

Emilia Niittyviita

**KANNATTAVAT MÄDÄTYSJÄÄNNÖKSEN KÄSITTELYMENE-
TELMÄT MAATILAKOKOLUOKAN BIOKAASULAITOKSISSA**

**HABITUS-hanke, raportti
CENTRIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Kesäkuu 2023**

Vipuvoimaa
EU:lta
2014–2020



SISÄLLYS

1 JOHDANTO	0
2 ERILLAISET MÄDÄTYSJÄÄNNÖKSEN EROTTELUMENETELMÄT	2
2.1 Erotellun kiintoainejakeen jatkokäsittely ja hyödyntäminen.....	7
2.2 Erotellun nestejakeen jatkokäsittely ja hyödyntäminen	8
2.3 Määtysjäännöksen ja sen jakeiden hyödyntäminen maatilalla	11
2.4 Määtysjäännöksen käsittelyn ja hyödyntämisen ympäristövaikutukset	13
3 BIOKAASUN TUOTANNOSTA SAATAVIEN SIVUVIRTAJAKEIDEN TUOTTEISTAMINEN	16
4 KANNATTAVUUDEN ARVIOT KIRJALLISUUDESSA	18
5 LABORATORIOKOKKEET	19
5.1 Suodatus	20
5.2 Sentrifugointi	23
5.3 Flokkulointi, koagulointi ja laskeutuminen	25
5.4 Biohiilen hyödyntäminen fosforin talteenotossa	30
5.5 6.5 Konsentroidi ja tislauk.....	31
5.6 Eri menetelmien erotuskyky	37
6 TILALLA KANNATTAVAT KÄSITTELYMENETELMÄT	38
6.1 Tilakokoluokan biokaasulaitokset Suomessa	39
6.2 Määtysjäännöksen käsittelyn kustannukset tilalla	44
7 YHTEENVETO	47
LÄHTEET	7

1 JOHDANTO

HABITUS eli Hajautettu Biokaasuntuotanto ja nesteytys Suomessa -hankkeessa on pureuduttu maatalouskokoluokan biokaasuntuotannon kannattavuushaasteisiin vastaaviin ratkaisuihin biokaasuntuotannon tuotteiden jalostuksen osalta. Hankkeessa on etsitty ratkaisuja niin itse biokaasun jalostamiseen pienemässä mittakaavassa, kuin myös biokaasuntuotannossa muodostuvaan toisen jakeen, eli mädätysjäännöksen, käsittelyyn. Kannattava käsittely ja ravinnerikkaan mädätysjäännöksen (mädäte, käsittelyjäännös, mädätysjäännö) laadukas ja asianmukainen hyödyntäminen on mahdollisuus niin tilalle, kuin koko Suomelle lannoiteomavaraisuuden näkökulmasta. Samalla hankkeessa on rakennettu virtuaaliosuuskuntamallia todellisten maatilojen pohjalle osuuskuntamalliselle liikennepolttoaineen jalostukselle. Hanke on toteutettu Centria ammattikorkeakoulun toimesta Keski-Pohjanmaan liiton kautta saadun Euroopan aluekehitysrahaston rahoituksen sekä hankkeeseen osallistuneiden yhteistyö rahoituksen avulla. Mädätysjäännökseen ja sen käsittelyyn liittyvässä työpaketissa (Työpaketti 3. Mädätysjäännöksen käsittely ja ravinteiden talteenotto maatilalla) on selvitetty kirjallisuuden sekä laboratoriokokeiden pohjalta kannattavaa tapaa käsitellä mädätysjäännöstä maatilalla ravinteiden talteen ottamiseksi ja mädätysjäännöksen tehokkaammaksi hyödyntämiseksi. Tässä selvityksessä on keskitytty pääsääntöisesti nautaperäisestä lietelannasta märkämädätystekniikalla tuotettavaan biokaasuun ja siitä muodostuvaan mädätysjäännökseen, koska maatilojen biokaasulaitokset pienessä mittakaavassa ovat pääasiassa maito- ja karjatilaille sijoituvia märkämädätyslaitoksia, joiden syöte on pääasiassa lietelantaa. Märkämädätysreaktoriin voidaan lietelannan lisäksi kuitenkin syöttää useita muitakin syötteitä lietelannan rinnalla. Tällaisia syötteitä ovat mm. kuivalantaa, navetan pesuvedet sekä ylijäämärehu. (Biokaasulaitokset kartalla 2021; Huttunen ym. 2018; Ympäristöministeriö 2022) Märkämädätyslaitoksen mädätysjäännös sisältää mädätystekniikasta ja syötteestä johtuen runsaasti vettä ja siten esimerkiksi sen kuljettaminen pitkiä matkoja on kannattamatonta. (Biokaasuteknologia 2015, Balsari ym. 2010) Tähän kustannusongelmaan sekä ravinteiden parempaan kohdennettavuuteen on pyritty löytämään ratkaisuja tässä selvityksessä.

Biokaasutusprosessin aikana tuotetaan biokaasua, mutta samalla jäännösmateriaalista muodostuu mädätysjäännöstä. Tämä mädätyksen aikana muodostuva sivutuote voi sisältää edelleen jopa 96 % syötteen alkuperäisestä massasta sekä siten valtaosan ravinteista. Lisäksi ravinteet ovat mädätysjäännöksessä kasvien kannalta hyödynnettävämmässä muodossa kuin mädätettävässä lannassa, sillä mädätysprosessin aikana ravinteet mineralisoituvat orgaanisen materiaalin kaasuuntuessa. Ravinteiden määrä mädätysjäännöksessä vaihtelee syötteen vaihteluiden mukaan, eivätkä ne ole helposti kohdennettavissa niiden ollessa seoksena mädätysjäännöksessä. Ravinteet voidaan kuitenkin erotella melko yksinkertaisesti karkealla tasolla liukoisuuden perusteella, eli erottelemalla kiinteäaine nesteestä. Näin voidaan erotella

muun muassa pääosin typpi ja fosfori toisistaan. (Barampouti ym. 2020, Biokaasuteknologia 2015, Guilayn ym. 2019) Ravinteiden erottelu toisistaan mahdollistaa niiden paremman kohdentamisen alueille, joissa niitä tarvitaan ja toisaalta vähentää ravinteiden lisäystä alueille, joilla on ylimäärää tietyistä ravinteista, ehkäisten siten esimerkiksi ravinne huuhtoumia.

Tämä selvitys koostuu kirjallisuus ja laboratorio osioista, joiden pohjalta on pyritty löytämään kannattavia käsittely tapoja mädätysjäätöksen käsittelyyn maatilamittaluokassa. Kirjallisuusselvitys tarkastelee, millaisia erilaisia menetelmiä mädätysjäätöksen käsittelyyn on tarjolla ja mitkä niiden edut ja haittapuolet ovat. Tarkastelussa edetään yksinkertaisista separointimenetelmistä aina spesifisempiin jalostustekniikoihin, joilla voidaan esimerkiksi tuottaa teollisia lannoitteita vastaavia tuotteita. Selvityksessä käsitellään niin neste kuin kiintoainejakeiden erilaisia jalostusmenetelmiä lannoitemateriaalien valmistuksessa. Kirjallisuusosiossa tutustutaan myös muihin erilaisiin käytösävelluksiin, jota mädätysjäätöksestä saatavalle kiintoainejakeelle on. Käsittelyyn liittyen käydään läpi mädätysjäätöksen käsittelyn aiheuttamia ympäristövaikutuksia ympäristön ja ihmisten kannalta. Tarkastellaan kirjallisuudessa esiintyviä kustannus ja kannattavuusarvioita tarvittavasta kokoluokasta, joilla mädätysjäätöksen käsittelyn arvioidaan olevan kannattavaa. Laboratorio-osiossa esitetään tulokset hankkeenaikana toteutettujen separointi menetelmien ja fosforintalteenottokokeiden testauksista todellisilla materiaaleilla. Laboratoriokokeiden tarkoituksena on ollut täydentää kirjallisuudesta saatavaa kokonaiskuvaa nykytilanteesta ja kartoittaa eri vaihtoehtojen toimivuutta haastavalla materiaalilla käytännössä.

2 ERILLAISET MÄDÄTYSJÄÄNNÖKSEN EROTTELUMENETELMÄT

Mädätysjäännöksen erottelu perustuu pitkälti samoihin menetelmiin kuin lannan erottelu. (Biokaasuteknologia 2015, Barampouti ym. 2020) Perinteisesti lannanerotteluun on hyödynnetty erilaisia mekaanisia separointimenetelmiä (rumpusuodatus, ruuviseparointi, sentrifugointi (linkous), seulominen, suotopuristus), ilmavaahdotusta sekä muita flotaatiomenetelmiä, laskeutusta sekä lämpö- ja painekäsittelyjä. Yleisesti nesteen ja kiintoaineen erotusprosessit voidaan jakaa seuraavasti:

- lämpö- ja painekäsittelyt
- partikkelikoon perusteella tapahtuva erottaminen
- ominaispainon perusteella tapahtuva erottaminen (Flotats ym. 2011, Luostarinen ym. 2011)

Nämä eri menetelmät perustuvat käsiteltävään materiaaliin kohdistettaviin pääasiallisesti fysikaalisiin ja kemiallisiin käsittelyihin ja erottelumenetelmien periaatteet on avattu seuraavassa lyhyesti. Mekaaniset menetelmät perustuvat mekaanisen voiman käyttöön ja erottelu tapahtuu joko partikkelikoon (seulan tai vastaavan läpi puristaminen) tai materiaalien ominaispainon avulla erotteluun. Partikkelikoonperusteella erottelevat menetelmät ovat erilaiset seuloja tai suodatinkankaita hyödyntävät menetelmät, kuten ruuviseparointi, suotopuristus ja kaari- sekä rumpuseulat. Ominaispainoon perustuvat menetelmät erottelevat eri painoiset massajakeet toisistaan, tällaisia menetelmiä ovat flotaatio, laskeutus ja sentrifugointi. (Luostarinen ym. 2011) Flotaatiossa hyödynnetään kaasuja (esimerkiksi ilmakaasutuksessa hyödynnettävä ilma) tai kemikaaleja ja erottuminen tapahtuu painovoimaisesti, kun kiintoaine vaahdotetaan tai nostatetaan nesteen pintaan. Painovoimaa hyödynnetään myös laskeutuksessa, jota voidaan yhtä lailla avustaa kemikaaleilla. Lietteet voidaan myös laskeuttaa sakeuttimissa tai laskeutus altaissa. (Flotats ym. 2011, Luostarinen ym. 2011)

Lämpö- sekä painekäsittelyissä materiaali altistetaan normaalista poikkeavalle lämpötiloille ja/tai paineelle mahdollistaen ravinteiden erottelun ja talteenoton. Haihduttaminen on yksi mahdollinen menetelmä, jossa nestettä erotetaan kiintoaineesta haihduttamalla se erilleen, konsentroiden ravinteet. Menetelmässä poistetaan vettä tiivistäen massaa sekä mahdollisesti erottaen muita haihtuvia jakeita saman aikaisesti (typpi/ammoniakki). Konsentroitua haihdutuksen avulla voidaan tehdä esimerkiksi alipaineen avulla. Lämpö- ja painekäsittelyillä voidaan samalla myös hygienisoida lietteet tai lanta jatkokäyttöä varten (Flotats ym. 2011)

Erilaisia kemiallisia esikäsittelymenetelmiä nesteen ja kiintoainejakeen erottelun tehostamiseksi tai mahdollistamiseksi voidaan hyödyntää monien eri erottelumenetelmien kanssa. Tällaisia ovat mm. flokkuloiti ja koagulointi menetelmät. Kemiallisessa erottelussa hyödynnetään eroteltavan materiaalin ja kemiallisen reagenssin (saostimien, flokkulanttien, koagulanttien) välisiä kemiallisia reaktioita. (Flotats ym. 2011) Kemiallisia erottelumenetelmiä voidaan käyttää parantamaan erottelun tehokkuutta, usein yhdessä mekaanisten menetelmien kanssa. Kemiallinen erottelu perustuu tyypillisesti kiintoaineen partikkelikoon kasvattamiseen. Partikkelikoon kasvatuksella flokkulaation tai koagulaation avulla voidaan esimerkiksi edistää partikkelien laskeutumista ja parantaa mekaanisen erottelun tehokkuutta. Kemiallisten flokkulanttien tai koagulanttien lisäksi koagulointi voidaan suorittaa myös elektrokemiallisesti. (Flotats ym. 2011) Muita kemiallisia käsittely menetelmiä ovat happamoittaminen sekä kalkitseminen. Happamoittamisella tarkoitetaan lietteen pH:n laskemista kemikaaleilla, ja sillä pyritään estämään typen karkaamista ja typpipäästöjä. Kalkituksessa lietteeseen tai kiinteään lantaan lisätään kalkkia, jolloin materiaalin pH nousee. Lietteissä kalkituksella voidaan valmistella lietettä tulevia käsittelyjä varten kuten ravinteiden talteenottoa varten (ammoniakkistriippaus, saostus). Lietteeseen tai lantaan voidaan myös lisätä kemikaaleja erilaisten haittavaikutusten ehkäisemiseksi (kaasupäästöt, hajuhaitat, patogeenit), lannan stabiloimiseksi tai lannoitusarvon parantamiseksi. (Flotats ym. 2011)

Monista eri vaihtoehtoista valittaessa tärkeitä tekijöitä ovat erityisesti erotusmenetelmän tehokkuus sekä menetelmän investointi- ja käyttökustannukset. Taulukossa 1 on esitetty arvioita erilaisten käsittelymenetelmien investointi- ja käyttökustannuksista lannan käsittelyssä. Syötteen ominaisuuksien vaikutus erottelun tehokkuuteen on myös tärkeä huomioida, sillä eri menetelmät sopivat paremmin tiettyntyyppisille syötteille kuin toiset. Koska biokaasutusprosessin aikana tapahtuvat kemialliset muutokset vaikuttavat myös materiaalin fysikaalisiin ominaisuuksiin, eivät esimerkiksi lannan ja mädätysjäännöksen käsittely eivät ole suoraan verrattavissa toisiinsa. (Aguirre-Villegas ym. 2019, Barampouti ym. 2020, Lehtomäki ym. 2007, Möller & Müller 2012)

TAULUKKO 1. Lannan käsittelymenetelmien kustannuksia (Flotats ym. 2011)

Käsittelymenetelmä	Investointikustannukset (€)	Käyttökustannukset (€/m ³ syötettä)	Kapasiteetti (m ³ syötettä/h)
Partikkelikoon kasvattaminen (kemikaalien avulla)	50 000	0,80	
Ruuviseparointi	17 000-28 000	0,50-0,90	
Seulominen (seula ja täryytin)	18 500-23 000	NA	
Suotopuristin	25 000-125 000	1,5 (nauhasuodatin)	
Sentrifugointi	40 000-100 000	0,6-2,3	1,5-25
Rumpusuodatin	25 000	0,35	2-3
Laskeutus (sakeutin 350 m ³)	17 000	NA	

Edellä esitetyt menetelmiä voidaan siis hyödyntää myös mädätysjäännöksen käsittelyssä, huomioiden syötteiden eroavaisuudet. Märkämädätyksessä käytetään korkean vesipitoisuuden omaavia syötteitä, kuten lietelantaa, ja siten syötteiden laadusta johtuen reaktorin sisällöstä vähintään 85 % on vettä. (Biokaasuteknologia 2015) Tämä johdosta myös mädätysjäännös koostuu pääasiassa vedestä (yli 90 %). (Balsari ym. 2010) Märkämädätyksessä lietteen määrä pienenee mädätyksen aikana suuren vesimäärän johdosta vain hieman, joten karkeasti voidaan todeta, että syötteen ja mädätysjäännöksen määrät vastaavat toisiinsa. (Biokaasuteknologia 2015) Mädätyksen aikana mädätysprosessi itsessään sekä sen rinnalla tapahtuvat sivureaktiot aiheuttavat muutoksia lietteen ominaisuuksiin. Prosessin aikana syötteen sisältämä orgaaninen aines hajoaa ja muuntuu metaaniksi ja erilaisiksi epäorgaanisiksi fraktioksi. (Al Seadi ym. 2008) Syötteeseen verrattuna mädätysjäännöksen viskositeetti laskee mädätyksen aikana, kuten myös sen kiintoainepitoisuus, orgaanisen aineen hajotessa. Tämän seurauksena mädätysjäännös on tasalaatuisempaa ja juoksevampaa kuin syöte ja siksi helpommin käsiteltävää kuin syöte materiaali. (Lehtomäki ym. 2007, Möller & Müller 2012) Lantapohjainen märkämädätysjäännös sisältää tyypillisesti alle 10 %:ia kiintoainetta, josta noin 70 % on orgaanista materiaalia. (Barampouti ym. 2020) Viskositeetin muutosten lisäksi mädätyksen aikana tapahtuu myös monia kemiallisia muutoksia, joiden johdosta lietteen pH kohoaa, typpeä mineralisoituu ja hiilen määrä lietteessä laskee. (Lehtomäki ym. 2007, Möller & Müller 2012, Virkkajärvi ym. 2016) Lannasta tuotetun mädätysjäännöksen pH vaihtelee tyypillisesti välillä 7,3-8,6. (Barampouti ym. 2020) Taulukossa 2 on esitetty märkämädätyksen aikaisia muutoksia lietteen koostumuksessa eri muuttujien suhteen. Taulukosta voidaan nähdä numeerisesti edellä kuvattuja muutoksia.

TAULUKKO 2. Lehmänlantaa hyödyntävien mädätyslaitosten syötteiden keskimääräiset koostumuksen muutokset mädätyksenaikana sekä mädätysjäännöstä käsiteltäessä. (Aguirre-Villegas ym. 2019)

	Alkuperäinen	Mädätetty	Nestejäte	Kiintojäte
Kiintoaine (%)	7,63	5,50	3,46	29,40
Orgaaninen aine (%)	6,13	4,10	2,27	26,39
Kokonaistyyppi (mg/kg KA)	46,30	69,30	96,76	15,29
Ammoniumtyppi (mg/kg KA)	21,51	38,60	60,80	0,40
Kokonaisfosfori (mg/kg KA)	7,90	9,30	10,86	6,93
Kokonaiskalium (mg/kg KA)	31,26	42,40	64,66	6,89

*KA = kuiva-ainetta

Lietteen fysikaalisten ominaisuuksien muutosten lisäksi biokaasutuksen aikaisilla kemiallisilla muutoksilla on vaikutusta ravinteiden hyödynnettävyyteen. Orgaaniseen materiaaliin sitoutuneiden ravinteiden muuttumista epäorgaanisiksi materiaaleiksi kutsutaan mineralisoitumiseksi. (Aguirre-Villegas ym.

2019, Möller & Müller 2012) Esimerkiksi mineralisoitunut typpi on kasveihin helposti imeytyvässä muodossa, jolloin niiden hyödyllisyys lannoittamisen kannalta kasvaa lantaan verrattaessa ja ne toimivat muistuttaen enemmän epäorgaanisia lannoitteita. (Aguirre-Villegas ym. 2019, Virkkajärvi ym. 2016) Typen lisäksi fosforin käytettävyyden uskotaan parantuvan mädätysprosessin yhteydessä. (Virkkajärvi ym. 2016, Möller & Müller 2012) Toisaalta joissain tutkimuksissa ei olla havaittu vaikutusta kasvatuskokeiden yhteydessä. Mädätysprosessin aikana pH noustessa liukoiset fosfaatit saostuvat kalsium- ja magnesiumfosfaatteina liuksesta kiintoaineeseen. Tätä ilmiötä voidaan hyödyntää fosforin talteen otossa mädätysjäännöksistä. Fosforin mineralisoitumisen myötä on kuitenkin havaittu myös fosfori häviöitä reaktorissa, mineralisoituvan fosforin saostuessa reaktoriin. Samalla häviöitä muodostuu myös saostavien metallien suhteen. (Möller & Müller 2012) Vaikka typen ja fosforin muutokset reaktorissa on tyypillisesti nähty positiivisina, tapahtuu rikin osalta biokaasutuksen aikana kasvien kannalta epäedullisia muutoksia. Sulfaatit (kasvien hyödyntämä muoto) muuttuu sulfideiksi mädätyksen aikana. (Möller & Müller 2012) Näin ollen rikki ei ole yhtä helposti kasvien käytettävissä mädätysjäännöksestä suoraan.

Se miksi mädätysjäännöstä halutaan separoida, liittyy oleellisesti sen sisältämiin ravinteisiin, sillä myös mädätysjäännöksen jatkokäsittely separoimalla kiintoaine ja neste toisistaan johtaa käsittelyssä muodostuvien jakeiden erilaisiin koostumuksiin. Eroteltaessa jakeet päätyvät vesiliukoiset materiaalit nestejakeeseen ja liukenemattomat kiintoaineeseen. Ravinteiden jakautumisen tehokkuus riippuu separointimenetelmän tehokkuudesta. (Guilayn ym. 2019) Erottelun jälkeen menetelmästä riippuen kiintojake sisältää 40-90 %:ia mädätysjäännöksen kiintoaineesta (sitien valtaosa hiilestä) ja vastaavan määrän mädätysjäännöksen sisältämästä fosforista. (Barampouti ym. 2020) Tyyppistä valtaosta (75-80 %:ia) päätyy nestejakeeseen. Nestejake sisältää myös valtaosan muista liukoisista materiaaleista, kuten kaliumista. (Barampouti ym. 2020) Nestejake käsittää myös valtaosan mädätysjäännöksen massasta ja tilavuudesta märkämädätykseen liittyvän suuren vesipitoisuuden johdosta. Separoidessa helpotetaan myös potentiaalisesti fosforin tehokkaampaa käyttöä, kun ravinteet saadaan tiivistettyä pienempään tilavuuteen ja voidaan kuljettaa pitempiä matkoja pelloille, joilla on fosfori vajetta (tyypillisesti pellot tilojen läheisyydessä ovat fosforirikkaita lannan levityksen johdosta). (Guilayn ym. 2019) Toisaalta typpi pitoinen ja vähäfosforinen nestejake voidaan edelleen hyödyntää lähipelloilla. Näin ravinteet saadaan kohdennettua järkevästi ja kustannustehokkaasti.

Mädätysjäännöksen rakenteeseen vaikuttaa mädätyksen aikaisten muutosten lisäksi merkittävästi myös syöte. (Barampouti ym. 2020) Esimerkiksi naudan ja sian lannasta saatavat mädätysjäännökset ovat rakenteellaan hyvin erilaisia, koska myös syötteet ovat erilaatuisia. Naudan lanta sisältää runsaasti sulamatonta kuituista orgaanista ainetta, kun taas sian lanta on nestemäisempää ja hienojakoisempaa naudan lantaan verrattuna. Sian lanta ei myöskään sisällä kuituista materiaalia. (Barampouti ym. 2020,

Bolzonella ym. 2018, Guilayn ym. 2019) Tämä näkyy myös lopputuloksessa: naudan lannasta tuotettu mädätysjäännös on kuituisempaa ja karkeampaa kuin sian lannasta. Reaktorien lisäsyötteet, kuten kivi- tai ylimäärärehu vaikuttavat samaan tapaan mädätysjäännöksen koostumukseen. (Barampouti ym. 2020) Taulukossa 3 on esitetty sian ja naudan lanta pohjaisten mädätysjäännösten sekä niistä eroteltujen jakeiden koostumusten eroja muutamien eri indikaattorien suhteen. (Bolzonella ym. 2018) Taulukosta voidaan nähdä selvästi, kuinka kuituisuuden ja siten kiintoainepitoisuuden ero on merkittävä nauta- ja sikalähtöisestä mädätysjäännöksestä. Kiintoaineen eroteltavuus näissä materiaaleissa jokaisella käsittely tasolla vaikuttaa olevan haastavampaa nautalähtöiselle materiaalille, vaikka loppujakeeseen (dekanterisentrifugilta tuleva nestejake) jäävät ravinne määrät ovat melko vastaavia lähteestä riippumatta. Taulukosta voidaan myös nähdä, että hienon kiintoaineen talteen otto (tässä dekanterisentrifugilla eroteltu kiintoaine) on merkittävää fosforin erottelun kannalta, sillä karkeasti eroteltu nestejake sisältää vielä runsaasti hienoa kiintoainetta, joka puolestaan sisältää vielä merkittäviä määriä fosforia.

