S. Yurchenko, K. Kipper, K. Herodes, V. Pihl, K. Sepp, R. Lõhmus ja L. Nei, „Simultaneous determination of fluoroquinolones, sulfonamides and tetracyclines in sewage sludge by pressurized liquid extraction and liquid chromatography electrospray ionization-mass spectrometry,” *Journal of Chromatography A*, kd. 1216, nr 32, pp. 5949-5954, 2009. DOI: 10.1016/j.chroma.2009.06.029.
- [19] V. Banegas, J. L. Moreno, J. I. Moreno, C. Gracia, G. Leon ja T. Hernandez, „Composting anaerobic and aerobic sewage sludges using two proportions of sawdust,” *Waste Management*, kd. 27, nr 10, pp. 1317-1327, 2007.
- [20] M. Kacprzak, E. Neczaj, K. Fijałkowski, A. Grobelak, A. Grosser, M. Worwag, A.

- Rorat, H. Brattebo, Å. Almås ja B. R. Singh, „Sewage sludge disposal strategies for sustainable development,” *Environmental Research*, kd. 156, pp. 39-46, 2017. DOI: 10.1016/j.envres.2017.03.010.
- [21] Council Directive 86/278/EEC, „Council Directive on the protection of the environment, and in particular of the soil, when sewage sludge is used in agriculture,” *Official Journal of the European Communities*, kd. 181, pp. 0006-0012, 1986.
- [22] Council Directive 91/271/EEC, „Concerning urban waste water treatment,” *Official Journal of the European Communities*, kd. 135, pp. 40-52, 1991.
- [23] C. H. Redshaw, V. G. Wootton ja S. J. Rowland, „Uptake of the pharmaceutical Fluoxetine Hydrochloride from growth medium by Brassicaceae,” *Phytochemistry*, kd. 69, nr 13, pp. 2510-2516, 2008. DOI: 10.1016/j.phytochem.2008.06.018.
- [24] A. Jelic, M. Gros, A. Ginebreda, R. Cespedes-Sánchez, F. Ventura, M. Petrovic ja D. Barcelo, „Occurrence, partition and removal of pharmaceuticals in sewage water and sludge during wastewater treatment,” *Water Research*, kd. 45, nr 3, pp. 1165-1176, 2011.
- [25] C. E. Rodríguez-Rodríguez, E. Barón, P. Gago-Ferrero, A. Jelić, M. Llorca, M. Farré, M. S. Díaz-Cruz, E. Eljarrat, M. Petrović, G. Caminal, D. Barceló ja T. Vicent, „Removal of pharmaceuticals, polybrominated flame retardants and UV-filters from sludge by the fungus *Trametes versicolor* in bioslurry reactor,” *Journal of Hazardous Materials*, Kd-d. %1/%2233-234, pp. 235-243, 2012. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2012.07.024.
- [26] O. Borgman ja B. Chefetz, „Combined effects of biosolids application and irrigation with reclaimed wastewater on transport of pharmaceutical compounds in arable soils,” *Water Research*, kd. 47 (10), pp. 3431-3443, 2013. DOI: 10.1016/j.watres.2013.03.045.
- [27] M. Narumiya, N. Nakada, N. Yamashita ja H. Tanaka, „Phase distribution and removal of pharmaceuticals and personal care products during anaerobic sludge digestion,” *Journal of Hazardous Materials*, kd. 260, pp. 305-312, 2013. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2013.05.032.
- [28] R. Reichel, I. Rosendahl, E. Peeters, A. Focks, J. Groeneweg, R. Bierl, A. Schlichting, W. Amelung ja S. Thiele-Bruhn, „Effects of slurry from sulfadiazine-(SDZ) and difloxacin- (DIF) medicated pigs on the structural diversity of microorganisms in bulk and rhizosphere soil,” *Soil Biology & Biochemistry*, kd. 62, pp. 82-91, 2013. DOI: 10.1016/j.soilbio.2013.03.007.

- [29] L. Nei, E. Haiba, S. Kutti, K. Kipper, K. Herodes ja M. Lillenberg, „Sewage sludge compost, microbial activity and pharmaceuticals,” *Global Journal on Advances in Pure & Applied Sciences*, kd. 3, pp. 30-37, 2014.
