



Puhdistamolietepohj
aisen
kierrätysravinteen
modifiointi
laadukkaaksi
lannoitetuotteeksi -
loppuraportti

Prizztech Oy

Pirjo Taube
Iiris Puhakka
19.07.2023

SISÄLLYSLUETTELO

1.	Tiivistelmä.....	3
2.	Hankkeen tausta.....	4
2.1.	Lannoitelainsäädäntö.....	6
2.2.	Kasvien ravinnetarpeet	8
2.2.1.	Fosfori.....	9
2.2.2.	Typpi.....	9
2.2.3.	Kalium.....	9
2.2.4.	Magnesium.....	10
2.2.5.	Ravinteiden tarve maanviljelyksessä.....	10
2.3.	Ravinteiden jakautuminen ja kierrätyslannoitteiden käyttö Satakunnassa	11
2.4.	Kierrätyslannoitevalmisteet	12
2.4.1.	Puhdistamolietepohjainen kierrätyslannoite	13
2.4.2.	Metsäteollisuuden ja elintarviketeollisuuden sivuvirrat.....	14
2.4.4.	Kierrätyslannoitevalmisteiden laatu järjestelmä	15
2.4.5.	Kierrätyslannoitteiden lannoituspotentiaali.....	15
2.5.	Satakunnassa syntyvät ravinnerikkaat jätevesilietteet, mädätysjäännökset ja sivuvirrat.....	16
3.	Puhdistamopohjaiset lietteet	17
3.1.	Jätevesilietteet.....	17
3.1.1.	Kemiallinen saostus.....	19
3.1.2.	BioP.....	19
3.1.3.	Vaihtoehtoiset fosforinsaostustavat.....	20
3.2.	Biokaasulaitoksen ravinnerikkaat jakeet.....	21
3.3.	Metsäteollisuuden lietteet.....	21
4.	Struviitin valmistus jätevedestä ja mädätysjäännöksestä.....	22
5.	Puhdistamolietteiden haitta-aineet ja mikromuovit.....	23
6.	Hankkeessa tehdyt muut selvitykset.....	24
7.	Kokeellinen osuus ja tulokset.....	25
7.1.	Struviitin saostus Huittisten Puhdistamon jätevedestä.....	26
7.1.1.	Struviittisaostuksen koeajot	26
7.1.2.	Struviittisaostuskokeiden tulokset	26
7.2.	Infrapunakuivaus	30
7.2.1.	Infrapunakuivauskoeajot	30
7.2.2.	Infrapunakuivauksen tulokset.....	31
7.2.3.	Haitta-aineet	33
7.2.4.	Konsentraattikokeet.....	34
7.3.	Autoterminen hapellinen hajotusprosessi.....	34

7.3.1. Koeajot mikrobikäsittelylle.....	34
7.3.2. Tulokset.....	35
7.3.3. Haitta-aineet.....	37
7.4. Kalkkistabilointi UPM.....	37
7.4.1. Kalkkistabilointikokeet.....	37
7.5. Fosforinsaostus magnesiumkemikaaleilla.....	38
7.5.1. Fosforinsaostuskokeet.....	38
7.5.2. Fosforinsaostustulokset.....	38
8. Teknistoloudellinen tarkastelu.....	39
8.1. Struviitti.....	39
8.2. Mikrobikäsitelty bioliete.....	39
8.3. Infrapunakuivattu ja rikastettu mädätysjäännös.....	40
8.4. Fosforinsaostus magnesiumilla.....	40
9. Johtopäätökset.....	41
Lähteet.....	42

1. Tiivistelmä

Tämä raportti on Prizztech Oy:n koordinoiman SATA-Ravinne hankkeen loppuraportti (2021–2023). Hanke sai ympäristöministeriön ravinteiden kierrätyksen ja jätevesien käsittelyn energiatehokkuuden hankkeisiin tarkoitettua avustusta. Tämän hankkeen taustana oli tarve selvittää puhdistamopohjaisten jätevesilietteiden ja mädätysjäännösten sekä muiden teollisuuden sivuvirtojen jalostamista ja edistämistä peltoravinteeksi Satakunnan seudulla.

Porissa käynnistyi v. 2021 biokaasulaitos, joka käsittelee Porin seudun jätevesilietteet. Satakunnan alueella syntyy myös metsäteollisuuden ja yhdyskuntajätevesien tuotteena ravinne- ja kuitupitoisia lietteitä, joiden käyttö on jo tunnustettu maanparannusaineena. Kierrätyslannoitteita tulisi alueella muokata helpommin kuljetettavaan muotoon ja niiden ravinnesisältöä olisi hyvä muokata soveltumaan paremmin eri viljelykasvien ravinnetarpeisiin. Tulevaisuudessa viljelijöiden tarpeet ja jätevesilaitosten ja biokaasulaitosten tuottamat kierrätyslannoitteiden ominaisuudet pitäisi saada paremmin kohtaamaan, jotta kierrätysravinteiden käyttö yleistyisi. Tämä edellyttää tiiviimpää yhteistyötä ja verkostoja kierrätyslannoitteiden tuottajien, lannoitevalmistajien ja viljelijöiden kesken. Kierrätyslannoitteiden prosessointi ja kuivaus helpottaisi käsittelyä ja vähentäisi kustannuksia, jolloin niiden kuljetus olisi kannattavaa Satakunnan alueen ulkopuolisille alueille. Kierrätyslannoitteiden käyttö edistää myös vesiensuojelun tavoitteita, koska talteen otetut kierrätysravinteet pysyvät paremmin maaperässä. Erityisesti kuitupitoisten kierrätyslannoitteiden orgaaninen aines parantaa viljelysmaan mururakennetta, jolloin maaperä pidättää vettä ja ravinteita paremmin.

Hankkeen aikana maailman poliittinen tilanne ja lannoitteiden markkinat ovat muuttuneet oleellisesti Ukrainan sodan vuoksi. Väkilannoitteiden saatavuus on heikentynyt sekä hinnat ovat nousseet moninkertaisesti. Kierrätyslannoitteiden käytön lisäämisen tärkeys on Suomessa tunnustettu erityisesti viimeisen vuoden aikana huoltovarmuutta parantavana tekijänä. Myös muita kierrätyslannoitteiden käyttöä sääteleviä asioita on tapahtunut hankkeen aikana. Uusi lannoitelainsäädäntö tuli voimaan 1.7.2022. Nykyinen ainesosiin perustuva lannoitelainsäädäntö antaa vähemmän mahdollisuudet suunnitella ja valmistaa erilaisia kierrätyslannoitteita niiden laatuvaatimusten puitteissa.

Hankkeessa suunniteltiin ja kokeiltiin laadukkaana lannoitetuotteen rikastusta puhdistamopohjaisesta lietteestä tai mädätysjäännöksestä prosessoimalla ja siihen pyrittiin yhdistelemään Satakunnan alueella sijaitsevia teollisuuden sivuvirtoja tai lisäaineita koostumusta parantamaan. Hankkeen toimenpiteisiin valikoitui projekteja, joissa jätevedenpuhdistamoiden, biokaasulaitosten ja kemianteollisuuden toimijoilla oli selviä pyrkimyksiä saada omien prosessiensa tuotannossa syntyviä sivuvirtoja hyötykäyttöön maanparannusaineeksi tai lannoitetuotteiksi. Yritysosapuolina hankkeeseen osallistuivat Berner Chemicals Oy, Gasum Oy, Envor Pori Oy, Huittisten Puhdistamo Oy ja UPM Rauma Oyj.

Kokeellisessa osassa tehtiin kunkin yrityksen kanssa suunnitelma projektista, jossa yrityksen ravinnerikasta sivuvirtaa voitaisiin jalostaa parempaan ja käyttökelpoisempaan muotoon maanparannusaineeksi. Hankkeessa saatiin pieniä määriä lannoitetuotteita, joiden laatua ja soveltuvuutta maanparannusaineeksi analysoitiin. Hankkeessa tuotetuista kierrätyslannoitetuotteista analysoitiin ravinnepitoisuudet ja haitta-aineet. Termisesti käsitellyille tuotteille tehtiin myös laaja haitta-aineanalyysi ja asiantuntijalausunto haitta-aineista. Hankkeessa kokeiltujen menetelmien kannattavuutta teollisessa mittakaavassa arvioitiin. Viestinnän ja työpajojen avulla luotiin yritysverkostoja, jotka mahdollisesti avaavat jatkojalostusprosessille liiketoimintamahdollisuuksia.

2. Hankkeen tausta

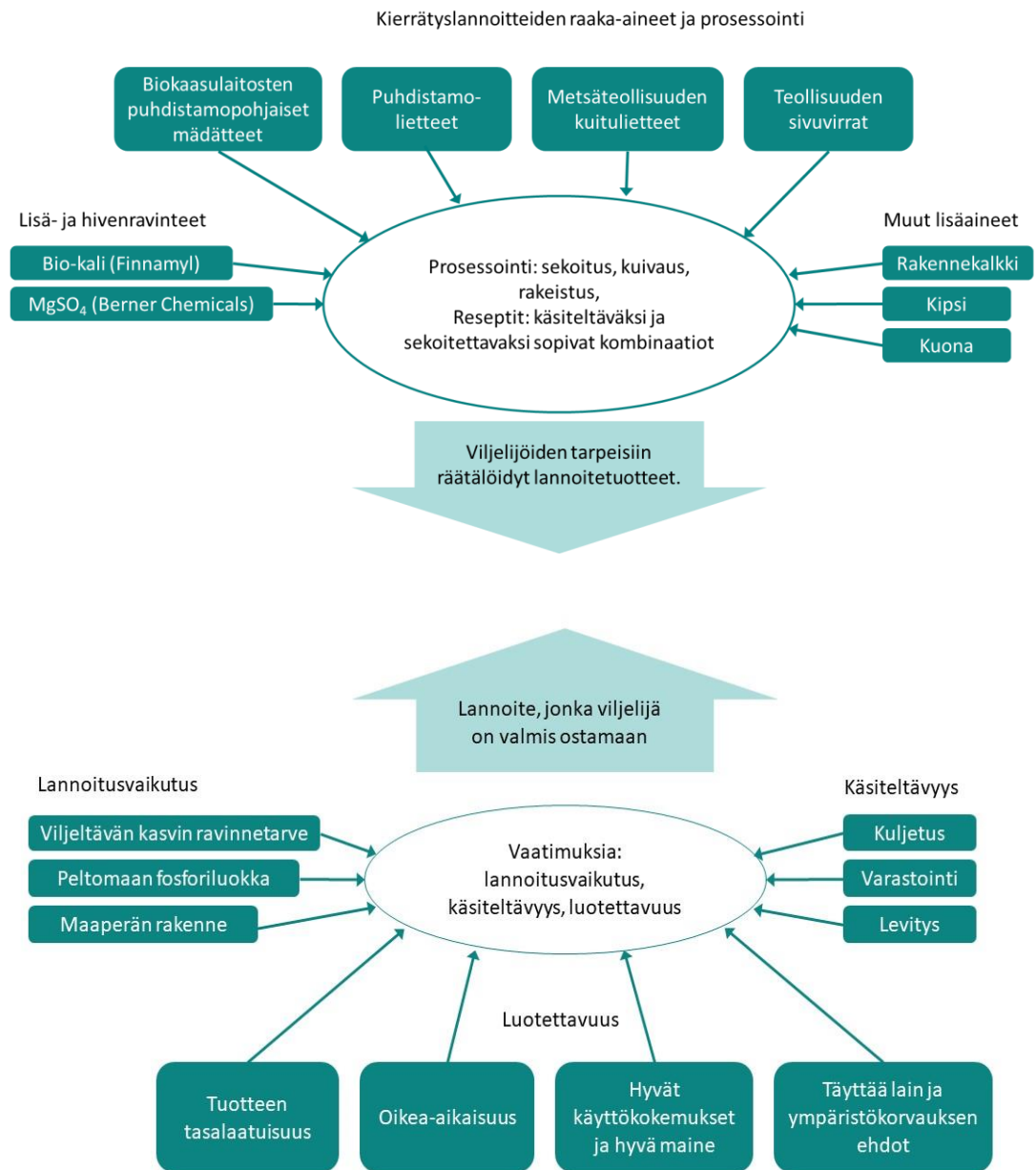
Ympäristöministeriön Raki-ohjelma koskee ravinteiden kierrätyksen edistämistä ja Saaristomeren tilan parantamista vähentämällä kiertotalouden keinoin Itämeren kuormitusta ja tehostamalla vesiensuojelua. Ohjelmassa rahoitetaan hankkeita, joissa hyödynnetään biomassoja ja tuotetaan kierrätysravinteita ja uusiutuvaa energiaa. Vuodesta 2020 lähtien rahoitusta on kohdennettu erityisesti yhdyskuntien jätevesien ja lietteiden hyödyntämishankkeille, sekä hankkeille, joissa luodaan eri toimijoiden välisiä ravinteiden kierrätyksen yhteistyöverkostoja. (Ympäristöministeriö).