TAULUKKO 3. Perättäisen ruuviseparoinnin ja dekanterisentrifugin vaikutus muodostuviin jakeisiin lehmän ja sian ulosteperäisestä mädätysjäännöksestä. (Bolzonella ym. 2018)

	Jae	Kiintoaine %	Orgaaninen aine %	Kokonaistyyppi %	Kokonaisfosfori %
Nauta	Mädätysjäännös	7,0	4,9	0,34	0,16
	Kiintojake, ruuvipuristin	22,0	19,8	0,33	0,40
	Nestejake, ruuvipuristin	5,5	3,7	0,32	0,13
	Nestejakeesta eroteltu kiintoaine, dekanterisentrifugi	20,1	14,0	0,73	0,53
	Nestejakeesta eroteltu neste, dekanterisentrifugi	1,8	1,0	0,17	0,01
	Jae	Kiintoaine %	Orgaaninen aine %	Kokonaistyyppi %	Kokonaisfosfori %
Sika	Mädätysjäännös	3,2	2,1	0,23	0,04
	Kiintojake, ruuvipuristin	23,1	19,8	0,46	0,19
	Nestejake, ruuvipuristin	2,1	1,1	0,22	0,03
	Nestejakeesta eroteltu kiintoaine, dekanterisentrifugi	18,7	13,0	0,37	0,15
	Nestejakeesta eroteltu neste, dekanterisentrifugi	0,9	0,4	0,17	0,02

Koska erisyötteistä valmistettujen mädätysjäännösten koostumus poikkeaa toisistaan, soveltuu niiden käsittelyyn luonnollisesti erityyppiset menetelmät. Kirjallisuudessa on yleisesti esitetty, että karkeammalle kuituisille mädätysjäännöksille sopiva erottelumenetelmä on ruuvipuristus, sillä partikkelikoko on

riittävä kiintoaineen erotteluun ja karkeampi syöte vahingoittaisi sentrifugia. Dekantterisentrifugi taas soveltuu hyvin hienorakenteisemmän mädätysjäännöksen käsittelyyn. Mikäli sentrifugointia halutaan hyödyntää erotteluun, voidaan karkeat syötteet esierotella esimerkiksi ruuvipuristimella karkeamman materiaalin erottelemiseksi, jonka jälkeen dekantterisentrifugia voidaan hyödyntää nestejakeen käsittelyyn, erottamaan hieno kiintoaines nesteestä. (Aguirre-Villegas ym. 2019, Barampouti ym. 2020, Guilayn ym. 2019) Edellä mainitut laitteet erotellaan usein kahteen kategoriaan erottelutehokkuuden mukaan: korkean tehokkuuden omaavat laitteet (tyypillisesti dekantterisentrifugit) ja matalantehokkuuden omaavat laitteet (tyypillisesti ruuvipuristimet ja erilaiset seulat). Matalantehokkuuden omaavat laitteet ovat tehokkaita vain suurtenpartikkelien erotteluun. Käytännössä tämä tarkoittaa kuituisia mädätysjäännöksiä. Korkean tehokkuuden laitteet ja menetelmät sopivat jo esikäsitellyille materiaaleille ja ei-kuituisille materiaaleille ja niiden avulla hienokiintoaine saadaan eroteltua tehokkaammin. Tehokkaampien erottelumenetelmien käyttäminen on kuitenkin kalliimpaa, joten kustannustehokas ja kannattava käyttö vaatii suuria käsittely volyymejä, joka maatilakokoluokassa voi olla saavuttamattomissa. Mädätysjäännöksen esikäsitelyllä voidaan kuitenkin tehostaa erottelua, jolloin myös perinteisesti matalan tehokkuuden laitteet voivat toimia yhtä tehokkaasti kuin korkean tehokkuuden laitteet. (Guilayn ym. 2019) Esikäsitelynä voidaan hyödyntää apuna kemikaaleja kuten lannan käsittelyssä tai peräkkäisiä menetelmiä paremman erottelukyvyn saavuttamiseksi. (Biokaasuteknologia 2015) Erilaiset käsittelyt ovat kuitenkin myös oma lisäkustannuseränsä, joka täytyy ottaa huomioon kannattavuuden näkökulmasta. Kirjallisuudessa käytettyjä mädätysjäännöksen erottelumenetelmiä ovat: seulominen (ruuvipuristimet, erilaiset seulat ja prässit, kuten suotonauhapuristin, täryseula, tasoseula, rumpusuodattimet) ja linkous (dekantterisentrifugit). Tyypillisimmät käsittelymenetelmät ovat ruuviseparaattori- ja dekantterisentrifugikäsitely. (Aguirre-Villegas ym. 2019, Barampouti ym. 2020, Guilayn ym. 2019, Møller ym. 2000)

2.1 Erotellun kiintoainejakeen jatkokäsittely ja hyödyntäminen

Kiintoaine sisältää mädätysjäännöksen hajoamattoman orgaanisen aineksen, bakteerit sekä mineraalit. (Jørgensen 2009) Tätä jaetta voidaan hyödyntää monenlaisissa käyttökohteissa suoraan ja erilaisten jatkokäsittelyjen myötä. Kiintoainejake voidaan hyödyntää ilman käsittelyjä lannoitukseen sekä kuivikkeena. (Biokaasuteknologia 2015, Setoguchi ym. 2022) Kiintoainejakeen käsittely on kuitenkin tärkeää, sillä jae ei ole stabiili, ja voi alkaa esimerkiksi kompostoitua (ei tyypillistä) säilytyksessä ilman jatkokäsittelyä. (Biokaasuteknologia 2015) Kiintoaineen jatkokäsittely tapahtuu tyypillisesti kompostoinnin, kuivauksen tai termokemiallisten käsittelyjen avulla ja jaetta voidaan stabiloida ilmaamalla mädätysjäännöstä seosaineiden avulla (hiekkä, turve). (Biokaasuteknologia 2015, Vilanova Plana & Noche 2016)

Kompostoinnilla kiintojäte voidaan jalostaa kasvualustaksi ja maanrakennus käyttöön (land regeneration). (Vilanova Plana & Noche 2016) Kompostointia kuitenkin haittaa epäedullinen hiilen ja typen suhde ja liiallinen kosteus materiaalissa. Siksi kompostointia varten massaan täytyykin lisätä kasviperäistä materiaalia hiilipitoisuuden nostamiseksi ja ilmauksen takia. Kompostoinnin aikana voi myös syntyä kaasupäästöjä, kuten NH_3 , N_2 , N_2O ja metaani päästöjä. (Barampouti ym. 2020, Lyons ym. 2021)

Kuivattua kiintoainetta voidaan hyödyntää maataloudenparissa (viljely, kuivikkeet, energian tuotanto (polttoaineena)) ja maanrakennuksessa. (Al Seadi ym. 2008, Barampouti ym. 2020, Setoguchi ym. 2022, Vilanova Plana & Noche 2016) Kuivaus voi olla perinteistä lämmöllä kuivaamista tai biokuivausta (bio drying), joka perustuu kompostointiin. Lämmöllä kuivaus tapahtuu tyypillisesti mädätysprosessin hukkalämmön avulla, ja kuivauksessa voidaan hyödyntää mm. nauha-, rumpu- ja aurinkokuivaimia. Biokuivauksessa pyritään lahottamisen sijaan poistamaan kosteutta kompostoinnin avulla. Kuivattu massa on hajutonta ja ammonia vapaata, ja se voidaan pelletöidä helpottaen käsittelyä, kuljetusta ja lannoitekäyttöä. (Barampouti ym. 2020) Kuivaaminen myös hygienisoi materiaalin, jolloin erillistä käsittelyä hygienisointiin ei tarvita. Kuivaus kuluttaa kuitenkin paljon energiaa, ja on siten melko kallis käsittelymenetelmä. (Biokaasuteknologia 2015)

Termokemiallisissa käsittelyissä kiintoainetta poltetaan ja poltossa muodostuva tuhka tai muut jakeet kuten biohiili hyödynnetään lannoitukseen. Termokemiallisia käsittelyitä ovat mm. polttaminen, pyrolysointi, biohiilentuotanto pyrolyysillä tai hydrotermisesti. (Barampouti ym. 2020, Horn ym. 2020) Menetelmä soveltuu erityisesti fosforin talteenottoon ja hyödyntämiseen, sillä typpi haihtuu prosessien aikana palokaasujen mukana ja loppu tuotteena saadaan fosforirikkaita tuotteita. (Barampouti ym. 2020, Horn ym. 2020) Termokemiallisten menetelmien yleistymisen esteeksi on koettu menetelmien korkeat kustannukset sekä typen häviäminen prosessissa. (Barampouti ym. 2020)

2.2 Erotellun nestejakeen jatkokäsittely ja hyödyntäminen

Nestettä voidaan hyödyntää sellaisenaan ilman jatkokäsittelyä lannoitukseen, sillä ohut liete on typpipitoista ja se voidaan levittää injektoimalla tai letkujen avulla (toisin kuin käsittelemätön mädätysjännös). (Guilayn ym. 2019, Jørgensen 2009) Nestejakeen jatkokäsittely on kuitenkin mahdollista, ja sitä voidaan käsitellä ja jalostaa useilla tavoilla: adsorptio, ammoniakkipuutustriippaus, biologinen käsittely, haihdutus (konsentroidi), kalvosuodatus, kemiallinen käsittely ja saostus (kiteytys). (Barampouti ym. 2020, Biokaasuteknologia 2015, Horn ym. 2020) Näillä menetelmillä pyritään tyypillisesti erottelemaan ja keräämään talteen nestejakeeseen liuenneita ravinteita. Taulukossa 4 on vertailtu eri nestejakeen käsittelymenetelmien tehokkuutta ravinteiden erottelussa. (Barampouti ym. 2020)

Adsorption ja ionivaihdon hyödyntäminen nestejakeen ravinteiden erotteluun on tehokas tapa niiden talteen ottoon. Prosessissa ravinteet adsorboidaan kiinteiden adsorbenttien, kuten hartsien tai zeoliittien pintaan. Näiden materiaalien pinnalta kiinnittyneet aineet voidaan irrottaa erilaisilla kemiallisilla tai biologisilla menetelmillä, riippuen käytetystä adsorbentista. Adsorption avulla voidaan erotella sekä fosforia että typpeä nestejakeesta tehokkaasti kuten Taulukko 4 voidaan havaita. Toistaiseksi Adsorbenttia ei ole hyödynnetty teollisessa mittakaavassa, sillä käytettävien kemikaalien aiheuttamat kustannukset ovat korkeat, varsinkin kun huomioidaan että mädätysjäätöksen sisältämä muu materiaali kiihdyttää adsorbenttien toimintakyvyn rappeutumista. Adsorption on kuitenkin vähän energiaa kuluttava menetelmä, eikä operointi vaadi suurta henkilötyöpanosta. (Barampouti ym. 2020)

TAULUKKO 4. Nestejakeen käsittelymenetelmien ravinteidenerottelukyvyn vertailua (Barampouti ym. 2020)

Jatkokäsittely menetelmä	Fosfori	Typpi
Adsorptio ja ioninvaihto	Jopa 100 %	83 %
Ammoniastrippaus	-	40-99 %
Saostus, struviittina	83-90 %	15 %
Saostus, kalsiumfosfaatteina	50-100 %	-
NF	97-98 %	5-23 % (NH ₃)
RO		95 %
Haihdutus		97,5
Polttaminen	78 %	

Ammoniastrippaus on yksi keino erotella typpeä nestejakeesta. Ammoniastrippauksessa typen erottelu nestejakeesta tapahtuu kuplittamalla, desorptiolla, aspiroimilla, suihkutorneissa tai pintailmauksella. Käsittelyn ideana on vapauttaa nesteeseen liuenut ammonium nesteestä kaasuttamalla se ammoniakiksi. Strippauksen kannalta on tärkeää, että separointi on onnistunut, sillä kiintoaine jäämien läsnäolo voi haitata prosessia. (Barampouti ym. 2020) Ammoniumstrippaus vaatii onnistuneen separoinnin lisäksi sekä lämpötilan että pH:n säätelyä, ja kuluttaa siten mm. kemikaaleja, jonka seurauksena prosessin ylläpito on kallista. Prosessissa typpi eristetään menetelmässä tyypillisesti joko ammoniumsuolana (ammoniumsulfaatti) tai väkevänä ammonialiuoksena. (Barampouti ym. 2020, Jørgensen 2009) Prosessissa nestejakeesta jää jäljelle jää runsaasti kaliumia sisältävä liuos, jonka voi jatkokäsitellä kaliumin erottamiseksi tai hyödyntää kasteluun. (Jørgensen 2009) Myös liuoksen sisältämä CO₂ voidaan erotella strippauksella, esikäsittelemällä ammoniakki strippaukselle tai struviitin saostukselle, sillä CO₂ strippauksen myötä liuoksen pH nousee. (Flotats ym. 2011)

Jo mainitun struviitin saostaminen on yksi tapa erotella useita ravinteita nestejakeesta. Struviitti, eli ammoniummagnesiumfosfaatti voidaan saostaa nestejakeesta ottaen tällä tavoin talteen niin fosforia, kuin typpeä. Struviitin asemesta voidaan saostaa myös K-struviittia tai erilaisia kalsiumfosfaatteja. K-struviitissa ammoniumionit ovat korvautuneet kaliumioneilla. Saostamalla K-struviittia ja kalsiumfosfaatteja

voidaan poistaa nestejakeen ylimäärä fosforia ravinnejakeiden tehokkaammaksi erotteluksi. Näitä materiaaleja voitaisiin saostaa esimerkiksi ammoniakkipakkauksesta jäljelle jäävästä nesteestä, mikäli se sisältää runsaasti fosforia. Yleisesti saostuksessa tarvitaan ylisaturoitunut liuos saostettavan materiaalin suhteen, tarvittavia komponentteja oikeassa suhteessa sekä tarkoituksen mukaiset pH- ja lämpötilaolot. Tämän seurauksena saostukseen tarvitaan tyypillisesti kemikaaleja (saturointi, ionisuhteiden optimointi, pH säätö) sekä energiaa (lämpötilansäätö). Saostusmenetelmät ovat tehokkaita menetelmiä rehevöitymisen estämiseen, sillä pääasialliset rehevöitymistä aiheuttavat alkuaineet ovat typpi ja fosfori. Koska typpeä on yleensä ylen määrin näiden eri fosfaattien saostamiseen, jää saostuksesta jäljelle typpeä sisältävä liuos, jota voidaan hyödyntää lannoituksessa tai ylimäärä typpi voidaan erotella jollain muulla menetelmällä, mikäli sitä ei erotella ennen saostusta. (Barampouti ym. 2020)

Haihdutus on tapa pienentää nestejakeen tilavuutta ja konsentroida ravinteita paksuksi viskoottiseksi tiivisteksi. (Barampouti ym. 2020, Jørgensen 2009) Nestejakeen konsentroida voidaan suorittaa lämmittämällä tai vakuumin avulla. Nestejakeesta erottuu haihdutuksen aikana haihtuvia aineita, kuten ammoniakkia. (Barampouti ym. 2020) Ammoniakin haihtumisen minimoimiseksi nestejake voidaan happamoida tai muuten käsitellä siten että haihtumista voidaan vähentää. Haihduttaminen on kuitenkin kallista ja energiaa kuluttavaa. (Jørgensen 2009) Tästä huolimatta ravinnetiivisteiden käsittely on nestejakeetta helpompaa, sillä se mahdollistaa ravinteiden kuljettamisen laajemmalle alueelle nestejakeen tilavuuden pienentyessä merkittävästi. (Jørgensen 2009)

Nestejakeesta voidaan erotella siihen vielä jäänyt hienokiintoaine ja ravinteet kalvoilla. Kalvotekniikoita on eri tasoisia ja toisilla saadaan lopputulokseksi lähes puhdasta vettä. Eri kalvoerottelumenetelmät ovat (erottelu kyvyn mukaa): mikrofiltröinti, ultrafiltröinti, nanofiltröinti ja käänteisosmoosi. Mikro- ja ultrafiltröinnillä saadaan eroteltua eriasteisesti kaikki kiinteät aineet ja makromolekyylit. (Barampouti ym. 2020) Nanofiltröinnillä pystytään erottamaan suuret liuenneet molekyylit (kokoluokkaa 200- 400 amu), mutta myös jonkin verran tätä pienempiä ioneita, kuten kalsium-, magnesium ja ammoniumioneita. Käänteisosmoosilla pystytään erottelemaan edellä mainitut liuenneet ionit täydellisesti. (Hjorth ym. 2010) Suodatusmenetelmät ovat energia syöppöjä ja kalliita hankkia ja ylläpitää. Mädätysjäännöksen sisältämät bakteerit ja suolat voivat myös laskea menetelmien tehokkuutta. (Barampouti ym. 2020) Paineistettujen menetelmien lisäksi, myös paineetonta kalvoerottelumenetelmiä on olemassa. Tällaisia ovat bioelektrokemia, kalvotislaus, kaksisuuntainen kalvoelektrolyysi, kemsorptio kalvon läpi ja elektrodialyysi. (Barampouti ym. 2020)

Edellä mainittujen mädätysjäännöksen nestejakeen käsittelymenetelmien lisäksi lannasta eroteltua nestejakeetta on käsitelty myös sitouttamalla ravinteita biomassaan. Ravinnerikkaassa nestejakeessa voidaan esimerkiksi kasvattaa levää ravinteiden ja haitta-aineiden poistamiseksi. Kasvatettu levä voidaan tuottaa (biopoltoaineet, lannoitteet, rehu). Levän lisäksi ravinteita ja haitta-aineita on poistettu myös

vesiensuojelukosteikoilla, eli rakennetuilla kosteikoilla, joissa kasvatetaan mm. kelluvia kasveja ja muita kosteikkokasveja ravinteiden talteenottoa varten. Samalla kosteikoilla seisoessaan loppu orgaaninen aine hajoaa luonnollisissa prosesseissa. (Flotats ym. 2011) Myös mädätysjäännöksen nestejakeen käyttö kasvualustana voisi olla yksi potentiaalinen jakeen käyttökohde tiloilla, joilla ei ole tarvetta suurelle osalle nestejakeesta.

2.3 Mädätysjäännöksen ja sen jakeiden hyödyntäminen maatilalla

Mädätysjäännöstä ja siitä saatavia neste- ja kiintojakeita sekä muita tuotteita voidaan hyödyntää maatilalla monipuolisesti ja monin eri tavoin. Mädätysjäännöksen separointi helpottaa mädätysjäännöksen käyttöä ja käsittelyä. Saatavat neste- ja kiintoaine jakeet voidaan jatko käsitellä tai hyödyntää suoraan. Myös mädätysjäännös voidaan hyödyntää sinällään ilman käsittelyä lannoitukseen ja mikäli esimerkiksi tilan ravinnetasapainon kannalta tämä on hyödyllistä ja kannattavaa. Mädätysjäännös kuitenkin sisältää runsaasti fosforia ja typpeä, eikä välttämättä vastaa tilan peltojen ravinne tarvetta, samalla sen levittämistä rajaa samat säädökset, kuin lietelannankin levittämistä. (Guilayn ym. 2019) Siinä missä mädätysjäännöksen levittämällä on selkeitä etuja lietelantaan verrattuna (ravinteet kasveille paremmassa muodossa, hajuhaitat pienempiä, käsittely helpompaa, rikkakasvien ja bakteerien siirtyminen pelloille pienempää (tuhoutuvat pääosin mädättäessä)), ei se käyttö aina ole järkevää tai mahdollista sellaisenaan. (Aguirre-Villegas ym. 2019, Barampouti ym. 2020, Guilayn ym. 2019, Möller & Müller 2012, Virkkajärvi ym. 2016) Tämän vuoksi erottelu fosforirikkaaksi kiintojakeeksi ja typpirikkaaksi nestejakeeksi on yleistä. Vaikka erottelu ei jaottele ravinteita täydellisesti, soveltuvat ne erottelun jälkeen fosfori ja typpilannoitteiden korvaajiksi. Näiden jakeiden tuottaminen on usein kannattavaa, sillä niillä voidaan korvata mineraalilannoitteiden käyttöä, säästäten lannoite kuluissa. (Biokaasuteknologia 2015)

Käytännön esimerkiksi liettualaisessa Doyeni ym. (2021) kolmenvuoden lannoitekäyttö viljelykokeissa pitempiaikaisen lannoituskäytön ja viljelyvasteen muutoksia seurattiin vuosittain vaihtuvalla viljakasvatuksella (kevätvehnä, ruisvehnä, ohra) koealueella, jonka eri segmenttien lannoitukseen käytettiin kontrolliviljeys pois lukien typpipitoisuuden mukaan teollista verrokki typpilannoitetta ja kolmesta eri lähteestä peräisin olevaa mädätysjäännöstä (kana, nauta, sika). Kokeista nähdään niin erot teolliseen typpilannoitteeseen (pelkkä typpilannoitus) kuin eri syötelähteiden vaikutus maaperän koostumukseen. Maaperän typpi, hiili ja pH eivät muuttuneet kolmen koevuoden aikana merkittävästi: hiili ja pH laskivat kaikilla koealoilla; typpipitoisuus laski kontollialueella ja sika peräisistä mädätysjäännöstä käytettäessä.

Maaperän kaliumpitoisuus kasvoi huomattavasti mädätyslannoite aloilla ja laske kontrolli- ja typpilannoitealalla. Pellon fosforipitoisuus kasvoi kaikilla paitsi kananlannasta valmistetulla mädätysjäännöksellä. Syynä tähän annettiin Doyeni ym. mukaan lannoitusvahvuuden valinta typen mukaan, mikä rajasi typpirikkaan syötteen levitysmäärää verrattuna muihin koemateriaaleihin. Muutokset maannoksessa tarkasteltiin näytteen otolla ennen ensimmäistä viljelykautta ja viimeisen viljelykauden jälkeen. Viljan tuottavuus ensimmäisenä vuonna (kevätheinä) oli kontrollia korkeampi kaikilla lannoitteilla, typpilannoitteen ollessa paras. Toisena vuonna (ruisvehnä) viljatuotanto oli tasaista kaikilla aloilla (viljelykausi hyvin kuiva). Kolmantena vuonna (ohra) tuottavuus oli korkein mädätysjäännöksillä lannoitetuilla aloilla. Viljantuotannon määrän lisäksi seurattiin viljan laatua (proteiinipitoisuus), joka pysyi kaikkina vuosina kaikilla lannoitetuilla aloilla hyvänä (yli rehulaadun). Myös oljen laatua tarkasteltiin ja tulokset typpipitoisuuden osalta ovat jyviä vastaavia. Typen hyödyntämisen tehokkuutta (nitrogen use efficiency, NUE) eri viljely aloilla olivat yhtenevät typpipitoisuuden kanssa (eniten typpeä tuotteessa, eniten typpeä saatu maannoksesta). Mädätysjäännöksen hyödyntämiseen lannoitteena liittyen haittavaikutuksia ei havaittu ja vaikutus muutenkin vähäinen maaperänkuntoon, ja että pitemmällä aikavälillä mädätysjäännöksen käyttö on sadon määrän ja laadun kannalta hyödyllistä. (Doyeni ym. 2021)

Kokemuksia mädätysjäännöksen käytöstä viljelyssä on myös tutkittu ja tutkimukset ovat laajalti osoittaneet kasvien ravinteiden oton sekä tuotannon lisääntyvän mädätysjäännöksen käytön myötä. (Lamolinaro ym. 2022) Käyttökokemuksia siitä, että tilan ulkopuolisia lannoitteita tarvitaan vähemmän, on myös Suomessa. 2019 Biokaasulehden haastattelussa todetaan lannoite laskujen pienentyneen mm. Wenströmmiin sekä Huutolan tilalla. Huutolan tilalla vuosi tasolla säästöt ovat olleet 5000-10 000 € välillä. (Arffman & Taavitsainen 2019)

Kiintojaetta voidaan hyödyntää maanparannukseen sekä lannoitukseen fosforikatoalueilla fosfori- ja kiintoainepitoisuutensa johdosta. Jae voidaan levittää pelloille lannan tapaan. (Jørgensen 2009) Fosforirikkailla alueilla fosforijakeen käyttäminen lannoitukseen ei ole järkevää ympäristön kannalta, kuivajaetta voidaan kuitenkin hyödyntää tilalla myös muilla tavoilla. Kuivajaetta voidaan hyödyntää mm. navetassa kuivikkeena, lisäsyötteenä hakekattilassa tai lisäsyötteenä biokaasureaktorille. (Al Seadi ym. 2008, Møller ym. 2007, Setoguchi ym. 2022) Tällä tavoin käytettynä kiintojake voi auttaa pienentämään kustannuksia korvaavana materiaalina tai energian lähteenä säästäen siten näistä tarpeista muodostuvista kustannuksista.

Jakeiden jatkojalosteet voidaan niin ikään hyödyntää tilalla, mutta toisaalta niistä saatu taloudellinen hyöty ulos myytäessä voi myös olla kannattavampi vaihtoehto tilalle jatkokäsittelyjen vaatimien merkittävien investointien ja kulujen seurauksena. Kuivajakeesta valmistettavat kuivat pelletit lannoitteet, tuhka tai komposti voidaan helposti muokata maannokseen. (Biokaasuteknologia 2015) Samoin biohiili,

jolla voidaan parantaa maannosta ja johon esimerkiksi nestejakeesta voidaan imeyttää ravinteita hitaamman lannoitevasteen aikaansaamiseksi. (Barampouti ym. 2020, Bian ym 2023) Nestejakeista saatavat lannoitteet taas vastaavat hyvin kaupallisia saatavilla olevia lannoitteita ja niitä voidaan siten käyttää samaan tapaan, mutta verrattuna nestejakeeseen ne pystytään kuljettamaan myös kaukana sijaitseville pelloille kustannustehokkaasti. (Biokaasuteknologia 2015) Mikäli tilan kannalta kuljetusmatkat eivät kuitenkaan ole ongelma ja mädätysjäännös tai sen jakeet soveltuvat hyvin tilan ravinnetarpeisiin, voi olla järkevämpää hyödyntää jakeita suoraan ilman kalliita jatkokäsittelyjä.

