BIOKAASULAITOKSESSA MÄDÄTETTÄVÄN OLUTMÄSKIN MÄDÄTYSJÄÄNNÖKSEN HYÖTYKÄYTTÖ

Mahdollisuudet mallasohran viljelyssä

HAMK
HÄMEEN AMMATTIKORKEAKOULU
HÄME UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö

Bio- ja elintarviketekniikka, Hämeenlinna

Kevät 2023

Elina Kallio

HAMK
HÄMEEN AMMATTIKORKEAKOULU
HÄME UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Bio- ja elintarviketekniikka, insinööri AMK Tiivistelmä
Tekijä Elina Kallio Vuosi 2023
Työn nimi Biokaasulaitoksessa mädätettävän olutmäskin mädätysjäännöksen hyötykäyttö
Ohjaaja Maritta Kymäläinen

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää biokaasulaitoksessa mädätettävän olutmäskin mädätysjäännöksen ravinnepitoisuudet ja mädätysjäännöksen mahdollisuudet mallasohran lannoitekäytössä. Opinnäytetyö tehtiin yhteistyössä ONE1 Oy:n ja Lahti Energia Oy:n kanssa, jotka perustavat Hartwall Oy:lle biokaasulaitoksen keväällä 2023.

Perustettavan biokaasulaitoksen syötteenä toimii Hartwall Oy:n panimon oluentuotannosta ylijäävä olutmäski. Olutmäski on panimoteollisuuden sivuvirta ja sen hyödyntämiselle on etsitty erilaisia vaihtoehtoja. Olutmäski on ominaisuuksiltaan hyvä biokaasuprosessin syöte. Prosessista syntyvä energia hyödynnetään juomatehtaan omaan käyttöön ja mädätysjäännös on tarkoituksena hyödyntää lähialueella mallasohran viljelyn ravinteena.

Lannoitteiden tuottaminen kuluttaa valtavasti fossiilista energiaa. Teollisesti tuotettujen lannoitteiden hinnat ovat olleet nousussa ja fosforivarat vähentyneet, mikä on herättänyt laajasti kiinnostusta kierrätysravinteiden hyödyntämiseen. Suomessa lannoiteomavaraisuutta voitaisiin lisätä kierrätysravinteilla huomattavasti. Fosforia kierrättämällä voitaisiin korvata jopa 90 % lannoitteena käytetystä fosforista.

Olutmäskin soveltuvuutta biokaasun tuotantoon ja olutmäskin mädätysjäännöksen mahdollisuuksia lannoitekäyttöön tutkittiin laboratorio-olosuhteissa suoritetulla koemädätyksellä. Koemädätys suoritettiin jatkuvatoimisella bioreaktorilla ja mädätys kesti yhteensä kuusi viikkoa. Koemädätyksen jälkeen mädätysjäännöksen ravinnepitoisuudet, mikrobiologinen laatu ja raskasmetallipitoisuudet tutkittiin.

Laboratorio-olosuhteissa tehdyn koemädätyksen tulosten perusteella olutmäski sopii hyvin biokaasuprosessin syötteeksi ja mädätysjäännös sopii mallasohran ravinteeksi peltoviljelyssä. Mallasohran viljelyssä ei kuitenkaan ole järkevää käyttää lannoitteena pelkästään mädätysjäännöstä sen sisältämän fosforin vuoksi. Liian korkea fosforipitoisuus pelloilla voidaan ehkäistä käyttämällä muita typpilannoitevalmisteita täydennyslannoitteena. Vaikkei pyrittäisikään käyttämään mädätysjäännöstä yksistään typpilannoitteena on hyvä huomioida se, että orgaanisilla lannoitteilla on monia maaperää hyödyntäviä puolia.

Avainsanat Mädätysjäännös, olutmäski, kierrätysravinteet, fosforin kierrätys, mallasohra
Sivut 53 sivua ja liitteitä 2 sivua

HAMK
HÄMEEN AMMATTIKORKEAKOULU
HÄME UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Degree Programme in Biotechnology and Food Engineering Abstract
Author Elina Kallio Year 2023
Subject Utilisation of the Digestate from the Beer Mash Digested in the Biogas Plant
Supervisors Maritta Kymäläinen

The aim of the thesis was to determine the nutrient content of the digestate residue of the beer mash digested in the biogas plant and the potential of the digestate in the use of growing malting barley as fertiliser. The thesis was carried out in cooperation with ONE1 Oy and Lahti Energia Oy, which will establish a biogas plant for Hartwall Oy in spring 2023.

The feedstock of the biogas plant to be established will be the surplus beer mash from Hartwall brewery's beer production. Beer mash is a side stream of the brewing industry, and various alternatives have been sought for its utilisation. Beer mash is a good biogas process feedstock in terms of its properties. The energy generated by the process is utilised for the beverage factory's own use, and the digestate is intended to be utilised in the surrounding area as a nutrient for malting barley cultivation.

The fertilizer production consumes a huge amount of fossil energy. Prices of industrially produced fertilisers have risen, and phosphorus resources have decreased, which has attracted a wide interest in the utilisation of recycled nutrients. In Finland, self-sufficiency in fertiliser could be significantly increased with recycled nutrients. By recycling phosphorus, up to 90 % of the phosphorus used as fertiliser could be replaced.

The suitability of the beer mash for biogas production and the possibilities of the beer mash digestate for fertiliser use were tested in laboratory conditions by test digestion. Testing was carried out with a continuously operating bioreactor. The digestion lasted a total of six weeks. After the test digestion, the digestate was examined for nutrient concentrations, microbiological quality, and heavy metal concentrations.

Based on laboratory digestion test results, the beer mash is well suited as a feedstock for the biogas process and the digestate of the beer mash is suitable as a nutrient for growing malting barley. However, in the cultivation, it is not sensible to use only the digestate residue as a fertiliser due to the phosphorus it contains. Too high a phosphorus content in fields can be prevented by using other nitrogen fertiliser products as a complementary fertiliser. Even if the digestate is not the only source of nitrogen, it is worth noting that organic fertilisers have many aspects that benefit the soil.

Keywords Digestate residue, beer mash, recycled nutrients, phosphorus recycling, malting barley
Pages 53 pages and appendices 2 pages

Sisällys

1 Johdanto ... 1

2 Opinnäytetyön tavoite ja tutkimuskysymykset ... 2

3 Tarkastelukohteen kuvaus ... 2

3.1 Biokaasu ... 4

3.2 Mädätysjäännös ... 6

3.3 Elintarviketeollisuuden sivuvirtojen verotus ja kestävyys biokaasun raaka-aineena ... 7

4 Olutmäskin hyödyntäminen ... 8

4.1 Olutmäski ... 8

4.1.1 Olutmäskin synty ... 9

4.1.2 Olutmäskin koostumus ... 10

4.2 Olutmäskin hyödyntämisvaihtoehtoja ... 11

4.3 Olutmäski biokaasuprosessin syötteenä ... 13

5 Mädätysjäännöksen ravinteet ... 17

5.1 Typpi ja ammoniumtyppi ... 18

5.2 Fosfori ... 19

5.3 Ravinnetaseet ... 20

6 Mallasohran viljely ... 21

6.1 Laatuvaatimukset ... 22

6.2 Mallasohran lannoitus ... 23

7 Orgaaniset lannoitteet ... 24

7.1 Laatuvaatimukset ... 24

7.2 Lainsäädäntö ... 26

8 Ravinteiden kierrätys ... 27

8.1 Mädätysjäännöksen hyödyntäminen lannoitteena ... 29

8.1.1 Mädätysjäännöksen käyttö ohran viljelyssä ... 30

8.1.2 Huomioitavat asiat mädätysjäännöksen varastoinnissa ja levityksessä ... 31

8.2 Kierrätysravinteiden hyödyt ... 33

8.3 Taloudellisuus ... 34

9 Fosforin kierrätys ... 35

10 Olutmäskin koemädätys ... 38
10.1 Koemädätyksen toteutus ... 39
10.2 Ravinnemääritykset ... 40
11 Tulokset ... 41
11.1 Olutmäskin ominaisuudet biokaasun tuotossa ... 41
11.2 Mädätysjäännöksen ravinnepitoisuudet ... 44
11.3 Lannoitekelpoisuus ... 47
11.4 Kustannukset ... 48
12 Yhteenveto ja johtopäätökset ... 50
Lähteet ... 54

Liitteet

Liite 1 Mallasohran laatuvaatimukset ja -hinnoittelu 2023
Liite 2 Lannoitteiden sisältämien haitallisten aineiden ja taudinaiheuttajien enimmäismäärät

Opinnäytetyössä käytetyt termit ja lyhenteet:

Anaerobinen	Hapeton, biokaasuprosessissa hapettomissa oloissa tapahtuvaa orgaanisen aineen mädätystä
Biokaasu	Anaerobisessa mädätyksessä syntyvä kaasuseos
Biomassa	Biologista syntyperää oleva massa, biokaasureaktorin syöte
CO_2	Hiilidioksidi
CH_4	Metaani
COD	Kemiallinen hapen kulutus (Chemical Oxygen Demand)
HRT	Viipymäaika (Hydraulic Retention Time)
LCFA	Pitkäketjuiset rasvahapot (Long Chain Fatty Acids)
Mesofiilinen	Biokaasuprosessin toimintalämpötila välillä 35–43 °C
Mikrobiymppi	Massa, joka sisältää biokaasua muodostavia mikrobeja
OLR	Orgaaninen kuormitus [kgVS(m^3vrk^{-1})] (Organic Loading Rate)
Orgaaninen aines	Biologista alkuperää oleva aine
pH	Liuoksen happamuustaso
Termofiilinen	Biokaasuprosessin toimintalämpötila välillä 50–55 °C
TS	Kuiva-aine (Total Solids)
VS/TS-suhde	Orgaanisen kuiva-aineen ja kuiva-aineen suhde
VFA	Haihtuvat rasvahapot (Volatile Fatty Acids)
VS	Orgaaninen kuiva-aine (Volatile Solids)

1 Johdanto

Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää Hartwall Oy:lle Lahden panimon yhteyteen perustettavan biokaasulaitoksen mädätysjäännöksen ravinnepitoisuudet ja ravinteiden hyötykäytön mahdollisuudet mallasohran viljelyssä lähialueilla. Opinnäytetyön toimeksiantajina toimi Lahti Energia Oy ja One1 Oy, jotka toteuttavat yhteistyönä Hartwall Oy:lle biokaasulaitosta. Biokaasulaitoksen käyttöönotto tapahtuu keväällä 2023. Perustettava biokaasulaitos tuottaa oluen panemisesta syntyvästä mäskistä energiaa juomatehtaan omaan käyttöön. Olutmäskin soveltumista biokaasulaitoksen syötteeksi on tutkittu laajasti, mutta pelkästään olutmäskin mädättämisestä syntyvän mädätysjäännöksen hyödyntämistä mallasohran viljelyssä ei ole aikaisemmin tutkittu.

Typpilannoitteiden tuottaminen aiheuttaa hyvin suuren määrän kasvihuonepäästöjä, kuten metaania ja hiilidioksidia, ja kuluttaa runsaasti fossiilisia polttoaineita ja energiaa, jopa 11 000 kWh/ tonni typpeä. Lannoitteiden todella korkeiden hintojen syynä on Ukrainan kriisi ja sen myötä Venäjään kohdistuvat pakotteet, energian hintojen nousu ja fosforivarojen ehtyminen. Hintojen nousun ja teollisesti tuotettujen lannoitteiden saatavuusongelmien vuoksi biokaasulaitosten ravinnepitoisen mädätysjäännöksen hyötykäyttö on lisääntynyt maan laajuisesti. Aiemmin kierrätyslannoitteita hyödynsivät lähinnä luomutilat ja mädätysjäännöksen rahallinen arvo on ollut jopa negatiivinen. (Gareis, 2022, ss. 24–25)

Opinnäytetyön aikana suoritettiin laboratorio-olosuhteissa kuusi viikkoa kestänyt koemädätys olutmäskille. Koemädätyksen perusteella saatiin selville mädätysjäännöksen ravinnepitoisuudet ja niistä saatiin laskettua mallasohran viljelyyn sopiva levitysohje ja arvio mädätysjäännöksen arvosta. Mädätyskokeella selvitettiin liukoisen typen, fosforin ja kaliumin pitoisuudet ja verrattiin niitä teollisesti tuotettuihin lannoitteisiin.

Jäte- ja elintarviketeollisuuden sivuvirroista syntyvillä kierrätyslannoitteilla voidaan korvata teollisesti tuotettujen lannoitteiden käyttöä ja parantaa huomattavasti Suomen omavaraisuutta lannoitteiden suhteen. Hartwallin biokaasulaitoksen mädätysjäännöstä voidaan käyttää kierrätysravinteena peltokäytössä sellaisenaan eikä erillistä hygienisointia tarvita, koska kyseessä on panimoteollisuuden sivuvirta.

2 Opinnäytetyön tavoite ja tutkimuskysymykset

Opinnäytetyön tavoitteena on selvittää olutmäskin mädättämisessä syntyvän mädätysjäännöksen ravinnepitoisuudet ja ravinnepitoisen mädätysjäännöksen hyödyntämisen mahdollisuudet mallasohran viljelyssä.

Tutkimuskysymykset:

- Mitkä ovat mäskin mädätyksessä syntyvän mädätysjäännöksen ravinnepitoisuudet?
- Mitä lannoitteita tarvitaan mädätysjäännöksen lisäksi kattamaan mallasohran viljelyssä tarvittavat ravinteet?
- Mitkä ovat mädätysjäännöksen lannoitekäytön kustannukset verrattuna kaupallisiin lannoitteisiin?

Opinnäytetyön tulokset hyödynnetään suunniteltaessa mallasohran viljelyssä käytettyjen teollisesti tuotettujen lannoitteiden korvaamista biokaasulaitoksella syntyvän mädätysjäännöksen ravinteilla. Lannoitekäytön lisäksi opinnäytetyössä arvioidaan mädätysjäännöksen kaupallista arvoa.

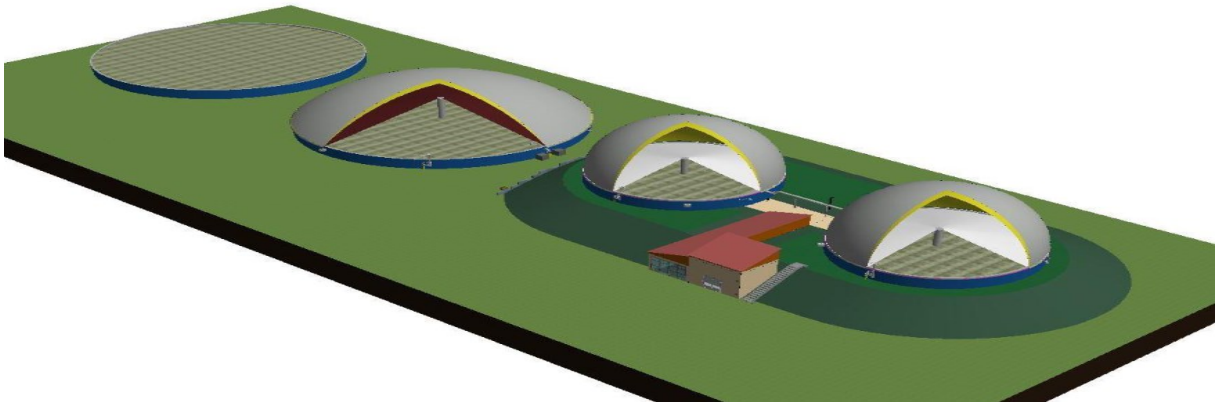
3 Tarkastelukohteen kuvaus

Hartwall Oy (jatkossa Hartwall) on Lahdessa sijaitseva panimo ja virvoitusjuomatehdas. Perustettavan biokaasulaitoksen käyttöönotto tapahtuu keväällä 2023. Tavoitteena prosessista on saada alkukesän aikana biokaasua tehtaan omaan käyttöön. Biokaasuprosessi on uusiutuvan energian tuottamisen lisäksi osa erittäin tärkeää ravinteiden kierrätystä. Oluenpanemisen sivutuotteena syntyvästä olutmäskistä saadaan tuotettua anaerobisissa, eli hapettomissa, olosuhteissa biokaasua. Biokaasu hyödynnetään prosessienergiaksi sähkö- ja höyrykattiloilla ja ravinnepitoinen mädätysjäännös hyödynnetään kierrätysravinteina mallasohran viljelyssä lähiympäristön pelloilla. (Hartwall Oy, 2022)

Biokaasulaitoksen laitekokonaisuuden toimittaa Sauter Biogas Finland Ky. Olutmäski pumpataan pumppauslaitteiden avulla putkea pitkin suoraan panimolta (oluen panemisen

prosessista) biokaasulaitoksen kahteen lieriömäiseen reaktoriin. Olutmäskin syöttönopeus perustuu syötteen hajoamisnopeuteen. (Tukes, 2022, ss. 7–9) Olutmäski on panimoteollisuuden sivuvirta, joten erillistä syötteen hygienisointia ei tässä tapauksessa tarvita. Kuvassa 1 näkyy perustettavan biokaasulaitoksen laitoskokonaisuus. Biokaasulaitokselle tulee kaksi 2400 m³ kokoista bioreaktoria ja yksi 3000 m³ jälkireaktori. Jälkireaktori mahdollistaa suurimman mahdollisen kaasutilavuuden ja kaasun tuoton. Tämä edesauttaa energian säätelyä juomatehtaan prosessin tarpeen mukaan. Lisäksi laitokselle tulee varastointiallas mädätysjäännökselle. Mädätysjäännös on tarkoituksena hyödyntää sellaisenaan lannoitteena mallasohran viljelyssä. (Sauter Biogas Finland Ky, 2022)

Kuva 1. Biokaasulaitoksen havainnekuva. Kuvassa oikealla bioreaktorit, keskellä jälkireaktori ja vasemmalla mädätysjäännösallas (Tukes, 2022, s. 5)



Perustettavan biokaasulaitoksen prosessin valintaan vaikuttaa aina prosessiin käytettävä raaka-aine, eli syöte, etenkin sen orgaaninen kuiva-ainepitoisuus (VS, volatile solids), raaka-aineen saatavuus ja prosessista saatava energiantuottotavoite (Luostarinen, 2015, ss. 83—85). Hartwallille perustettavan laitoksen vuorokausikohtainen syötteen määrä vaihtelee vuodenajan mukaan. Syötettä ei erikseen tarvitse kuljettaa laitokselle, mikä laskee prosessin kokonaiskustannuksia. Laitoksen prosessi on niin kutsuttu tulppavirtaus (panos–tulppa) prosessi, jossa syötettä ei sekoiteta, vaan reaktoriin muodostuneet kerrokset, jotka ovat kaasukerros, karkea kerros, mikrobipitoinen massa ja nestemäinen hajonnut massa, saadaan rikottua kastelulla ja näin biokaasu pääsee kulkeutumaan prosessissa ylöspäin. Uusi olutmäskimassa ruiskutetaan karkean kerroksen päälle. Anaerobisen mädätysprosessin alkaessa uudestaan, olutmäskin sisältämä hajoava orgaaninen aines kulkeutuu alaspäin ja biokaasu nousee ylöspäin. (Tukes, 2022, ss. 7–11)

Prosessissa orgaaninen kuormitus (OLR), eli bioreaktorin tilavuutta (m^3) kohden syötetty orgaanisen aineen määrää, ja viipymäaika (HRT) eli laskennallinen aika reaktorin koon ja syötemäärän suhteesta, riippuvat suoraan raaka-aineen hajoamisnopeudesta. Raaka-aineen hajoamisnopeuden lisäksi viipymäaikaan vaikuttaa reaktorin koko ja syöttötilavuus. (Kymäläinen, 2015b, s. 74) Kasvipitoisilla syötteillä viipymäaika on yleensä noin 30 vuorokautta (Luostarinen, 2015, s. 84). Tarkastelukohteen laitoksella syötteen viipymäaika pääreaktoreissa on syötteen kuitupitoisuuden vuoksi korkeampi, keskimäärin 30–60 vuorokautta (Tukes, 2022, s. 7). Anaerobisessa mädätysprosessissa prosessin syötteeksi valittu raaka-aine, joka tässä kohteessa on olutmäski, hajotetaan hapettomissa olosuhteissa. Anaerobisessa prosessissa raaka-aineen hajoaminen tapahtuu mikrobien toimesta. Prosessissa syntyy biokaasua ja mädätysjäännöstä. (Kymäläinen, 2015b, ss. 60) Tässä opinnäytetyössä keskitytään tarkemmin mädätysjäännöksen hyötykäytön ja sen sisältämien ravinteiden kierrätyksen mahdollisuuksiin. Luvussa 5 käydään läpi mädätysjäännöksen ravinteita ja luvuissa 6 ja 7 ravinteiden kierrätystä ja mädätysjäännöksen lannoitekäytön mahdollisuuksia.

3.1 Biokaasu

Biokaasuprosessissa biokaasua syntyy, kun biokaasulaitoksen reaktoriin syötetty orgaaninen aines hajoaa hapettomissa olosuhteissa. Orgaaninen aines hajoaa mätänemällä anaerobisten bakteerien avulla. Anaerobinen mädätysprosessi koostuu neljästä eri vaiheesta. Vaiheet ovat hydrolyysi, fermentaatio eli asidogeneesi, asetogeneesi ja tärkein eli metaania (CH_4) tuottava metanogeneesi. Asidogeneesi vaiheessa on muodostuttava joko asetaatteja tai hiilidioksidia ja vetyä, koska metanogeenit eivät pysty muodostamaan vetyä muista yhdisteistä. Ensimmäisessä vaiheessa, hydrolyysissä, suuret orgaaniset molekyylit pilkkoutuvat ja liukenevat. Fermentaatiossa eli hajoamisen toisessa vaiheessa, mikrobit tuottavat erilaisia orgaanisia happoja ja alkoholia. Asetogeneesissä tuotetaan metaanin tuotannon raaka-aineet fermentaatiovaiheen lopputuotteista. Näistä asetogeneesin lopputuotteista metanogeenit tuottavat viimeisessä vaiheessa metaania ja hiilidioksidia. Asetogeeniset bakteerit toimivat symbioosissa metaania tuottavien metanogeenien kanssa. (Kymäläinen, 2015b, ss. 60—63)

Mädätysprosessissa suurin osa syötteen kuiva-aineen orgaanisesta aineesta (VS, volatile solids) hajoaa, koska orgaaninen kuiva-aine on biokaasun muodostumisen raaka-aine. Syötemateriaalin laatu vaikuttaa biokaasun tuotantomäärään. Arvioitaessa syötteen sopivuutta biokaasuprosessiin on hyvä huomioida syötteen VS/TS-suhde. Syötteen suuri orgaanisen aineen ja kuiva-aineen suhde, sekä se, miten helposti valitun syötteen orgaaninen aines hajoaa, kertoo syötteen sopivuudesta biokaasuprosessin raaka-aineeksi. Kuiva-ainepitoisuuksien tietäminen mahdollistaa myös prosessin tarvitseman laimennosveden määrän arviointia. Laimennosveden määrää on lisättävä niin, että märkäprosessissa käytetyn syötteen kuiva-ainepitoisuus on alle 15 %. (Kymäläinen, 2015c, ss. 23–25)

Biokaasuprosessista syntyvästä biokaasusta metaania on noin 45–75 % ja hiilidioksidia (CO_2) 20–55 %. Niiden lisäksi puhdistamattomassa biokaasussa on pieniä määriä muita kaasuja, kuten typpeä, vetyä, happea, ammoniakkia ja rikkivetyä. (Kinnunen & Rintala, 2015, s. 17; Lampinen, 2015, s. 126) Energiasisällöltään 1 m^3 biokaasua vastaa noin 6 kWh energiaa, edellyttäen, että metaanipitoisuus biokaasussa on noin 60 %, kun vastaavasti 1 m^3 metaania tai 1 litra öljyä sisältää 10 kWh energiaa (Motiva, n.d., s. 25). Prosessista saatavaan biokaasun määrään vaikuttaa syötteen metaanintuottopotentiaali, joka saadaan selville laboratoriokokeilla.

Biokaasu luokitellaan uusiutuvaksi energiaksi ja sitä hyödynnetään sähkön ja lämmön tuotannossa. Biokaasu voidaan jalostaa liikennekäyttöä varten puhtaaksi metaaniksi, mutta lämmitykseen ja sähköntuottoon biokaasua ei tarvitse jatkojalostaa, riittää, että biokaasu on tarpeeksi puhdasta lämmitys- ja sähköntuotantolaitteille. (Kinnunen & Rintala, 2015, s. 17) Fossiiliset energianlähteet (maakaasu), korvataan jatkossa biokaasulla, mikä mahdollistaa tulevaisuudessa hiilidioksidipäästöttömän tuotannon (Hartwall Oy, 2022).

