

**KAURAN (*Avena sativa* L. 'Obelix') SADON
MUODOSTUS JA LAATU NELJÄLLÄ
KIERRÄTYSLANNOITEKÄSITTELYLLÄ**

Mari Unnbom
Maisterintutkielma
Helsingin yliopisto
Maataloustieteiden osasto
Agroekologia
Marraskuu 2019

HELSINGIN YLIOPISTO — HELSINGFORS UNIVERSITET — UNIVERSITY
OF HELSINKI

Tiedekunta/Osasto — Fakultet/Sektion — Faculty Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta		Laitos — Institution — Department Maataloustieteiden osasto	
Tekijä — Författare — Author Mari Unnbom			
Työn nimi — Arbetets titel — Title Kauran (<i>Avena sativa</i> L. 'Obelix') sadon muodostus ja laatu neljällä kierrätyslannoitekäsitteillä			
Oppiaine — Läroämne — Subject Agroekologia			
Työn laji — Arbetets art — Level Maisterintutkielma		Aika — Datum — Month and year Marraskuu 2019	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages 71 s.
Tiivistelmä — Referat — Abstract <p>Suomi on sitoutunut tavoitteisiin pyrkiä lisäämään ravinteiden kierrätystä ja toimimaan ravinteiden kierrätyksen mallimaana. Suomessa syntyy vuosittain yli 21 miljoonaa tonnia erilaisia biomassoja, joita hyödyntämällä voidaan vähentää maatalouden riippuvuutta tuontilannoitteista ja vähentää näin alkutuotannon riippuvaisuutta uusiutumattomista raaka-aineista. Kierrätysraaka-aineisiin pohjautuvat orgaaniset ja epäorgaaniset lannoitteet eroavat toisistaan käytetyn raaka-aineen ja käsittelymenetelmien suhteen, ja nämä tekijät vaikuttavat niiden olomuotoihin, orgaanisen aineksen määrään ja ravinnepitoisuuksiin. Orgaanisten ja epäorgaanisten lannoitteiden merkittävin ero on niiden sisältämien ravinteiden olomuoto. Orgaaniset ravinteet vaativat mineralisoitumisprosessin. Tutkimukset osoittavat, että kierrätysravinteilla voidaan saada väkilannoitteiden veroisia satoja, mutta lisätutkimusta tarvitaan muun muassa niiden käytön pitkäaikaisvaikutuksista.</p> <p>Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, onko kierrätyslannoitevalmisteilla lannoitetun kauran sadonmuodostuksessa ja sadon laadussa eroja verrattuna väkilannoitekontrolliin ja lannoittamattomaan käsittelyyn yhden kasvukauden aikana. Tutkimuksen aineisto saatiin HYKERRYYS-hankkeen (2016-2019) peltokokeesta kasvukaudella 2017. Tutkittavat kierrätyslannoitekäsitteilyt olivat lihaluujauho mikrobilisällä, ammoniumsulfaatti, mädätejäännös täydennettynä ravinnelisällä sekä kiinteä matokomposti täydennettynä matokompostiuutteella. Koeruuduilta ennen puintia kerätyistä kasvustonäytteistä laskettiin pääversojen ja sivuversojen määrä, röyhyjen ja jyvien osuus kasveista, jyväsato, satoindeksi sekä maanpäällinen biomassa. Kasvustonäytteistä laskettuja satoja verrattiin puituihin satoihin ja käsittelyiden tuottamat typpisadot laskettiin.</p> <p>Tutkituista käsittelyistä mädätysjäännöksen, ammoniumsulfaatin ja lihaluujauhon sadot olivat väkilannoitekontrollin veroisia. Matokompostikäsitteily ei eronnut satokomponenttien tai sadon suhteen lannoittamattomasta käsittelystä. Muut kierrätyslannoitteet olivat väkilannoitteen veroisia myös kasvuston muodostuksen, röyhyjen ja jyvien määrän ja jyväpainon suhteen. Suurin biomassa saatiin ammoniumsulfaattikäsitteilyllä. Lannoittamaton kontrolli tuotti viljavalla maalla hyvän sadon, ja erot kierrätyslannoitteisiin verrattuna jäivät pieniksi. Tulosten perusteella voidaan sanoa, että matokomposti poisluettuna kierrätyslannoitteiden sadonmuodostus ja sadon laatu ei eroa väkilannoitekäsitteilystä. Koekenttä oli kuitenkin jo kokeen aloitusajankohtana valmiiksi multava ja ravinteikas, mikä rajoittaa tämän tutkimuksen yleistettävyyttä samankaltaisen ravinnetilan omaaville peltolohkoille.</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords ravinteiden kierrätys, kiertotalous, lannoitus, satokomponentit, sadonmuodostus, biotalous			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited Maataloustieteiden laitos ja Viikin kampuskirjasto			
Muita tietoja — Övriga uppgifter — Further information Työtä ohjasivat agroekologian professori Juha Helenius ja kasvinviljelytieteen yliopistolehtori Priit Tammeorg			

HELSINGIN YLIOPISTO — HELSINGFORS UNIVERSITET — UNIVERSITY
OF HELSINKI

Tiedekunta/Osasto — Fakultet/Sektion — Faculty Faculty of Agriculture and Forestry		Laitos — Institution — Department Department of Agricultural Sciences	
Tekijä — Författare — Author Mari Unnbom			
Työn nimi — Arbetets titel — Title Yield formation of oat (<i>Avena sativa</i> L. 'Obelix') fertilized with four recycled fertilizers			
Oppiaine — Läroämne — Subject Agroecology			
Työn laji — Arbetets art — Level M. Sc. Thesis		Aika — Datum — Month and year November 2019	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages 71 p.
Tiivistelmä — Referat — Abstract <p>Finland has committed to goals related to increased nutrient recycling and acting as a model nation of nutrient recycling. Annually over 21 million tons of organic biomasses, such as manure and organic sludges from municipal wastes and side streams from industries are formed in Finland. Food production's dependency on imported chemical fertilizers and non-renewable natural resources could be reduced by utilizing these nutrient rich masses. Fertilizers and soil amendments refined from recycled materials differ according to the raw material and methods of treatment. These factors define the physical form, nutrient content and quantity of organic matter of these materials. The main difference with organic and inorganic fertilizers is related to the share of plant available, soluble nutrients in which inorganic fertilizers have an advantage. Organic nutrients require mineralization. Studies show, that it is possible to achieve corresponding yields with fertilizers containing recycled nutrients and mineral fertilizers. However, among other things more studies are needed for better evaluation of the long-term effects of these products.</p> <p>The aim of this thesis was to study how different recycled fertilizers affect the yield formation of oat compared to unfertilized control and chemical fertilizer control. The data was collected from HYKERRYS-project's (2016-2019) field experiment in growing season 2017. The recycled fertilizer treatments were ammonium sulphate, meat and bone meal pellet with microbial supplement, biogas sludge with nutrient supplement and solid vermicompost with vermicompost extract supplement. Oat plant samples were collected from the experimental plots right before harvest. Number of main and side shoots, panicles and seeds from shoots, grain yield, harvest index, above ground biomass was calculated from the results of the yield component separation. Yields from the yield component separation were compared to harvested yields and nitrogen yields was calculated.</p> <p>Yields from biogas residue treatment, meat and bone meal treatment and ammonium sulphate treatment did not differ from chemical fertilizer control. Yield component formation or yield of vermicompost treatment did not differ from unfertilized control. Ammonium sulphate treatment gave the greatest biomass. Yield formation of the recycled fertilizer treatments with higher nitrogen application rates than given in vermicompost did not differ from chemical fertilizer. However, yield from the unfertilized control was relatively high because of the good nutrient content in the soil before the experiment was started and differences between unfertilized control and recycled fertilizer treatments remained small. Hence the results of this study can be applied only to soils with similar nutrient composition and fertility.</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords circular economy, nutrient recycling, yield components, fertilization, yield formation			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited Department of Agricultural Sciences and Viikki Campus Library			
Muita tietoja — Övriga uppgifter — Further information Supervisors: professor Juha Helenius and University Lecturer in Crop Science Priit Tammeorg			

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	3
2 RAVINTEIDEN KIERRÄTTÄMINEN ALKUTUOTANNOSSA OSANA KIERTOTALOUTTA	4
2.1 Kiertotalous	4
2.1.1 Kiertotalouden toimintaympäristö ja ohjauskeinot.....	6
2.1.2 Kierrätettävien ravinteiden lähteet	7
2.1.3 Orgaaniset haitta-aineet kierrätettävissä biomassossa	12
2.2 Kierrätyslannoitteet osana kestäviä viljelymenetelmiä	13
2.3 Kauran sadonmuodostus	17
2.3.1 Kasvuolot	17
2.3.2 Viljelymenetelmien vaikutus kauran sadonmuodostukseen	19
3 TUTKIMUKSEN TAVOITTEET	22
4 AINEISTO JA MENETELMÄT	22
4.1 Kenttäkoe ja koejärjestelyt	22
4.1.1 Koelohkon viljavuus	26
4.1.2 Viljelykierto ja tutkimuksen kasvimateriaali	27
4.1.3 Kasvukauden aikaiset toimenpiteet	28
4.1.4 Lannoitus	29
4.2 Kasvukauden sääolot	32
4.3 Aineiston kerääminen ja käsittely	32
4.5 Tilastolliset menetelmät	34
5 TULOKSET	35
5.1 Satokomponentit	35
5.1.1 Väkilannoitekäsittely verrattuna lannoittamattomaan	35
5.1.2 Kierrätyslannoitekäsittelyt verrattuna väkilannoitekäsittelyyn.....	36
5.1.3 Lannoittamaton käsittely verrattuna kierrätyslannoitekäsittelyihin.....	38

5.2 Jyvästo	40
5.2.1 Väkilannoitekasittely verrattuna lannoittamattomaan	40
5.2.2 Kierrätyslannoitekasittelyt verrattuna väkilannoitekasittelyyn.....	40
5.2.3 Lannoittamaton käsittely verrattuna kierrätyslannoitekasittelyihin.....	41
5.3 Kasvuston biomassa.....	42
5.3.1 Väkilannoitekasittely verrattuna lannoittamattomaan	42
5.3.2 Kierrätyslannoitekasittelyt verrattuna väkilannoitekasittelyyn.....	43
5.3.3 Lannoittamaton käsittely verrattuna kierrätyslannoitekasittelyihin.....	44
5.4 Sadon laatu	46
5.5 Typpisato	47
6 TULOSTEN TARKASTELU	48
6.1 Sadon määrä.....	48
6.2 Sadonmuodostus ja laatu.....	51
7 JOHTOPÄÄTÖKSET	52
KIITOKSET.....	54
LÄHTEET	55

1 JOHDANTO

Nykyinen lineaaritalouteen läheisesti kytkeytynyt ruokajärjestelmä ei pysty vastaamaan tulevaisuuden kestävyysaasteisiin, sillä ruuantuotanto on hyvin riippuvainen uusiutumattomista raaka-aineista energian (Dalgaard ym. 2001) ja lannoitteiden (Nykänen ym. 2012) suhteen. Maatalous on myös merkittävä kasvihuonekaasujen lähde (Vermeulen ym. 2012) sekä negatiivisten ympäristövaikutusten, kuten maaperän köyhtymisen (Lal 2015) ja luonnon monimuotoisuuden vähene-
misen (Butler ym. 2007) aiheuttaja. Planeettarajat, ihmiskunnan toiminnalle ja kehitykselle määritetyt turvalliset toimintarajat ympäristön sietokyvyn rajoissa, ovat ylittyneet jo muun muassa luonnon monimuotoisuuden ja typen kierron osalta (Steffen ym. 2015), ja ilmastomuutos on merkittävä uhka tulevaisuuden ruuantuotannolle (Howden ym. 2007). Ruuantuotannon järjestelmien on siirryttävä kestäviin ratkaisuihin tulevaisuuden ruokajärjestelmän turvaamiseksi.

Ravinteiden kierrätys on yksi kiertotalouden keskeisistä tavoitteista (MacArthur 2013). Jätteen määrän vähentämisellä ja kierrätystä tehostamalla voidaan vähentää riippuvuutta neitseellisistä raaka-aineista ja vastata sekä talouskasvun että ympäristönsuojelun tavoitteisiin (Euroopan komissio 2011, Lieder ja Rashid 2016). Ravinteiden kierrätys ei ole maataloudessa uusi toimintatapa. Amazonin sademetsän alkuperäisasukkaat lisäsivät jo 2000 vuotta sitten viljelysmailleen puuhiiltä, lantaa ja luita humusköyhän maan kasvukunnon parantamiseksi (Denevan 1996), ja ennen kaupallisten lannoitteiden aikaa ravinteet ovat kiertäneet ruokajärjestelmässä pääosin lannan mukana.

Nykyiset kierrätyslannoitteet ovat kuitenkin laaja joukko ominaisuuksiltaan eroavia tuotteita, joiden markkinat ovat vielä kehittymättömät (Seppänen ym. 2018). Kierrätyslannoitteiden käytön yleistyminen kasvintuotannossa edellyttää muun muassa niiden jalostusasteen ja prosessoinnin parantamista (Holm-Nielsen ym. 2009, Marttinen ym. 2017), markkinoiden ohjaamista kierrätysravinteita suosivaksi (Seppälä ym. 2016) ja tutkimusta niiden toimivuudesta kasvintuotannossa.

Tässä tutkimuksessa selvitettiin, onko kierrätyslannoitevalmisteilla lannoitetun kauran sadonmuodostuksessa ja sadon laadussa eroja kierrätyslannoitteiden välillä ja verrattuna väkilannoitettuun ja lannoittamattomaan käsittelyyn. Lisäksi tutkittiin, onko kierrätyslannoitteiden tuottamissa typpisadoissa eroja kierrätyslannoitevalmisteiden välillä tai verrattuna kontrollikäsittelyihin. Tutkimusaineisto saatiin Hyvän sadon kierrätyslannoitus-hankkeesta (HYKERRYYS), jota rahoittivat vuosina 2016-2019 Euroopan maaseudun kehittämisrahasto ja hankkeen yhteistyökumppanit Soilfood Oy, Ecolan Oy, Helsingin seudun ympäristöpalvelut HSY sekä Tuhala Bio Oü.

2 RAVINTEIDEN KIERRÄTTÄMINEN ALKUTUOTANNOSSA OSANA KIERTOTALOUTTA

2.1 Kiertotalous

Kiertotaloudella tarkoitetaan talousjärjestelmää, jossa tuotteisiin niiden valmistuksen aikana sidottu arvo ja käytetyt luonnonvarat pyritään pitämään mahdollisimman pitkään tuottavassa käytössä eli kierrossa (Salminen ym. 2017). Kiertotalouden keskeisiä tavoitteita ovat jätteen määrän vähentäminen, tuotteiden ja materiaalien kestävä valmistaminen, huolto ja uudelleen käyttäminen (Aho ym. 2015), sekä jätteen syntymisen välttäminen ja tuotteiden lisäarvon säilyttäminen (Euroopan komissio 2014). Biotalous, vihreän kasvun ja talouden sekä jakamistalouden käsitteet liittyvät läheisesti ja ovat osittain päällekkäisiä kiertotalouden käsitteen kanssa, sillä ne jakavat samoja periaatteita (Seppälä ym. 2016). Ruokajärjestelmän kontekstissa yksi merkittävimmistä kiertotalouden sovelluksista on uusiutumattomien luonnonvarojen käytön vähentäminen ruuan alkutuotannossa lisäämällä ravinteiden kierrätystä hyödyntäen ravinteikkaita biomassoja ja sivuvirtoja.

Kiertotalouden ratkaisut ovat avainasemassa ilmastonmuutoksen hillitsemisessä ja kestäväen kehityksen tavoitteiden toteutumisessa, mutta materiaalien uusiokäyttö on maailmanlaajuisesti tarkasteltuna vielä vähäistä. Vain 9 % maail-

manmarkkinoille vuosittain tulevasta 92,8 miljardista tonnista mineraaleista, biomassoista, metalleista ja fossiilisia raaka-aineista koostuvasta materiaalivirrasta päätyy uudelleen käytettäväksi (de Wit ym. 2018, de Wit ym. 2019). Näiden materiaalien käyttöönnotosta, prosessoinnista ja niistä johdettujen tuotteiden valmistuksesta on arvioitu muodostuvan 62% vuosittaisesta globaaleista hiilidioksidipäästöistä, joten tämän kierrätyskuilun (circularity gap) kaventamisella olisi merkittävä vaikutus muun muassa Pariisin ilmastopimuksen sekä YK:n vuonna 2015 julistettujen kestävän kehityksen SDG-tavoitteiden saavuttamisessa (de Wit ym. 2019).

Resurssitehokkuus on tärkeä osa kiertotaloutta. Luonnonvarat ja materiaalipanokset ovat valmistavan teollisuuden huomattava kustannustekijä ja tuotannon jätteet puolestaan merkittävä kustannuserä kaikille yhteiskunnan osapuolille, kuluttajalle, yrityksille, kolmannen sektorin toimijoille sekä hallinnolle (Seppälä ym. 2016). Resurssitehokkuus tarkoittaa käytännössä luonnonvarojen ja muiden materiaalien tehokkaampaa käyttöä tehostamalla tuotantoprosesseja, logistiikkaa ja uudelleenvalmistusta sekä edistämällä sivutuotteiden ja jättemateriaalien hyödyntämistä (Koskela ym. 2013). Kansantalouden näkökulmasta resurssitehokkuuden parantaminen ja materiaalivirtojen sulkeminen tuottaisi Sitran, Suomen itsenäisyyden juhluvuoden rahaston vuonna 2014 tekemän arvion mukaan merkittävää taloudellista hyötyä ja kilpailukyvyyn parantumista (Arponen ym. 2014).

Lisääntyneessä resurssitehokkuudessa on kuitenkin Jevonsin paradoksin vaara: englantilaisen taloustieteilijän William Stanley Jevonsin (1835-1882) vuonna 1865 esittämän teorian mukaan materiaalin käytön tehostamisella saavutettu resurssitehokkuus johtaa ennemmin kyseisen materiaalin kulutuksen lisääntymiseen kuin käytön vähentymiseen (Polimeni ym. 2009). Materiaalin käytön teknologian kehittymisestä ja resurssitehokkuuden paranemisesta saavutetut hyödyt voivat siis pahimmillaan johtaa heijastusvaikutuksen (rebound-efektin) kautta lisääntyneisiin negatiivisiin ympäristövaikutuksiin kyseisen materiaalin kulutuksen kasvaessa (Arponen ym. 2014).

Hiilineutraalia kestävän kehityksen periaatteiden mukaista yhteiskuntaa tavoiteltaessa kiertotalous ei ole yksinään riittävä ratkaisu. Talouskasvu on 1900-luvulla

perustunut kestävämpään luonnonvarojen käyttöön, mutta vihreän talouden kehityksen kannalta on olennaista, että talouskasvu ja haitalliset ympäristövaikutukset saadaan kytkettyä irti toisistaan puhtaiden ratkaisuiden ja toimintamallien avulla (Seppälä ym. 2014). Maataloudella on tärkeä rooli näiden tavoitteiden saavuttamisessa yhdyskuntien ja teollisuuden alojen jätteiden ja sivuvirtojen hyödyntäjänä sekä bioenergian raaka-aineen tuottajana (Aho ym. 2015).

EU:ssa sekä useassa suuressa teollisuusmaassa kansallisella tasolla on ryhdytty toteuttamaan biotaloutta edistäviä politiikkatoimia. Suomen kansallisen biotalousstrategian tavoitteina on luoda talouskasvua, uusia työpaikkoja sekä vähentää talouden riippuvuutta fossiilisista luonnonvaroista nostamalla Suomi kansainväliseksi biotalouden ja puhtaiden ratkaisuiden edelläkävijäksi (TEM, MMM ja YM 2014). Kiertotalouden tarjoaman vuotuisen kasvupotentiaalin on arvioitu olevan noin 1,5- 2,5 miljardia Suomen kansantaloudelle vuoteen 2030 mennessä (Arponen ym. 2014) ja Euroopassa kiertotalouden arvon on arvioitu olevan 570 miljonna euroa vuosittain (Seppälä ym. 2016). Biotalousstrategian tavoitteena on kasvattaa Suomen biotalouden tuotos 100 miljardiin euroon vuoteen 2025 mennessä (TEM, MMM ja YM 2014).