2.4 Mädätysjäännöksen käsittelyn ja hyödyntämisen ympäristövaikutukset

Mädätysjäännöksen käsittelyyn liittyy monenlaisia ympäristövaikutuksia, jotka voivat olla mm. kasvi- huonepäästöjen kannalta niitä lisääviä tai vähentäviä. Ravinnerikkaiden materiaalien kanssa on hyvä huomioida myös ravinnehuuhtoumat sekä ulosteperäisiä materiaaleja käsiteltäessä mahdolliset patogeenit riskeinä ympäristölle ja ihmiselle. Mädätysjäännöksen oikeanlainen käsittely ja hyödyntäminen vähentää näiden erilaisten haittavaikutusten riskiä. Yleisesti neste- ja kiintoainejakeen erottelun on havaittu lisäävän hiilidioksidi, ammonium ja typpioksiduuli päästöjä. (Zhang 2022) Erottelun ja ravinteiden talteenoton on kuitenkin havaittu vähentävän metaanipäästöjä (VanderZaag ym. 2022, Zhang 2022) VanderZaad ym. havaitsivat ravinteiden talteenoton vähentää metaanipäästöjä mädätysjäännöstä säilöttäessä, kun valtaosa kiintoaineesta ja siten hajoavasta orgaanisesta materiaalista saadaan erilleen ja hyötykäyttöön (kuivike ja lannoitemateriaaleina usea vaiheisessa prosessissa) ennen ravinnejakeen säilömistä. (VanderZaag ym. 2022) Samalla lannoitekäytön on havaittu olevan eniten ympäristö- ja terveysvaikutuksiin positiivisesti vaikuttava tekijä. Lannoitekäytössä on kuitenkin huomioitava myös ravinnetarve ja lannoitteiden levitysmäärä, kuten lannoituksessa yleensäkin ravinnehuuhtoutumien estämiseksi. (Lamolinara ym. 2022)

Angouria-Tsorochidou ym. (2022) vertailivat eri asteisia mädätysjäännöksen (sianlanta, puhdistamoliete, elintarviketeollisuuden jätteet) jalostustapoja ja näiden ympäristövaikutuksia. Tutkimuksessa arviointiin kolmea käsittely tapaa: mädätysjäännöksen suoraa hyödyntämistä, mädätysjäännöksestä dekantterisentrifugilla eroteltujen jakeiden hyödyntämistä sekä jakeista jalostettujen lannoitejakeiden hyödyntämistä. Jatkojalostus tapahtui kahdessa perättäisessä suodatusprosessissa ultrasuodatuksen ja käänteisosmoosin avulla ja kaiken kaikkiaan prosessissa muodostuu kolme lannoitejaetta ja puhdasta vettä. Kaikki käsittelyt pienentävät hiilidioksidi päästöjä, mutta jatkojalostuskäsittelyistä vain pelkkä dekantterisentrifugin käyttö vähensi päästöjä verrattuna mädätysjäännöksen suoraan käyttöön. Jakeiden jalostus monivaiheinen prosessi lisää myös ammoniumpäästöjä materiaalista, mutta toisaalta on hyvä huomioida, että

levitettäessä selvästi eniten typpipäästöjä tuottaa käsittelemättömän mädätysjäännöksen käyttö. Yleisesti tarkastellessa useita ympäristöindikaattoreita (ilmaston lämpenemispotentiaali, happamoituminen, rehevöityminen jne.) ei elinkaariarvioinnissa ole selvää johtopäätöstä suoran käytön ja dekanterisentrifugilla erottelun molempien tarjotessa erilaisia etuja. Angouria-Tsorochidou ym. (2022) nostavat myös esille, että jatkojalostusta hyödyntäessä saadaan useita kiinteitä ominaisuuksiltaan erilaisia lannoitejakeita, lisäten joustavuutta lannoituksessa.

Suoria vaikutuksia ihmisten terveyteen on myös tutkittu mädätysjäännöksen käyttöön liittyen. Irlannissa toteutetussa tutkimuksessa todettiin, että mädätysjäännöksestä voi potentiaalisesti levittää mm. E. coli, salmonella ja listeria bakteereja. (Nag ym. 2020) Tähän potentiaaliseen terveysriskiin liittyen Nolan ym. tutkivat mädätyksen ja mädätysjäännöksen hygienisoinnin vaikutusta ravinne huuhtoumiin sekä mikrobi ja raskasmetalli päästöihin verrattuna perinteiseen lannan levitykseen. Viljelykokeissa tutkittiin näiden haitallisten komponenttien huuhtoutumista, kertymistä ja siirtymistä kasveihin (nurmi). Ryhmä havaitsi mädätysprosessin vähentävän näiden haitallisten aineiden ja eliöiden huuhtomaa vesistöihin, hygienisoinnin parantaen edelleen näitä ominaisuuksia. Mädätysjäännöksen käyttö käsittelystä huolimatta vähensi haitta-aineiden huuhtoumaa, kertymistä ja kasveihin siirtymistä erityisesti mikrobien osalta, vaikka merkittävämmät vaikutukset havaittiin pastöroidun mädätysjäännöksen kohdalla. (Nolan ym. 2020)

Lannoitusvaikutuksen lisäksi mädätysjäännöksen ja sen jakeiden pelloilla hyödyntämisen vaikutuksia on tutkittu niin maaperän laadun kuin tuottavuudenkin kannalta. Esimerkiksi erilaisia tutkimuksia mädätysjäännöksen levityksen vaikutuksista maaperän eliöihin sekä maaperän laatuun. (Jurgutis ym. 2021, Moinard ym. 2021) Moinard ym. tutkivat mädätysjäännöksen (märkämädättämöliete, syötteet: lietelanta (nauta), lannat (nauta, hevonen), jätevesiliete, rasva, muu maatalousjäte, myllyjen sivuvirrat ja nurmi-säilörehu) levityksen vaikutusta hieroihin lyhyellä ja pitkällä aikavälillä. Tutkimuksessa havaittiin, että levitys (annostus 40 t/ha ja 80 t/ha) lisää kuolleisuutta lieroissa välittömästi levityksen yhteydessä, oletettavasti ammoniakkin myrkyllisyyden seurauksena. Pitkällä aikavälillä lierokannan havaittiin kuitenkin kasvavan säännöllisen levityksen seurauksena. (Moinard ym. 2021)

Liettuassa tehdyssä pelto tutkimuksessa seurattiin mädätysjäännöksen (kananlanta, ruokajäte, maissi- ja punajuurijäte) käytön vaikutusta maannokseen ja pellon tuottavuuteen (nurmi) systeemissä, jossa pellot tuottavat biokaasulaitoksen syötettä uusiutuvan energiantuotannon ja muodostuva mädätysjäännös hyödynnetään näiden peltujen viljelyssä. Tutkimuksessa hyödynnettiin niin neste, kuin kiintoainetta erillisillä verrokkialueilla vuosittaisella lannoituksella (85 kg/ha ja 170 kg/ha lisäys molemmilla materiaaleilla) kolmen vuoden ajan. Käsittelemättömään peltoon verrattuna maannos paranee mm. orgaanisen hiilen ja typen lisääntyessä maannoksessa. Maannoksen parantumisen seurauksena pellon tuottavuus kasvoi parhaimmillaan yli kolminkertaiseksi verrattuna käsittelemättömiin alueisiin. Myös nurmen laatu

parani proteiinipitoisuuden kasvaessa. Lopputulemana mädätysjäännöksellä lannoitettujen nurmialueiden nurmi tuotti keskimäärin 19 % enemmän biokaasua kuin lannoittamattomien alueiden. (Jurgutis ym. 2021)

Lannoitehyödyn ja siten teollistenlannoitteiden korvaamisen lisäksi jakeiden muunlaisella hyödyntämisellä on ympäristö vaikutuksia. Esimerkiksi biokaasutuksen ja siitä muodostuvan kiintoaineen käyttö kuivikkeena on laskettu laskevan kasvihuonepäästöjä noin 7 % verrattuna lietelannan käyttöön. Lisäksi kierrätetyn petimateriaalin käytön yhdessä biokaasulaitoksen kanssa laskettiin maitotilalla olevan kannattavaa ja lisäävän tuloja lähes 300 \$ eläintä kohden Japanissa toteutetussa tutkimuksessa. (Setoguchi ym. 2022)

Mädätysjäännöksen sisältämien ravinnepäätteiden erottelu ja näiden jakeiden kohdennettu käyttö mm. teollisuuslannoitteita korvaten tai kuivikkeena voi vähentää teollisten lannoitteiden tarvetta ja siten niiden valmistukseen käytettävän energian ja neitseellisten raaka-aineiden käyttöä. Samalla oikein kohdennetut ravinteet voivat potentiaalisesti vähentää ravinnehuuhtoumaa. Lannoite käytössä mädätysjäännöksen hyödyntäminen parantaa maaperää. Kaikkiaan mädätysjäännöksen hyödyntäminen tilalla voi siis vähentää toiminnan aiheuttamia ravinne- ja kasvihuonepäästöjä, uusiutumattoman energian ja neitseellisten ravinteiden tarpeen vähentyessä.

3 BIOKAASUN TUOTANNOSTA SAATAVIEN SIVUVIRTAJAKEIDEN TUOTTEISTAMINEN

Mädätysjäännöstä ja sen eroteltuja komponentteja voidaan käyttää useissa ei käyttökohteissa, joista tilalla merkittävin on varmasti lannoite käyttö suoraan tai jatkokäsittelyjen kautta. Alkuperäisen materiaalin ja sen jakeiden hyödyntämisen lisäksi mädätysjäännöksestä voidaan myös valmistaa kiertolannoitteita, eli lannoite valmisteita, jotka on valmistettu kierrätysmateriaaleista peräisin olevista ravinteista. (Tampio ym. 2018) Edellisessä luvussa esitetyn mukaan mädätysjäännöksestä ja siitä erotelluista jakeista voidaan valmistaa monenlaisia lannoitemateriaaleja, kuten ammoniumsulfaattia, struviittia, nestemäisiä ravinne tiivisteitä sekä kiintoainekomponentteja. Lannoitteiden ja kasvunedistäjien (maanparannusaineet) lisäksi mädätysjäännöksen kiintoainejakeesta voidaan valmistaa kuiviketta, polttoainepellettejä, kompostia tai muuta maannosta, joita voidaan myös tuotteistaa, mikäli näille ei tilalla ole tarvetta. Kuivikkeita voidaan hyödyntää esimerkiksi läheisillä maatiloilla. Kompostia tai muuta maannosta johon mädätysjäännöksen kiintoaine voidaan hyödyntää viherrakentamisen ja maisemointiin. Kiintoaineesta puristetut polttoaine pelletit voidaan käyttää pellettikattilassa energiantuotantoon kuten tavallinenkin muu pellettimateriaali. (Barampouti ym. 2020, Biokaasuteknologia 2015, Jørgensen 2009, Setoguchi ym. 2022, Vilanova Plana & Noche 2016)

Tuotteistamisessa on kuitenkin huomioitava erilaiset säädökset, jotka koskevat näitä lantaperäisiä materiaaleja. Lannoitevalmisteiden tulee vastata lainsäädännön niille asettamia vaatimuksia. Hygienisointi on yksi lisätoimenpide, jota voidaan tuotantotavasta riippuen vaatia (mikäli tuotteen katsotaan hygienisoituvan tuotannon aikana, ei erillinen hygienisointi ole pakollista). (Tampio ym. 2018) Hygienisointi sekä erilainen analytiikka, jota tuotteiden koostumuksesta vaaditaan voi olla merkittävä kuluerä pienemässä kokoluokassa.

Luonnonvarakeskus on julkaissut vuonna 2018 oppaan kierrätyslannoitteiden valmistukseen. Oppaan mukaan kompostointi ja mädätys ovat yleisiä prosesseja, joilla kiertolannoitteita Suomessa valmistetaan, mutta että mädätysprosessien tarkoitus on harvoin lannoite valmistus ja siten tuote vaatii tyypillisesti jatkojalostusta. Tyypillisiä jatkojalostusmenetelmiä mädätyksen jälkeen ovat hygienisointi, separoinnilla sekä jälkikompostointi. Näitä vaiheita voi seurata erilaiset jakeiden jatkokäsittelyt, joita jo edellä on esitetty. Lannoite vaikutuksen varmistamiseksi jatkojalostus seostamalla voi olla tarvittava toimenpide myytiin meneville lannoitteille, jotta se vastaa markkinoilla olevaa tarvetta. Lannoitteiden lisäksi mädätysjäännöksestä voidaan tuottaa maanparannusaineita. Maanparannusaineiden on tarkoitus parantaa maannoksen rakennetta, kuten lisätä vedenpidätyskykyä ja edistää pieneliöiden elin oloja. Suomessa

kaikkia lannoitevalmisteita säätelee lannoitevalmistelaki, joka on uudistumassa. Laki asettaa rajat valmisteiden raskasmetalli ja muille haitta-aineiden pitoisuuksille sekä hygienialle. Lisäksi kiertolannoitteita koskee omat levityssäädöksensä. Näiden yleisten säädösten lisäksi mädätysprosessointia koskee omat erikoisvaatimuksensa. Karkeasti myytävät lannoitetuotteet tulee valmistaa hyväksytyssä laitoksessa, jossa toiminnan voi aloittaa omalla ilmoituksella ja on omavalvonnan alaista. Lisäksi mädätysjäännös tulee hygienisoida syötteen vaatimalla tavalla. Suuremman mittakaavan tuotantoon tarvitaan myös ympäristölupa. Lannoitevalmisteen markkinoille saattamiseksi täytyy laitos hyväksyttää ja tehdä aloitusilmoitus Ruokavirastolle, tuotteella olla tyyppimini sekä tuoteseloste. Ruokavirasto toimii valvojana lannoitevalmistustoiminnalle. EU-alueella lannoitteita koskee myös REACH-asetus sekä EY-asetus EY 2003/2003, asetukset eivät kuitenkaan tällä hetkellä kata orgaanisia lannoitteita. Mikäli tuote täyttää osoitetusti CE-merkinnän vaatimukset voidaan tuotetta markkinoida vapaasti myös EU-alueella, mutta myös kansallinen lainsäädännön puitteissa hyväksytyjä tuotteita on mahdollista asettaa markkinoille muihin EU-maihin omilla erityisjärjestelyillään. (Tampio ym. 2018)

Mädätysjäännöksen eri jakeita on siis mahdollista tuotteistaa monipuolisesti, ja kaikkia muodostuvia jakeita voidaan hyödyntää myös tilan ulkopuolella, samaan tapaan kuin ne voidaan hyödyntää tilalla itsellään tarpeiden puitteissa. Tuotteistuksessa on hyvä huomioida erilaiset asetukset lainsäädäntö ja tuotteistamiseen liittyvät vaatimukset. Lainsäädännön sekä potentiaalisten jalosteiden suhteen on hyvä ottaa huomioon tilan omat tarpeet ja resurssit tuotteistettavien materiaalien ja tuotteistuksen vaatiman ajan sekä investointien suhteen. Mikäli tilan omat tarpeet mm. ravinteiden kautta kattavat tuotannon esimerkiksi yksin tai yhdessä kuivikekäytön kanssa, ei merkittävät investointi lannoitejalostuslaitteistoihin (separointi laitteistoa pitemmälle) todennäköisesti ole järkevää. Tiloilla, jotka eivät tarvitse tai joilla sitä ei voida hyödyntää, mädätysjäännöksen jatkojalostaminen voi hyvinkin toimiva vaihtoehto, ja riippuen ympäröivästä tarpeesta ja tuotanto volyymistä voidaan jatkojalostusta viedä myös pitemmälle. Väliin jäävät kuitenkin vielä tilat, joiden tuotanto ylittää oman tarpeen, mutta joissa ei ole järkevää jalostaa ylimäärää pienen määrän vuoksi. Yksi potentiaalinen ratkaisu voisi olla tilojen yhteinen jalostustoiminta, jossa toimintaan osallistuvat voisivat yhdessä jalostaa sekä myydä tilojen ylijäämämateriaalin pois tiloilta kasvattaen ulosmyytävää volyymiä sekä tuotannon varmuutta ja joustavuutta. Samalla investointien kulut kohdentuisivat laajemmalle joukolle pienentäen potentiaalisesti riskejä myös kulujen suhteen. Tällainen yhteistoiminta voitaisiin järjestää esimerkiksi osuuskunta tyyppisesti.

4 KANNATTAVUUDEN ARVIOT KIRJALLISUUDESSA

Tässä kappaleessa on esitelty Suomen oloihin arvioituja lantaperäisen materiaalin jalostusmenetelmien kannattavuutta koskevia arvioita. Suomessa arvioita on tehty mm. Savonia ammattikorkeakoulun ja Luonnonvarakeskuksen hankkeissa Ravinnerinki ja Lantalogistiikka, joissa on tutkittu lietelannan separoinnin tapoja ja kannattavuutta. Vaikka käsiteltävä materiaali ei ole mädätysjäännöksen kanssa identtistä, voidaan materiaaleilla nähdä vastaavuutta ja kustannusten kokoluokka on oletettavasti vastaava. Savonian kustannusarviossa yhden robotin navetan, eli 2000 m³ vuosittaisen liete määrän käsittelyn katsottiin olevan kannattavaa ruuviseparaattorilla pienentyvien levityskustannusten johdosta. Kannattavuutta voidaan edelleen lisätä hyödyntämällä kuivajakeen kuivikkeena. (Partanen 2019) Samassa yhteydessä Luonnonvarakeskus on arvioinut ruuviseparaattorin ja dekanterisentrifugin (dekanterilingon) käytön kannattavuutta esimerkin omaisesti 120 lehmän kokonaisuudessa, jossa lietettä muodostuisi 3000 m³/a nousisivat kustannukset vielä palveluna ostettavan separoinnin yläpuolelle (palveluna 1,20 €/m³). Ruuvipuristimella käsittely määrä tulisi Luken laskelmien mukaan olla 3000 ja 4000 m³/a välillä, jotta tilan olisi järkevää investoida laitteistoon palvelun sijasta. (Pyykkönen & Ervasti 2019)

Suomen ympäristökeskuksen kustannusarviossa BioKymppi Oy:n laitosta esimerkkinä hyödyntäen separoinnista sekä separoinnin ja kalvosuodatuksen yhdistelmästä. Jalostukseen käytettävän energian oletettiin tulevan laitoksen tuototannosta, joten sähkön hinnaksi määritettiin sähköverkon syötöstä saatava korvaus. Mallissa BioKymppi Oy myy lannoitenesteen ja sen levityksen yhtenä pakettina, jolloin valmistus, varastointi, kuljetus ja levityskustannukset kohdistuvat biokaasulaitokselle. Kustannusten kannalta merkittävä tekijä oli kuljetusetäisyys, sillä molemmat erottelu tavat olivat kannattavia tämän kokoluokan laitoksella (19 000 t/a, Latvala). Kuljetusetäisyyden kasvaessa lähenevät käsittelyjen kannattavuus, siten että lyhyillä matkoilla ruuvipuristetun nestejakeen valmistus on kannattavampaa ja pitkillä matkoilla (yli 80 km säteellä) suodatuksen kautta saatavan ravinnetiivisteiden valmistus on kannattavampaa. Tuloja on oletettu saatavan 1€/kg ravinnetta (liukoinen fosfori, kalium ja typpi). (Horn ym. 2020)

5 LABORATORIOKOKKEET

Laboratoriokokeiden tarkoituksena oli tarkemmin tutkia erilaisten erottelumenetelmien ja niiden yhdistelmien eroja maitotilalta peräisin olevan mädätysjäännöksen sekä maatilalla ruuvipuristetun mädätysjäännöksen eli biorejektin käsittelyssä. Laboratoriokokeiden aikana tutkittujen erottelu- ja käsittelymenetelmien vaikutuksia analysoitiin kiintoaine- sekä koostumusmuutosten perusteella hyödyntäen ICP-MS, IC, AAS ja Kjeldahl menetelmiä materiaalien koostumuksen selvittämiseksi.

Laboratoriokokeissa tutkitut käsittelymenetelmät olivat sentrifugointi (pilotti mittakaavan dekanterisentrifugi sekä laboratoriosentrifugi), suodatus (kangas, biohiili), haihdutus/konsentroidi ja laskeuttaminen. Kokeisiin linkittyi myös erilaisia ravinteiden erottelumenetelmiä (imeytys biohiileen, saostimien käyttö). Laboratoriossa käytetyt materiaalit sisältävät useita hankkeeseen osallistuneiden yritysten tarjoamia näytemateriaaleja. Pääraaka-aineet eli mädätysjäännös ja biorejekti näytteet olivat peräisin Ilpo Wennströmin tilalla. Hankkeen aikana näytemateriaalia hankittiin useita kertoja eri ajankohtina. Mädättemateriaalien koostumuksen vaihtelun vuoksi alla on eritetty mädätysjäännöksen ja biorejektin keskimääräistä koostumusta, tulosten tarkastelua varten. Keskimääräinen mädätysjäännöksessä kuiva-ainepitoisuus 5,93 % (n=5) ja biorejektin kuiva-ainepitoisuus 4,38 % (n=2). Keskimääräiset ravinnepitoisuudet on esitetty Taulukossa 5. Carbons Finland Oy tarjosi useita biohiilinäytteitä (...) tuotevalikoimastaan hankkeessa toteutettuihin biohiilitesteihin. Haarla Oy tarjosi kolmea teollista flokkulanttia (Biopolymer HTH25, Flocstar ja Hfloc) flokkulointi kokeiden suoritukseen. Haarla Oy:n asiantuntijat tarjosivat myös ohjeistusta materiaalien käyttöön flokkuloinnissa.

TAULUKKO 5. Mädätysjäännöksen ja biorejektin merkittävät alkuaine komponentit (>0,1 %) ICP-MS ja Kjeldahl menetelmillä

	Mädätysjäännös % KA (n=5)	Biorejekti % KA (n=2)
Al	0,06	0,10
Ca	1,70	3,67
Fe	0,09	0,12
K	6,00	8,33
Mg	1,13	1,48
N	7,10	6,36
Na	0,67	0,88
P	1,16	1,65
S	1,53	1,31

5.1 Suodatus

Suodatus kokeissa on hankkeen aikana testattu monen tyyppisiä kangaslaatuja ja materiaaleja (TAULUKKO 6). Yleisesti suodatuksessa ongelmaksi muodostui kankaan tukkiutuminen ja/tai materiaalin itsensä suodatuspinnalle muodostama tiiviskalvo, joka estää suodatuksen niin ali- kuin ylipaine suodatuksessa. Kalvon muodostuessa suodattimen pinnan mekaanisen agitoinnin on havaittu auttavan suodatuksessa ja lopputuloksena voidaan saada muotonsa pitävää tuotetta. Laboratoriokokeiden aikana suodatusta testattiin pienissä erissä painovoiman ja mekaanisen agitoinnin yhdistelmällä, alipainesuodattamalla bühnersuppilolla vesi sekä Piab-imulla, ylipainesuodatuksella itserakennetulla batch-suodattimella (KUVA 1b) sekä isommassa mittakaavassa kehysuotopuristimella (KUVA 1a) ja nauhasuodattimella (Kpedu).

TAULUKKO 6. Suodatuskokeissa käytetyt kangaslaadut.

Kangas	Materiaali	Huokoskoko (µm)
MON-500	Nailon, kudottu, yksikerroksinen	500
MON-400	Nailon, kudottu, yksikerroksinen	400
MON-300	Nailon, kudottu, yksikerroksinen	300
MON-200	Nailon, kudottu, yksikerroksinen	200
MON-100	Nailon, kudottu, yksikerroksinen	100
MON-60	Nailon, kudottu, yksikerroksinen	60
MON-25	Nailon, kudottu, yksikerroksinen	25
Suodatinkangas, puutarha	Polypropeeni, kuitukangas	-
S1107-L2K2-1700	Polypropeeni, kudottu, monikerroksinen	-
S1159-V2K2-M2-1600	Polypropeeni, kudottu, monikerroksinen	-
S1121-L2 -1900	kudottu, monikerroksinen	-
DL W2-B000-SK01 (SEPAR)	kudottu, monikerroksinen	-

Pienenmittakaavan laboratorio kokeet aloitettiin alipainesuodatuksella ja mekaanisella käsinavustetulla suodatuksella. Näissä kokeissa havaittiin, että kunnollista kakkua ei muodostu, ellei käytetä melko harvaa suodatinta tai vaihtoehtoisesti hyvin pieniä näyte määriä, jotta suodatin ei ehdi tukkeutua tai tiivis kalvo muodostua. Koska alipainesuodatuksen havaittiin tiiviin kalvon muodostumisen ja/tai kankaan tukkeutumisen tapahtuvan melko nopeasti, testattiin parhaiten toimivia kangaslaatuja ylipainesuodatuksella hyödyntäen kehysuotopuristinta. Näin pystyttiin myös hyödyntämään suurempia näytekojoja, ta- soittaen kankaiden vertailtavuutta heterogeenisen näytteen vaikutusta. Kehysuotopuristin tiivistyy suotokehysten väliin asetettavilla suodatin kankailla, joten ohuempien nylonkankaiden (MON-kankaat) väliin valmistettiin karkeammasta tukiverkosta (muovipohjainen kangasmateriaali) riittävän tiiviyden var-

mistamiseksi (KUVA 1a). Kehyssuotopuristimen ja painesuodatuksen lopputulos oli sama kuin alipainesuodatuksenkin, suodatin kankaille muodostui tiiviskalvo suodatettavaa materiaalia, jonka jälkeen neste ei enää virrannut suodatin kankaan läpi. Kankaan pinnalta pois päin siirtyessä muodostunut kaku on kosteamaa ja kosteampaa muuttuen lopulta lietteeksi kuten Kuvassa 1a on esitetty.

Kehyssuotopuristimella ja pienessä mittakaavassa laboratoriossa tehtyjen mekaanista liikuttelua suodatinpinnalla hyödyntävien kokeiden perusteella päätettiin testata biorejektin suodatusta nauhasuodattimella. Kpedun tiloissa on käytössä Pannevis 510.001, RT100 nauhasuodatin, jolle valmistimme puutarhaan tarkoitettua suodatinkangasta suodatin nauhan (todettu hyväksi materiaaliksi, jonka pystyi liittämään itseensä lenkiksi liimaamalla pitävästi, jonka takia se voitiin asettaa suodattimelle. Nauhasuodattin toimii alipainesuodatus-periaatteella ja nauhan päässä oleva kaavin kiintoaineen irrottamiseen nauhalta. Tarpeeksi hitaan nauhan liikkeen (riittävän imuajan) mukaista hidasta lietteen syöttöä ei kuitenkaan pystytty säätämään. Hitaimmilla asetuksilla liete tulvi nauhalta kiintoaineen sekaan, nestemäärän ollessa liian suuri imunopeuteen nähden nauhapinnan läpäisykyvyn laskiessa. Kokeen alussa kiintoainetta saatiin kuitenkin kaavittua nauhalta ja siten kokeet vaikuttivat vastaavalle tekniikalle lupaavalta vaikkakaan kyseinen prosessi ei lopulta toiminut.



KUVA 1. a) Tukkiutuneen kehyssuotopuristimen kaku, b) Ylipainesuodatin, omavalmiste.