Fosfori on ihmiselle elintärkeä alkuaine. Se on välttämätön raaka-aine maanviljelyn lannoitteissa. Jos maaperässä on liikaa fosforia, se valuu vesistöihin ja rehevöittää vesiä. Liian korkeat fosforipitoisuudet pintavesissä siis aiheuttavat rehevöitymistä ja pohjavesien saastumista. Siksi fosforia täytyy poistaa jätevesistä. Poistaminen on kemiallista saostamista tai biologista ravinteidenpoistoa, jossa fosfori liittyy mikro-organismeihin. Suomessa fosforinpoistoon käytetään lähinnä kemiallista saostusta. Biologinen fosforinpoisto ei varsinkaan kylminä vuodenaikoina takaa tarpeeksi tehokasta fosforinpoistoa. Globaalisti biologinen fosforinpoisto on yleistä. (Berninger et al. 2017) Fosforia kulkeutuu ympäristöön eniten maanviljelyn kautta, kun osa käytetyistä lannoitteista huuhtoutuu sateiden mukana vesistöihin. Se on niin sanottua hajakuormitusta, kun kunnallisesta jätevedestä vesistöön päätyvät fosfaatit ovat pistekuormitusta. (Lenntech)

Fosforia on maapallolla vakiomäärä, sitä ei synny, eikä se katoa. Neitseellinen fosfori on loppumassa maapallolta ja siksi sen kierrättämistä on lisättävä. Yksi kierrätysmuoto on kierrättää se jätevedestä lietteen kautta. Erilaisten teollisuuden ja jätevedenpuhdistuksen sivuvirroissa olevaa fosforia kierrättämällä voidaan kattaa lähes kaikki peltoviljelyn tarvitsema fosfori ja suuri osa typestä. Fosfaattimineraalit ovat uusiutumattomia luonnonvaroja, joiden on arvioitu riittävän nykykulutuksella 50–100 vuotta. Suurin osa tunnetuista fosfaattivarannoista on Kiinan, USA:n ja Marokon hallinnassa. EU on täysin riippuvainen tuontifosforista, koska sen omat varannot ovat pieniä. Euroopan ainoa fosforikaivos sijaitsee Siilinjärvellä. Suurin osa maailmassa louhitusta fosforista käytetään lannoiteteollisuudessa.

Väkilannoitteena typpikin on ongelmallinen ravinne. Mineraalipohjaisissa typpilannoitteissa käytetään ilmakehän typpeä, jota on riittävästi. Sitä valmistetaan kuitenkin energiantensiivisellä tavalla, mistä aiheutuu myös kasvihuonepäästöjä. Pelloille levitetty typpi voi jäädä myös kasveilta hyödyntämättä ja kulkeutua vesistöihin ja aiheuttaa rehevöitymistä ja pohjaveden pilaantumista. Ilmaan päässeet typpiyhdisteet voivat aiheuttaa happamoitumista, ilman laadun heikkenemistä sekä edistää ilmastonmuutosta. (Maa- ja metsätalousministeriön ja ympäristöministeriön työryhmä 2011)

Biokaasulaitoksella mädätettyjä ja käsiteltyjä jätevesilietteitä voidaan nykyisen lainsäädännön mukaan käyttää kierrätysravinteena mm. viljan viljelyssä, mutta elintarviketeollisuuden pelkäämän imagohaitan vuoksi niiden lannoitekäyttö on viime vuosina vähentynyt. Puhdistamolietepohjaisten mädätysjäännösten käytettävyyttä voidaan lisätä jatkojalostamalla niistä kierrätyslannoitetuotteita. Näin saadaan yhteen viljelykasvien ravinnetarpeita vastaava ravinnesisältö, mahdollisesti vähäisempi haitta-ainepitoisuus ja laadukas imago.



Kuva1. Kierrätyslannoitevalmisteiden raaka-aineet ja prosessointi

Globaali maatalous on kärsinyt paljon Ukrainan sodan syttymisen takia. Venäjä oli vuonna 2020 maailman suurin lannoitteiden viejä. Siksi suuri osa maailman elintarviketuotannosta on nyt vaakalaudalla. Venäjää vastaan asetetut pakotteet lopettivat viennin Eurooppaan ja USA:han. Siksi uusia ratkaisuja lannoitepulaan tarvitaan. Suomen ja EU:n lannoitelainsäädännössä on tapahtunut muutoksia vuonna 2022. Nämä muutokset mahdollistivat sisämarkkinat orgaanisille ja sivuvirtapohjaisille lannoitteille. Tämä on helpottanut niiden tuotantoa ja myyntiä. Sanotaan, että orgaanisesta jättemateriaalista koostuvat lannoitteet voisivat korvata 30 % neitseellisistä mineraalilannoitteista. (UPM 2022)

2.1. Lannoitelainsäädäntö

Suomen poikkeuksellisen happamat maaperä- ja vesistöolosuhteet edellyttävät maaperän ja ympäristöriskien erityistä hallintaa ja vähentämistä. Suomessa lannoitevalmisteiden käyttöä säädelään lannoitelainsäädännöllä. Lannoitteiden lainsäädäntö kuuluu Maa- ja metsätalousministeriön alaisuuteen ja lainsäädäntöä valvoo Ruokavirasto (Maa- ja metsätalousministeriö).

Yksi Suomen lainsäädännön tavoitteista on, että markkinoille tulevat lannoitevalmisteet ovat turvallisia, hyvälaatuisia ja kasvintuotantoon sopivia. Lain tarkoituksena on myös edistää sivuvirroista peräisin olevien lannoitetuotteiden hyötykäyttöä. Sillä ehdolla, että ne eivät aiheuta vaaraa tai haittaa ihmisten, eläinten tai kasvien terveydelle, eivätkä ympäristölle, sekä että ne vaikuttavat positiivisesti kasvien kasvuun. (Maa- ja metsätalousministeriö).

Siirtymäkauden lainsäädäntö

EU:n ja Suomen lannoitelainsäädäntö ovat uudistuneet hankkeen aikana. Aiemman lainsäädännön mukaisia tyyppinimiluettelon ja EY-lannoiteasetuksen mukaisia tuotteita voi valmistaa kansallisina tuotteina 31.12.2023 saakka ja niitä voi saattaa markkinoille 31.12.2024 saakka. (Ruokavirasto 7).

Aiemman lainsäädännön mukaan Ruokavirasto piti yllä lannoitevalmisteista tyyppinimiluetteloa. Lannoitevalmisteen tyyppinimellä pyrittiin kuvaamaan lannoitteen ominaisuuksia, kuten koostumusta, käyttötarkoitusta tai valmistusmenetelmää. Lannoitteen tyyppinimi oli valvonnan kannalta tärkeä tieto, jotta voitiin valita tuotteelle soveltuvat valvonta-analyysit. Tyyppinimiluettelossa oli tyyppinimen yhteydessä kuvaus lannoitteen ominaisuuksista, valmistusmenetelmästä, ravinnepitoisuuksista, sille asetetuista laatuvaatimuksista ja mahdollisista rajoituksista (Taulukko 1). Lannoitevalmisteista, joita haluttiin saattaa markkinoille, valmistaa tai tuoda maahan, täytyi löytyä tyyppinimi kansallisesta tyyppinimiluettelosta tai EY-asetuksen mukaisesta lannoitetyyppien luettelosta. (Ruokavirasto 4)

Taulukko1. Ruokaviraston mukaiset tyyppinimet, joissa puhdistamolietettä, mädätysjäännöstä, kuitulietettä tai muita teollisuuden sivutuotteita. Tarkempi tyyppinimiluettelo löytyy Ruokaviraston sivuilta. (Ruokavirasto 5)

1 LANNOITTEET

1A EPÄORGAANISET LANNOITTEET

1A3 Epäorgaaniset sivuravinnelannoitteet

Nro	Tyyppinimi
1	Sivuravinnelannoite
2	Sivuravinneliuos

3 MAANPARANNUSAINEET

3A2 Orgaaniset maanparannusaineet

1	Maanparannuskomposti
3	Tuorekomposti
5	Kuivarae tai -jauhe
6	Hapotettu ja stabiloitu puhdistamoliete
7	Maanparannuslahote
8	Parannettu kuituliete
9	Vanhennettu puhdistamoliete

3A5 Maanparannusaineena sellaisenaan käytettävät sivutuotteet

1	Kalkkistabiloitu puhdistamoliete
2	Mädätysjäännös
3	Lahotettu puhdistamoliete
4	Kuituliete
7	Kemiallisesti hapetettu puhdistamoliete

5A2 Seosmullat

2	Kompostimulta
---	---------------

EU-lannoitevalmisteasetus

EU-lannoitevalmisteasetus (2019/1009) tuli voimaan 14.7.2019 ja sen soveltaminen CE-merkittyjen lannoitevalmisteiden valmistuksessa ja markkinoinnissa alkoi 16.7.2022. Asetuksen tarkoituksena on yhdenmukaistaa EU:n alueella markkinoitavien lannoitevalmisteiden valmistus- ja laatuvaatimukset. Lannoitevalmisteet jaetaan asetuksessa toimintaperusteisiin tuoteluokkiin (PFC) ja sallitut raaka-aineet määritellään ainesosaluokissa (CMC). (Ruokavirasto 8)

Lannoitelaki ja kansalliset asetukset

Lannoitelaki (711/2022) on kumonnut lannoitevalmistelain (539/2006), jossa säädettiin lannoitevalmisteiden tyyppinimistä. Lannoitelaisissa annettujen siirtymäsäännösten mukaisesti voi

lannoitevalmisteita, joiden tyyppinimi on kansallisessa tyyppinimiluettelossa tai EY-asetuksen lannoitetyyppien luettelossa, valmistaa kansallisina tuotteina 31.12.2023 saakka. Lisäksi niiden saattaminen markkinoille on sallittua 31.12.2024 saakka. (Ruokavirasto 10)

Lannoitelaki määrää lannoitevalmisteiden ja niiden ainesosien valmistamisesta, markkinoille viemisestä, käytöstä, varastoinnista, kuljetuksesta, tuonnista ja viennistä (Ruokavirasto 9). Lannoitevalmisteiden tulee koostua ainesosista, jotka täyttävät kansallisen lainsäädännön mukaisen ainesosaluokan tai EU:n lannoitevalmistusasetuksen mukaisen ainesosaluokan (CMC) laatu- ja käsittelyvaatimukset (Ruokavirasto 11).

Jos toimijan tarkoituksena on markkinoida lannoitevalmisteita vain Suomessa, voi se myös jatkossa valmistaa lannoitevalmisteita kansallisen lannoitelainsäädännön vaatimusten mukaisesti. CE-merkintää voi käyttää kuitenkin vain niissä tuotteissa, jotka täyttävät EU-asetuksen vaatimukset. (Ruokavirasto).

Jäte- ja sivutuotejakeiden soveltuvuus lannoitevalmisteeiksi

Lannoitevalmisteiden valmistusta ja käyttöä säätelee lannoitelaki. Lannoitevalmisteeiksi soveltuu tuote, joka sisältää ravinteita siinä määrin, että niistä on hyötyä kasvien kasvulle tai sen muut ominaisuudet parantavat merkittävästi kasvien kasvua tai kasvuolosuhteita. Tuotteen ei pidä aiheuttaa haittaa ympäristölle, kasveille, eläimille tai ihmisille. Lannoitevalmisteeiksi soveltuvuuden arvioinnissa on mietittävä mitä hyötyä sen käytöstä on kasvien kasvulle ja mitä haitallisia ominaisuuksia sillä voi olla. (Ruokavirasto 12)

Lannoitelakiin on kirjattu yleisellä tasolla lannoitevalmisteita koskevat vaatimukset. Tuotekohtaiset käsittelyvaatimukset sekä raja-arvot muun muassa haitallisille metalleille ja vaatimukset tuotteen hygienialle on annettu maa- ja metsätalousministeriön asetuksessa 24/11. (Ruokavirasto 12)

Jätteet ja sivutuotteet lannoitevalmisteenä

Lannoitevalmisteenä voidaan käyttää teollisuuden sivutuotteita ja jätteitä, muun muassa puun ja turpeen polton tuchia, teollisuuden jäte- ja sivutuotekalkkeja, jätevedenpuhdistamoiden lietteitä sekä elintarviketeollisuuden sivutuote- ja jätejakeita. Jättemateriaalin käyttö lannoitevalmisteenä ei tarkoita, että se on luokiteltu sivutuotteena ympäristöluvassa. Kuitenkaan käyttö lannoitevalmisteenä ei poista jätteiden jätetästatusta. Joskus sivutuotteet on käsiteltävä ennen lannoitekäyttöä. Tyypillisiä käsittelymenetelmiä ovat seulonta, hygienisointi ja stabilointi. (Ruokavirasto 12)

Struviitti

EU-asetuksessa ainesosaluokka 12 saostetut fosfaattisuolat eli struviitti, eli mm. yhdyskuntajäteveden käsittelylaitosten jätevedet ja liete sisältyy tähän sekä erilliskerätty biojäte. Ainesosaluokkaa koskee prosessivaatimuksia ja puhtausvaatimuksia. Orgaanisen hiilen pitoisuus on maksimissaan 3 % kuiva-ainesta, jolla pyritään minimoimaan haitta-aineita, ja fosforipitoisuus minimissään 7 %. (Berlin 2023)

2.2. Kasvien ravinnetarpeet

Kasvien perustarpeita ovat vesi, ravinteet, auringon valo, hiilidioksidi sekä sopiva lämpötila. Kasvien ravinnetarpeet ja pellon ravinnetila ovat lannoituksen lähtökohta. On havaittu, että kasvit tarvitsevat 16 eri ravinnetta, joista jokaisella on kasvissa ainakin yksi tehtävä, joita muut ravinteet eivät voi korvata. Kasvien pääravinteisiin kuuluvat typpi, fosfori, rikki, kalium, kalsium ja magnesium. Kasvit tarvitsevat näitä ravinteita runsaasti, jotta ne kasvaisivat normaalisti. Kasvit tarvitsevat myös muita ravinteita. Mikroravinteet ovat kasveille tärkeitä jossain elinkaaren aikana tai ne tarvitsevat niitä vähän. Mikroravinteisiin kuuluvat: rauta,

mangaani, kupari, sinkki, molybdeeni, boori ja kloori. (Järvi et al. 2016 Leppämäki 2019 mukaan) Tässä kappaleessa keskitymme tärkeimpiin pääravinneaineisiin fosforiin, typpeen, kaliumiin ja magnesiumiin.