Hajoamisprosessissa anaerobisten mikro-organismien eli bakteerien kasvunopeus ja aktiivisuus riippuu prosessiolosuhteista. Biokaasuprosessien operointi, eli mädätysprosessin hallinta, tapahtuu useimmiten joko mesofiilisella (35–43 °C) tai termofiilisellä (50–55 °C) lämpötila-alueella. (Kymäläinen, 2015b, ss. 59—64) Tarkastelukohteessa mädätys tapahtuu mesofiilisena, noin 40 °C asteen lämpötilassa.

Aikaisempien tutkimusten ja laboratoriokokeiden tulosten perusteella olutmäski, mikä kuuluu viljaperäisiin syötteisiin, tuottaa metaania noin 200–500 litraa orgaanista kuiva-aine painokiloa kohden (litraaCH_4(kgVS)$^{-1}$) (Bougrier, 2018; Kymäläinen, 2015a, ss. 43—44). Kun tiedetään syötteen orgaanisen kuiva-aineen määrä, voidaan myös laskea prosessista saatava energian määrä. Metaanintuotto saadaan selville kertomalla syötteen sisältämän orgaanisen aineen (VS) kokonaismäärä potentiaalisen metaanintuoton (litraaCH_4 /kgVS) -luvulla (Kymäläinen, 2015d, s. 32). Biokaasulaitoksen tuottamalla energialla pystytään tulevaisuudessa kattamaan suurin osa tehtaan käyttämästä energiasta (Hartwall Oy, 2022).

3.2 Mädätysjäännös

Biokaasuprosessissa orgaaninen aines muuttuu metaaniksi. Viipymäajan jälkeen jäljelle jäänyt mädätysjäännös pumpataan jälkireaktoriin, jossa voi vielä syntyä metaania. Kun orgaaninen aines on suurimmaksi osaksi hajonnut, prosessista jäljelle jäänyt massa päätyy varastoitavaksi biokaasulaitoksella olevaan mädätysjäännös-, eli rejektialtaaseen, josta se voidaan kuljettaa lannoitekäyttöä varten maanviljelijöiden lannoitevarastoihin tai suoraan peltolevitykseen. (Tukes, 2022, s. 7)

Mädätysjäännöstä jää jäljelle biokaasuprosessin jälkeen suunnilleen sama määrä, kuin minkä verran syötettä on alussa ollut huomioiden mahdollinen laimennosvesi. Biokaasuprosessin mädätysjäännös sisältää mikrobimassaa, epäorgaanista ainesta, hajoamatonta raaka-ainetta, esimerkiksi olutmäskin sisältämää ligniiniä ja vettä. Mädätysjäännös koostuu siis samoista ravinteista mitä syötteessä on ollut ennen mädätystä, mutta mädätysjäännöksessä osa ravinteista on kasveille paremmin hyödynnettävissä olevassa liukoisessa muodossa. (Paavola, 2015, ss. 94—95) Prosessissa syntyvä mädätysjäännös on tarkoituksena hyödyntää lannoitteena tai maanparannusaineena. Mädätysjäännöksen sisältämät ravinteet käsitellään tarkemmin luvussa 5.

3.3 Elintarviketeollisuuden sivuvirtojen verotus ja kestävyys biokaasun raaka-aineena

Olutmäski on luokiteltu panimoteollisuuden jätteeksi. On otettava kuitenkin huomioon, että tulevaisuudessa on mahdollista, että elintarviketeollisuuden jätteiden ja sivuvirtojen verotus biokaasun raaka-aineena muuttuu. Suomessa lähes kaikki syötteet, joita Euroopan komission ehdotus uusiutuvan energialuokan muutosta koskee, kuuluvat tällä hetkellä A-luokkaan, mutta muutoksen myötä olisivat jatkossa B-luokkaa, mikä tarkoittaisi korkeampaa verotusta. Muutos koskisi siis myös olutmäskin käyttöä biokaasulaitoksen syötteenä. Keskusteluissa on noussut esiin tyytymättömyys mahdolliseen muutokseen, sillä on katsottu, että kyseisten syötteiden hyödyntäminen energiaksi ei ole pois ruuantuotannosta. Päätöksiä tehdessä pitäisi ottaa huomioon myös se näkökulma, että biokaasulaitosten toiminnalla on uusiutuvan energian tuotannon lisäksi tärkeä rooli ravinteiden kierrätyksessä, jota pitäisi edistää ja samalla voitaisiin parantaa lannoiteomavaraisuutta. (Suomen Biokierto & Biokaasu ry, 2022)

Biokaasun tuottajien on rekisteröidyttävä verovelvollisiksi aina ennen toiminnan aloittamista. Tuottajan on rekisteröidyttävä joko biokaasun tuottajaksi tai biokaasun pientuottajaksi. Pientuottajaksi katsotaan laitos, jossa tuotanto on alle 1 GWh (gigawattitunti), ja sen ylittävissä, kyseessä on biokaasun tuottaja. Tuotantomäärät katsotaan aina laitoskohtaisesti ja arviointi toteutetaan kerran vuodessa. Biokaasun pientuottajien etuna on, että paikallisesti käytettynä kaasu on verotonta, eikä heidän tarvitse osoittaa kaasun kestävyyttä. Biokaasun lämmitys- ja työkonekäyttö on verotonta, jos kestävyysvaatimukset täyttyvät. (Suomen Biokierto ja Biokaasu ry, 2021)

Biokaasun kestävyysvaatimukset on ilmoitettu joulukuussa 2018 julkaistussa uusiutuvan energian direktiivissä (RED II). Direktiivi käsittää pakolliset EU-tason kestävyysvaatimukset biomassoille, joita käytetään energian tuotantoon vuosina 2021–2030. (Rasi, 2019, s. 5) Kestävyysvaatimusten tarkoituksena on huolehtia siitä, että bioenergian lisääntynyt käyttö energian tuotannossa tuottaisi merkittäviä vähennyksiä kasvihuonekaasupäästöihin, kun niitä verrataan fossiilisten polttoaineiden tuotantoon. Kestävyyskriteerit koskevat myös biokaasulla tuotettua energiaa (sähkö-, lämpö- ja jäähdytysenergia), kun aikaisemmin kestävyyskriteerit koskivat biokaasun osalta vain liikenteen kaasumaisia biopolttoaineita.

Biokaasun kestävyysvaatimuksilla tarkoitetaan sitä, että päästövähennykset fossiilisiin polttoaineisiin verrattuna on oltava vuoden 2021 jälkeen perustettavien laitosten kohdalla yli 70 % ja vuoden 2026 ja sen jälkeen perustettavilla laitoksilla yli 80 % pienemmät verrattuna fossiilisten polttoaineiden tuotantoon. (Koponen & Sokka, 2019, ss. 4–9)

4 Olutmäskin hyödyntäminen

Maailmanlaajuisesti olutta tuotettiin vuonna 2021 189 biljoonaa litraa (Statista, 2023). Suomessa olutta tuotetaan noin 400 miljoonaa litraa vuodessa (Sandell, 2023). Oluen tuotannosta syntyy jokaista 100 olutlitraa kohden 15–20 kilogrammaa mäskiä. Olutmäski muodostaa yli 80 prosenttia panimon kaikista jätteistä. (Sganzerla, 2021a, s. 1967) Suomessa olutmäskiä muodostuu hyödynnettäväksi siis noin 80 miljoonaa kilogrammaa vuodessa.

4.1 Olutmäski

Olutmäski on panimon jätettä, toisin sanoen se on elintarviketeollisuuden sivuvirta, mitä syntyy panimon jalostusprosessin aikana. Oluen panemiseen käytetään olutmaltaita, jotka ovat pieniä kuivattuja ja idätettyjä ohran tai muiden viljojen, esimerkiksi vehnän tai kauran jyviä. (Buller, 2022) Hartwall käyttää tuotannossaan paikallisten sopimusviljelijöiden viljaa. Ennen panimolle tuloa jyvät mallastetaan Lahdessa Viking Malt Oy:n mallastamolla. (Hartwall Oy, n.d.)

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan olutmäskin hyödyntämistä biokaasuprosessin syötteenä, mutta muitakin vaihtoehtoja hyödyntämiselle on. Olutmäskiä on tutkittu paljon ja eri hyödyntämismahdollisuudet esitetään luvussa 4.2 (s. 11). Olutmäskin hyödyntämisen haasteena on mäskäysprosessin tuomat haasteet mäskin säilyvyydelle. Mäskäysprosessin lämpötila, valitun menetelmän mukaan, on 50–80 °C astetta ja olutmäskin pH on hieman alle 6. Prosessista jäljelle jäävä mäski on hyvin lämmintä ja kosteaa, minkä vuoksi mäski ei säily elintarvikekelpoisena yli viikkoa ilman lisäaineiden, esimerkiksi muurahaishapon käyttöä. (Buller, 2022) Kuvassa 2 näkyy, minkälaista mäski on, kun se on erotettu oluen keittoon käytettävästä nesteestä.

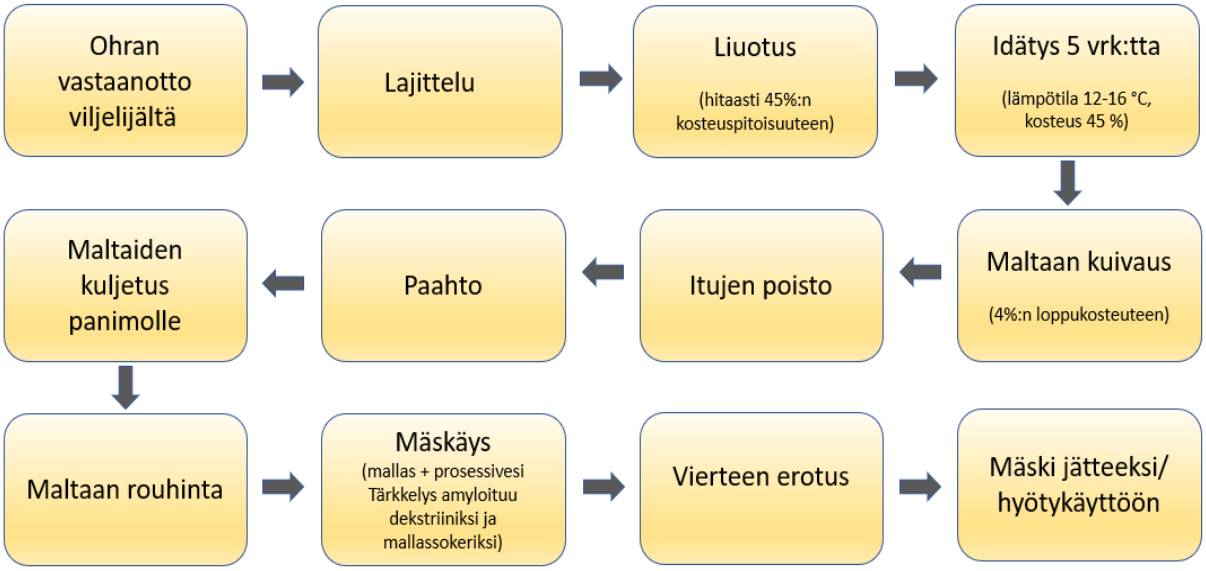
Kuva 2. Oluen tuotannosta ylijäävä mäski

4.1.1 Olutmäskin synty

Oluen valmistukseen käytettään vettä, maltaita, hiivaa ja humalaa. Oluen valmistusvaiheessa voidaan lisätä myös erilaisia mausteita. Maltaana käytetään eniten ohramallasta, mutta muistakin viljoista voidaan oluita valmistaa. Valmistusprosessin alussa idätetyt ja kuivatut maltaat hienonnetaan pieneksi, jotta uutto onnistuisi tehokkaammin. Seuraavassa vaiheessa, eli mäskäyksessä hienonnetut maltaat yhdistetään veden kanssa. Mäskäysmenetelmiä on useampia, joiden erona on se, kuinka pitkään ja millaisissa lämpötiloissa mäskäys tehdään, mutta keittomäskäys on yksi yleisimmistä menetelmistä. Mäskäyksen lämpötilat vaihtelevat valitun tekniikan mukaan. Mäskäyksen päätarkoitus on saada maltaista liukenevat aineet liukenemaan nesteeseen, eli vierteeseen. (Enari & Mäkinen, 2014, ss. 76–83)

Kun mäskäys on tehty, mäski siivilöidään huolella nesteestä pois ja nestemäinen vierre menee keitettäväksi. Tässä kohtaa mäski siis erotetaan prosessista jätteeksi. Erotetusta vierteestä keitetään olutta ja mäski poistuu prosessista sivuvirtana. Jäljelle jäänyt mäski koostuu maltaiden kuorista ja muista liukenemattomista aineista. (Enari & Mäkinen, 2014, ss. 101–102) Liukenemattomia aineita on esimerkiksi ohramaltaiden sisältämät ligniinit. Mallastusprosessi ja mäskin synty on kuvattu prosessikaaviona kuvassa 3.

Kuva 3. Prosessikaavio ohran mallastusprosessista ja mäskin synnystä



4.1.2 Olutmäskin koostumus

Mäskin koostumus vaihtelee muun muassa mäskäykseen käytettyjen raaka-aineiden (viljan) ja prosessin olosuhteiden mukaan. Tässä työssä kuvatussa prosessissa käsitellään oluenpanemisen raaka-aineena ohramaltaita. Olutmäski sisältää maltaan kuoria ja muita prosessissa liukenematta jääviä osuuksia (kuva 2). Mäski koostuu suurimmaksi osaksi maltaan proteiineista, kuoriaineesta ja rasvasta ja on sen vuoksi hyvin ravintorikasta. Maltaan hiilihydraatit pilkkoutuvat prosessissa pienemmiksi molekyyleiksi, jotka liukenevat vierteeseen. (Buller, 2022)

Olutmäskin kuoriaines koostuu selluloosasta, hemiselluloosasta ja ligniinistä. Olutmäskin kuiva-aineen määrä on noin 20–24 % ja orgaanisen kuiva-aineen määrä kuiva-aineesta on noin 95 % (Johnson, 2010, s. 2; Sobek, 2022 s. 157). Mäskin pH on noin 5,7–5,9 (Buller, 2020; Sganzerla, 2021b). Bougrierin ym. (2018) tekemän tutkimuksen tuloksista koottu olutmäskin koostumus on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Olutmäskin koostumus (Bougrier, 2018, s. 103).

Olutmäskin koostumus

	Näyte 1	Näyte 2	Näyte 3	Näyte 4	Keskiarvo
Tiheys (g/m^{-3})	568 ± 66	794 ± 51	674 ± 11	872 ± 50	727 ± 134
TS (g/kg^{-1})	243.9 ± 10.6	262.3 ± 4.5	229.1 ± 10.4	251.8 ± 11.5	246.8 ± 14.0
VS (g/kg^{-1})	233.7 ± 10.8	249.6 ± 5.4	219.3 ± 11.4	236.1 ± 11.0	234.7 ± 12.4
COD ($g\ O_2/kg^{-1}$)	317.3 ± 41.5	356.0 ± 37.6	292.9 ± 46.1	335.4 ± 24.2	325.4 ± 26.8
N ($g\ N/kg^{-1}$)	11.2 ± 2.7	12.4 ± 0.8	9.7 ± 0.5	10.4 ± 0.8	10.9 ± 1.1
P ($g\ P/kg^{-1}$)	5.0 ± 0.4	8.4 ± 1.9	4.9 ± 0.4	5.6 ± 0.3	6.0 ± 1.6
Hiilihydraatit (%VS)	1 %	1 %	3 %	3 %	2% ± 1%
Proteiinit (%VS)	24 %	25 %	24 %	25 %	25% ± 1%
Rasvat (%VS)	11 %	12 %	9 %	12 %	11% ± 1%
Kuidut (%VS)	64 %	62 %	64 %	60 %	61% ± 2%
Hemiseluloosa (%VS)	29.9 %	30.8 %	38.7 %	36.3 %	33.9% ± 4.3%
Selluloosa (%VS)	21.80 %	23.80 %	20.00 %	17.40 %	20.8% ± 2.7%
Lignin (%VS)	11.90 %	7.90 %	5.10 %	5.90 %	7.7% ± 3.0%
Metaanintuottopotentiaali (litraa CH_4 $(kgVS)^{-1}$)	320 ± 17	331	328 ± 10	333 ± 15	328 ± 6
Ca (g/kg^{-1} TS)	3.0 ± 0.5	3.5 ± 1.0	2.5 ± 0.2	3.1 ± 0.1	3.0 ± 0.4
K (g/kg^{-1} TS)	0.61 ± 0.08	0.50 ± 0.12	0.74 ± 0.16	1.00 ± 0.11	0.71 ± 0.22
Mg (g/kg^{-1} TS)	1.7 ± 0.3	1.9 ± 0.2	1.6 ± 0.1	1.8 ± 0.2	1.8 ± 0.1
Na (g/kg^{-1} TS)	<0.17	<0.19	<0.27	<0.27	
S (g/kg^{-1} TS)	3.0 ± 0.6	4.2 ± 0.9	2.8 ± 0.3	2.5 ± 0.2	3.1 ± 0.7
Co (g/kg^{-1} TS)	<0.62	<0.54	<0.53	<0.54	
Cu (mg/kg^{-1} TS)	16.9 ± 1.8	13.6 ± 3.8	12.6 ± 1.3	13.9 ± 0.8	14.3 ± 1.9
Fe (mg/kg^{-1} TS)	166.0 ± 68.2	265.0 ± 52.7	111.0 ± 51.5	94.6 ± 33.4	159.2 ± 76.9
Ni (mg/kg^{-1} TS)	<1.2	<1.1	<1.1	<1.1	

Näytteet	
Näyte 1	Panimo, jossa oluen tuotantoa yli 300 000 litraa / vuosi
Näyte 2	Panimo, jossa oluen tuotantoa yli 1.6 milj. litraa / vuosi
Näyte 3	Panimo, jossa oluen tuotantoa yli 2.8 milj. litraa / vuosi
Näyte 4	Panimo, jossa oluen tuotantoa yli 8 milj. litraa / vuosi

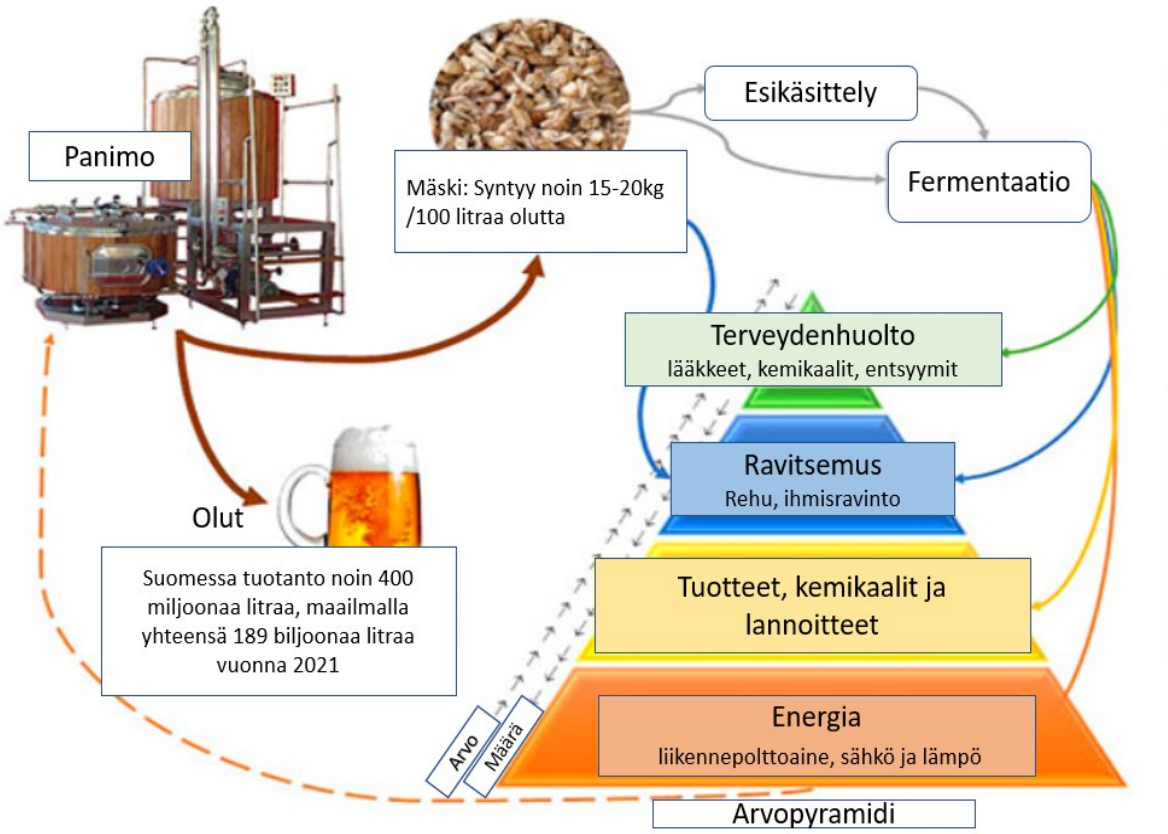
4.2 Olutmäskin hyödyntämisvaihtoehtoja

Olutmäski sopii tutkimusten mukaan erittäin hyvin bioenergian, biomateriaalien ja elintarvikkeiden raaka-aineeksi. Toistaiseksi olutmäskiä on käytetty pääasiassa eläinten rehuna tai hävitetty kaatopaikoille. Useat tutkimukset ovat kuitenkin osoittaneet, että olutmäskistä voitaisiin tuottaa erilaisia biomateriaaleja, kuten maitohappoa (Mussatto, 2007), ksylitolia (Mussatto & Roberto, 2008), bioaktiivisia yhdisteitä, eli yhdisteitä, joilla on

biologista aktiivisuutta (Socaci, 2018), erilaisia entsyymejä (Hassan, 2020) ja aktiivihiiltä (Mussatto, 2010). Olutmäski sopii hyvin myös biokaasuprosessin syötteeksi ja näin saadaan tuotettua lämpöä, sähköä ja prosessihöyryä kattamaan panimoiden omaa energiankulutusta. Mikäli biokaasua tuotetaan yli panimon oman tarpeen, energiaylijäämä voidaan myös tarvittaessa myydä, mikä lisää energiatehokkuutta ja vähentää kasvihuonekaasupäästöjä. (Sganzerla, 2021b, s. 2)

Alhaisten kustannusten, korkean proteiini- ja kuitupitoisuuden vuoksi olutmäskiä on aikaisemmin hyödynnetty pääasiallisesti juuri eläinten ravintona, etenkin lehmien, sikojen ja kanojen rehuna. Olutmäskin sopivuutta erilaisiin ihmisravinnontuotteisiin on myös tutkittu paljon ja olutmäskiä voisi hyödyntää esimerkiksi leivässä korvaamaan jauhoja. Olutmäskiä on myös hyödynnetty mikro-organismien ja entsyymien kasvattamisessa. (Nganyira, 2022, s. 2) Kuvassa 4 näkyy olutmäskin hyötykäytön mahdollisuudet ja arvopyramidi.

Kuva 4. Olutmäskin hyötykäytön mahdollisuudet. Kuva muokattu lähteestä Zeko-Pivač (2022)



Olutmäskin sopivuutta kartonki- ja paperiteollisuuden raaka-aineena on testattu ja ominaisuuksiltaan se korvaamaan puukuituja, koska olutmäski sisältää paljon selluloosaa ja hemiselluloosaa (Karppinen, 2020). Teknologian tutkimuskeskus VTT kehitti termokemiallisen menetelmän, jolla voidaan erottaa olutmäskistä eri jakeet, kuten sokerit, proteiinit, lipidit ja ligniinin erilleen. Tämä mahdollistaisi jakeiden hyötykäytön erillisinä tuotteina, esimerkiksi sokerit voisi hyödyntää uudelleen oluen panemisessa. (VTT, 2016) Toistaiseksi monipuolisemman hyödyntämisen esteenä on ollut mäskin heikko säilyvyys ja prosessoinneista muodostuvat korkeat kustannukset (Nganyira, 2022, s. 2).