- [30] X. Van Doorslaer, J. Dewulf, H. Van Langenhove ja K. Demeestere, „Fluoroquinolone antibiotics: An emerging class of environmental micropollutants,” *Science of the Total Environment*, Kd-d. %1/%2500-501, pp. 250-269, 2014. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.08.075.
- [31] R. S. Prosser ja P. K. Sibley, „Human health risk assessment of pharmaceuticals and personal care products in plant tissue due to biosolids and manure amendments, and wastewater irrigation,” *Environment International*, kd. 75, pp. 223-233, 2015. DOI: 10.1016/j.envint.2014.11.020.
- [32] H. Bártíková, R. Podlipná ja L. Skálová, „Veterinary drugs in the environment and their toxicity to plants,” *Chemosphere*, kd. 144, pp. 2290-2301, 2016. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2015.10.137.
- [33] EMEA/CVMP/055/96-FINAL (1996) Committee for Veterinary Medicinal Products., „Note for guidance: environmental risk assessment for veterinary medicinal products other than GMO-containing and immunological products,” *Veterinary Medicines Evaluation Unit*, 1996.
- [34] M. Montforts, „RIVM report 601500002/2005. The trigger values in the environmental risk assessment for (veterinary) medicines in the European Union: a critical APPRAISAL,” *Expert Centre for Substances of the RIVM, Bilthoven*, pp. 21-37, 2005.
- [35] J. W. Doran ja M. R. Zeiss, „Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality,” *Applied Soil Ecology*, kd. 15, nr 1, pp. 3-11, 2000. DOI: 10.1016/S0929-1393(00)00067-6.
- [36] C. Pankhurst, B. M. Doube ja V. V. Gupta, „Biological Indicators of Soil Health,” *New Phytologist*, kd. 139, nr 2, pp. 389-392, 1998. DOI: 10.1111/j.1469-8137.1998.194-3.x.
- [37] Statistics Estonia, „Agriculture Yearbook,” *Statistical Office of Estonia*, p. 64, 2006.
- [38] A. Iital, M. Kloga, M. Pihlak, K. Pachel, A. Zahharov ja E. Loigu, „Nitrogen content and trends in agricultural catchments in Estonia,” *Agriculture, Ecosystems & Environment*, kd. 198, pp. 44-53, 2014. DOI: 10.1016/j.agee.2014.03.010.
- [39] A. Astover ja H. Rossner, „Phosphorus status of agricultural soils in Estonia,” *Baltic Forum for Innovative Technologies for Sustainable Manure Management*,

- p. 8, 2013.
- [40] J. I. Rodale, *The complete book of composting*, Emmaus, Pa., Rodale Books, 1960.
- [41] G. E. Fitzpatrick, E. C. Worden ja W. A. Vendrame, „Historical Development of Composting Technology during the 20th Century,” *HotTechnology*, kd. 15, nr 1, pp. 48-51, 2005. DOI: 10.21273/HORTTECH.15.1.0048.
- [42] A. Howard ja Y. D. Wad, *The Waste Products of Agriculture—Their Utilization as Humus*, London: Oxford University Press, 1931. DOI: 10.2134/agronj1932.00021962002400020010x.
- [43] S. Gajalakshmi ja S. A. Abbasi, „Solid Waste Management by Composting: State of the Art,” *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, kd. 38, nr 5, pp. 311-400, 2008. DOI: 10.1080/10643380701413633.
- [44] E. Epstein, *The science of composting*, Lancaster: Technomic, 1997.
- [45] U. İpek, E. Öbek, L. Akca, E. I. Arslan, H. Hasar, M. Doğru ja O. Baykara, „Determination of degradation of radioactivity and its kinetics in aerobic composting,” *Biorecourse Technology*, kd. 84, nr 3, pp. 283-286, 2002. DOI: 10.1016/S0960-8524(02)00024-X.
- [46] T. Paré, H. Dinel, M. Schnitzer ja S. Dumontet, „Transformations of carbon and nitrogen during composting of animal manure and shredded paper,” *Biology and Fertility of Soils*, kd. 26, pp. 173-178, 1998. DOI: 10.1007/s003740050364.