2.1.1 Kiertotalouden toimintaympäristö ja ohjauskeinot

Siirtymisessä lineaaritaloudesta kiertotalouteen on vielä useita esteitä ja hidasteita (Seppälä ym. 2016). Nykyinen talousjärjestelmämme on rakentunut luonnonvarojen edullisuuteen perustuvan lineaaritalouden varaan ja kiertotalouteen siirtyminen vaatii sektori- ja toimialarajoja ylittävää rakenteellista muutosta (Sitra 2016). Nykyisiä lineaaritalouden rakenteita ylläpitävät muun muassa hallinnollinen infrastruktuuri ja sen lainsäädäntö, verorakenteet ja ohjauskeinot (Salminen ym. 2017). Kierrätysmateriaalien korkea hinta neitseellisiin materiaaleihin verrattuna voi olla merkittävä hidaste kierrätysmateriaalin käytön yleistymiselle. Esimerkiksi jätevesistä erotetun fosforin hinta on edullisimmallakin talteenottomenetelmällä kaksinkertainen neitseelliseen fosforiin verrattuna (Berninger ym. 2017). Toisaalta apatiittivarantojen rajallisuus ja keskittyminen muutamaan alueelliseen sijaintiin voi tulevaisuudessa vaikeuttaa mineraalifosforin saatavuutta ja

aiheuttaa voimakkaita hinnanvaihteluja (Valkama ym. 2011), mikä voi edistää kierrätetyn fosforin käyttöä.

Talousjärjestelmää voidaan ohjata kohti kiertotaloutta poliittisten ja taloudellisten ohjauskeinojen avulla (Seppälä ym. 2016). Tuilla, lainsäädännöllä ja verotuksella markkinoita voidaan ohjata kohti haluttua suuntaa (Seppälä ym. 2016). Esimerkiksi luonnonvaroihin kohdistuvalla verotuksella, jossa niiden käyttöönoton ulkoisvaikutukset sisällytetään kustannuksiin, markkinoita voidaan ohjata kierrätystä suosiviksi, jolloin jätteiden ja sivuvirtojen tuotteistamisen kiinnostavuus kasvaa (Tikkanen ym. 2018). Ympäristölainsäädännön muutos vuosituhaten vaihteessa rajoitti biojätteen kaatopaikkasijoittamista, mikä loi tarpeen perustaa biomassolle käsittelylaitoksia ja pohtia niiden hyödyntämismahdollisuuksia (Marttinen ym. 2013).

Kiertotaloutta edistävien innovaatioiden ja teknologioiden kehitystä voidaan edesauttaa tukemalla tutkimusta ja kehitystyötä (Tikkanen ym. 2018). Esimerkiksi investointituilla voidaan tukea biokaasulaitosten rakentamista, jolloin maatalouden biomassoja hyödynnetään bioenergian tuotannossa ja samalla edistetään ravinteiden kierrättämistä (Seppälä ym. 2016). Ohjauskeinojen ja politiikkatoimien keskeisenä tavoitteena on luoda kiertotaloudelle suotuisa ja kannustava toimintaympäristö (Sitra 2016).

2.1.2 Kierrätettävien ravinteiden lähteet

Määrältään ja ravinnepitoisuuksiltaan merkittävimmät orgaaniset kierrätyslannoitevalmisteiden raaka-aineet syntyvät maataloudessa, metsä- ja elintarviketeollisuudessa sekä yhdyskuntajätteiden prosessoinnissa (Tampio ym. 2018). Suomessa muodostuu vuosittain yli 21 miljoonaa tonnia lannoitteina tai maanparannusaineina hyödynnettävissä olevia biomassoja, jotka sisältävät noin 95 000 tonnia typpeä ja 26 000 tonnia fosforia (taulukko 1) (Marttinen ym. 2017). Suomen pelloille levitetään väkilannoitteina vuosittain 11 000 tonnia fosforia ja 152 000 tonnia typpeä (Marttinen 2017). Kierrätysfosfori riittäisi kattamaan vuosittaisen lannoitustarpeen yli kaksinkertaisesti ja kierrätetyllä työllä voitaisiin korvata yli

puolet väkilannoitetypeistä, jos biomassojen ravinteet saataisiin hyödynnettyä täysmääräisesti. Kierrätysravinteina ja kierrätyslannoitteiden valmistuksessa voidaan käyttää myös epäorgaanisia sivuvirtoja ja jätteitä, kuten fosforihappoteollisuuden sivutuotteena muodostuvaa kipsiä (Ekholm ym. 2011), alkaliparistojen kierrätyksestä talteen otettua mangaania ja sinkkiä (Deep ym. 2011), tuhkalannoitteita (Pesonen ym. 2017) ja jätevesistä kemiallisella talteenottotekniikalla erotettua ammoniumsulfaattia (Tampio ym. 2018).

Suurin osa vuosittain muodostuvasta biomassamäärästä on kotieläinten lantaa. Pelkästään lannan sisältämä fosfori riittäisi kattamaan koko Suomen vuosittaisen kasvintuotannon vaatiman fosforilannoituksen (Ylivainio ym. 2014). Lannan hyödyntämistä vaikeuttaa sen alueellinen keskittyminen ja lannan korkea fosforipitoisuus, mikä rajoittaa sen peltokohtaista levitysmäärää. Suomen maatalous on jakautunut alueellisesti tuotantosuuntien mukaisesti. Kotieläintuotanto on painotunut Itä- ja Pohjois-Suomeen, kun taas kasvinviljelytiloja on eniten Etelä-Suomessa (Niemi ja Väre 2017). Lantaa tai muita runsaasti vettä sisältäviä kierrätysravinnejakeita ei ole taloudellisesti kannattavaa kuljettaa pitkiä matkoja. Kuljetus- ja levityskustannukset ovat riippuvaisia käytettävästä kalustosta, mutta keskimääräinen lietelantakuutiometrin levityskustannus yhden kilometrin matkalla on kahden euron luokkaa (Luostarinen ym. 2011). Kustannukset, tuotantosuuntien alueellinen jakautuminen ja fosforin määrä lannassa on aiheuttanut tilanteen, jossa kotieläintuotannon keskittymissä lanta on ongelma, mutta kasvintuotantotiloille se olisi tervetullutta.

Myös muiden merkittävien biomassojen alueellinen jakautuminen on epätasaista. Puhdistamolietteitä ja biojätettä syntyy eniten suurimpien väestötiheyksien alueilla, Uudellamaalla ja Kaakkois-Suomessa (Marttinen ym. 2017). Elintarviketeollisuuden sivuvirrat ovat keskittyneet Etelä-Pohjanmaalle ja metsäteollisuuden lietteet Pirkanmaan ja Kaakkois-Suomen alueelle (Marttinen ym. 2017). Kierrätysravinteiden kustannustehokas hyödyntäminen edellyttääkin alueellisia jalostuskonsepteja (Tampio ym. 2018, Marttinen ym. 2017). Esimerkiksi biomassojen mädätys biokaasulaitoksissa mahdollistaa paikallisen bioenergiantuotannon sekä ravinteiden hyödyntämisen mädätysjäännöksenä tai jatkojalostettuna kierrätysravinnevalmisteiksi (Luostarinen ym. 2019). Biokaasutusprosessissa raaka-aineen

orgaanista tyypeä mineralisoituu kasveille käyttökelpoiseksi ammoniumtypeksi (NH_4^+), jolloin kasveille käyttökelpoisen liukoisen typen osuus kasvaa (Möller ja Stinner 2008).

Taulukko 1. Suomessa vuosittain syntyvien biomassojen lähteet, määrät (t/v) sekä niiden sisältämät kokonaistypen ja -fosforin määrät (mukaillen Marttinen ym. 2017)

Lähde	Määrä	P	N
Kotieläinten lanta (naudat, siat, siipikarja, lampaat, turkiseläimet, hevoset, vuohet)	17 300 000	19 300	75 600
Nurmi (kesanto- ja luonnonhoitopellot, suojavyöhykkeet)	1 510 000	2 540	7 060
Biojäte (asutus ja teollisuus)	809 000	730	5 340
Puhdistamolietteet (asutus ja teollisuus)	667 000	2 880	3 740
Metsäteollisuuden lietteet (kuitu-, pasta-, puhdistamo- ja siistaus-lietteet)	578 000	230	1 160
Elintarviketeollisuuden sivuvirrat (jalostus ja prosessointi)	259 000	360	2 070
Yhteensä	21 123 000	26 040	94 970

Biomassoja voidaan prosessoida ja jalostaa teknisesti niiden ominaisuuksien mukaan. Tekniikat voidaan jakaa esikäsitteilyyn, prosessointiin ja jalostamiseen (Tampio 2018). Käytettyjä menetelmiä on kuvattu taulukossa 2. Esitettyjen menetelmien lisäksi kehitteillä on useita tekniikoita, joilla voidaan muun muassa parantaa fosforin erottamista ja käyttökelpoisuutta jätevesilietteissä (Tampio ym. 2018). Kehittyneiden menetelmien tarve on suuri, jotta pääministeri Sipilän hallitusohjelmassa asetettu tavoite saada vähintään 50% jätevedenpuhdistamojen lietteistä kehittyneen prosessoinnin piiriin vuoteen 2025 mennessä saavutetaan

(Ympäristöministeriö 2016). Korkea fosforipitoisuus rajoittaa useimpien biomassojen hyödyntämistä kasvintuotannossa, joten kehittyneet prosessointimenetelmät laajentavat näiden jakeiden käyttömahdollisuuksia (Marttinen ym. 2017).

Kierrätyslannoitteiden on täytettävä lannoitevalmistelainsäädännön vaatimukset, jossa muun muassa määritellään raja-arvot lannoitevalmisteiden raskasmetalleille, jotta niitä voidaan markkinoida lannoitteina (Marttinen ym. 2017). Jalostettujen kierrätyslannoitteiden on ominaisuuksiltaan myös vastattava käyttäjien tarvetta, jotta niille muodostuu kannattavia markkinoita (Seppänen ym. 2018). Olennaisia asioita käytännön viljelyn kannalta viljelijälle kierrätyslannoitteen valinnassa ovat esimerkiksi ravinnepitoisuudet ja niiden suhteet, hiilen ja typen suhde, jakeen olomuoto sekä levitystekniikka ja -kustannukset (Seppänen ym. 2018).

Taulukko 2. Biomassojen esikäsitteilyyn, prosessointiin ja jalostukseen käytettyjä menetelmiä (Tampio ym. 2018, Seppänen ym. 2018).

Menetelmä	Kuvaus
Esikäsitteily	
Murskaus	Partikkelikoon säätäminen käsittelyn ja biologisten reaktioiden helpottamiseksi.
Seulonta	Epäpuhtauksien ja hajoamattomien materiaalien poistaminen sekä partikkelikoon optimointi.
Hygienisointi	Kuumennus tai painesterilointi lainsäädännön vaatimusten mukaisesti.
Prosessointi	
Kompostointi	Orgaanisen aineksen mikrobiologinen hajotus hapellisissa olosuhteissa.
Mädätys	Orgaanisen aineksen mikrobiologinen hajotus hapettomissa olosuhteissa.
Kuivaus	Veden poistaminen käsiteltävyyden, hygienian ja kuljetettavuuden parantamiseksi.
Hydrolyysi	Jätevesilietteiden pH lasketaan rikkihapolla, hapetetaan vetyperoksidilla ja neutralisoidaan natriumhydroksidilla vedenerotuksen helpottamiseksi. Hygienisoiva menetelmä.
Kalkkistabilointi	pH:n ja lämpötilan nostaminen poltetulla kalkilla materiaalin hygienisoimiseksi.
Jalostus	
Separointi	Massan erottelu nestejakeeseen ja kiinteään jakeeseen.
Poltto	Kuivajakeen orgaanisen aineksen polttaminen termisessä hapetusprosessissa.
Pyrolyysi	Kuivajakeen orgaanisen aineksen kuumentaminen anaerobisissa olosuhteissa.
Rakeistus	Materiaalin mekaaninen tiivistäminen pelletiksi käytön helpottamiseksi ja laadun parantamiseksi.
Haihdutus	Nestejakeen väkevöinti haihduttamalla materiaalista vettä.
Strippaus	Ammoniumtyypen erotus nesteestä. Lämpötilaa ja pH:ta alentamalla ja ilmapuhalluksen avulla muodostunut ammoniakki pestään rikkihappoon. Lopputuotteena ammoniumsulfaattia.

2.1.3 Orgaaniset haitta-aineet kierrätettävissä biomassoissa

Suurimmat riskit kierrätyslannoitteiden, maanparannusaineiden ja kompostien käytössä liittyvät niiden mahdollisesti sisältämiin haitta-aineisiin, jotka voivat kertyä maaperään, eliöihin ja vesistöihin (Kasurinen ym. 2014). Suurin haitta-aineriski on maataloudessa, yhdyskuntajätevesien puhdistuksessa ja teollisuuden prosesseissa syntyvissä lietteissä (Kasurinen ym. 2014) sekä biokaasulaitosten lopputuotteissa (Marttinen ym. 2013). Lietteiden hyötykäyttöä voivat estää esimerkiksi korkeat raskasmetallipitoisuudet, orgaaniset haitta-aineet tai taudinaiheuttajat (Kasurinen ym. 2014). Orgaanisten haitta-aineiden ryhmä sisältää muun muassa lääkeaineita, palonestoaineita ja muoviperäisiä aineita (Kasurinen ym. 2014). Haitallisille ja pysyville orgaanisille haitta-aineille ei ole vielä nykyisessä lainsäädännössä asetettu raja-arvoja (Vieno ym. 2018).

Lietteiden sisältämien haitta-aineiden määrä riippuu niiden raaka-aineista (Marttinen ym. 2013). Jätevesissä esiintyvät orgaaniset haitta-aineet kuvaavat viemärintialueen maankäyttöä, teollisuutta ja asukkaiden käyttäytymistottumuksia (Vieno ym. 2018). Haitta-aineiden tutkimus lietteistä on haastavaa, sillä mahdollisten haitta-aineiden kirjo on laaja ja niiden sitoutuminen lietteisiin riippuu sekä kyseessä olevan aineen että lietteen ominaisuuksista (Vieno ym. 2018). Suomen ympäristökeskuksen selvityksen mukaan orgaanisten haitta-aineiden pitoisuudet puhdistamolietteisä vaihtelevat yhdisteryhmästä riippuen, ja joidenkin yhdisteiden kohdalla määritettyjä pitoisuustuloksia ei ole tarpeeksi, jotta niiden merkitystä lietteiden hyötykäytölle voitaisiin arvioida luotettavasti (Kasurinen ym. 2014).

Taudinaiheuttajien aiheuttamat riskit liittyvät niiden kykyyn selviytyä lietteiden käsittelyprosesseista (Marttinen ym. 2013). Ihmis-, eläin- ja kasvipärisille taudinaiheuttajille on asetettu enimmäismäärät kansallisessa lainsäädännössä sekä sivutuoteasetuksessa (Vieno ym. 2018). Jakeiden käsittelyprosesseissa taudinaiheuttajien aiheuttamaa riskiä minimoidaan lämpökäsittelyillä ja niiden tuhoutumisessa merkittävimmät tekijät käsittelyprosesseissa on lämpötila- ja aika (Vieno ym. 2018).

Puhdistamolietteitä koskevan selvityksen (Kasurinen ym. 2014) sekä biokaasulaitosten lopputuotteita koskevan selvityksen (Marttinen ym. 2013) mukaan lietteiden hyötykäytön riskiarviointiin tarvitaan lisää tutkimustietoa muun muassa yhdisteiden yhteisvaikutuksista ja kertymisestä maaperään ja eliöihin. Lisäksi lietteiden tutkimuksen näytteenottoon tarvitaan standardoituja menetelmiä, jotta tulokset olisivat paremmin vertailtavissa (Vieno ym. 2018). Tämän hetkisen lainsäädännön mukaan asianmukaisesti käsitellyjä lietteitä voidaan käyttää maataloudessa, eivätkä ne nykytiedon valossa aiheuta uhkaa elintarviketurvallisuudelle (Kasurinen ym. 2014, Marttinen ym. 2013, Vieno ym. 2018).

2.2 Kierrätyslannoitteet osana kestäviä viljelymenetelmiä

Ruokaa tuotetaan ihmisen muokkaamissa ekosysteemeissä, joiden ravinteiden kierto poikkeaa luonnon ekosysteemien suljetusta kierrosta, koska ravinteita poistuu luonnollisesta kierrosta esimerkiksi sadonkorjuun yhteydessä (Conway 1987). Agroekosysteemit ovat luonnon ekosysteemien tapaan riippuvaisia elämää ylläpitävistä ekosysteemipalveluista (Costanza ym. 1997), mutta ihminen on kestäättömillä viljelymenetelmillä, kuten runsaalla väkilannoitteiden ja torjunta-aineiden käytöllä heikentänyt näiden palvelujen toimintaa niin, että panosintensiivisen maatalouden kiistattomista tuotannollisista saavutuksista huolimatta tulevaisuuden väestön- ja kulutuksen kasvun kysyntään ei voida enää näillä keinoilla vastata (IPES-FOOD 2016). Panosintensiivinen tehomaatalous on tullut tiensä päähän, mutta tehokasta maataloutta on syytä tavoitella (Mueller ym. 2012, Tilman ym. 2002, IPES-FOOD 2016).

Ruuantuotannon kestäväällä tehostamisella tarkoitetaan toimia, joilla peltojen pinta-alakohtaista sadontuottokykyä nostetaan ekosysteemipalveluja kestävästi hyödyntäen (Garbach ym. 2017). Arvioiden mukaan ruuantuotannon olisi kaksinkertaistuttava vuoden 2005 tasosta vuoteen 2050 mennessä (Tilman ym. 2011). Tuotannon kaksinkertaistaminen on kuitenkin saavutettava lisäämättä maatalouden negatiivisia ympäristövaikutuksia (Tilman ym. 2002) ja samalla sopeutuen ilmastonmuutokseen (Mueller ym. 2012). Kierrätysravinteiden ja maanparannus-

aineiden käyttö on olennainen osa kestävästä tehostamisesta, ja yhdessä muiden kestävien viljelykäytäntöjen, kuten viljelykiertojen monipuolistamisen (Davis ym. 2012), muokkauksen vähentämisen (Wezel ym. 2014), maan hyvän rakenteen ja viljavuuden ylläpitämisen (Lal 2015) kanssa voidaan vähentää nykyisen teollisen maatalouden aiheuttamia ongelmia.

Maan viljavuudella tarkoitetaan sen kykyä toimia maan fysikaalisten, kemiallisten ja biologisten tekijöiden kautta kasveille kasvualustana sekä ravinteiden ja veden lähteenä (Heinonen ym. 1992). Maan orgaanisen aineksen määrä on viljavuuden perusta, jota ylläpitämällä ja lisäämällä voidaan parantaa ravinteiden saatavuutta kasveille ja maan rakennetta (Heikkinen ym. 2013), vähentää eroosiota (Paasonen-Kivekäs ym. 2009) ja tehostaa maan mikrobiologista toimintaa (Workneh ym. 1994). Maan orgaaninen aines voidaan jakaa kahteen luokkaan: biologista aktiivisuutta ylläpitävään kuolleista kasveista, eläimistä ja mikrobeista peräisin olevaan helposti hajoavaan ainekseen ja humukseen, joka on mikrobitoiminnan lopputuotteena syntyvää pitkäikäistä ja hajotusta kestävästä aineesta (Heinonen ym. 1992). Maan orgaaninen aines on maaperän hiilivarastojen perusta, johon on maailmanlaajuisen arvion mukaan sitoutunut kolminkertainen määrä hiiltä ilmakehän hiilipitoisuuteen verrattuna (Paustian ym. 2016).

Kestämättömien viljelymenetelmien, suolaantumisen ja eroosion seurauksena peltomaiden viljavuus on heikentynyt eri puolilla maailmaa (Montanarella ym. 2015). Myös Suomen peltomaan orgaanisen aineksen on osoitettu vähentyneen vertailujaksolla 1974–2009 keskimäärin 0,2–0,4% vuodessa, mikä käytännössä tarkoittaa sitä, että hiiltä poistuu peltomaista noin 220 kg/ha/a (Heikkinen ym. 2013). Lisäämällä runsaasti orgaanista ainesta sisältäviä maanparannusaineita voidaan jo kertalevityksellä lisätä maahan useita tonneja hiiltä (Paustian ym. 1992). Viljelymenetelmiä, joilla lisättyä hiiltä ylläpidetään maassa ja jotka edelleen kartuttavat maaperän hiilivarastoja, ovat monipuolinen viljelykierto, kerääjäkasvien käyttö ja talviaikainen kasvipeitteisyys (Paustian ym. 2016) sekä maan muokkaamisen vähentäminen (Powlson ym. 2012).