Puhdistamolietepohjaisten lannoitevalmisteiden tuoteselosteissa ilmoitetaan yleensä vain pääravinteet (fosfori, typpi ja kalium), sekä haitallisten metallien pitoisuudet. Yleensä käsittelemättömän lietteen pH on neutraali (7–8). (ProAgria 2013)

2.2.1. Fosfori

Energia-aineenvaihdunnassa fosfori on oleellinen. Se on osa solujen energianlähdettä ATP:tä, eli adenosinitrifosfaattia. ATP hajoaa soluissa luovuttaen energiaa kasvin käyttöön. (Farmit b 2009)

Fosfori sidotaan lietteeseen jätevedenpuhdistamolla rauta- ja alumiinisuolojen avulla. Fosforin liukoisuus ja käyttökelpoisuus mädätysjäännöksessä riippuu käytetystä saostusmenetelmästä sekä suolojen käyttömäärästä. Fosforin määrä ei käsittelyssä muutu. Vain pieni osa, alle 1 % puhdistamolietteen kokonaisfosforista on vesiliukoista fosforia. Maaperässä rauta- ja alumiinisuloihin sidotun fosforin käyttökelpoisuus kasveille paranee vuosien saatossa. (ProAgria 2013) Fosfori säilyy kivennäismaassa hyvin sekä orgaaniseen ainekseen että maahankin sitoutuneena. Turvemaassa fosfori pysyy heikosti. (Haavisto et al. 2020)

2.2.2. Typpi

Typpi on ravinne, jota tarvitaan määrällisesti kaikista ravinteista eniten. Kasvit ottavat maasta typpeä sekä ammonium- (NH_4^+) että nitraattimuodossa (NO_3^-). Suurin osa tyydestä kuluu valkuaisaineiden muodostamiseen. Kasvit tarvitsevat riittävästi typpeä koko kasvukauden, koska aminohappoja rakentuu kasvilla koko ajan. Kasvin yhteyttäminen tapahtuu lehtivihreässä, ja typpi on tärkeä osa lehtivihreää. (Yara)

Mädätyksessä orgaaninen typpi muuttuu helposti haihtuvaan ammonium-muotoon. Mädätyksessä myös lietteen pH yleensä nousee. Lietemateriaalin terminen kuivaus, kuten infrapunakuivaus, voi haihduttaa ammoniumtyppeä paljon. Mädätysjäännösten orgaaniseen ainekseen sitoutunut typpi on yleensä hyvin hitaasti vapautuvaa, koska helposti haihtunut typpi on jo poistunut. (ProAgria 2013) Biokaasulaitosten mädätysjäännöksiä voi käyttää maanparannusaineina joko sellaisenaan tai mineraalilannoitteiden kera. Ne toimivat hyvin lannoituksen perustana fosforin suhteen. Mädätysjäännöksissä on liukoista typpeä, joka on heti kasvien käytettävissä. Koska typpeä tarvitaan myös kasvin korren kasvattamiseen, voi typpeä olla tarpeen antaa enemmän kuin pellolta viedään pois. Typpi säilyy peltomaassa vain orgaaniseen aineeseen sitoutuneena. (Haavisto et al. 2020) Typen kierto lannoitteissa on tärkeää, koska typpeä otetaan ilmakehästä lannoitteeksi erittäin energiantensiivisellä tavalla.

2.2.3. Kalium

Kalium liikkuu hyvin sekä kasvilla että maassa. Kasvilla se vaikuttaa laaja-alaisesti kasvuun ja kehitykseen. Kaliumilla on ravinteista tärkein merkitys solunesteen osmoottisen potentiaalin säätelyssä. Solujen suolasatasapaino vaikuttaa veden ja ravinteiden kuljetukseen kasvilla. Jos kaliumista on puutetta, sokereiden kuljetus kasvin sisällä häiriintyy. Kaliumin puute näkyy tällöin kasvin heikentyneenä kasvuna. Kalium on välttämätön ravinne valkuaisaineiden muodostumisessa. (Yara 2)

Kaikki kaliumyhdisteet ovat hyvin helposti veteen liukenevia. Vesistöjen rehevöitymisen kannalta kaliumilla ei ole merkitystä. (RIL 2004)

2.2.4. Magnesium

Magnesiumin tärkein tehtävä on toimia lehtivihreämolekyylien keskusatomina. Sen ympärillä on neljä typpiä. Sillä on tärkeä merkitys yhteyttämisessä. Klorofyllin eli lehtivihreän lisäksi kasvissa esiintyy mm. siemenissä fytiniä eli siemenen vararavintoa, joissa on magnesiumia. Magnesium toimii useiden eri entsyymien aktivaattorina, se on mukana fosforylaatioissa, jossa muodostuu ATP-yhdisteitä, ja se osallistuu valkuaisaineiden, hiilihydraattien ja rasvojen muodostumiseen ja niiden kulkeutumiseen kasvin eri osiin. Magnesium toimii myös kasvin suola-vesitasapainon säätelijänä, ja on mukana RNA-synteesissä. (Farmit 2009)

2.2.5. Ravinteiden tarve maanviljelyksessä

Puhtaan magnesiumin tarve viljapellolle on noin 20 kg/ha (Rinta-Harri 2022). Typen tarve pellolle on noin 120 kg±50 kg/ha. Typpi on kasveille tärkein eri alkuaineista. Nitraattityppi on vesiliukoinen, joka liukenee myös helposti järviin. Ammoniumtyppi on pitkävaikutteisempi typpi, joka liukenee heikommin. Nitraatti- ja ammoniumtyppi yhdessä muodostavat kokonaistypen. Typpi ohjaa tonn määrän hehtaarille ja magnesiumia lisätään suhteessa siihen. Maanviljelijät käyttävät pellon lannoittamiseen ainakin kahta eri kalkkia: kalsiittipohjaista kalkkia, jossa ei ole magnesiumia tai dolomiittikalkkia, jossa on magnesiumia. Magnesiumilla rikastettua kierrätysravinnetta käytettäessä kalkkilannoitus voitaisiin hoitaa edullisemmalla kalsiittipohjaisella kalkilla. (Perko 2022, Käytännön maamies 2020)

Kasvin tarve eri ravinteille vaihtelee kasvilajeittain ja alueittain. Taulukossa 2 on kuvattu eri kasvien sadon mukana poistuva ravinnemäärä perunalle, vehnälle, ohralle, kauralle sekä rypsilä ja rapsille kilogrammaa/satotonni. Typeä otetaan maasta selvästi eniten, toiseksi eniten kaliumia, kolmanneksi eniten fosforia ja näistä neljästä vähiten rikkiä.

Taulukko 2. Kuinka paljon sato laskennallisesti ottaa ravinteita eri kasveilla. (Koskela 2022) Näistä ohra ja kaura ovat myös rehuviljoja.

Kasvi	Sadossa poistuva ravinnemäärä, kg/satotonni			
	Typpi (N)	Fosfori (P)	Kalium (K)	Rikki (S)
Peruna	3,3	0,5	4,8	0,4
Vehnä	17,2	3,9	4,3	1,4
Ohra	17,3	3,5	5,2	1,2
Kaura	18,2	3,4	5,2	1,4
Rypsi ja rapsi	34,6	8,6	8,3	2,6

Satakunnan alueen maaperän ravinteisuus verrattuna koko maan ravinteisuuteen on kuvattu taulukossa 3. Magnesiumia on hieman vähemmän kuin Suomessa keskimäärin, fosforia on hieman enemmän, rikkiä suurin piirtein saman verran, kalsiumia, kaliumia, mangaania ja natriumia vähän vähemmän.

Taulukko3. Maan keskimääräinen ravinteisuus Satakunnan alueella ja koko maassa keskimäärin vuosina 2011–2015 (mg/l) (Tuloslaari)

	Magnesium	Fosfori	Rikki	Kalsium	Kalium	Mangaani	Natrium
Satakunnassa keskimäärin	225	15	17	1727	144	28	23
Koko maassa keskimäärin	254	11	16	1758	148	32	29

Ruokaviraston mukaan fosforilannoituksen enimmäismäärät ovat viljoille 0–34 kg/ha/v riippuen viljavuusluokasta, ja nurmelle 5–46 kg/ha/v. Typpilannoituksen enimmäismäärät ovat viljoille 20–240 kg/ha/v riippuen siitä korjataan yksi vai kolme satoa ja nurmille 60–120 kg/ha/v. Luvut riippuvat paljolti myös maatyypistä. (Ruokavirasto3) Pääsääntönä on myös sanottu, että pääravinteita (typpi, fosfori, kalium) kasvit tarvitsevat 10–300 kg/ha/v, sivuravinteita (rikki, kalsium, magnesium) 1–50 kg/ha/v ja hivenravinteita (mangaani, sinkki, kupari, boori, rauta, kloori, molybdeeni) 0,01–1 kg/ha/v (Yara 3).

2.3. Ravinteiden jakautuminen ja kierrätyslannoitteiden käyttö Satakunnassa

Satakunta on väkiluvultaan Suomen seitsemänneksi suurin maakunta. Sen pinta-ala on 8412 km², josta pelto-pinta-alaa 1 400 km². Vuonna 2022 peltopinta-alasta 63 % oli viljoja, 18 % nurmella ja 7 % kesannolla. (Luke 2022) Alkutuotannosta parhaiten Satakunnassa ovat pärjänneet maito- ja broileritilat sekä kasvihuoneviljely. Satakunta tuottaa runsaasti siipikarjaa, sianlihaa, avomaan vihanneksia ja juureksia sekä kasvatettuja sieniä (Ruokatieto). Suomessa kotieläintuotanto onkin keskittynyt pitkälti lounais- ja länsirannikolle sekä Pohjois-Savoon.

Peltomaan fosfori jakautuu Suomessa epätasaisesti. Satakunnassa, jossa on paljon maanviljelystä ja karjankasvatusta, on fosforia Suomessa toiseksi eniten, vain Ahvenanmaalla on peltomaassa enemmän fosforia (Lemola et al. 2018). Kierrätyslannoitteiden prosessointi ja kuivaus helpottaisi käsittelyä ja kustannuksia, jolloin niitä voitaisiin kuljettaa helpommin Satakunnan alueen ulkopuolelle.

Satakunta kuuluu Lounais-Suomen maatalousalueeseen, jolta tulee kuormitusta Itämereen. Sustainable Biogas -hankkeessa on kartoitettu Lounais-Suomen alueen ravinteiden jakautumista. Satakunnan ja Varsinais-Suomen alueen merkittävimpiä ravinnelähteitä ovat runsaan 9 miljoonan tuotantoeläimen lannat ja maatalouden kasvijätteet. Myös lähes 700 000 asukkaan jätevesissä on paljon ravinteita. Nämä ja muut alueen biomassat ovat noin 28 300 tonnin typpilähde vuodessa ja 5 700 tonnin fosforilähde vuodessa. Fosforin määrästä yhdyskuntalietteet muodostavat 6 % ja tyypestä 3 %, teollisuuden orgaaniset jätteet fosforista 4 % ja tyypestä 4 %, maatalouden kasvijätteet fosforista 14 % ja tyypestä 16 %. Alueella syntyy kasvien fosforitarpeeseen perustuvan laskentatavan mukaan 2500 fosforitonniin ylijäämää. Ravinneylijäämä pitäisi ohjata niille alueille, joilla ravinteet voidaan hyödyntää ja käyttää kestävästi, jolloin ylimääräisten ravinteiden huuhtoutumisesta vesistöön voitaisiin päästä eroon. (John Nurmisen Säätiö 2021)

Satakunnan alueella satovaste perunalle, porkkanalle ja sokerijuurikkaalle saadaan fosforilannoituksella 20 kg/ha/vuosi. Kasvien fosforitarpeeseen perustuvan laskentatavan mukaan Satakunnan alueella sijaitseville peltoalueille tarvitaan 999 tonnia fosforia vuodessa. Satakunnan alueella syntyy 1832 tonnia fosforia vuodessa, suurimpana lähteenä tuotantoeläinten lanta. Alueella 78,3 % fosforista muodostuu tuotantoeläinten lannasta, 13,8 % maatalouden kasvijätteistä, 4,5 % teollisuuden orgaanisista jätteistä, 2,3 % yhdyskuntalietteistä, 0,9 % kotitalouksien biojätteistä ja 0,3 % suojavyöhykkeiltä ja luonnonhoitopelloilta. Satakunnan alueella syntyy kasvien fosforitarpeeseen perustuvan laskentatavan mukaan noin 831 tonnia enemmän fosforia kuin alueen pelloille olisi tarve levittää. (Köngäs & Liljendahl 2021)

Lannasta ja kierrätysravinteita sisältävistä lannoitevalmisteista on peräisin 65 % maatalouden fosforilannoituksesta ja 35 % maatalouden typpilannoituksesta, loput ovat epäorgaanisia lannoitteita. Kierrätysravinteita sisältävät lannoitevalmisteet muodostavat 5,3 % maatalouden kaikista lannoitevalmisteista. (Marttinen et al. 2017)

Vuonna 2021 Suomessa oli 79 biokaasulaitosta, joista biojätteen ja lietteen yhteiskäsittelylaitoksia 26 ja lietemädättämoitä 19. Pääosa nykyisistä lietemädättämoistä sijaitsee Etelä- ja Lounais-Suomessa. Pohjoisimmat lietemädättämöt sijaitsevat Kokkolassa ja Kuopiossa. (Suomen Biokierto ja Biokaasu ry) Oikea levitysaika, parhaiten soveltuva levityskalusto ja ammattitaitoinen levittäjä ovat yhtä tärkeitä asioita lietteen käytössä kuin oikea ravinnemäärä. Typpihävikin välttäminen, tasainen levitys ja pellon tiivistymisen minimointi ovat tärkeimpiä huomioitavia asioita levitystä suunniteltaessa. (ProAgria Länsi-Suomi 2020)

2.4. Kierrätyslannoitevalmisteet

Kierrätyslannoitevalmisteet ovat erilaisista sivuvirroista prosessoituja lannoitevalmisteita. Niitä on ravinnesisällöltään mineraalilannoitteiden tapaisia ja orgaanista ainesta sisältäviä maanparannusaineita. Kierrätyslannoitevalmisteiden avulla fosfori, typpi, sekä orgaaninen aines on mahdollista kierrättää. Keskeisimpiä materiaaleja kierrätyslannoitevalmisteissa ovat kotieläintuotannon lannat, yhdyskuntien ja teollisuuden erilliskerätyt biojätteet ja puhdistamolietteet, sekä metsäteollisuuden tuhkat ja lietteet. Puhdistamolietteiden ja mineraalityppilannoitteiden käyttö kierrätyslannoitevalmisteessa estää valmisteen luomukelpoisuuden. Kierrätyslannoitevalmisteita on lietemäisiä, kuivalantamaisia, nestemäisiä, kuonia ja kiteitä, tuhkia ja biohiiliä, sekä pellettejä ja rakeita. Kierrätyslannoitevalmisteilla on usein myös tarve erilaisille varastoinnin, kuljetuksen ja levityksen ratkaisuille verrattuna mineraalilannoitteisiin. Mitä laimeampi tuote on ja mitä suurempi sen massa, sitä lähempänä tulisi valmistajan ja loppukäyttäjän sijaita. (Seppänen et al. 2019)