4.3 Olutmäski biokaasuprosessin syötteenä

Panimoteollisuudesta saadaan runsaasti biokaasuntuotantoon hyvin soveltuvia orgaanisia tuotteita. Olutmäskiä syntyy tuotannossa suhteellisen tasaisesti riippuen tuotantolaitoksesta. (Buller, 2022) Olutmäskin runsas saatavuus ja kohtuuhintaisuus tekee siitä houkuttelevan raaka-aineen biokaasun tuotantoon ja se on herättänyt maailmanlaajuista kiinnostusta (Panjičko, 2017, s. 519). Olutmäski sisältää runsaasti orgaanista hiiltä ja sen metaanituottopotentiaali korkea. Olutmäski tuottaa metaania noin 200–500 litraa orgaanista kuiva-aine painokiloa kohden (litraaCH_4(kgVS)$^{-1}$). (Bougrier, 2018; Kymäläinen, 2015a, s. 44)

Olutmäski on kosteaa, lämmintä ja sen pH on noin 5,7–5,9, minkä vuoksi sen säilyvyys ilman säilöntäaineita tai erillistä käsittelyä on vain noin seitsemän vuorokautta. Olutmäskin huono säilyvyys ja tämänhetkinen energiakriisi on edistänyt olutmäskin hyödyntämistä biokaasun ja bioetanolin tuotannossa. Panimot käyttävät hyvin paljon fossiilisia polttoaineita ja sen vuoksi tuotantoon kohdistuukin jatkuvasti taloudellisia ja ympäristöpaineita energiankäytön sekä sivuvirtojen hävittämiskustannusten vähentämiseksi. Biokaasun tuotto sivuvirroista tarjoaa erittäin hyvän vaihtoehdon panimoille fossiilisten polttoaineiden käytön huomattavaan vähentämiseen ja samalla prosessin hiilijalanjäljen pienentämiseen. (Nganyira, 2022, s. 2; Panjičko, 2017, s. 519)

Biokaasuprosessissa bakteerit hydrolysoivat orgaanista materiaalia sellaiseen muotoon, mitä on helpompi hyödyntää. Hydrolyysivaiheen on siis toimittava anaerobisessa

mädätysprosessissa hyvin, jotta olutmäskin sisältämä selluloosa ja hemiselluloosa saadaan prosessissa hajotettua. Pelkän olutmäskin lisäksi olisi, aikaisemmin tehtyjen tutkimusten mukaan, hyvä olla muitakin syötteitä, jotta prosessin tehokkuus parantuisi ja biokaasun tuotanto kasvaisi. (Nganyira, 2022, s. 3) Toisaalta stabiilissa anaerobisessa mädätyksessä olutmäskin on todettu hajoavan hyvin. Olutmäski on osoittautunut hyväksi syötteeksi myös sen sisältämän C/N- (hiili/typpi) suhteen takia. Mäskin soveltumista anaerobiseen prosessiin todisti myös Panjičkon ym. (2017) tekemässä tutkimuksessa se, että bioreaktorissa mikrobiston koostumus pysyi lähes 80 prosenttisesti samana ja biokaasureaktorin toiminta pysyi vakaana testaukseen käytetyn 198 päivän ajan. (Panjičko, 2017, ss. 519–529) Taulukossa 2 on esitetty Sganzerlan ym. (2021b) tekemän tutkimuksen perusteella olutmäskille laboratorio-olosuhteissa suoritetun koemädätyksen tuloksia. Taulukossa 1 (s. 11) on esitetty olutmäskin koostumus, joka on koottu Bougrierin ym. (2018) tekemästä tutkimuksesta.

Taulukko 2. Sganzerlan ym. (2021b) suorittaman olutmäskin koemädätyksen arvoja

	Ennen mädätystä	**Mädäte reaktorissa (alussa)**	**Mädäte reaktorissa (lopussa)**
pH	5.9	6.7	7.5
liukoinen kemiallinen hapen kulutus (mgO_2L^{-1})		5449.5	25290.8
TS (%)	98.1	13.3	3.1
VS (%)	73.5	12.7	2.7
Kiintoaineiden kokonaismäärä (%)		0.6	0.4
Alkaliniteetti (mg $CaCO_3$)		745.7	8990.1
Ammoniumtyppi ($mgNH_3L^{-1}$)	185.3	100	1291.2
Asetaattihappo ($mgL-^{1}$)		100	1291.2
Propionihappo (mgL^{-1})		11	13.6
Isovoihappo (mgL^{-1})		2	111.6
Voihappo (mgL^{-1})		13.1	106.1
Isovaleriaanihappo (mgL^{-1})		0	115.7
Valeriaanihappo (mgL^{-1})		0	5.8
Heksaanihappo (mgL^{-1})		0	0.7

Olutmäskin VS/TS-suhde on Bougrierin ym. (2018) keskiarvoisista tuloksista (taulukko 1, s. 11) laskettuna on noin 95,1 %. Tuloksissa keskiarvoinen VS, eli orgaanisen kuiva-aineen määrä, oli 234,7 (g/kg^{-1}) ja TS, eli kuiva-aineen määrä, oli 246,8 ($g/kg-^{1}$). Sganzerlan ym.

(2021b) tutkimustulosten mukaan VS/TS- suhde oli 95,4 % (taulukko 2). Mitä suurempi käytetyn syötteen orgaanisen aineen (VS, volatile solids) osuus on kuiva-aineen kokonaismassasta (TS, total solids) (VS/TS-suhde) sen paremmin syöte sopii biokaasuprosessiin (Kymäläinen, 2015c, ss. 23–25). Tämä luku puoltaa myös sitä, että olutmäski sopii biokaasuprosessin syötteeksi hyvin, vertailuarvoina esimerkiksi biokaasuprosessissa paljon hyödynnetyt syötteet biojätteet ja karjan lanta. Biojätteen VS/TS-luku on noin 80 % ja karjan lannalla noin 83 %. (Kymäläinen, 2015d, s. 31)

Orgaanisen syötteen sopivuus biokaasuprosessiin määritellään kemiallisilla kokeilla, mutta yleisesti orgaaninen jäte tai elintarviketeollisuuden sivutuote sisältää biokaasuprosessin toiminnan kannalta tärkeille mikrobeille kaikki niiden tarvitsemat ravintoaineet. Mikrobit tarvitsevat elääkseen ravintoaineita, joista pääravinteita ovat typpi, hiili, fosfori ja rikki. Lisäksi tarvitaan hivenaineita, kuten, kalsiumia, magnesiumia, rautaa, kaliumia ja natriumia. Olutmäskin ravinnepitoisuudet vaihtelevat mallastamiseen käytetyn ohran lajikkeesta ja ominaisuuksista riippuen. (Johnson, 2010, s. 2; Sobek, 2022, s. 157)

Yksistään olutmäskiä mädätettäessä on hyvä selvittää mäskin ravinnepitoisuudet etukäteen, jotta voidaan varmistaa, että biokaasuprosessin mikrobien tarvitsemat ravinteet löytyvät syötteestä, eikä lisäravinteita tarvitsisi käyttää. On kuitenkin hyvä huomioida, että vaikka olutmäski sisältäisi kaikki tarvittavat alkuaineet, ei tulokset takaa tietoa siitä, että alkuaineet ovat mikrobeille hyödynnettävissä olevassa muodossa. Joissain tapauksissa voi olla hyödyllistä lisätä hivenaineita, jotta voidaan varmistaa mahdollisimman tuottoisa prosessi. (Kymäläinen, 2015c, ss. 26–27)

Bougrierin ym. (2018) tekemän tutkimuksen tuloksista selviää, että olutmäskin kuiva-aineen orgaaninen aine (VS, Volatile solids) sisälsi vain vähän hiilihydraatteja, kuten glukoosia tai tärkkelystä (2 % VS). Olutmäskin alhainen hiilihydraattipitoisuus selittyy sillä, että glukoosi on käytetty oluen tuotantoon, eikä sen vuoksi sisällä juurikaan hiilihydraatteja. Proteiinipitoisuus puolestaan oli korkea, 25 % kuiva-aineen orgaanisesta aineksesta, mikä selittää tutkimustulosten korkean typpipitoisuuden. Lipidipitoisuus oli myös melko korkea, 11 % kuiva-aineen orgaanisesta aineksesta. Lipidien hajoaminen voi johtaa pitkäketjuisten rasvahappojen muodostumiseen (LCFA, Long Chain Fatty Acids). Korkeissa pitoisuuksissa

pitkäketjuiset rasvahappo yhdisteet voivat aiheuttaa inhibointia, eli estää anaerobisen reaktion. (Bougrier, 2018, s. 103)

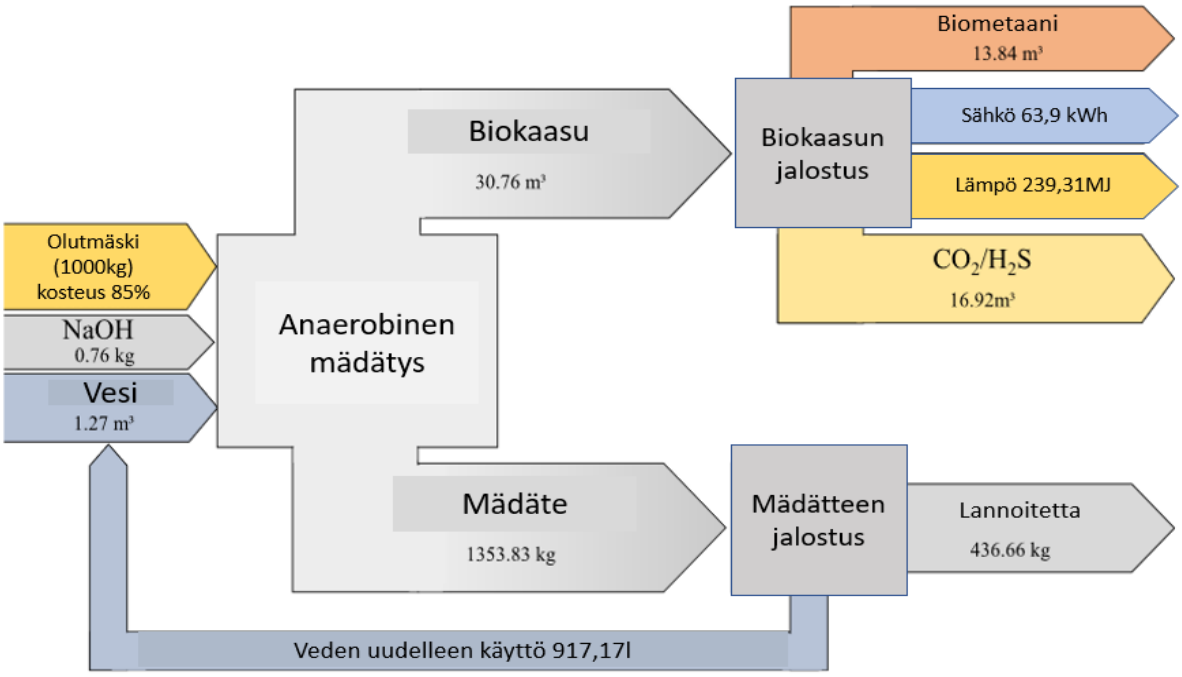
Kuitupitoisuus olutmäskissä on hyvin korkea, yli 60 %, kuiva-aineen orgaanisesta aineesta (Taulukko 1, s. 11, ligniini, selluloosa ja hemiselluloosa). Ligniini ei hajoa, tai hajoaa erittäin huonosti anaerobisessa mädätyksessä. Hemiselluloosa ja selluloosa puolestaan hajoavat, mutta hitaasti, minkä vuoksi olutmäskin viipymäaika (HRT, Hydraulic retention time) bioreaktorissa on hyvä pitää hieman normaalia kasvipitoisen syötteen (30 vuorokautta) viipymäaikaa pidempänä. Bougrierin (2018) tutkimuksessa viipymäaika oli 40 vuorokautta. Kokonaiskuitupitoisuudesta ligniiniä, joka ei siis hajoa (tai hajoaa hyvin hitaasti) anaerobisessa mädätyksessä, oli vain 6–10 % kuiva-aineen orgaanisesta aineesta. (Bougrier, 2018, s. 103)

Usein biokaasuprosessissa sopivan ravinnepitoisuuden takaamiseksi käytetään useampaa erilaista syötettä, mutta pelkän olutmäskin mädättäminen on osoittautunut hyväksi vaihtoehdoksi. Tasaisen toiminnan takaamiseksi prosessi todennäköisesti vaatii hivenaineiden lisäämistä, mikä nostaa laitoksen käyttökustannuksia ja laskee kannattavuutta. Hivenaineiden lisääminen yksipuolisia syötteitä käytettäessä parantaa prosessin tehoa ja tasapainoa. Hivenaineiden lisätarve perustuu olutmäskin mädätysjäännöksen hivenainepitoisuuksiin. (Bougrier, 2018, s. 107) Hivenainepitoisuuksien perusteella suositeltavaa on, yksittäisiä syötteitä käytettäessä, lisätä natriumia (Na), mangaania (Mn), rautaa (Fe), magnesiumia (Mg), kaliumia (K), kobolttia (Co) ja nikkeliä (Ni) (Kymäläinen, 2015c, ss. 26–27). Mikäli prosessiin käytettävä laimennusvesi sisältää riittävästi kalsiumia (Ca) ei kalsiumlisälle ollut tutkimuksen mukaan tarvetta (Bougrier, 2018, s. 107).

Tehtyjen tutkimusten ja kirjallisuuden perusteella olutmäski sopii siis hyvin syötteeksi biokaasuprosessiin. Sganzerlan ym. (2021b) laboratorio-olosuhteissa tekemän tutkimuksen perusteella biokaasuprosessista saatiin noin 31 m^3 biokaasua 1000 kilogrammasta olutmäskiä. Tuotetusta biokaasusta voidaan jatkojalostamalla saada vajaa 14 m^3 biometaania. Kuvassa 5 on kuvattu Sganzerlan ym. (2021b) tekemän tutkimuksen perusteella anaerobisen mädätyksen bioenergian ja lannoitteiden tuotannon massa- ja energiataseet (1000 kg:sta olutmäskiä). Tehdyn tutkimuksen mukaan, kun laimennosvettä

käytettiin noin 1,3 m^3, mädätysjäännöstä jäi noin 1350 kilogrammaa, josta nestejakeen määräksi oletettiin 70 % ja kuivajakeen määräksi 30 %. Mädätysjäännöksen määrään vaikuttaa se, että kyseisessä tutkimuksessa prosessin laimennosvedestä käytettiin uudestaan noin 1m^3. Mädätysjäännöksestä laskettiin ravinnepitoisuudet lannoitekäyttöä varten. (Sganzerla, 2021b, ss. 3–5) Mädätysjäännöksen ravinteita tarkastellaan tarkemmin seuraavassa luvussa (luvussa 5).

Kuva 5. Sganzerlan ym. (2021b) suorittaman olutmäskin koemädätyksen massa- ja energiataseet laboratorio-olosuhteissa toteutetun märkämädätyksen perusteella.



5 Mädätysjäännöksen ravinteet

Biokaasulaitosten mädätysjäännös on ravinnerikasta, koska se sisältää kaikkia niitä ravinteita mitä prosessiin syötteiden mukana on mennyt. Mädätysjäännös sisältää typpeä (N), Fosforia (P), kaliumia (K) ja magnesiumia (Mg) kasvien helposti hyödynnettävässä muodossa. Mädätysjäännös sisältää myös erilaisia kasveille välttämättömiä hivenaineita. (Paavola, 2015, ss. 94—95) Mädätysjäännöksen ravinnearvo riippuu biokaasulaitoksen syötteestä ja prosessin olosuhteista. Mädätysjäännöksen lannoitehyötykäytön kannalta suurin etu on, että typpi esiintyy suurimmaksi osaksi ammoniumtyppenä (NH_4^+-N). (Schnurer & Jarvis, 2010, ss. 98–99)

Sganzerlan ym. (2021b) tekemässä olutmäskin mädätyskokeessa (märkämädätys, kuiva-ainepitoisuus 15 %) 1000 kilogrammasta olutmäskiä tuli noin 1350 kilogrammaa mädätysjäännöstä. Tulosten perusteella mädätysjäännös sopisi nestepitoiseksi orgaanisiksi lannoitteiksi ja sillä voisi korvata viljelyssä teollisesti tuotetut, niin kutsutut seoslannoitteet (typpi, fosfori ja kalium), eli mineraali NPK-lannoitteet. Mädätysjäännös sisälsi kaikkia kasvien tarvitsemia pääravinteita. (Sganzerla, 2021b, s. 6) Mallasohran viljelyyn suositellaan yleensä seoslannoitteiden käyttöä (typpi, fosfori ja kalium), mikä puoltaa mädätysjäännöksen sopivuutta mallasohran lannoitteeksi (Jurkola, 2019, ss. 19–20).

5.1 Typpi ja ammoniumtyppi

Typpi (N) on yksi maailman yleisimmistä alkuaineista, pelkästään ilmakehässä on typpeä 78 %. Typpeä esiintyy ilmakehän lisäksi kasvillisuudessa ja kaikissa eliöissä. Ravinteiden kierrätyksen kannalta typen loppumista maapallolta ei tarvitse pelätä, kuten fosforin, koska typpi on uusiutuvaa. Typpi kiertää ilmakehän, kasvien ja maaperän välillä. Luonnossa typpi esiintyy typpikaasun (N_2), nitriitin (NO_2^-), nitraatin (NO_3^-) ja ammoniumtypen (NH_4^+) muodossa. Kasvit hyödyntävät typen ammoniumnitraattina ja ammoniakin muodossa typpi on haihtuvaa ja haihtuu näin takaisin ilmakehään. (Oras, n.d.)

Biokaasuprosessiin typpi kulkeutuu syötteenä käytettyjen raaka-aineiden mukana. Olutmäskin sisältämän typen pitoisuus vaihtelee tutkimustulosten perusteella 9,7–12,4 (gN/kg^{-1}) ja keskiarvo olutmäskin typpipitoisuudelle tutkimuksissa oli 10,9 (gN/kg^{-1}). (Bougrier, 2018) Tarkat arvot esitetty taulukossa 1 (s. 11). Sganzerlan ym. (2021b) tutkimuksessa vastaavasti typen arvot olivat 24,8 (gN/kg^{-1}). Tämä lukema on huomattavasti korkeampi kuin Bougrierin ym. (2018) tutkimuksissa saamat tulokset. Korkeaan typpipitoisuuteen voi vaikuttaa käytetyn maltaan lajike, mäskäysprosessin erot sekä eroavaisuudet ja virheelliset tulokset laboratoriotutkimuksissa.

Biokaasuprosessissa raaka-aineen typpi (N) muuttuu osittain liukoiseen muotoon ja on näin kasveille helpommin hyödynnettävässä muodossa. Ammonifikaatio, eli typen mineralisaatio/ liukoistuminen, lisää syötteen sisältämän orgaanisen typen määrää. Ammonifikaatiossa osa typestä muuttuu ammoniumtypeksi (NH_4 -N). Kasvit hyödyntävät typpeä ammoniumtyppenä

ja nitraattityppenä (NO_3-N). Typen mineralisoitumisen määrään vaikuttaa biokaasuprosessin olosuhteet (lämpötila, käytetty teknologia, viipymäaika). Mineralisoitumisen määrää on vaikea arvioida ilman syötteelle tehtäviä kemiallisia tutkimuksia, mutta kasviperäisen raaka-aineen, johon olutmäski kuuluu, voi typen mineralisaatio olla jopa 50–80 %. (Paavola, 2015, ss. 94–95)

Mädätysjäännöksen hyödyntämistä viljelykäyttöä ajatellen ammonifikaatio nostaa mädätysjäännöksen arvoa, sillä ammoniumtyppi sitoutuu paremmin maaperään, kuin nitraattityppi, eikä tämän vuoksi huuhtoudu yhtä helposti pois. Lisäksi mädätysjäännös on biokaasuprosessin jäljiltä tasaisempaa ja juoksevampaa, mikä helpottaa mädätysjäännöksen levitystä pelloille. Ravintorikkaan mädätysjäännöksen hyödyntäminen lannoitteena tukee ravinteiden kierrätyksen lisäksi energiansäästötavoitteita ja on ympäristöystävällisempi vaihtoehto teollisesti tuotettujen lannoitteiden käytölle. (Kinnunen & Rintala, 2015, ss. 18—19; Paavola, 2015, ss. 94–95) Ravinteiden kierrätyksen etuja ja hyötyjä on käyty tarkemmin läpi luvussa 7.

5.2 Fosfori

Fosfori (P) on elintärkeä aine kasveille typen ohella. Biokaasuprosessiin fosfori kulkeutuu syötteen mukana. Olutmäskin sisältämä fosfori vaihteli Bougrierin ym. (2018) tutkimuksen perusteella, panimon tuotantomäärän mukaan, 4,9–8,4 (gP/kg^{-1}) ja keskiarvo olutmäskin sisältämälle fosforille oli 6,0 (gP/kg^{-1}). Tarkat arvot esitetty taulukossa 1. Sganzerlan ym. (2021b) tutkimuksessa olutmäskin fosforipitoisuus oli 5,1 (gP/kg^{-1}).

Fosfori ei esiinny lainkaan kaasumaisessa muodossa, joten se ei pääse haihtumaan mädätysjäännöksestä. Fosforin määrä säilyy siis mädätysjäännöksessä samana mitä syötteen mukana on bioreaktoriin mennyt. Ravinnetaseiden määrään vaikuttaa fosforin kannalta eniten se, kuinka mädätysjäännös käsitellään. Mikäli mädätysjäännös jaotellaan biokaasulaitoksella kahdeksi eri jakeeksi, neste- ja kuivajakeeksi, fosforin prosentuaalinen pitoisuus kuivajakeessa nousee ja puolestaan nestejakeessa laskee (kuva 6, s. 21). (Luostarinen, 2015, s. 92) Mädätysjäännöksen erottelu kahdeksi jakeeksi monipuolistaa mädätysjäännöksen käyttöä ja mahdollistaa fosforipitoisen jakeen kuljettamisen

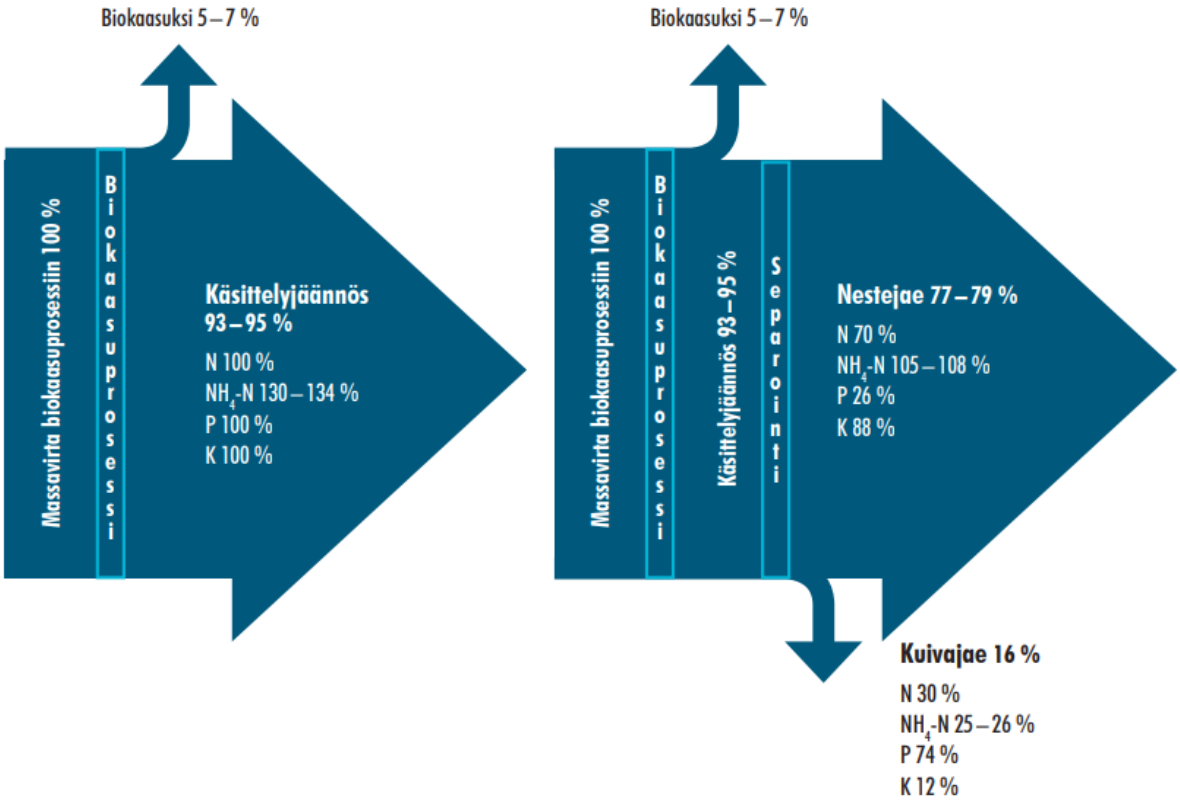
edullisemmin sinne missä sitä tarvitaan (Horn, 2020). Mikäli biokaasulaitoksella mädätysjäännöstä ei käsitellä kahdeksi eri jakeeksi, ravinnepitoisuudet säilyvät kokonaistaseessa samana (Luostarinen, 2015, s. 92).