Kierrätetyistä raaka-aineista peräisin olevan orgaanisen aineksen lisäämisen pelto- maahan on todettu lisäävän maan mikrobi- ja entsyymiaktiivisuutta ja paranta- van maan rakennetta (Ros ym. 2003, Melero ym. 2007, Odlare ym. 2014), kemi- allista tilaa (Melero ym. 2007) vedenpidätyskapasiteettia (Barzegar ym. 2002) ja maanmurujen kestävyyttä (Soinne ym. 2014). Maaperän parantunut biologinen, fysikaalinen ja kemiallinen tila puolestaan luo hyvät edellytykset peltokasvien sa- donmuodostukselle.

Typpi on useimmissa ekosysteemeissä kasvua rajoittava tekijä, sillä sitä on luon- nossa kasveille käyttökelpoisessa muodossa hyvin rajallisesti (Gruber ja Gallo- way 2008). Kasvit voivat hyödyntää lannoitteessa annetun typen vain liukoisessa muodossa, ammoniumina (NH_4^+), nitraattina (NO_3^-) tai ureana ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$), joten orgaanisen typen on käytävä läpi maaperämikrobiston hajotusprosessi, jotta typpi mineralisoituu kasvien hyödynnettäväksi (Paustian 1992). Tilanteessa, jossa lan- noitteessa on runsaasti hiiltä verrattuna typpeen maaperämikrobisto kuluttaa maanesteen liukoista typpeä aineksen hajotustoimintaan ja omaan kasvuunsa, jol- loin typpi immobilisoituu ja kasvit voivat lannoituksesta huolimatta kärsiä typen puutteesta (Senesi 1989). Käytettäessä orgaanisia lannoitteita on otettava huomi- oon niiden liukoisen ja orgaanisen typen suhde sekä hiilen ja typen suhde. Liu- koisessa muodossa olevien typpiyhdisteiden haihtumista ja huuhtoutumista voi- daan vähentää rakeisten lannoitteiden sijoituslannoituksella ja nestemäisten jakei- den välittömällä multauksella, huolehtimalla maan hyvästä rakenteesta ja lannoi- tuksen oikealla ajoituksella (Amberger 1993).

Ravinteiden, erityisesti typen, saatavuudella on merkittävä vaikutus viljakasvien satopotentiaalini täyttymiseen (Peltonen-Sainio 1991). Justus von Liebigin mini- milakiteorian mukaan sadon määrä riippuu siitä kasvutekijästä, jota on vähiten saatavilla (van der Ploeg ym. 1999). Kasvit tarvitsevat 16 eri ravinnettä kasvuun ja kehitykseen, ja kaikilla ravinteilla on omat tehtävänsä, joita muut ravinteet eivät voi korvata (Marschner ja Marschner 2012). Kaikkia ravinteita tarvitaan sopi- vassa suhteessa. Lannoituksen suunnittelussa otetaan huomioon maaperässä en- nestään olevat ravinteet (Marttinen ym. 2017). Lannoituksen tulisi aina perustua satovasteisiin ja taloudelliseen kannattavuuteen, sillä lannoitustarpeen ylittävät

ravinteet, erityisesti fosforin ja typen osalta kuormittavat vesistöjä (Valkama ym. 2011)

Orgaanisista raaka-aineista jalostetuilla lannoitteilla on mahdollista tutkimusten mukaan saavuttaa väkilannoitekontrollien veroisia satoja. Biokaasutusprosessin lietemäisillä mädätejäännöksillä on saatu tilastollisesti yhtä suuria satoja muun muassa Praysin ja Kaupenjohannin (2016) ja Odlaren ym. (2014) peltokokeissa ohralla ja Chantignyn ym. (2007) peltokokeessa timoteilla. Lihaluujauhokäsittelyillä on saatu väkilannoitekontrolleja vastaavia satoja peltokokeista kevätvehnällä Norjassa (Jeng ym. 2004), syysvehnällä ja syysrapsilla Puolassa (Nogalska ym. 2014) sekä kauralla Ylistarolla (Chen ym. 2011). Astiakokeissa on saatu vastaavia tuloksia ohralla (Jeng ym. 2006) ja vehnällä (Haraldsen ym. 2011). Mantovin ym. (2005) tutkimuksessa yhdyskuntajätteitä ja teollisuuden orgaanisia kompostikäsittelyt olivat väkilannoitteen veroisia.

Svenssonin ym. (2004) tutkimuksessa ohran sadot mädätejäännöksellä olivat peltokokeessa yhtä suuria väkilannoitekontrollin kanssa mutta kauralla sadot eivät eronneet lannoittamattomasta. Tammeorgin ym. (2014) lihaluujauholla Suomessa tehdyssä tutkimuksessa kevätvehnän sato oli tilastollisesti merkitsevästi pienempi kuin väkilannoitekäsittelyllä, mutta merkitsevästi suurempi kuin lannoittamattoman kontrollikäsittelyn. Odlaren ym. (2011) sekä Praysin ja Kaupenjohannin (2016) kokeissa kiinteiden mädätefraktioiden sadot eivät eronneet lannoittamattomasta kontrollista. Vagstadin ym. (2001) tutkimuksessa paperiteollisuuden sivuvirroilla, erityisesti kalkkistabiloidulla lietteellä havaittiin olevan merkittävä jälkilannoitusvaikutus vehnällä ja ohralla tehdyssä astiakokeessa, mutta alhaisilla levitysmäärillä havaittiin merkittäviä sadonalennuksia. Jeng ym. (2006) osoittivat, että lihaluujauhon suhteellinen fosforin hyväksikäyttöaste on noin 50% mineraalisen fosforilannoitteen hyväksikäyttöasteesta ensimmäisenä lannoitusvuotena, ja että lihaluujauholla oli fosforin jälkilannoitusvaikutusta seuraavina vuosina. Ylivainio ja Turtola (2009) havaitsivat, että lihaluujauhon kokonaisfosforista 15% mineralisoituu kasveille käyttökelpoiseen muotoon ensimmäisen kasvukauden aikana, ja 7% seuraavan kasvukauden aikana (Ylivainio ja Turtola 2009).

Kierrätysraaka-aineista jalostetut lannoitteet ja maanparannusaineet muodostavat monimuotoisen joukon orgaanisia ja epäorgaanisia materiaaleja, joiden ominaisuudet vaihtelevat lähtöaineena käytettyjen raaka-aineiden mukaan. Lisätutkimukselle on tarvetta muun muassa monivuotisista systeemitason tarkasteluista, jossa kierrätysravinteet sovitetaan viljelykiertoihin ja lannoitusten jälkivaikutuksia (Mantovi ym. 2005, Siebielec ym. 2018), ympäristövaikutuksia (Herrmann ym. 2013) arvioidaan.

2.3 Kauran sadonmuodostus

2.3.1 Kasvuolot

Kasvuolosuhteet määrittelevät yhdessä perimän luomissa puitteissa viljojen kasvun ja kehityksen (Peltonen-Sainio 1991). Kasvuolosuhteista päivänpituus on muuttumaton tekijä, mutta lämpösumman kertyminen ja sadanta vaihtelevat kasvukausittain (Peltonen 1990). Lopullinen sato muodostuu satokomponenteista, eli sadon tekijöistä, jotka ovat viljoilla oraiden määrä neliometrillä, kasviyksilöiden määrä neliometrillä, tähkien tai röyhyjen määrä neliometrillä, jyvien määrä tähkässä tai röyhyssä ja tuhannen jyvän paino (Donald ja Hamblin 1976, Piepho 1995). Jyväluku neliometriä kohti sekä jyvän paino ovat viljojen merkittävimmät satokomponentit (Peltonen-Sainio ym. 2007). Satokomponenteilla on jossain määrin kyky kompensoida toisiaan, mikä voi vaikuttaa satovaihteluihin, jos kasvuolosuhteet ovat epäedulliset jonkin komponentin muodostusvaiheessa (Piepho 1995). Viljat voivat esimerkiksi kompensoida alhaista jyvälukumäärää neliometrillä kasvattamalla jyväpainoa (Peltonen-Sainio 1991, Peltonen-Sainio ym. 2007).

Suomi on maailman pohjoisin maataloutta harjoittava maa, jossa kasvuolosuhteet poikkeavat muista maista päivänpituuden, lämpötilan ja kasvukauden pituuden suhteen (Peltonen-Sainio ym. 2005). Kasvukausi on Suomessa lyhyt, mutta pitkien päivien vuoksi viljojen kehitys on nopeaa (Peltonen-Sainio ym. 2005). Kasvukausi alkaa, kun vuorokauden keskilämpötila nousee yli 5 °C ja vastaavasti päättyy, kun vuorokauden keskilämpötila laskee alle 5 °C. Etelä-Suomessa kasvukauden pituus on keskimäärin 185 vuorokautta (Kersalo ja Pirinen 2009). Kas-

vukauden tehoisan lämpösumman kertymä lasketaan päiviltä, jolloin vuorokauden keskilämpötila on korkeampi kuin 5°C. Summaan lasketaan viiden asteen ylittävä osa (Laine ym. 2017). Etelä-Suomessa tehoisa lämpösumma vaihtelee 1250-1400 vuorokausiasteen välillä (Kersalo ja Pirinen 2009). Esimerkiksi Tanskaan verrattuna Suomen kasvukausi on 50 vuorokautta lyhyempi, ja lämpösumma on 200-400 vuorokausiastetta pienempi (Hakala ja Peltonen-Sainio 2008). Ilmastollisten erojen vuoksi viljoihin ei Suomessa ehdi muodostua yhtä paljon suvullisia kasvinosia, eli tähkiä tai röyhyjä ja jyviä, kuin eteläisimmillä leveysasteilla ja sadot jäävät näin ollen pienemmiksi (Peltonen-Sainio ym. 2003).

Kasvukauden sääolosuhteilla, kuten sateen määrällä ja sateiden ajoittumisella sekä kasvien käytettävissä olevien ravinteiden määrällä on merkittävä vaikutus kasvien kasvuun ja satokomponenttien muodostumiseen (Peltonen-Sainio ym. 2005). Kaura on kasvupaikan ja lämpötilan suhteen vaatimattomampi kuin muut viljat, mutta kauran vedentarve on suurempi kuin ohralla, vehnällä tai rukiilla (Peltonen 1990). Kasvit ottavat ravinteet juurillaan maavedestä, joten veden saannin rajoittaminen heikentää myös ravinteiden ottoa (Clark 1990). Veden ja typen saatavuus ovat viljoilla keskeisiä satoon vaikuttavia tekijöitä (Peltonen-Sainio ym. 2005).

Itämään lähtevät siemenet tarvitsevat tarpeeksi vettä kasvuunlähtöön. Orastuminen viivästyy tai estyy kokonaan, jos maa on liian kuiva, lämpötila liian matala, maaveden suolapitoisuus liian korkea tai edellisten yhteisvaikutuksesta (Willenborg ym. 2005). Veden kyllästävässä maassa kaasujen vaihto maaperän ja ilmakehän välillä heikkenee (Paasonen-Kivekäs ym. 2009). Heikentyneessä happitilanteessa itämään lähtevän siemenen juuret jäävät heikoiksi ja kasvi tuottaa vähemmän sivuversoja (Watson ym. 1976). Maan kosteus on kylvön onnistumisen kannalta tärkein ulkoinen tekijä (Rahkonen ja Esala 1988). Suomen olosuhteissa maa saattaa kuivua nopeasti keväällä, joten kevätiljojen kylvö on tehtävä tarpeeksi ajoissa, jotta maan vesitalous on sopiva itäville siemenille (Peltonen-Sainio ym. 2005).

Sateiden ajoittuminen vaikuttaa kasvuston muodostumiseen. Sateinen alkukasvu-kausi suosii aikaista sivuversojen muodostusta, kun taas kuivan alkukesän jälkeiset sateet voivat aiheuttaa kukinnan jälkeistä sivuversojen muodostusta (Peltonen-Sainio ja Järvinen 1995). Myöhään kehittyneet sivuversot heikentävät sadon laatua, sillä ne eivät ehdi tuleentua muun kasvuston tahdissa (Peltonen-Sainio ym. 2005). Viljojen kehitysrytmi ei ole riippuvainen sääolosuhteista (Peltonen-Sainio ym. 2005), mutta epäedullisissa olosuhteissa, kuten kuivina kasvukausina, kasvit jäävät pienikokoisiksi ja sato-osia erilaistuu vähemmän (Peltonen 1990).

Noin kolme viikkoa ennen tähkälle tai röyhylle tuloa viljojen kehityksessä on satoisuusikkunaksi kutsuttu kahden viikon ajanjakso, jonka aikana suurin osa kukista erilaistuu ja näin ollen satotaso määräytyy (Peltonen-Sainio ym. 2005). Epäedulliset olosuhteet tämän ajanjakson aikana voivat laskea satoa merkittävästi (Peltonen-Sainio ym. 2005). Myös röyhylle tulon, kukinnan ja jyväntäytymisen aikainen kuivuus alentaa satoa, mutta vähemmän kuin satoisuusikkunan aikaiset ongelmat (Peltonen 1990). Viljojen vedentarve vähenee kasvukauden loppua kohti, mutta liian kuivissa olosuhteissa kasvustot pakkotuleentuvat (Peltonen-Sainio ym. 2005), jolloin jyväntäytymisjakso jää lyhyeksi ja jyväkoko pieneksi (Peltonen-Sainio 1991). Kuivuus vaikuttaa heikkoa ravinnetilaa enemmän jyvien lukumäärään ja jyvän painoon (Rajala ym. 2011).

2.3.2 Viljelymenetelmien vaikutus kauran sadonmuodostukseen

Lämpötilaan, päivänpituuteen tai kasvien kehityksen etenemiseen ei voida käytännön peltoviljelyssä vaikuttaa, mutta lajikevalinnalla ja viljelytoimenpiteillä, kuten lannoituksella, voidaan edistää eri kehitysasteiden tuotantopotentialien täyttymistä, vähentää ympäristötekijöistä johtuvia sadonalennuksia ja näin vaikuttaa lopullisen sadon määrään (Peltonen-Sainio ym. 2005).

Viljojen kehitys ja kasvu jaetaan suvuttomaan ja suvulliseen kehitysvaiheeseen. Suvuttomassa kehitysvaiheessa kasvit muodostavat yhteyttävän biomassan, jonka kuiva-ainetuotantoon ja yhteyttämistehoon voidaan vaikuttaa lannoituksella (Peltonen-Sainio ym. 1993). Suvulliseen kehitysvaiheeseen siirtyminen on perimän

säätlemää (Peltonen-Sainio ym. 2005). Kasvit siirtyvät suvulliseen kehitysvaiheeseen, kun perimän ja päivänpituuden säätelämä lämpötilakertymä saavuttaa pisteen, jossa se on riittävä suvullisten kehitysvaiheiden, kuten kukinnan alkamiseen (Peltonen-Sainio ym. 2005). Ravinteiden, erityisesti typen, saatavuudella myös suvullisessa kehitysvaiheessa on merkittävä vaikutus satoon (Browne ym. 2006).

Suomessa pyritään kylvötiheyttä lisäämällä pääversoaltaisiin kasvustoihin, sillä sivuversot eivät ehdi tuottaa satoa pääversojen tahdissa (Peltonen-Sainio ym. 2005). Suomessa käytetään yleisesti kylvötiheytenä 500–700 siementä neliömetrillä (Peltonen-Sainio ym. 2009), mikä on noin kaksinkertainen Keski-Euroopassa käytettyihin kylvötiheyksiin verrattuna (Peltonen-Sainio ja Järvinen 1995). Pääversoaltainen kasvusto tulee tasaisesti, mikä helpottaa sadonkorjuuta ja sadon laatu on tasainen (Peltonen-Sainio ym. 2005).

Itämisen ja oraiden alkukehityksen vaiheessa viljat käyttävät siemenvalkuaisen varastoja (Peltonen-Sainio ym. 2005). Oraat alkavat käyttää maaveden ravinteita, kun sirkkalehti työntyy maan alta ja fotosynteesi alkaa (Peltonen-Sainio ym. 2005). Ravinteet, erityisesti typpi, edistävät sivuversojen muodostusta (Peltonen-Sainio ym. 2009). Sivuversojen muodostus on niiden heikommasta sadontuotokyvystä huolimatta alkukasvukaudella suotavaa, sillä aikainen maanpeittävyys estää rikkakasvien itämistä ja ylläpitää kasvustossa sopivaa mikroilmastoa (Peltonen-Sainio ym. 2005). Sivuversojen lehtibiomassasta kasvi saa myös enemmän yhteyttävää pinta-alaa, ja ne toimivat yhteyttämistuotteiden välivarastona pääversoille (Peltonen-Sainio ym. 2007). Kasvisolukon korkea typpipitoisuus pidentää kasvuston ikää (Peltonen-Sainio ym. 1993) ja nostaa klorofyllipitoisuutta (Peltonen-Sainio 1997), jolloin yhteyttämistuotteita syntyy enemmän (Peltonen-Sainio ym. 1993). Liiallinen typpilannoitus lisää kuitenkin jälkiversontariskiä, ja voi johtaa kasvustojen lakoontumiseen (Mohr ym. 2007, Peltonen-Sainio ym. 1993) ja viivästyneeseen tuleentumiseen (Peltonen-Sainio ym. 2005).

Vegetatiivinen vaihe päättyy, kun röyhy on kasvanut lehtitupen suojassa täyteen mittaansa (Nass ym. 1976). Kauran röyhyjen tähkylöihin kehittyy korkeintaan kuusi kukka-aihetta, joista korkeintaan kolmesta kehittyy jyvä (Peltonen-Sainio

ym. 2005). Kolmatta, viimeisenä kehittyvää jyvää kutsutaan välijyväksi. Välijyvät heikentävät sadon laatua, sillä ne ovat pienikokoisia ja kuoripitoisia (Browne ym. 2006). Kauran tuottamista kukista huomattava osa, jopa 80% voi abortoitua ennen pölyttymistä (Peltonen-Sainio ym. 2005). Hyvä ravinteiden saatavuus edistää kukkien tuotantoa, mutta ravinnetilasta huolimatta noin 40% kukista kuitenkin abortoituu (Peltonen-Sainio ja Peltonen 1995).

Typpilannoitus röyhylle tulon vaiheessa lisää tähkylöiden lukumäärää röyhyssä, nostaa röyhyn painoa ja edistää yhteyttämistuotteiden kulkeutumista kehittyviin jyviin (Peltonen-Sainio ja Peltonen 1995). Typpilannoitus lisää myös röyhyjen määrää neliometriä kohti (Mohr ym. 2007, Peltonen-Sainio ym. 1993) ja jyvien määrää röyhyä kohden (Peltonen-Sainio ym. 1993). Mitä runsaampi jyvämäärä röyhyssä on, sitä tehokkaammin jyvät pystyvät hyödyntämään yhteyttämistuotteita jyvän täyttymisvaiheessa (Peltonen-Sainio ym. 2005). Jyvien määrällä neliometriä kohti on merkittävämpi vaikutus lopullisen sadon määrään kuin jyvän painolla (Borrás ym. 2004, Peltonen-Sainio ym. 2007), mutta epäedullisissa olosuhteissa sadon laatu kuitenkin heikkenee runsasjyväisissä kasvustoissa, sillä jyväpaino jää pieneksi ja kuorien osuus kasvaa (Peltonen-Sainio ym. 2005).

Jyvien proteiinipitoisuus, hehtolitraino ja tuhannen jyvän paino ovat sadon laatua kuvaavia parametreja (Valkama ym. 2013). Hyvä ravinnetila kasvukauden aikana lisää jyvien proteiinipitoisuutta (Peltonen-Sainio ym. 2007, Peltonen-Sainio ym. 2015), ja tuhannen jyvän paino indikoi jyvän kokoa ja kuorien osuutta jyvistä (Valkama ym. 2013). Sadon määrällä on kuitenkin negatiivinen korrelaatio jyvän proteiinipitoisuuteen (Peltonen-Sainio ym. 2012, Rajala ym. 2011). Korkea sato laskee jyvien typpipitoisuutta, joten lajikevalinnassa ja lannoituksen suunnittelussa on otettava huomioon mihin käyttöön sato on tarkoitettu (Peltonen-Sainio ym. 2012).

3 TUTKIMUKSEN TAVOITTEET

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, onko kauran satokomponenttien muodostuksessa, sadoissa ja sadon laadussa eroja yhden kasvukauden aikana, kun lannoitteena käytetään epäorgaanisista ja orgaanisista raaka-aineista jalostettuja kierrätyslannoitevalmisteita ja niitä verrataan lannoittamattomaan ja väkilannoitettuun kontrolliin.

Oletuksena oli, että lannoitteen sisältämä typen määrä vaikuttaa lannoituksessa merkittävimmin kauran satokomponenttien muodostukseen yhden kasvukauden pituisella tutkimusjaksolla. Tutkimuksen toisena tavoitteena oli selvittää, onko kierrätyslannoitteiden tuottamissa typpisadoissa eroja kierrätyslannoitevalmisteiden välillä ja verrattuna lannoittamattomaan kontrolliin ja väkilannoitekontrolliin.