Parhaiden kankaiden suodatuskykyä arvioitiin karkeasti panossuodatuksella paineistetulla suodattimella. Lopulta suodatinkankaiden vertailua varten hyödynnettiin pientä omarakenteista ylipainesuodatinta (KUVA 1b), jonka avulla kvantifioitiin eri kankaiden suodatuskykyä. Kokeiden aikana testattiin puutarhakäyttöön tarkoitettua suodatinkangasta sekä pyrittiin testaamaan käytössä olevat yksikertaiset nailon kankaat läpi. Koelaitteen pyöreän suotinpinnan halkaisija on noin 5 cm. Kokeissa liete panos asetettiin suodattimeen ja se pyrittiin puristamaan noin 2 bar paineella suodattimesta läpi viiden minuutin ajan. Mikään materiaaleista ei testatulla panoskoolla (noin 1,5 dl) suodattunut kokonaisuudessaan ja suodattuminen loppui ennen viiden minuutin koeajan päättymistä. Suodatinkangas sekä suurin reikäiset nailon kankaat pystyttiin suodattamaan jollain tasolla, mutta MON-60 kangas ehti tukkeutua ennen kuin suodosnäytettä ehti kertyä ja kangas repesi paineen alla (KUVA 2). Tämän seurauksena pienin reikäistä MON-25 kangasta ei testattu. Tulokset suodoksen laadusta on esitetty Taulukossa 7. Tuloksien perusteella voidaan sanoa, että hienojakoinen kiintoaine sisältää vielä fosforia ja sitä on mahdollista suodattaa pois myös pienemmillä suodattimilla. Eli kiintoainepitoisuuden laskeessa laskee myös fosforipitoisuus. Samalla huokoskoon pienetessä kalvon muodostus nopeutuu ja suodoksen läpivaluma laskee.

TAULUKKO 7. Parhaiten toimivien suodatinkankaiden suodatuksen kvantifionti.

Kangas	Näyte (MK R8)	Suodos	Suodoksen osuus näytteestä	Suodoksen KA	Suodoksen P	
	g	g	%	%	mg/kg	mg/kg KA
MON-200	153	43	28	2,80	297	10600
MON-100	153	39	26	2,63	258	9822
Harso	153	23	15	2,52	258	10239

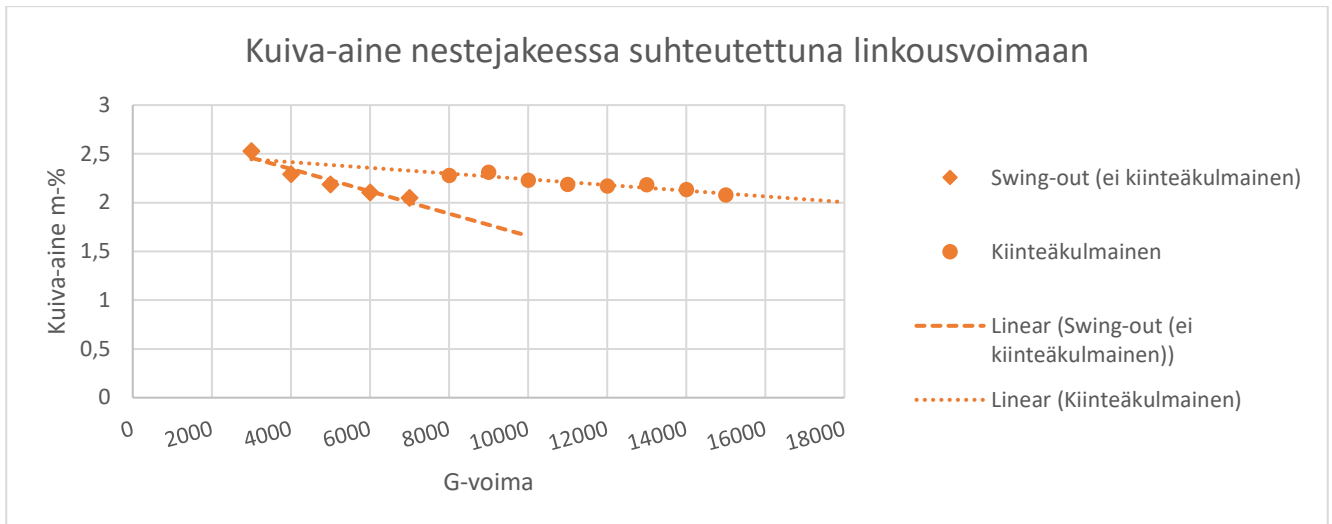
Kokeiden perusteella toimiva suodattaminen vaatii suodattimen pinnan ajoittaista puhdistusta, mutta sopivilla laitteilla (suodatuspintaa kaapiva tai vastaava) ja yksinkertaisella kankaalla suodattaminen ei oletettavasti ole haaste sinänsä ainakaan tarpeeksi suurilla huokoskoilla. Suodatuksen aikana muodostuva kalvo vaikuttaisi muodostuvan kaikista pienimmistä partikkeleista (mahdollisesti mädätysjäännöksen ja biorejektin sisältämästä solukosta), joka voi hankaloittaa suodatusta tietyn kynnyksarvon alle menevässä huokoskoossa. Kokeissa toimivimmaksi on todettu yksinertainen nylonkudos, joka laboratoriomittakaavassa on saatu toimimaan niin 200 kuin 100 µm reikäkoolla. Tätä pienempi reikäiset kankaat ovat työläitä ja niiden toimivuutta pitäisi voida testata sopivammalla laitteistolla.



KUVA 2. MON-60 kangas painesuodatuksen jälkeen.

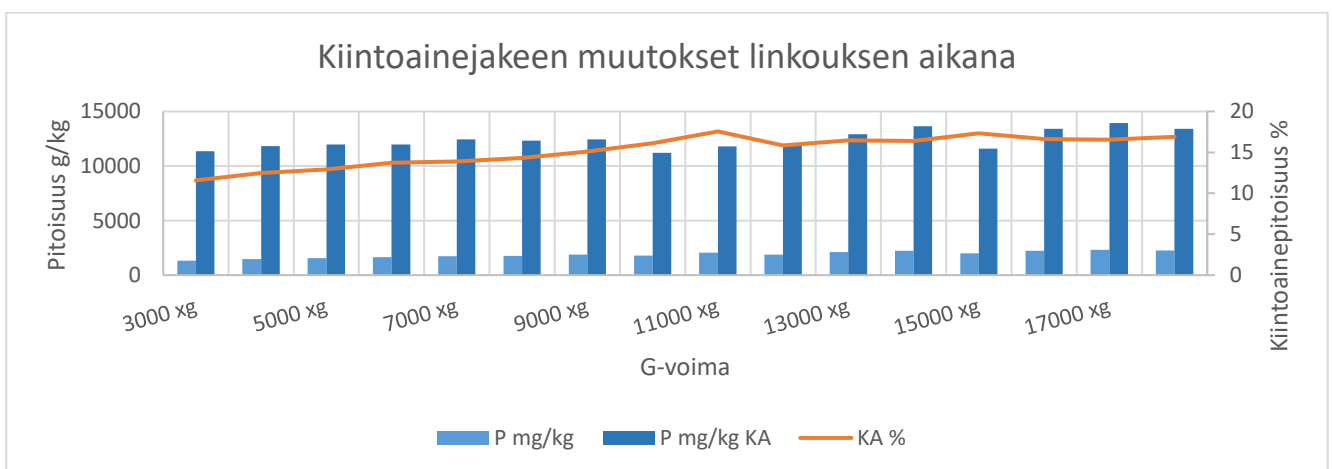
5.2 Sentrifugointi

Mädätysjäännöksen sekä biorejektin sisältämän kiintoaineen erottelua testattiin hankkeen aikana myös sentrifugointi menetelmillä. Erottelua testattiin niin laboratoriosentrifugilla kuin pilottimittakaavan dekanterisentrifugilla. Sentrifugointi testauksessa pyrittiin seuraamaan linkouksen aiheuttaman voiman vaikutusta nestejakeen kiintoainepitoisuuteen. Dekanterisentrifugia (ThermoScientific Multifuge X Pro Series) testattiin mädätysjäännöksen käsittelyyn. Kokeiden aikana todettiin, että mädätysjäännös täytyi esisuodattaa, jotta se voitiin edes pumpata laitteelle, sillä kyseisen laitteen sisään otto tapahtuu pienellä peristaattisella letkupumpulla. Kiintoaine, jonka dekanterisentrifugi sai syötettyä ulos, oli murenevaa ja muihin menetelmiin verrattuna kuivempaa. Valtaosa hienommasta aineksesta, joka saatiin erotettua lietteestä, oli kuitenkin tahmaista eikä irronnut laitteen sisäisestä ulos syöttö ruuvista. Osalti tämän johdosta (neste viipymä aika pieneni ruuvin täytyessä) ja osalti rajallisen pyörimisnopeuden (maksimi pyörimisnopeus 10 000 rpm) johdosta, sisälsi nestejake edelleen merkittävästi hienoainetta. Alustavasta testauksesta dekanterisentrifugilla siirryttiin seuraavaksi laboratoriosentrifugin käyttöön, jotta saataisiin parempi kuva hienoaineen laskeutumiseen tarvittavista voimista ja voiman vaikutuksista nestejakeen koostumukseen. Tulokset laboratoriossa tehdyistä sentrifugointi kokeista Kuvioissa 1-3.



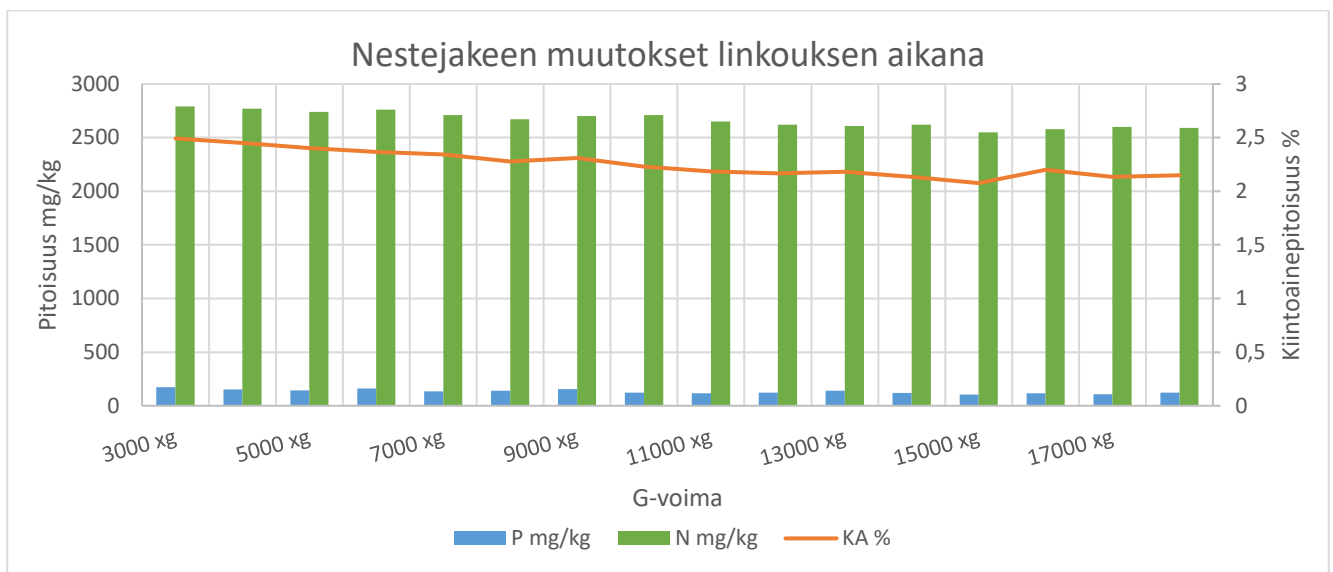
KUVIO 1. Linkousvoiman vaikutus erotellun mädätysjäännöksen nestejakeen kiintoainepitoisuuteen.

Kuviosta 1 nähdään nestejakeen kiintoainepitoisuuden laskevan alimmillaan reiluun 2 % ja jo pienimmilläänkin g-voimilla (3000 xg) 2,5 % eli alle puoleen alkuperäisestä kiintoainemäärästä. Jäljelle jäävä supernanttiliuos on ruskeaa ja läpinäkymätöntä, sakka tahmeaa ja kosteaa erikokoisia partikkeleja sisältävää... Sentrifugoinnilla on tarkoitus lisätä materiaalin käsittelyä ja parantaa ravinteiden erottelua. Niinpä jakeista seurattiin kiintoainepitoisuuden lisäksi ravinne (P ja N) pitoisuuksia. Kuviossa 2 on esitetty kiintoainesakan koostumuksen muutosta käytetyn g-voiman suhteen. Kuviosta nähdään, että fosforin osuus kiintoaineessa pääsääntöisesti kasvaa g-voiman kasvaessa, ja vaikuttaa tasaantuvan noin 13 000 xg:tä ja sitä suuremmilla voimilla. Myös kiintoaineen kuiva-ainepitoisuus vaikuttaa tasaantuvan 11 000 xg:sta eteenpäin. Fosforipitoisuuden kasvu ei kuitenkaan ole suurta ja vaihtelu näytteiden välillä on merkittävää, mitä todennäköisimmin heterogeenisen näytteen johdosta. Tästä huolimatta yleistrendi on kasvava.



KUVIO 2. Linkousvoiman muutoksen vaikutukset kiintoainejakeen fosfori ja kuiva-ainepitoisuuteen.

Vastaavasti nestejakeen kiintoainepitoisuus laskee yhdessä fosforipitoisuuden kanssa ja tasaantuu jonkin verran suuremmilla g-voimilla. Myös nestejakeessa vaihtelu on suurta, mutta trendi laskeva (KUVIO 3). Vastaava trendi voidaan nähdä myös tyypipitoisuudessa. Tämä ei oletettavasti kuitenkaan johdu ainakaan merkittävässä määrin siitä, että tyyppiä siirtyisi kiintoainejakeeseen, vaan todennäköisemmin haihtuminen on voimakkaampaa mitä rankempi käsittely on. Kuten jo 3000 xg:n tuloksista nähdään, että tyyppi pitoisuus on laskenut keskimääräisestä (märän näytteen tyypipitoisuus mädätysjäännökselle noin välillä 3600-4100 mg/kg). Sama voidaan havaita myös fosfori pitoisuudessa, joka mädätysjäännöksessä on tyypillisesti 600-750 mg/kg, mutta laskee nestejakeessa jo pienimmillä voimilla alle 200 mg/kg ja parhaimmillaan merkittävästi alle 150 mg/kg eli alle neljäsosaan alkuperäisestä.



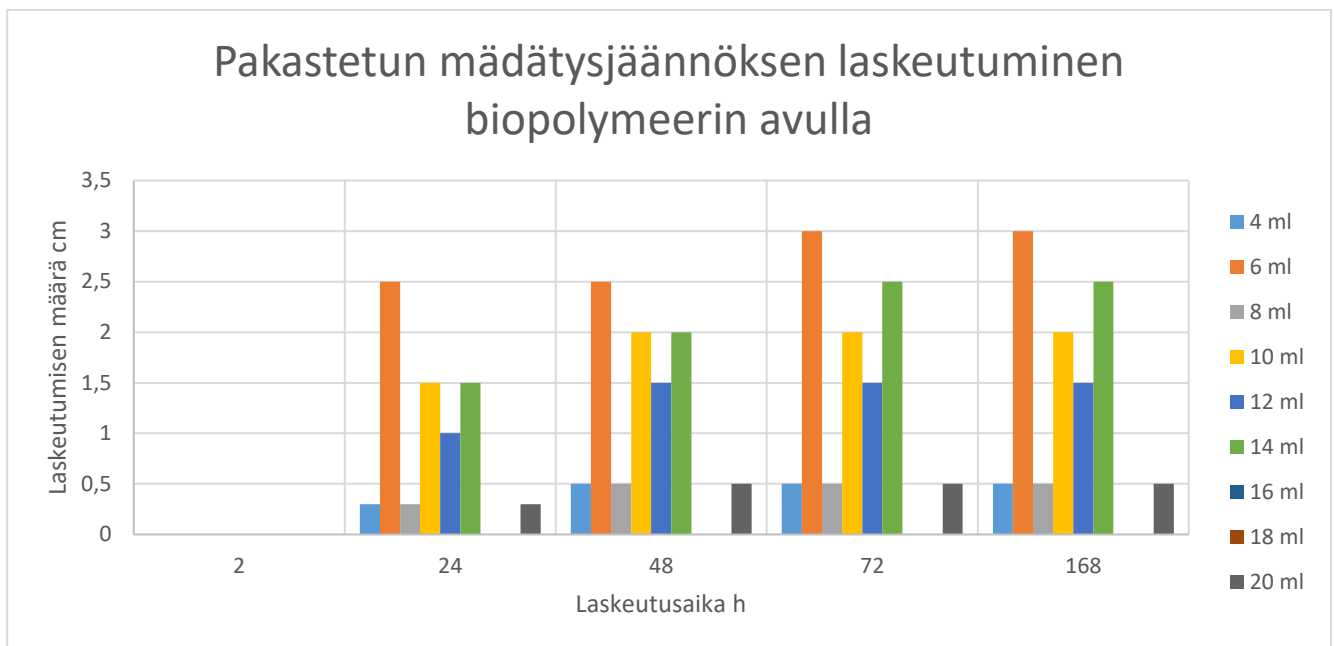
KUVIO 3. Linkousvoiman muutoksen vaikutukset nestejakeen fosfori, tyyppi ja kuiva-ainepitoisuuteen.

Mädätysjäännöksen sentrifugointi vähentää merkittävästi materiaalin kiintoainepitoisuutta ja siirtää jonkin verran fosforia. Vastaavaan kiintoaineen ja fosforipitoisuuden laskuun ei päästä ruuviseparoinnin avulla, ainakaan käytössämme olleessa koemateriaalissa. Fosforia on nestejakeeseen suspendoituneessa hienossa kiintoaineessa vielä merkittävästi ja sitä on mahdollista siirtää kiintoainejakeeseen linkoamalla.

5.3 Flokkulointi, koagulointi ja laskeutuminen

Laboratoriossa testattiin erilaisia flokkulointiaineita / koagulointiaineita ja niiden vaikutusta mädätysjäännöksen laskeutumiseen ja käsiteltävyyteen. Oletettavan lannoitekäytön myötä keskityttiin biopohjaisiin materiaaleihin, jotta mädätteisiin ei lisättäisi potentiaalisesti haitallisia aineita. Erilaisia aktivoituja ja muita luonnonmateriaaleja on käytetty onnistuneesti jätevesien puhdistukseen. (Asharuddin ym. 2019, Popovic ym. 2017, Turunen ym. 2019, Usefi ym. 2019) Mädätysjäännöksen sakeus erottaa sen jäteveden

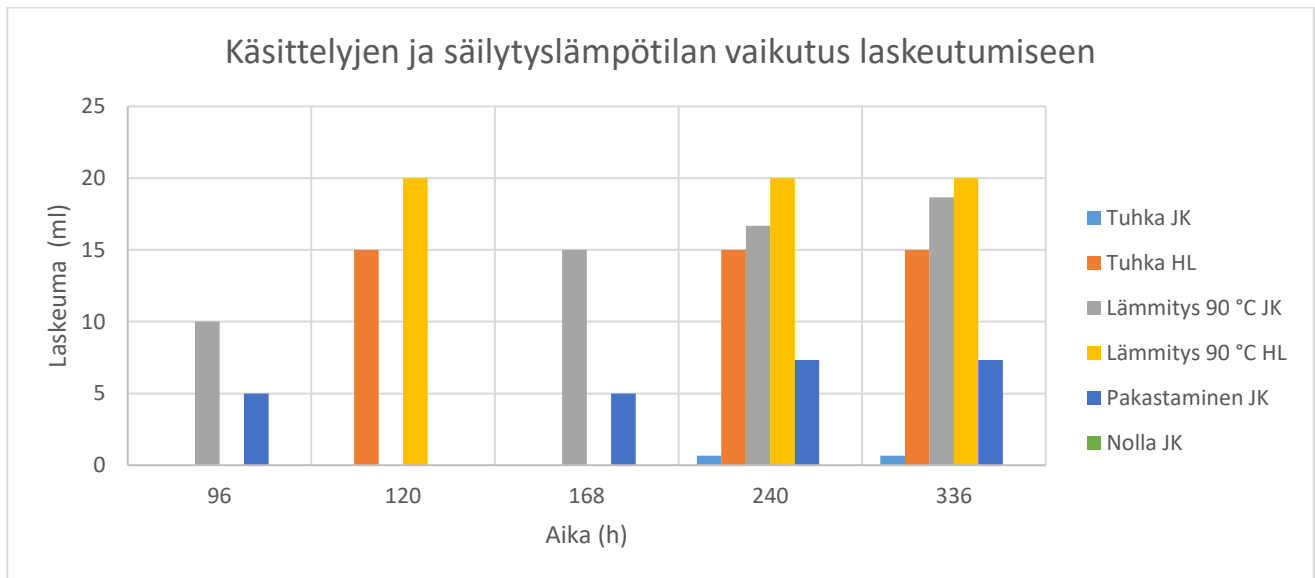
käsitellystä, joten haluttiin tutkia voisiko vastaavia materiaaleja hyödyntää myös tällaisten paksujen runsaasti orgaanista materiaalia sisältävien lietteiden kanssa. Käytössä oli luonnollisia flokkulanteja, kuten tärkkelys, tanniini ja kitiini liuoksia, sekä Haarla Oy:n tarjoamia teollisen vedenpuhdistukseen tarkoitettuja, flokkulanteja pääsääntöisesti 1 % liuoksina. Käytetyistä flokkulanteista yksi oli biopolymeeri (A) jonka rinnalla käytettiin kahta perinteisempää flokkulanttimateriaalia (B, C). Flokkulanttien käytössä tarkkailtiin, erottuuko neste ja kiintoaine paremmin omiksi jakeikseen. Pääsääntöisesti tämä tarkoitti kiintoaineen laskeutumisen silmämääräistä tarkastelua ja erottuneiden faasien analysointia.



KUVIO 4. A -flokkulantin lisäyksen vaikutus eri maltillisina tilavuusosuuksina ajansuhteen.

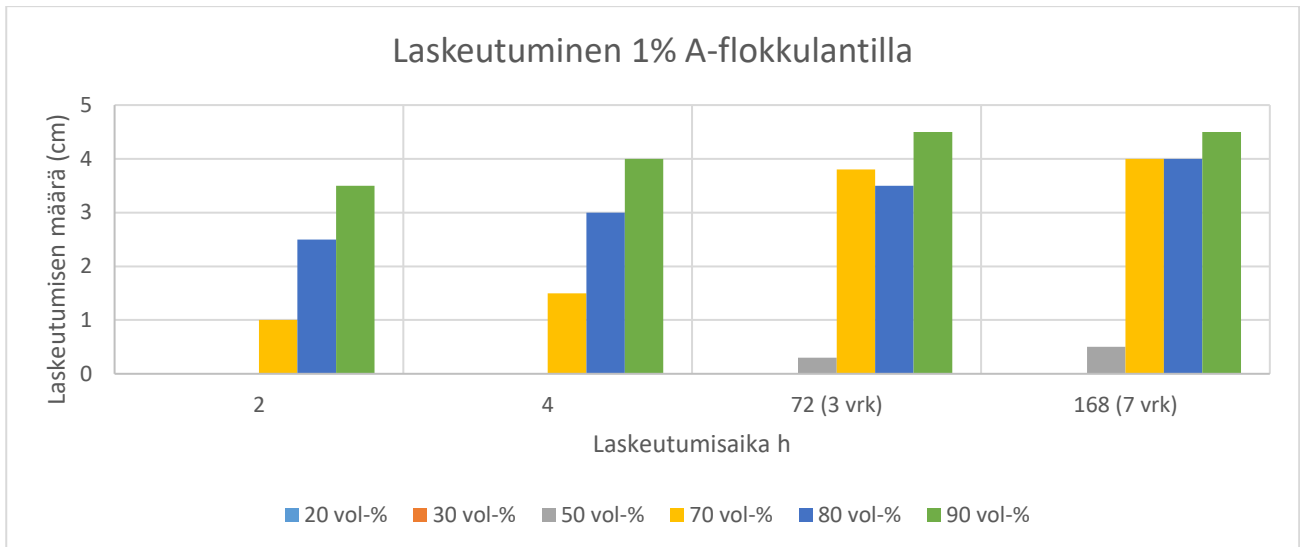
Ensimmäisissä koe erissä käytettiin flokkulanteja 1%-liuoksina pienillä lisäyksillä (2-10 %). Tämän kokoiset lisäykset eivät vaikuttaneet materiaaliin. Seuraavissa kokeissa flokkulantin annosta lisättiin, kokeet aloitettiin A-flokkulantilla. Kuviossa 4 nähdään flokkulanttiliuoksen 2-10 vol- % verrattuna näytteenkokoon vaikutukset laskeutumisaikaan nähdessä viikon kestäneissä kokeissa. Parhaiten kokeessa laskeutui nollanäyte. Alustavissa kokeissa käytetty mädätemateriaali oli pakastettua. Pakastamisen on havaittu mädätysjäännöksen kanssa työskentelyn myötä edistävän laskeutumista verrattuna jääkaapissa säilytettyyn materiaaliin, niinpä laskeutumista tutkittiin myös jäädyttämisen ja kuumentamisen vaikutuksia jatkokeiden aikana. Samaan aikaan koesarjaan lisättiin myös ravinteiden saostamisen vaikutus laskeutumiseen, lisäämällä magnesium pitoista tuhkaa mädätysjäännökseen fosforin ja typen samanaikaiseksi saostamiseksi. Tuhkan lisäys nostaa materiaalin pH:ta ja sillä on aiemmissa kokeissa havaittu olevan vähäinen, mutta positiivinen vaikutus suodatettavuuteen. Flokkulanttien lisäyksen määrää tut-

kittiin yhdessä pakastamisen, kuumentamisen ja ravinteiden saostamisen (tuhkalisäys) rinnalla. Kokeissa käytettiin biorejektia MK R9. Kuviossa 5 on esitetty vaikutukset materiaaleissa, joissa havaittiin mitattavaa muutosta. Tärkkelyksen, kitiinin ja tanniinin käsitellyissä havaittiin mahdollista flokkuloitumista pinnalle, mutta flokkuloinnin määrää ei ollut mahdollista selvittää, flokkuloinnin ollessa vain osittaista.