5.3 Ravinnetaseet

Laskettaessa mädätysjäännöksen ravinnetaseita on otettava huomioon esimerkiksi syötteen kuiva-ainepitoisuus ja ravinnearvot ennen mädätystä. Ravinnetaseet vaihtelevat todella paljon käytetyn syötteen muukaan ja tähän vaikuttaa juuri se, kuinka suuri osa syötteen kuiva-aineesta päätyy mädätysjäännökseen. Mädätysjäännöksen hyötykäytön kannalta huomioitavaa on, että fosforin, kokonaistypen ja kaliumpitoisuuksien arvioidaan säilyvän biokaasuprosessissa samana, mikä tarkoittaa, että syötteen sisältämien ravinteiden kokonaismäärät siirtyvät mädätysjäännökseen. (Luostarinen, 2015, ss. 91–92)

Anaerobisessa mädätyksessä syötteen orgaaninen aine muuttuu biokaasuksi ja ammoniumtypen määrä nousee, mikä johtuu typen mineralisoitumisesta. Kuvassa 6 on kuvattu syötteen ravinnetaseiden määrien muutos ja se, miten mädätysjäännöksen erottelu kahdeksi eri jakeeksi vaikuttaa ravinteiden pitoisuuksiin mädätysjäännöksessä. (Luostarinen, 2015, ss. 91–92) Opinnäytetyön tarkastelukohteessa ei mädätysjäännöstä ole tarkoitus jaotella kahdeksi jakeeksi, vaan hyödyntää sellaisenaan.

Kuva 6. Ravinnetaseiden pitoisuudet märkämädätyksen jälkeen. Vasemmalla ravinnearvot ilman erottelua kuiva- ja nestejakeeksi. (Luostarinen, 2015, s. 92)



6 Mallasohran viljely

Suomessa mallasohran viljely on sopimusviljelyä, mikä tarkoittaa sitä, että viljelijä sitoutuu kasvattamaan mallastamolle ennalta sovitun määrän mallasohraa ja mallastamo puolestaan sitoutuu ostamaan sovitun määrän, mikäli vain toimitetun ohran laatuvaatimukset täyttyvät. Sopimusviljely tuo turvaa viljelijälle sen vuoksi, että sato päätyy mallastamolle maailmanmarkkinatilanteista huolimatta. (Huttunen, 2018) Mallasohran viljely on ollut hieman laskusuuntainen. Viljelyyn käytetty peltoala laski Suomessa vuonna 2022 66 000 hehtaariin, kun vuonna 2021 se oli 70 000 hehtaaria. Erilaisia mallasohran lajikkeita viljelyssä oli vuonna 2022 yhteensä 58. (VYR, 2022) Mallasohraa on tuotettu noin 200 000 tonnia vuodessa, mistä noin puolet päätyy suomalaisten mallastamoiden käyttöön. Mallasohran kysyntään vaikuttaa oluen tuotanto ja olutmaltaan vienti. Suomesta mallasohraa viedään pääosin Eurooppaan. (VYR, 2012)

Mallasohran viljely on tilastojen mukaan kannattavaa verrattuna muihin kevätviljoihin, kuten kauraan ja kevätvehnään. Kasvattamiseen tuo haastetta mallastamoiden ja olutpanimoiden laatuvaatimukset, mutta sadon onnistuessa mallasohrasta saatu tuotto on hyvä. Mallasohran saanto rehuohraan verrattuna on ollut viimevuosina noin 500 kg hehtaarilta parempi ja hehtaarilta saatu tuotto on ollut noin 130 euroa suurempi. (VYR, 2017)

6.1 Laatuvaatimukset

Maltaan laatuvaatimukset ovat tiukentuneet hyvin paljon, kun panimoteknologia on kehittynyt (Viking Malt Oy, n.d.). Laatuvaatimuksien kiristymiseen vaikuttaa myös lopputuotteelle, eli oluelle, asetettujen laatu- sekä turvallisuusvaatimusten tiukentuminen. Mikäli laatuvaatimuksista ei noudateta, poikkeamat saattavat aiheuttaa ongelmia, niin oluen panemisen prosessiin, suodattamiseen, oluen käymiseen, kuin saataviin määriin, eli saantoon ja sen lisäksi poikkeamat voivat vaikuttaa suoraan lopputuotteen laatuun ja turvallisuuteen. (Huttunen, 2018)

Laatuvaatimusten tarkoitus on mahdollistaa toivottu mallastus sekä mäskäysprosessi. Mallasohran tärkeimmät laatuvaatimukset ovat korkea itävyys, tasalaatuiset jyvät, iso jyväkoko, matala valkuaispitoisuus sekä hygieenisyys. Satokauden 2023–2024 laatuvaatimukset löytyvät liitteestä 1. Liitteessä esitettyjen laatuvaatimusten lisäksi mallasohrassa ei saa olla kasvinsuojeluainejäämiä, eikä toksiineja, jotka voivat muodostaa homeita. Luomumallasohrien laatuvaatimukset ovat samat kuin teollisesti tuotetuilla lannoitteilla kasvatetuilla mallasohrilla. (Viking Malt Oy, n.d.) Myös glyfosaatin (rikkakasvien torjunta-aine) käyttö ennen mallasohran puintia on kielletty. Kiellettyä on myös se, että ohrapelloilla lannoitteena käytettäisiin saman kasvukauden aikana yhdyskuntapuhdistamolietettä. (Huttunen, 2018)

Mallasohraa varastoitaessa ja kuljetettaessa pitää noudattaa Euroopan unionin elintarvikehygienia-asetuksen (Elintarvikehygienian asetus 382/2021) määräyksiä, jotta laatuvaatimukset täyttyvät. Kuljetukset pitää suorittaa autoilla, jotka täyttävät asetetut vaatimukset, kuljetuskaluston on oltava puhdas, umpinainen, kuiva ja hajuton. Vaatimuksena on, että tuotteen turvallisuus säilyy kuljetuksen aikana. (Huttunen, 2018)

6.2 Mallasohran lannoitus

Onnistuneen mallasohran lannoituksen perustana on hyväkuntoinen maaperä. Lannoituksen määrä ja laatu valikoituukin aina viljeltävän pellon maaperän ja sen sisältämien ravinteiden mukaan. Lannoitus suositellaan yleisesti tekemään kahdessa erässä. Mallasohran tarvitsemista pääravinteista typpi ja kalium vaikuttavat eniten kasvuun ja jyvän laatuun. Laatuvaatimuksien vuoksi suositellaan lisälannoitusta kasvukauden aikana, jottei valkuaispitoisuus jää liian alhaiseksi mallastusta ajatellen. Valkuaispitoisuus pitää olla yli 9,5 % ja alle 11,5 % (mallasohran laatuvaatimukset esitetty liitteessä 1). Tutkimusten mukaan osa typestä olisi hyvä kasvukauden alussa antaa teollisesti tuotetuilla lannoitteilla, koska orgaanisissa lannoitteissa typpi vapautuu kasvin hyödynnettäväksi hitaammin. Teollisesti tuotetuilla, niin kutsutuilla mineraali lannoitteilla, turvataan se, että mallasohran kasvu alkaa nopeasti heti kasvukauden alussa. (VYR, 2017)

Uusien ohralajikkeiden myötä lannoitusvaatimukset ovat muuttuneet. Suositeltava kylvölannoitus on yleisesti 100 kg liukoista typpeä hehtaarille. Mikäli maaperän kunto on hyvä, maa on multavaa ja eloperäistä, tarvittavan typen määrä voi olla alhaisempi, koska maasta pääsee vapautumaan typpeä. Orgaanisia lannoitteita käytettäessä on kuitenkin otettava huomioon, että typpi vapautuu kasvin käyttöön teollisesti tuotettuja lannoitteita myöhemmin. Jos tätä ei huomioida voi valkuaispitoisuus nousta liian korkeaksi. (VYR, 2017)

Typen saanti maaperästä on yksi tärkeimmistä ohran kasvuun vaikuttavista tekijöistä. Ohra saa käyttöönsä typen, ammonium- (NH_4+) tai nitraattitypen (NO_3-N) muodossa. Liian suuri typpilannoitus nostaa mallasohran proteiinipitoisuutta, joten typpilannoituksen määrä on laskettava peltokohtaisesti ja siihen on kiinnitettävä tarkasti huomiota. (Jurkola, 2019, s. 5)

Kalium puolestaan parantaa mallasohran viljelyssä hiilen yhteyttämistä, korren- ja taudinkestävyyttä. Kalium parantaa myös mallasohran kykyä pitää yllä nestetasapainoa kuivempina aikoina ja auttaa tuottamaan paremman sadon. Mallasohran juuret ovat pienemmät kuin muiden viljojen, joten fosforin, kuten muidenkin lannoitteiden, saantia tulee tehostaa. Fosfori kasvattaa mallasohran jyväkokoa, nopeuttaa kasvun alussa kehitystä ja parantaa satoa. Hyvällä fosforilannoituksella voidaan myös alentaa ohran kuivaamiseen

kuluvia kustannuksia, koska oikean lannoituksen saanut kasvusto tuleentuu tasaisesti ja nopeasti. Hyvällä fosforilannoituksella saadaan kokonaisuudessaan laadukkaampi mallasohrasato. (VYR, 2017)

7 Orgaaniset lannoitteet

Orgaaniset lannoitteet ovat lannoitteita, jotka sisältävät orgaanista ainesta ja orgaanista hiiltä, jopa yli 50 % lannoitteen sisältämästä kuiva-aineesta. Orgaanisten lannoitteiden raaka-aineet ovat peräisin ainoastaan massoista, jotka ovat biologista alkuperää. Näitä massoja kutsutaan biomassoiksi. Biomassoja on eläin-, kasvi- tai mikrobiperäiset massat. Yleisimmin käytössä olevat orgaaniset lannoitteet ovat olleet karjan lantaa tai lietelantaa, mutta nykyisin myös biomassoista prosessoituja tuotteita, kuten biokaasulaitosten mädätysjäännöstä. Tutkimusten mukaan lisäämällä orgaanista ainesta pelloille maaperän rakenne ja vedenpidätyskyky paranee. Näiden ominaisuuksien lisäksi orgaanisesta aineksesta on hyötyä maaperän pieneliöille. Orgaanisilla lannoitteilla katsotaankin olevan aina maanparannusvaikutus teollisesti tuotettuihin, eli epäorgaanisiin lannoitteisiin verrattuna. (Tampio, 2018, ss. 9, 33)

7.1 Laatuvaatimukset

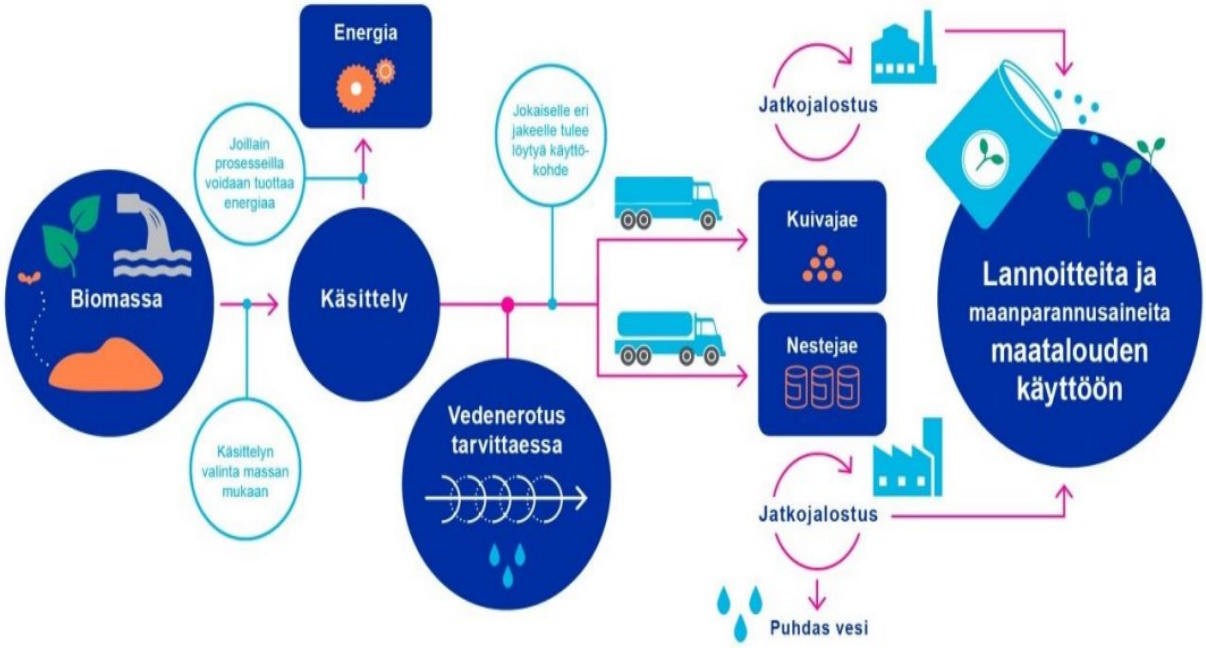
Kaikkien kasvien kasvattamiseen tarkoitettujen lannoitteiden on aina täytettävä niille asetetut laatu- ja turvallisuusvaatimukset (Lannoitelaki 711/2022). Orgaanisten lannoitteiden vaatimukset koskevat esimerkiksi haitallisten aineiden määriä ja hygieenisyyttä, jolla estetään muun muassa kasvitautien leviäminen. Lisäksi on huomioitava ihmisten, ympäristön, kasvien ja eläinten turvallisuus. Orgaaniset lannoitteet eivät saa sisältää yhdyskuntien tai teollisuuden jätevesilietteitä. (Ruokavirasto, 2023a)

Mädätysjäännöksen lannoitekäyttöä arvioitaessa on aina otettava huomioon käyttöön liittyvät hyödyt ja haitat. Orgaaniseksi lannoitteeksi mädätysjäännös soveltuu, mikäli ravinnepitoisuus on riittävän korkea ja ravinteet ovat kasveille sellaisessa muodossa, että kasvit pystyvät ne hyödyntämään, mädätysjäännös on hygieenistä eikä sen sisältämät haitalliset aineet ylitä sallittuja määriä. Liitteessä 2 on esitetty lannoitteiden sisältämien

haitallisten aineiden ja taudinaiheuttajien enimmäismäärät. Lisäksi on huomioitava tuotteen tasalaatuisuus ja oletettava kasvien kasvuolosuhteiden parantuminen. (Ruokavirasto, 2023b) Taudinaiheuttajien ja haitallisten aineiden lisäksi (Liite 2) on huomioitava, ettei lannoite saa sisältää myöskään kasvintuhoojia. Kasvintuhoojilla tarkoitetaan haitallisia eliöitä, kuten sieniä, bakteereja ja viruksia. Kasvintuhoojat aiheuttavat haittaa viljelykasvien lisäksi myös luonnonvaraisille kasveille. (Ruokavirasto, 2023e)

Jätteistä ja teollisuuden sivuvirroista osa kelpaa sellaisenaan lannoitekäyttöön, mutta on muistettava, että osa syötteistä on käsiteltävä ennen lannoitekäyttöä, jotta laatuvaatimukset täyttyvät. Erilaisia käsittelytapoja on esimerkiksi tuotteen hygienisointi, seulonta tai stabilointi. (Ruokavirasto, 2023b) Valittu käsittelyprosessi riippuu materiaalista, sen ominaisuuksista ja siitä, minkälaisia tavoitteita käsittelyllä toivotaan saavutettavan. Käsittelyprosessit voidaan jaotella kolmeen osaan, jotka ovat esikäsittely, varsinaiseen prosessointi ja jatkojalostus. Lannoitevaatimusten lisäksi käsittelyn tavoitteena on saavuttaa jätteelle sellainen olomuoto, joka edesauttaa ravinteiden kuljetettavuutta ja käytettävyyttä. Kuvassa 7 on ”Opas kierrätyslannoitevalmisteiden tuottajille” – raportin kuva siitä, kuinka prosessointi edistää ravinteiden käytettävyyttä. Käsittelyllä voidaan samalla tähdätä esimerkiksi energiantuotantoon, josta biokaasulaitokset ja niiden mädätysjäännöksen hyötykäyttö on hyvä esimerkki tällaisesta kokonaisuudesta. (Tampio, 2018, s. 15)

Kuva 7. Prosessoinnin vaikutus orgaanisten jätteiden ravinteidenkierrätykseen (Tampio, 2018)



7.2 Lainsäädäntö

Lannoitelainsäädännön (Lannoitelaki 711/2022) mukaan kaikki epäorgaaniset ja orgaaniset lannoitteet, maanparannusaineet, erilaiset kasvualustat, kalkitusaineet, mikrobivalmisteet ja lannoitevalmisteena sellaisenaan käytettävät sivutuotteet ovat lannoitevalmisteita. Tämän lain määritelmän mukaisesti kierrätyslannoitteet, eli orgaaniset lannoitteet, kuuluvat osaksi kierrätyslannoitevalmisteita. Lannoitelain tarkoituksena on varmistua kierrätyslannoitteiden turvallisuudesta, laadusta ja lainmukaisuudesta. Orgaaniset lannoitteet jaotellaan maanparannusaineiksi tai lannoitteiksi. Kierrätyslannoite on lannoitetta silloin kun kaikkien pääravinteiden osuus kuiva-aineesta on yli 1 %. Jaottelun erona on ravinnepitoisuuksien lisäksi käyttötarkoitus. Erona lain määritelmän mukaan on se, että maanparannusaineet parantavat maaperän fysikaalisia ja biologisia olosuhteita, kun lannoitteet puolestaan edistävät kasvien kasvua ja parantavat sadon laatua. (Ruokavirasto, 2023a)

Orgaanisia lannoitteita koskeva lannoitelaki uudistui 16.7.2022. Lannoitelain muutoksessa poistui orgaanisten lannoitevalmisteiden laitoshyväksyntävelvoite, mikä tarkoittaa, ettei biokaasulaitokselle tarvita erillistä laitoshyväksyntää mädätysjäännöksen hyödyntämiseksi

lannoitteena. (Lannoitelaki 711/2022) Lakiuudistuksen myötä vastuu tuotannosta ja tuotteesta siirtyi lannoitealan toimijoille, eli opinnäytetyön tarkastelukohteessa se tarkoittaa biokaasulaitoksen tuotannosta vastaavaa yritystä. Orgaanisia lannoitteita valmistavalla on vastuu myös siitä, että toiminta on laadukasta ja täyttää asetetut vaatimukset, koska viranomainen ei enää ennakkoon hyväksy laitoksen toimintaa. Biokaasulaitoksella on vastuu mädätysjäännöksen kelpoisuudesta lannoitekäyttöön. Mädätysjäännöksen sisältämät ravinnepitoisuudet ja tuotantoon käytetyt raaka-aineet on oltava biokaasulaitoksen toiminnasta vastaavalla aina tiedossa. (Ruokavirasto, 2023c)

> Lannoitelailla säädetään lannoitevalmisteiden ja niiden ainesosien valmistuksesta, markkinoille saattamisesta, käytöstä, varastoinnista, kuljetuksesta, tuonnista ja viennistä. Lannoitelain uudistuksella on yhdenmukaistettu EU-asetuksen ja kansallisen lainsäädännön toimintatavat sekä luotu entistä joustavampi toimintamalli, joka edistää uusien kestävästi valmistettujen tuotteiden markkinoita varmistaen samalla niiden turvallisuuden. (Ruokavirasto, 2023d)

Uuteen lannoitelakiin liittyvät, yksityiskohtaista toimintaa koskevat, asetukset ovat vielä valmistelussa opinnäytetyötä tehdessä. Maa- ja metsätalousministeriön tavoitteena on saada asetukset valmiiksi kevään 2023 aikana. Tämän takia lainsäädännön voimaantuloon liittyy siirtymäaikoja. Siirtymäaikaan keskeisesti liittyy se, että vanhan lainsäädännön mukaisia lannoitteita saa valmistaa 31.12.2023 saakka ja niitä saa viedä markkinoille 31.12.2024 saakka. (Ruokavirasto, 2023c)

8 Ravinteiden kierrätys

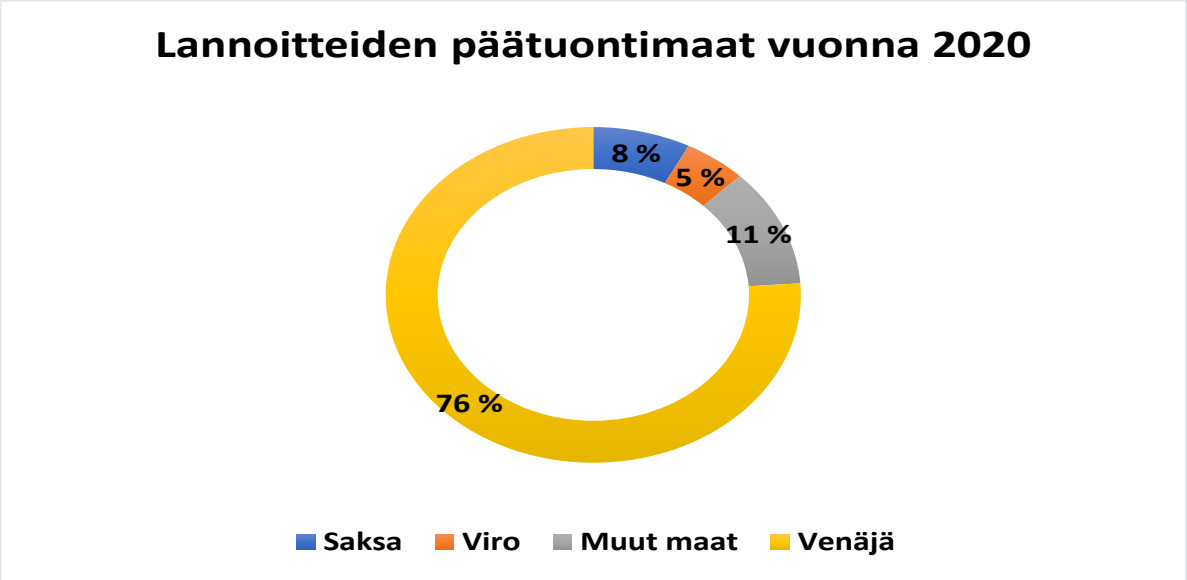
Ravinteiden kierrätyksellä tarkoitetaan esimerkiksi elintarviketeollisuudessa muodostuvien sivuvirtojen sisältämien ravinteiden hyötykäyttöä kierrätysravinteina. Ravinteiden kierrätyksellä pystytään pienentämään ravinnepäästöjä, vähentämään teollisesti tuotettujen lannoitteiden ja uusiutumattomien luonnonvarojen, kuten fosforin, käyttöä. Biokaasuprosessisi on hyvä esimerkki ravinteiden kierrätyksestä, sillä prosessista saadaan uusiutuvan energian lisäksi ravinnepitoista mädätysjäännöstä hyödynnettäväksi. (Suomen Biokierto & Biokaasu ry, n.d.) Mädätysprosessin aikana kaikki orgaaninen aines ei muutu

biokaasuksi vaan mädätysjäännökseen jää orgaanista hiiltä mikä edesauttaa ravinteiden vapautumista maaperästä. Orgaaninen aines parantaa viljeltävän pellon ominaisuuksia ja lisää maaperän humuspitoisuutta. (Tampio, 2018, s. 34)

Typpi on yksi tarkeimmistä kasviravinteista. Ravinteiden kierrätyksen merkitystä korostaa se, että lannoitteena käytettävistä teollisista ravinteista typpi tuotetaan paljon energiaa ja fossiilisia polttoaneita kuluttavalla Haber-Bosch-prosessilla. Haber-Bosch-prosessi tarkoittaa prosessia, jossa typpikaasu talteen otetaan ilmakehästä ja se sidotaan ammoniakiksi maakaasusta saatavaa vetyä hyödyntäen. Tuotantoprosessista aiheutuu hyvin paljon kasvihuonekaasupäästöjä. (Vainio, 2022, s. 3; Paloniitty, 2020, s. 11) Hiilidioksidipäästökerroin on noin 3,6 $CO_{2\text{-ekv}}$ kilogrammaa teollisesti valmistettua lannoitekiloa kohden. $CO_{2\text{-ekv}}$ eli hiilidioksidiekvivalentti kuvaa tuotteen elinkaaren aikaisten kasvihuonekaasupäästöjen määrää. (Rasi, 2019, s. 9) Lannoitteena käytettävä fosfori saadaan tuotettua maaperästä louhitusta fosfaattikivestä. Maapallon fosforivarannot ovat kuitenkin selkeästi vähentymässä, joten tehokkaalle fosforin talteenotolle ja ravinteiden kierrätykselle on jo tällä hetkellä suuri tarve. (Paloniitty, 2020, s. 11)

Biokaasulaitosten mädätysjäännösten ja muiden orgaanisten sivuvirtojen hyödyntäminen kierrätyslannoitteena voisi nostaa Suomessa maatalouden omavaraisuusastetta. Vuonna 2020 peräti noin kolme neljäsosaa Suomeen tuoduista lannoitteista tuli Venäjältä (kuva 8). Ravinteiden kierrätyksellä voidaan turvata maanviljelyn lisäksi peltojen hyvä kunto ja ekologinen tasapaino. Suomen fosforitarve voitaisiin käytännössä kokonaan kattaa biomassojen sisältämällä fosforilla. (Gareis, 2022, ss. 24–25) Fosforin kierrätyksen merkitys ja mahdollisuudet Suomessa käydään vielä tarkemmin läpi luvussa 9.