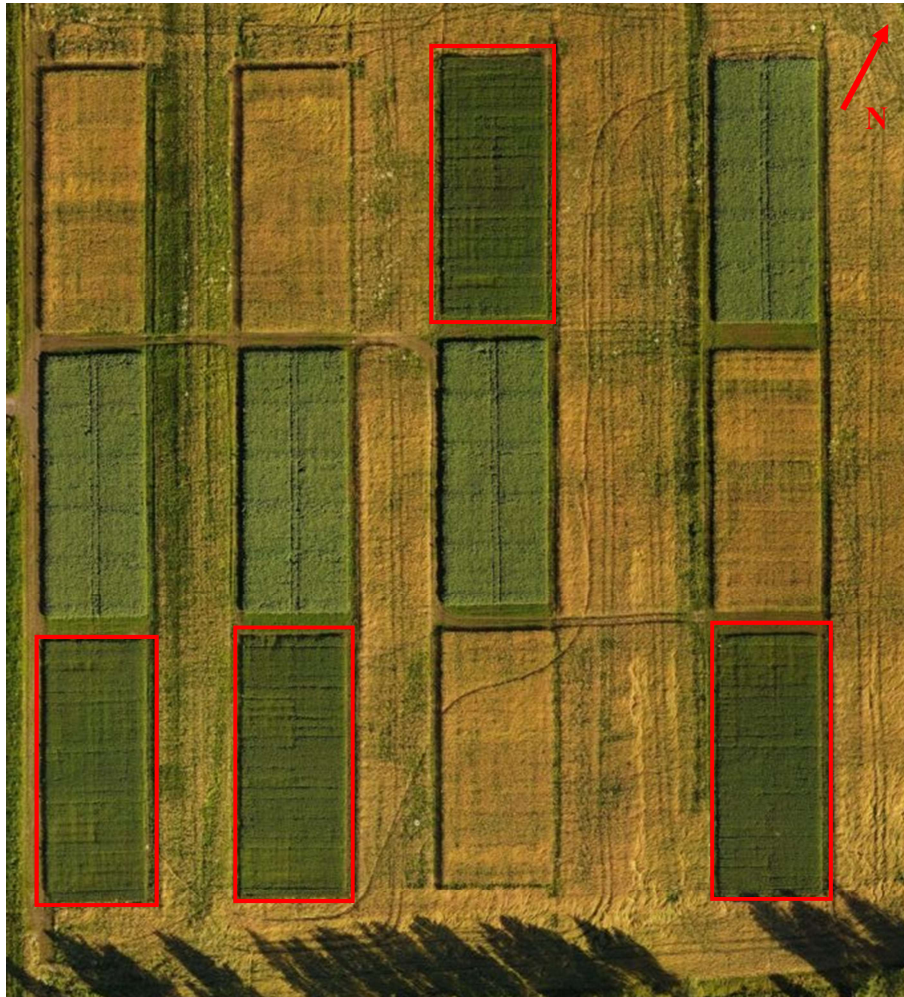
4 AINEISTO JA MENETELMÄT

4.1 Kenttäkoe ja koejärjestelyt

Tutkimuksen aineisto saatiin HYKERRYYS- hankkeen kenttäkokeesta, joka perustettiin syksyllä 2016 Helsingin kaupungin omistamalle Haltialan tilalle, lohkolle 0910035610. Koealueen koordinaatit ovat 60°26' N, 24°96' "E. Kasvukaudella 2016 lohkolta viljeltiin ohraa (*Hordeum vulgare*). Viljelykierto oli ollut lohkolta viljavaltaista myös aikaisempina vuosina. Lohkolle on levitetty runsaasti jätevesipohjaisia komposteja 2000-luvun alussa. Muuten lannoitus on ennen kokeen alkua perustunut mineraalilannoitteisiin. Koelohko kynnettiin ohran sadonkorjuun jälkeen.

Tutkimuksen aineisto on kerätty viisivuotisen hankkeen ensimmäisenä sato-vuonna 2017, ja aineistoon on otettu mukaan vain kaurakoejäsen. Kenttäkokeessa oli neljä kerrannetta, joiden väleissä oli 20 tai 40 metrin suojakaista. Kerranteiden väleihin kylvettiin syksyllä 2016 ruista. Jokaisessa kerranteessa oli kolme kasvilohkoa, jotka oli jaettu viiteen pääruutuun. Kasvilohkojen väleillä oli noin 6 metrin suojavyöhykkeet, joille kylvettiin ohraa. Pääruutujen koko oli 8 x 20m, ja

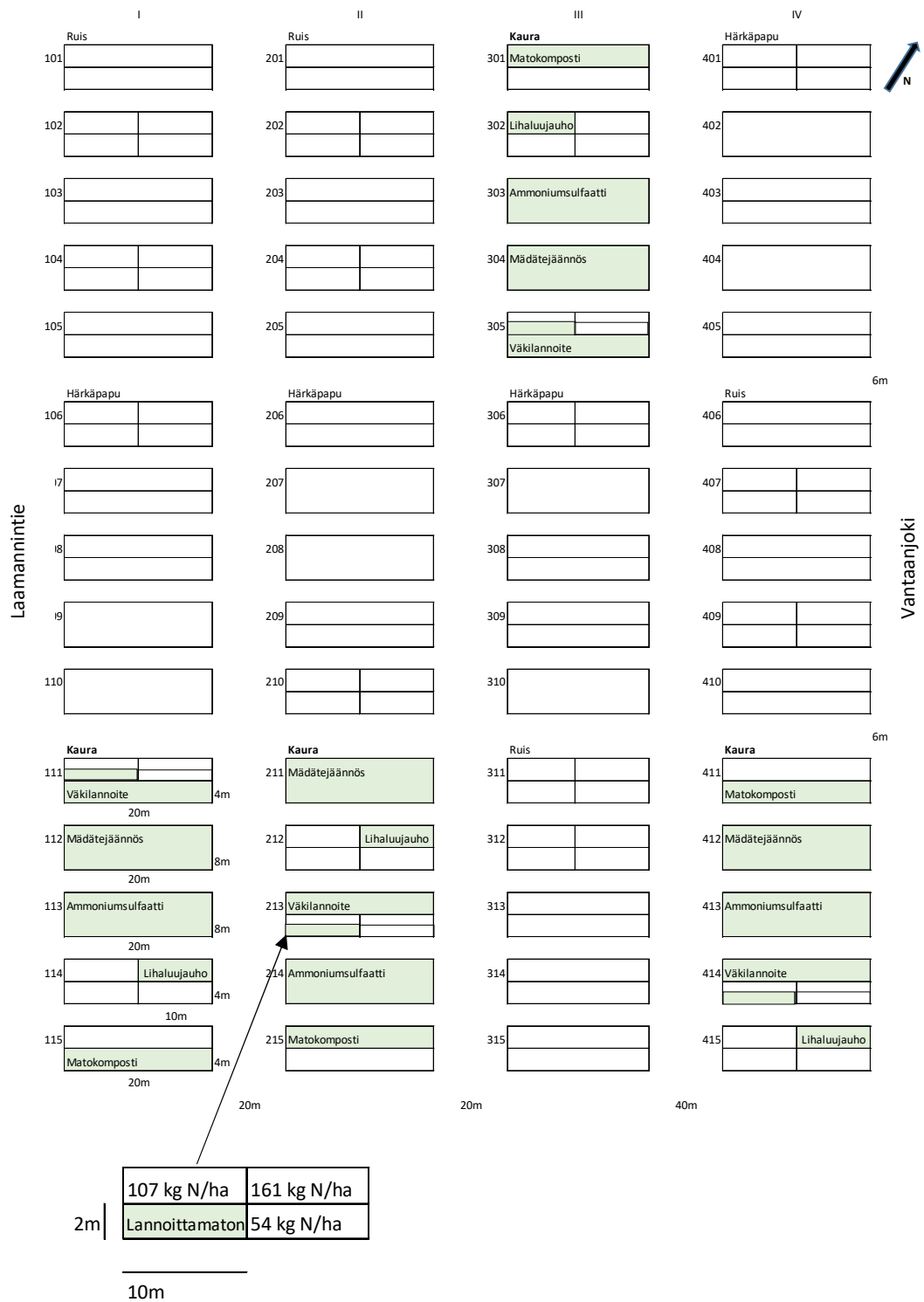
niiden väleissä sekä koelohkon päädyissä oli 2 metrin suojakaistat, joille kylvettiin samaa viljelykasvia kuin pääruuduille. Ilmakuva (kuva 1) havainnollistaa kerranteiden ja kasvilohkojen sijoittumista koekentälle.



Kuva 1. Ilmakuva HYKERRYYS-hankkeen koekentästä. Kauralohkot on merkitty kuvaan punaisella. Kuva: Eetu Virtanen (2017).

Kauralohkojen koeruudut mitattiin ja merkittiin koekentälle 28.4.2017. HYKERRYYS-hankkeen yritysysteistyökumppaneilla oli mahdollisuus jakaa pääruutu pienempiin osaruutuihin, mikä mahdollisti useamman lannoitekonseptin tutkimista yhden kasvukauden aikana. Ruutukoko vaihteli aineistossa sen mukaan, kuinka monta lannoituskäsittelyä pääruudulle oli jaettu. Väkilannoiteruudun ja matokompostiruudun koko oli 4 x 20 m, lannoittamattoman koeruudun koko oli 2 x 10 m, lihaluujauhokäsittelyn ruutu oli 4x10 m ja mädätysjäännös- ja ammoniumsulfaattiruutujen koko oli 8 x 20 metriä.

Kenttäkokeessa kaikkien mukana olleiden käsittelyiden vertaaminen toisiinsa ei ollut mahdollista, koska kaikki käsittelyt eivät olleet täysin satunnaistettuja osaruutujen suhteen (kuva 2). Koeasetelman satunnaistamisrajoitus salli kuitenkin varianssianalyysin siten, että jokaisesta pääruudusta otettiin mukaan analyysiin lohkoittain satunnaistetun pääruutumallin mukaisesti vain yksi käsittely. Näin pystyttiin vertaamaan valittujen kierrätyslannoitekäsittelyiden keskiarvoja tutkittujen muuttujien suhteen erikseen lannoittamattomaan kontrolliin sekä väkilannoitekontrolliin. Yritysyhteistyökumppaneiden käsittelyt pääruuduilta on valittu niin, että ne edustavat kullekin osallistujalle oleellista tai pääasiallista kierrätyslannoitevalmistetta.



Kuva 2. Peltokokeen kenttäkartta. Tutkimuksessa käytetyt lannoituskäsittelyt on merkitty karttaan vihreällä värillä. Yliopiston pääruutu on jaettu viiteen osaan niin, että väkilannoiteruudun koko on puolet pääruudun koosta (4m x 20m) ja

toinen puoli on jaettu neljään osaan lannoittamattoman käsittelyn ja typpiporaskäsittelyiden kesken. Lannoittamattoman käsittelyn sisältävää osaruutua ei ole satunnaistettu.

4.1.1 Koelohkon viljavuus

Maaperän ravinnetilanteen selvittämiseksi koelohkoilta otettiin maanäytteet muokkauskerroksesta 4.5.2017. Jokaiselta pääruudulta otettiin kahdeksan satunnaista näytettä maanäytekairalla (syvyys 20 cm, läpimitta 2,7 cm), joista poistettiin näytteeseen mahdollisesti mukaan tullut pohjamaa ja suurimmat roskat. Osanäytteet sekoitettiin ja kaadettiin maanäyterasiaan. Maanäytteenotossa käytetyt välineet puhdistettiin 75% alkoholilla osaruutujen välillä. Näytteitä säilytettiin -20 °C:ssa viisi viikkoa ennen näytteiden lähettämistä analysoitavaksi Eurofins Viljavuuspalvelu Oy:lle.

Pintamaan maalajin ja multavuuden määrittäminen tehtiin aistinvaraisella määrittämisellä (ISO/IEC 17025 mukaisesti akkreditoituilla menetelmillä). Johtoluku ja pH mitattiin maa-vesi suspensiosta (1:2,5) (Vuorinen ja Mäkitie 1955). Kalsium, kalium, rikki ja magnesium määritettiin uutamalla näytteet 15% ammoniumasetaattiliuokseen ja uuton jälkeen näytteet analysoitiin ICP-laitteella (induktiivisesti kytketty plasmaemissiospektrometria) (ICP-OES; Thermo-Fisher iCAP6500, Thermo Fisher Scientific, Cambridge, UK) (Vuorinen ja Mäkitie 1955). Fosfori määritettiin uutamalla näytteet 20% ammoniumasetaattiliuokseen. Määrittäminen tehtiin spektrofotometrisellä mittauksella (Vuorinen ja Mäkitie 1955). Boorin määrittämisessä näytteet uutettiin kuumaan veteen ja mitattiin ICP-laitteella (Vuorinen ja Mäkitie 1955). Kuparin, mangaanin ja sinkin määrittämisessä käytettiin uuttoa happamaan ammoniumasetaatti-EDTA-liuokseen (25%) ja mittaus tehtiin ICP-laitteella (Lakanen ja Erviö 1971). Tulosten luotettavuus on 95% varmuudella.

Maanäytteistä määritettiin myös muokkauskerroksen hiili (%) ja typpi (%) Dumas-menetelmällä (polttomenetelmä) automaattisella elementtialyysaattorilla (VarioMax CN analyysaattori, Elementar Analysensysteme GmbH, Hanau, Saksa). Analyysit tehtiin maanäytteistä seulotuista osanäytteistä (2-3g). Ennen analyysia

näytteet kuivattiin 40 °C:ssa 48 tuntia. Analysoinnin jälkeen näytteistä määritettiin kuiva-ainepitoisuus kuivaamalla yhden gramman osanäytteitä 105 °C:ssa 16-18 tunnin ajan. Näytteiden vesipitoisuus määritettiin alkuperäisen painon ja kuivauksen jälkeisen painon erotuksena. Kauralohkojen hiilipitoisuus oli kokeen alkamisajankohtana 3,52%, typpipitoisuus 0,32% ja hiili-typpi-suhde 11,13.

Viljavuusanalyysin mukaan koepellon muokkauskerros on runsasmultaista hieta-savea. Mangaanin osalta analyysin tulos oli heikko, mutta muiden ravinteiden luokitukset olivat kategorioissa ”tydyttävä”, ”hyvä” tai ”korkea”. Viljavuusanalyysin tuloksista lasketut kauralohkojen keskiarvot ja Uudenmaan peltojen keskiarvot on esitetty taulukossa 3. Koelohkolle 2000-luvun alussa levitetyt yhdyskuntajätepohjaiset kompostit ovat nostaneet muokkauskerroksen fosfori- ja kuparipitoisuuksia.

Taulukko 3. Kauralohkojen muokkauskerroksen viljavuusanalyysin keskiarvot kevään 2017 näytteistä ja Uudenmaan peltojen keskimääräiset pitoisuudet vuosina 2006-2010 (Viljavuuspalvelu 2018).

Ravinne	Kauralohkojen keskiarvo, kevät 2017	Kauralohkojen viljavuusluokka	Uudenmaan peltojen keskiarvo 2006-2010
pH	6,18	Hyvä	6,12
Ca, mg/l	3075	Hyvä	2206
P, mg/l	19,6	Korkea	11,4
K, mg/l	373	Hyvä	214
Mg, mg/l	502	Hyvä	381
S, mg/l	14,2	Tyydyttävä	19,3
B, mg/l	1,10	Tyydyttävä	0,79
Cu, mg/l	28,8	Arvel. korkea	5,2
Mn, mg/l	9,3	Huononlainen	28,3
Zn, mg/l	25,6	Korkea	3,5

4.1.2 Viljelykierto ja tutkimuksen kasvimateriaali

Kokeessa toteutetaan viisivuotista viljelykiertoa (syysruis – härkäpapu – kaura nurmialuskasvilla – viherlannoitusnurmi – syysrapsi), jossa on edustettuna joka vuosi kolme kierron vaihetta. Kasvukaudella 2017 viljelyssä oli härkäpapu (*Vicia faba* L. 'Louhi'), syksyllä 2016 kylvetty ruis (*Secale cereale* L. 'Reetta') sekä

kaura (*Avena Sativa* L. 'Obelix') jonka aluskasviksi kylvettiin Retu-apilanurmi-seosta (5 % alsikeapila *Trifolium hybridum* L. cu.'Frida', 5 % valkoapila *Trifolium repens* L. cu. 'Jögeva', 10 % puna-apila *Trifolium pratense* L.cu. 'Saija', 25 % ruokonata *Festuca arundinacea* L. cu.'Retu', 55 % timotei *Phleum pratense* L. cu. 'Tenho').

Obelix-lajikkeen sato on virallisten lajikekokeiden mukaan 6331 kg/ha (15% kosteudessa), kasvu-aika 100 päivää ja lämpösummavaatimus 1002 °C (Laine ym. 2017). Lajikkeen tuhannen jyvän paino on 45,3 g ja valkuaisprosentti 11,9 (Laine ym. 2017).

Aluskasviseos oli kaikille käsittelyille sama. Aluskasvin vaikutusta kauran sadonmuodostukseen ei otettu tässä tutkimuksessa huomioon. Kauralohkot äestettiin kahtena perättäisenä päivänä, 4.5 ja 5.5 ja kaura kylvettiin koeruutukokoisella Juko-kylvölannoittimella 20.5.2017. Kylvötiheytenä käytettiin 500 siementä/m² ja riviväli oli 12,5 cm. Aluskasviseos kylvettiin 23.5.2017.

4.1.3 Kasvukauden aikaiset toimenpiteet

Kasvukauden aikana kauran kasvua ja kehitystä sekä rikka- ja tuholaistilannetta seurattiin viikoittaisilla käynneillä koelohkolla. Kasvun ja kehityksen vaiheita seurattiin BBCH-asteikon avulla (Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie) (Meier 2001). Kauran oraslaskenta tehtiin 9.6.2017 kasvuasteella BBCH 12 (kaksi lehteä). Oraat laskettiin kolmelta satunnaiselta 30 cm mittaiselta pituudelta. Rikkakasvitorjunta tehtiin Nufarm MCPA-kasvinsuojeluaineella 17.6.2017.

Kukintavaiheessa (BBCH 65) 8.8.2017 koeruuduilta mitattiin kasvuston typpitilanteen selvittämiseksi epäsuoria lehtivihreäpitoisuuksia (Minolta SPAD-502, Minolta Camera Co. Ltd., Osaka, Japani). Epäsuora lehtivihreämittaustulos määritettiin 20 kasvin lippulehdestä mitatun SPAD-tuloksen keskiarvona.

4.1.4 Lannoitus

Hankekumppanit suunnittelivat itse pääruutujen lannoituskäsittelyt. Tutkimuksessa käytettyjen kierrätyslannoitekäsittelyiden levitysjankohdat ajoittuivat kylvöön ja orasvaiheelle (taulukko 4). Nestemäiset käsittelyt levitettiin kastelukannuilla ja kiinteät joko pintalevityksenä tai sijoitettuna. Lannoitteista kerättiin osanäytteistä koostuvat edustavat näytteet, joita säilytettiin pakastimessa -20 °C:ssa 12-40 vuorokautta ennen lähettämistä Eurofins Viljavuuspalvelu Oy:lle analysoitavaksi.

Taulukko 4. Tutkimuksessa käytetyt lannoitteet, levitysjankohdat ja –tekniikat. Lannoittamatonta koeruutua ei ole esitetty.

Lannoite	Levitysjankoha	Levitystekniikka
Ammoniumsulfaatti	Ennen kylvää	Kastelukannulla veteen sekoitettuna 15% (w/w) liuksena
Lihaluujauho Mikrobikäsittely	Ennen kylvää Kylvön yhteydessä	Käsin pintalevityksenä Siemeneen peitattuna
Matokomposti Matokompostiuute	Ennen kylvää Kasvuasteilla BBCH 10 ja 13 (Meier 2001)	Käsin pintalevityksenä Kastelukannulla veteen laimennettuna 5% (w/w) liuksena
Mädätysjäännös Ravinneisä	3-lehtivaiheessa (BBCH 13)	Kastelukannulla riviväleihin Mädätysjäännökseen sekoitettuna
Väkilannoite Patenttikali	Kylvön yhteydessä	Sijoituslannoituksena

Lannoitteiden analysoinnissa kokonaistyyppi määritettiin Kjeldahl-menetelmällä ja liukoinen tyyppi uutamalla näyte 0,1 M kaliumsulfaattiin (K₂SO₄) ja määrittämällä liukoinen tyyppi uuttoliuoksesta Kjeldahl-menetelmällä (devardan metalli katalyyttinä). Kivennäisaineiden (K, Ca, P, Mg, Cu, Mn, Zn, Na, B) määrittämisessä käytettiin kuivapolttoja 550 °C:ssa, jonka jälkeen näytteet on uutettu vetykloridiin (HCL) ja mittaus tehtiin ICP-laitteella. Kuiva-aineen ja tilavuuspainon määrittä-

sessä käytettiin gravimetristä määrittystä (kuivaus 105 °C). Lannoitteiden levitysmäärät ja ravinnemäärät on koottu taulukkoon 5. Ravinnemäärät on laskettu analyysitulosten perusteella. Analyysituloksissa on 20%:n virhemarginaali.