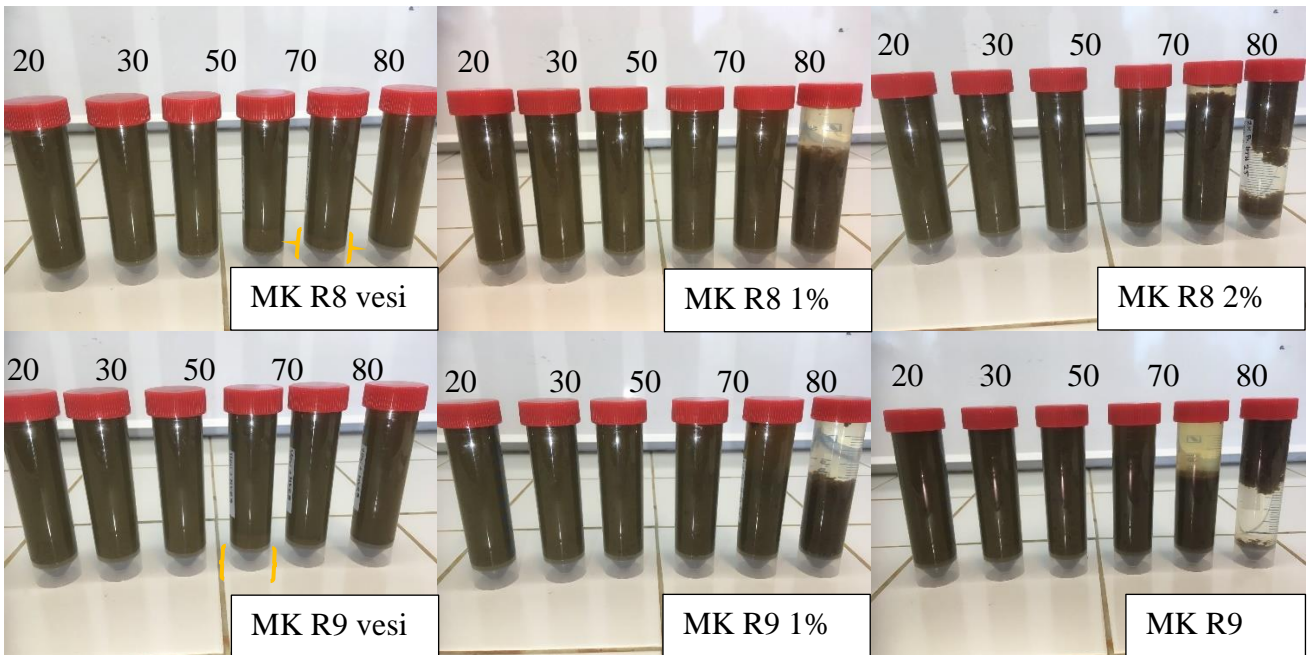
KUVIO 5. Eri lisäaineiden ja käsittelyjen vaikutukset laskeutumiseen.

Flokkulanttien vähäisen vaikutuksen vuoksi tarkasteltiin kaupallisen flokkulantin A (1-% liuos) kohdalla suurempia lisäsmääriä (KUVIO 6). Kokeissa havaittiin, että ajalla on edelleen vaikutusta laskeutumisen määrään, mutta suurilla annoksilla valtaosa laskeutumisesta tapahtuu suhteellisen nopeasti. Mädatteen tilavuuteen nähden flokkulanttiliuoksen määrä ei kuitenkaan voida ajatella olevan järkevää, jos loppliuoksen tilavuudesta 90 % on peräisin flokkulantin liuksesta. Tämän seurauksena suoritettiin jatkokokeita joissa tarkasteltiin väkevämpää liuosta ja veden lisäystä, sillä laskeutumista voi häiritä myös mädatysjäännöksen sakeus ja viskositeetti. Tämän seurauksena suoritettiin vertailu kokeita käyttäen 1% ja 2% A-liuoksia.



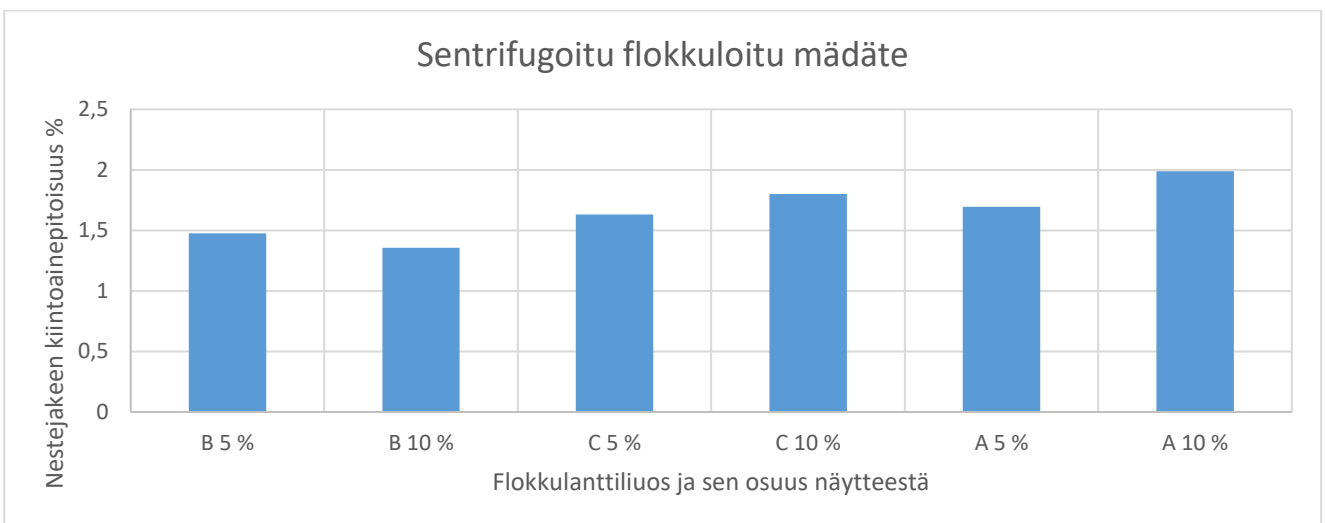
KUVIO 6 Biopolymer HTH25 -flokkulantin lisäyksen vaikutus eri merkittävinä tilavuusosuuksina ajansuhteen.

Flokkulointia testattiin niin käsittelemättömälle mädätysjäännökselle (MK R8) ja biorejektille (MK R9). Kokeen lopputuloksissa kiinnostavaa on huomata, että suuret flokkulantti pitoisuudet tuottavat kirkasta nestejätettä, joka kirkastuu asteittain flokkulantin määrän lisääntyessä. Lisäyksillä flokkulantin vaikutus saa kiintoaineen laskeutumaan, mutta suuremmilla lisäyksillä (2% liuos) kiintoaine nousee pintaan nesteen erottuessa sen alle (KUVA 3). Saman aikaisesti tehtiin myös rinnakkaiskokeet veden lisäyksestä ja sen vaikutuksesta kiintoaineen laskeutumiseen. Karkeampi kiintoaine laskeutuu hyvin, vaikka laskeutumisen havaitseminen on haastavaa nesteosuuden merkittävän hienoaineosuuden ja sitä seuraavan tummuuden johdosta. Tästä huolimatta Kuvassa 3 a ja d voidaan nähdä, kuinka karkea kiintoaine on laskeutunut pohjalle. Veden lisäys ei kuitenkaan siis poista hienoa kiintoainetta, toisin kuin flokkulantit. On kuitenkin mahdollista, että reaktion ja erottumisen saavuttamiseksi vaaditaan enemmän tilaa kuin mädätysjäännöksessä on tarjolla selkeän laskeutumisen tai kohoamisen ja sitä seuraavan erottelun mahdollistamiseksi.



KUVA 3. Flokkulantin A ja veden lisäyksen vaikutus mädätysjäännöksen (MK R8) ja biorejektin (MK R9) kiintoaineen erottumiseen nestejakeesta.

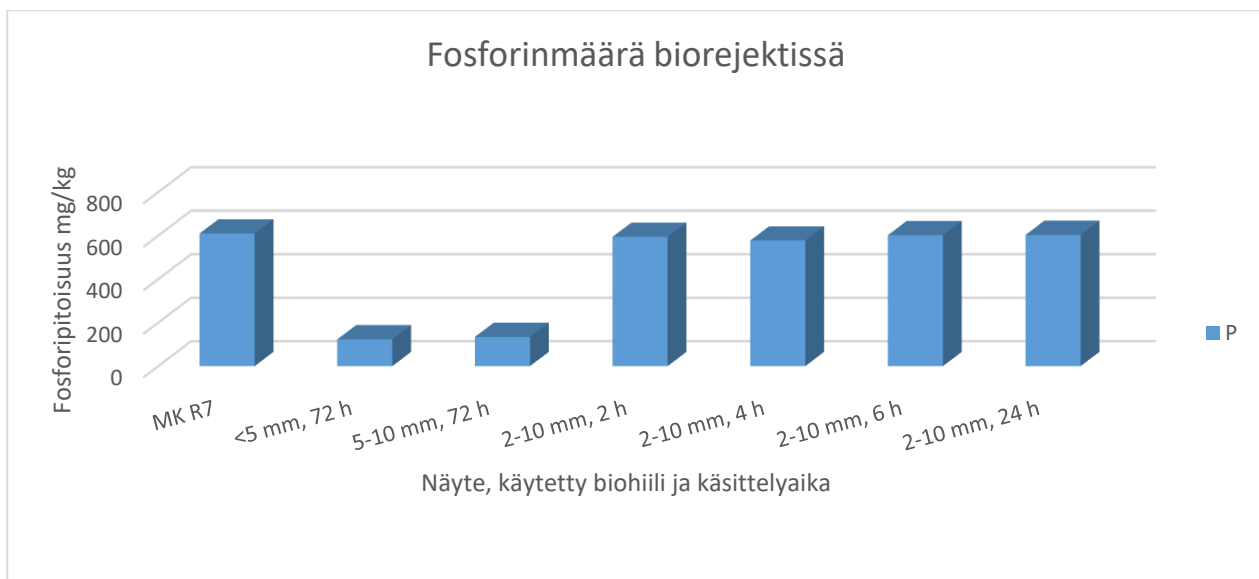
Flokkuloitumisen myötä testattiin myös flokkulanttikäsiteltyjen lietteiden sentrifugointia. Kokeissa hyödynnettiin kaupallisia Haarla Oy:n flokkulanteja. B- ja C-flokkulantit lisättiin 1 % liuoksina ja A-flokkulantti laimentamattomana liuoksena. Näytteet sentrifugoitiin 18 000 xg voimalla kiinteäkulmaisella roottorilla ja erottuneet neste ja kiinteä faasi eroteltiin. Kuviossa 8 on esitetty sentrifugoinnin jälkeisen nestefaasin kiintoainepitoisuus, joka jää alle 2 % kaikilla materiaaleilla, eli kiintoainepitoisuus saadaan pienemmäksi kuin pelkällä mädätysjäännöksen sentrifugoinnilla on mahdollista. Parhaimmillaan B-flokkulantin lisäys pienentää kiintoainepitoisuuden alle 1,5 % eli karkeasti noin neljäsosaan alkuperäisestä keskimääräisestä.



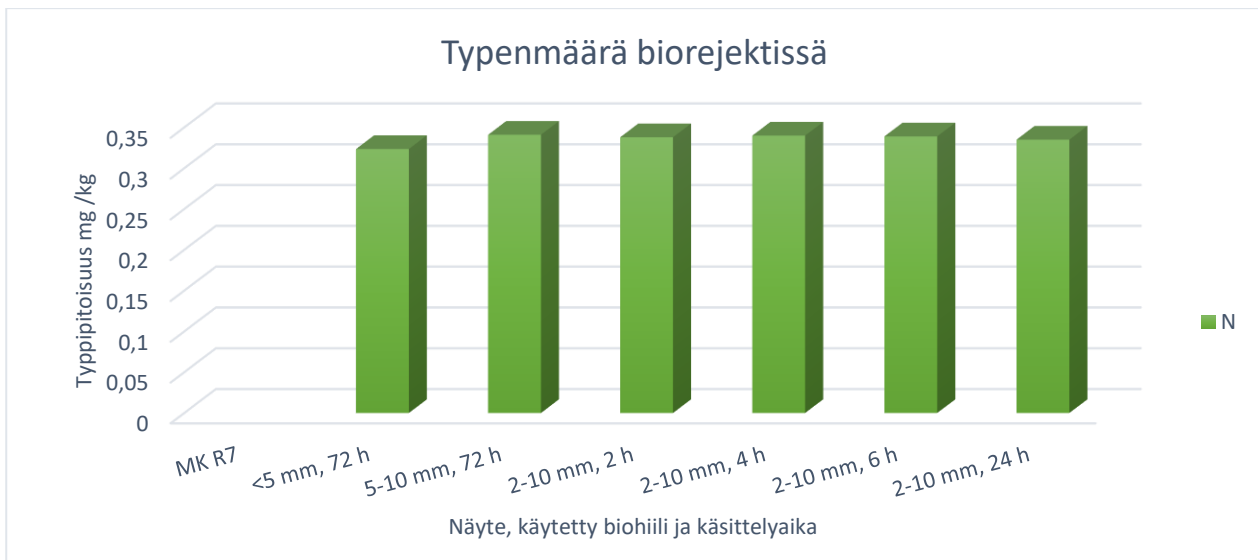
KUVIO 8. Kaupallisten flokkulanttien lisäyksen vaikutus mädätysjäännöksen kiintoaineen eroteltavuuteen sentrifugoidessa.

5.4 Biohiilen hyödyntäminen fosforin talteenotossa

Biohiilen avulla tutkittiin suodatuksen lisäksi hiilen fosforin sitomiskykyä mädätemateriaaleista. Kokeissa hyödynnettiin Carbons Finland Oy:n tarjoamia biohiilinäytteitä ja mädätysjäännöstä sekä biorejektia. Alustavissa kokeissa tarkkailtiin ajan vaikutusta fosforin sidonta kykyyn (Kuvio 9). Kokeissa käytettiin aluksi laajimman kokojakauman omaavaa biohiiltä (2-10 mm). Alle 24 h kestoisella vaikutusajalla ei havaittu olevan merkitystä fosforin määrään suodoksessa. Kokeiden pituutta lisättiin ja siirryttiin suurempiin partikkelikoon hiiliin, jotta hiilen erottelu kokeen päättyessä helpottuisi, mädätemateriaalien suodatusaasteiden ratkaisemiseksi. Hiilimäärää vaihdeltiin välillä 0,7-4,0g/ dl sopivan annostuksen löytämiseksi. Kokeiden aikana havaittiin, että biohiilen vettyminen vie merkittävästi aikaa ja siten käsittely vaatisi myös merkittävän ajan mädätysprosessin jälkeen, lisäten potentiaalisesti lietteen varastointiin tarvittavaa tilaa. Havaitun käytöksen perusteella tehtiin jatkokokeita, joissa testattiin biohiilen vettämistä vedellä ennen sen mädätysjäännökseen lisäämistä.



KUVIO 9. Ajan vaikutus biohiilen fosforin talteenottokykyyn

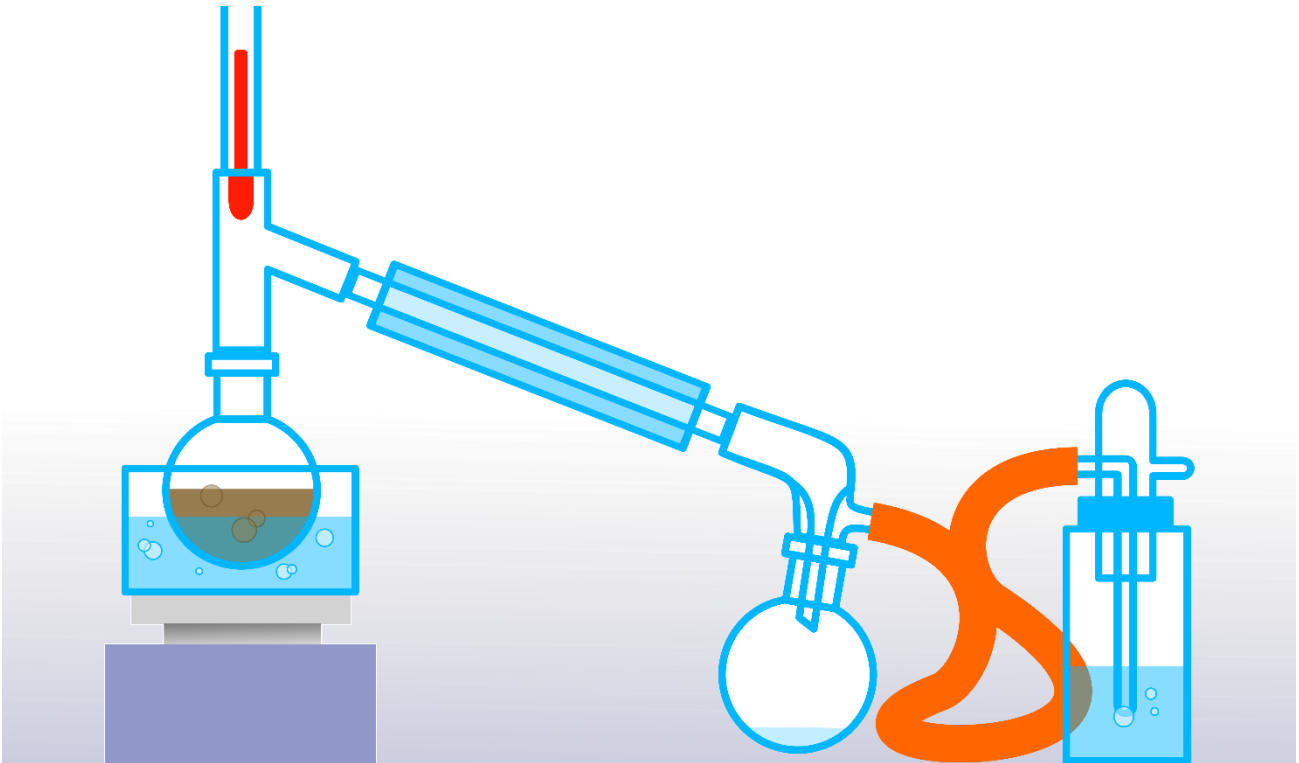


KUVIO 10. Typenmäärä liuoksessa biohiilen fosforin talteenoton jälkeen

Jatkokokeissa tutkittiin ajan jaksoja 2-72 h niin vettämisen kuin fosforin talteenoton osalta. Taulukossa 8 on esitetty vettämisen vaikutus liuoksen fosforipitoisuuteen. Taulukosta nähdään, että vettämällä voidaan säästää merkittävästi aikaa, joka fosforin imeytymiseen vaaditaan. Näiden kokeiden perusteella 2 h vettäminen yhdistettynä 24 h fosforintalteenottoon säästäisi aikaa ja toimisi saman tasoisesti kuin 72 h imeytymisaika ilman vettämistä. Fosforin talteenottoa ei vettämissä kokeissa noussut yhtä korkealle kuin alkuperäisissä 72 h kokeissa, joissa fosforin poistokyky oli lähellä 80 %. Tästä huolimatta se oli huomattava myös jatkokokeissa, jossa parhaimmillaan fosforista saatiin talteen yli 35 % fosforista. Koska kokeissa hyödynnettiin rejektin osa mädätysjäännöksen fosforista, oli otettu talteenko maatilalla ruuvipuristuksen yhteydessä.

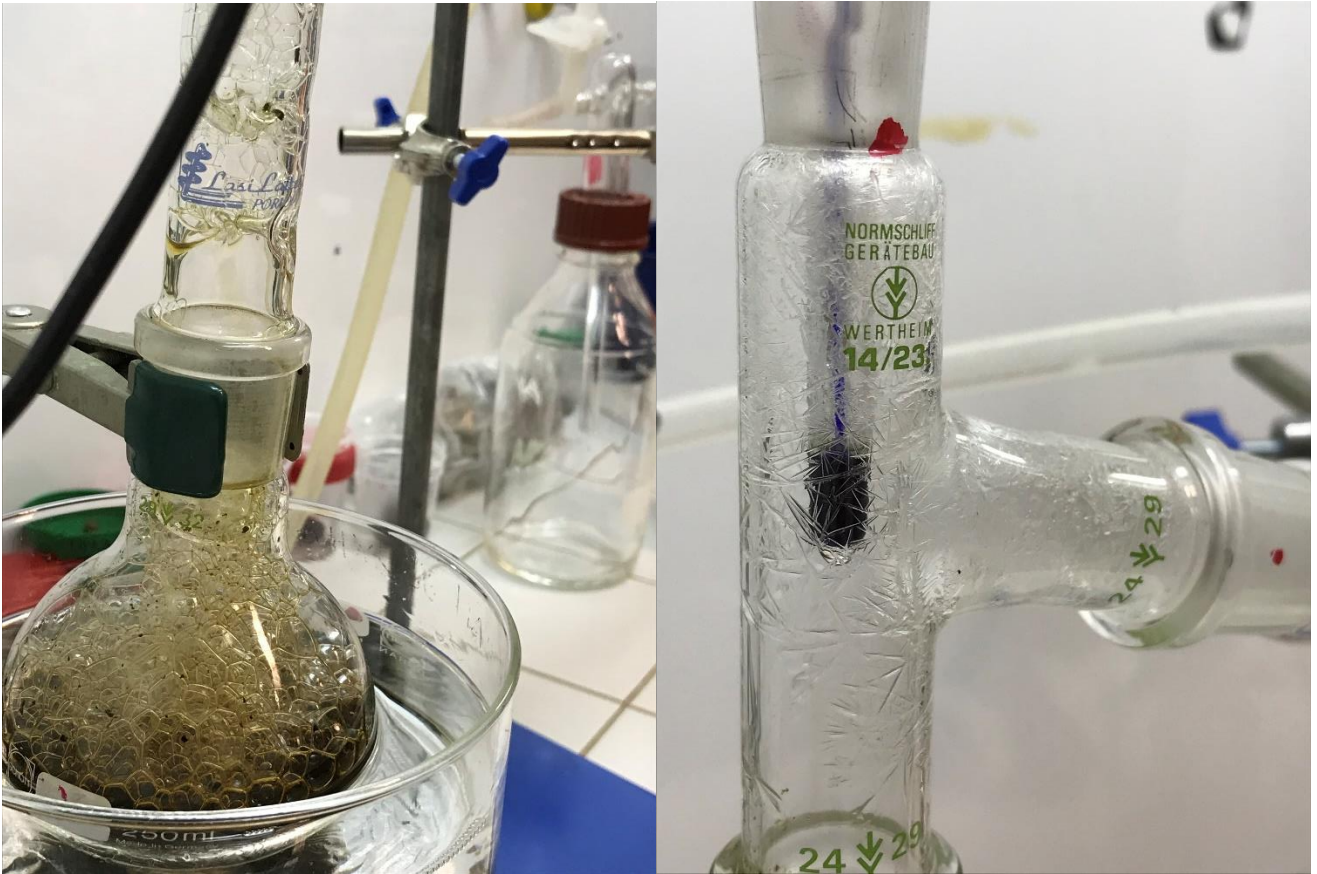
TAULUKKO 8. Vettämisen ja imeytymisaikan vaikutus liuoksen fosforipitoisuuteen biohiilellä.

Vettäminen \ Rejektin		Aika (h); fosforipitoisuus mg/kg					
		0	2	6	24	48	72
Aika (h)	0	664				545	425
	2		595	550	429	462	487
	6		585	515	460	558	649
	24		594	524	497	567	596
	48		629	510	489	564	569
	72		650	640	533	554	608



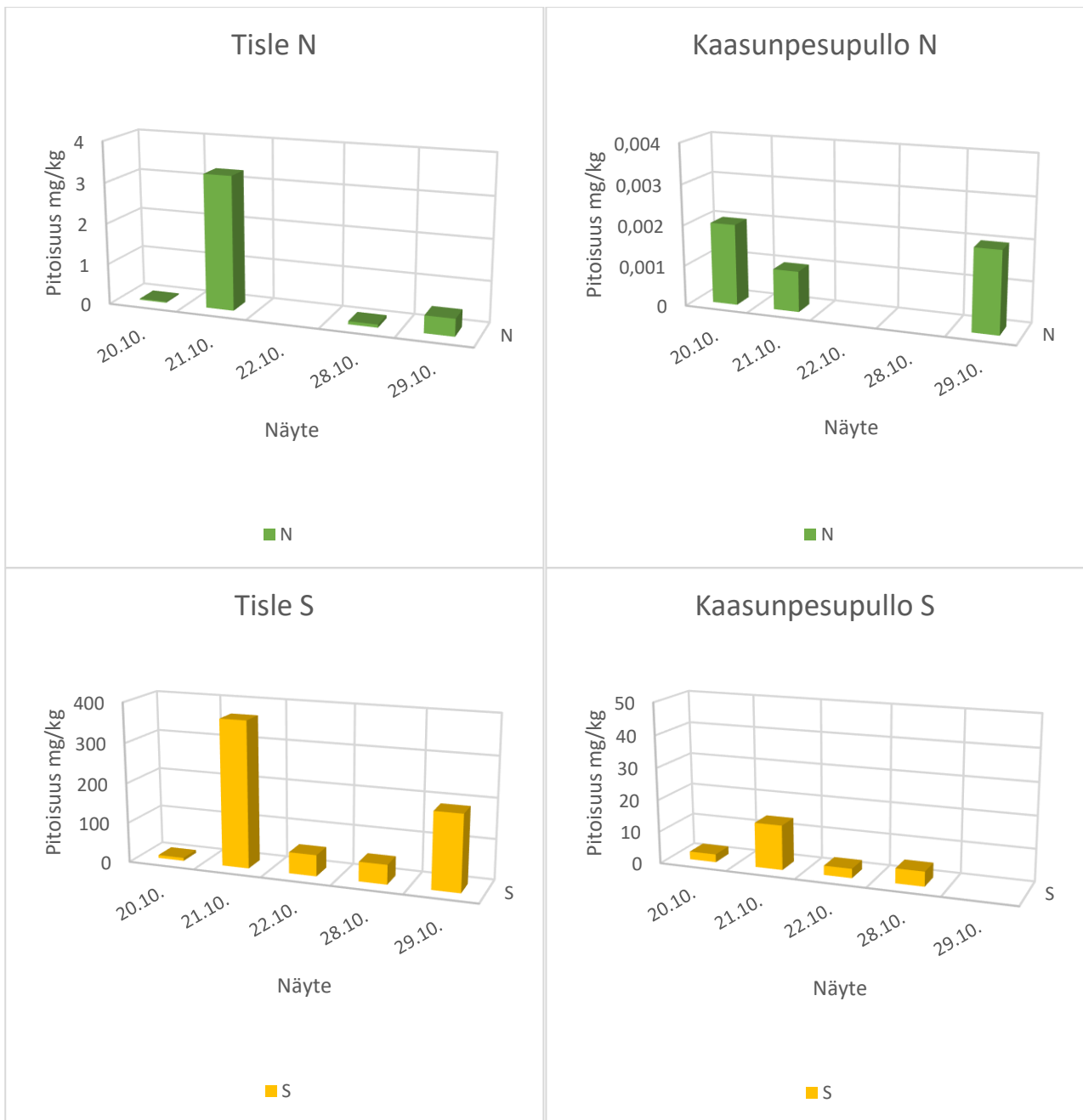
KUVIO 11. Määtysjäännöksen tislaukseen käytetty tisluslaitteisto.