Kuva 8. Suomeen tuotujen lannoitteiden päätuontimaat (muokattu lähteestä Gareis, 2022, ss. 24–25)



8.1 Mädätysjäännöksen hyödyntäminen lannoitteena

Mädätysjäännöstä voidaan käyttää viljelyssä kasvien ravinteiden pääasiallisena lähteenä. Mädätysjäännös sisältää kaikki pää- ja hivenravinteet mitä kasvit tarvitsevat. Näistä tärkeimmät on typpi, fosfori ja kalium. (Paavola, 2015, s. 95) Lannoitteiden käyttöä säätelee lannoitelaki (Ruokavirasto, 2023c). Orgaanisia lannoitteita koskevan lannoitelain pääkohdat on käyty läpi luvussa 6.2.

Mädätysjäännöksen lannoitekäyttöä rajoittaa kustannukset, jotka koostuvat suurimmalta osalta siitä, että mädätysjäännös sisältää paljon vettä, eikä kuljettaminen pitkän matkan päähän ole kustannustehokkuuden kannalta järkevää. Tarkastelukohteen mädätysjäännös on tarkoituksena hyödyntää lähialueilla, jolloin kuljetusmatkat jäävät suhteellisen lyhyiksi. Kuljetuskustannusten vähentämiseksi mädätysjäännöstä olisi mahdollista jatkojalostaa. Suomessa mädätysjäännös jalostetaan usein kahdeksi eri jakeeksi, eli separoidaan. Nestejae sisältää paljon typpeä ja kuivajae sisältää puolestaan fosforia. (Paavola, 2015, ss. 96–111) Tarkastelukohteessa separointia ei ole tarvetta käyttää, koska kaikki mädätysjäännöksen ravinteet on tarkoitus hyödyntää peltoviljelyssä. Separointimenetelmät lisäävät myös biokaasulaitoksen ja mädätysjäännöksen kustannuksia.

8.1.1 Mädätysjäännöksen käyttö ohran viljelyssä

Erilaisten biokaasuprosessien mädätysjäännösten käytettävyyttä peltoviljelyssä on tutkittu pelkästään Suomessa useimpien vuosien ajan erittäin paljon. Tutkimuksissa mädätysjäännöksen käyttöä on verrattu usein teollisesti tuotettuihin lannoitteisiin. Esimerkiksi Iivonen ym. (2013) testasivat mädätysjäännöksien hyödyntämistä kevätvehnän viljelyssä. Huttunen ym. (2020) testasivat karjan lietelannan ja biokaasulaitoksen mädätysjäännöksen eroja nurmen ja vehnän viljelyssä. Kangas (2020) tutki kauran viljelyssä lannoitteena käytetyn ammoniumsulfaatin, lihaluujauhon ja mädätysjäännöksen vaikutuksia. Tehdyissä tutkimuksissa yleisesti ottaen selvisi, että biokaasulaitosten mädätysjäännöksen lannoitekäytöllä saatiin samankokoinen sato kuin teollisesti tuotetuilla lannoitteilla, silloin kun liukoisen typen määrä lannoitekäytössä pidettiin samana.

Olutmäskiä ei ole Suomessa yksistään käytetty biokaasulaitosten syötteenä, joten tutkimuksia ei ole tehty siitä, miten juuri olutmäskin mädättämisessä syntyvä mädätysjäännös sopii ohran tai muiden viljojen viljelyyn. Biokaasulaitoksen mädätysjäännöksen käytöstä ohran lannoitteena on kuitenkin Suomessa tehty jonkin verran tutkimuksia. Hyrkäs ym. (2014) tutki kolme vuotta kestäneessä kokeessa mädätysjäännöksen ja lannan vaikutuksia ohran ja nurmen viljelyssä. Tuloksista kävi ilmi, että käytetyn mädätysjäännöksen sisältämän liukoisen typen vaikutus ohran satoon oli keskimäärin parempi raakalantaan verrattaessa.

Partasen (2012) tekemän ”Biokaasulaitoksen mädätysjäännöksen käyttö ohran lannoitteena” - opinnäytetyön mukaan mädätysjäännös soveltuu hyvin ohran viljelyyn. Opinnäytetyössä tutkittiin mädätysjäännöksen lannoitevaikutuksia Hyrkäksen ym. (2014) tapaan kolme vuotta kestäneessä lannoituskokeessa. Tulosten perusteella viljeltävän ohran jyvien sisältämät ravinnemäärät olivat suurempia mädätysjäännöksellä lannoitetuilla kuin karjan raakalannalla lannoitetuilla alueilla. Tuloksista voi vetää johtopäätöksen, että mädätysjäännöksen ravinteet ovat kasveille paremmin hyödynnettävissä olevassa muodossa. Tutkimuksissa selvisi myös, että mädätysjäännös on koostumukseltaan tasaisempaa ja juoksevampaa, eikä aiheuta niin paljon hajuhaittoja. Mädätettyä lantaa käytettäessä levitys pelloille helpottuu ja

pystytään käyttämään maatiloilla jo olemassa olevaa kalustoa, verrattuna karjan raakalannan käyttöön, joka ei ole niin tasalaatuista ja juoksevaa.

Sganzerlan ym. (2021b) laboratorio-olosuhteissa tekemän koemädätyksen mukaan olutmäskin mädätysjäännös sopii korvaamaan teollisesti tuotettuja, niin sanottuja, seoslannoitteita. Tutkimuksessa ei arvioitu mädätysjäännöksen sopivuutta nimenomaan ohran viljelyyn, mutta ravinnearvojen mukaan orgaaninen lannoite sopisi hyvin korvaamaan, ainakin osittain, teollisesti tuotetut lannoitteet. Elintarviketeollisuuden sivuvirtana olutmäski ei sisällä patogeenejä (Sganzerla, 2021b, s. 5) joten senkin puolesta mädätysjäännös sopii levitettäväksi ohrapelloille.

8.1.2 Huomioitavat asiat mädätysjäännöksen varastoinnissa ja levityksessä

Mädätysjäännöksen varastointiin ja kuljetukseen liittyy lannoitevalmistelaissa määritettyjä velvoitteita. Velvoitteet esitetään maa- ja metsätalousministeriön asetuksessa 24/11. (Maa- ja metsätalousministeriön asetus lannoitevalmisteista 24/11) Lisäksi on huomioitava laitoskohtaiset ympäristölupavaatimukset ja nitraattiasetus (Nitraattiasetus 1250/2014) mikäli viljelijä on sitoutunut noudattamaan ympäristökorvausjärjestelmään (Valtioneuvoston asetus ympäristökorvauksesta 78/2023), on hänen noudatettava typen ja fosforin käyttöön liittyviä määräyksiä. Ympäristölupa määrittää kuinka suuri varastointikapasiteetti ja minkälaiset varastointiolosuhteet orgaanisille lannoitteille tarvitaan. Yleisesti ottaen varastointi täytyy järjestää mädätysjäännöksen käyttöön asti, eli biokaasulaitoksessa 6–12 kuukauden aikana syntyvälle mädätysjäännökselle. Mädätysjäännös on nestemäistä, ja sen vuoksi se pitää varastoida katetussa tilassa, jottei ammoniakki pääse haihtumaan eikä varastoinnista aiheudu hajuhaittoja. (Tampio, 2018, s. 61)

Mädätysjäännös on nestemäistä, joten sen varastointiin liittyy samat säädökset kuin pakkaamattomien orgaanisten lannoitteiden varastointiin. Varaston pitää olla sellainen, ettei missään työvaiheessa tai mädätysjäännöksen siirron yhteydessä, aineita pääse valumaan ympäristöön. Mädätysjäännös pitää pystyä siirtämään kuljetusautoon sellaisessa paikassa mikä kestää ajoneuvon painon ja mistä mahdollinen valunut mädätysjäännös voidaan poistaa. Mädätysjäännöksen varastointiallasta tai säiliötä ei saa lähtökohtaisesti sijoittaa

pohjavesialueelle. Mikäli varastointiallas sijoitetaan pohjavesialueelle, täytyy siitä olla todistus ja varmuus, ettei pohjavesien pilaantumiselle ole vaaraa. Varastointiallasta ei saa sijoittaa myöskään alle 50 metrin etäisyydelle talousvesikaivosta, vesistöstä tai lähteestä. (Tampio, 2018, s. 61)

Mädätysjäännöksen hyödyntämisen kannalta on otettava huomioon, että biokaasuprosessi nostaa mädätysjäännöksen pH:ta, Sganzerlan ym. (2021b) tekemässä koemädätyksessä mäskin pH nousi prosessin aikana 5,9:stä 7,5:een (taulukko 2, s. 14). pH:n nousu lisää typen haihtumisriskiä ammoniakiksi. Haihtumisriskin takia mädätysjäännöksen varastointiin ja sen levittämiseen onkin kiinnitettävä huomiota, jottei vääränlaisella varastoinnilla pilata biokaasuprosessissa saavutettuja hyötyjä. pH:n lisäksi lämpötilan vaikutus on keskeinen haihtumisriskiä nostava asia, mikä on varastoinnissa otettava erityisesti huomioon. (Paavola, 2015, s. 95)

Lietemäinen mädätysjäännös voidaan levittää samoilla välineillä kuin lietelanta tai jos kuiva-ainepitoisuus mädätysjäännöksessä on kovin alhainen (alle 5 %), levitettävä määrä on pieni (1m^3 ha^{-1}), eikä se sisällä kiintoaineita, onnistuu sen levittäminen myös olemassa olevalla kasvinsuojeluruiskulla (Kapuinen, 2015, s. 116; Tampio, 2018, s. 64). Mädätysjäännöksen levityksessä on otettava huomioon, ettei maa pääse liikaa tiivistymään, mikä hidastaisi kasvien kasvua ja lisäisi ravinteiden vesistöihin valumista. Lisäksi on vältettävä typen haihtumista ja pyrittävä mahdollisimman tasaiseen levitykseen. Yleisesti ottaen orgaanisen lannoitteen levittäminen pitää hoitaa niin, ettei siitä aiheudu vesistöjen pilaantumista. Säädöksissä (Valtioneuvoston asetus eräiden maa- ja puutarhataloudesta peräisin olevien päästöjen rajoittamisesta 1250/2014) vaaditaan, että orgaanisen lannoitteen levitys pitää tapahtua alueille, joista on matkaa yli 5 metriä vesistöihin, tämän lisäksi on huolehdittava, että vesikaivojen ja lähteiden väliin jää 30–100 metriä väliä. Sama säädös rajoittaa orgaanisten lannoitteiden levittämistä marraskuun alusta maaliskuun loppuun. (Tampio, 2018, s. 64)

Peltokohtaisiin levitysmääriin vaikuttaa orgaanisen lannoitteen / mädätysjäännöksen sisältämän liukoisen typen ja fosforin määrä (kg/m^3) sekä ympäristökorvausjärjestelmä, mikäli maatila sellaiseen kuuluu. Nitraattiasetuksessa annetaan kasvikohtaisesti

typpilannoituksen enimmäismäärä. Jos maatila kuuluu ympäristökorvausjärjestelmään, on typen ja fosforin käyttöä rajoitettu enemmän kuin mitä lainsäädäntö edellyttäisi. (Tampio, 2018, s. 66)

8.2 Kierrätysravinteiden hyödyt

Kierrätysravinteiden käytöllä peltoviljelyssä on tehtyjen tutkimusten mukaan paljon hyviä puolia teollisesti valmistettuihin lannoitteisiin verrattuna. Orgaanisia lannoitteita käyttämällä voidaan pellon ravinteiden lisäksi vaikuttaa maaperän ominaisuuksiin. (Horn, 2020, ss. 14–15) Kierrätyslannoitteiden käytöllä pelloille saadaan palautettua orgaanista ainesta, joka lisää maaperän pieneliöstöä. Orgaaniset lannoitteet parantavat viljojen satoa, veden pidätyskyky pelloilla paranee ja hiilen palautuminen maaperään hidastaa myös ilmastonmuutosta. Kierrätysravinteilla on vaikutusta maaperään aiheutuvien hyvien puolien lisäksi myös kestävän kehityksen kannalta. (Hongisto, 2022, ss. 16–17) Orgaanisilla lannoitteilla voidaan tutkimusten mukaan vaikuttaa myös siihen, että pelloilla kalkin käytön määrä vähenee. Edellä mainittujen ominaisuuksien lisäksi osa orgaanisista lannoitteista saattaa sisältää kasvunedistäjiä. Kierrätysravinteilla/ orgaanisilla lannoitteilla voidaan katsoa aina olevan kokonaisvaltaisesti hyvä vaikutus maaperän ominaisuuksille sekä mikrobitoiminnalle. (Horn, 2020, ss. 14–15)

Suomen Biokierto ja Biokaasu ry on kierrätysravinteet – sivustolla luetellut kierrätysravinteiden hyötyjä. Edellisessä kappaleessa mainittujen hyötyjen lisäksi kierrätysravinteilla on positiivinen vaikutus energian säästöön ja kasvihuonekaasupäästöjen vähenemiseen, koska kierrätyslannoitteiden hiilijalanjälki on teollisesti tuotettuja lannoitteita huomattavasti pienempi. Kierrätyslannoitteiden käytön hyviä puolia on myös se, ettei kierrätyslannoitteet ole riippuvaisia uusiutumattomista luonnonvaroista, kuten fosforista. Biomassojen prosessoinnilla kierrätyslannoitteiksi, esimerkiksi biokaasuprosessilla, voidaan edistää ravinteiden kuljetusta sinne missä niitä tarvitaan ja vastaavasti pois ravinneylijäämäisiltä alueilta. Kierrätysravinteet sisältävät usein pelkkien ravinteiden lisäksi myös orgaanista ainesta ja ovat näin myös maanparannusaineita. (Suomen Biokierto ja Biokaasu ry, n.d.)

8.3 Taloudellisuus

Mädätysjäännöksen hyödyntämiseen liittyy vahvasti taloudellinen puoli. Tällä hetkellä kiinnostus kierrätyslannoitteiden käytölle on lisännyt epäorgaanisten typpilannoitteiden todella jyrkkä hinnannousu. Energian hintojen vaihtelun vuoksi, teollisesti tuotettujen lannoitteiden hinnat ovat vaihdelleet todella paljon. Joulukuussa 2022 typpilannoitteiden hinnat olivat jopa yli 1000 €/tonni, kun ennen energiakriisiä samat lannoitteet maksoivat 230–400 €/tonni. Mallasohran lannoitteiden nykyhinnoista on käyty sähköpostitse keskustelua maanviljelijä Heikki Mäkelän kanssa (henkilökohtainen tiedoksianto, 24.1.2023) ja häneltä on saatu tietoon lannoitteiden reaaliaikaisia hintoja. (henkilökohtainen tiedoksianto) Taulukossa 3 on esitettynä tammikuun 2023 mallasohran lannoitteiden hinnat hehtaarilta.

Taulukko 3. Mallasohran teollisesti tuotettujen lannoitteiden hinnat alkuvuodesta 2023, laskettu typen tarpeen (100 kg /ha) mukaan (ei sisällä ALV, eikä rahtimaksua) (henkilökohtainen tiedoksianto, 2023)

Lannoite	hinta €/t	Hinnat ennen energiakriisiä €/t (v.2021)	Ravinteet/ 100kg lannoitetta	hinta €/ha kun typen tarve 100kg/ha
Yara Y 25	726	-	Typpi 25 kg, Fosfori 3 kg Kalium 6 kg	290
Yara Y 5	763	300 - 400	Typpi 20 kg, Fosfori 4.6 kg, Kalium 10 kg	382
Yara axan 27	604	230-300	Typpi 27 kg, kalium 1 kg, Rikki 4 kg (Täydennys lannoite)	242

Mädätysjäännöksen rahallista arvoa arvioitaessa tärkein kriteeri on mädätysjäännöksen sisältämät ravinnepitoisuudet ja nimenomaan mädätysjäännöksen liukoiset ravinteet. Käytäntönä on aikaisemmin ollut, että biokaasulaitos on saanut mädätysjäännöksestä tuloa jäännöksen sisältämien ravinteiden mukaan. Vuoden 2020 raportin mukaan mädätysjäännöksen arvo oli 1 €/kg liukoisia ravinteita kohden (typpi, fosfori ja kalium),

silloin kun, mädätysjäännöstä tuottava (biokaasu)laitos, järjestää itse mädätysjäännökselle kuljetuksen ja pellolle levityksen. (Horn, 2020, s. 34)

Lannoitteiden hintojen nousun lisäksi urakointihinnat ovat nousseet. Vuonna 2023 on ilmestymässä uusi työtehoseurannan raportti, mutta se ei ole vielä ollut käytettävissä opinnäytetyötä tehdessä. Urakoinnin nykyhinnoista käyty sähköpostitse keskustelua maanviljelijä Heikki Mäkelän kanssa (henkilökohtainen tiedoksianto, 13.3.2023). Heikki Mäkelän mukaan Palvan (2020) työtehoseurannan raportin mukaisiin hintoihin voi karkeasti laskea 15–30 % (keskiarvo 22,5 %) korkeammat hinnat mädätysjäännöksen levitykselle sekä kuljetukselle biokaasulaitokselta varastosäiliöön (henkilökohtainen tiedoksianto).

Opinnäytetyötä varten laskettiin biokaasulaskurilla vertailuarvoksi olutmäskin sisältämän typen liukoistumisesta saatava rahallinen hyöty. Laskuriin lähtöarvoiksi syötettiin olutmäskistä otettujen ravinneanalyysien arvot. Tulokset eivät ole suoraan verrannollisia mädätysjäännöksen rahalliseen arvoon, mutta antaa vertailukohtaisen arvion typen liukoistumisen määrästä. Biokaasulaskurin (Luke, n.d.) laskelmien mukaan liukoisen typen määrän lisääntyminen biokaasuprosessissa vastaisi rahallisesti noin 20 000 euroa / vuosi.

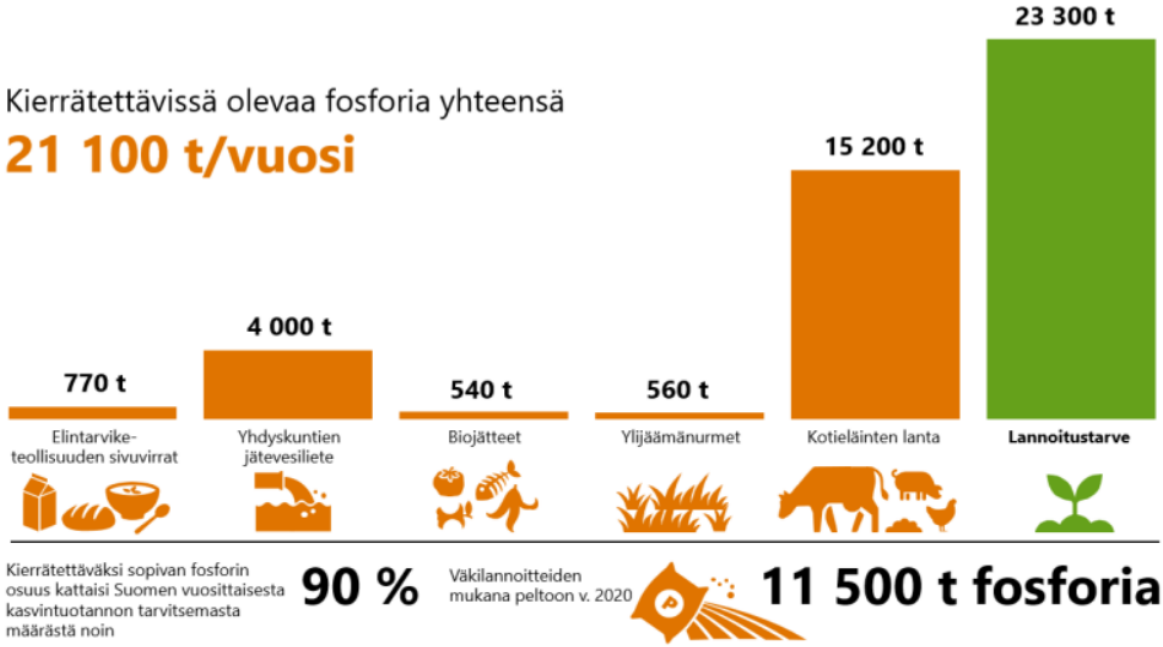
9 Fosforin kierrätys

Kriittisten aineiden luettelon mukaan Eurooppaan tuodaan yli 80 % kaikesta teolliseen lannoitetuotantoon käytettävästä fosfaattikivestä. Merkittäväksi Euroopan osalta asian tekee se, että Suomen fosfaattikivivarannot ovat Euroopan ainoat ja niiden osuus Euroopassa käytetystä fosforista on vain 16 %. Venäjältä tuodun fosfaattikiven osuus on kattanut ennen noin 20 %. (Euroopan Komissio, 2020) Sen lisäksi, että fosforivarannot Suomessa ja sen myötä koko Euroopassa ovat hyvin rajalliset, on huomioitava, että ravinteiden kierrätyksellä voidaan pienentää kasvihuonekaasupäästöjä, jotka syntyvät lannoitteiden valmistamisesta. Ravinteiden kierrätyksellä pystytään myös turvaamaan ruoantuotannon lannoitetarpeet ja nostamaan Suomessa lannoiteomavaraisuusastetta. (Luostarinen, 2019, s. 9)

Lemolan ym. (2023) tekemässä tuoreessa tutkimuksessa selvisi, että lähes kaikki Suomessa käytetty mineraalifosforilannoitus voitaisiin korvata kierrätetyllä fosforilla. Kuvassa 9 on esitettynä tutkimuksessa selvinneen fosforinkierron mahdollisuudet, joilla voitaisiin korvata jopa 90 % lannoitteena käytetystä fosforista. Elintarviketeollisuuden sivuvirtojen, kuten olutmäskin, sisältämän fosforin osuutta voitaisiin tehtyjen laskelmien mukaan nostaa Suomessa 770 tonnia. Elintarviketeollisuuden jakeiden/ sivuvirtojen sisältämä fosfori on kasveille käyttökelpoista sellaisenaan. Laskelmissa huomioitu tämänhetkinen hyödyntämätön fosfori koostuu jakeista, jotka hyödynnetään tällä hetkellä jotenkin muuten, esimerkiksi rehuna, tai jakeista, jotka palautuvat jätevedenpuhdistamoille. (Lemola, 2023, ss. 4, 43, 48)

Tehokas prosessointi ja hyvä yhteistyö fosforin yli- että alijäämäalueilla, parantaa kierrätysfosforin käytön mahdollisuuksia. Prosessoinnilla voidaan erottaa typpi ja fosfori toisistaan ja esimerkiksi väkevöidä nestemäinen jae edullisemmin kuljetettavaan muotoon. Yksi keino lisätä prosessoinnin kannattavuutta on biomassojen energiantuotanto biokaasuksi. Biokaasuprosessilla voidaan myös turvata ravinteidenkierrätyksen turvallisuus ja fosforin käyttökelpoisuus. (Lemola, 2023, s. 47) Jotta ravinteidenkierrätys lisääntyisi, tarvitaan siihen tukia ja kannustusta. Lemolan ym. (2023) raportissa ravinteiden kierrätysasteen nostamisen keinoiksi on mainittu esimerkiksi ravinnekiertotuki, fosforiasetuksen (Valtioneuvoston asetus fosforia sisältävien lannoitevalmisteiden ja lannan käytöstä 64/2023) sallima vähäinen fosforilisäys sekä tuki konsentroiduille lannoitevalmisteille.