- [47] R. Frank, „The use of biosolids from wastewater treatment plants in agriculture,” *Environmental Management and Health*, kd. 9, nr 4, pp. 165-169, 1998. DOI: 10.1108/09566169810228926.
- [48] R. E. White, S. I. Torri ja R. S. Corrêa, „Biosolids Soil Application: Agronomic and Environmental Implications,” *Applied and Environmental Soil Science*, pp. 1-3, 2011. DOI: 10.1155/2011/928973.
- [49] G. Zheng, X. Wang, T. Chen, J. Yang, J. Yang, J. Liu ja X. Shi, „Passivation of lead and cadmium and increase of the nutrient content during sewage sludge composting by phosphate amendments,” *Environmental Research*, kd. 185, 2020. DOI: 10.1016/j.envres.2020.109431.
- [50] K. Xiao, G. Abbt-Braun ja H. Horn, „Changes in the characteristics of dissolved organic matter during sludge treatment: A critical review,” *Water Research*, kd. 187, 2020. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116441.
- [51] H. Wei, J. Ma, Y. Su ja B. Xie, „Effect of nutritional energy regulation on the fate of antibiotic resistance genes during composting of sewage sludge,” *Bioresource Technology*, kd. 297, 2020. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.122513.

- [52] F. Tambone, B. Scaglia, G. D'Imporzano, A. Schievano, V. Orzi, S. Salati ja F. Adani, „Assessing amendment and fertilizing properties of digestates from anaerobic digestion through a comparative study with digested sludge and compost,” *Chemosphere*, kd. 81, nr 5, pp. 577-583, 2010. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2010.08.034.
- [53] Z. Tang, B. Xi, C. Huang, W. Tan, X. Xia, T. Yang, M. Yu, X. Zhao ja W. Yuan, „Linking phytoavailability of heavy metals with microbial community dynamics during municipal sludge composting,” *Process Safety and Environmental Protection*, kd. 130, pp. 288-296, 2019. DOI: 10.1016/j.psep.2019.08.026.
- [54] D. Fischer, G. Erben, G. Dunst ja B. Glaser, „Dynamics of labile and stable carbon and priming effects during composting of sludge and lop mixtures amended with low and high amounts of biochar,” *Waste Management*, kd. 78, pp. 880-893, 2018. DOI:10.1016/j.wasman.2018.06.056.
- [55] H. Kebibeche, O. Khelil, M. Kacem ja M. K. Harce, „Addition of wood sawdust during the co-composting of sewage sludge and wheat straw influences seeds germination,” *Ecotoxicology and Environmental Safety*, kd. 168, pp. 423-430, 2019. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2018.10.075.
- [56] S. Amir, A. Jouraiphy, A. Meddich, M. El Gharoud, P. Winterton ja M. Hafidi, „Structural study of humic acids during composting of activated sludge-green waste: Elemental analysis, FTIR and 13C NMR,” *Journal of Hazardous Materials*, kd. 177, nr 1-3, pp. 524-529, 2010. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2009.12.064.
- [57] D. Kulikowska, „Kinetics of organic matter removal and humification progress during sewage sludge composting,” *Waste Management*, kd. 49, pp. 196-203, 2016. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.01.005.
- [58] A. L. Wright, T. L. Provin, F. M. Hons, D. A. Zuberer ja R. H. White, „Compost impacts on dissolved organic carbon and available nitrogen and phosphorus in turfgrass soil,” *Waste Management*, kd. 28, nr 6, pp. 1057-1063, 2008. DOI: 10.1016/j.wasman.2007.04.003.
- [59] Z. Yu, X. Liu, M. Zhao, W. Zhao, J. Liu, J. Tang, H. Liao, Z. Chen ja S. Zhou, „Hyperthermophilic composting accelerates the humification process of sewage sludge: Molecular characterization of dissolved organic matter using EEM-PARAFAC and two-dimensional correlation spectroscopy,” *Bioresource Technology*, kd. 274, pp. 198-206, 2019. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.11.084.
- [60] X. Zhao, Y. Wei, Y. Fan, F. Zhang, W. Tan, X. He ja B. Xi, „Roles of bacterial community in the transformation of dissolved organic matter for the stability and safety of material during sludge composting,” *Bioresource Technology*, kd.