Kuva2. Kierrätyslannoitevalmisteiden raaka-aineet ja käyttökohteet (Seppänen et al. 2019)

Myös maatalouden kasvibiomassoista olisi mahdollista saada ravinteita kerton. Niitä voitaisiin prosessoida osana lannoitevalmisteita tuottavien laitosten syöteseosta, erityisesti biokaasulaitoksilla. (Tampio et al. 2022)

Kierrätyslannoitteiden käytöllä voidaan vähentää ruoantuotannon tai viher- ja ympäristörakentamisen ympäristövaikutuksia sekä riippuvuutta mineraalilannoitteista. Kierrätyslannoitteiden hiilijalanjälki on pienempi kuin mineraalilannoitteilla. Biomassojen prosessoinnilla kierrätyslannoitteiksi voidaan edistää ravinteiden kuljetettavuutta ravinneköyhille alueille. (Suomen Biokierto ja Biokaasu ry)

Vuosittain muodostuu noin 20 miljoonaa tonnia erilaisia biohajoavia materiaaleja, joista kotieläinten lantaa 13 miljoonaa tonnia ja yhdyskuntien jätevesilietteitä 4,7 miljoonaa tonnia, sekä biojätteitä ja elintarviketeollisuuden jätelajeita, joista on mahdollista jalostaa kierrätyslannoitteita. Verrattuna mineraalilannoitteisiin, erityisesti muiden biomassojen kuin lannan sisältämä typpimäärä on pieni. (Luke Tampio et al. 2022 mukaan)

Kierrätyslannoitetuotteet voidaan levittää pelloille pitkälti perinteisellä lannanlevityskalustolla. Jotta ravinteet tulevat käyttöön tehokkaasti, lannoite kannattaa levittää kasvavaan kasvustoon, jossa ravinteiden otto on käynnissä. Siksi kevät ja kesä ovat parempia lannanlevitysaikoja kuin syksy. Kevätlevityksessä ennen kylvöä on riski ravinnehuuhtoutumille, jos sateet huuhtovat ravinteita kasvittomalta pellon pinnalta. Typen haihtumisen välttämiseksi paras levityssää on tyyni ja viileä. Helteinen ja kuuma ilma lisäävät ammoniakkin haihtumisen riskiä. Lanta on mullattava täydentävien ehtojen vaatimusten mukaisesti vuorokauden sisällä levityksestä, jos sitä ei ole sijoitettu kasvustoon. Kalteville lohkoille lanta on mullattava kahdentoista tunnin sisällä. (ProAgria Länsi-Suomi 2020)

Letkulevitys on levitystapa, jossa liete levitetään pellon pintaan letkuista valuttamalla. Siinä käytetään traktoria ja lietevaunua tai pumpataan letkulla lietettä säiliöstä. Jälkimmäistä kutsutaan vetoletkulevitykseksi. (RE-tilan materiaali)

Hajalevityksessä liete levitetään pellon pintaan. Levitysjälki on epätasainen ja ravinteet hukkaantuvat helposti. Muut levitystavat ovat ravinteiden hyödyntämisen kannalta parempia. (RE-tilan materiaali)

Kuivalannan levitys on niin sanottua pintalevitystä. Lanta levitetään levitysvaunun riippuen tekniikasta joko ruuvien tai lautasten avulla. Tekniikka sopii kuiville jakeille. Uusimmat kuivalannan levitykseen suunnitellut vaunut ovat tarkkoja, ja levitys käy nopeasti ja tasaisesti. Ne punnitsevat kuorman, näyttävät ajolinjat ja säätelevät levitettävää määrää annettujen arvojen mukaan. (RE-tilan materiaali)

2.4.1. Puhdistamolietepohjainen kierrätyslannoite

Puhdistamolietepohjaista kierrätyslannoitetta voidaan käyttää viljan, sokerijuurikkaan, tärkkelysperunan sekä öljykasvien viljelyssä. Puhdistamolietteiden käytön varoaika on viisi vuotta. Sinä aikana pellolla ei saa viljellä muita tuotteita. Mahdollisten haitta-aineiden vuoksi leipäviljan ostaneet ovat rajoittaneet/kieltäneet puhdistamolietepohjaisen lannoitteen käytön sopimusviljelijöillään. Niiden käytöllä on elintarviketeollisuudessa imago-ongelma ja ihmisten asenteet voivat olla lietteen käyttöä vastaan. Asian muutos vaatii asenteiden muutosta ja lisää tietoa. (Haavisto 2018) Satakunnassa ainakin on viljelijöitä, jotka suhtautuvat positiivisesti mädätysjännöksen käyttöön. Jos puhdistamolietettä on kuitenkin alle 10 %, saa lannoitetta käyttää kaikkeen viljelyyn (ProAgria 2013).

Puhdistamolietteissa on vuositason biomassaa hyödynnettäväksi 4 720 000 t, fosforia 4 500 t, typpeä 8 300 t ja liukoista typpeä 1 800 t (Luke Tampio et al. 2022 mukaan). Puhdistamolietteet ovat lannan jälkeen suurin kierrätettävän fosforin lähde. Kierrätettävän fosforin osuutta tulisi lisätä, jotta voidaan vähentää neitseellisen fosforin louhimista ja parantaa ravinteiden huoltovarmuutta. (Haavisto 2018) Kierrätyslannoitteissa on myös orgaanista ainesta, joka parantaa maaperän mururakennetta sekä veden ja fosforin pidätkykyä ja vähentää fosforin valumista vesistöön.

Kaikki kierrätettävissä oleva materiaali tulee saada uudelleenkäyttöön, eikä polttoon. Siten myös puhdistamolietteiden sisältämät ravinteet ja orgaaninen aines on hyödynnettävä maanparannusaineena. Jos tämä toteutetaan biokaasulaitosten kautta, myös biohajoamisen tuottama energia saadaan talteen. (Haavisto 2018)

Jäteveden puhdistuksessa typpeä vapautuu aktiivilieteprosessissa ilmaan, vain alle kymmenesosa puhdistamoille tulevasta typestä päättyy lietteen ja lietteenkäsittelyn kautta viherrakentamiseen ja maatalouteen (Lehtoranta et al. 2021). Osa typestä kuitenkin kiertää puhdistamoille takaisin lietteen kuivauksessa erotettavana rejektivetenä ennen lietteen käsittelyä tai mädätyksen jälkeen (Tampio et al. 2022).

Sellaisia kierrätyslannoitustuotteita, jotka sisältävät puhdistamolietettä on jo olemassa. Lakeuden Etappi tuottaa Ranu-nimistä maanparannusraetta erilliskerätystä ja teollisesta biojätteestä ja puhdistamolietteestä. Prosessi tapahtuu termisesti kuivaamalla ja hygienisoimalla kahteen otteeseen. Tuotteen haitta-ainejäämät ovat vähäisiä. Raskasmetallipitoisuudetkin alittavat lain asettamat raja-arvot. Kierrätyslannoitteen etuna on fosforin palaaminen takaisin maaperään. Silloin sitä ei tarvitse louhia maaperästä. Lannoite pysyy maaperässä, eikä kulkeudu sateiden mukana pois, ja tuo humusta pieneliöiden käyttöön. (Lakeuden Etappi) Myös Gasumin Turun biokaasulaitoksen konsentraatti sisältää puhdistamolietettä ja sitä käytetään maatalouden lannoitteena (Gasum 2).

2.4.2. Metsäteollisuuden ja elintarviketeollisuuden sivuvirrat

Satakunnassa on kaksi erilaista metsäteollisuuden keskittymää, Raumalla ja Eurassa, lähinnä sellu- ja paperiteollisuutta. Metsäteollisuus tuotti puusivutuotteita (sahanpuru, seulapuru, kuori, puumurskeet ja kutterinlastu) Satakunnassa vuonna 2019 1864 GWh. Tästä käytettiin Satakunnassa 1184 GWh eli noin 65 %. Sivutuotteita ohjautui eniten Pirkanmaalle, Varsinais-Suomeen ja Etelä-Pohjanmaalle. Sivutuotteista yli 90 % meni polttoon. Kuorta ohjautui kompostointiin tukiaineeksi, kutterinlastua ja sahanpurua eläinten kuivikkeeksi. Satakunnasta pois kuljetettu sivutuote meni lähinnä polttoon voimalaitoksiin, jonkun verran sahanpurua toimitettiin puupellettitehtaiden ja sellun raaka-aineeksi. (Satakuntaliitto 2020)

Selluntuotannon sivuvirrat ovat usein raaka-aineita muulle teollisuudelle. Sivuvirtana syntyy kuorta, kuorihiekkaa, lentotuhkaa, oksarejektia, bio-, kuitu- ja sekalietteitä, meesakalkkia, viherlipeäsakkaa ja soodasakkaa. Tuotannosta nykyisin syntyvät sivuvirrat hyödynnetään 100 %:sti. Lannoitekäyttöön Satakunnan alueen selluteollisuuden sivuvirroista menee nyt noin 55 000 tn/v, määrän ennakoidaan kasvavan. Massastabilointi on yleisesti käytetty ratkaisu hyödyntää vaikeasti kierrätettävät sivuvirrat ja jätteet. (Satakuntaliitto 2020)

Metsäteollisuuden sivuvirtaa puutuhkaa, voidaan käyttää metsälannoitteena ja maanrakennuksessa. Kalkkipitoisiin sivutuotteisiin sekoitettuna sitä voidaan käyttää maanparannusaineena. Kuorta käytetään energiantuotantoon. Hiekkaista kuorta taas voidaan käyttää maisemoinnissa tai kompostimullan tuotannossa. (Metsä Group)

Muun muassa Soilfood hyödyntää sivuvirtoja metsä-, elintarvike-, bio- ja kemianteollisuudesta lannoitteiden ja maanparannusaineiden raaka-aineeksi. Näitä käyttämällä sidotaan hiiltä ja ravinteita peltoon. Aiemmin teollisuuden sivuvirrat on poltettu ja viety kaatopaikalla. Näin on edelleen suurimmalla osalla teollisuuden sivuvirroista, joten käyttöpotentiaalia löytyy. (Sitra 2021)

Elintarviketeollisuudessa syntyy suuri määrä erilaisia biopohjaisia sivuvirtoja, joissa on paljon orgaanista ainesta ja ravinteita. Sivuvirroissa ei ole haitta-aineita. Sivuvirtoja syntyy meijereistä, viljateollisuudesta ja leipomoista, juomateollisuudesta, lihateollisuudesta, kalateollisuudesta, marja-, hedelmä-, kasvis- ja

vihannesteollisuudesta, margariinien, öljyjen ja majoneesien valmistuksessa, makeisten valmistuksessa, hyönteisteollisuudessa sekä lemmikkieläinten ruokateollisuudessa. (Satafood)

Satakunnassa syntyy runsaasti biomassoja, joita nykyään hyödynnetään vähän. Merkittävä osa huonosti hyödynnetyistä biomassoista on nurmibiomassaa, yli 35 000 tonnia vuodessa. Maataloudessa syntyy kasviperäisiä sivutuotteita melko paljon. Osa materiaalista kierrätetään korjuun yhteydessä takaisin peltoon. Maatalouden kasvijätteiden ravinteet saadaan varsin hyvin kiertoon. Kasviperäisiä biomassoja Satakunnan alueella käsitteleviä toimijoita ovat esim. sokeria tuottava Sucros ja perunaa jalostava Finnamyl. Sokeriteollisuuden sokerijuurikasleike kuivataan ja hyödynnetään eläinrehuna, ja jalostetaan nanoselluloosaksi. Perunateollisuuden sivutuotteissa otetaan perunaproteiineja talteen. Perunan kuitua on myös mahdollista erottaa. (Maijala et al. 2019)

2.4.4. Kierrätyslannoitevalmisteiden laatujärjestelmä

Kierrätyslannoitevalmisteille on tehty laatujärjestelmä, joka pohjautuu saksalaiseen järjestelmään, sekä eurooppalaiseen käsikirjaan. Sen tavoitteena on todentaa kierrätyspohjaisten lannoitevalmisteiden laatu, sekä lisätä toiminnan ja raaka-aineiden jäljitettävyyttä, ja raaka-aineketjun läpinäkyvyyttä. Se varmistaa, että loppukäyttäjä saa tiedon siitä, miten, missä ja millaisista raaka-aineista kierrätyslannoitevalmiste on valmistettu. Laatujärjestelmä huomioi lopputuotteen laadun, käytetyt raaka-aineet sekä tuotantoprosessin. Siitä vastaa Suomen Biokierto ja Biokaasu ry. Toimintaa valvotaan näytteenotoin: laitoksen oma henkilökunta ottaa näytteitä, sekä myös ulkoisia näytteenottajia käytetään. Kierrätyslannoitevalmisteiden laatujärjestelmään kuuluu tällä hetkellä tuote kuivarae, jota yksi tämänkin työn lopputulos edustaa. Laatujärjestelmässä seurataan nykyisen lainsäädännön mukaan rajoitettavia haitallisten metallien pitoisuuksia, hygieniaparametrejä, sekä lisäparametrejä. Seurattavia haitallisia metalleja vähintään neljä kertaa vuodessa ovat arseeni, elohopea, kadmium, kromi, kupari, lyijy, nikkeli ja sinkki. Laatujärjestelmässä seurataan seuraavia orgaanisia haitta-aineita: PAH (16), PCB, perfluoratut yhdisteet, lääkeaineita, palonestoaineet, kuluttajatuotteissa esiintyviä haitallisia yhdisteitä, dioksiinit, furaanit. Muita seurattavia laatuominaisuuksia ovat hygieenisuus (e.coli, salmonella), ravinteet (kokonaistyyppi, ammoniumtyyppi, nitraattityyppi, kokonaisfosfori, liukoinen fosfori, kalium), orgaaninen aines, roskaisuus ja epäpuhtaudet, pH, kosteus, tilavuuspaino ja johtokyky. (Laatulannoite 2021)

Potentiaali

2.4.5. Kierrätyslannoitteiden lannoituspotentiaali

Kierrätyslannoitteiden ravintosisältö voi riippuen lannoitetuotteesta olla huomattavasti väkilannoitetta pienempi. Tällöin kierrätyslannoitetta täytyy levittää pinta-alaa kohden moninkertainen määrä, mikä voi johtaa kuljetuksen, varastoinnin ja levityksen suurempiin ympäristövaikutuksiin. Venla Kytän Pro gradussa tutkittiin kierrätyslannoitteista mm. biokaasulaitoksen mädätysjäätännöstä verrattuna perinteiseen väkilannoitteeseen. Näiltä laskettiin elinkaaren aikana syntyneet päästöt kauratonnia kohden. Väkilannoitteen kasvihuonekaasupäästöt olivat yli kaksinkertaiset mädätysjäätännöksen kasvihuonekaasupäästöihin verrattuna. Energiaa väkilannoitteen valmistukseen, kuljetukseen, lannoitukseen ja sadon puintiin kului kolminkertaisesti mädätysjäätännöksen vastaaviin verrattuna. Mädätysjäätännöksen energiankulutus oli tutkituista lannoitteista pienin, koska se voidaan ajaa suoraan biokaasulaitokselta pellolle ilman käsittelyä. Kuitenkin lannoitteen levitysmäärä pinta-alaa kohden on suuri, joten kuljetuksen aiheuttamat päästöt ja energiankulutus on suurta. Pro gradun mukaan kierrätyslannoitteiden käytöllä saavutetaan siis pienemmät ympäristövaikutukset ja vähennetään uusiutumattomien luonnonvarojen käyttöä. (Kytä 2019).