Kuva 9. Fosforin kierrätyksen mahdollisuudet (Lemola, 2023, s. 48)



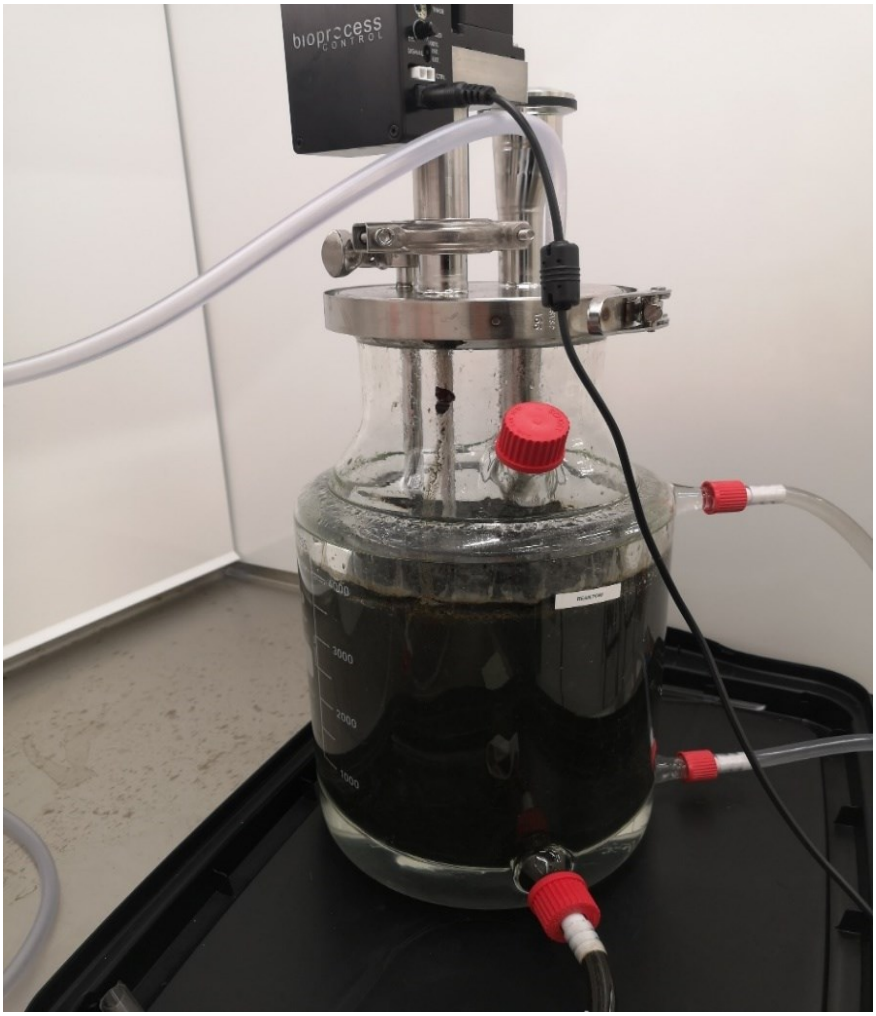
Uusi fosforiasetus (Valtioneuvoston asetus fosforia sisältävien lannoitevalmisteiden ja lannan käytöstä 64/2023) astui voimaan vuoden alussa. Asetus koskee fosforia sisältävien lannoitteiden ja lannan käyttöä. Asetuksessa fosforin käyttöä rajoitetaan laajemmin. Ennen fosforin käytölle rajoituksia asettivat ympäristökorvausten ehdot, mutta uudistetun asetuksen myötä fosforin käyttöön liittyvät rajoitukset laajentuivat koskemaan kaikkia viljelijöitä. Muutos koskee siis myös viher- ja ympäristörakentamista, joita fosforin käytön lainsäädäntö ei ole aikaisemmin koskenut. (Maa- ja metsätalousministeriö, 12.1.2023)

Uudistuksen tavoitteena on estää fosforin vesistökuormitusta ja tasata peltojen fosforipitoisuuksia niin, että pystytään kuitenkin turvaamaan kasvien fosforintarve. Ravinteiden kierrätyksen edistämiseksi karjanlantapoikkeuksesta luovutaan. (Valtioneuvoston asetus fosforia sisältävien lannoitevalmisteiden ja lannan käytöstä 64/2023 § 5) Tarkoituksena on, yhdessä lannan ja biokaasulaitosten mädätteiden fosforinerotuksen edistämisen kanssa, vähentää teollisesti tuotettujen lannoitteiden käytön tarvetta. Kuten lannoitelain uudistuksessa, myös fosforiasetuksessa on siirtymäaika, lantapoikkeuksesta luovutaan kahden vuoden jälkeen, tammikuussa 2025. (Maa- ja metsätalousministeriö, 12.1.2023)

10 Olutmäskin koemädätys

Koemädätys suoritettiin Lahden ammattikorkeakoulun kiertotalouslaboratoriossa. Koemädätys aloitettiin 1.2.2023, jolloin reaktoriin laitettiin mikrobiymppi, eli massa, joka sisältää biokaasua muodostavia mikrobeja, jolla biokaasuntuotanto käynnistetään. Seuraavana päivänä bioreaktoriin alettiin lisäämään olutmäskiä. Mädätys toteutettiin jatkuvatoimisella, tilavuudeltaan 4 litran (4 dm^3), lasisella bioreaktorilla. Koemädätykseen käytetty bioreaktori on esitettynä kuvassa 10. Biokaasureaktori käynnistettiin toiminnassa olevan biokaasulaitoksen reaktorin syötteellä ja Hartwallin panimon tuotannosta saatua olutmäskiä käytettiin reaktorin syötteenä. Koemädätys suoritettiin 2.2.2023-17.3.2023, mädätyksen kokonaisaika oli kuusi viikkoa. Koemädätys suoritettiin mesofiilisena, 38 °C asteen lämpötilassa.

Kuva 10. Bioreaktori (kuva otettu ja lupa käyttöön kysytty kehitysinsinööri Raisa Pajariselta)



10.1 Koemädätyksen toteutus

Koemädätys toteutettiin laboratorio-olosuhteissa jatkuvatoimisessa bioreaktorissa. Koemädätykseen käytettiin niitä syötteitä millä tarkastelukohteena olevan biokaasulaitoksen anaerobinen mädätysprosessi on tarkoituksena käynnistää. Olutmäskistä tutkittiin ennen kokeen aloitusta ravinnepitoisuudet, kalorimetriset lämpöarvot, kuiva-aine pitoisuus ja tiheys. Olutmäskin kuiva-ainepitoisuus oli 20,24 % ja sitä laimennettiin vedellä niin, että kuiva-ainepitoisuudeksi saatiin 10 %. Mikrobiymppiä ei laimennettu ennen mädätystä ja sen kuiva-ainepitoisuus oli 5 %. Mikrobiympistä ei tutkittu ravinnepitoisuuksia.

Koemädätyksen alussa bioreaktoriin laitettiin neljä litraa (4 dm^3) mikrobiymppiä. Olutmäskiä lisättiin bioreaktoriin kolme kertaa viikossa, maanantaisin, keskiviikkoisin ja perjantaisin. Lisätyn olutmäskin määrää nostettiin pikkuhiljaa orgaanisen kuormituksen (OLR) mukaan 0,5:stä 1,5:een (gVS/l/ vrk). Syöttömäärät olivat ensimmäiset neljä syöttökertaa 41,7 g olutmäskiä, seuraavat kolme syöttökertaa 83,4 g olutmäskiä ja loput 11 syöttökertaa reaktoriin laitettiin 125,2 g olutmäskiä. Syötteet laimennettiin 10 % kuiva-ainepitoisuuteen. Viipymäaika, eli laskennallinen aika, jolla korvataan koko reaktorin tilavuus, laskettiin kaavalla 1. Viipymäajaksi saatiin, orgaanisen kuormituksen ollessa 1,5 (gVS/l/ vrk), 22 vuorokautta.

Kaava 1. Viipymäaika, HRT

$$HRT = \frac{Reaktorin\ tilavuus\ (dm^3)}{syöttötilavuus\ (dm^3 vrk^{-1})}$$

Olutmäski säilytettiin koemädätyksen aikana laboratorion pakastimessa, josta tarvittava määrä kullekin syöttökerralle sulatettiin. Syöttökertojen yhteydessä reaktorista poistettiin tilavuudeltaan sama määrä mitä sinne syötettiin. Tilavuuksien perusteella saatiin laskettua mikrobiympin pitoisuus reaktorissa koemädätyksen lopussa. Mikrobiympin pitoisuus reaktorin tilavuudesta on esitetty tulososiossa, kuvissa 13 ja 14 (sivuilla 45 ja 46).

Koemädätyksen perusteella saatiin selville näytteen sisältämän kuiva-aineen ja orgaanisen aineen määrä, syntyvän biokaasun metaani- ja hiilidioksidipitoisuudet,

metaanintuottopotentiaali orgaanisen aineen painoa, kuiva-ainetta ja tuorepainoa kohden sekä orgaanisen aineen vähenemä. Tulososiossa käsitellään koemädätyksen keskeiset tulokset. Pääpaino on ravinteiden kierrätyksen ja mädätysjäännöksen lannoitekäytön kannalta tärkeissä tuloksissa, eli ravinneanalyyseissä.

10.2 Ravinnemääritykset

Koemädätyksessä syntyneestä mädätysjäännöksestä tehtiin ravinnemääritykset Eurofins Viljavuuspalvelu Oy:n laboratoriossa Mikkelissä ja mikrobiologinen analyysi tehtiin Eurofins Oy:n Lahden laboratoriossa. Ravinnemäärityksiä varten lähetettiin yksi litra (1 dm^3) bioreaktorista kokeen päätyttyä kerättyä näytettä. Analyysimenetelmistä käyty keskustelua sähköpostitse Kemisti/ Analyysipalvelupäällikkö Meeri Rantasen kanssa (henkilökohtainen tiedoksianto, 30.3.2023) ja häneltä saatu tietoon käytetyt menetelmät ja standardit. Analyyseihin käytetyt menetelmät ja standardit on esitetty taulukossa 4. Ravinnepitoisuuksien lisäksi määritettiin raskasmetallit ja mikrobiologinen laatu (*Salmonella* ja *Escherichia coli*) lannoitekelpoisuuden selvittämiseksi.

Taulukko 4. Analyyseihin käytetyt menetelmät (henkilökohtainen tiedoksianto, 2023)

Analyysi	Menetelmä
Kokonaistyppi	SFS-EN 13342:2000, SFS-EN 13654-1:2002
Liukonen typpi	SFS-EN 13342:2000, SFS-EN 13654-1:2002
Hehkutushäviö	SFS-EN 13039:2000
Kuiva-aine ja kosteus	SFS-EN 13040: 2008
Tilavuuspaino	Sisäinen menetelmä
pH	SFS-EN 13037:2011
Johtokyky	SFS-EN 13038: 2011
Vesiliukoinen typpi	SFS-EN 13652:2002
Vesiliukoinen fosfori	SFS-EN 13652:2002
Kokonaiskalium	SFS-EN 13652:2002
Kokonaisfosfori	SFS-EN 13652:2002
Raskasmetallit	SFS-EN 13650:2002
Escherichia coli*	Sisäinen menetelmä, perustuu ISO 9308-2:2014
Salmonella*	NMKL 71

*Eurofins Lahden yksikkö

11 Tulokset

Tässä osiossa käydään läpi opinnäytetyön aikana tehdyn olutmäskin koemädätyksen tulokset. Tuloksissa käsitellään kaikkia koemädätyksen tuloksia, mutta pääpaino on ravinneanalyyseissä ja mädätysjäännöksen lannoitekelpoisuudessa.

11.1 Olutmäskin ominaisuudet biokaasun tuotossa

Ennen mädätystä olutmäskistä analysoitiin kuiva-aineen ja orgaanisen aineen pitoisuudet. Mäskin kuiva-aineen pitoisuus oli 20,24 % ja orgaanisen aineen (VS) osuus 19,41 %. VS/TS-suhde oli 95,8 %. Pommikalorimetrillä kalorimetriseksi lämpöarvoksi tuorepainoa kohden saatiin 1,38 kWh/kg ja kuiva-ainetta kohden 6,38 kWh/kg. Olutmäskin tilavuuspaino ennen mädätystä oli 700 kg/m^3. Olutmäskin ominaisuudet vastasivat aikaisempien tutkimusten tuloksia ja VS/TS-suhde osoittaa tehdyn koemädätyksen perusteella, että kyseessä on hyvä raaka-aine biokaasuprosessiin. Taulukossa 5 on mäskin ominaisuudet mädätyksen jälkeen.

Taulukko 5. Mädätysjäännöksen ominaisuudet

Kosteus: 95.5 %	Tilavuuspaino: 1100 kg/m^3
Kuiva-aine: 4.5 %	pH: 8.1
Orgaaninen aines: 3.2 %	Johtokyky: 558 mS/m
Tuhka: 1.3 %	

Biokaasua muodostuu, kun olutmäskin sisältämän kuiva-aineen sisältämä orgaaninen aines hajoaa. Taulukossa 6 on koemädätyksen tuloksena saadut kuiva-aineen ja orgaanisen aineen vähenemät, sekä kosteuspitoisuuden ja tiheyden muutokset. Kuiva-aineen vähenemä eli TS-reduktio oli hieman alle 78 % ja orgaanisen aineksen vähenemä eli VS-reduktio mädätyksen aikana oli noin 84 %. Reduktio laskettiin kaavalla 2. Tulokset osoittavat prosessin olosuhteiden olleen hyvät olutmäskin hajoamiselle. Viipymäajan ollessa sopivan pitkä orgaanisen aineen reduktio kasvaa ja biokaasun tuotanto tehostuu. Viipymäaikaan vaikuttaa olutmäskin kuiva-ainepitoisuuden ja orgaanisen aineen pitoisuuden lisäksi mädätysprosessissa käytetty lämpötila, reaktorin koko ja se kuinka syöte sekoittuu biokaasureaktorissa.

Kaava 2. Reduktion laskukaava

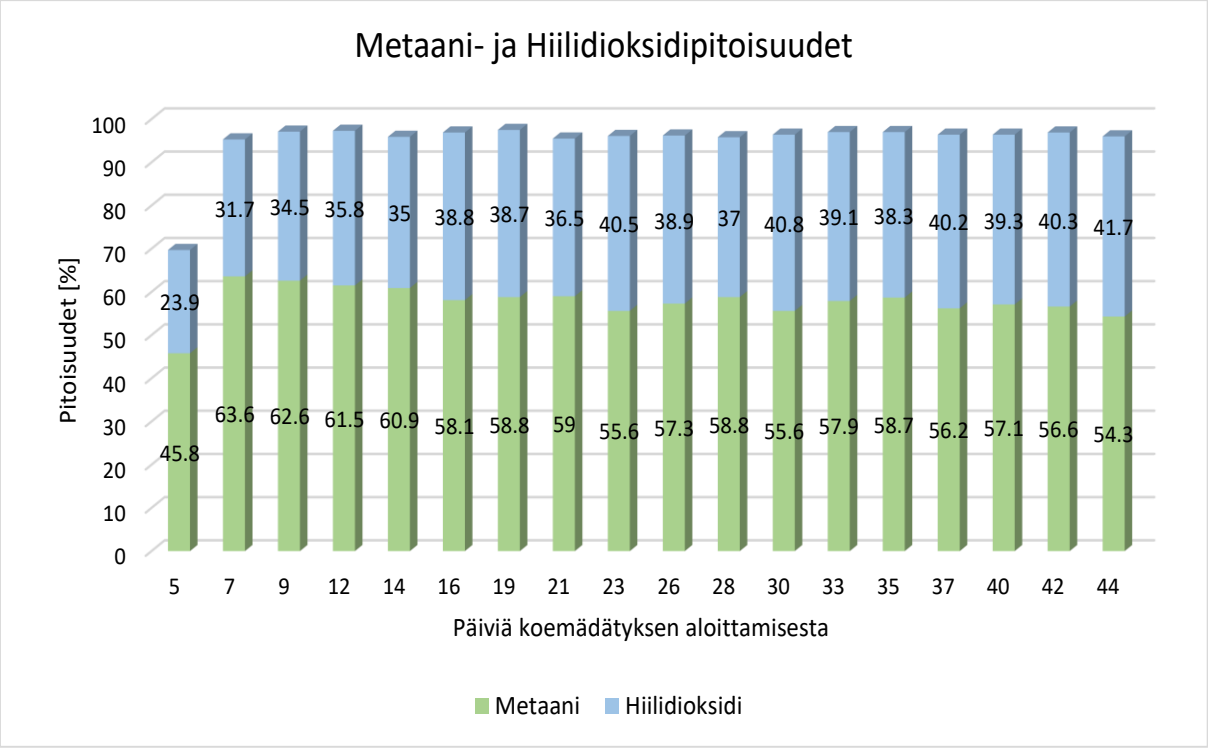
$$Reduktio = \frac{pitoisuus\ mädätyksen\ jälkeen - pitoisuus\ ennen\ mädätystä}{pitoisuus\ ennen\ mädätystä} * 100$$

Taulukko 6. Mädätyksen aikana tapahtuneet muutokset

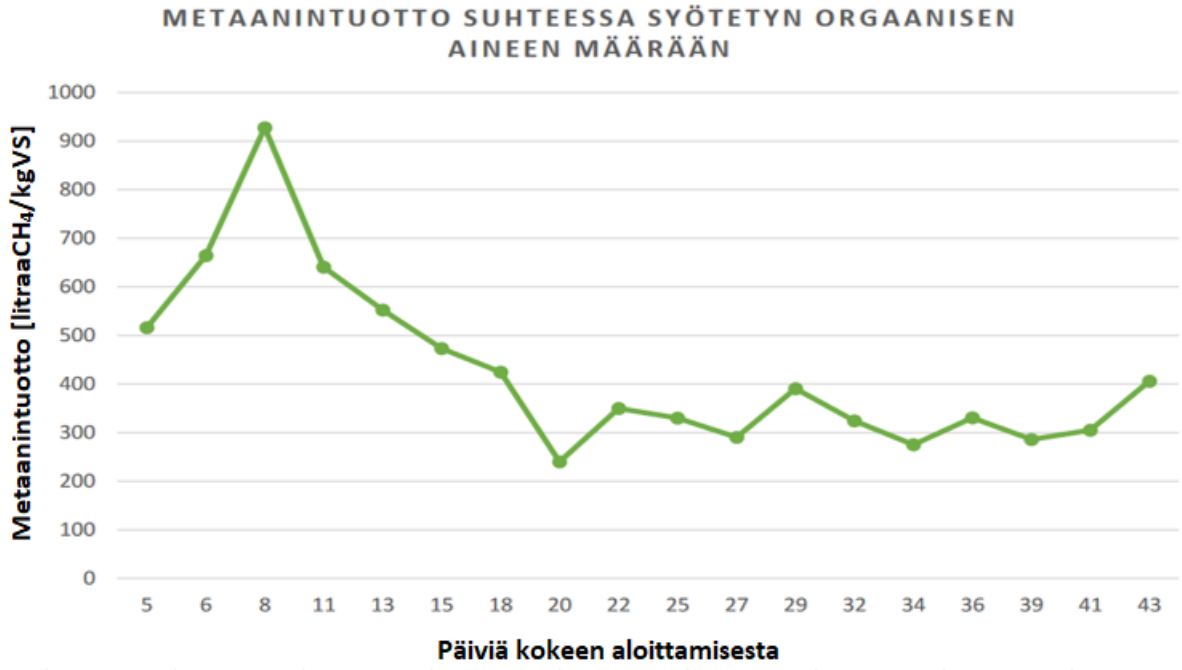
Parametri	Ennenen mädätystä	Mädätyksen jälkeen	Muutos (%)
Kuiva-aine % (TS)	20.24	4.5	-77.77
Orgaaninen aines % (VS)	19.40	3.2	-83.51
VS/TS-Suhde	95.85	71.11	-25.81
Kosteus %	79.76	95.5	19.73
Tiheys g/l	700	1100	57.14

Laboratoriotulosten perusteella olutmäskin metaanintuotto oli noin 250–400 litraaCH_4/kgVS. Keskiarvoinen metaanipitoisuus biokaasussa oli koemädätyksen aikana hieman yli 58 % ja hiilidioksidi pitoisuus noin 38 % (kuva 11). Keskiarvoiset pitoisuudet laskettiin viiden viimeisen koemädätysviikon tulosten perusteella, koemädätyksen ensimmäisen viikon arvot jätettiin poikkeavuuksien vuoksi huomioimatta laskuissa. Viimeisen mittauspäivän kohdalla arvoissa näkyy metaanipitoisuuden kohdalla laskua, joka johtuu siitä, että bioreaktoria syötettiin viimeisen kerran keskiviikkona. Tämä on voinut vaikuttaa myös biokaasun koostumukseen ja metaanipitoisuuden laskuun. Mädätyskokeen alussa metaanipitoisuus oli puolestaan korkeampi, joka johtuu todennäköisesti mikrobiympin vaikutuksesta. Jotta prosessista saataisiin korkeampia metaanipitoisuuksia, olisi teoriatiedon mukaan tarpeellista hyödyntää prosessissa hivenainelisää tai monipuolistaa syötettä. Keskiarvoinen (58 %) metaanipitoisuus on kuitenkin erittäin hyvä sähkön ja prosessihöyryn tuottamiseen, johon biokaasulaitoksen tuottama energia on tarkoituksena hyödyntää. Kuvassa 12 näkyy metaanin tuotto orgaanista ainesta kohden [litraaCH_4/kgVS].

Kuva 11. Koemädätyksen metaani- ja hiilidioksidipitoisuudet



Kuva 12. Metaanintuotto orgaanisen aineen määrää kohden (litraaCH_4/kgVS)



11.2 Mädätysjäännöksen ravinnepitoisuudet

Orgaanisia lannoitteita koskeva laatuasetus valmistuu keväällä 2023. Opinnäytetyötä tehdessä oletuksena on, että ravinnepitoisuuksien raja-arvot säilyvät samoina. Mädätysjäännös on yleisesti maanparannusainetta, koska mädätysjäännökset sisältävät runsaasti vettä. Jos mädätysjäännöksen ravinnepitoisuudet ylittävät 1 % osuuden kuiva-ainepainokiloa kohden on kyseessä lannoitevalmiste.

Mädätysjäännöksestä tehtiin laaja lannoiteanalyysi ja mädätysjäännöksestä analysoitiin ominaisuudet, kuten kuiva-ainepitoisuus ja orgaanisen aineksen määrä. Taulukossa 5 (s. 40) on esitettynä mädätysjäännöksen ominaisuudet. Mädätysjäännöksen ravinnepitoisuudet on esitetty muutosprosentteina, koska tarkkoja ravinnepitoisuuksia ei toimeksiantajan kanssa tehdyn salassapitosopimuksen vuoksia tässä opinnäytetyössä esitetä. Prosentit kertovat tapahtuneen ravinteiden osuuden muutoksen mädätyksen aikana. Ravinnepitoisuuksien muutos on laskettu kaavalla 3. Mädätysjäännöksen ravinnepitoisuuksiin vaikuttaa olennaisesti se, kuinka paljon prosessi vaatii laimennosvettä. Prosessin vaatima laimennosveden todellinen määrä selviää, kun laitos käynnistyy. Mädätysjäännös voi olla kosteuspitoisuudeltaan matalampi. Kokeen aikana olutmäski laimennettiin 10 % kuiva-ainepitoisuuteen ja lopullisen mädätysjäännöksen kuiva-ainepitoisuus oli 4,5 %.