Laboratoriokokeissa tutkittiin konsentroidin vaikutusta koostumukseen eri lämpötiloissa sekä yhdessä saostajien kanssa. Konsentroidilla ei havaittu vaikutusta käsitteletä huolimatta materiaalin suodatettavuuteen. Kuviossa 11 on esitetty kaaviokuva määtysjäännöksen tislaukseen käytetystä laitteistosta. Tislauksen avulla tutkittiin konsentroidin aikana muodostuvaa höyryä/kaasua tiivistämällä höyry vesikierron avulla ja pulputtamalla muodostuva paine vedellä täytetyn kaasunpesupullon kautta pois. Tisle oli pistävän hajuista typpeä ja rikkiä sisältävää vesiliuosta (KUVIO 12). Kaikki typpi ja rikki eivät kuitenkaan tiivistyneet veden kanssa vastaan ottoastiaan, vaan molempia aineita päätyi myös kaasunpesu pullon. Kaasunpesu pullon pitoisuudet eivät ole verrannollisia tisleeseen sillä tai toisiinsa, sillä pullon vesimäärä vaihteli kokeesta kokeeseen. Kaasupullon tarkoitus oli selvittää millaisia kaasuja pääsisi pakkenemaan höyryn tiivistämisestä huolimatta.

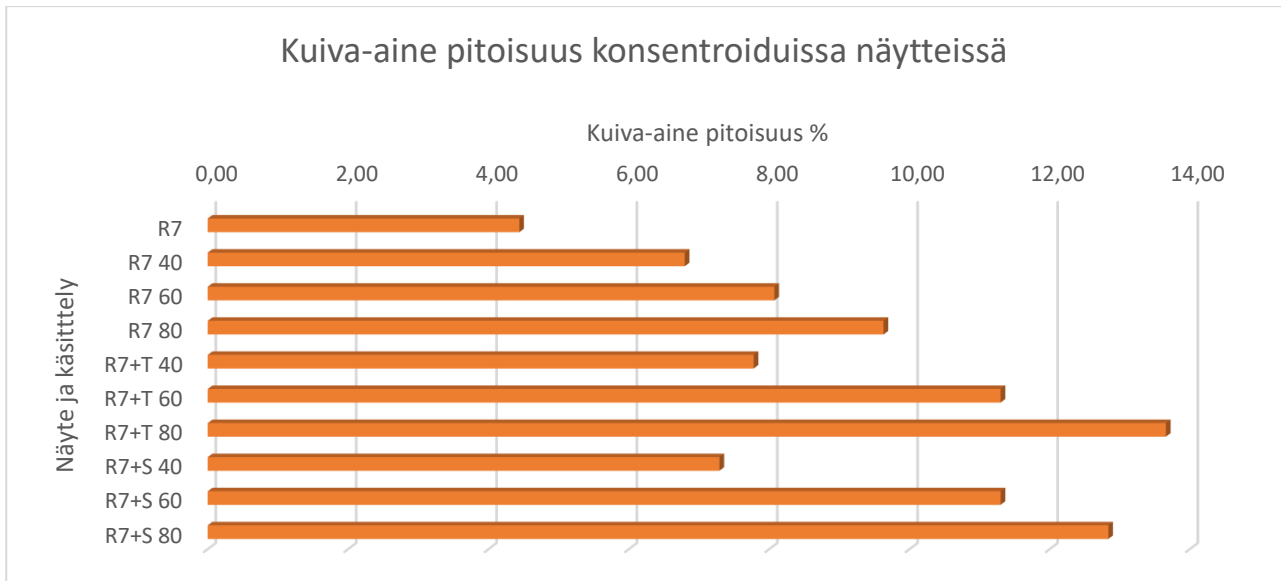


KUVA 4. Mädätysjäännöksen tislauksen a) mädätysjäännöksen epätasainen kiehuminen ja vaahtoaminen, b) tislauksen aikana tapahtuva kiteytyminen.

Konsentroitimi kokeissa biorejektin, biorejektin ja tuhkan sekä biorejektin ja suotokakun seoksia konsentroititiin vesihauteen avulla. Kokeissa käytettiin kolmea eri lämpötilaa 40 °C, 60 °C ja 80 °C. Koeolosuhteilla pyrittiin selvittämään mitä kondensointi aiheuttaa neste faasin alkuainetasapainolle ja eroteltavuudelle kiintoaineesta. Kuviossa 13 on esitetty näytteiden kuiva-ainepitoisuudet kondensoinnin jälkeen verrattuna käsittelemättömään MK R7 biorejektin kuiva-ainepitoisuus. Kuiva-ainepitoisuus kasvaa lämpötilan kohotessa voimakkaamman haihtumisen seurauksena ja kuiva-ainepitoisuus on suurempi tuhka ja suotokakkukäsittelyissä sillä biorejektin sekaan on lisätty kiintoainetta enne koetta.

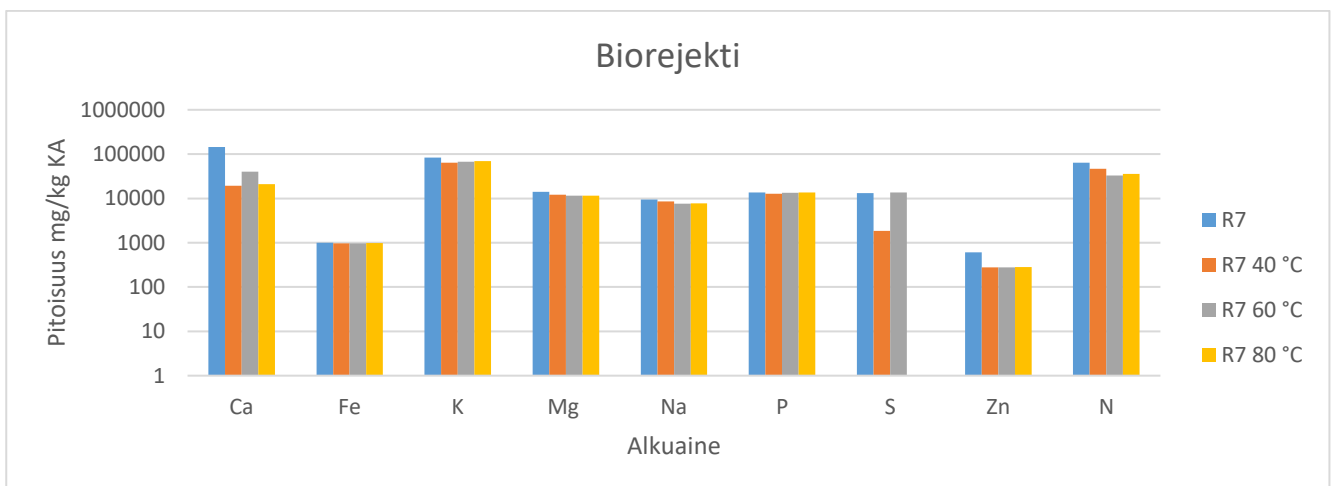


KUVIO 12. Tisleeseen ja kaasunpesupulloon päätyvät alkuaineet. Typeä ei voitu mitata näytteestä 22.10. näytteen pienen koon vuoksi.

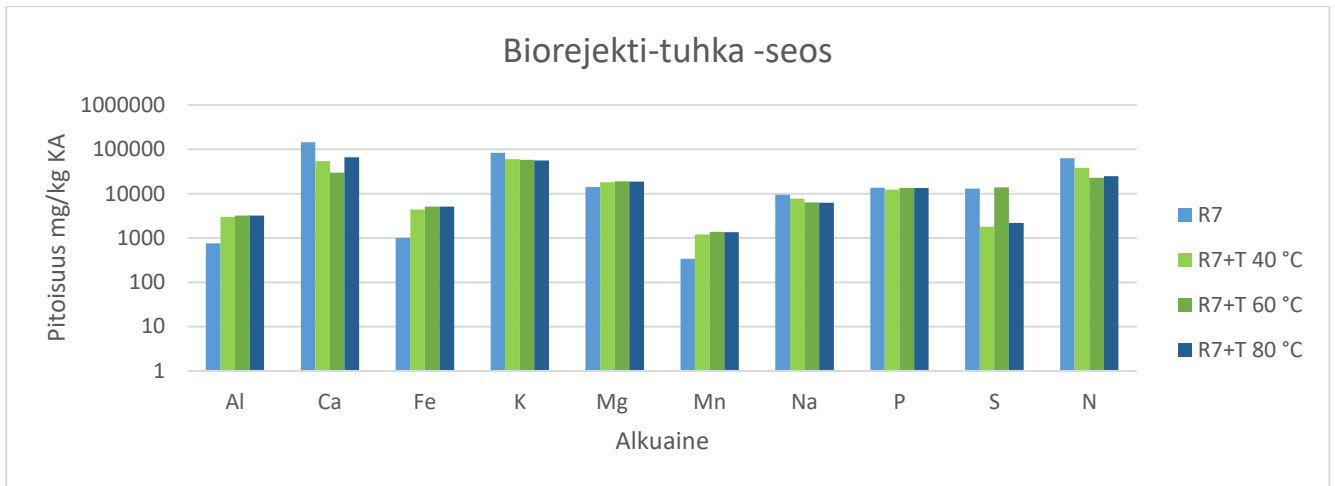


KUVIO 13. Kuiva-ainepitoisuuden muutokset konsentroinnin aikana eri lämpötiloissa ja käsittelyissä

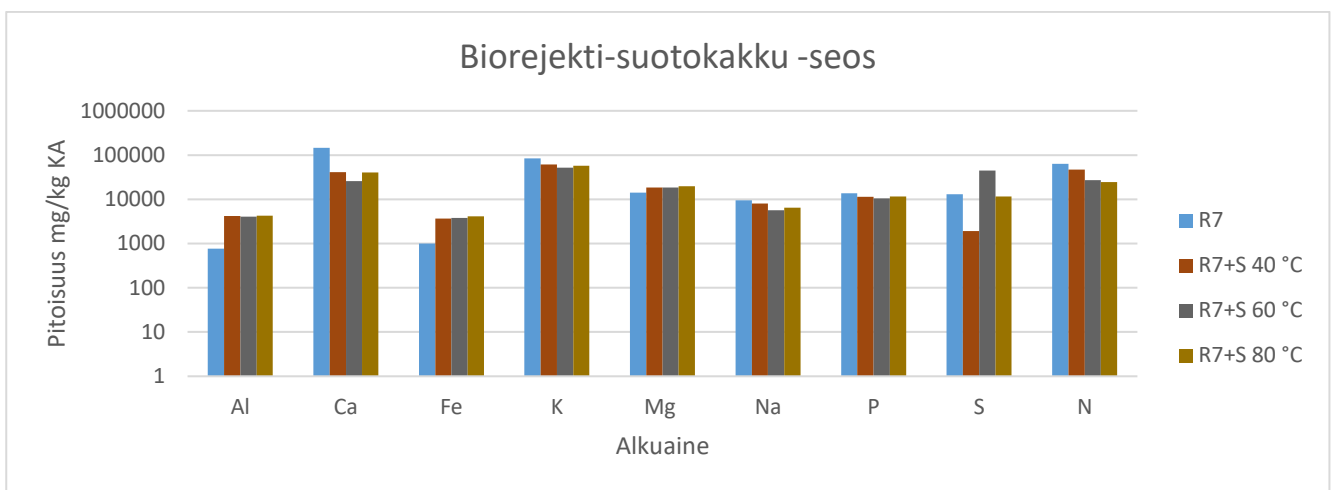
Kuvioissa 14-16 on esitetty eri käsittelyjen ja kondensoinnin seuraukset näytteen koostumukselle (kuvioihin on sisällytetty pää komponentit, joiden pitoisuus on > 1000 mg/kg KA) verrattuna alkuperäisen MK R7 biorejektin kokonaiskoostumukseen kuiva-aine kiloa kohden. Typpi vähenee lämpötilan kasvaessa, kuten on odotettavissa, muut alkuainevaihtelut ovat oletettavasti lietteen heterogeenisyydestä peräisin. Tuhka ja suotokakku käsittelyt lisäävät typen haihtumista korkeissa lämpötiloissa, lisäysten aiheuttaman pH nousun vuoksi. Muut selkeät poikkeamat pelkän lietteen ja seosten välillä johtuvat oletettavasti suotokakun ja tuhkan lisäyksestä (alumiini, raudan, mangaanin määrän kasvu tuhkaseoksissa ja alumiinin ja raudan määränkasvu suotokakkuseoksissa).



KUVIO 14. Biorejektin kondensointikäsittelyn vaikutukset alkuainejakaumaan.

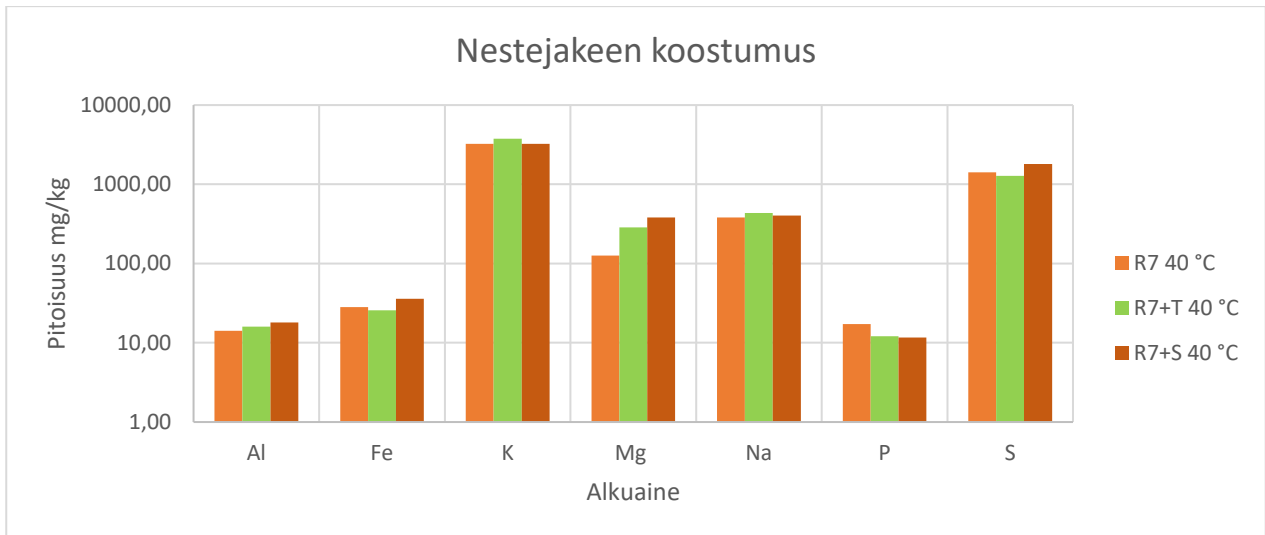


KUVIO 15. Biorejetti-tuhka –seoksen kondensointikäsitteilyn vaikutukset alkuainejakaumaan.



KUVIO 16. Biorejetti-suotokakku –seoksen kondensointikäsitteilyn vaikutukset alkuainejakaumaan.

Kokonaiskoostumuksen lisäksi nestejakeiden koostumusta tarkasteltiin. Kondensoinnin jälkeen näytteet suodatettiin MON-200 suodatinkankaan ja 0,45 µm ruiskusuodattimen läpi, jotta nähtäisiin muutokset nestefaasissa ja voitaisiin havainnoida mahdolliset muutokset suodatuksen kannalta. Suodatus ei helpottunut huomattavasti käsittelyillä, mutta eri käsittelyillä oli vaikutusta nestefaasin koostumukseen. Vain 40 °C konsentroitinäytteistä saatiin kattava näytteen otto analyysijä varten, muut näytteet olivat liian haastavia suodattaa. Kuvio ... nestejakeen koostumuksen (pitoisuus > 10 mg/kg). Kuvion perusteella fosfori on saostunut hyvin konsentroidinnin aikana ja vain 1-2 % fosforista on nestejakeessa. Nestejakeet sisältävät pääosan näytteiden hyvin liukoisista materiaaleista, eli kaliumista, natriumista sekä rikistä.



KUVIO 17. 40 °C konsentroitujen näytteiden nestejakeen alkuainepitoisuus.

5.6 Eri menetelmien erotuskyky

Yleisesti mitä tarkemmin hieno kiintoaine saadaan eroteltua nestejakeesta, sitä paremmin saadaan eroteltua fosfori ja typpi toisistaan. Se kuinka pitkälle prosessi kannattavuuden kannalta voidaan viedä, riippuu monista tekijöistä. Runsaasti energiaa ja/tai lisättäviä kemikaaleja vaativat menetelmät eivät välttämättä ole kannattavia maatilakokoluokassa. Harkittavaa on myös mihin käyttöön tuotteet on tarkoitus käyttää. Jos ruuvipuristimen saavuttama erottelu kyky on riittävä ei jatkotoimenpiteisiin ole järkevää investoida. Tutkituista menetelmistä parhaan erottelukyvyn saavutti linkous. Suodatus sekä imeytys biohiileen olivat myös tehokkaista menetelmiä erottaa fosfori nestejakeesta tietyissä oloissa. Biohiilen fosforin talteenotto kyky kuitenkin vaihteli voimakkaasti kokeiden aikana. Käytetyn mädätysjännöksen suodattaminen oli haastavaa ja suodatuksen tehostamiseksi ja mahdollistamiseksi pienemillä seuloilla tarvitaan suodatustekniikka, jossa suodatuspintaa puhdistetaan aika ajoin. Tällaisessa suodatuksessa voidaan potentiaalisesti päästä merkittävästi parempiin tuloksiin, sillä osittainen suodattaminen onnistuu myös pienillä huokoskoilla. Laboratoriossa tehtyjen kokeiden perusteella linkous on siis tehokkain fosforin talteenottomenetelmä. Kun huomioidaan että jatkuvatoiminen linkous ei sovi kaikille materiaaleille tilamittakaavassa parhaaksi vaihtoehdoksi jää suodatus. Mikäli menetelmiä on mahdollista yhdistää tai suodatusta avustaa esimerkiksi kogulanteilla kannattavasti ovat erottelu tulokset odotettavasti parempia. Kustannushaasteiden sekä sopivien kemikaalien löytäminen voi kuitenkin olla hyvin vaativaa.

6 TILALLA KANNATTAVAT KÄSITTELYMENETELMÄT

Suomessa maatilakokoluokan biokaasulaitoksen ovat pääasiassa nautatiloilla, erityisesti maitotiloilla. Esimerkkejä myös sian lantaa hyödyntävistä laitoksista kuitenkin on. Maatilakokoluokan biokaasulaitoksia on maatilojen lisäksi myös joillain oppilaitoksilla ja Luonnonvarakeskuksella. Myös tilayhteistyötä on Suomessa jo kokeiltu Juvan Bioson Oy:n ja Biohauki Oy:n toimesta. (Winqvist ym. 2018) Kaiken kaikkiaan käytössä on monikirjava kattaus erilaisia tiloja ja laitoksia, ja siten erilaisia tarpeita myös mädätysjäännöksen käsittelylle. Tässä kappaleessa pyritään esittämään erilaisia vaihtoehtoja käsittelymenetelmille. Samalla käydään läpi nykyistä tilakokoluokan biokaasutuotannon infrastruktuuria.

Biokaasulaitokseen investointi on merkittävä satsaus tilalle kuin tilalle, ja siten tilakoko sanelee monesti biokaasun tuotantoon ja sen tuotteiden jatkojalostukseen investoinnin kannattavuuden. Monissa selvityksissä ja raporteissa on tuotu esille lannan potentiaali niin biokaasutuksessa, kuin ravinteena. (Luostarinen 2019, Jääskeläinen 2020) On kuitenkin oleellista ottaa huomioon mistä lantapotentiaali koostuu, eli minkä kokoisissa yksiköissä lantaa muodostuu. Koska lannan tai lietelannan kuljetus ei pitemmillä välimatkoilla ole kannattavaa, on realistista lanta potentiaalia usein vain sellainen, joka on kannattavaa toteuttaa tilalla (vs keskitettylaitos), eli tilakoko rajaa nykytilanteessa osan potentiaalista saavuttamattomiin. Suomessa on arvioitu tilalla olevan kannattavaa sijoittaa biokaasureaktoriin, jos tilalla on lypsykarjaa 150-160 päätä. (Motiva 2013, Winqvist ym. 2015)

Suomessa vuonna 2022 36 % (32 % vuonna 2021) maitotilojen lypsylehmistä elää tiloilla, joissa vähintään 100 lypsylehmää (2022 tämä tarkoittaa 11 % maitotiloista). Pohjanmaan maakuntien (Etelä-, Keski- ja Pohjois-Pohjanmaa sekä Pohjanmaa) alueella vastaavat luku on 36 % (31 % 2021). Tämä tarkoittaa, että kokomaassa 11% tiloista on sellaisia, joissa on yli 100 lypsylehmää ja vastaavasti Pohjanmaan maakuntien alueella tiloista 13 %. Konkreettisessa tila määrässä tämä tarkoittaa yli 250 tilaa, mikä on koanaisuudessaan merkittävä osa (46 %) koko Suomen yli 100 lehmän lypsytiloista. (Luke 2022) Tälle alueelle sijoittuu 18 (Pohjois-Pohjanmaa 9; Keski-Pohjanmaa 6, Etelä-Pohjanmaa 3) maatilakokoluokan biokaasulaitosta eli merkittävä osa tällä hetkellä käytössä olevista maatilojen biokaasulaitoksista (laitoksia kaikkiaan noin 20-30). (Biokaasulaitokset kartalla 2021, Huttunen ym. 2018, Hyttinen 2022, Laaksonen ym. 2017, Savela 2021, Ympäristöministeriö 2022)

6.1 Tilakokoluokan biokaasulaitokset Suomessa

Maatilakokoluokan biokaasulaitoksia on monen kokoisilla tiloilla, vaikka pääosa esimerkki tiloista kuuluvat karjakokoluokkiin 100-149, 150-199, 200-299 ja 300- kuten Taulukosta 9 voidaan nähdä. Kokeuksia biokaasulaitoksista löytyy kuitenkin myös pienemmiltäkin tiloilta. Kaiken kaikkiaan Suomessa biokaasulaitoksia on tai on ollut käytössä tiloilla, joiden eläinmäärä liikkuu 20 ja 550 eläimen välillä. Tyypillinen tilan koko on noin 100-200 eläintä. Tämä jättää ulkopuolelleen valtaosan tiloista Suomessa. (Luke 2022) Taulukoissa 9 ja 10 esitetyt biokaasulaitokset lasketaan pääosin pieniä laitoksia, jotka käsittelevät tyypillisesti enintään 20 000 t syötettä vuosittain, ja jäävät siten ympäristövaikutusten arviointimenettelyn ulkopuolelle. (Biokaasuteknologia 2015) Valtaosa näistä laitoksista on märkämädätyslaitoksia, mutta joitain kuivämädätyslaitoksia on myös käytössä niin tiloilla kuin muilla toimijoilla. Taulukossa 9 on esitetty Suomessa toimineita, toimivia ja rakenteilla olevia tilakokoluokan biokaasulaitoksia, sekä niiden toimintaan liittyviä tekijöitä, kuten syötelähteet. Maatiloilla sijaitsevien biokaasulaitosten lisäksi pienlaitoksia löytyy myös oppilaitoksilta ja tutkimuslaitoksilta (TAULUKKO 10).