Lihaluujauho on luomutuotantoon soveltuva teurasteollisuuden hygienisoiduista sivuvirroista valmistettu rakeistettu lannoite. Lannoitteen lisäksi kylvösiemen peitattiin kasvien kasvua edistävällä mikrobivalmisteella. Valmiste sisältää *Bacillus subtilis*-, *Lactococcus sp.*- ja *Bacillus megaterium* -bakteerikantoja. Lannoitusten levitysmäärät ja lannoituksen ravinnemäärät on esitetty taulukossa 6.

Mädätysjäännös on orgaanisten biomassojen biokaasutusprosessissa syntyvää lietemäistä jäännöstä. Biokaasutusprosessin syötteenä käytettiin erilliskerättyä biojätettä. Mädätysjäännökseen sekoitettiin elintarviketeollisuuden sivuvirroista valmistettua ravinnelisää.

Kokeessa käytetty kiteinen ammoniumsulfaatti on tuotettu nikkeliteollisuuden sivuvirroista erottamalla jäteveden typpi ja sitomalla se happoon. Matokomposti on luomutuotantoon soveltuvaa kastematojen kompostoimaa karjanlantaa. Matokompostiuute on kiinteästä jakeesta erotettua nestettä. Väkilannoitekontrollina ruuduilla käytettiin Yara Mila 5- lannoitetta ja kaliumin sekä magnesiumin täydennykseen Patenttikalia.

Taulukko 5. Lannoitteiden levitysmäärät ja ravinmäärät, kg/ha

Käsittely	Levitys- määrä, kg/ha	N-liuk	N-tot	P	K	Mg	Ca	Cu	Mn	Zn	Na	B
Ammoniumsulfaatti	571	114	120	0	0	0	0	0	0	0	4	0
Lihaluu jauho	900	21	68	37	22	2	72	0	0	1	5	0
Mikrobikäsitteily	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Yhteensä	901	21	68	37	22	2	72	0	0	1	5	0
Mädätysjäännös	19750	91	126	8	83	2	11	0	1	0	34	0
Ravinnelisä	430	3	4	1	6	0	1	0	0	0	3	0
Yhteensä	20180	93	130	9	89	2	12	0	1	0	36	0
Matokomposti	4000	14	29	10	33	21	104	0	0	0	2	0
Kompostiuute	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Yhteensä	4050	14	29	10	33	21	104	0	0	0	3	0
Väkilannoite, Yara Mila5	545	120	120	27	27	0	0	0	0	27	0	0
Patenttikali	91	0	0	0	25	6	0	0	0	0	0	0
Yhteensä	636	120	120	27	52	6	0	0	0	27	0	0

4.2 Kasvukauden sääolot

Terminen kasvukausi alkoi Etelä-Suomessa 1.5.2017, noin kaksi viikkoa myöhemmin 1981–2010 keskiarvosta (Ilmatieteen laitos 2017). Huhtikuu ja toukokuu olivat hieman keskimääräistä kylmempiä (taulukko 6). Toukokuun oli keskimääräistä kuivempi, mutta kesäkuu oli tavanomaista sateisempi. Elokuun ja syyskuun keskilämpötilat ja sademäärät olivat melko tavanomaisia. Kauran kylvöajankohdan 20.5.2017 ja puinnin välillä 27.9.2017 tehoisaa lämpösummaa kertyi 1195 astetta Helsinki-Vantaan mittauspisteessä mitattuna (Ilmatieteen laitos).

Taulukko 6. Kuukausittaiset keskilämpötilat ja sademäärät kasvukaudella 2017 ja vertailujaksolla 1981-2010 Helsinki-Vantaan Lentoaseman mittauspisteestä.

Kuukausi	Keskilämpötila, °C		Sadanta, mm	
	1981-2010	2017	1981-2010	2017
Toukokuu	10,4	9,9	39	10
Kesäkuu	14,6	13,8	61	99
Heinäkuu	16,1	17,7	66	33
Elokuu	15,9	15,8	79	71
Syyskuu	11,4	10,7	64	65

4.3 Aineiston kerääminen ja käsittely

Kasvustonäytteet kerättiin kauralta satokomponenttien erotteluun 26. ja 27.9., päivää ennen puintia ja puintipäivänä. Näytteet kerättiin juurineen kolmelta 30 cm pituiselta satunnaiselta riviltä 1-2 metrin päästä koeruutujen Vantaanjoen puoleiselta reunalta. Näytteet kerättiin paperipusseihin ja kuivattiin uunissa 60 °C:ssa 72 tunnin ajan.

Kauraruuduilta puitiin 27.9.2019 Sampo Rosenlew 2010-koeruutupuimurilla (Sampo Rosenlew Oy, Pori, Suomi) 10 m² alat. Kauran aluskasvina ollut nurmiseos jätettiin kasvamaan ruuduille. Puidut satonäytteet kuivattiin lavakuivurissa, puhdistettiin roskista ja punnittiin. Näytteistä otettiin 500 gramman osanäyte, joista määritettiin kuiva-aine punnitsemalla 10 gramman näytteet, joita kuivattiin

16-18 tunnin ajan 105 °C:ssa. Kuivauksen jälkeen näytteet punnittiin uudestaan. Jokaisesta satonäytteestä tehtiin kaksi kuiva-ainemäärittystä (A ja B näytteet). Määrittys tehtiin uudestaan, jos näytteiden (A ja B) kosteudessa erotus oli yli 5%.

Ennen puintia kerätyistä kasvustonäytteistä eroteltiin rikkakasvit, jotka hävitettiin punnituksen jälkeen. Näytteistä eroteltiin ja laskettiin kasvien lukumäärä ja määritettiin pääversojen ja sivuversojen määrä. Juuret leikattiin pää- ja sivuversomäärityksen jälkeen yhden senttimetrin korkeudelta juuren ylimmän osan yläpuolelta. Lehdet eroteltiin korsista ja lehdet ja korret punnittiin erikseen (kuva 3). Juurien painoa ja alle yhden senttimetrin kokoisia kasvinosia ei huomioitu lajittelussa.

Röyhyt leikattiin yhden senttimetrin päästä alimmasta röyhyn haarasta. Röyhysten lukumäärä laskettiin ja punnittiin. Röyhyt puitiin lyhdepuimurilla (Hege 16, Hege Maschinen, Waldenburg, Saksa) ja roskat poistettiin jyvien joukosta. Osa jyivistä rikkoontui puinnissa. Rikkoontuneet jyvät eroteltiin kokonaisista. Ehjistä jyivistä laskettiin jyvälaskurilla (Pfeuffer Contador, Pfeuffer GmbH, Kitzingen, Saksa) niiden lukumäärä, keskimääräinen jyvän paino ja tuhannen jyvän paino. Rikkoontuneet jyvät punnittiin, ja niiden lukumäärä laskettiin kokonaisten jyvien keskimääräisen jyväpainon mukaan. Hehtaarisato laskettiin satokomponenteista johtaen (kaava 1) sekä puiduista jyväsadosta.

$$\text{Sato, kg/ha} = (\text{Versoja, kpl/m}^2 \times \text{Röyhyjä/Verso} \times \text{Jyviä/Röyhy} \times \text{Jyvän paino, g}) \times 10 \quad (1)$$



Kuva 3. Satokomponenttien laskeminen kuivaamisen jälkeen. Kasvinosat eroteltiin, laskettiin ja punnittiin.

Sadon laatu (valkuainen, NDF ja tuhka (%)) analysoitiin NIR-spektrometrimittalaitteella (Perten DA 7200 near infrared spectroscope, Perten Instruments, Huddinge, Ruotsi). NDF eli neutraalidetergenttikuitu (solunseinämäkuitu) kuvaa kokonaiskuitumäärää sadon kuiva-aineessa (Laine ym. 2016). Valkuaispitoisuus (%) kuvaa sadon kuiva-aineessa olevan proteiinin määrää ja tuhkapitoisuus (%) jyvien kivennäisainepitoisuutta (Laine ym. 2016).

NIR-analyysin proteiinituloksista laskettiin kauran jyväsadon sisältämän typen määrä (kg/ha) kertomalla puidun sadon määrä (kg/ha) proteiinin määrällä (%) ja jakamalla tulos kertoimella 6,25 (100 grammaa kauran valkuaista sisältää 16 grammaa typpeä).

4.5 Tilastolliset menetelmät

Lannoitekäsittelyiden vaikutusta satokomponenttien muodostumiseen tutkittiin kaksisuuntaisella varianssianalyysillä (ANOVA), jossa lohkokotijä oli kerranne. Kenttäkokeessa kaikkien mukana olleiden käsittelyiden vertaaminen toisiinsa ei ollut mahdollista, koska varianssianalyysin oletukset satunnaistetusta koeasetelmasta osaruutumallin vaatimalla tavalla ei olisi kaikkien osaruutujen osalta täytynyt. Koeasetelman satunnaistamisrajoitus salli kuitenkin varianssianalyysin siten, että jokaisesta pääruudusta otettiin mukaan analyysiin lohkoittain satunnaistetun pääruutumallin mukaisesti vain yksi käsittely. Näin pystyttiin vertaamaan valittujen kierrätyslannoitekäsittelyiden keskiarvoja tutkittujen muuttujien suhteen erikseen lannoittamattomaan kontrolliin sekä väkilannoitekontrolliin. Kaksisuuntainen varianssianalyysi tehtiin myös lannoittamattoman ja väkilannoitetun käsittelyn välillä. Kierrätyslannoitekäsittelyt hankekumppaneiden pääruuduilta on valittu niin, että ne edustavat kullekin osallistujalle oleellista tai pääasiallista kierrätyslannoitevalmistetta. Pareittaiset vertailut tehtiin Tukeyn HSD-monivertailumenetelmällä.

Muuttujien jäännösvaihteluiden normaalijakautuneisuus testattiin Shapiro-Wilkin testin avulla. Varianssien yhdensuuntaisuus varmistettiin Levenen testillä.

Muuttujille, jotka eivät olleet normaalisti jakautuneita tai niiden varianssit olivat erisuuret, tehtiin Box-Cox-muunnoksia (Box ja Cox 1964) kunnes varianssianalyysin edellytykset täyttyivät. Tulosten käsittelyyn käytettiin SPSS tilasto-ohjelmaa (version 25, IBM Inc., Chicago, IL, USA). Tilastollisen merkitsevyyden rajana käytettiin $P \leq 0,05$.

5 TULOKSET

5.1 Satokomponentit

5.1.1 Väkilannoitekäsittely verrattuna lannoittamattomaan

Väkilannoituksella saatiin lannoittamattomaan käsittelyyn verrattuna merkitsevästi suurempi röyhyjen määrä ($p=0,022$) ja röyhyjen määrä versoja kohti ($p=0,048$) (taulukko 7). Versojen yhteismäärä, pääversojen ja sivuversojen määrä ei eronnut tilastollisesti merkittävästi käsittelyiden välillä. Väkilannoituskäsittelyllä saatiin myös tilastollisesti merkitsevästi suurempi jyvälukumäärä neliömetriä kohden ($p=0,034$) ja kasvikohtaisen jyvälukumäärä ($p=0,045$) kuin lannoittamattomalla. Röyhykohtaisessa jyvälukumäärässä tai tuhannen jyvän painossa ei ollut tilastollisesti merkitseviä eroja.

Taulukko 7. Varianssianalyysin merkitsevyysarvot satokomponenteille väkilannoitetun ja lannoittamattoman käsittelyn välillä, $p \leq 0,05$. Tilastollisesti merkitsevät arvot on lihavoitu.

Käsittely	Oraita, kpl/m ² (BBCH 12)	Versoja, kpl/m ²	Pää- versoja, kpl/m ²	Sivu- versoja, kpl/m ²	Röyhyjä, kpl/m ²	Röyhyjä/ verso	Jyviä, kpl/m ²	Jyviä/ verso	Jyviä/ röyhy	T _{jp} , g
Ei lannoitusta	356	816	278	538	636	0,8	8357	12	15	38,7
Väkilannoite	420	916	344	571	798	0,9	16094	16	18	40,4
Keskivirhe	22	42	30	43	61	0,0	1634	1	1	0,5
p-arvo	0,165	0,126	0,287	0,445	0,022	0,048	0,034	0,045	0,248	0,192

Keskivirhe on lannoituskäsittelyiden (n=8) keskiarvon keskivirhe. Tukey HSD, $p \leq 0,05$

5.1.2 Kierrätyslannoitekäsittelyt verrattuna väkilannoitekäsittelyyn

Suurin versojen määrä saatiin ammoniumsulfaattikäsittelyllä (ka. 1204 kpl/m²) ja ero oli tilastollisesti merkitsevä verrattuna väkilannoitekäsittelyyn ($p=0,004$) (taulukko 8). Muiden käsittelyiden keskiarvot eivät eronneet väkilannoitteesta. Pääversojen määrässä ei ollut merkitseviä eroja, mutta ammoniumsulfaattikäsittelyllä saatu sivuversojen määrä (ka. 733 kpl/m²) oli merkitsevästi suurempi kuin väkilannoitekäsittelyssä ($p=0,004$).

Matokompostikäsittely tuotti merkitsevästi vähemmän jyviä tarkasteltuna niin jyvien määrää neliömetrillä (ka. 10226 kpl/m², $p= 0,002$) kuin kasvikohtaisesti (ka. 11 jyvää/verso, $p=0,011$) väkilannoitekontrolliin verrattuna. Muiden käsittelyiden keskiarvot eivät eronneet väkilannoitetusta käsittelystä tilastollisesti merkitsevästi. Tuhannen jyvän painossa ei ollut merkitseviä eroja käsittelyiden välillä.

Taulukko 8. Kauran satokomponentit kierrätyslannoitekäsitelyissä verrattuna väkilannoitteeseen sekä varianssianalyysien merkitsevyysarvot ($p \leq 0,05$) käsittelyiden vertailuille. Käsiteltyyn keskivirheen $n=4$. Tilastollisesti merkitsevät arvot lihavoitu.

Käsittely	Oraita, kpl/m ² (BBCH 12)	Versoja, kpl/m ²	Pääversot, kpl/m ²	Sivuversot, kpl/m ²	Röyhyt, kpl/m ²	Röyhyjä/ verso	Jyviä, kpl/m ²	Jyviä/ verso	Jyviä/ röyhy	T.jp, g
Väkilannoite	420	916 a	344	571 ab	798,00	0,9	16094 b	16 b	18 ab	40,40
Keskivirhe	35	70	20	63	77	0,0	1339	2	2	0,5
Ammoniumsulfaatti	- 18	+ 289 c	+ 127	+ 162 c	+ 195	- 0,0	+ 2774 b	+ 1 b	+ 2 b	- 1,8
Keskivirhe	29	63	22	47	54	0,1	1769	1	1	1,0
Mädätysjäännös	- 2	+ 145 ab	+ 11	+ 109 bc	+ 98	0,0	- 2174 b	- 1 ab	- 1 ab	+ 0,2
Keskivirhe	17	68	70	36	88	0,0	1830	1	1	1,1
Lihaluujauho	- 9	+ 163 ab	+ 85	+ 78 abc	+ 93	- 0,0	- 1378 ab	- 3 ab	- 3 ab	+ 0,4
Keskivirhe	7	48	32	19	32	0,0	1087	1	1	0,2
Matokomposti	- 64	- 67 a	- 4	- 62 a	- 113	- 0,1	- 5867 a	- 5 a	- 4 a	+ 0,4
Keskivirhe	37	69	59	18	81	0,0	1159	1	1	0,9
Keskivirhe (n=20)	12	39	22	24	37	0,0	872	1	1	0,4
p-arvo	0,481	0,004	0,140	0,004	0,056	0,921	0,002	0,011	0,016	0,433

Keskivirhe on kaikkien lannoituskäsitelyiden (n=20) keskiarvojen keskiarvo. Eri kirjaimet keskiarvojen perässä viittaavat tilastollisesti merkitsevään eroon käsittelyiden välillä (Tukey HSD, $p \leq 0,05$). Keskiarvovertailut on tehty jokaiselle vastemuuttujalle erikseen; samalla kirjaimella merkityt arvot eivät eroa tilastollisesti merkitsevästi toisistaan.

5.1.3 Lannoittamaton käsittely verrattuna kierrätyslannoitekäsittelyihin

Versojen määrässä ammoniumsulfaattikäsittelyn (ka. 1204 kpl/m²) ja lihaluujauhon (ka. 1078 kpl/m²) keskiarvot olivat merkitsevästi suurempia kuin lannoittamattoman käsittelyn (p=0,002) (taulukko 9). Ammoniumsulfaattikäsittelyn tuottama sivuversojen määrä (ka.733 kpl/m²) oli tilastollisesti merkitsevästi (p=0,013) suurempi kuin lannoittamattoman käsittelyn, mutta pääversojen määrässä ei ollut merkitseviä eroja käsittelyiden välillä. Ammoniumsulfaattikäsitteyllä oli myös tilastollisesti merkitsevästi suurempi röyhyjen lukumäärä neliometriä kohden (ka. 993 kpl/m², p= 0,027), jyvien määrä neliometriä kohden (ka. 18 868 kpl/m², p=0,001) sekä jyvien määrä versoa kohden (ka. 17 kpl/verso, p=0,035). Lihaluujauhokäsittelyn jyvien määrä neliometriä kohden (ka. 14716 kpl/m², p=0,001) oli myös tilastollisesti merkitsevästi suurempi kuin lannoittamattomalla kontrollilla.

Taulukko 9. Kauran satokomponentit kierrätyslannoitekäsitelyissä verrattuna lannoittamattomaan käsittelyyn sekä varianssianalyysien merkitsevyysarvot ($p \leq 0,05$) käsittelyiden vertailuille. Käsitelyn keskivirheen $n=4$.

Käsittely	Oraita, kpl/m ² (BBCH 12)	Versoja, kpl/m ²	Pääversot, kpl/m ²	Sivuversot, kpl/m ²	Röyhyt, kpl/m ²	Röyhyjä/ verso	Jyviä, kpl/m ²	Jyviä/ verso	Jyviä/ röyhy	T _{jp} , g
Ei lannoitusta	356	816 a	278	538 a	636 a	0,8	8357 a	12 ab	15	38,7
Keskivirhe	21	39	55	66	83	0	832	2	2	0,5
Ammoniumsulfaatti	+46	+389 c	+193	+196 b	+358 b	+0,0	+10511 c	+5 b	+5	-0,1
Keskivirhe	29	63	22	47	54	0	1769	1	1	1,0
Mädätysjämmös	+62	+245 abc	+78	+142 ab	+260 ab	+0,1	+5563 abc	+3 ab	+2	+2
Keskivirhe	17	68	70	36	88	0	1830	1	1	1,1
Lihaluujuaho	+55	+263 bc	+151	+112 ab	+255 ab	+0,0	+6359 bc	+1 ab	+0	+2
Keskivirhe	7	48	32	19	32	0	1087	1	1	0,2
Matokomposti	0	+33 ab	+62	-29 a	+49 ab	0,0	+1870 ab	-1 a	-1	+2
Keskivirhe	21	69	59	18	81	0	1159	1	1	0,9
Keskivirhe (n=20)	12	41	26	26	42	0,0	1007	1	1	0,4
p-arvo	0,268	0,002	0,13	0,013	0,027	0,944	0,001	0,035	0,055	0,244

Keskivirhe on kaikkien lannoituskäsitelyiden (n=20) keskiarvojen keskivirhe. Keskiarvovertailut on tehty jokaiselle vastemuuttujalle erikseen; samalla kirjaimella kirjaimella merkityt arvot eivät erivä eroa tilastollisesti merkitsevästi toisistaan (Tukey HSD, $p \leq 0,05$).

5.2 Jyväsato

5.2.1 Väkilannoitekäsitely verrattuna lannoittamattomaan

Sekä väkilannoitekäsitelyn satokomponenteista johdettu sato että puitu sato oli tilastollisesti merkitsevästi suurempi kuin lannoittamattoman kontrollin sato (taulukko 10). Satoindeksissä ei ollut merkitsevää eroa käsittelyiden välillä.