- 267, pp. 378-385, 2018. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.07.060.
- [61] R. Zbytniewski ja B. Buszewski, „Characterization of natural organic matter (NOM) derived from sewage sludge compost. Part 1: chemical and spectroscopic properties,” *Bioresource Technology*, kd. 96, nr 4, pp. 471-478, 2005. DOI: 10.1016/j.biortech.2004.05.018.
- [62] D. Plachá, H. Raclavská, M. Kučerová ja J. Kuchařová, „Volatile fatty acid evolution in biomass mixture composts prepared in open and closed bioreactors,” *Waste Management*, kd. 33, nr 5, pp. 1104-1112, 2013. DOI: 10.1016/j.wasman.2013.01.021.
- [63] X.-I. Zhao, B.-Q. Li, J.-P. Ni ja D.-T. Xie, „Effect of four crop straws on transformation of organic matter during sewage sludge composting,” *Journal of Integrative Agriculture*, kd. 15, nr 1, pp. 232-240, 2016. DOI: 10.1016/S2095-3119(14)60954-0.
- [64] F. Ingelmo, M. J. Molina, M. D. Soriano, A. Gallardo ja L. Lapeña, „Influence of organic matter transformations on the bioavailability of heavy metals in a sludge based compost,” *Journal of Environmental Management*, kd. 95, pp. S104-S109, 2012. DOI: 10.1016/j.jenvman.2011.04.015.
- [65] L. Zhu, Z. Wei, T. Yang, X. Zhao, Q. Dang, X. Chen, J. Wu ja Y. Zhao, „Core microorganisms promote the transformation of DOM fractions with different molecular weights to improve the stability during composting,” *Bioresource Technology*, kd. 299, 2020. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.122575.
- [66] M. Robledo, C. Gómez-Silván, G. L. Andersen, C. Calvo ja E. Aranda, „Assessment of bacterial and fungal communities in a full-scale thermophilic sewage sludge composting pile under a semipermeable cover,” *Bioresource Technology*, kd. 298, 2020. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.122550.
- [67] T. Robledo-Mahón, E. Aranda, C. Pesciaroli, A. Rodríguez-Calvo, G. A. Silvia-Castro, J. González-López ja C. Calvo, „Effect of semi-permeable cover system on the bacterial diversity during sewage sludge composting,” *Journal of Environmental Management*, kd. 215, pp. 57-67, 2018. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.03.041.
- [68] Y. Liu, L. Ding, B. Wang, Q. He ja D. Wan, „Using the modified pine wood as a novel recyclable bulking agent for sewage sludge composting: Effect on nitrogen conversion and microbial community structures,” *Bioresource Technology*, kd. 309, 2020. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.123357.
- [69] K. Nakasaki, L. T. Tran, Y. Idemoto, M. Abe ja A. P. Rollon, „Comparison of organic matter degradation and microbial community during thermophilic

- composting of two different types of anaerobic sludge," *Bioresource Technology*, kd. 100, nr 2, pp. 676-682, 2009. DOI: 10.1016/j.biortech.2008.07.046.
- [70] Z. Shou, N. Zhu, H. Yuan, X. Dai ja Y. Shen, „Buffering phosphate mitigates ammonia emission in sewage sludge composting: Enhanced organics removal coupled with microbial ammonium assimilation," *Journal of Cleaner Production*, kd. 227, pp. 189-198, 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.04.197.
- [71] M. Kriipsalu, A. Luik ja E. Peetsmann, *Abiks väiketootjale: komposti valmistamine*, Ecoprint AS, Eesti Maaülikool, 2016.
- [72] V. De Gannes, G. Eudoxie ja W. J. Hickey, „Insights into fungal communities in composts revealed by 454-pyrosequencing: implications for human health and safety," *Frontiers in Microbiology*, pp. 1-9, 2013. DOI: 10.3389/fmicb.2013.00164.
- [73] Ó. J. Sánchez, D. A. Ospina ja S. Montoya, „Compost supplementation with nutrients and microorganisms in composting process," *Waste Management*, kd. 69, pp. 136-153, 2017. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.08.012.