Kaava 3. Ravinnepitoisuuksien muutosprosenttien laskukaava

$$Muutos(\%) = \frac{mädätysjäännöksen\ ravinnearvo - ravinnearvo\ ennen\ mädätystä}{ravinnearvo\ ennen\ mädätystä} * 100$$

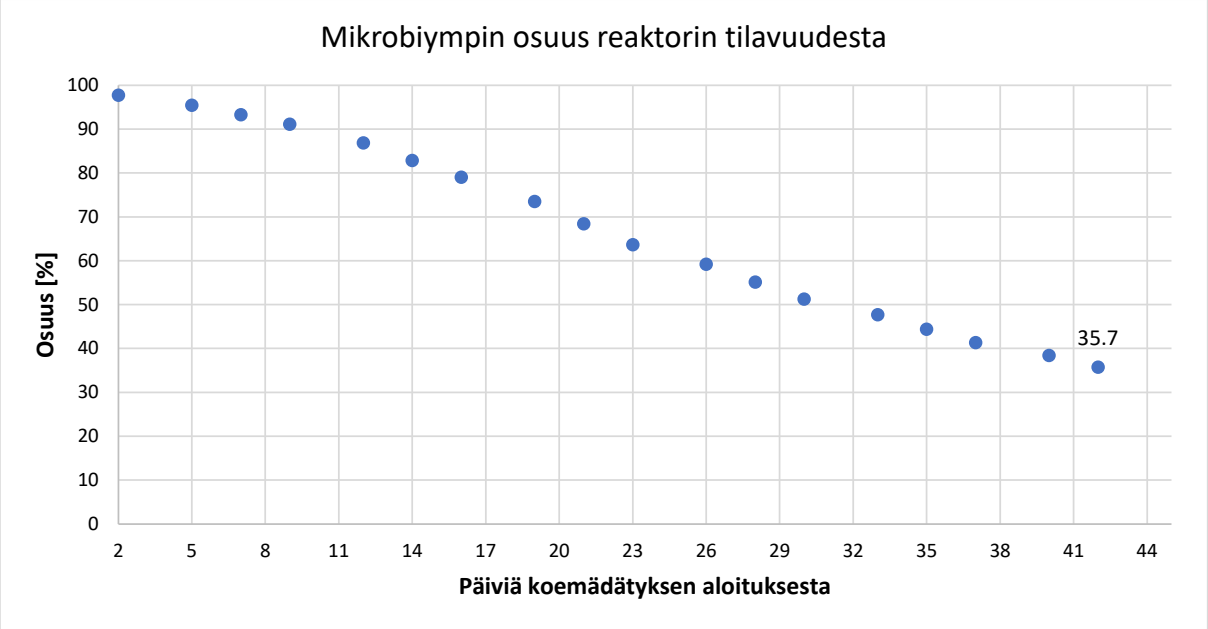
Ravinnepitoisuuksien muutokset on esitetty taulukossa 7. Ravinnepitoisuudet vastasivat pääosin aikaisemmin tehtyjä tutkimuksia, teoriatietoa ja biokaasulaskurilla tehtyjä laskuja. Tuloksissa kaliumin muutosprosentti oli kuitenkin poikkeuksellinen. Ennen mädätystä otetuissa analyyseissä mäskin kaliumpitoisuus vastasi aikaisempia tutkimuksia, joten on todennäköistä, että mädätysjäännöksen analyyseissä on käynyt jokin virhe tai sitten analyysiin vaikuttaa koemädätykseen käytetty mikrobiymppi, jota koemädätyksen lopussa

reaktorin tilavuudesta oli vielä laskennallisesti 35,7 % (kuva 13). Koemädätystä olisi ollut syytä jatkaa vielä ainakin kuusi viikkoa samalla orgaanisella kuormituksella ja syöttömäärillä, jotta mikrobiympin osuus reaktorin tilavuudesta olisi saatu laskemaan alle 10 %:iin (kuva 14). Mikrobiympin vaikutus voi näkyä ravinnepitoisuuksien tuloksissa, mutta mikrobiympistä ei otettu ennen koemädätystä ravinnepitoisuuksia, joten ei ole tietoa, kuinka korkea kaliumpitoisuus mikrobiympissä oli.

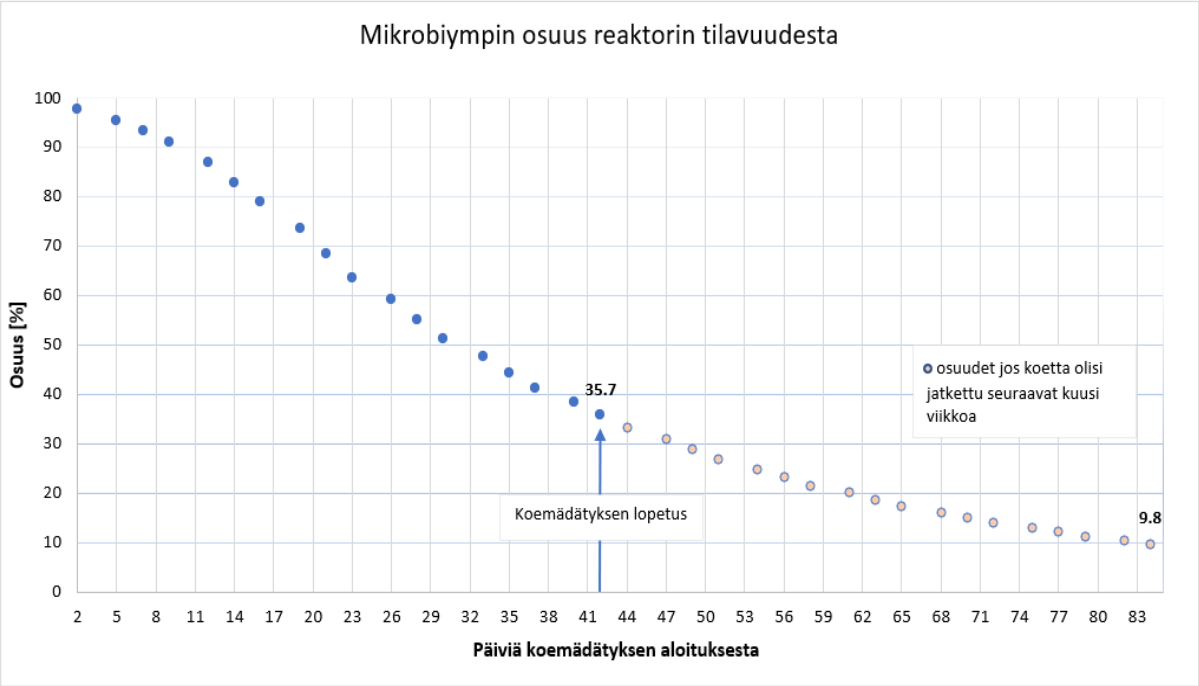
Taulukko 7. Ravinnepitoisuuksien muutokset koemädätyksen aikana

Kg/m^3 (tuorepainoa kohden)	Muutos-%
Kokonaistyppi	36 %
Liukonen typpi	1103 %
Kokonaisfosfori	15 %
Kalium	957 %

Kuva 13. Mikrobiympin osuus (%) reaktorin tilavuudesta koemädätyksen edetessä



Kuva 14. Mikrobiympin osuus (%) reaktorin tilavuudesta koemädätyksen edetessä ja laskennalliset arvot koemädätyksen jatkuessa seuraavat kuusi viikkoa



Ravinnearvoista laskettiin levitysohje mallasohran viljelyä varten vertaamalla mädätysjäännöksen ravinnepitoisuutta (kg/m^3) mallasohran tarvitsemiin ravinnemääriin. Käytettävän mädätysjäännöksen määrä laskettiin niin, että pelloille levitettävän typen määrä pidettiin tavoitellussa määrässä, eli 100 kg liukoista typpeä hehtaarille. Selvittämällä tarvittavan mädätysjäännöksen määrän, saatiin laskettua kustannukset lannoitekäytölle. Nämä tulokset esitetty luvussa 11.4.

Mädätysjäännöksessä liukoisen typen määrä kokonaistypen osuudesta oli 51,3 %. Vertailun vuoksi olutmäskin ravinnepitoisuuksista laskettiin biokaasulaskurilla mädätysjäännöksen potentiaalinen arvonlisäys ja ravinnepitoisuuksien muutokset. Biokaasulaskurilla saatiin selville myös teoreettinen mädätysjäännöksen määrä (tonnia/ vuosi). Laskelmat tehtiin kuivamädätykselle ja märkämädätykselle. Kuivamädätyksessä kuiva-ainepitoisuudeksi asetettiin olutmäskin kuiva-ainepitoisuus (laboratoriotulos 1.2.2023 otetuissa analyyseissä) 20,24 % ja märkämädätyksessä laskelmat tehtiin niin, että kuiva-aineen pitoisuus oletettiin olevan 10 %. Biokaasulaskurista saadut tulokset ovat esitettynä taulukossa 8.

Taulukko 8. Liukoisen typen määrän lisääntyminen ja rahallinen arvo (Biokaasulaskuri)

	Liukoisen typen määrä lisääntyy (kg/vuosi)	Liukoisen typen määrän lisäyksen arvo (€/vuosi)	Mädätysjäännös (t/ vuosi)
Kuivamädätys (kuiva-aine 20.24 %)	28 433	24 168	8 765
Märkämädätys (kuiva-aine 10 %)	24 914	21 192	18 918

11.3 Lannoitekelpoisuus

Mädätysjäännöksestä analysoitiin lannoitelainsäädännön vaatimat analyysit. Uuden lannoitelainsäädännön laatuasetukset valmistuvat keväällä 2023, mutta oletuksena on, että raja-arvot (taulukko 9) lannoitekelpoisuuteen pysyvät samoina kuin tähän asti. Lannoitekäyttöä varten laitoksen toimijalla pitää olla tiedossa mädätysjäännöksen sisältämien haitallisten aineiden määrä ja mikrobiologinen laatu. Haitallisten aineiden pitoisuuksien tulokset esitettynä taulukossa 9. Taulukossa 10 on esitettynä mädätysjäännöksen mikrobiologinen laatu. Mädätysjäännöksen sisältämät haitalliset aineet eivät ylittäneet lannoitelainsäädännön raja-arvoja, eikä mädätysjäännös sisältänyt mikrobeja. Lannoiteanalyysitulosten perusteella mädätysjäännös sopii hyvin lannoitteeksi tai maanparannusaineeksi.

Taulukko 9. Mädätysjäännöksen haitallisten aineiden pitoisuudet verrattuna lannoitelainsäädännön raja-arvoihin

	Mädätysjäännös mg/kg (kuiva-ainetta kohden)	**Lannoitelainsäädännön raja-arvo** mg/kg (kuiva-ainetta kohden)
Arseeni (As)	<5.2	25
Elohopea (Hg)	0.19	1
Kadmium (Cd)	0.42	1.5
Kromi (Cr)	15	300
Kupari (Cu)	14	600
Lyijy (Pb)	4.8	100
Nikkeli (Ni)	14	100
Sinkki (Zn)	310	1500

Taulukko 10. Mädätysjäännöksen mikrobiologinen laatu ja lannoitelain sallimat raja-arvot

Taudin aiheuttaja/ indikaattori	Mädätysjäännös	Lannotelain sallimat raja-arvot
Escherichia coli	<10 MPN/g	<1000 pmy/g
Salmonella	ei todettu /25g	ei todettavissa

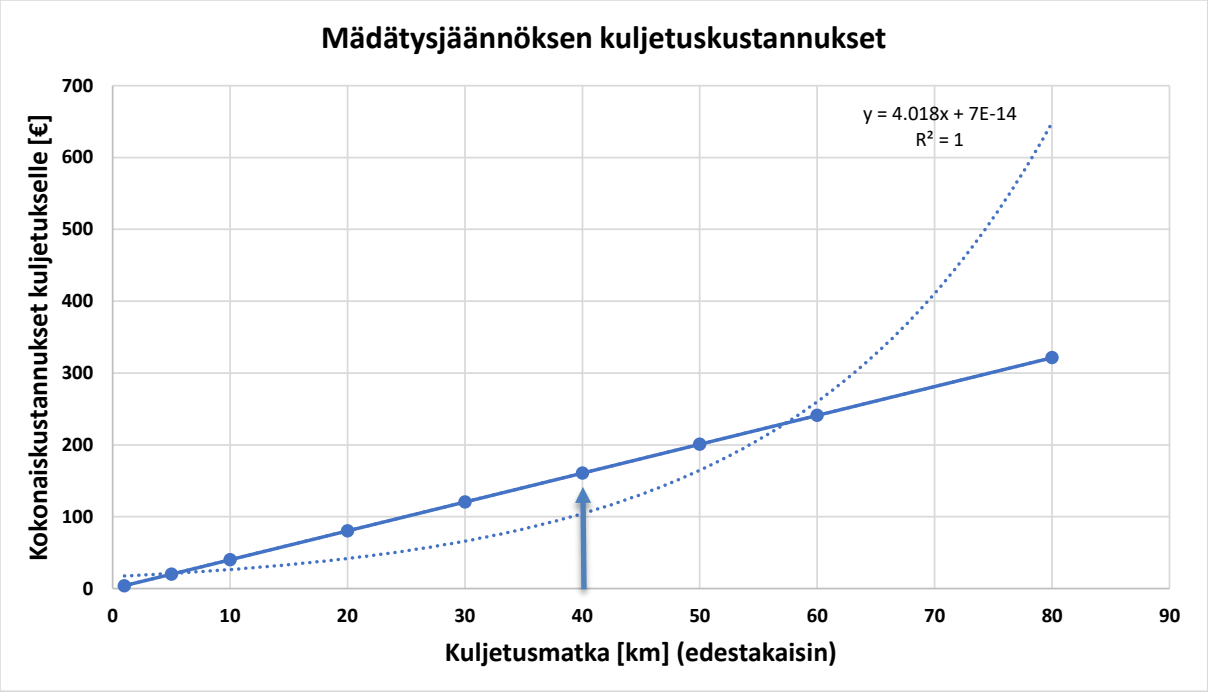
Taulukossa 10 olevat yksikköerot MPN (Most propaple number eli todennäköisin lukumäärä) ja pmy (pesäkettä muodostavaa yksikköä) johtuvat siitä, että laboratoriossa on käytössä eri yksikkö kuin lannoitelainsäädännön ilmoittamissa raja-arvoissa. Yksikköeroista huolimatta voidaan todeta, ettei *Escherichia colin* lannoitelain asettamat raja-arvot mädätysjäännöksessä ylittyneet.

11.4 Kustannukset

Vuoden 2022 konetyön kustannukset ja tilastolliset urakointihinnat- raportti valmistuu huhtikuun 2023 aikana, joten tuoreimmat urakointihinnat eivät ole olleet opinnäytetyötä tehdessä vielä valmiina. Taloudellisuutta arvioitaessa on Palvan (2020) raportin urakointihintoihin laskettu keskiarvoinen urakointihintojen nousu, joka arvioitiin olleen 22,5 % verrattuna vuona 2020 hintoihin. (henkilökohtainen tiedoksianto, 2023) Korotetut hinnat laskettiin sekä mädätysjäännöksen, että teollisesti valmistetun lannoitteen kuljetukselle ja levitykselle.

Kuljetuskustannuksista laskettu Break-even point, eli piste, jonka jälkeen ei ole enää kannattavaa kuljettaa mädätysjäännöstä. Kustannukset laskettu edestakaiselle matkalle ja verrattuna hehtaarille tarvittavaan ravinnemäärään. Kuvassa 15 näkyy nousevat kuljetuskustannukset matkan pidentyessä. Hehtaarille tarvittavan mädätysjäännöksen kuljettaminen yli 40 km edestakaiselle matkalle ei ole enää kannattavaa. Kuljetuskustannukset muodostavatkin yleensä suurimman kustannuksen mädätysjäännöksen käytölle. Tarkastelukohteen biokaasulaitoksen mädätysjäännöksen hyödyntämiselle kuljetuskustannukset eivät muodosta ongelmaa, sillä mädätysjäännös on tarkoituksena hyödyntää lähiseuduilla.

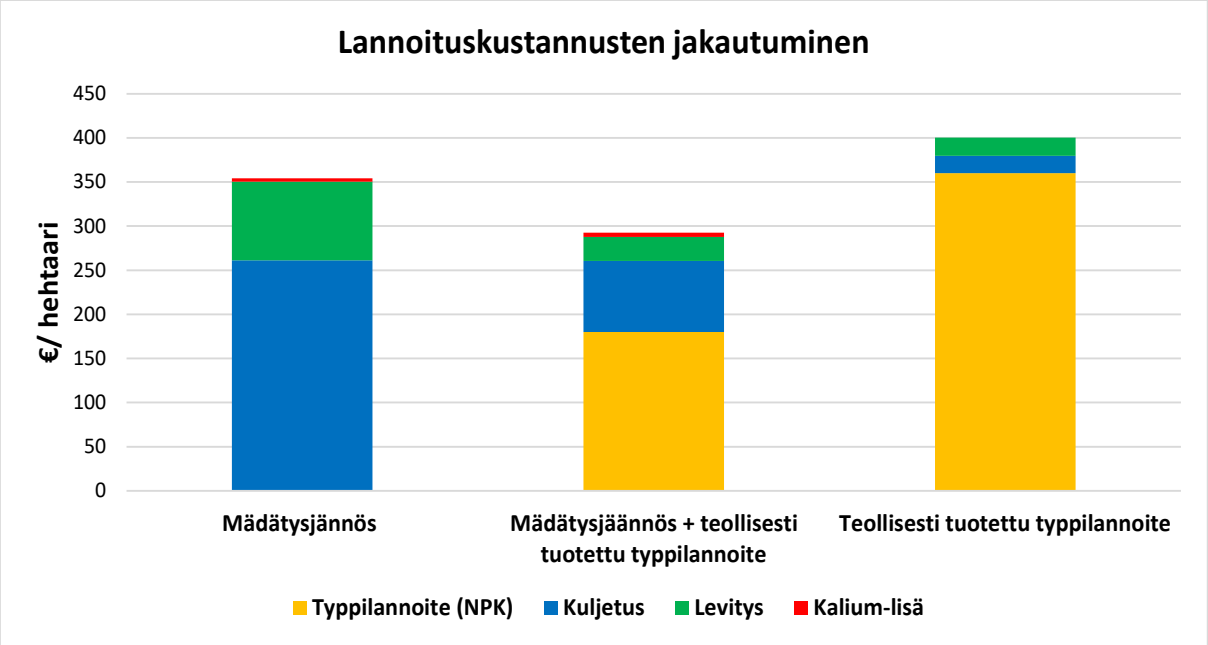
Kuva 15. Mädätysjäännöksen kuljetuskustannukset kuljetusmatkaan verrattuna hehtaarille



Kokonaistypen osuudesta liukoista typpeä on mädätysjäännöksessä 51,3 %. Kuvassa 16 on esitettynä, kuinka kustannukset nousevat, kun on laskettu kustannukset ainoastaan liukoisen typen mukaan. Tällöin kokonaistypen osuus pelloilla kasvaa vajaa 50 % yli tavoiteltavan rajan, mutta liukoista typpeä on kasvien tarvitsema määrä. Laskut on tehty niin, että tavoiteltava 100 kg liukoista typpeä hehtaarille täyttyy. Jos tavoitellaan mädätysjäännöksen hyödyntämistä ainoastaan liukoisen typen mukaan fosforin määrä, nousee yli rajoitusten ja kaliumlisän tarve vähenee. On selvää, että yksistään mädätysjäännöstä ei kannata käyttää lannoitteena, vaan on järkevää esimerkiksi keväällä hyödyntää muita typpipitoisia lisälannoitteita. Lisälannoitteita hyödyntämällä pelloilla ei fosforipitoisuus nouse liian korkeaksi, mikä aiheutuu ongelmaksi pelkkää mädätysjäännöstä hyödynnettäessä.

Kuvassa 16 näkyy mädätysjäännöksen, mädätysjäännöksen ja teollisesti tuotetun lannoitteen yhteiskäytön ja teollisesti tuotetun lannoitteen kustannusten erot mallasohran viljelyssä. Laskuihin on otettu huomioon kustannukset, jotka muodostuvat mädätysjäännöksen kuljetuksesta biokaasulaitokselta maanviljelijälle (edestakainen matka), mädätysjäännöksen levitys hehtaarille ja lisälannoitteen kustannukset ja niitä on verrattu teollisesti tuotettujen lannoitteiden vastaaviin kustannuksiin. Mädätysjäännöksen ja teollisesti tuotetun typen yhteiskäyttö tulee kaikkein edullisemmaksi.

Kuva 16. Lannoituskustannuksien hinnan muodostuminen eri valmisteille



Maanviljelijän hoitaessa mädätysjäännöksen kuljetuksen pois biokaasulaitokselta ja levityksen pelloille, verrattuna teollisesti tuotettujen lannoitteiden käyttöön, on mädätysjäännöksen käyttö noin 27 % edullisempaa hehtaaria kohden, vaikka lannoitteen levitysmäärät hehtaaria kohden kasvavat. Teollisesti tuotettujen typpilannoitteiden määrä vähenee mädätysjäännöksen ja typpilannoitteen yhteiskäytöllä jopa 50 %, joka tarkoittaa tämän hetken lannoitteiden hinnoilla reilun 110 euron (€) rahallista säästöä hehtaarilta. Laskelmissa on huomioitu mädätysjäännöksen lisäksi tarvittavat lisäravinteet (teollisesti tuotettu typpilannoite ja kaliumlisä).

12 Yhteenveto ja johtopäätökset

Tämän opinnäytetyön keskeisimpänä tavoitteena oli selvittää Hartwallille perustettavan biokaasulaitoksen mädätysjäännöksen käytön mahdollisuudet mallasohran viljelyssä. Mädätysjäännöksen lannoitekäytön mahdollisuuksia arvioitiin koemädätyksen perusteella saatujen mädätysjäännöksen ravinnearvojen, aikaisemmin tehtyjen vastaavien tutkimuksien, kirjallisuuden, lannoitekäytöstä muodostuvien kustannuksien ja lainsäädännön asettamien laatuvaatimusten sekä ravinnerajoituksien perusteella. Lannoitelainsäädäntö ja peltokohtaiset fosforirajoitukset vaikuttavat biokaasulaitoksien mädätysjäännöksen

hyötykäyttöön. Lisäksi hyötykäyttöä rajoittaa kustannuskysymykset, jotka muodostuvat mädätysjäännöksen kuljetuksesta ja levittämisestä. Perustettavan biokaasulaitoksen syöte on hygieenistä, joten hygienia eikä haitta-aineet rajoita mädätysjäännöksen käyttöä mallasohran viljelyssä tarkastelukohteessa.

Laboratorio-olosuhteissa suoritetun koemädätyksen kesto oli kuusi viikkoa. Koemädätys sujui ongelmitta ja kokeen aikaiset tulokset osoittivat olutmäskin olevan hyvä syöte biokaasuprosessiin. Syötteen sopivuutta puolsi hyvä metaanintuottopotentiaali, korkea VS/TS-suhde ja kuiva-aineen sekä orgaanisen aineen vähenemä mädätyksen aikana. Koemädätyksellä saatiin selville olutmäskin mädätysjäännöksen ravinnepitoisuudet. Bioreaktorin syötteenä käytetyn olutmäskin ravinnepitoisuudet ennen mädätystä vastasivat aikaisempia tutkimuksia ja teoriatietoa, mutta mädätysjäännöksessä oli hieman poikkeavuuksia. Poikkeavuudet saattavat johtua virheellisestä analyysituloksesta tai siitä, että reaktorin tilavuudesta mikrobiymppiä arvioitiin laskennallisesti olevan kokeen lopussa vielä noin 36 %. Koemädätystä olisi pitänyt jatkaa vielä kuusi viikkoa, jotta mikrobiympin osuus reaktorissa olisi laskenut alle 10 %:iin. Koemädätystä jatkamalla olisi varmistuttu siitä, ettei mikrobiymppi vaikuta lopullisiin ravinneanalyyseihin tai vaikutus olisi ollut pienempi.

Mallasohran tyypillinen ravinnetarve hehtaarille on 100 kg liukoista typpeä, 12 kg fosforia ja 24 kg kaliumia. Mädätysjäännöksen ravinnepitoisuuksista saatiin laskettua levitysohje mallasohran viljelyyn. Mädätysjäännöksen käytön suunnitteluun vaikuttaa mädätysjäännöksen typpi- ja fosforipitoisuus. Fosforipitoisuus rajoittaa mädätysjäännöksen peltokäyttöä. Ravinteiden kierrätyksen kannalta olisi järkevää separoida (jakaa kahdeksi erilliseksi jakeeksi) mädätysjäännös. Separoimalla fosforipitoinen kuivajae saataisiin erilliseksi ja voitaisiin kuljettaa edullisemmin sinne missä sitä tarvitaan. Mädätysjäännöksen separointi kahdeksi jakeeksi nostaa kuitenkin biokaasulaitoksen kustannuksia. Edullisempi vaihtoehto on suunnitella mädätysjäännöksen lannoitekäyttö tarkkaan ja käyttää lisänä teollisesti valmistettuja typpilannoitteita, joissa fosforipitoisuus on alhaisempi. Huomioitavaa on, vaikkei tavoiteltaisikaan pelkän mädätysjäännöksen käyttöä, että orgaanisilla lannoitteilla on runsaasti maaperää parantavia ominaisuuksia. Mädätysjäännöksen käyttö on lisäksi osa erittäin tärkeää ravinteiden kierrätystä ja sen hyödyntäminen parantaa huomattavasti Suomen lannoiteomavaraisuutta.

Opinnäytetyössä laskettiin kustannukset mädätysjäännöksen lannoitekäytölle ja sitä verrattiin teollisesti tuotettuihin lannoitteisiin. On selvää, että tällä hetkellä teollisesti tuotettujen lannoitteiden hinnat ovat korkeammalla kuin normaalisti. Jopa osittainenkin mädätysjäännöksen hyödyntäminen lannoitteena on tämän hetken laskelmien mukaan edullisempaa verrattaessa teollisesti tuotettuihin lannoitteisiin. Vaikka levitettävä lannoitteen määrä peltokohtaisesti (m^3/ha) kasvaisi, mädätysjäännöksen käyttäminen tuo sen maaperää parantavien hyötyjen lisäksi rahallista säästöä ja mädätysjäännöstä voidaan hyödyntää luomuviljelyssä.