Tutkimusten mukaan maan hiili sekä orgaaninen aines ovat vähentyneet suomalaisessa peltomaassa. Orgaaniset lannoitteet lisäävät ja vahvistavat maaperän eliöstöä ja sitä kautta parantavat maan

mururakennetta ja lisäävät vedenpidätyskykyä, sekä vähentävät eroosioriskiä (Eurofins 2020). Suurella osalla kierrätyslannoitteista on siis positiivinen vaikutus maamurujen kestävyys. Puhdistamolietepohjaisten kierrätyslannoitteiden haaste Suomessa on kasveille käyttökelpoisen liukoisin fosforin puute, koska fosforin saostuksessa yleisimmin käytetään rauta- ja alumiinikemikaaleja, jotka sitovat fosforin hyvin pysyväksi yhdisteeksi.

Orgaanisen lannoitteen sopiva hiili-typpitasapaino edistää maaperän pieneliöstön toimintaa, jolloin haitalliset mikrobit vähenevät. Tämä johtaa myös torjunta-aineiden käytön vähentämiseen. Orgaaninen aines myös edistää keväällä maan lämpenemistä, mikä nopeuttaa kasvuun lähtöä, minkä seurauksena myös sadon määrä kasvaa, kun aktiivinen kasvuaika pitenee. (Biopallo 2)

Kierrätyslannoitteiden päästöt ovat moninkertaisesti pienemmät kuin vastaavan määrän ravinteita sisältävien mineraalilannoitteiden tuotannon päästöt. Myöskään niiden hinta ei ole sidoksissa fossiilisen energian hintaan, kuten teollisilla lannoitteilla, vaan kierrätyslannoitteiden hintojen voidaan olettaa pysyvän vakaampina. Koska kierrätyslannoitteiden lannoitepotentiaali ei niin korkea kuin väkilannoitteilla, rikastaminen erilaisten sivuvirtojen kanssa toisi paremmin lannoitteen potentiaalia esiin, ei tarvitsisi laittaa erikseen montaa tuotetta maahan.

Mahdollisena haittapuolena kierrätyslannoitteilla voi olla sadon pieneneminen keinolannoitteisiin verrattuna, kun ravinnemäärät ovat pienemmät. Eri jalostustekniikoilla väkeväinti samoihin pitoisuuksiin on kuitenkin mahdollista (Seppänen et al. 2019).

2.5. Satakunnassa syntyvät ravinnerikkaat jätevesilietteet, mädätysjäännökset ja sivuvirrat

Satakunnan alueella on 17 toiminnassa olevaa jätevedenpuhdistamo. Osasta puhdistamoista lietteet viedään käsiteltäväksi suurempiin laitoksiin ja osalla on omat biokaasulaitoksensa. Satakunnan alueen puhdistamoiden fosforimäärä on 42 tonnia vuodessa ja typpimäärä 101 tonnia vuodessa. (Köngäs & Liljendahl 2021) UPM:n metsäteollisuuden ja Rauman yhdyskuntajätevesien lietteet poltetaan Rauman Biovoiman yhteistuotantolaitoksella.

Vuonna 2022 Satakunnassa oli 6 biokaasulaitosta; Envor Oy:n Porin laitos, Gasum Oy:n Honkajoen ja Huittisten laitokset, Säkylässä VSS Biopower Oy:n laitos ja Apetit Oy:n pieni laitos sekä Huittisissa sijaitseva maatilakokoluokan laitos Emomyly-tilalla.

Muita ravinnepitoisia jätevesiä ja lietteitä syntyy Satakunnan alueella mm. Apetit Sucrosin ja Finnamylin teollisuuslaitoksilta, sekä lietettä HKScan Euran teollisuuslaitokselta. Finnamylin tehtaalla syntyvät lietteet käytetään paikallisesti peltojen lannoituksessa, HKScanin lietteet johdetaan Loimi-Hämeen Jätehuollolle. (Köngäs & Liljendahl 2021).

Berner Chemicalsin Kokemäen tehtaalla syntyy sivuvirtana magnesiumkakkua noin 500 t / vuosi. Kakkua käytetään tällä hetkellä lannoitteena, mutta tehtaalla kasvaessa sitä syntyy koko ajan lisää ja mahdollisuuksia olisi muuallekin. Kakun magnesiumpitoisuus on 4 %. Toinen sivuvirta on tehtaalla yksi tuote: magnesiumpöly. Se menee kotimaan myyntiin. Pölyn magnesiumpitoisuus on vähintään 9,5 %.

3. Puhdistamopohjaiset lietteet

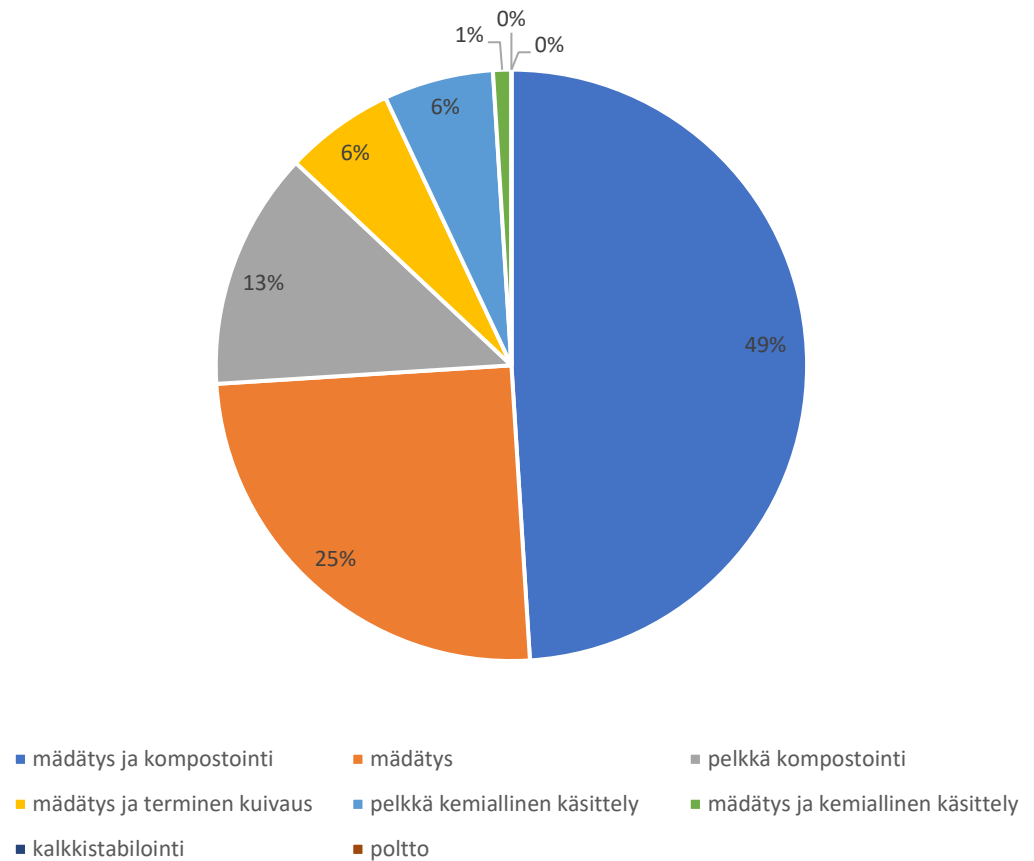
3.1. Jätevesilietteet

Jätevedenpuhdistamoilla jätevedestä poistetaan ravinteita ja orgaanista ainesta, jotta ne saataisiin talteen ravinnekiertoon ja ne eivät päätyisi kuormittamaan vesistöjä. Puhdistamoliete koostuu yleensä primääri-, sekundääri- ja tertiäärilietteestä. Primäärilietteen päätyy kaikki materiaali, mikä poistetaan jätevedestä välppäyksen ja hiekanerotuksen jälkeen. Jäteveden puhdistusprosessissa orgaanista ainesta poistuu sitoutumalla lietteeseen, kun mikrobit käyttävät sitä ravintonaan prosessin biologisessa osassa. Tätä kutsutaan sekundäärilietteeksi. Mikäli fosfori saostetaan kemiallisesti erikseen jälkisaostuksessa biologisen prosessin jälkeen, syntyy lisäksi tertiääriliete. Yleensä kaikki lietejakeet kerätään lietesäiliöön tai saostussäiliöön, jonka jälkeen puhdistamoliete lingotaan ja jatko käsitellään.

Suurin osa syntyvästä puhdistamolietteestä käsitellään kompostointi- tai biokaasulaitoksissa ja hyödynnetään viherrakentamisessa tai maatalouskäytössä. Puhdistamoliete käsitellään aina ennen maatalouskäyttöä ja ainoastaan käsiteltyä jätevesilietettä saa levittää pellolle (Ruokavirasto). Liete käsitellään biologisesti kompostoimalla tai mädättämällä, kemiallisesti kalkkistabiloimalla tai happo-vetyperoksidikäsittelyllä, tai fysikaalisesti kuumentamalla. Puhdistamolietteestä valmistetut lannoitevalmisteet ovat maanparannusaineita. Porin Luotsinmäen jätevedenpuhdistamossa, josta liete tulee mädätettäväksi Envorille, on käytössä ferrisulfaattia fosforinsaostukseen, sekä linkouksessa polymeeri. Siten tyyppi ja fosfori ovat sekä sitoutuneena orgaaniseen ainekseen ja rautayhdisteisiin että liukoissa muodossa. Kalium on liukoissa muodossa. (ProAgria 2013)

Puhdistamolietettä syntyy Suomessa noin miljoona kuutiota vuodessa. Teollisuus käsittelee yleensä jätevetensä, mutta osa niistä ohjautuu yhdyskuntien puhdistamoille. Elintarviketeollisuuden lietteet ohjataan kompostointi- tai biokaasulaitoksiin. (ProAgria 2013)

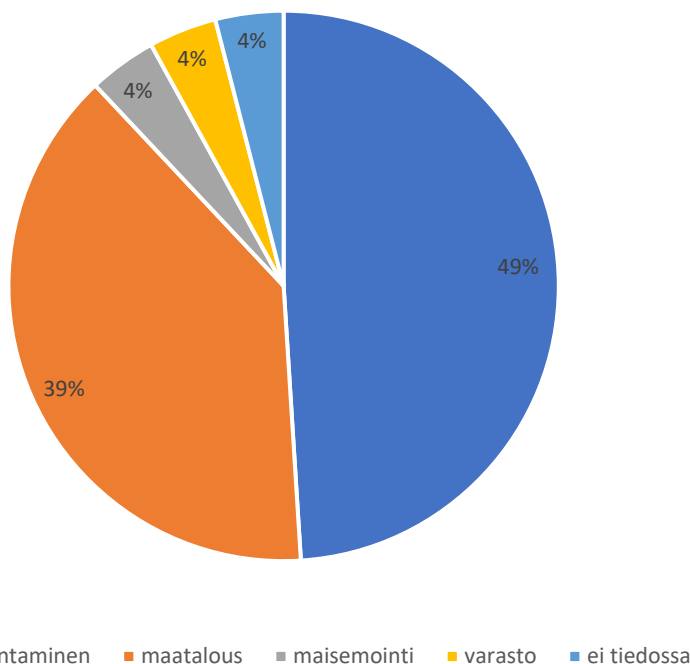
Lietteen käsittelymenetelmien osuudet lietteen kokonaismäärästä vuonna 2018 (Konola ja Toivikko 2019)



Kuva3. Lietteen käsittelymenetelmien osuudet lietteen kokonaismäärästä vuonna 2018 (Konola ja Toivikko 2019)

Vuonna 2018 Suomessa 6 % puhdistamolietteestä mädätettiin ja kuivattiin termisesti. Suurin osa lietteestä mädätettiin ja kompostoitui 49 %, ja toiseksi suurin osa pelkästään mädätettiin 25 % (Kuva3). Nyt puhdistamolietteistä 70 % käsitellään biokaasulaitoksissa (Toivikko 2023). Lietteestä 39 % hyödynnettiin maataloudessa ja 49 % viherrakentamisessa, sekä loput 12 % menivät maisemointiin, varastointiin ja ei-tiedossa olevaan loppusijoitukseen (Kuva4).