Suomessa maatiloilla toimivilla biokaasulaitoksilla on monia erilaisia kokoonpanoja, jotka voivat olla joko omatoimirakennettuja tai toimitettuja ostolaitoksia. Taulukosta 9 on poimittu joitain esimerkkejä erikokoisista itse rakennetuista sekä tehdastoimitetuista biokaasulaitoksista, joita käsitellään tekstissä hieman tarkemmin, eri kokoisten ja valmisteisten laitosten toiminnan havainnollistamiseksi ja kustannusten. Tilat on valittu tiedonsaatavuuden ja tilakokojen perusteella, jotta saadaan käsiteltyä mahdollisimman laajaskaala erikokoisia tiloja, joilla on biokaasuntuotantoa. Yleisesti, kuten Taulukosta 9 voidaan nähdä, on laitoksia otettu käyttöön melko tasaisesti, mutta kiihtyvällä tahdilla 1990-luvun lopulta alkaen. Laitoksia on sijoittunut lähes kokomaahan aivan pohjoisia osia lukuun ottamatta. Laitokset ovat kuitenkin huomattavasti yleisempiä pohjanmaalaisissa maakunnissa sekä Varsinais-Suomessa. (Biokaasulaitokset kartalla 2021)

Esimerkkeinä omarakenteisista biokaasulaitoksista ovat Haatajan tila Suomussalmella (n. 20 lypsylehmää, n. 25 ha), Junttilan tila Nivalassa (70 lypsylehmää + nuorkarjaa), Ryytilän tila Siikajoella, (n. 550 nautaa, n. 300 ha). (Haverinen 2014) (Mulari & Viitasalo 2020) Haatajan tilalla biokaasu hyödynnetään lämmitykseen ja laitoksella tuotetaan 80 MWh vuodessa, eli yli tilan oman tarpeen. Reaktorinsyötteenä käytetään lietelantaa ja säilörehua (maksimissaan 300 kg/a). Laitoksen rakennuskustannukset ovat noin 37 000 € (arvonlisäveroton). (Haverinen 2014) Junttilan tilalla biokaasua hyödynnetään niin lämmön kuin sähkön tuotantoon. Tuotetun biokaasun avulla voidaan kattaa noin puolet tilan sähkön tarpeesta (tarve 100 MWh/a) ja koko lämmöntuotanto tarve. Syötteenä käytetään lietelantaa ja talvella lisänä peltohiomassaa sekä paistinrasvaa. Mädätysjäännös hyödynnetään lannoitukseen ja kokemuksen perusteella on todettu sato tason parantuneen. Tilalla on myös liikennepolttoaineeksi jalostamiseen tarvittava

laitteisto. Laitos on alunperin rakennettu Itä-Suomen yliopiston koelaitokseksi, joka on myöhemmin siirretty Nivalaan. Rakennuskustannukset ovat olleet n. 60 000 € (koneet ja laitteet). (Haverinen 2014, Mulari & Viitasalo 2020) Ryytilän tilalla biokaasun tuotannon tarkoituksena on ollut tuottaa energiaa (sähköä ja lämpöä) tilan käyttöön sekä jalostaa biokaasusta liikennepolttoainetta. Kustannukset laitosta varten ovat olleet n. 160 000 €. (Haverinen 2014)

Vastaavasti tehdastoimitetuille laitoksille tila esimerkkejä ovat Virtaalan tila Haapajärveltä (70 lypsy-lehmää + nuorkarjaa) ja Wennströmin tila Toholammilta (n. 500 nautaa (lypsylehmät ja nuorkarja)). Molempien tilojen biokaasulaitokset on toimittanut Demeca Oy. Virtaalan tilalla biokaasu hyödynnetään energian tuotantoon (sähkö ja lämpö) ja tila on energia omavarainen (tuotanto 21 MWh, tarve 20 MWh). Biokaasureaktorin syötteenä käytetään lietelantaa ja ylijäämärehua. Jäännös hyödynnetään lannoitukseen. (Nevalainen) Wennströmin tilalla biokaasulla tuotetaan lämpöä ja sähköä. Vuotuinen sähköntuotanto on noin 350 MWh, joka kattaa sähkön tarpeen, lämmitykseen energiaa käytetään käyttöveden lämmitykseen ja tarvittaessa navetan lämmitykseen. Syötteenä liete- ja kuivikelanta sekä pilaantunut rehu. (Mulari & Viitasalo 2020)

Kuten Taulukosta 9 nähdään tyypillisen kokoisia laitoksia ovat tällä hetkellä saatavilla olevan tiedon perusteella noin 5000 t/a sekä 10 000 t/a tai enemmän käsittelevät laitokset, jotka sijoittuvat joko lypsy- tai karjatilaille. Nämä ovat kooltaan tiloja, joissa maidontuotannossa on yli 100 lypsävää ja voidaan puhua tiloista, joissa parhaimmillaan karjaa on noin 550 eläintä (Taulukko 9). Esimerkkejä laitoksista on myös sikaloiden yhteydessä, nämä ovat ainakin tällä hetkellä hieman nautatiloja suurempia yksiköitä ja puhutaan tyypillisesti yli 10 000 t/a käsittelymääristä ja liikutaan jo tuhansissa eläimissä per tila (Taulukko 9). Taulukoissa 9 ja 10 on esitetty eri laitosten syötteen saatavilla olevan tiedon puitteissa: nautojen ja sikojen lanta syötteenä myös peräisin myös mm. siipikarjan sekä hyödynnetään; lantapohjaisten syötteen lisäksi ylijäämä rehu sekä kasvibiomassat ovat yleisiä laitoksilla; lisäksi joillain laitoksilla hyödynnetään elintarviketeollisuuden sivuvirtoja sekä erilaisia jätejakeita (biojätteet, jäte lietteet jne.). Maatilojen lisäksi pienen mittakaavan biokaasulaitoksia on myös oppilaitosten ja tutkimuslaitosten yhteydessä ja ovat pääasiassa märkämädätyslaitoksia. Ammattiopistojen biokaasulaitokset toimivat usein opetustilojen osana ja syötteenä käytetään siten lantaa, erilaisia biomassoja sekä elintarviketuotannon sivuvirtoja ja elintarvike jätteitä. Luonnonvarakeskuksen laitoksista toinen (märkämädätys) toimii maatilanyhteydessä ja toinen on kuivämädätyslaitos, johon syötetään peltobiomassoja. Tietoja näistä laitoksista on esitetty Taulukossa 10.

TAULUKKO 9. Suomen maatilakokoluokan/pienen kokoluokan biokaasulaitokset ja niiden tietoja.

Tila tai laitos	Sijainti	Toiminta	Laitostyyppi	Syötemäärä	Syöte	Käyttöönotto, rakennusvuosi	Eläintenmäärä	Lähde
BioBoksi, Kuittilan tila	Parainen		K	850 000 kg	KL, R, E, B			Valjakka 2018
Lähteen tila	Haapavesi		K, M	4680 t/a	LL, KL, R, E	2014/2015	120-130 LY	Biokaasulaitokset kartalla 2021, Degerman 2015, Huttunen ym. 2018, ProAgria 2018, Ympäristöministeriö 2022
Vuoremaan tila	Haapavesi		K, M	15402 t/a	LL, KL, N, R, E	2014/2015	180 LY	Biokaasulaitokset kartalla 2021, Huttunen ym. 2018, Ympäristöministeriö 2022
BioHauki Oy, yhteinen	Mikkeli	Liikennepolttoaineen jalostus	K	19500 t/v	L, LK, N	2017		Huttunen ym. 2018, Ympäristöministeriö 2022
Biopir oy, yhteinen	Vehmaa	Porsastuotanto	M	17 000 m ³ /a 20 000 t/a	L, N	2021	S 1600 emakkoa, yli 50 000 porsasta/a	Biokaasulaitokset kartalla 2021, Lehtonen 2021, Uusio-utiset 2020, Ympäristöministeriö 2022
Emomylly	Huittinen	Porsastuotanto	M	L: 14000 t/v; muu: 5000, 15000 t/a	L, E, Y, L, N	2013/ 2016	S 2500 emakkoa	Huttunen ym. 2018, Laaksonen ym. 2017, Winquist ym. 2018, Ympäristöministeriö 2022
Haatajan tila	Suomussalmi	Maidontuotanto	M		LL, R, N	2009	20 LY	Biokaasulaitokset kartalla 2021, Haverinen 2014, Huttunen ym. 2018
Halsuan Kehitys Oy	Halsua			10700 m ³ /v	L, E, Y			Ympäristöministeriö 2022
Hannula	Kalajoki			3000 m ³ /v	LL, N	1998		Laaksonen ym. 2017, Latvala 2009
Hietakorven tila	Sääksvesi (Vimpeli)		M	7000 t/a	L, N		160 L, 30 H	Biokaasulaitokset kartalla 2021, Poikelin 2018, Spoof-Tuomi & Välimäki 2021
Huutolan tila	Suomussalmi	Maidontuotanto	M	<10000 t/a	LL, R	2012	120 (60 LY), 115 (55 LY)	Biokaasulaitokset kartalla 2021, e-farm 2023, Haverinen 2014, Huttunen ym. 2018, Spoof-Tuomi & Välimäki 2021
Ilpo Wennström	Toholampi	Maidontuotanto	M	14750 t/v	L, R		280 LY&H	Biokaasulaitokset kartalla 2021, Mulari & Viitasalo 2020, Spoof-Tuomi & Välimäki 2021, Ympäristöministeriö 2022
Jokimaan tila	Askola				LL	2017		Biokaasulaitokset kartalla 2021, Ympäristöministeriö 2022
Junttilan tila/Heusalan tila	Nivala	Maidontuotanto	M	2600 m ³ /v	LL, N, R	2000	70 LY, +H	Haverinen 2014, Huttunen ym. 2018, Biokaasulaitokset kartalla 2021, Winquist ym. 2018, Ympäristöministeriö 2022
Juntulan tila	Suomussalmi		M	<10000 t/a	LL,R			Spoof-Tuomi & Välimäki 2021, Ympäristöministeriö 2022
Juvan Bioson Oy, yhteinen	Juva	Energiantuotanto, mädäte osakkaille	M	19500 t/a	LL, LK, E	2011		Huttunen ym. 2018, Valjakka 2018, Ympäristöministeriö 2022

Kalmarin tila (Me- terer Oy)	Leppävesi	Liikennepoltto- aine, lämpö sähkö	M, K	2000 m ³ /v (märkä)	N, LL, E	Märkä 1998, kuiva 2015		Laaksonen ym. 2017, Latvala 2009, Spoof-Tuomi & Väli- mäki 2021, Ympäristöministeriö 2022
Keskitalon tila	Haapavesi	Maidontotanto	M		LL, kuivike	2022	200	Hyttinen 2022
Klemolan tila	Ullava	Maidontuotanto	M			2021		Savela 2021
Koivunen	Virrat		M	4300 t/v	LL, E, Y	2005		Biokaasulaitokset kartalla 2021, Laaksonen ym. 2017, Huttunen ym. 2018, Spoof-Tuomi & Välimäki 2021
Kotimäki	Halsua		M	5000 t/a		2003		Biokaasulaitokset kartalla 2021, Huttunen ym. 2018, Spoof-Tuomi & Välimäki 2021
Maatila Lassi Käh- könen	Valtimo			6000 t/v		2017	130 LY	Biokaasulaitokset kartalla 2021, Spoof-Tuomi & Välimäki 2021, Winquist ym. 2018, Yle 2018
Maitoparrat Oy	Utajärvi	Maidontuotanto, lihantuotanto	M	5550 t/v	LL, KL, R	2017	350 (140 LY, 120 N)	Anttila, A. 2019, Biokaasulaitokset kartalla 2021, Win- quist ym. 2018, Ympäristöministeriö 2022
Mikko Elovaara Oy ja Eloväsikka Oy, yhteinen	Kiuruvesi	Sonnien kasvatust	M		LL	2022	2500 (1800 son- nia, 700 vasik- kaa)	Laatikainen 2022
Mty Kylmäaho	Siikalatva				LL, N		N	Ympäristöministeriö 2022
Mty Lähteenmäki	Rusko		M	7780 t/v	L, R			Biokaasulaitokset kartalla 2021, Spoof-Tuomi & Välimäki 2021, Ympäristöministeriö 2022
Mty Nygård	Alajärvi	Maidontuotanto			LL		300 LY	Jokiaho 2021, Ympäristöministeriö 2022
Palopuron Bio- kaasu Oy, yhteistoi- mintaa	Hyvinkää		K	4200 t/a	N, LHe, LK			Biokaasulaitokset kartalla 2021, Spoof-Tuomi & Välimäki 2021
Picnus Oy	Kurikka			10800 t/v	LL, KL, R		N/S	Ympäristöministeriö 2022
Pirilä	Uusikaupunki		M	4600 m ³ /a	LL, Y		S	Laaksonen ym. 2017
Riihimäki H	Halsua			10700 m ³ /v	L, E, Y		S	Laaksonen ym. 2017
Ryytilän tila, Nau- taRyytilä Oy	Siikajoki	Naudanlihantuot- tanta		n. 7000	LL, KL, N	2014	550 N	Haverinen 2014, Winquist ym. 2018, Ympäristöministe- riö 2022
Salmela	Orivesi				maata- lousliete	2006		Latvala 2009
Uusitalo Group	Kannus		M		LL, N			Biokaasulaitokset kartalla 2021
Virtaala	Haapavesi	Maidontuotanto	M		LL, R	2004, 2006	70 LY +H	Latvala 2009, Nevalainen 2017
Qvidja Gård	Parainen			<10000 t/a			He, N, La	Biokaasulaitokset kartalla 2021, Spoof-Tuomi & Välimäki 2021, Qvidja Gård 2023

K=kuivamädätys; M=märkämädätys; KL=kiintolanta; LL=lietelanta ja maatalousliete; R=säilörehu/rehu; N=nurmi, peltobiomassa tai heinä; L=lanta; LK=kananlanta; LHe=hevosenlanta; E=elintarviketuotannon ja elintarvike jätteet (rasva, teurasjäte, kalanperkuujäte, vihannesjäte); B=muu biomassa muut (vihermassat ja kasvimassat); Y=(biojäte, yhteiskuntajäte, jäteliitteet); LY=lypsylehmä; H=hieho/nuorkarja; N=lihakarja; S=sika; He=hevonen, La=lampaita.

TAULUKKO 10. Suomessa sijaitsevien oppilaitosten ja tutkimuslaitosten pienukoluokan biokaasulaitokset ja niiden tietoja.

Laitos	Sijainti	Laitos- tyyppi	Sytöte	Käyttöön- ottovuosi	Lähde
Ammattiopisto Lappia	Tervola	M	LL, B, L, N, E	2013	Biokaasulaitokset kartalla 2021, Huttunen ym. 2018, Laaksonen ym. 2017, Ympäristöministeriö 2022
Ammattiopisto Livia	Piikkiö (Kaarina)	M	L, LL, B, glyseroli	2012	Biokaasulaitokset kartalla 2021, Huttunen ym. 2018, Tuorlan opetusmaatila 2023, Ympäristöministeriö 2022
Haapajärven ammattiopisto	Haapajärvi	M	LL, R	2007	Biokaasulaitokset kartalla 2021, Latvala 2009, Ympäristöministeriö 2022
Kauhajoen ammattiopisto (Ammattiinstituutti Suurpohja)	Kauhajoki	K	LL (septoitu), N, E	2017	Huttunen ym. 2018, Mulari & Viitasalo 2020, Laaksonen ym. 2017, Ranta-Nikkola 2017
Luke	Maaninka	M	LL +, Y, biomassoja	2009	Biokaasulaitokset kartalla 2021, Huttunen ym. 2018, Laaksonen ym. 2017, Luke 2023, Ravinnerenki 2015
Luke	Sotkamo	K	N		Biokaasulaitokset kartalla 2021, Huttunen ym. 2018, Luke 2015

K=kuivamädätys; M=märkämädätys; KL=kuivalanta; LL=lietelanta; R=säilörehu/rehu; N=nurmi, peltobiomassa tai heinä; L=lanta; LK=kananlanta; LH=hevosenlanta; E=elintarviketuotannon ja elintarvike jätteet (rasva, teurasjäte, kalanperkuujäte, vihannesjäte); B=muu biomassassa (vihermassat, kasvibiomassa), Y=(biojäte, yhteiskuntajäte, jäteliitteet)

6.2 Mädätysjäännöksen käsittelyn kustannukset tilalla

Mädätysjäännöksen käsittely tilalla vaati aina jonkinlaisia investointeja laitteistoon tai laitteistoihin, joilla mädätysjäännöstä voidaan separoida ja muuten jatkojalostaa. Taulukossa 11 on esitetty erilaisia kirjallisuudesta löytyviä hankinta-, käyttö- ja kokonaiskustannuksia eri separointi- ja jatkojalostusmenetelmille. Mukaan on sisällytetty myös aiemmin esitetyt lannan käsittelylle esitetyt kustannukset Flo-tatsin ym. (2011) raportoinnista. Taulukosta nähdään, että erilaiset puristimet ja suodattimet ovat keskimäärin halvempia investointeja sekä käyttökustannuksiltaan pienempiä kuin lingot, ja siten kokonaiskustannuksiltaan mitä separointiin tulee. Jatkojalostuksen laitekustannuksista tietoa on saatavilla niukasti pienen mittakaavan tuotannossa, mutta esimerkiksi LUKE:n raportoima ammoniumstrippauslaitteisto ei sinällään ole järjetön kuluerä maatilalle. Jatkojalostuslaitteet vaativat kuitenkin tyypillisesti syötettävän materiaalin esikäsittelyä, ja niiden käyttökustannukset voivat olla merkittäviä mm. energiankulutuksen ja/tai tarvittavien kemikaalilisäysten johdosta, jolloin kokonaiskustannukset nousevat merkittävästi, esimerkiksi LUKE:n laskelmissa käsittely hinta nousee 9-12 €/m³. (Pyykkönen & Ervasti 2019) Investoinnin takaisin maksun sekä tilalle syntyvän hyödyn kannalta laitteistojen käyttövolyyymi on oleellista. Mitä enemmän laitetta käytetään, sitä nopeammin investointi maksaa itsensä takaisin, käytön mu-

kanaan tuomien etujen myötä sekä käsittelyn hinnan per volyyymi laskiessa. Tämä johdosta myös mädätysjäännöksen käsittely, kuten ylipäättään biokaasulaitoksen perustaminen, on pääsääntöisesti sitä kannattavampaa mitä suurempi yksikkö.

Tilan ei kuitenkaan ole aina välttämätöntä sijoittaa itse mädätysjäännöksen käsittelylaitteistoon, vaan voidaan ainakin separointi ostaa palveluna tilan ulkopuolelta. Koska lietteen separointikustannuksiin vaikuttaa volyyymi, eikä mädätysjäännöstä synny tilalla paljoa voi separointi ostopalveluna tai vuokralaitteilla olla järkevämpi ratkaisu. Lietteiden separointia palveluna ja vuokrattavia laitteita Suomessa on tarjonnut ainakin Separointi.fi. Verkkosivuston mukaan käsittely hinta urakalle noin 0,7-1,70 €/m³ alkaen riippuen lietteen kuiva-ainepitoisuudesta. Sivuston mukaan tämä tarkoittaisi lypsytilalle 1,20 ja karjatilalle 1,70 €/m³ kustannuksia (kuiva-ainepitoisuudet 4-9 % ja yli 9 %). (Separointi.fi) Vähintään vastaava taso tulisi siis saavuttaa separoinnissa tilan omalla laitteistolla, ottaen huomioon, että laitteiden odotetaan kestävän 10-12 vuotta. (Cathcart ym. 2021, Pyykkönen & Ervasti 2019) Tämä vastaisi Luken esittämine esimerkki ruuviseparaattorin ja lingon tapauksessa investointituella (35 %) hankittuja erottimen ja pumpun yhdistelmää noin 19 500 ja 48 400 €. (Pyykkönen & Ervasti 2019) Ostopalveluna hankittavassa separoinnissa on kuitenkin hyvä huomioida, että lietteiden säilytys vaatii todennäköisesti enemmän tilaa, kuin silloin jos tilalla itsellään omat välineet käytössä. Säilytystilaa tarvitaan tällöin separoimattomalle mädätysjäännökselle sekä neste- ja kiintoainejakeille. Lietteiden varastointiin tarvittavien tilojen mahdolliset rakennus- ja hankintakustannukset tulee siten ottaa huomioon. Ostopalvelun lisäksi osuuskunta malli voisi myöskin keventää tilakohtaisia kustannuksia, jos tiloille hankitaan yhteinen suuremman kapasiteetin liikuteltava järjestelmä separointiin. Näin voitaisiin potentiaalisesti optimoida laitteen käyttö ja tilakohtainen kierto pystyttäisiin sopimaan joustavammin kuin palveluna ostettaessa.

TAULUKKO 11. Ruuviseparaattorien ja dekantterisentrifugien hankinta- ja käyttökustannuksia.

Menetelmä	Hankinta-kustannukset	Käyttö-kustannukset ja separointi määrä	Kokonaiskustannukset	Takaisinmaksuaika (a)	Lähde
Ruuvipuristin			0,54 €/m ³		Barampouti ym. 2020
	75 000 Can\$	0,35 kWh/m ³			Fournel ym. 2019
	15,000–65,000 £	0,4–1,2 kWh/t			Lyons 2021
	10 000 £	4000 t/a	0,44 £/t	10	Møller ym. 2000
	25 000 £	0,53 £/t, 15 499 t/a	0,74 £/t	10	Cathcart ym. 2021
	17 000-28 000 €	0,50-0,90 €/m ³			Flotats ym. 2011*
	22 000 €	1,38 €/m ³ , 2000 m ³ /a	1,00 €/m ³	20	Partanen 2019*
	35 000 € + 35 % investointi tuki	1,32 €/m ³ , 3000 m ³ /a		12 (käyttöikä)	Pyykkönen & Ervasti 2019*
Dekantterilinko			3,68 €/m ³		Barampouti ym. 2020
	145 000 Can\$	5,00 kWh/m ³			Fournel ym. 2019
			0,7-2,1 €/m ³		Jacobsen 2011
	50,000–250,000 £	2.2–5.1 kWh/t			Lyons 2021
	50 000 £	4000 t/a	2,21 £/t	10	Møller ym. 2000
	100 000 £	3,68 £/t, 15 499 t/a	4,52 £/t	10	Cathcart ym. 2021
	40 000-100 000 €	0,6-2,3 €/m ³			Flotats ym. 2011*
	70 000 € + 35 % investointi tuki	2,85 €/m ³ , 3000 m ³ /a			Pyykkönen & Ervasti 2019*
Telapuristin	75 000 Can\$	0,10 kWh/m ³			Fournel ym. 2019
Suotopuristin	25 000-125 000 €	1,5 €/m ³ (nauhasuodatin)			Flotats ym. 2011*
Rumpusuodatin	25 000 €	0,35 €/m ³			Flotats ym. 2011*
Seula ja täryytin	18 500-23 000 €				Flotats ym. 2011*
Sakeutin 350 m³	17 000 €				Flotats ym. 2011*
Partikkelikoon kasvattaminen (kemikaalien avulla)	50 000 €	0,80 €/m ³			Flotats ym. 2011*
PAM-lisäys separointia varten		2,9 €/m ³			Pyykkönen & Ervasti 2019*
Strippaus (maatilakokoluokan laite)	60 000-100 000 €	9-12 €/m ³			Pyykkönen & Ervasti 2019*

*kustannukset laskettu lietelannan käsittelylle; PAM=polyakryyliamidi

7 YHTEENVETO

Mädätysjäännöksen käsittelymenetelmiä on lukemattomia, mutta pienenmittakaavan biokaasulaitoksilla kannattavuus rajaa monia erottelumenetelmiä pois käytännön toteutuksista. Siinä missä nämä menetelmät eivät tilan ympäristöstä ja ravinnetarpeesta riippuen ole välttämättömiä, tarjoaa tehokas ravinteiden erottelu monia etuja mm. lisäen hyödynnettävyyttä (kohdentaminen, kuljetus jne.) ja eri sovelluskohteita mahdollistamalla. Tehokkaampien erottelumenetelmien käytön kannattavuutta voitaisiin parantaa esimerkiksi kollektiivisilla biokaasulaitoksilla tai mädätysjäännöksen jalostuslaitoksilla, joihin kerättäisiin raaka-aineet ympäröivistä tiloista laajemmin. Lisäksi tällaisissa suuremmissa yksiköissä mädätysjäännöksen jalostaminen erilaisiksi lannoitevalmisteiksi voisi olla kannattavaa. Tällöin lannoitteiden valmistus voisi olla yksi lisätulon lähde, kun ravinteet, joita ei tarvita tiloilla voidaan myydä kuljetettavassa muodossa ulos yhteisöstä. Yhteisöllistä mallia voitaisiin toteuttaa myös yhteisillä laitehankinnoilla, joita hankintaan osallistuvat tilat voisivat käyttää tarpeen mukaan. Tällainen toiminta malli mädätysjäännöksen käsittelyssä ja potentiaalisesti myös jalostuksessa voisi muodostua osaksi tilojen välistä osuuskunta- tai muuta yhteistoimintamallia.

Koska tilalla tapahtuvan jalostustoiminnan kannattavuus riippuu paljon tilan koosta, on tärkeää huomioida, millaisessa ympäristössä toimita tapahtuu. Oletettavasti tilakoko tulee jatkossakin olemaan Suomessa sellaista kokoluokkaa, että tilojen omat biokaasulaitokset lasketaan pienenmittakaavan laitoksiksi, täytyy myös tällaiseen pienemmässä mittakaavassa löytää toiminta- ja käsittelytapoja ravinnerikkaan mädätysjäännöksen parhaan mahdollisen hyödyntämisen takaamiseksi mm. niillä tiloilla, joilla ei ole mahdollisuutta osallistua osuuskuntaan tai muuten tehdä yhteistyötä muiden tilojen kanssa. On yhtä lailla tärkeää ottaa huomioon, että kategoriaan pienlaitokset, eli alle 10 000 t vuodessa tuottavat laitokset, sisältävät laajan skaalan erilaisia ja keskenään erikokoisia laitoksia ja tiloja. Tämä on nähtävissä esimerkiksi nykyisin toiminnassa olevien biokaasulaitosten käsittelemästä mädätysjäännöksen määrästä, joka vaihtelee noin 2000 ja 10 000 t/a välillä (Taulukko 9). Tämä vastaa kokoluokaltaan esimerkiksi maitotilojen kohdalla tiloja, joilla on nautoja noin sadasta yksilöstä ylöspäin. Separoinnin kannattavuuden rajaksi (yleinen lietteen separointi) on arvioitu Suomessa jotain 2000-4000 m³ vuotuisen käsittelymäärän väliltä. (Partanen 2019, Pyykkönen & Ervasti 2019) Toki tilakokojen tulevaisuudessa potentiaalisesti kasvaessa, kasvavat myös käsittely määrät ja biokaasulaitosten koko.