Taulukko 10. Varianssianalyysin tulokset satokomponenteista johdetuille sadoille, satokomponentierottelun jyvämääristä lasketuille sadoille ja koeruuduilta puitu sato (14% kosteudessa) sekä satoindeksille lannoittamattoman ja väkilannoitetun kontrollin välillä.

Käsittely	Satokomponenteista laskettu sato, kg/ha	Jyvistä laskettu sato, kg/ha	Puitu sato, kg/ha	SI
Ei lannoitusta	2699	3291	3886	0,34
Väkilannoite	4759	6545	6550	0,36
Keskivirhe	684	696	551	0,01
p-arvo	0,088	0,039	0,004	0,275
Keskivirhe on lannoituskäsittelyiden (n=8) keskiarvojen keski- virhe				

5.2.2 Kierrätyslannoitekäsitelyt verrattuna väkilannoitekäsitelyyn

Satokomponenteista johdetuissa sadoissa ammoniumsulfaattikäsitelyn (ka. 7203 kg/ha) ja väkilannoitekäsitelyn sadot olivat tilastollisesti merkitsevästi ($p=0,004$) suurempia kuin matokompostikäsitelyn sato (ka. 4160 kg/ha) (taulukko 11).

Matokompostikäsitelyn puitu sato (ka. 3727 kg/ha) oli merkitsevästi pienempi kuin väkilannoitekäsitelyllä ($p=0,001$). Muiden kierrätyslannoitekäsitelyiden puidut sadot eivät eronneet väkilannoitekäsitelystä. Satoindeksissä ei ollut tilastollisesti merkitseviä eroja.

Taulukko 11. Satokomponenteista johdettu sato ja koeruuduilta puitu sato (14% kosteudessa) sekä satoindeksi kierrätyslannoitekäsittelyissä verrattuna väkilannoitekäsittelyyn sekä varianssianalyysien merkitsevyysarvot ($p \leq 0,05$) käsittelyiden vertailuille.

Käsittely	Satokomponenteista laskettu sato, kg/ha	Puitu sato, kg/ha	SI
Väkilannoite	6545 b	6550 b	0,36
Keskivirhe	612	211	0,03
Ammoniumsulfaatti	+ 658 b	-922 ab	- 0,00
Keskivirhe	637	627	0,02
Mädätysjäännös	- 753 ab	-495 ab	+ 0,01
Keskivirhe	543	204	0,03
Lihaluujauho	- 543 ab	-999 ab	+ 0,02
Keskivirhe	453	282	0,03
Matokomposti	- 2385 a	-2481 a	- 0,01
Keskivirhe	489	853	0,03
Keskivirhe (n=20)	319	272	0,01
p-arvo	0,004	0,034	0,492

5.2.3 Lannoittamaton käsittely verrattuna kierrätyslannoitekäsittelyihin

Satokomponenteista johdetuissa sadoissa ammoniumsulfaattikäsittelyn sato oli tilastollisesti merkitsevästi ($p=0,001$) suurempi kuin kaikilla muilla käsittelyillä (taulukko 12). Lihaluujauhokäsittelyn (ka. 6002 kg/ha) ja mädätejäännöksen (ka. 5792 kg/ha) sadot olivat tilastollisesti merkitsevästi suurempia kuin matokompostikäsittelyn ja lannoittamattoman kontrollin sadot. Puiduissa sadoissa ainoastaan mädätysjäännöskäsittelyn sato (ka. 6054 kg/ha) erosi merkitsevästi lannoittamattomasta kontrollista. Satoindeksi ei eronnut kierrätyslannoitteiden ja lannoittamattoman käsittelyn välillä.

Taulukko 12. Satokomponenteista johdettu sato ja koeruuduilta puitu sato (14% kosteudessa) sekä satoindeksi kierrätyslannoitekäsittelyissä verrattuna lannoittamattomaan kontrolliin sekä varianssianalyysien merkitsevyysarvot ($p \leq 0,05$) käsittelyiden vertailuille.

Käsittely	Satokomponenteista laskettu sato, kg/ha	Puitu sato, kg/ha	SI
Ei lannoitusta	3291 a	3886 a	0,34
Keskivirhe	345	435	0,02
Ammoniumsulfaatti	+ 3912 c	+ 1742 ab	+ 0,02
Keskivirhe	637	627	0,02
Mädätysjäännös	+ 2501 b	+ 2169 b	+ 0,02
Keskivirhe	543	204	0,03
Lihaluujauho	+ 2711 b	+ 1664 ab	+ 0,04
Keskivirhe	453	282	0,03
Matokomposti	+ 869 a	+ 183 ab	+ 0,01
Keskivirhe	489	853	0,03
Keskivirhe (n= 20)	377	272	0,01
p-arvo	0,001	0,020	0,175

5.3 Kasvuston biomassa

5.3.1 Väkilannoitekäsittely verrattuna lannoittamattomaan

Väkilannoitekäsittelyllä saatu maanpäällinen biomassa oli tilastollisesti merkitsevästi suurempi väkilannoitekäsittelyllä (ka. 15,5 t/ha) kuin lannoittamattomalla (ka. 10,4 t/ha, $p=0,042$) (taulukko 13). Myös epäsuoran lehtivihreämittauksen (SPAD) arvo oli tilastollisesti merkitsevästi suurempi väkilannoitteella (ka. 57,8) kuin lannoittamattomalla käsittelyllä (ka. 47,8, $p=0,007$).

Taulukko 13. Varianssianalyysin tulokset SPAD-arvoille ja maanpäälliselle biomassalle lannoittamattoman kontrollin ja väkilannoitekasittelyn välillä.

Käsittely	SPAD (BBCH 65)	Biomassa, t/ha
Ei lannoitusta	47,8	10,4
Väkilannoite	57,8	15,5
Keskivirhe	2,1	1,7
p-arvo	0,007	0,042
Keskivirhe on lannoituskäsittelyiden (n=8) keskiarvon keskivirhe		

5.3.2 Kierrätyslannoitekasittelyt verrattuna väkilannoitekasittelyyn

Väkilannoitekontrollin epäsuoran lehtivihreämittauksen (SPAD) arvo (ka. 57,8) oli tilastollisesti merkitsevästi suurempi ($p=0,000$) kuin matokompostikasittelyn SPAD-arvo (ka. 41,8, $p=0,000$) (taulukko 14). Matokompostikasittelyn maanpäällinen biomassa (ka. 10,4 t/ha) oli merkitsevästi pienempi ($p=0,00$) kuin väkilannoitekasittelyn biomassa (15,5 t/ha). Ammoniumsulfaattikasittelyllä saatiin merkitsevästi suurempi maanpäällinen biomassa kuin väkilannoitekasittelyllä (ka. 20,2 t/ha). Muiden kierrätyslannoitekasittelyiden SPAD-arvot tai biomassat eivät eronneet merkitsevästi väkilannoitekasittelystä.

Taulukko 14. Epäsuoran lehtivihreämittauksen (SPAD) arvot ja maanpäällinen biomassa kierrätyslannoitekäsittelyissä verrattuna väkilannoitekontrolliin sekä varianssianalyysien merkitsevyysarvot ($p \leq 0,05$) käsittelyiden vertailuille.

Käsittely	SPAD (BBCH 65)	Biomassa, t/ha
Väkilannoite	57,8 b	15,5 b
Keskivirhe	1,8	2,4
Ammoniumsulfaatti	- 4,4 b	+ 4,7 c
Keskivirhe	2,3	0,5
Mädätysjäännös	- 1,8 b	- 0,2 b
Keskivirhe	1,4	0,9
Lihaluujauho	- 6 b	- 0,7 ab
Keskivirhe	1,4	0,9
Matokomposti	- 16 a	- 5,2 a
Keskivirhe	1,9	1,2
Keskivirhe (n=20)	1,5	0,9
p-arvo	0,000	0,000

Käsittelykohtaisen keskivirheen n=4, kaikkien lannoituskäsittelyiden keskiarvon keskivirheen n=20. Keskiarvovertailut on tehty jokaiselle vastemuuttujalle erikseen; samalla kirjaimella merkityt arvot eivät eroa toisistaan tilastollisesti merkitsevästi (Tukey HSD, $p \leq 0,05$)

5.3.3 Lannoittamaton käsittely verrattuna kierrätyslannoitekäsittelyihin

Mädätysjäännöskäsittelyn (ka. 56,00) SPAD-arvo oli merkitsevästi suurempi kuin lannoittamattoman käsittelyn ($p=0,000$) (taulukko 15). Ammoniumsulfaattikäsittelyn SPAD-arvo (ka. 53,4) oli merkitsevästi suurempi kuin matokompostikäsittelyn SPAD-arvo (ka. 41,8). Ammoniumsulfaattikäsittely tuotti suurimman maanpäällinen biomassan (ka. 20,2 t/ha), joka oli tilastollisesti merkitsevästi

($p=0,001$) suurempi kuin lannoittamattomaan käsittelyn (ka. 10,4 t/ha) ja mato-
kompostikäsitteilyn (ka. 10,4 t/ha) tuottamat biomassat.

Taulukko 15. Epäsuoran lehtivihreämittauksen (SPAD) arvot ja maanpäällinen
biomassa kierrätyslannoitekäsittelyissä verrattuna lannoittamattomaan kontrolliin
sekä varianssianalyysien merkitsevyysarvot ($p\leq 0,05$) käsittelyiden vertailuille.

Käsittely	SPAD (BBCH 65)	Biomassa, t/ha
Ei lannoitusta	47,8 ab	10,4 a
Keskivirhe	0,9	2,0
Ammoniumsulfaatti	+ 5,7 bc	+ 9,8 b
Keskivirhe	2,3	0,5
Mädätysjäännös	+ 8,3 c	+ 4,9 ab
Keskivirhe	1,4	0,9
Lihaluujauho	+ 4,1 bc	+ 4,4 ab
Keskivirhe	1,4	0,9
Matokomposti	- 6 a	- 0,0 a
Keskivirhe	1,9	1,2
Keskivirhe (n= 20)	1,3	1,0
p-arvo	0,000	0,001

Käsittelykohtaisen keskivirheen $n=4$, kaikkien lannoituskäsittelyiden keskiarvon keskivirheen $n=20$. Keskiarvovertailut on tehty jokaiselle vastemuuttujalle erikseen; samalla kirjaimella merkityt arvot eivät eroa toisistaan tilastollisesti merkitsevästi (Tukey HSD, $p\leq 0,05$)

5.4 Sadon laatu

Väkilannoitteen ja lannoittamattoman käsittelyn tai näiden vertailussa kierrätyslannoitekäsittelyihin ei ollut sadon laadussa tilastollisesti merkitseviä eroja (taulukko 16). Proteiinin osuus jyvissä oli keskimäärin 12,08%, NDF 36,13% ja tuhkan osuus 3,75%.

Taulukko 16. Sadon laatu väkilannoitekäsittelyn ja lannoittamattoman käsittelyn kesken sekä kierrätyslannoitekäsittelyt verrattuna lannoittamattomaan kontrolliin ja väkilannoitekontrolliin.

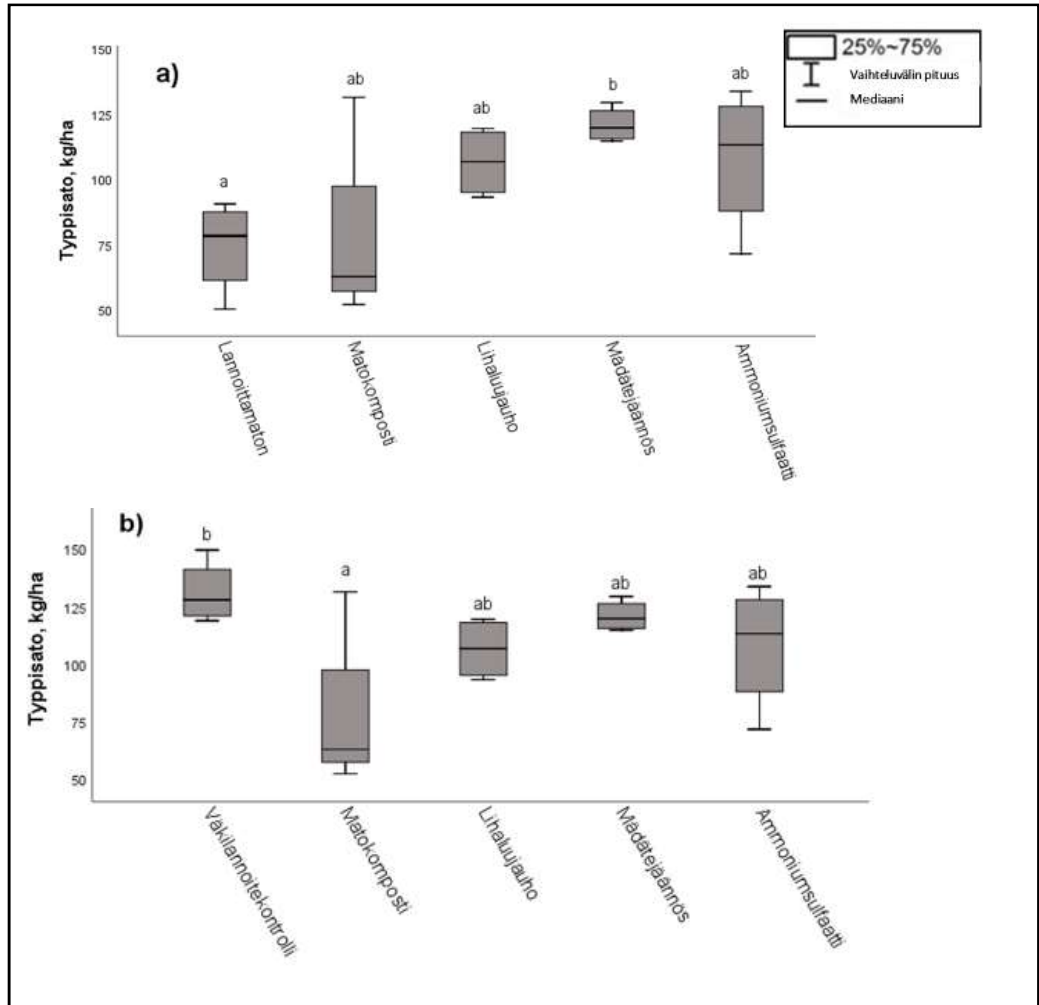
Käsittely	Proteiini, %	NDF, %	Tuhka, %
Ei lannoitusta	11,9	36,8	3,8
Väkilannoite	12,5	37,4	3,8
Keskivirhe (n=8)	0,2	0,4	0,1
P-arvo	0,093	0,618	1,00
Ammoniumsulfaatti	11,9	35,8	3,8
Mädätysjäännös	12,5	34,9	3,9
Lihaluujauho	12,0	36,5	3,7
Matokomposti	11,7	35,5	3,6
Väkilannoite	12,5	37,4	3,8
Keskivirhe (n=20)	0,1	0,4	0,0
P-arvo	0,172	0,456	0,231
Ei lannoitusta	11,9	36,8	3,8
Keskivirhe (n=20)	0,1	0,4	0,0
p-arvo	0,205	0,7	0,286

(Tukey HSD, $p \leq 0,05$)

5.5 Typpisato

Mädätejäännöskäsittelyn typpisato (ka. 121 kg N/ha, keskiarvon keskivirhe 3) oli tilastollisesti merkitsevästi ($p=0,021$) suurempi kuin lannoittamattoman kontrollin typpisato (ka. 74 kg N/ha, keskiarvon keskivirhe 9) (kuva 4, a). Muiden kierrätyslannoitekäsittelyiden typpisadot eivät eronneet merkitsevästi lannoittamattomasta.

Matokompostikäsitteilyn typpisato (ka. 77 kg N/ha, keskiarvon keskivirhe 18) oli tilastollisesti merkitsevästi ($p=0,030$) pienempi kuin väkilannoitekäsittelyn typpisato (ka. 131 kg/ha, keskiarvon keskivirhe 7) (kuva 4, b). Lihaluujuuhokäsittelyn (ka. 106 kg N/ha, keskiarvon keskivirhe 7) ja ammoniumsulfaattikäsitteilyn (ka. 108 kg N/ha, keskiarvon keskivirhe 14) typpisadot eivät eronneet lannoittamattoman kontrollin tai väkilannoitekäsittelyn typpisadoista.



Kuva 4. Kierrätyslannoitekäsittelyiden typpisadot (kg/ha) verrattuna lannoittamattomaan kontrolliin (a) ja väkilannoitekäsittelyyn (b). Samalla kirjaimella merkityt arvot eivät eroa tilastollisesti merkitsevästi toisistaan (Tukey HSD $\leq 0,05$).

6 TULOSTEN TARKASTELU

6.1 Sadon määrä

Tämän tutkimuksen tulokset kauran sadonmuodostuksesta kokeessa mukana olleilla kierrätyslannoitekäsittelyillä verrattuna väkilannoitekäsittelyyn ja lannoittamattomaan käsittelyyn viittaavat siihen, että kauran sadonmuodostuksessa ei ole eroja väkilannoitekäsittelyyn verrattuna, jos typpilannoitusmäärät ovat 60-120 kg N/ha.

Peltokokeen koekenttä oli viljava ja vuoden 2017 kasvukausi oli sateinen. Sateet ajoittuivat kasvukaudelle hyvin tasaisesti, eikä koeruutujen kasvustoissa ei ollut kasvukauden aikana merkkejä kuivuusstressistä. Voidaan olettaa, että vesi ei rajoittanut kaura sadonmuodostusta kyseisenä vuotena. Lannoittamaton käsittely tuotti korkeahkon sadon, joten oletettavasti maaperästä on mineralisoitunut typpeä kasvien käytettäväksi. Koeruuduilla ei ollut nähtävissä selkeitä muihin kuin typpeen liittyviä merkkejä ravinnepuutoksista, joten satoa rajoittavana ravinteena peltokokeessa kyseisellä kasvukaudella voidaan pitää lannoitekäsittelyiden typpeä.

Tämän tutkimuksen tulokset satojen osalta ovat linjassa Chien ym. (2018) tutkimuksen kanssa, jossa ammoniumsulfaattikäsittelyllä saadut sadot eivät poikenneet ammoniumnitraatti- tai ureakäsittelystä vehnällä ja maissilla. Chienin ym. (2018) tutkimuksessa ammoniumsulfaatti mullattiin levityksen jälkeen, sillä multaus vähentää typpitappioita. Ammoniumsulfaatti sisältää runsaasti rikkiä. Rikkilannoituksen on osoitettu lisäävän typpilannoituksen tehokkuutta rypsilä (Schnug ym. 1993) ja vehnällä (Salvagiotti ym. 2009) parantuneen typen oton tehokkuuden kautta. Tässä tutkimuksessa ammoniumsulfaatin sisältämä rikki voi selittää suuren sadon ja maanpäällisen biomassan.

Tutkimuksessa saatu puitu jyväsato oli lihaluujauholla 83% väkilannoitteen sadosta, mikä vastaa aikaisempia tuloksia (Jeng ym. 2004, Jeng ym. 2006). Satojen ero ei ollut tilastollisesti merkitsevä. Lihaluujauholla tehdyissä pelto- ja kasvihuonekokeissa on saatu sekä tämän tutkimuksen tuloksia tukevia tuloksia (Jeng ym. 2006, Chen ym. 2011, Haraldsen ym. 2011, Salomonsson ym. 1994), että tuloksia, jossa lihaluujauhon lannoitusvaikutus on ollut väkilannoitetta heikompi (Jeng ym. 2004, Tammeorg ym. 2014). Tutkimusten väliset erot lihaluujauhon lannoitusvaikutuksesta johtuvat todennäköisesti eroista maan ravinnetilassa ja orgaanisen aineksen määrässä (Jeng ym. 2006, Chen ym. 2011) sekä maan että valmisteen hiili-typpisuhteissa (Jeng ym. 2004, Tammeorg ym. 2014).

Mädätejäännöskäsittelyn sato oli 92% väkilannoitekäsittelyn puidusta sadosta. Tulos on linjassa Chantignyn ym. (2007), Odlaren ym. (2014) ja Prays ja Kaupen-

johannin (2016) tutkimusten kanssa, joissa biokaasumädätteen sadot olivat väkilannoitteen veroisia. Herrmannin ym. 2012 tutkimuksessa biokaasumädätteen typpilannoitusvaikutuksen osoitettiin olevan sian ja karjan liettelantaa parempi maissilla. Mädätteiden ravinnepitoisuudet riippuvat biokaasulaitoksen syötteistä, ja levitystekniikka (Odlare ym. 2008) sekä levitysjankohta ja koepaikan olosuhteet (Sieling ym. 2013) vaikuttavat saatuihin tuloksiin. Nämä seikat tulisi ottaa huomioon eri tutkimusten tulosten vertailussa.