Lietteen hyötykäyttötapojen suhteelliset osuudet vuonna 2018
(Konola ja Toivikko 2019)



Kuva4. Lietteen hyötykäyttötapojen suhteelliset osuudet vuonna 2018 (Konola ja Toivikko 2019)

Puhdistamoliete sisältää runsaasti hyödyllisiä aineita, kuten fosforia ja typpeä. Satakunnan jätevedenpuhdistamoiden läpi kulkee noin 173 tonnia fosforia vuodessa. Tällä fosforimäärällä pystyttäisiin lannoittamaan lähes 20 % viljanviljelyyn käytetystä peltopinta-alasta Satakunnassa (Haavisto 2018). Typpeä tosin haihtuu typenpoistoon yleisesti käytettävässä nitrifikaatio-denitrifikaatioprosessissa. Jäljelle jäävä typpi on pääosin orgaanista typpeä, jonka on muututtava ammoniumtypiksi tai nitraatiksi, jotta kasvit voisivat sitä hyödyntää. Mädätys muuttaa jonkin verran orgaanista typpeä ammoniumtypiksi. (Marttinen et al. 2017)

3.1.1. Kemiallinen saostus

Yleisimmin fosfori saostetaan Suomessa kemiallisesti. Yleisimmät käytetyt saostuskemikaalit ovat rautapohjaiset ferro- ja ferrisulfaatti, sekä alumiinisulfaatti ja polyalumiinikloridi. Biologinen käsittely poistaa fosforista 20–40 %, suora saostus 75–90 %, esisaostus 85–95 %, rinnakkaissaostus 75–90 % ja jälkisaostus 90–98 %. Kemiallisessa saostuksessa muodostuva metallifosfaatti ei liukene veteen, eikä ole käyttökelpoinen kasveille. Rauta- ja alumiinipohjaiset saostuskemikaalit myös asettavat laitokselle tietyt turvallisuusvaatimukset. (RIL 2004)

3.1.2. BioP

Kemiallisessa saostuksessa rauta- tai alumiinisulfaattia lisätään, jotta se muodostaa fosforin kanssa niukkaliukoista sulfaattia. Maaperässä fosforin vapautuminen tästä sulfaattista kestää vuosikymmeniä. Huittisissa

ja Savonlinnassa on jätevesilaitoksilla kuitenkin käytössä osaratkaisuna biologisen fosforinpoiston (BioP)-menetelmä, missä fosfori saostetaan biologisesti. BioP:ssä aktiivilieteprosessiin lisätään anaerobinen vaihe, jolloin sopivilla olosuhteilla fosforia varastoivat organismit varastoivat kasvuunsa nähden ylimäärin fosforia polyfosfaatteina. (Lehtoranta et al. 2021)

Fosforia sitoutuu normaalisti mikrobien kasvussa, mutta siten poistuu vain noin 10–20 % fosforista. BioP:ssä fosforia varastoivat organismit (PAO) varastoivat kasvuunsa nähden ylimäärin fosforia polyfosfaattina. Poistuvan veden fosforipitoisuus voi BioP:n jälkeen olla jopa alle 0,1 mg/l. Fosfori poistetaan ylijäämalietteen mukana ja se vapautuu erilaisissa loppukäytöissä mikrobista helposti. (Halinen 2021)

BioP vaatii toimiakseen lämpimät olosuhteet ja helposti hajoavaa orgaanista ainesta sisältävän jäteveden suhteessa fosforin määrään. BioP:n ansiosta lietteen fosfori on liukoissa muodossa jopa 4–10-kertainen verrattuna fosforin saostamiseen kemiallisesti. Kemikaalien ja energian tarve on BioP-prosessissa vähäisempää kuin kemiallisessa saostuksessa. (Lehtoranta et al. 2021)

Huittisten jätevedenpuhdistamon prosessia ajetaan osan vuodesta BioP-prosessina, jolloin fosfori sitoutuu biologisesti jätevesilietteeseen puhdistamon biologisessa prosessissa ja kemikaalin käyttö vältetään ajoittain lähes kokonaan. Kun fosfori on sitoutunut lietteeseen biologisesti, se on paremmin erotettavissa ja hyödynnettävissä myöhemmässä vaiheessa esimerkiksi jatkojalostamalla lietteestä struviitti. BioP-prosessin aikana havaittiin puhdistamon tiivistämöllä fosforin vapautumista rejektiveteen viiveen seurauksena. Ilmiö on haitallinen, koska fosfori vapautuu rejektiveteen ja kulkeutuu eteenpäin prosessissa edelleen purkuveteen. Tällöin on lisättävä kemikaalia jälkisaostukseen, jolla varmistetaan laitokselta lähtevän purkuveden lupamääräysten mukainen fosforipitoisuus. Fosforin vapautumista voitaisiin kuitenkin hyödyntää laitoksella, mikäli se voitaisiin saostaa liukoissa muodossa suoraan tiivistämön rejektivedestä tai palautuslietteestä struviitiksi.

3.1.3. Vaihtoehtoiset fosforinsaostustavat

Fosforia saostetaan jätevedenpuhdistamoilla Suomessa perinteisesti rauta- ja alumiiniyhdisteillä. Niiden ongelmana kuitenkin on, että ne sitoutuvat lietteeseen tiukasti, eikä fosforia siten saa enää kasveille hyötykelpoiseen muotoon helposti.

Biopolymeerejä, kuten selluloosaa, kitiiniä, tanniinia, ligniiniä ja tärkkelystä, voidaan jalostaa ja käyttää vesien käsittelyssä saostuskemikaaleina. Ne ovat eliöiden tuottamia orgaanisia molekyylejä. Niiden raaka-aineita saadaan teollisuuden sivuvirroista (mm. metsäteollisuus, elintarviketeollisuus, vesiviljely). Niiden etuna on se, että ne ovat biohajoavia ja raskasmetallittomia. Niihin sitoutuneet ravinteet ovat helposti kasvien käytettävissä, eikä muodostunut liete sisällä raskasmetalleja, ja on siten hyvin kierrätettävää. Biopolymeerit eivät myöskään vaikuta veden pH:seen, kuten ferrisulfaatti vaikuttaa. Biopolymeerejä on sovellettu yhdyskunta- ja teollisuusjätevesien käsittelyssä, sekä kaivosvesien käsittelyssä.

Jos fosfori saostetaan magnesiumsulfaatilla tai -hydroksidilla, fosfori jää liukoisempaan muotoon ja liete on suoraan kelpoinen lannoitukseen ja kemikaalit myös turvallisia käyttää. Kirjallisuudessa (Liao et al. 1993) on sikalan jätevesillä saatu hyviä fosforin vähenemistuloksia magnesiumsulfaatilla, mutta silloin alkuperäinen fosforipitoisuus on ollut korkea 470 mg/l. Jätevedenpuhdistamoilla liukoisien fosforin pitoisuudet ovat huomattavasti matalampia.

3.2. Biokaasulaitoksen ravinnerikkaat jakeet

Biokaasulaitoksella puhdistamoliette mädätetään. Prosessissa bakteeritoiminta hajottaa eloperäisen aineksen sokereiksi, aminohapoiksi ja pitkäketjuisiksi rasvahapoiksi. Hajoamisketjun lopussa syntyy metaania ja hiilidioksidia sisältävää biokaasua ja ravinteikasta mädätysjäännöstä. Mädätys stabiloii ja hygienisoi lietteen. Yli puolet eloperäisestä aineksesta muuttuu biokaasuksi, mutta tilavuus ei juuri muutu. Esimerkiksi Envorin biokaasulaitoksella Porissa on käytössä termofiilinen prosessi, eli lämpötila on 50–55 Celcius-astetta.

Biokaasuprosessin jälkeen jäänyttä kiinteää ainesta kutsutaan mädätysjäännökseksi. Se johdetaan jälkimädätysreaktoriin sekä sen jälkeen varastosäiliöihin. Mädätysjäännos voidaan vielä lingota/separoida, jolloin siitä erotetaan kiinteä eli kuivajae ja nestemäinen osa eli rejektivesi. Kiinteää mädätysjäännöstä voidaan käyttää esimerkiksi peltolannoitteena. Rejektivettä voidaan käyttää uudelleen esimerkiksi seuraavan murskatun biojäte-erän liettämiseen. Rejektivesi sisältää runsaasti ravinteita, etenkin typpeä ja sitä voidaan prosessoida edelleen ja käyttää esim. lannoitteena. (Gasum)

Biokaasulaitoksen mädätysjäännöstä voidaan prosessoida termisillä menetelmillä kuivemmaksi, jolloin saadaan helpommin sekoitettua kuivana teollisuuden sivuvirtaa mädätysjäännökseen. Kuivattu ja sivuvirtaan sekoitettu mädätysjäännos on myös kustannustehokkainta maanviljelijän kannalta: sen voi levittää pellolle yhdellä kerralla. Pellolla liikkumista ja levitystä tulee välttää etenkin märissä olosuhteissa, koska ajo pelloille raskailla koneyhdistelmillä voi tiivistää maata (ProAgria 2013). Veden erottaminen vähentää myös kuljetuskustannuksia.

Mädätysjäännöksiä voi olla sekä puhdistamolietepohjaisia että ei-puhdistamopohjaisia. Mädätysjäännöksillä on maanparannusvaikutus, ne parantavat maan mururakennetta ja vedenpidätyskyky lisääntyy. Tulokset maan rakenteen paranemisesta näkyvät vasta tuotteiden pitkäaikaisessa käytössä yhdistettynä monipuoliseen viljelykiertoon. Mädätysjäännökset soveltuvat parhaiten Etelä-Suomen karjattomille alueille ja savipitoisille pelloille, joissa nurmenviljely on vähäistä ja orgaanisen aineksen pitoisuus matala. Viljelijät väkevoittävät maanparannusaineita usein kemiallisilla lannoitteilla. (Perko 2022, ProAgria 2013).

Biokaasulaitoksen typpikonsentraatilla tarkoitetaan rejektivedestä tuotettua väkevoitetyä liuosta tai tiivistettyä. Esimerkiksi Turun Gasumin biokaasulaitoksen konsentraatti on typpistrippauksen ja haihdutuksen jälkeinen jae, jota Gasum käyttää maatalouskäyttöön. Rejektivettä ja -konsentraattia voidaan käyttää metsäteollisuuden jätevedenpuhdistamolla ravinnelähteenä (mm. typpi). Sillä voidaan korvata urean käyttöä. Konsentraattia voidaan käyttää myös lietelannan lisäravinteena.

3.3. Metsäteollisuuden lietteet

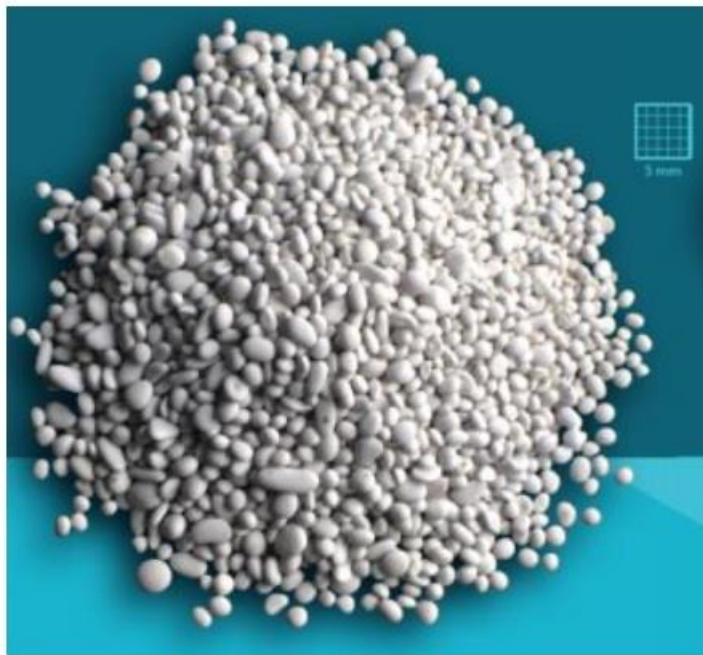
Metsäteollisuuden lietteet ovat jätevedenkäsittelyn ravinnepitoisia lietteitä, joita ennen on pidetty jätteenä. Liette voidaan kuitenkin hyödyntää energiana tai maanparannusaineena. Metsäteollisuuden lietteistä osa ohjautuuakin käsiteltynä maatalouskäyttöön maanparannukseen, mutta iso osa päättyy energian tuotantoon polttolaitoksiin. (ProAgria 2013) Lietteen hyödyntämiseen maanparannusaineena vaikuttaa myös lainsäädäntö. Esimerkiksi metsäteollisuuden lietteiden kadmiumpitoisuudet usein ylittävät lainsäädännön raja-arvot.