Yksittäisellä tilalla ja yleisesti käsittely kustannusten kannalta kannattavin käsittelymenetelmä mädätysjäännöksen prosessointiin on ruuviseparaattori. Ruuviseparaattorin sijasta voidaan harkita dekanterilinkoa, mikäli syöte on sopivaa suoraan lingolla käsiteltäväksi. Lisäksi on mahdollista, että myös muita puristin vaihtoehtoja voi olla kannattavaa käyttää tilalla ruuviseparaattorin tapaan, mutta tiedot hinnoista

sekä käytettävyydestä ovat ruuviseparaattoriin verrattuna rajallisia. Suuremmilla tiloilla sekä yhteistointa järjestelyissä, jotka kasvattavat käsittely volyymia ja tasaavat investointikustannuksia suhteessa käyttötarpeeseen. Tällöin voidaan harkita myös peräkkäisiä käsittelymenetelmiä tai erilaisia jakeiden jatkojalostusmenetelmiä. Näin voitaisiin tuottaa useita käyttäjakeita kuten karkeaa kiintoainetta kuivikkeeksi, hienoa kiintoainetta fosforilannoitteeksi ja typpipitoista nestettä lannoitteeksi tai typpilannoitteen raaka-aineeksi riippuen kuinka pitkälle prosessi halutaan viedä. Ruuviseparointi mahdollistaa kuitenkin jo karkean jaottelun fosforipitoiseen helpommin kuljetettavaan ja kuivikkeeksi soveltuvaan kiintoainejakeeseen sekä typpipitoiseen helposti levitettävään nestejakeeseen, mahdollistaen ravinteiden kohdentamisen.

LÄHTEET

- Aguirre-Villegas, H. A., Larsson, R. A. & Sharara, M. A. 2019. Anaerobic digestion, solid-liquid separation, and drying of dairy manure: Measuring constituents and modelling emissions. *Science of the Total Environment* 696, 134059-134070.
- Al Seadi, T., Rutz, D., Prassl, H., Köttner, M., Finsterwalder, T., Volk, S. & Janssen R. 2008. *Biogas – Handbook*. Esbjerg: University of Southern Denmark Esbjerg. Saatavissa: <https://www.lemvigbio-gas.com/BiogasHandbook.pdf>. Viitattu 26.5.2023.
- Angouria-Tsorochidou, E., Seghetta, M., Trémier, A. & Thomsen, M. 2022. Life cycle assessment of digestate post-treatment and utilization. *Science of the Total Environment* 815, 152764-152773.
- Anttila, A. 2019. Veljekset muuttivat maitotilansa osakeyhtiöksi – ”Karjatalous on muuttunut ison luokan liiketoiminnaksi”. *Päivän-lehti*. Saatavissa: <https://www.paivanlehti.fi/veljekset-muuttivat-maitotilansa-osakeyhtioksi-karjatalous-on-muuttunut-ison-luokan-liiketoiminnaksi/>. Viitattu 26.5.2023.
- Arffman, M. & Taavitsainen, T. 2019. Maatilamittakaavan biokaasun tuotanto. *Biokaasu* 1/19, 10-11. Saatavissa: https://biokierto.fi/wp-content/uploads/2019/11/Biokaasulehti-2019_light.pdf. Viitattu 26.5.2023.
- Asharuddin, S.M., Othman, N., Zin, N.S.M., Tajarudin, H.A. & Din, M.F.M. 2019. Flocculation and antibacterial performance of dual coagulant system of modified cassava peel starch and alum. *Journal of Water Process Engineering* 31, 100888-100900.
- Balsari, P., Gioelli, F., Menardo, S. & Paschetta, E. 2010. The (re)use of mechanical separated solid fraction of digested or not digested slurry in anaerobic digestion plants. *14th Ramiran Conference*. Lisboa, 13.-15. syyskuuta.
- Barampouti, E. M., Mai, S., Malamis, D., Moustakas, K. & Loizidou, M. 2020. Exploring technological alternatives of nutrient recovery from digestate as a secondary resource. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 134, 110379-110390.
- Bian, X., Wang, K. & Gong, H. 2023. Biochar-enhanced agricultural application of liquid digestate from food anaerobic digestion for celery cultivation. *Science of the Total Environment* 869, 161562-161570.
- Biokaasulaitokset kartalla 2021. 2021. Saatavilla: <https://www.google.com/maps/d/viewer?mid=1ZHpWSB6Av2QQIZSGySCriDCW7piuX-nBM&ll=63.71419157616261%2C25.5049118552287&z=6>. Viitattu: 26.5.2023
- Biokaasuteknologia – Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen*. 2015. Kymäläinen, M. & Pakarinen, O. (toim.). Hämeenlinna: Hämeenlinnan ammattikorkeakoulu. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-951-784-771-1>. Viitattu 26.5.2023.

- Bolzonella, D., Fatone, F., Gottardo, M. & Frison, N. 2018. Nutrients recovery from anaerobic digestate of agro-waste: Techno-economic assessment of full scale applications. *Journal of Environmental Management* 216, 111-119.
- Botania Näring i Kretslopp. 2020. *Raportti biokaasun nykytilanteesta Merenkurkun alueella*. Infolehti-nen 1. Saatavilla: <https://biofuelregion.se/projekt/botnia-naring-i-kretslopp/infosheet-botnia-naring-i-kretslopp/>. Viitattu: 26.5.2023.
- Cathcart, A., Smyth, B. M., Lyons, G., Murray, S., Rooney, D. & Johnston, C. R. 2021. An economic analysis of anaerobic digestate fuel pellet production: can digestate fuel pellets add value to existing operations? *Cleaner Engineering and Technology* 3, 100098-100108.
- Degerman, R. 2015. *Karjatila vääntää lannasta sähköä ja lämpöä – pienvoimalakin voi tuottaa tarpeeksi sähköä*. Saatavissa: <https://yle.fi/a/3-8386773>. Viitattu: 26.5.2023.
- Doyeni, M.O., Stulpinaite, U., Baksinskaite, A., Suproniene, S. & Talvikiene, V. 2021. The Effectiveness of Digestate Use for Fertilization in an Agricultural Cropping System. *Plants* 10, 1734-1746.
- e-farm. 2023. *Huutolan tila, Suomussalmi*. Saatavissa: <https://www.efarm.fi/kohteet/e-farm-huutolan-tila/>. Viitattu: 26.5.2023.
- Ervasti, S. & Winqvist E. 2016. Typen erotus ja talteenotto lantaperäisestä nesteestä. *Maataloustieteen Päivät*. Helsinki, 12.-13. tammikuuta. Suomen Maataloustieteellisen Seuran Tiedote –sarja.
- Ervasti, S., Winqvist, E. & Rasi, S. 2018. *Typen talteenotto lantaperäisestä nesteestä – tekninen toteuttavuus ja prosessin kannattavuus arvio*. Helsinki. Luonnonvarakeskus. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 4/2018. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-532-5>. Viitattu 26.5.2023.
- Flotats, X., Foged, H. L., Bonmati Blasi, A. Palatsi, J., Magri, A. & Schelde, K. M. 2011. *Manure processing technologies – Technical Report No. II to the European Commission, Directorate-General Environment*. Tjele. Agro Business Park ja GIRO Centre Tecnològic. Saatavissa: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/583aacc3-8e66-40d8-8828-47f8cd4262d7> Viitattu 26.5.2023.
- Fournel, S., Godbout, S., Ruel, P., Fortin, A., Généreux, M, Côté, C., Landry, C. & Pellerin, D. 2019. Production of recycled manure solids for bedding in Canada dairy farms: I. Solid-liquid separation. *Journal of Dairy Science* 102, 1832-1846.
- Frondelius, L., Lindeberg, H. & Pastell, M. 2019. Separoitu kuivajae toimii makuuparsien kuivikkeena. Teoksessa Pulkka, E.-K., Tantala, T., Antikainen, S., Eskelinen, P. & Partanen, J. (Toim.) *Lanta liikelle ja ravinteet kiertoon*. Savonia-ammattikorkeakoulun julkaisusarja 3/2019. Kuopio: Savonia-ammattikorkeakoulu, Lantalogistiikka ja Ravinnerenki -hankkeet, 12-13 Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2019102835181>. Viitattu: 26.5.2023.
- Hjorth, M., Christensen, K. V., Christensen, M. L. & Sommer, S. G. 2010. Solid-liquid separation of animal slurry in theory and practice. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 30, 153-180.

- Horn, S., Seppänen, A.-M., Winqvist, E., Lehtoranta, S. & Luostarinen, S. 2020. *Biokaasulaitoksen mädätysjäännöksen hyödyntämismvaihtoehdot – vaihtoehtojen ilmastovaikutukset ja taloudellisuus*. Helsinki. Suomen ympäristökeskus. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 42: 2020. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-11-5229-0>. Viitattu 26.5.2023.
- Guilayn, F., Jimenez, J., Rouez, M., Crest, M. & Patureau, D. 2019. Digestate mechanical separation: Efficiency profiles based on anaerobic digestion feedstock and equipment choice. *Bioresource Technology* 274, 180-189.
- Haverinen, T. 2014. *Maatilojen omatoimirakennetut biokaasulaitokset. Toteutus ja kustannukset*. Oulu: Oulun Ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö.
- Huttunen, M.J., Kuittinen, V. & Lampinen, A. 2018. Suomen biokaasulaitosrekisteri n:o 21. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-61-2856-6>. Viitattu: 26.5.2023.
- Hyttinen, S. 2022. Omat lehmät tuottavat sähkön ja lämmön Keski-Itämaalla maatilalle. *Haapavesi-lehti*. Saatavissa: <https://www.haapavesi-lehti.fi/artikkeli/omat-lehmat-tuottavat-sahkon-ja-lammon-haapavesi-selle-keskitalon-maatilalle-syksyn-mittaan-kayttoo>. Viitattu: 26.5.2023.
- Jacobsen, B. 2011. Cost of slurry separation technologies and alternative use of the solid fraction for biogas production or burning – a Danish perspective. *International Journal of Agricultural Management* 1, 11-22.
- Jokiaho, T., 2021. Biokaasulaitos kokosi kävijöitä Nygårdin tilalle Alajärvellä. *Torstai-lehti*. Saatavissa: <https://www.torstai-lehti.fi/2018/11/02/biokaasulaitos-toi-positiivista-kuhinaa-saaksjarvelle/>. Viitattu: 26.5.2023.
- Jurgutis, L., Šlepetienė, A., Amalevičiūtė-Volungė, K., Volungevičius, J. & Šlepetys, J. 2021. The effect of digestate fertilisation on grass biogas yield and soil properties in field-biomass-biogas-field renewable energy production approach in Lithuania. *Biomass and Bioenergy* 153, 106211-106220.
- Jääskeläinen, K. 2020. *Naudan lietelannan biokaasupotentiaali ja ravinnetarkastelu*. Kokkola. Centria-ammattikorkeakoulu. Centria Raportteja ja selvityksiä, 44. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2020052739357>. Viitattu 26.5.2023.
- Jørgensen, P. J. 2009. *Biogas – green energy: Process, Design, Energy supply, Environment*. 2. uudistettu painos. Aarhus. Aarhus University. Saatavissa: <https://www.lemvigbiogas.com/BiogasPJJuk.pdf>. Viitattu 26.5.2023.
- Kaparaju, P. L. N. & Rintala, J. A. 2008. Effects of solid-liquid separation on recovering residual methane and nitrogen from digested dairy cow manure. *Bioresource Technology* 99, 120-127.
- Laaksonen, J., Merilehto, K., Pietarinen, A. & Salmenpää H. 2017. Valtakunnallinen jätesuunnitelma vuoteen 2023. *Suomen ympäristö* 3/2017. Saatavissa: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/79699/SY_03_2017.pdf. Viitattu: 30.1.2023.

- Laatikainen, A. 2022. Lämpöä ja sähköä lannasta. *Kiuruvesi-lehti*. Saatavissa: <https://kiuruvesi-lehti.fi/2022/10/25/lampoa-ja-sahkoa-nautojen-lannasta-mikko-elovaara-oy-ja-elovasikka-oy-siirtyivat-biokaasuaikaan/>. Viitattu: 26.5.2023.
- Lamolinara, B., Pérez-Martínez, A., Guardado-Yordi, E., Guillén Fiallos, C. Diéguez-Santana, K. & Ruiz-Mercado, G. J. 2022. Anaerobic digestate management, environmental impact, and techno-economic challenges. *Waste Management* 140, 14-30.
- Latvala, M. 2009. *Biokaasun tuotanto suomalaisessa toimintaympäristössä – Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT)*. Helsinki. Suomen ympäristökeskus. SUOMEN YMPÄRISTÖ 24: 2009. Saatavissa: https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/37998/SY_24_2009.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Viitattu 30.1.2023
- Lehtomäki, A., Paavola, T., Luostarinen, S. & Rintala, J. 2007. *Biokaasusta energiaa maatalouteen – Raaka-aineet, teknologiat ja lopputuotteet*. Ålander, T. (toim.) Jyväskylä. Jyväskylän yliopisto. Jyväskylän yliopiston bio- ja ympäristötieteiden laitoksen tiedonantoja 85. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-39-3075-2>. Viitattu: 26.5.2023.
- Lehtonen, S. 2021. Pirteän Porsaan kupeessa pöhisevä biokaasulaitos kierrättää eläinten lannan lämmitämään ja valaisemaan sikalaa. *Maaseuduntulevaisuus*. Saatavissa: <https://www.maaseuduntulevaisuus.fi/maatalous/57cb0678-f282-560b-8658-57b6ba81d23c>. Viitattu: 30.1.2023
- Luke, 2015. *Luke Sotkamon VuoGas-biokaasulaitoksen esittely / VuoGas biogas reactor*. Saatavissa <https://www.youtube.com/watch?v=mqdwNf4NJvA>. Viitattu: 30.1.2023
- Luke, 2022. *Lypsylehmien lukumäärä karjakokoluokittain*. Saatavissa: http://statdb.luke.fi/PXWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE_02%20Maatalous_04%20Tuotanto_12%20Kotielainten%20lukumaara/03_Lypsylehmien_lukumaara_karjakokoluokka.px/table/tableViewLayout2/?loadedQueryId=d22827fc-f07d-41f9-9fb1-4dab37a3adc8&timeType=top&timeValue=1. Viitattu: 26.5.2023
- Luke, 2023. Maaningan tutkimusinfrastruktuuri. Saatavissa: <https://www.luke.fi/fi/tutkimus/tutkimusinfrastruktuurit/maaningan-tutkimusinfrastruktuuri#tutkimusnavetta>. Viitattu: 30.1.2023
- Luostarinen, S., Paavola, T., Ervasti, S., Sipilä, I. & Rintala, J. 2011. *Lannan ja muun eloperäisen materiaalin käsittelyteknologiat*. Jokioinen. MTT Jokioinen. MTT RAPORTTI 27: 2011. Saatavissa: <http://www.mtt.fi/mtrraportti/pdf/mtrraportti27.pdf>. Viitattu 26.5.2023.
- Luostarinen, S., Tampio, E., Niskanen, O., Koikkalainen, K., Kauppila, J., Valve, H., Salo T. & Ylivainio, K. Lantakaasutuen toteuttamisvaihtoehdot. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus* 40/2019. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-777-0>. Viitattu 26.5.2023.
- Lyons, G. A., Cathcart, A., Frost, J. P., Wills, M., Johnston, C., Ramsey, R. & Smyth, B. 2021. Review of Two Mechanical Separation Technologies for the Sustainable Management of Agricultural Phosphorus in Nutrient-Vulnerable Zones. *Agronomy* 11, 836-860.

- Moinard, V., Redonidi, C., Etiévant, V., Savoie, A., Duchene, D., Pelosi, C., Houot, S. & Capoweiz, Y. 2021. Short- and long-term impact of anaerobic digestate spreading on earthworms in cropped soils. *Applied Soil Ecology* 168, 104149-104162.
- Motiva Oy. 2013. *Biokaasun tuotanto maatilalla*. Helsinki. Motiva Oy. Saatavissa: https://www.motiva.fi/files/6958/Biokaasun_tuotanto_maatilalla.pdf. Viitattu 26.5.2023.
- Mulari, A. & Viitasalo, P. 2020. *Biometaanin hyödyntäminen maaseudulla*. Oulu: Oulun Ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö.
- Møller, H. B., Lund, I. & Sommer, S. G. 2000. Solid-liquid separation of livestock slurry: efficiency and cost. *Bioresource Technology* 74, 223-229.
- Møller, H. B., Hansen, J. D. & Sørensen, C. A. G. 2007. Nutrient Recovery by Solid-Liquid Separation and Methane Productivity of Solids. *Transactions of the ASABE* 50, 193-200.
- Möller, K. & Müller, T. 2012. Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review. *Engineering in Life Sciences* 12, 242-257.
- Nag, R., Whyte, P., Markey, B. K., O'Flaherty, V., Bolton, D., Fenton, O., Richards, K. G. & Cummins, E. 2020. Ranking hazards pertaining to human health concerns from land application of anaerobic digestate. *Science of the Total Environment* 710, 136297-136313.
- Nevalainen, R. 2017. *Pohjois-Pohjanmaan maataloussektorin biokaasun tuotantopotentiaali*. Oulu: Oulun yliopisto. Diplomityö.
- Nolan, S., Thorn, C. E., Ashekuzzaman, S. M., Kanvanagh, I., Nag, R., Bolton, D., Cummins, E., O'Flaherty, V., Abran, F., Richards, K. & Fenton, O. 2020. Landspreading with co-digested cattle slurry, with or without pasteurisation, as a mitigation strategy against pathogen, nutrient and metal contamination associated with untreated slurry. *Science of the Total Environment* 744, 140841-140855.
- Partanen, J. 2019. Lannan separoinnin kannattavuus. Teoksessa Pulkka, E.-K., Tantala, T., Antikainen, S., Eskelinen, P. & Partanen, J. (Toim.) *Lanta liikkeelle ja ravinteet kiertoön*. Savonia-ammattikorkeakoulun julkaisusarja 3/2019. Kuopio: Savonia-ammattikorkeakoulu, Lantalogistiikka ja Ravinnerenki -hankkeet, 4-5. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2019102835181>. Viitattu: 26.5.2023.
- Poikelin, V. 2018. Biokaasuulaitos toi positiivista kuhinaa Sääksjärvelle. *Torstai-lehti*. Saatavissa: <https://www.torstai-lehti.fi/2018/11/02/biokaasuulaitos-toi-positiivista-kuhinaa-saaksjarvelle/>. Viitattu: 26.5.2023.
- Popovic, O., Gioelli, F., Duniccio, E., Rollè, L. & Balsari, P. 2017. Centrifugation of Digestate: The Effect of Chitosan on Separation Efficiency. *Sustainability* 9, 2302-2310.
- ProAgria. 2018. *Johtaminen lähtee itsestä*. Saatavissa: <https://www.proagria.fi/ajankohtaista/johtaminen-lahtee-itsesta>. Viitattu: 26.5.2023

- Pyykkönen, V. & Ervasti, S. 2019. Separoinnin mahdollisuudet ja kannattavuustekijät. Teoksessa Pulkka, E.-K., Tantala, T., Antikainen, S., Eskelinen, P. & Partanen, J. (Toim.) *Lanta liikkeelle ja ravinteet kiertoön*. Savonia-ammattikorkeakoulun julkaisusarja 3/2019. Kuopio: Savonia-ammattikorkeakoulu, Lantalogistiikka ja Ravinnerenki -hankkeet, 6-8. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2019102835181>. Viitattu: 26.5.2023.
- Ranta-Nikkola, K. 2017. Biokaasu tähtää tulevaisuuteen. *Tejuka-lehti*. Saatavissa: <https://www.tejuka-lehti.fi/artikkeli-6.107.462230.5673753003>. Viitattu: 30.1.2023.
- Tuorlan opetusmaatila. 2023. Bioenergia. Saatavissa: <http://ravinnejaenergia.fi/materiaali/tuorla/biokaasu/>. Viitattu: 26.5.2023.
- Ravinnerenki, 2015. Yleistä biokaasusta, Luke Maaningan biokaasulaitos. Saatavissa: https://ravinnerenki.savonia.fi/images/Renki_tuparit_Luke_biokaasu.pdf. Viitattu: 30.1.2023
- Savela, P. 2021. Nyt saa sähkölasku kyytiä. *Keskipohjanmaa*. Saatavissa: <https://www.keskipohjanmaa.fi/artikkeli/nyt-saa-sahkolasku-kyytia-klemolan-maatalousyhtyma-ullavassa-korvaa-lahes-kokonaan-biokaasun-kaytol>. Viitattu: 26.5.2023.
- Separointi.fi, 2022. *Separoinnin hinta*. Saatavissa: <http://separointi.fi/separointiurakointi/separoinnin-hinta/>. Viitattu 17.3.2022.
- Seppänen, A.-M., Laakso, J. & Luostarinen, S. 2018. *Sivuvirrasta väkilannoitteen korvaajaksi – Mädätysjäätännöksen jalostusteknologioiden nykytila, tarpeet ja tulevaisuuden mahdollisuudet Suomessa*. Helsinki. Luonnonvarakeskus. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 31/2018. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-590-5>. Viitattu: 26.5.2023.
- Setoguchi, A., Oishi, K., Kimura, Y., Ogino, A, Kumagai, H. & Hirooka, H. 2022. Carbon footprint assessment of whole dairy farming system with a biogas plant and the use of solid fraction of digestate as a recycled bedding material. *Resources, Conservation & Recycling Advances* 15, 200115-200125.
- Spoof-Tuomi, K. & Välimäki, S. 2021. *Suomalaisen biokaasuntuotannon ja biokaasun jakeluinfrastruktuurin benchmarkkaus*. Vaasa. Vaasan yliopisto. Saatavissa: <https://www.uwasa.fi/sites/default/files/2021-09/Suomalaisen%20biokaasuntuotannon%20ja%20biokaasun%20jakeluinfrastruktuurin%20benchmarkkaus.%20Kes%C3%A4kuu%202021.pdf>. Viitattu: 27.1.2023
- Szymańska, M., Szara, E., Sosulski, T., Wąs, A., van Pruissen, G. W. P., Cernelissen, R. L., Borowik, M. & Konkol, M. 2019. A Bio-Refinery Concept for N and P Recovery – A Chance for Biogas Plant Development. *Energies* 12, 155.
- Tampio, E., Marttinen, S. & Rintla, J. 2016. Liquid fertilizer products from anaerobic digestion of food waste: mass, nutrient and energy balance of four digestate liquid treatment systems. *Journal of Cleaner Production* 125, 22-32.

- Tampio, E., Vainio, M., Virkkunen, E., Rahtola, M. & Heinonen, S. 2018. *Opas kierrätyslannoitevalmisteiden tuottajille*. Helsinki. Luonnonvarakeskus. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus* 37/2018. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-606-3>. Viitattu: 26.5.2023.
- Turunen, J., Karppinen, A. & Ihme, R. 2019. Effectiveness of biopolymer coagulants in agricultural wastewater treatment at two contrasting levels of pollution. *SN Applied Sciences* 1, 210-218.
- Usefi, S., Asadi-Ghalhari, M., Izanloo, H., & Yari, A. & Mostafaloo, R. 2019. The Performance of Starch as a Natural Coagulant for Turbidity Removal from Wastewater in Stone Cutting Industry. *Archives of Hygiene Sciences* 8. 17-26.
- Uusiouutiset. 2020. *Sikatilalle Doranovan märkämädättämö*. Saatavissa: <https://www.uusiouutiset.fi/sikatilalle-doranovan-markamadattamo/>. Viitattu: 26.5.2023.
- Valjakka, M. 2018. *Pienimuotoisen biokaasun tuotannon ratkaisut ja haasteet Suomessa*. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Kandidaatintyö.
- VanderZaag, A. & Baldé, H. 2022. Nutrient recovery abates methane emissions from digestate storage. *Bioresource Technology Reports* 18, 101086-101092.
- Vilanova Plana, P. & Noche B. 2016. A review of the current digestate distribution models: storage and transport. *8th International Conference on Waste Management and The Environment*. València, 1.-9. Kesäkuuta. Southampton: WIT Press.
- Winquist, E., Luostarinen, S., Kässi, P., Pyykkönen, V. & Regina, K. 2015. Maatilojen biokaasulaitosten kannattavuus ja kasvihuonekaasujen päästövähennys. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus* 36/2015. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-045-0>. Viitattu 26.5.2023.
- Winquist, E., Rikkonen, P. & Varho, V. 2018. Suomen biokaasualan haasteet ja mahdollisuudet. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus* 47/2018. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-630-8>. Viitattu: 26.5.2023.
- Virkkajärvi, P., Hyrkäs, M., Rätty, M., Pakatinen, T., Pyykkönen, V. & Luostarinen, S. 2016. Biokaasuteknologiaa maataloilla II – Biokaasulaitoksen käsittelyjäännöksen hyödyntäminen lannoitteena. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus* 37/2016. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-266-9>. Viitattu: 26.5.2023.
- Vondra, M., Máša, V., Touš, M. & Konečná. 2018. Vacuum Evaporation of a Liquid Digestate from Anaerobic Digestion: A Techno-economic Assessment. *Chemical Engineering Transactions* 70, 769-774.
- Yle, 2018. Lassi Kähkösen navetasta runsaasti biokaasua. Saatavissa: <https://areena.yle.fi/podcastit/1-4529258>. Viitattu: 26.5.2023.
- Ympäristöministeriö, 2022. Toimivat biokaasulaitokset ja biopolttoaine.xls. Saatavissa: <https://ym.fi/documents/1410903/42733297/Biokaasu+ja+biopolttoainelaitokset.pdf/04268564-2b1c->

[e960-cd5d-dd69979a5f40/Biokaasu+ja+biopolttolaitokset.pdf?t=1649650326400](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114777).

Viitattu:

27.1.2023

Zhang, X., Liu, C., Liao, W., Wang, S., Zhang, W., Xie, J. & Gao, Z. 2022. Separation efficiency of different solid-liquid separation technologies for slurry and gas emission of liquid and solid fraction: A meta-analysis. *Journal of Environmental Management* 310, 114777-114788.

Qvidja Gård. 2023. *Eläimet*. Saatavissa: <https://www.qvidja.fi/qvidjan-tila/elaimet/>. Viitattu 26.5.2023.