- [74] A. N. Nozhevnikova, V. Mironov, E. A. Botchkova, Y. V. Litti ja Y. I. Russkova, „Composition of a Microbial Community at Different Stages of Composting and the Prospects for Compost Production from Municipal Organic Waste (Review)," *Applied Biochemistry and Microbiology*, kd. 55, pp. 199-208, 2019. DOI: 10.1134/S0003683819030104.
- [75] E. Paul, *Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry 3rd Edition*, Academic Press, 2006.
- [76] L. Nei, E. Haiba ja M. Lillenberg, „Ravimijäädid reoveesettes ja nende lagunemine kompostimisel – viimase aastakümne uuringud Eestis," *Journal of Agricultural Science*, kd. 1, nr XXXI, pp. 47-52, 2020. DOI: 10.15159/jas.20.02.
- [77] P. Verlicchi ja E. Zambello, „Pharmaceuticals and personal care products in untreated and treated sewage sludge: Occurrence and environmental risk in the case of application on soil — A critical review," *Science of The Total Environment*, kd. 538, pp. 750-767, 2015. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.08.108.
- [78] N. H. Tran, M. Reinhard ja K. Y.-H. Gin, „Occurrence and fate of emerging contaminants in municipal wastewater treatment plants from different geographical regions-a review," *Water Research*, kd. 133, pp. 182-207, 2018. DOI: 10.1016/j.watres.2017.12.029.
- [79] M. Patel, R. Kumar, K. Kishor, T. Mlsna, C. U. Pittman ja D. Mohan, „Pharmaceuticals of Emerging Concern in Aquatic Systems: Chemistry,

- Occurrence, Effects, and Removal Methods," *Chemical Reviews*, kd. 119, nr 6, pp. 3510-3673, 2019. DOI: 10.1021/acs.chemrev.8b00299.
- [80] A. Ghirardini ja P. Verlicchi, „A review of selected microcontaminants and microorganisms in land runoff and tile drainage in treated sludge-amended soils," *Science of The Total Environment*, kd. 655, pp. 939-957, 2019. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.11.249.
- [81] B.-H. Seo, H. S. Kim, S.-I. Kwon, G. Owens ja K.-R. Kim, „Heavy metal accumulation and mobility in a soil profile depend on the organic waste type applied," *Journal of Soils and Sediments*, kd. 19, pp. 822-829, 2019. DOI: 10.1007/s11368-018-2065-5.
- [82] L. J. Piddock, „Reflecting on the final report of the O'Neill review on antimicrobial resistance," *The Lancet Infectious Diseases*, kd. 16, nr 7, pp. 767-768, 2016. DOI: 10.1016/S1473-3099(16)30127-X.
- [83] J. Carlet, P. Collignon, D. Goldmann, H. Goossens, I. C. Gyssens, S. Harbarth, V. Jarlier, S. B. Levy, B. N'Doye, D. Pittet, R. Richtmann, W. H. Seto, J. W. van der Meer ja A. Voss, „Society's failure to protect a precious resource: antibiotics," *The Lancet*, kd. 378, nr 9788, pp. 369-371, 2011. DOI: 10.1016/S0140-6736(11)60401-7.
- [84] F. F. Reinhaller, J. Posch, G. Feierl, G. Wüst, D. Haas, G. Ruckebauer, F. Mascher ja E. Marth, „Antibiotic resistance of E. coli in sewage and sludge," *Water Research*, kd. 37, nr 8, pp. 1685-1690, 2003. DOI: 10.1016/S0043-1354(02)00569-9.
- [85] L. Sahlström, V. Rehbinder, A. Albihn, A. Aspan ja B. Bengtsson, „Vancomycin resistant enterococci (VRE) in Swedish sewage sludge," *Acta Veterinaria Scandinavica*, kd. 51, nr 24, pp. 1-9, 2009. DOI: 10.1186/1751-0147-51-24.
- [86] J. Davies, „Inactivation of antibiotics and the dissemination of resistance genes," *Science*, kd. 264, nr 5157, pp. 375-382, 1994. DOI: 10.1126/science.8153624.
- [87] S. Yang, J. McDonald, F. I. Hai, W. E. Price, S. J. Khan ja L. D. Nghiem, „Effects of thermal pre-treatment and recuperative thickening on the fate of trace organic contaminants during anaerobic digestion of sewage sludge," *International Biodeterioration & Biodegradation*, kd. 124, pp. 146-154, 2017. DOI: 10.1016/j.ibiod.2017.06.002.