Matokompostikäsitellyn tilastollisesti merkitsevästi pienempi puitu sato väkilannoitekäsitelyyn verrattuna on linjassa Roberts ym. (2007) tutkimusten kanssa. Tomaatilla tehdyssä kokeessa (Gutiérrez-Miceli ym. 2007) matokompostilla saatiin lannoittamatonta käsittelyä suurempia satoja, mutta tutkimuksessa ei ole käytetty väkilannoitekontrollia, joten tulosten suhteuttaminen tähän tutkimukseen on vaikeaa. Lazcanon ym. (2013) tutkimuksessa matokompostikäsitellyllä saatiin väkilannoitekontrollin veroinen sato maissilla, mutta kyseisessä tutkimuksessa ei ollut lannoittamatonta kontrollia ja matokomposti oli täydennetty 75%:sti väkilannoitteella. Matokompostien lannoitusvaikutus vaikuttaisi Roberts ym. (2007) mukaan olevan riippuvaista viljeltävästä kasvista, kasvuolosuhteista sekä kompostin ravinnesuhteista, joten sen käytöstä olisi syytä tehdä pidempiaikaisia kokeita.

Typpisatojen tulokset tukevat lihaluujauhon osalta Chenin ym. (2011) ja Jengin ym. (2004) tutkimuksia, joissa lihaluujauhon typenoton tehokkuudessa ei ollut tilastollisesti merkitseviä eroja väkilannoitekontrolliin verrattuna. Mädätejäännösten typpisadot olivat Möllerin ja Stinnerin (2008) tutkimuksessa käsittelemättömiä lietemäisiä lantakäsittelyjä suurempia vehnällä ja rukiilla.

Viljavuusanalyysin tuloksissa ainoastaan mangaanin viljavuusluokka oli ”huononlainen”. Lannoituksia ei kuitenkaan täydennetty mangaanin suhteen. Srikuamarin ja Öckermanin (1991) tutkimuksessa analysoitiin kauran ja vehnän jyvistä hivenravinteiden pitoisuudet. Orgaanisella lantapohjaisella lannoitetun kauran jyvissä oli suurempi mangaanipitoisuus kuin epäorgaanisella lannoituskäsittelyllä (Srikumar ja Öckerman 1991). Vehnällä epäorgaaninen lannoitus nosti jyvien

mangaanipitoisuutta orgaanista lannoitekäsittelyä enemmän. Jyvien mangaanipitoisuuden ja sadon välillä ei kuitenkaan ollut korrelaatiota (Srikumar ja Öckerman 1991). Sayyari-Zahanin ym. (2009) tutkimuksessa mangaanilannoitus lisäsi versojen kuiva-ainesatoa merkitsevästi. Mangaanilannoituksella olisi voinut olla mahdollista saada sadonlisäystä myös tässä tutkimuksessa.

6.2 Sadonmuodostus ja laatu

Tulokset sivuversojen muodostuksesta ovat linjassa aikaisempien tutkimusten (Peltonen-Sainio ja Järvinen 1995, Peltonen-Sainio ym. 2009) kanssa, joissa sateiden ajoittuminen alkukasvukaudelle suosi aikaista sivuversojen muodostusta ja lannoituksen liukoisen typen määrän nostaminen lisäsi sivuversojen määrää.

Kierrätyslannoituskäsittelyiden vaikutus röyhyjen lukumäärään neliometriä kohti ei ollut tässä tutkimuksessa tilastollisesti merkitsevä väkilannoitekäsittelyyn verrattuna, ja tämä tulos tukee aikaisempia tuloksia. Perimä ja kasvuolosuhteet määrittelevät röyhyjen neliökohtaista lukumäärää typpilannoitusta enemmän (Petr ym. 1988, Peltonen-Sainio 1997). Ammoniumsulfaatin ja väkilannoitteen röyhymäärät neliometriä kohden olivat kuitenkin tilastollisesti merkitsevästi suuremmat kuin lannoittamattoman käsittelyn. Tulos on linjassa Zhaon ym. (1996) tutkimuksen tulosten kanssa, jossa havaittiin rikkilannoituksen lisäävän versojen ja jyvien kuiva-ainetuotantoa vehnällä.

Tulokset neliometrikohtaisesta jyvämäärästä ja röyhykohtaisesta jyvämäärästä ovat linjassa aikaisemman tutkimuksen (Peltonen-Sainio ym. 1993) kanssa, joissa kevätiljoilla typpilannoitusmäärät 90–130 kg/ha välillä lisäsi jyvämäärää neliometrillä sekä röyhyssä.

Tulokset kierrätyslannoitekäsittelyiden vaikutuksesta tuhannen jyvän painoon ovat linjassa aikaisempien tutkimusten kanssa (Chen ym. 2011, Chalmers ym. 1998, Peltonen-Sainio ym. 1993, Svensson ym. 1998, Svensson ym. 2004), jossa typpilannoitus ei nostanut jyväpainoa orgaanisella tai epäorgaanisella typpilan-

noituksella. Valkaman ym. (2013) tutkimuksessa havaittiin, että typpilannoituksen vaikutus tuhannen jyvän painoon pienenee maan orgaanisen aineksen pitoisuuden noustessa. Tässä tutkimuksessa koekenttä oli jo ennen kokeen aloittamista runsasmultainen, joten tulokset viittaavat orgaanisen aineksen vaikutukseen Valkaman ym. (2013) tutkimuksen mukaisesti.

Tässä tutkimuksessa jyvien proteiinipitoisuudet olivat virallisia lannoitekokeita korkeammat (Laine ym. 2016). Proteiinipitoisuuksissa ei kuitenkaan ollut tilastollisesti merkitseviä eroja, ja lannoittamattomankin käsittelyn jyvien proteiinipitoisuus oli korkea. (Wuestin ja Cassmannin (1992) tulokset osoittavat, että viljat voivat hyödyntää kukinnan jälkeisen typpilannoituksen ja hyödyntää sen jyvän täyttymisvaiheessa. Tässä tutkimuksessa typpeä on todennäköisesti mineralisoitunut joko maaperästä tai kierrätyslannoitekäsittelyiden orgaanisesta tyypeistä jyvän täyttymiselle suotuisaan aikaan.

Perimä säätelee viljelytoimenpiteitä enemmän satoindeksiä, eli tähkän tai röyhyn suhdetta vegetatiiviseen kasvustoon (Peltonen-Sainio ym. 1993). Peltonen-Sainio ym. (2007) mukaan korkea satoindeksi viittaa vegetatiivisen kasvuvaiheen aikaisiin epäedullisiin olosuhteisiin, mutta hyviin olosuhteisiin jyvän täyttymisen aikana, jolloin jyväpaino kasvaa. Kokeessa saadut satoindeksit olivat 0,3 luokkaa, mikä on melko matala. Matala satoindeksi viittaa suotuisiin olosuhteisiin vegetatiivisen kasvun aikana, mutta heikentyneisiin olosuhteisiin jyvän täyttymisen aikana (Peltonen-Sainio ym. 2008).

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, onko kauran satokomponenttien muodostuksessa, sadoissa ja sadon laadussa eroja yhden kasvukauden aikana, kun lannoitteena käytetään epäorgaanisista ja orgaanisista raaka-aineista jalostettuja kierrätyslannoitevalmisteita ja niitä verrataan lannoittamattomaan ja väkilannoitettuun kontrolliin. Tutkimuksen toisena tavoitteena oli selvittää, onko kierrätyslannoitteiden tuottamissa typpisadoissa eroja kierrätyslannoitevalmisteiden välillä ja verrattuna lannoittamattomaan kontrolliin ja väkilannoitekontrolliin.

Tulosten perusteella voidaan sanoa, että tutkituilla kierrätyslannoitevalmisteilla lannoitetun kauran sadonmuodostus ja typpisadot eivät eroa väkilannoitteella lannoitetun kauran sadonmuodostuksesta ammoniumsulfaatin, mädätejäännöksen ja lihaluujauhon osalta kokeessa käytetyillä typpilannoitustasoilla yhden kasvukauden aikana. Lisätutkimusta kuitenkin tarvitaan, jotta voidaan paremmin selvittää niitä sadonmuodostuksen syy-seuraussuhteita ja mekanismeja erilaisten kierrätysravinnevalmisteiden välillä ja verrattuna kontrollikäsitteilyihin, joita ei tämän tutkimuksen rajoituksissa voitu huomioida. Useamman vuoden tarkastelujaksolla voidaan paremmin tarkastella muun muassa miten multavuuden positiiviseen kehitykseen liittyvät vaikutukset, kuten vedenpidätyskyvyn ja maamurujen kestävyysparaneminen, maan mikrobiston aktiivisuuden kasvu ja orgaanisten kierrätysravinteiden jälkilannoitusvaikutukset vaikuttavat satokasvien sadonmuodostukseen verrattuna epäorgaanisiin lannoitteisiin.

Tutkituista kierrätyslannoitekäsitteilyistä lihaluujauho soveltuu olomuotonsa puolesta hyvin karjattomaan viljelyyn, sillä rakeistettua lannoitetta voidaan levittää kasvinviljelyyn painottuvilla tiloilla jo olemassa olevalla lannoituskalustolla. Kierrätyslannoitteiden kehityksessä olisikin syytä keskittyä löytämään kustannustehokkaita keinoja, joilla nestemäiset jakeet saataisiin jalostettua tasalaatuisiksi rakeiksi. Tässä tutkimuksessa nestemäiset lannoitteet levitettiin pintalevityksenä, mikä on voinut vaikuttaa satokomponenttien muodostukseen pintalevityksestä aiheutuvan typpihävikin vuoksi. Nestemäisten lannoitteiden levitystekniikkaan olisi jatkossa syytä löytää kastelukannua parempi koeruutukokoluokkaan sopiva multaava välineistö.

Kasvuolosuhteilla on merkittävä vaikutus kauran satokomponenttien muodostukseen. Sääolosuhteiden vaikutuksen erottaminen lannoitekäsitteilyn vaikutuksesta ei ollut tässä tutkimuksessa mahdollista, sillä kyseessä oli viisivuotisen peltokokeen ensimmäisen vuoden tuloksista. Aineiston kertyessä useammalta kasvukaudelta sadonmuodostuksen mahdolliset erot kierrätyslannoitekäsitteilyiden välillä antavat lisätietoa niiden soveltuvuudesta pitkäaikaiskäyttöön. Jatkotutkimuksessa voisi myös harkita kasvatuskoetta kasvihuoneolosuhteissa, jolloin saataisiin tuloksia kierrätyslannoitevalmisteiden sadonmuodostuksesta optimiolosuhteissa.

Tämän tutkimuksen tuloksien yleistettävyyttä rajoittaa koekentän hyvä viljavuus ja runsasmultaisuus, minkä johdosta ravinteita on todennäköisesti mineralisoitunut kasvien käytettäväksi maaperästä. Jatkotutkimuksen kannalta keskeisiä kysymyksiä olisivatkin kyseisten kierrätyslannoitustuotteiden sadonmuodostus eri maalajeilla ja heikkotuottoisilla peltomailla.

KIITOKSET

Kiitän HYKERRYYS-hankkeen toimijoita tilaisuudesta työskennellä mielenkiintoisen hankkeen parissa. Kiitos hankkeen yritysyhteistyökumppaneille Ecolan Oy:lle, Helsingin seudun ympäristöpalvelut HSY:lle, Soilfood Oy:lle ja Tuhala Bio Oy:lle yhteistyöstä ja Helsingin kaupungin Haltialan tilalle koepaikan tarjoamisesta sekä käytännön peltotöihin liittyvän avun tarjoamisesta aina tarvittaessa. Helsingin yliopiston maataloustieteiden osaston agroekologian työhuoneessa työskenteleviä sekä työn ohjaajia, agroekologian professori Juha Heleniusta ja kasvinviljelytieteen yliopistolehtori Priit Tammeorgia kiitän neuvoista, kannustuksesta ja ajatuksia herättävistä keskusteluista aiheen tiimoilta.

LÄHTEET

- Aho, M., Pursula, T., Saario, M., Miller, T., Kumpulainen, A., Päällysaho, M., Kontio-kari, V., Autio, M., Hillgren, A. & Descombes, L. 2015. Ravinteiden kierron talou-dellinen arvo ja mahdollisuudet Suomelle. Sitran selvityksiä, 99, Sitra. Multiprint Oy, Helsinki. 50 s.
- Amberger, A. 1993. Efficient management of nitrogen fertilization in modern cropping systems. In *Optimization of Plant Nutrition* (pp. 619-622). Springer, Dordrecht.
- Arponen, J., Granskog, A., Pantsar-Kallio, M., Stuchtey, M., Törmänen, A. & Vanthournout, H. 2014. Kiertotalouden mahdollisuudet Suomelle. Sitran selvityk-siä 84, Sitra. Libris, Helsinki. 72 s.
- Barzegar, A. R., Yousefi, A., & Daryashenas, A. 2002. The effect of addition of differ-ent amounts and types of organic materials on soil physical properties and yield of wheat. *Plant and Soil*, 247(2), 295-301.
- Berninger, K., Pihl, T., Kasanen, P., Mikkola, A., Tynkkynen, O. & Vahala, R. 2017. Jätevesien fosfori hyötykäyttöön–teknologioita ja ohjauskeinoja. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 62/2017. 70 s.
- Borrás, L., Slafer, G. A., & Otegui, M. E. 2004. Seed dry weight response to source–sink manipulations in wheat, maize and soybean: a quantitative reappraisal. *Field Crops Research*, 86(2–3), 131–146.
- Box, G. E., & Cox, D. R. 1964. An analysis of transformations. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 26(2), 211–243.
- Browne, R. A., White, E. M., & Burke, J. I. (2006). Responses of developmental yield formation processes in oats to variety, nitrogen, seed rate and plant growth regula-tor and their relation-ship to quality. *The Journal of Agricultural Science*, 144(6), 533-545.
- Butler, S.J., Vickery, J.A. & Norris, K. 2007. Farmland biodiversity and the footprint of agriculture. *Science*, 315(5810), s.381-384.

- Chalmers, A. G., Dyer, C. J., & Sylvester-Bradley, R. 1998. Effects of nitrogen fertilizer on the grain yield and quality of winter oats. *The Journal of Agricultural Science*, 131(4), 395-407.
- Chantigny, M. H., Angers, D. A., Rochette, P., Bélanger, G., Massé, D., & Côté, D. 2007. Gaseous nitrogen emissions and forage nitrogen uptake on soils fertilized with raw and treated swine manure. *Journal of environmental quality*, 36(6), 1864-1872.
- Chen, L., Kivelä, J., Helenius, J. & Kangas, A. 2011. Meat bone meal as fertiliser for barley and oat. *Agric. Food Sci.*, 20 (2011), pp. 235-244
- Chien, S. H., Gearhart, M. M., & Collamer, D. J. 2008. The effect of different ammoniacal nitrogen sources on soil acidification. *Soil Science*, 173(8), 544-551.
- Clark, R.B., 1990. Physiology of cereals for mineral nutrient uptake, use, and efficiency. *Crops as enhancers of nutrient use*, s.131-209.
- Conway, G.R. 1987. The properties of agroecosystems. *Agricultural systems*, 24(2), s.95-117.
- Costanza, R., d'Arge, R., De Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R.V., Paruelo, J. & Raskin, R.G., 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387(6630), s.253.
- Dalgaard, T., Halberg, N. & Porter, J.R. 2001. A model for fossil energy use in Danish agriculture used to compare organic and conventional farming. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 87(1), s.51-65.
- Davis, A.S., Hill, J.D., Chase, C.A., Johanns, A.M. and Liebman, M., 2012. Increasing cropping system diversity balances productivity, profitability and environmental health. *PloS one*, 7(10), s. 47149.
- Denevan, W.M. 1996. A bluff model of riverine settlement in prehistoric Amazonia. *Annals of the Association of American Geographers*, 86(4), s.654-681.

- Deep, A., Kumar, K., Kumar, P., Kumar, P., Sharma, A.L., Gupta, B. & Bharadwaj, L.M. 2011. Recovery of pure ZnO nanoparticles from spent Zn-MnO₂ alkaline batteries. *Environmental science & technology*, 45(24), s.10551-10556
- De Wit, M., Hoogzaad, J., Ramkumar, S., Friedl, H. & Douma, A. 2018. *The Circularity Gap Report: An analysis of the circular state of the global economy*. Circle Economy: Amsterdam, The Netherlands. 56 s.
- De Wit, M., Verstraeten-Jochensen, J., Hoogzaad, J., Kubbinga, B. 2019. *The Circularity Gap Report: Closing the Circularity Gap in a 9% World*. Circle Economy: Amsterdam, The Netherlands. 56 s.
- Donald, C. M. & Hamblin, J. 1976. The biological yield and harvest index of cereals as agronomic and plant breeding criteria. *Advances in Agronomy*, 28: 361-405.
- Ekholm, P., Jaakkola, E., Kiiirikki, M., Lahti, K., Lehtoranta, J., Mäkelä, V., Näykki, T., Pietola, L., Tattari, S., Valkama, P. & Vesikko, L. 2011. The effect of gypsum on phosphorus losses at the catchment scale. *Suomen ympäristökeskuksen raportteja* 33/2011. 47 s.
- Euroopan komissio 2011. Komission tiedonanto Euroopan parlamentille, neuvostolle, Euroopan talous- ja sosiaalikomitealle sekä alueiden komitealle Etenemissuunnitelma kohti resurssitehokasta Eurooppaa /* KOM/2011/0571 lopullinen */. Annettu 20.9.2011 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:52011DC0571&from=FI> Viitattu 13.6.2017
- Euroopan komissio 2014. Komission tiedonanto Euroopan parlamentille, neuvostolle, Euroopan talous- ja sosiaalikomitealle ja alueiden komitealle. Annettu 25.2.2015 http://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:50edd1fd-01ec-11e4-831f-01aa75ed71a1.0014.01/DOC_1&format=PDF Viitattu 13.6.2017.
- Garbach, K., Milder, J.C., DeClerck, F.A., Montenegro de Wit, M., Driscoll, L. & Gemmill-Herren, B. 2017. Examining multi-functionality for crop yield and ecosystem services in five systems of agroecological intensification. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 15(1), pp.11-28.

- Gruber, N. & Galloway, J.N. 2008. An Earth-system perspective of the global nitrogen cycle. *Nature*, 451(7176), p.293.
- Gutiérrez-Miceli, F. A., Santiago-Borraz, J., Molina, J. A. M., Nafate, C. C., Abud-Archila, M., Llaven, M. A. O., Rincón-Rosales, R. & Dendooven, L. 2007. Vermicompost as a soil supplement to improve growth, yield and fruit quality of tomato (*Lycopersicum esculentum*). *Bioresource Technology*, 98(15), 2781-2786.
- Hakala, K., & Peltonen-Sainio, P. 2008. Tuleeko Suomesta vilja-aitta, kun ilmasto muuttuu? Suomen Maataloustieteellisen Seuran Tiedote, (23), 1-7.
- Haraldsen, T. K., Pedersen, P. A., & Grønlund, A. 2011. Mixtures of bottom wood ash and meat and bone meal as NPK fertilizer. In *Recycling of biomass ashes*. Springer, Berlin, Heidelberg. s. 33-44
- Hassan Sayyari-Zahan, M., Singh Sadana, U., Steingrobe, B., & Claassen, N. 2009. Manganese efficiency and manganese-uptake kinetics of raya (*Brassica juncea*), wheat (*Triticum aestivum*), and oat (*Avena sativa*) grown in nutrient solution and soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 172(3), 425-434.
- Heikkinen, J., Ketoja, E., Nuutinen, V. & Regina, K. 2013. Declining trend of carbon in Finnish cropland soils in 1974–2009. *Global Change Biology* 19: 1456-1469.
- Heinonen, R., Hartikainen, H., Aura, E., Jaakkola, A. & Kempainen, E. 1992. *Maa, viljely ja ympäristö*. WSOY. Porvoo. 334 s.
- Herrmann, A., Sieling, K., Wienforth, B., Taube, F., & Kage, H. 2013. Short-term effects of biogas residue application on yield performance and N balance parameters of maize in different cropping systems. *The Journal of Agricultural Science*, 151(4), 449-462.
- Holm-Nielsen, J.B., Al Seadi, T. & Oleskowicz-Popiel, P. 2009. The future of anaerobic digestion and biogas utilization. *Bioresource technology*, 100(22), pp.5478-5484.
- Howden, S.M., Soussana, J.F., Tubiello, F.N., Chhetri, N., Dunlop, M. & Meinke, H. 2007. Adapting agriculture to climate change. *Proceedings of the national academy of sciences*, 104(50), pp.19691-19696.