Yara ja UPM ovat tutkineet metsäteollisuuden sivuvirroista sellu- ja paperitehtaiden lietettä ja siitä saatavan kierrätyslannoitteen käyttäytymistä kasvien kasvamisessa. Kierrätyslannoitteeseen on lisätty mineraalilannoitteita, koska metsäteollisuuden liete ei sisällä ravinteita oikeassa suhteessa kasvien tarpeisiin nähden. Lopputuote on kuivattu ja pelletöity. Vuoden 2017 hankkeen tulosten mukaan

kierrätyslannoitteen sato oli lähes kolmanneksen suurempi kuin pelkän lietteen, mutta viidenneksen pienempi kuin mineraalilannoitteella. (Yara4)

4. Struviitin valmistus jätevedestä ja mädätysjäännöksestä

Struviitti on fosfaattimineraali, jossa on fosfaattia, ammoniumtyyppiä ja magnesiumia. Struviitti tunnetaan myös lyhenteellä MAP (magnesium ammonium phosphate) eli magnesiumammoniumfosfaatti ja sen kemiallinen kaava on MgNH_4PO_4 . Kideveden sisältävä kemiallinen kaava on $\text{MgNH}_4\text{PO}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$, eli magnesiumammoniumfosfaatti heksahydraatti. Struviitti on tavallisesti väriltään valkeaa ja se esiintyy kovina kiteinä. (Sääluoto 2018)



Kuva5. Struviittirakeita (NuReSys Sääluoto 2018 mukaan)

Struviittia muodostuu, kun fosforin, ammoniumtyypin ja magnesiumin pitoisuudet sekä ympäristön olosuhteet ovat sopivat. Tärkeimmät tekijät ovat edellä mainituista ioneista kylläinen liuos sopivissa moolisuhteissa ja emäksinen pH 7–11,5 (Hao et al. 2008). Matalammassa pH:ssa tuotetaan kuitenkin sekä suurempia että puhtaampia struviittikristalleja (Kozik et al. 2011, Hao et al. 2013). Kolmas tärkeä tekijä on lämpötila, 25–90 °C. Gonzáles-Morales et al. 2021 tutkimuksen mukaan lämpötilassa 20–25 °C ja pH:ssa 9 olivat parhaat prosessiolosuhteet struviitin muodostumiselle. Struviittia valmistetaan saostamalla ja kiteyttämällä. Sopivan lämpötilan ja pH:n lisäksi vaaditaan usein magnesiumilisäys. Lopputuotteena syntyy hidasliukoinen struviitti, joka toimii fosforilannoitteena ja sisältää fosforin lisäksi saman ainemäärän verran ammoniumtyyppiä ja magnesiumia. (Lehtoranta et al. 2021)

Jos jätevesienkäsittelyprosessissa on sopivat emäksiset olosuhteet, alkaa struviittia muodostua prosessilaitteiston putkiin ja pumppuihin haitaten niiden toimintaa. Struviittia pidetään haitallisena, jos se kertyy väärin paikkoihin, mutta on toisaalta myös itsessään arvokkaita ravinteita sisältävä mineraali. Struviitin saostaminen jätevirroista on kasvavan mielenkiinnon kohteena.

Struviittia saostetaan yleensä BioP-prosessin läpikäyneen lietteenkäsittelyn yhteydessä lietteen kuivauksessa syntyvistä rejektivesistä, mutta sitä voidaan saostaa myös suoraan lietteestä. Euroopassa ja Pohjois-Amerikassa struviittia saostetaan mädätetyn lietteen rejektivedestä tai palautuslietekierrosta paljon.

Ruotsissa struviittia valmistetaan eco:P -prosessilla vedenpoiston rejektistä jätevedenpuhdistamolla (Thelin 2016). On arvioitu, että vuonna 2020 otettiin 1000 tonnia fosforia talteen struviittina EU:ssa. Suurin osa struviitista tuotetaan Hollannissa (35–43 %), Belgiassa (16–20 %) ja Saksassa (15 %). Muyen et al. tutkimuksissa 2020 analysoitiin 24 eri struviittituottajan struviittinäytteiden raskasmetallipitoisuuksia, ja ne olivat selvästi alle lain sallitun rajan ja usein jopa alle havaitsemisrajan. Suurin osa taudinaiheuttajista ja indikaattoriorganismeista oli vähäisessä määrin läsnä analysoiduissa struviittinäytteissä. (Muys et al. 2020)

Struviitilla on potentiaalia vähentää fosforin aiheuttamaa saastumista ympäristössä vähentämällä keinotekoisien fosforilannoitteiden kysyntää maataloudessa (Kok et al 2018).

Airprex-menetelmässä kiteytetään struviittia jätevesilietteestä. Menetelmän on kehittänyt saksalainen Berliner Wasserbetriebe. Prosessissa fosforia poistetaan mädätetystä EBPR-jätevesilietteestä. Menetelmä on käytössä täyden mittakaavan jätevedenpuhdistamoilla esim. Amsterdamissa ja Emmenissä (Alankomaat) ja Mönchengladbachissa ja Wassmansdorfissa (Saksa). (Suomen Vesilaitosyhdistys 2016)

Toinen käytössä oleva jätevesilietemenetelmä on Seaborne. Saksalainen Seaborne-ympäristötutkimuslaboratorio on kehittänyt tämän jätevesilietteen käsittelymenetelmän, jossa yhdistetään biokaasun puhdistus ja fosforin sekä typen kierrätys. Lopputuotteita, struviittia ja ammoniumsulfaattia, voidaan käyttää lannoitteena maataloudessa. (Suomen Vesilaitosyhdistys 2016)

Fosforin talteenottomenetelmiä mädätyksen rejektivesistä struviittina on täyssekoitusreaktoreihin perustuvia tekniikoita mm. PHOSPAQ, ANPHOS ja NuReSys. Leijupetiteknikkaan perustuvia prosesseja ovat mm. PHOSNIX (Japani) ja Ostara Pearl (Pohjois-Amerikka). Struviittikiteytyksen periaatteella on myös kehitetty WASSTRIP-prosessi, jossa EBPR (enhanced biological phosphorus removal) -prosessin ylijäämäliete johdetaan anaerobiseen säiliöön, jossa fosfori ja magnesium vapautuvat vesifaasiin. Liete sakeutetaan ja sakeutettu liete johdetaan mädättämöön. Sakeuttamon rejekti, joka sisältää suurimman osan fosforista, käsitellään struviittireaktorissa. (Suomen Vesilaitosyhdistys 2016)

5. Puhdistamolietteiden haitta-aineet ja mikromuovit

Puhdistamoliete sisältää myös haitta-aineita, kuten raskasmetalleja, PAH-yhdisteitä, lääkeainejäämiä ja mikromuoveja. Tulevan jäteveden laatu ja koostumus määrää lietteen sisältämiä ravinteita ja muita aineita. (ProAgria 2013)

Nykyiset jätevedenpuhdistustekniikat ja lietteen käsittelymenetelmät pystyvät puhdistamaan orgaanisista haitta-aineista vain pienen osan. Ne kulkeutuvat siis joko purkuveden mukana vesistöihin tai kiinnittyvät lietteeseen ja päätyvät lietteen käsittelyn seurauksena maahan. Uudemmillä menetelmillä on mahdollista vähentää haitta-aineiden kulkeutumista ympäristöön. Uudet menetelmät myös samalla ottavat talteen fosforia ja tyypeä kasveille käyttökelpoisemmassa muodossa paremmin kuin vanhat. Haitta-aineille asetettujen raja-arvo vaatimusten täytyessä, puhdistamolietteen peltokäytölle ei ole lainsäädännöllistä estettä. Tällä hetkellä raja-arvot on asetettu vain raskasmetalleille ja taudinaiheuttajille (MMM 24/2011), ja orgaanisille haitta-aineille (esim. muovit, lääkeaineet, palonestoaineet) ei ole olemassa lainsäädännöllisiä raja-arvoja. (Lehtoranta et al. 2021)

Puhdistamopohjaisista lannoitevalmisteista on löydetty muun muassa metalleja, orgaanisia haitta-aineita, taudinaiheuttajia ja mikromuoveja. Puhdistamolietteen haitallisilla metalleilla tarkoitetaan yleensä kadmiumia, kromia, kuparia, elohopeaa, nikkeliä, lyijyä, sinkkiä ja arseenia. Puhdistamolietteilistä havaitaan paljon erilaisia orgaanisia haitta-aineita, kuten erilaisia palonsuoja-aineita, pintakäsittelyaineita, muovin pehmentimiä sekä lääkeaineita. Vaikka kaikki aineet eivät ole lietteiden ja maaperän kannalta haitallisia, on niitä tutkittu vain murto-osa kaikista tuotetuista kemiallisista yhdisteistä. Orgaanisista haitta-aineista perfluoratun yhdisteen PFOS:n, palonestoaineen TBBPA:n ja antibioottien norfloksasiinin, ofloksasiinin ja suproflaksasiinin on arvioitu aiheuttavan tutkituista aineista suurimman riskin ympäristön eliöille. Nämä ovat pysyviä ja kulkeutuvat maaperässä hitaasti eteenpäin ja biokertyvät mm. lieroihin ja rikastuvat ravintoverkkoihin. Puhdistamolietteisissä esiintyy erilaisia mikrobeja, jotka voivat aiheuttaa ihmisille infektioitauteja. Taudinaiheuttajia päätyy lietteisiin ihmisten ulosteista, hulevesistä ja teollisuudesta. Useimpien taudinaiheuttajien kasvu estyy, kun käsittelylämpötila on yli 50 °C tai pH on alle 4 tai yli 11. (Vieno et al. 2018)

Vienon ja Arjosen selvityksessä 2021 tutkittiin lähes 100 haitallista ainetta suomalaisilta jätevedenpuhdistamoilta. Selvityksen mukaan suurin osa tutkituista haitta-aineista poistuu jätevedenpuhdistuksessa niin hyvin, että niiden aiheuttama riski vesistöissä on pieni. Useat aineet kuitenkin todennäköisesti sitoutuvat paljolti puhdistamolla syntyvään lietteeseen. Vesistöjen kannalta tutkituista aineista haitallisimmat Suomessa ovat venlafaksiini, diklofenaakki, 17-alfa-etinyliestradioli ja sinkki. Lietteeseen sitoutuvia lääkeaineita ovat muun muassa norfloksaani, ofloksaani, siprofloksaani, tetrasykliini, fluoksetiini ja entakaponi (Vieno 2015 Fjäder & Åystön 2021 mukaan).

Muovin käyttö aiheuttaa monia ongelmia ympäristön suhteen, koska muoviroskan vuotuiset määrät ovat valtavia. Osa muovijätteestä menee kierrätykseen, mutta suurin osa kaatopaikoille, ja osa tuotetusta muovista joutuu vesistöihin. Muovin tärkeimmän ominaisuuden, kestävyys takia, se säilyy ympäristössä pitkiä aikoja. Lisäksi kun se on halpaa, sitä pidetään kertakäyttöisenä materiaalina. Siksi sitä on kertynyt ympäristöön paljon. UV-valo ja lämpötila vaikuttavat siihen, että ympäristöön päättynyt muovijäte voi hajota mikromuoveiksi.

Mikromuoveiksi luokitellaan alle 5 mm:n kokoiset muovikappaleet, joita esiintyy niin merissä kuin sedimenteissäkin ympäri maailmaa. (GESAMP 2015) Mikromuovien tutkimiselle ei ole vielä standardoituja menetelmiä, ei näytteiden keräämiselle kuin ei mikromuovien analysoinnillekaan. Analysointimenetelmät ja lietenäytteiden esikäsittelyt ovat kehitysvaiheessa.

Muovit ovat synteettisten ja puolisynteettisten polymeerien ja lisäaineiden seoksia. Pääasiassa muovit valmistetaan fossiilisista raaka-aineista, esim. maakaasusta, öljystä tai hiilestä, mutta niitä valmistetaan myös biopohjaisista raaka-aineista, esim. maassista. Valmistuksessa muoveihin lisätään usein lisäaineita, kuten lasi- ja hiilikuitua ja erilaisia mineraaleja. (Muoviteollisuus)

Jätevesien kautta puhdistamoille kulkeutuu erilaisia mikromuoveja. Arvioiden mukaan jopa 99 % puhdistamolle tulevista mikromuoveista päätyy lietteeseen (Magnusson & Norén 2014).

Lääkeaineita ja muoveja on lisääntyvässä määrin. Muille haitta-aineille on tullut rajoitteita käyttöön, jolloin niitä ei ole niin paljon jätevesissäkään.

6. Hankkeessa tehdyt muut selvitykset

Hankkeessa selvitettiin satakuntalaisten maanviljelijöiden mielipiteitä ja kokemuksia kierrätyslannoitteista. Kokonaiskuva muodostettiin haastattelemalla viljelijäyhteisöjä, viljelijöitä ja tutkijoita sekä maatalouden sidosryhmiä. Puhdistamolietteen käyttöön liittyviin kysymyksiin ja aiheeseen liittyviin tiedusteluihin

vastattiin viittaamalla yleisesti saatavana olevaan viranomais- tai alan asiantuntijaorganisaation tietomateriaaliin.

Kyselyjen yhteydessä selvitettiin satakuntalaisten maanviljelijöiden kiinnostusta mädätysjäännöksen ja muiden kierrätyslannoitteiden käyttöön sekä mädätysjäännöksen varastoinnin ja urakointipalvelun käyttöön. Kiinnostusta mädätysjäännöksen käyttöön oli isoilla yli 100 ha ammattiviljelytiloilla. Urakointiin yksittäisillä viljelijöillä ei ollut kiinnostusta, vaan sen nähtiin soveltuvan paremmin ammattimaiseen kuljetusliiketoimintaan.

Typvikonsentraatti kiinnosti sikatiloja, jos typvikonsentraatilla voitaisiin korvata lietelannasta haihtuvaa typpeä. Kaakkois-Satakunnassa on käytössä olevaa varastointitilaa, mutta ei ylimääräistä kapasiteettia. Maatalouden sidosryhmien mielestä kierrätysravinteiden hyödyntäminen on erittäin tärkeää jo nyt ja sen tärkeys näyttäisi korostuvan tulevaisuudessa.

7. Kokeellinen osuus ja tulokset

Hankkeen oleellisia toimenpiteitä oli jätevesilietteiden ja mädätysjäännösten prosessointi- ja rikastuskokeilut.

Struviittisaostuksen koeajo käsitti kokeellisen osan fosforin vapauttamiseksi jätevesilietteestä sekä sitä seuraavasta struviitin saostamisesta fosforipitoisesta jätevedestä. Koeajoissa käytettiin Berner Chemicalsin Mg-lähdettä, Huittisten Puhdistamon jätevesilietettä ja Gasumin typpirejektia. Koeajossa selvitettiin kuinka paljon ja minkä laatuista struviittia eli magnesiumammoniumfosfaattia voidaan Huittisten jätevesiprosessin palautuslietteestä (kiertolietteestä) saostaa.

Struviittisaostuksen toistokokeissa Huittisten puhdistamon palautuslietettä vanhennettiin ensin kaksi viikkoa, minkä jälkeen tehtiin struviitin saostus. Saostuksessa käytettiin Berner Chemicalsin magnesiumyhdistettä.