- [88] B. Sarkar, S. Mandal, Y. F. Tsang, M. Vithanage, J. K. Biswas, H. Yi, X. Dou ja Y. S. Ok, „24 - Sustainable sludge management by removing emerging contaminants from urban wastewater using carbon nanotubes," *Industrial and Municipal Sludge*, pp. 553-571, 2019. DOI: 10.1016/B978-0-12-815907-

1.00024-6.

- [89] M. F. Seleiman, A. Santanen ja P. S. Mäkelä, „Recycling sludge on cropland as fertilizer – Advantages and risks,” *Resources, Conservation and Recycling*, kd. 155, 2020. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.104647.
- [90] D. J. Lapworth, N. Baran, M. E. Stuart ja R. S. Ward, „Emerging organic contaminants in groundwater: A review of sources, fate and occurrence,” *Environmental Pollution*, kd. 163, pp. 287-303, 2012. DOI: 10.1016/j.envpol.2011.12.034.
- [91] D. Schowanek, R. Carr, H. David, P. Douben, J. Hall, H. Kirchmann, L. Patria, P. Sequi, S. Smith ja S. Web, „A risk-based methodology for deriving quality standards for organic contaminants in sewage sludge for use in agriculture— Conceptual Framework,” *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, kd. 40, nr 3, pp. 227-251, 2004. DOI: 10.1016/j.yrtph.2004.07.002.
- [92] L. Zhang, X. Yue, J. Liu, J. Feng, X. Zhang, C. Zhang, R. Li ja C. Fan, „Facile synthesis of Bi₅O₇Br/BiOBr 2D/3D heterojunction as efficient visible-light-driven photocatalyst for pharmaceutical organic degradation,” *Separation and Purification Technology*, kd. 231, 2020. DOI: 10.1016/j.seppur.2019.115917.
- [93] M. Kriipsalu, A. Maastik ja J. Truu, *Jäätmekäitlus ja pinnase tervendamise*, Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2016, p. 376.
- [94] P. Ojala, „Saasteaineid sisaldava reoveesette kompostimine kontrollitud tingimustes, kasutades kahes proportsioonis saepuru,” Tallinna Tehnikaülikooli Tartu Kolledž, 2016.
- [95] C. Stock, A. J. Barker ja S. Guy, „The Composting of Brewery Sludge,” *Journal of The Institute of Brewing*, kd. 108, nr 4, pp. 452-458, 2002. DOI: 10.1002/j.2050-0416.2002.tb00575.x.
- [96] S. Pragi, „Mõningate ravimijääkide lagunemise uurimine reoveesette kompostimisel,” Tallinna Tehnikaülikooli Tartu Kolledž, 2021.
- [97] International Organization for Standardization, „Soil quality — Determination of dry matter and water content on a mass basis — Gravimetric method,” *ISO Standard No. 11465*, 1993.
- [98] M. Pansu ja J. Gautheyrou, *Handbook of Soil analysis: Mineralogical, Organic and Inorganic Methods*, Berlin: Springer Verlag, 2006. DOI: 10.1007/978-3-540-31211-6.
- [99] J. D. Rhoades, „Electrical Conductivity Methods for Measuring and Mapping Soil Salinity,” *Advances in Agronomy*, kd. 49, pp. 201-251, 1993. DOI: 10.1016/S0065-2113(08)60795-6.

- [100] B. Brohon, C. Delolme ja R. Gourdon, „Complementarity of bioassays and microbial activity measurements for the evaluation of hydrocarbon-contaminated soils quality,” *Soil Biology and Biochemistry*, kd. 33, nr 7-8, pp. 883-891, 2001. DOI: 10.1016/S0038-0717(00)00234-0.
- [101] Xylem Analytics Germany Sales GmbH & Co, „XYLEM,” WTW, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.xylemanalytics.com/en/general-product/id-1577/OxiTop%C2%AE-IDS-B-6-Measurement-System-for-Soil-Respiration---WTW>. [Kasutatud 16 05 2021].