- Ilmatieteen laitos. Havaintojen lataus. <https://ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus#!/>
Viitattu 19.11.2017.
- Ilmatieteen laitos. 2017. Terminen kasvukausi 2017. <https://ilmatieteenlaitos.fi/kasvu-kausi-2017>. Viitattu 19.11.2017.
- IPES-Food. 2016. From uniformity to diversity: a paradigm shift from industrial agriculture to diversified agroecological systems. 94 s.
- Jeng, A., Haraldsen, T., & Vagstad, N. 2004. Meat and bone meal as nitrogen fertilizer to cereals in Norway. *Agricultural and Food Science*, 13(3), 268-275.
- Jeng, A. S., Haraldsen, T. K., Grønlund, A., & Pedersen, P. A. 2006. Meat and bone meal as nitrogen and phosphorus fertilizer to cereals and rye grass. In *Advances in Integrated Soil Fertility Management in sub-Saharan Africa: Challenges and Opportunities* (pp. 245-253). Springer, Dordrecht.
- Kasurinen, V., Munne, P., Mehtonen, J., Türkmen, A., Seppälä, T., Mannio, J., & Äystö, L. (2014). Orgaaniset haitta-aineet puhdistamolietteisä. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 6:2014. 74 s. Helsinki 2014. <https://helda.helsinki.fi/syke>
- Kersalo, J., & Pirinen, P. 2009. Suomen maakuntien ilmasto. Ilmatieteen laitos. Raportteja No. 2009: 8.
<https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/15734/2009nro8.pdf?sequence=1>
- Koskela, S., Mäenpää, I., Mattila, T., Seppälä, J., Saikku, L., Korhonen, M.R., Suorsa, M., Österlund, H. & Hippinen, I. 2013. Suomen talouden materiaalivirrat vuonna 2008 ja resurssitehokkuuden tehostamisen vaikutukset vuoteen 2030. Ympäristöministeriön raportteja 26/2013. <http://hdl.handle.net/10138/40781>
- Laine, A., Högnäsbacka, M., Niskanen, M., Ohralahti, K., Jauhiainen, L., Kaseva, J., & Nikander, H. 2017. Virallisten lajikekokeiden tulokset 2009-2016. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 1/2017
- Lakanen, E., & Erviö, R. 1971. A comparison of eight extractants for the determination of plant available micronutrients in soils. Helsingin yliopiston rehtorin professori Erkki Kivisen juhlaulkaisu/Viljo Puustjärvi (toim.).

- Lal, R. 2015. Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability*, 7(5), pp.5875-5895.
- Lastella, G., Testa, C., Cornacchia, G., Notornicola, M., Voltasio, F., & Sharma, V. K. 2002. Anaerobic digestion of semi-solid organic waste: biogas production and its purification. *Energy conversion and management*, 43(1), 63-75.
- Lazcano, C., Gómez-Brandón, M., Revilla, P., & Domínguez, J. (2013). Short-term effects of organic and inorganic fertilizers on soil microbial community structure and function. *Biology and Fertility of Soils*, 49(6), 723-733.
- Lieder, M. & Rashid, A. 2016. Towards circular economy implementation: a comprehensive review in context of manufacturing industry. *Journal of Cleaner Production* 115: 36-51.
- Luostarinen, S., Logrén, J., Grönroos, J., Lehtonen, H., Paavola, T., Rankinen, K., Rintala, J., Salo, T., Ylivainio, K. & Järvenpää, M. 2011. Lannan kestävä hyödyntäminen. MTT raportti 21. MTT, 31600 Jokioinen. 173 s. <http://jukuri.luke.fi/handle/10024/438223>
- Luostarinen, S., Tampio, E., Berlin, T., Grönroos, J., Kauppila, J., Koikkalainen, K., & Valve, H. 2019. Keinoja orgaanisten lannoitevalmisteiden käytön edistämiseen. Maa- ja metsätalousministeriön julkaisuja 2019:5, Helsinki 2019. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-453-941-8>
- MacArthur, E. 2013. Towards the circular economy. *Journal of Industrial Ecology*, 2, pp.23-44.
- Mantovi, P., Baldoni, G., & Toderi, G. 2005. Reuse of liquid, dewatered, and composted sewage sludge on agricultural land: effects of long-term application on soil and crop. *Water research*, 39(2-3), 289-296.
- Marschner, H. & Marschner, P., 2012. Marschner's mineral nutrition of higher plants. 3. painos Academic Press. Amsterdam, Boston, MA 651 s.

- Marttinen, S., Paavola, T., Ervasti, S., Salo, T., Kapuinen, P., Rintala, J., Vikman, M., Kapanen, A., Torniainen, M., Maunuksela, L., Suominen, K., Sahlström, L., Herranen, M., 2013. Biokaasulaitosten lopputuotteet lannoitevalmisteina. MTT raportti 82. 70 s. MTT 2013 <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-487-432-8>
- Marttinen, S., Venelampi, O., Iho, A., Koikkalainen, K., Lehtonen, E., Luostarinen, S., Rasa, K., Sarvi, M., Tampio, E. & Turtola, E. 2017. Kohti ravinteiden kierrätyksen läpimurtoa: Nykytila ja suositukset ohjauskeinojen kehittämiseksi Suomessa.
- Meier, U. 2001. Growth stages of mono- and dicotyledonous plants. Federal biological research centre for agriculture and forestry. Blackwell Wissenschafts-Verlag. 158 s.
- Mohr, R. M., Grant, C. A., May, W. E., & Stevenson, F. C. 2007. The influence of nitrogen, phosphorus and potash fertilizer application on oat yield and quality. Canadian journal of soil science, 87(4), 459-468.
- Montanarella, L., Badraoui, M., Chude, V., Costa, I.D.S.B., Mamo, T., Yemefack, M., AULANG, M., Yagi, K., Hong, S.Y., Vijarnsorn, P. & Zhang, G.L. 2015. Status of the world's soil resources: main report. <http://www.fao.org/documents/card/en/c/c6814873-efc3-41db-b7d3-2081a10ede50/> Rome: FAO, 2015. 608 s.
- Mueller, N.D., Gerber, J.S., Johnston, M., Ray, D.K., Ramankutty, N. & Foley, J.A. 2012. Closing yield gaps through nutrient and water management. Nature, 490(7419), p.254.
- Möller, K., Stinner, W., Deuker, A., & Leithold, G. 2008. Effects of different manuring systems with and without biogas digestion on nitrogen cycle and crop yield in mixed organic dairy farming systems. Nutrient cycling in agroecosystems, 82(3), 209-232.
- Nass, H. G., MacLeod, J. A., & Suzuki, M. 1976. Effects of Nitrogen Application on Yield, Plant Characters, and N Levels in Grain of Six Spring Wheat Cultivars 1. Crop Science, 16(6), 877-879.
- Niemi, J. & Väre, M. 2017. Suomen maa- ja elintarviketalous 2016/2017. Luke, Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus, 17/2017. 88 s.

- Nogalska, A., Chen, L., Sienkiewicz, S., & Nogalski, Z. 2014. Meat and bone meal as nitrogen and phosphorus supplier to cereals and oilseed rape. *Agricultural and food science*, 23(1), 19-27.
- Nykänen, A., Huusela-Veistola, E., Jalli, H., Jalli, M., Koikkalainen, K., Kymäläinen, M., Känkänen, H., Lemola, R., Lizarazo, C. & Sipiläinen, T. 2012. Typpi- ja valkuaisomavaraisuuden lisääminen palkokasveja tehokkaasti hyödyntämällä. Moni-Palko-hankkeen loppuraportti. MTT Jokioinen. MTT Raportti 59. 83 s.
- Odlare, M., Pell, M., & Svensson, K. 2008. Changes in soil chemical and microbiological properties during 4 years of application of various organic residues. *Waste management*, 28(7), 1246-1253.
- Odlare, M., Pell, M., Arthurson, J. V., Abubaker, J., & Nehrenheim, E. 2014. Combined mineral N and organic waste fertilization—effects on crop growth and soil properties. *The Journal of Agricultural Science*, 152(1), 134-145.
- Paasonen-Kivekäs, M., Peltomaa, R., Vakkilainen, P. & Äijö, H. 2009. Maan vesi- ja ravinnetalous. Ojitus, kastelu ja ympäristö. Salaojayhdistys ry, Jyväskylä. 63, 181.
- Paustian, K., Parton, W.J. & Persson, J. 1992. Modeling soil organic matter in organic-amended and nitrogen-fertilized long-term plots. *Soil science society of America journal*, 56(2), s.476-488.
- Paustian, K., Lehmann, J., Ogle, S., Reay, D., Robertson, G.P. & Smith, P. 2016. Climate-smart soils. *Nature*, 532(7597), s.49.
- Peltonen, P. 1990. Effect of climatic factors on the yield and on the characteristics connected to yielding ability of oats (*Avena sativa* L.). *Acta Agriculturae Scandinavica*, 40(1), pp.23-31.
- Peltonen-Sainio, P. 1991. Effect of moderate and severe drought stress on the pre-anthesis development and yield formation of oats. *Journal of Agricultural Science in Finland* 63: 379-389.
- Peltonen-Sainio, P. 1997. Nitrogen fertilizer and foliar application of cytokinin affect spikelet and floret set and survival in oat. *Field crops research*, 49(2-3), 169-176.

- Peltonen-Sainio, P., Granqvist, M., & Säynäjärvi, A. 1993. Yield formation in modern and old oat cultivars under high and low nitrogen regimes. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 171(4), s.268-273.
- Peltonen-Sainio, P., & Järvinen, P. 1994. Effects of seeding rate on growth duration, accumulation and partitioning of dry matter in oats. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 173(3-4), 145-159.
- Peltonen-Sainio, P. & Järvinen, P. 1995. Seeding rate effects on tillering, grain yield, and yield components of oat at high latitude. *Field Crops Research*, 40(1), pp.49-56.
- Peltonen-Sainio, P & Peltonen, J. 1995. Floret set and abortion in oat wheat under high and low nitrogen regimes. *European Journal of Agronomy* 4: 253-262.
- Peltonen-Sainio, P., Rajala, A., Simmons, S., Caspers, R., & Stuthman, D. D. 2003. Plant growth regulator and daylength effects on preanthesis main shoot and tiller growth in conventional and dwarf oat. *Crop science*, 43(1), 227-233.
- Peltonen-Sainio, P., Rajala, A. & Teräväinen, H. 2004. Laatusiemenen tuotanto. Tieto tuottamaan 100. Helsinki. Maaseutokeskuksen liitto. 90 s.
- Peltonen-Sainio, P., Rajala, A. & Seppälä, R. T. 2005. Viljojen kehityksen ja kasvun ABC. MTT.
- Peltonen-Sainio, P., Kangas, A., Salo, Y. and Jauhiainen, L., 2007. Grain number dominates grain weight in temperate cereal yield determination: Evidence based on 30 years of multi-location trials. *Field Crops Research*, 100(2-3), s.179-188.
- Peltonen-Sainio, P., Muurinen, S., Rajala, A., & Jauhiainen, L. 2008. Variation in harvest index of modern spring barley, oat and wheat cultivars adapted to northern growing conditions. *The Journal of Agricultural Science*, 146(1), 35-47.
- Peltonen-Sainio, P., Jauhiainen, L., Rajala, A., & Muurinen, S. 2009. Tiller traits of spring cereals under tiller-depressing long day conditions. *Field Crops Research*, 113(1), 82-89.

- Peltonen-Sainio, P., Jauhiainen, L., & Nissilä, E. 2012. Improving cereal protein yields for high latitude conditions. *European journal of agronomy*, 39, 1-8.
- Peltonen-Sainio, P., Rajala, A., Känkänen, H., & Hakala, K. 2015. Improving farming systems in northern Europe. In *Crop Physiology*. pp. 65-91. Academic Press.
- Pesonen, J., Kuokkanen, T., Rautio, P. & Lassi, U. 2017. Bioavailability of nutrients and harmful elements in ash fertilizers: Effect of granulation. *Biomass and Bioenergy*, 100, pp.92-97.
- Petr, J., Černý, V., & Hruška, L. 1988. *Yield formation in the main field crops*. Elsevier Science Publishers BV. 331 s.
- Piepho, H. 1995. A simple procedure for yield component analysis. *Euphytica* 84: 43-48.
- Polimeni, J.M., Mayumi, K., Giampietro, M. and Alcott, B., 2015. *The myth of resource efficiency: the jevons paradox*. Routledge. 200 s.
- Prays, N., & Kaupenjohann, M. 2016. Initial effects of differently treated biogas residues from municipal and industrial wastes on spring barley yield formation. *PloS one*, 11(4), e0154232.
- Rahkonen, A., & Esala, M. (1988). *Kevätviljojen ja-öljykasvien kylvöaika*. MTTK Maatalouden tutkimuskeskus tiedote 17/88 Jokioinen
- Rajala, A., & Peltonen-Sainio, P. 2011. Pollination dynamics, grain weight and grain cell number within the inflorescence and spikelet in oat and wheat. *Agricultural Sciences*, 2(03), 283.
- Ros, M., Hernandez, M. T., & García, C. 2003. Soil microbial activity after restoration of a semiarid soil by organic amendments. *Soil Biology and Biochemistry*, 35(3), 463-469.
- Powelson, D.S., Bhogal, A., Chambers, B.J., Coleman, K., Macdonald, A.J., Goulding, K.W.T. & Whitmore, A.P. 2012. The potential to increase soil carbon stocks

- through reduced tillage or organic material additions in England and Wales: a case study. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 146(1), pp.23-33.
- Salomonsson, L., Jonsson, A., Salomonsson, A. C., & Nilsson, G. 1994. Effects of organic fertilizers and urea when applied to spring wheat. *Acta Agriculturae Scandinavica B-Plant Soil Sciences*, 44(3), 170-178.
- Salminen, J., Tikkanen, S. & Koskiaho, J. 2017. Kohti vesiviisasta kiertotaloutta. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 16/2017. <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/188599>
- Salvagiotti, F., Castellarín, J. M., Miralles, D. J., & Pedrol, H. M. 2009. Sulfur fertilization improves nitrogen use efficiency in wheat by increasing nitrogen uptake. *Field Crops Research*, 113(2), 170-177.
- Schnug, E., Haneklaus, S., & Murphy, D. 1993. Impact of sulphur fertilization on fertilizer nitrogen efficiency. *Sulphur in Agriculture*, 17(8), 12.
- Senesi, N. 1989. Composted materials as organic fertilizers. *Science of the Total Environment*, 81, pp.521-542.
- Seppälä, J., Sahimaa, O., Honkatukia, J., Valve, H., Antikainen, R., Kautto, P., Myllymaa, T., Mäenpää, I., Salmenperä, H. & Alhola, K. 2016. Kiertotalous Suomessa -toimintaympäristö, ohjauskeinot ja mallinnetut vaikutukset vuoteen 2030.
- Seppänen, A.M., Laakso, J. & Luostarinen, S. 2018. Sivuvirrasta väkilannoitteen korvaajaksi: Mädätysjäännöksen jalostusteknologioiden nykytila, tarpeet ja tulevaisuuden mahdollisuudet Suomessa. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus. Luonnonvarakeskus. 2018. 49s. <http://jukuri.luke.fi/handle/10024/542095>
- Siebielec, G., Siebielec, S., & Lipski, D. 2018. Long-term impact of sewage sludge, digestate and mineral fertilizers on plant yield and soil biological activity. *Journal of Cleaner Production*, 187, 372-379.
- Sieling, K., Herrmann, A., Wienforth, B., Taube, F., Ohl, S., Hartung, E., & Kage, H. 2013. Biogas cropping systems: short term response of yield performance and N

- use efficiency to biogas residue application. *European Journal of Agronomy*, 47, 44-54.
- Sitra. 2016. Kierrolla kärkeen – Suomen tiekartta kiertotalouteen 2016-2025. Sitran selvityksiä 117. Helsinki. 56 s.
- Soinne, H., Hovi, J., Tammeorg, P., & Turtola, E. 2014. Effect of biochar on phosphorus sorption and clay soil aggregate stability. *Geoderma*, 219, 162-167.
- Srikumar, T. S., & Öckerman, P. A. 1991. The effects of organic and inorganic fertilization on the content of trace elements in cereal grains. *Food chemistry*, 42(2), 225-230.
- Steffen, W., Richardson, K., Rockstrom, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., Biggs, R., Carpenter, S. R., de Vries, W., de Wit, C. A., Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G. M., Persson, L. M., Ramanathan, V., Reyers, B. & Sorlin, S. 2015. Sustainability. Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet. *Science (New York, N.Y.)* 347: 1259855.
- Svensson, K., Odlare, M., & Pell, M. 2004. The fertilizing effect of compost and biogas residues from source separated household waste. *The Journal of Agricultural Science*, 142(4), 461-467.
- Tammeorg, P., Simojoki, A., Mäkelä, P., Stoddard, F. L., Alakukku, L., & Helenius, J. 2014. Short-term effects of biochar on soil properties and wheat yield formation with meat bone meal and inorganic fertiliser on a boreal loamy sand. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 191, 108-116.
- Tampio, E., Vainio, M., Virkkunen, E. & Rahtola, M. 2018. Opas kierrätyslannoitevalmistajille. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus* 37/2018. 73 s.
- TEM, MMM, & YM 2014 *Biotalousstrategia: Kestävää kasvua biotaloudesta*. Edita Prima Oy. 30 s.
- Tikkanen, S., Antikainen, R., Kautto, P. & Salmenperä, H. 2018. Katsaus kiertotalouden mahdollisiin taloudellisiin ohjauskeinoihin. *Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja* 4/2018. 60 s. <https://tietokayttoon.fi/julkaisu?pubid=24305>

- Tilman, D., Cassman, K.G., Matson, P.A., Naylor, R. & Polasky, S. 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418(6898), p.671.
- Tilman, D., Balzer, C., Hill, J. & Befort, B.L. 2011. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(50), pp.20260-20264.
- Vagstad, N., Broch-Due, A., & Lyngstad, I. (2001). Direct and residual effects of pulp and paper mill sludge on crop yield and soil mineral N. *Soil use and management*, 17(3), 173-178.
- Valkama, E., Uusitalo, R. & Turtola, E. 2011. Yield response models to phosphorus application: a research synthesis of Finnish field trials to optimize fertilizer P use of cereals. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 91: 1-15.
- Valkama, E., Salo, T., Esala, M. & Turtola, E. 2013. Grain quality and N uptake of spring cereals as affected by nitrogen fertilization in northern conditions: a meta-analysis. *Agricultural and Food Science* 22: 208-222.
- van der Ploeg, R. R., & Kirkham, M. B. (1999). On the origin of the theory of mineral nutrition of plants and the law of the minimum. *Soil science society of America* 1999. Vol. 63 No. 5, p. 1055-1062
- Vermeulen, S.J., Campbell, B.M. and Ingram, J.S., 2012. Climate change and food systems. *Annual review of environment and resources*, 37, pp.195-222.
- Vieno, N., Sarvi, M., Salo, T., Rämö, S., Ylivainio, K., Pitkänen, T., & Kusnetsov, J. (2018). Puhdistamolietteiden sisältämien haitta-aineiden aiheuttamat riskit lannoitekäytössä. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus* 58/2018. Luonnonvarakeskus, Helsinki 2018. 129 s. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-661-2>
- Viljavuuspalvelu. 2018. Viljavuustilastot. www.tuloslaari.fi/index.php?id=41. Viitattu 20.2.2019
- Vuorinen, J., & Mäkitie, O. 1955. The method of soil testing in use in Finland. *Maatalouskoelaitoksen maatumkimusosasto*.

- Watson, E. R., Lapins, P., & Barron, R. J. W. (1976). Effect of waterlogging on the growth, grain and straw yield of wheat, barley and oats. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 16(78), 114-122.
- Wezel, A., Casagrande, M., Celette, F., Vian, J.F., Ferrer, A. and Peigné, J., 2014. Agroecological practices for sustainable agriculture. A review. *Agronomy for sustainable development*, 34(1), pp.1-20.
- Willenborg, C. J., Wildeman, J. C., Miller, A. K., Rossnagel, B. G., & Shirliffe, S. J. (2005). Oat germination characteristics differ among genotypes, seed sizes, and osmotic potentials. *Crop Science*, 45(5), 2023-2029.
- Ylivainio, K., & Turtola, E. (2009). Meat bone meal and fur animal manure as P sources in plant production. *Suomen kotieläintalouden fosforikierto-säätöpotentiaali maaloilla ja aluetasolla*. MTT, Jokioinen. 66-160.
- Ylivainio, K., Sarvi, M., Lemola, R., Uusitalo, R. & Turtola, E. 2014. Regional P stocks in soil and in animal manure as compared to P requirement of plants in Finland. MTT, Jukioinen. *Natural resources and bioeconomy studies* 62/2015. 32 s.