Opinnäytetyössä laskettu ravinnemääriltään sopivin ja kustannustehokkain levitysohje sisälsi osittain mädätysjäännöstä ja osittain teollisesti tuotettua typpilannoitetta. Sekoitussuhde sisälsi ravinteita sen verran kuin lannoitelainsäädäntö ja fosforiasetus asettaa rajoituksia, ja mitä mallasohra tarvitsee hyvää kasvuun. Suositeltuihin arvoihin päästäkseen tarvitaan hyvin pieni määrä kaliumlisää, jolla ei kokonaiskustannuksissa ole suurtakaan merkitystä. Laskelmissa mädätysjäännös oli viljelijälle ilmaista. Mikäli teollisesti tuotettujen lannoitteiden hintojen nousu jatkuu, on hyvä arvioida mädätysjäännöksen arvoa tarkemmin kaupallisessa mielessä, niin, että biokaasulaitos saisi esimerkiksi yhden euron kilogrammalta liukoisia ravinteita, vaikka maanviljelijä itse hoitaisi kuljetuksen laitokselta ja pellolle levittämisen.

Mikäli mädätysjäännöksen ravinnepitoisuuksien oletetaan muuttuvan huomattavasti, on arvioitava uudelleen lannoitemäärät ja peltokohtaiset tarpeet. Tässä työssä laimennosveden määrää käytettiin niin, että kuiva-ainepitoisuus saatiin 10 %:iin. Mikäli käynnistyvässä prosessissa kuiva-ainepitoisuus on korkeampi, on hyvä laskea ravinnepitoisuudet lopullisessa mädätysjäännöksessä uudestaan.

Hartwallille perustettava biokaasulaitos on erinomainen esimerkki ravinteiden kierrätyksen mahdollisuuksista ja uusiutuvan energian tuottamisesta. Ravinteiden kierrätyksen merkitys tulee kasvamaan lähitulevaisuudessa ja kierrätysravinteiden käyttö maanviljelijöiden keskuudessa lisääntyy. Tehtyjen laskelmien mukaan mädätysjäännös on osittaisessa käytössä ravinnearvoiltaan sopivaa mallasohranviljelyyn ja maanparannusaineeksi, mutta tarvitaan

lisätutkimuksia siitä, millaisia vaikutuksia mädätysjäännöksellä on viljelyyn, maaperän kuntoon ja satotasoon.

Uusi lannoitelaki ja kierrätysravinnetavoitteet tulevat lisäämään biokaasulaitosten mädätysjäännösten kysyntää. Olutmäskin mädätysjäännöksen hyötykäytöstä mallasohran viljelyssä olisi tehtävä pidempiaikainen viljavuustutkimus. Useat kierrätyslannoitteita koskevat tutkimukset ovat osoittaneet, että kierrätyslannoitteilla on yhtä tehokkaat lannoitusvaikutukset käytettäessä sama määrä liukoista typpeä kuin teollisesti tuotettujen lannoitteiden kohdalla. Lannoitevaikutusten lisäksi kierrätyslannoitteilla on todistetusti maanparannusvaikutus. Jotta näihin tuloksiin saadaan olutmäskin mädätysjäännöksen käytölle samat tulokset, olisi tehtävä useamman peltolohkon kattava vähintään viisivuotinen tutkimus.

Lähteet

Bougrier, C., Dognin, D., Laroche, C., & Rivero, J. A. C. (2018). Use of trace elements addition for anaerobic digestion of brewer's spent grains. *Journal of environmentalt management,* 223, (ss. 101–107). https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.06.014

Buller, L. S., Sganzerla, W. G., Lima, M. N., Muenchow, K. E., Timko, M. T., & Forster-Carneiro, T. (2022). Ultrasonic pretreatment of brewers' spent grains for anaerobic digestion: Biogas production for a sustainable industrial development. *Journal of Cleaner Production*, 355. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131802

Enari, T. M., & Mäkinen, V. (2014). *Panimotekniikka*. 3. uusittu ja laajennettu painos. Oy Panimolaboratorio-Bryggerilaboratorium Ab, Espoo.

Euroopan komissio (3.9.2020). *Kriittisten raaka-aineiden sietokyky: kartoittaa tietä kohti parempaa turvallisuutta ja kestävyyttä.* https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=CELEX%3A52020DC0474&lang1=FI&from=EN&lang3=choose&lang2=choose&_csrf=3c2c2f47-544c-41f2-993e-33d0873d184a

Gareis, C. (2022). Ravinteet kiertoon. Ukrainan kriisin opetuksia. *Biokierto ja Biokaasu, 2022.* (2). (ss. 24–25).

Hartwall Oy. (10.5.2022). *Hartwallilla korvataan maakaasu biokaasulla – hiilineutraali tuotanto ensi vuoden aikana* [Kuva]. https://www.hartwall.fi/yritys/uutiset/2022/maakaasusta-biokaasuun-hiilineutraali-tuotanto/

Hartwall Oy. (n.d.). *Oluen raaka-aineet – vain vähän osia, mutta loputtomasti makuja!* https://www.hartwall.fi/inspiroidu/olut/oluen-raaka-aineet-vain-vahan-osia-mutta-loputtomasti-makua/

Huttunen, M., Kokkonen, A., & Kilpeläinen, J. (2020). Ohjeistus testattujen kierrätysravinteiden käsittelylle ja käytölle. https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-275-307-6

Huttunen, T. (15.2.2018). *Mallasohra.* https://www.proagria.fi/uploads/15.2.2018_ohrasta_olueksi_mallasohra_timo_huttunen_viking_malt_2022-06-13-125007_vzak.pdf

Hongisto, A-P. (2022). *Kiertokasvu kehittämässä*. *Biokierto ja Biokaasu, 2022.* (2). (ss. 16–17).

Horn, S., Seppänen, A. M., Winquist, E., Lehtoranta, S., & Luostarinen, S. (2020). *Biokaasulaitoksen mädätysjäännöksen hyödyntämisvaihtoehdot - vaihtoehtojen taloudellisuus ja ilmastovaikutukset*. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 42/2020. Suomen ympäristökeskus. https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/321266/SYKEra_42_2020_BioRaEE.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Hyrkäs, M., Virkajärvi, P., Räty, M., Luostarinen, S., & Pyykkönen, V. (2014). Biokaasulaitoksen käsittelyjäännös nurmen ja ohran lannoitteena. *Suomen Maataloustieteellisen Seuran Tiedote*, (30), (ss. 1–7). http://www.smts.fi/MTP_julkaisu_2014/Posterit/263Hyrkas_ym_Biokaasulaitoksen_kasittelyjaannos_nurmen_ja_ohran_lannoitteena.pdf

Iivonen, S., Tontti, T. & Nykänen, A. (2013). *Biokaasulaitoksen mädätysjäännöksen hyödyntäminen vehnän ja rypsin lannoitteena*. Energiaomavarainen maatila. (ss. 41–59). Helsingin Yliopisto. https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/228147/Julkaisuja29.pdf?sequence=1#page=43

Johnson, P., Paliwal, J. & Cenkowski, S. (2010). Issues with utilisation of brewers' spent grain. *Stewart Postharvest Review*, *6*(4), (s. 2). https://access.portico.org/stable?au=phx64r6dc4c

Jurkola, J. (2019). *Tuotantofunktion sekä panos- ja tuotoshintojenvaikutus taloudellisesti optimaaliseen mallasohran typpilannoitukseen*. [pro gradu -tutkielma, Helsingin yliopisto]. http://urn.fi/URN:NBN:fi:hulib-201905081900

Kangas, S. (2020). *Kauran (Avena sativa L.) sato ja typen käyttö kierrätyslannoitteilla*. [Maisterintutkielma] Helsingin yliopisto. http://urn.fi/URN:NBN:fi:hulib-202005142112

Kapuinen, P. (2015). Lannoitekäyttö. Teoksessa Kymäläinen M. & Pakarinen, O. (toim.) (2015). *Biokaasuteknologia. Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen* (ss. 114–120). Hämeen ammattikorkeakoulu.

Karppinen, P. (2020). Mäskistä saa vaikka mitä. *Uusiouutiset, 2020*. https://www.uusiouutiset.fi/maskista-saa-vaikka-mita/

Kinnunen, V. ja Rintala, J. (2015). Biokaasualan monet mahdollisuudet. Teoksessa Kymäläinen M. & Pakarinen, O. (toim.) (2015). *Biokaasuteknologia. Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen* (ss. 17—19). Hämeen ammattikorkeakoulu.

Koponen, K., & Sokka, L. (2019). *REDII-direktiivi: Kasvihuonekaasupäästövähenemää koskevat kestävyyskriteerit*: Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy.

Kymäläinen, M. (2015a). Teollisuuden sivutuotteet ja jätteet. Teoksessa Kymäläinen M. & Pakarinen, O. (toim.) (2015). *Biokaasuteknologia. Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen* (ss. 43–44). Hämeen ammattikorkeakoulu.

Kymäläinen, M. (2015b). Anaerobinen hajoaminen ja sen hallinta biokaasureaktorissa. Teoksessa Kymäläinen M. & Pakarinen, O. (toim.) (2015). *Biokaasuteknologia. Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen* (ss. 59—67 ja s. 74). Hämeen ammattikorkeakoulu.

Kymäläinen, M. (2015c). Anaerobinen hajoaminen ja sen hallinta biokaasureaktorissa. Teoksessa Kymäläinen M. & Pakarinen, O. (toim.) (2015). *Biokaasuteknologia. Kuiva-aine (TS) ja orgaaninen aines (VS)* (ss. 23—25). Hämeen ammattikorkeakoulu.

Kymäläinen, M. (2015d). Anaerobinen hajoaminen ja sen hallinta biokaasureaktorissa. Teoksessa Kymäläinen M. & Pakarinen, O. (toim.) (2015). *Yleistä biokaasutuotosta*. (ss. 31–32). Hämeen ammattikorkeakoulu.

Lampinen, A. (2015). Biokaasun käsittely ja hyödyntäminen. *Biokaasuteknologia. Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen* (s. 126). Hämeen ammattikorkeakoulu.

Lannoitelaki 711/2022. https://finlex.fi/fi/laki/smur/2022/20220711?search%5Btype%5D=pika&search%5Bpika%5D=Lannoitelaki

Lemola, R., Uusitalo, R., Luostarinen, S., Tampio, E., Laakso, J., Lehtonen, E., Skyttä, A. & Turtola, E. (2023). *Fosforin kierrätyksen tarve ja potentiaali kasvintuotannossa: synteesiraportti.* Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 10/2023. Luonnonvarakeskus. Helsinki. https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/553083/luke-uobio_10_2023.pdf?sequence=8&isAllowed=y

Luke. (n.d.). *Maatalousinfo*. https://maatalousinfo.luke.fi/fi/laskurit/biogas

Luostarinen, S. (2015). Biokaasuprosessit ja laitostaseet. Teoksessa Kymäläinen M. & Pakarinen, O. (toim.) (2015). *Biokaasuteknologia. Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen* (ss. 83–92). Hämeen ammattikorkeakoulu.

Luostarinen, S., Tampio, E., Berlin, T., Grönroos, J., Kauppila, J., Koikkalainen, K., Niskanen, O., Rasa, K., Salo, T., Turtola, E., Valve, H. & Ylivainio, K. (6.3.2019). *Keinoja orgaanisten lannoitevalmisteiden käytön edistämiseen.* Maa- ja metsätalousministeriö. https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161419/MMM_2019_5_Orgaaniset_lannoitevalmisteet.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Maa- ja metsätalousministeriön asetus elintarvikehygieniasta 318/2021. https://finlex.fi/fi/laki/alkup/2021/20210318

Maa- ja metsätalousministeriön asetus lannoitevalmisteista 24/11. https://www.finlex.fi/fi/viranomaiset/normi/400001/37638

Maa- ja metsätalousministeriö. (12.1.2023). *Uusi fosforiasetus voimaan – lannoituksen säätelyn kattavuus paranee.* https://mmm.fi/-/uusi-fosforiasetus-voima,an-lannoituksen-saatelyn-kattavuus-paranee

Motiva. (n.d.). *Biokaasun tuotanto maatilalla.* (s. 25) https://www.motiva.fi/files/6958/Biokaasun_tuotanto_maatilalla.pdf

Mussatto, S. I., Fernandes, M., Rocha, G. J., Órfão, J. J., Teixeira, J. A., & Roberto, I. C. (2010). Production, characterization and application of activated carbon from brewer's spent grainlignin. *Bioresource technology*, *101*(7). https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.025

Mussatto, S. I., & Roberto, I. C. (2008). Establishment of the optimum initial xylose concentration and nutritional supplementation of brewer's spent grain hydrolysate for xylitol production by Candida guilliermondii. *Process Biochemistry*, 43(5). https://doi.org/10.1016/j.procbio.2008.01.013

Mussatto, S. I., Fernandes, M., Dragone, G., Mancilha, I. M., & Roberto, I. C. (2007). Brewer's spent grain as raw material for lactic acid production by Lactobacillus delbrueckii. *Biotechnology Letters*, *29*, (ss. 1973–1976). https://doi.org/10.1007/s10529-007-9494-3

Nganyira, P. D., Shao, G. N., & Emmanuel, J. K. (2022). Evaluating the potential applications of brewers' spent grain in biogasgeneration, food and biotechnology industry: A review. *Heliyon*. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11140

Nitraattiasetus 1250/2014. https://finlex.fi/fi/laki/smur/2014/20141250?search%5Btype%5D=pika&search%5Bpika%5D=Nitraattiasetus

Oras. Opi ravinteista. (n.d.) *Ravinteet.* https://opiravinteista.info/ravinteet/

Paavola, T. (2015). Mädätysjäännöksen yleiset ominaisuudet. Teoksessa Kymäläinen M. & Pakarinen, O. (toim.) (2015). *Biokaasuteknologia. Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen* (ss. 94–95). Hämeen ammattikorkeakoulu.

Paloniitty, P. (2020). *Ravinteiden talteenotto biokaasureaktorin mädätteestä*. [Diplomityö, Tampereen yliopisto]. https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-202009096942

Palva, R. (2021). *Konetyön kustannukset ja tilastolliset urakointihinnat.* TTS:n julkaisuja 457, (s. 4). Työtehoseuranta ry. Rajamäki. https://www.tts.fi/files/4413/Konetyon_kustannukset_ja_tilastolliset_urakointihinnat.pdf

Panjičko, M., Zupančič, G. D., Fanedl, L., Logar, R. M., Tišma, M., & Zelić, B. (2017). Biogas production from brewery spent grain as a mono-substrate in a two-stage process composed of solid-state anaerobic digestion and granular biomass reactors. *Journal of Cleaner Production*, 166, (ss. 519–529). https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.197

Partanen, T. (2012). *Biokaasulaitoksen mädätysjäännöksen käyttö ohran lannoitteena*. [AMK-opinnäytetyö Jyväskylän ammattikorkeakoulu]. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/47642/PartanenTerhi.pdf?sequenc

Rasi, S., Timonen, K., Joensuu, K., Regina, K., Virkajärvi, P., Pulkkinen, H., Tampio, E., Pyykkönen, V. & Luostarinen, S. (2019). *Nurmi biokaasun raaka-aineena - RED II direktiivin mukainen kasvihuonekaasupäästöjen laskenta*. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 46/2019. Luonnonvarakeskus. Helsinki. https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/544351/luke-luobio_46_2019.pdf?sequence=5&isAllowed=y

Ruokavirasto. (2023a). *Lannoitteiden ja lannoitevalmisteiden laatuvaatimukset.* https://www.ruokavirasto.fi/kasvit/lannoitevalmisteet/laatuvaatimukset/

Ruokavirasto. (2023b). *Kierrätysravinteet.* https://www.ruokavirasto.fi/kasvit/lannoitevalmisteet/laatuvaatimukset/kierratysravinteet/

Ruokavirasto. (2023c*). Lannoitelain keskeiset uudet asiat.* https://www.ruokavirasto.fi/kasvit/lannoitevalmisteet/uusi-lannoitelaki/

Ruokavirasto. (2023d*). Lainsäädäntö.* https://www.ruokavirasto.fi/kasvit/lannoitevalmisteet/lannoitelan-toiminta/lainsaadanto/

Ruokavirasto. (2023e). *Haitalliset aineet.* https://www.ruokavirasto.fi/kasvit/lannoitevalmisteet/laatuvaatimukset/haitalliset-aineet-ja-hygienia/

Sandell, M. (2023). Yle uutiset. *Moni pienpanimo lopetti viime vuonna eikä tästä keväästä odoteta valoisampaa tulevaisuutta.* https://yle.fi/a/74-20011586

Sauter biogas finland Ky. (11.5.2022). *Hartwall biokaasulaitoksen peruskiven muuraus.* https://www.sauter-biogas.fi/post/hartwall-biokaasulaitoksen-peruskiven-muuraus

Schnurer, A., & Jarvis, A. (2010). Microbiological handbook for biogas plants. *Swedish Waste Management U*, *2009*, (ss. 98–99).

Sganzerla, W. G., Ampese, L. C., Mussatto, S. I., & Forster-Carneiro, T. (2021a). A bibliometric analysis on potential uses of brewer's spent grains in a biorefinery for the circular economy transition of the beer industry*. Biofuels, Bioproducts and Biorefining,* 15(6), (ss. 1965–1988). https://doi.org/10.1002/bbb.2290

Sganzerla, W. G., Buller, L. S., Mussatto, S. I., & Forster-Carneiro, T. (2021b*).* Techno-economic assessment of bioenergy and fertilizer production by anaerobic digestion of brewer’s spent grains in a biorefinery concept. *Journal of Cleaner Production*, 297. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126600

Sobek, S., Zeng, K., Werle, S., Junga, R., & Sajdak, M. (2022). Brewer's spent grain pyrolysis kinetics and evolved gas analysis for the sustainable phenolic compounds and fatty acids recovery potential. *Renewable Energy*, *199*, (ss. 157–168). https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.08.114

Socaci, S. A., Fărcaş, A. C., Diaconeasa, Z. M., Vodnar, D. C., Rusu, B., & Tofană, M. (2018). Influence of the extraction solvent on phenolic content, antioxidant, antimicrobial and

antimutagenic activities of brewers' spent grain. *Journal of Cereal Science*, *80* (ss. 180–187). https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.03.006

Statista. (2023). *Beer production worldwide from 1998 to 2021.* https://www.statista.com/statistics/270275/worldwide-beer-production/

Suomen Biokierto ja Biokaasu ry. (12.2022). *Kommentit Euroopan komission ehdotukseen muuttaa uusiutuvan energian direktiivin liitettä 9*. https://biokierto.fi/wp-content/uploads/2022/12/Komission-muutosesitys-RED2-liite-9_SBBn-kommentit-22122022.pdf

Suomen Biokierto ja Biokaasu ry. (13.12.2021). *Biokaasun verotus muuttuu 1.1.2022 – koskee tuottajia & käyttäjiä*. https://biokierto.fi/biokaasun-verotus-muuttuu-1-1-2022-koskee-tuottajia-kayttajia/

Suomen Biokierto ja Biokaasu ry. (n.d.). *Ravinteiden kierrätys*. https://biokierto.fi/ravinteiden-kierratys/

Tampio, E., Vainio, M., Virkkunen, E., Rahtola, M. & Heinonen, S. (2018). *Opas kierrätyslannoitevalmisteiden tuottajille.* Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 37/2018. Luonnonvarakeskus. Helsinki. https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/542240/luke-luobio_37_2018_2X.pdf?sequence=8&isAllowed=y

Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. (27.1.2016). *VTT kehitti olutmäskille uutta käyttöä.* https://news.cision.com/fi/vtt-info/r/lehdistotiedote--vtt-kehitti-olutmaskille-uutta-kayttoa,c9902854

Tukes. (21.3.2022). *Laajamittaisen teollisen käsittelyn ja varastoinnin lupahakemus. Biokaasulaitos – Hartwall.* (ss. 3–11). https://tukes.fi/documents/5470659/145722527/Lahti+Energia+hakemus.pdf/ae5eb607-9dee-766e-ef9c-b058139ea554/Lahti+Energia+hakemus.pdf?version=1.0&t=1672820244822

Vainio, E. (toim.). (2022). *Maatalouden typpihaaste – vaihtoehtoja ja ratkaisuja*. Synteesiraportti. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 53/2022. Luonnonvarakeskus. Helsinki. https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/551964/lukeluobio_53_2022.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Valtioneuvoston asetus eräiden maa- ja puutarhataloudesta peräisin olevien päästöjen rajoittamisesta 1250/2014. https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2014/20141250#Pidm45053757661680

Valtioneuvoston asetus fosforia sisältävien lannoitevalmisteiden ja lannan käytöstä 64/2023. https://finlex.fi/fi/laki/smur/2023/20230064

Valtioneuvoston asetus ympäristökorvauksesta 78/2023. https://www.finlex.fi/fi/laki/smur/2023/20230078

Viking Malt Oy. (n.d.). *Sato 2023–24 Laatuvaatimukset ja hinnoittelu.* https://vikingmalt.fi/wp-content/uploads/2022/11/Sato-2023-24-Laatuvaatimukset-ja-hinnoittelu.pdf

VYR, Vilja-alan yhteistyöryhmä. (2022). *Viljelyalat lajikkeittain.* https://www.vyr.fi/fin/viljelytietoa/tilastoja/viljelyalat-lajikkeittain/

VYR, Vilja-alan yhteistyöryhmä. (2017). *Lannoitus ja kalkitus*. https://www.vyr.fi/mallasohran-viljelyopas/miten-viljelen-mallasohraa/lannoitus-ja-kalkitus/

VYR, Vilja-alan yhteistyöryhmä. (2012). *Mallasohran viljelyopas.* https://www.vyr.fi/mallasohran-viljelyopas/mallasohran-viljelyopas/

Zeko-Pivač, A., Tišma, M., Žnidaršič-Plazl, P., Kulisic, B., Sakellaris, G., Hao, J., & Planinić, M. (2022). The potential of brewer's spent grain in the circular bioeconomy: State of the art and future perspectives. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, *10*. [Kuva]. 10.3389/fbioe.2022.870744

Liite 1: Mallasohran laatuvaatimukset (Vikingmalt, n.d.)

Mallasohran laatuvaatimukset ja -hinnoittelu sato 2023

1. Vastaanottolaatuvaatimukset

		Panimo-ohra (sis. luomu)		**Entsyymiohra**	
		Peruslaatu	Minimilaatu	Peruslaatu	Minimilaatu
Itävyys	Min	95 %	95 %	95 %	95 %
Valkuaispitoisuus	Max	11,5 %	12 %		
	Min	9,5 %	9,0 %	12,0 %	11,5 %
Lajittelu yli 2,5 mm	Min	90 %	85 %	90 %	85 %
alle 2,2 mm	Max	3 %	5 %	3 %	5 %
Kosteus	Max	14,0 %	14,5 %	14,0 %	14,5 %
Lajikepuhtaus	Min	95 %	95 %	95 %	95 %
Lajipuhtaus	Min	98 %	98 %	98 %	98 %
Fusariumpitoisuus	Max	80 %	80 %	80 %	80 %
Punaiset jyvät	Max	5 kpl/100 g	5 kpl/100 g	5 kpl/100 g	5 kpl/100 g
Vihreät jyvät	Max	1 %	1 %	1 %	1 %
Haljenneet jyvät	Max	5 %	5 %	5 %	5 %
Kuorettomat jyvät	Max	5 %	5 %	5 %	5 %

Liite 2: Lannoitteiden sisältämien haitallisten aineiden ja taudinaiheuttajien enimmäismäärät (Ruokavirasto, 2023e)

Haitalliset aineet

Kansallisen lannoitelainsäädännön mukaisesti valmistettavien ja markkinoitavien lannoitevalmisteiden haitallisten aineiden enimmäispitoisuudet (mg/kg kuiva-ainetta (ka) kohti).

- Arseeni (As) 25
- Elohopea (Hg) 1,0
- Kadmium (Cd) 1,5[1)]
- Kromi (Cr) 300
- Kupari (Cu) 600[2)]
- Lyijy (Pb) 100
- Nikkeli (Ni) 100
- Sinkki (Zn) 1500[2)]

1)Maa- ja puutarhataloudessa käytettävässä tuhkalannoitteessa kadmiumin enimmäispitoisuus on 2,5 mg/kg ka. 2)Kuparin ja sinkin enimmäispitoisuuden ylitys peltokäytössä voidaan sallia, kun maaperäanalyysin perusteella on todettu niiden puutetta.