- [102] P. Reuschenbach, U. Pagga ja U. Strotmann, „A critical comparison of respirometric biodegradation tests based on OECD 301 and related test methods,” *Water Research*, kd. 37, nr 7, pp. 1571-1582, 2003. DOI: 10.1016/S0043-1354(02)00528-6.
- [103] International Organisation of Standardization, „Soil quality — Laboratory methods for determination of microbial soil respiration,” *ISO Standard no. 16702:2002*, pp. 1-19, 2011.
- [104] International Organisation for Standardization, „Soil quality — Determination of soil microbial biomass — Part 1: Substrate-induced respiration method,” *ISO Standard No. 14240-1:1997*, pp. 1-4, 2011.
- [105] F. Schinner, R. Öhlinger, E. Kandeler ja R. Margesin, *Methods in Soil Biology*, Berlin: Springer, Berlin, Heidelberg, 1996. DOI: 10.1007/978-3-642-60966-4.
- [106] Y. Pan, Y. Wu, X. Li, J. Zeng ja X. Lin, „Continuing Impacts of Selective Inhibition on Bacterial and Fungal Communities in an Agricultural Soil,” *Microbial Ecology*, kd. 78, pp. 927-935, 2019. DOI: 10.1007/s00248-019-01364-0.
- [107] Q. Lin ja P. C. Brookes, „Comparison of substrate induced respiration, selective inhibition and biovolume measurements of microbial biomass and its community structure in unamended, ryegrass-amended, fumigated and pesticide-treated soils,” *Soil Biology and Biochemistry*, kd. 31, nr 14, pp. 1999-2014, 1999. DOI: 10.1016/S0038-0717(99)00122-4.
- [108] J. M. Sweeten ja B. A. Auvermann, „Composting Manure and Sludge,” *AgriLife Extensions Texas A&M System.*, pp. 1-7.
- [109] L. Yang, S. Zhang, Z. Chen, Q. Wen ja Y. Wang, „Maturity and security assessment of pilot-scale aerobic co-composting of penicillin fermentation dregs (PFDs) with sewage sludge,” *Bioresource Technology*, kd. 204, pp. 185-191, 2016. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.01.004.
- [110] D. Xue ja X. Huang, „The impact of sewage sludge compost on tree peony growth and soil microbiological, and biochemical properties,” *Chemosphere*, kd.

- 93, nr 4, pp. 583-580, 2013. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2013.05.065.
- [111] S. Ponsa, E. Pagans ja A. Sanchez, „Composting of dewatered wastewater sludge with various ratios of pruning waste used as a bulking agent and monitored by respirometer,” *Biosystems Engineering*, kd. 102, nr 4, pp. 433-443, 2009. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2009.01.002.
- [112] M. Ayuso, J. A. Pascual, C. Gracia ja T. Hernandez, „Evaluation of urban wastes for agricultural use,” *Soil Science and Plant Nutrition*, kd. 42, nr 1, pp. 105-111, 1996. DOI: 10.1080/00380768.1996.10414693.
- [113] M. S. Strickland ja J. Rousk, „Considering fungal:bacterial dominance in soils – Methods, controls, and ecosystem implications,” *Soil Biology and Biochemistry*, kd. 42, nr 9, pp. 1385-1395, 2010. DOI: 10.1016/j.soilbio.2010.05.007.
- [114] K. M. Carney, B. A. Hungate, B. G. Drake ja P. J. Megonigal, „Altered soil microbial community at elevated CO₂ leads to loss of soil carbon,” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, kd. 104, nr 12, pp. 4990-4995, 2007. DOI: 10.1073/pnas.0610045104.
- [115] E. Butler, M. J. Whelan, K. Ritz, R. Sakrabani ja R. Egmond, „The effect of triclosan on microbial community structure in three soils,” *Chemosphere*, kd. 89, nr 1, pp. 1-9, 2012. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2012.04.002.
- [116] H. Lü, X.-H. Chen, C.-H. Mo, Y.-H. Huang, M.-Y. He, Y.-W. Li, N.-X. Feng, A. Katcoyiannis ja Q.-T. Cai, „Occurrence and dissipation mechanism of organic pollutants during the composting of sewage sludge: A critical review,” *Bioresource Technology*, kd. 328, 2021. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.124847.