Envorin Porin biokaasulaitoksella käytetään raaka-aineena Porin seudun jätevesilaitoksen puhdistamolietettä. Tämän työn Envor-kokeiden tarkoituksena oli ottaa kuivaa lingon jälkeistä mädätysjäännöstä, kuivata sitä infrapunakuivauksella Puumalan Nanoparilla ja sekoittaa Berner Chemicalsin magnesiumkemikaaliin: sivuvirtaan ja samalla tehdään tuotteeseen hienoon magnesiumsulfaattiheptahydraattipölyyn. Magnesiumsulfaattipöly on tehtaan sivuvirta, ja sitä menee kotimaan myyntiin. Näin saataisiin teollisuuden sivuvirroista ja puhdistamolietteestä uudenlaista kiertotaloutta, ja maanparannusainetta viljelijöille. Satakunnassa joku toimiva taho, esimerkiksi biokaasulaitos voisi hankkia samanlaisen infrapunakuivauslaitteen kuin Nanoparilla, jos kokeen tulokset ovat lupaavia.

Gasumin Turun biokaasulaitoksella käytetään raaka-aineena biojätettä, puhdistamolietettä ja elintarviketeollisuuden 3 luokan sivutuotteita. Elintarviketeollisuuden 3 luokan sivutuotteita ovat mm. ravintoloiden, pitopalvelujen ja keittiöiden ruokajäte, elintarvikkeiden käsittelyssä ja valmistuksessa syntyvät sivutuotteet, hautomoiden sivutuotteet, kaupallisista syistä tapetut untuvikot (Ruokavirasto 2). Tämän työn Gasumin kokeiden tarkoituksena oli ottaa tämän biokaasulaitoksen konsentraattia, sekoitella sitä Berner Chemicalsin magnesiumkemikaaliin ja tämän jälkeen kuivata sitä infrapunakuivauksella Puumalan Nanoparilla.

UPM:n Rauman tehtaiden jätevesilietteet käsitellään Rauman yhteispuhdistamolla, jossa käsitellään lisäksi Metsä Fibren sellutehtaan ja Rauman kaupungin yhdyskuntajätevedet. Puhdistamon ns. biolietteen osuus on viime vuosina kasvanut, mikä on lisännyt lietejakeiden loppukäsittelyn kustannuksia. Lietteet poltetaan

osakkaiden omistaman Biovoima Oy:n energialaitoksella. Kiinnostus on saada ravinnerikkaan alhaisen kiintoainepitoisuuden omaavan biolietteen osuutta vähennettyä prosessissa ja saada se hyödynnettyä maanparannusaineena. UPM:n koeajot jakaantuivat kahteen osaan, biolietteen kalkkistabilointiin ja biolietteen mikrotermiseen käsittelyyn.

7.1. Struviitin saostus Huittisten Puhdistamon jätevedestä

7.1.1. Struviittisaostuksen koeajot

Huittisten jätevedenpuhdistamon prosessia ajetaan osan vuodesta BioP-prosessina, jolloin fosfori sitoutuu biologisesti jätevesilietteeseen puhdistamon biologisessa prosessissa ja kemikaalin käyttö vältetään ajoittain lähes kokonaan. Kun fosfori on sitoutunut lietteeseen biologisesti, se on paremmin erotettavissa ja hyödynnettävissä myöhemmässä vaiheessa esimerkiksi jatkojalostamalla lietteestä struviitti.

BioP-prosessin aikana havaittiin puhdistamon tiivistämöllä fosforin vapautumista rejektiveteen viiveen seurauksena. Ilmiö on haitallinen, koska fosfori vapautuu rejektiveteen ja kulkeutuu eteenpäin prosessissa edelleen purkuveteen. Tällöin on lisättävä kemikaalia jälkisaostukseen, jolla varmistetaan laitokselta lähtevän purkuveden lupamääräysten mukainen fosforipitoisuus. Fosforin vapautumista voitaisiin kuitenkin hyödyntää laitoksella, mikäli se voitaisiin saostaa liukoissa muodossa suoraan tiivistämön rejektivedestä struviitiksi.

Koeajoihin kerättiin Huittisten jätevedenpuhdistamolta palautuslietettä noin 100 l. Tiivistämissä tapahtuvaa fosforin vapautumista yritettiin simuloida vanhentamiskokeella. Ensimmäisessä koeajovaiheessa kokeiltiin fosforin vapautumispotentiaalia BioP-prosessin jätevesilietteestä vanhentamalla prosessin palautuslietettä koeajo-olosuhteissa. Koeajon kesto oli kesto 14 vrk. Lietteestä mitattiin alku- ja loppuanalyysit sekä päivittäiset mittaukset ja analyysit.

Kokeen päätyttyä tehtiin struviitin talteenottokoe. Talteenottokokeessa hyödynnettiin koeajon ensimmäisestä osasta saatua Huittisten puhdistamon fosforipitoista nestejätettä, Gasumin biokaasulaitoksen rejektiveden ravinteita sekä Berner Chemicalsin magnesiumlähdetä. Struviitin talteenottokoe tehtiin siihen tarkoitukseen sopivalla pilot-laitteistolla. Laitteistoon kuului sekoittimella varustettu reaktori sekä erotuskolonni. Tavoitteena oli saada tuotettua mahdollisimman korkealaatuista struviittia. Struviitti erotettiin ja pestiin erotuskolonnissa. Lopuksi tehtiin laatuanalyysit ja laskettiin saanto. Muodostunut struviitti otettiin talteen ja säilytettiin mahdollisia jatkoanalyysjä varten.

Koska näistä kokeista ei saatu tarpeeksi analysoitavaa materiaalia haitta-aineanalyysiin, tehtiin vielä struviitin valmistuksen toistokoe. Tässä kokeessa otettiin kaksi 1 000 l:n IBC-kontillista palautuslietettä Huittisten puhdistamolta ja vanhennettiin niitä yli kaksi viikkoa. Kun liete ei laskeutunut, lisättiin kumpaankin puhdistamolla käytössä olevaa 496-polymeeriä ja liete laitettiin lieriön muotoiseen reaktoriin laskeutumaan. Ylitettä saatiin talteen noin IBC-kontillinen. Vanhennuksen jälkeen liukoisin fosforin pitoisuus oli noin 260 mg/l, ja kokonaistyyppi 110 mg/l. Tästä saostettiin ensimmäiset kolme 46 l:n erää magnesiumsulfaattilla ja sen jälkeen loput 9 erää magnesiumhydroksidilla, lisättiin typen lähteeksi ammoniumsulfaattia, ja säädettiin pH laimealla NaOH-liuoksella 9 tuntumaan, annettiin laskeutua, suodatettiin ja saatu sakka kuivattiin 40°C-asteisessa uunissa.

7.1.2. Struviittisaostuskokeiden tulokset

Palautuslietteen vanhennuskokeista voitiin nähdä, että biologinen palautusliete vapauttaa fosforia hapettomissa olosuhteissa. Nestejakeen fosforipitoisuus kokeen alussa oli 22 mg/l ja kokeen lopussa 115–133 mg/l.

Struviitin valmistuskokeessa fosforipitoiseen vesifaasiin lisättiin Gasumin tyypirejektia ja Berner Chemicalsin magnesiumsulfaattia, jonka tuloksena vesifaasista saostui sakka. Pitoisuuksien ja massojen perusteella kokeessa saatiin talteen vähän yli 70 % ammoniumtyyppistä ja fosforista, ja suurin osa magnesiumista (noin $\frac{2}{3}$). Kemiallisen koostumuksen perusteella 45 % talteen otetusta fosforista oli struviittia, 46 % oli magnesiumfosfaattia ja 4 % kaliumfosfaattia.

Taulukko4. Struviitin kiteytyskokeiden kokonaismassatase ja laskennalliset luvut.

		laskennalliset		
	Pilot-kokeet	viikossa	10 viikossa	puolessa vuodessa
Määrä/paino	kg	t	t	t
Palautusliete	37,3	700,00	7 000,00	18 200,00
Gasumin ravinneliuos	0,2158	4,05	40,50	105,30
Berner Chemicalsin $MgSO_4$	0,0815	1,54	15,00	40,00
1 mol/kg NaOH	0,1884	3,58	35,76	92,98
Talteen otettu sakka	0,0336	0,64	6,42	16,69

Kokeen ja prosessin tietojen perusteella prosessista saataisiin talteen viikossa 700 m³ fosforirikasta vesifaasia, josta voitaisiin saostaa 0,64 t kuivaa fosfaattisakkaa. Nykytilanteessa BioP prosessia ajetaan 10 viikkoa, jonka aikana saataisiin 6,42 t fosfaattisakkaa. Mikäli BioP prosessia voitaisiin ajaa puolet vuodesta, puolen vuoden teoreettinen saanto olisi 16,69 t. Struviitin saantoa rajoittaa lietteen vanhentaminen, joka vie aikaa. Vanhentamista voidaan mahdollisesti nopeuttaa, mutta siihen ei perehdytty tämän hankkeen puitteissa. Struviitin saantoa fosforirikasta vesifaasista voitaisiin parantaa paremmalla myös pH:n säädöllä. $MgPO_4$ ja KPO_4 voivat mahdollisesti toimia myös lannoitetuotteena. (Taulukko4) Nämä ensimmäiset kokeet on tarkemmin selitetty Renotechin raporteissa [1](#) ja [2](#).

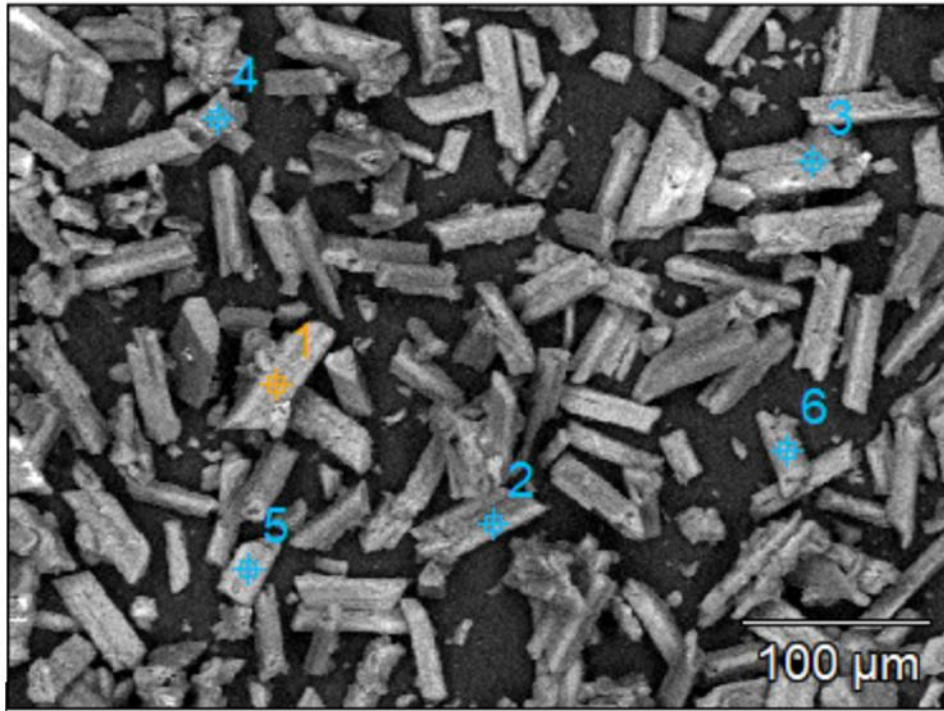
Taulukossa 5 on esitetty talteen otettu sakka ja sen koostumus analysoituna ICP-OES:llä (inductively coupled plasma optical emission spectroscopy).

Taulukko5. Struviitin kiteytyskokeiden talteenotetun sakan määrät (analysoitu ICP-OES:llä).

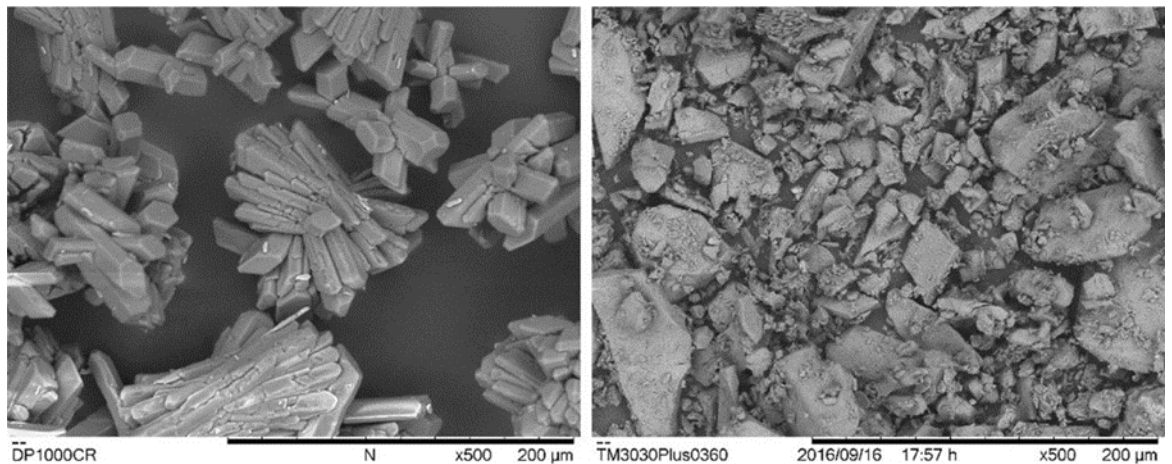
	Na	K	Ca	Mg	P _{tot}	S	NH ₄ ⁺	Fe	Si _{liukoinen}	C
Talteenotettu sakka / mg	4,3	251	33,3	3 420	4 590	5,7	1200	52,8	5,5	801
Sakan prosenttiosuudet %	0,01	0,75	0,10	10,18	13,66	0,02	3,57	0,16	0,02	2,38

Koska talteenotettua sakkaa ei riittänyt haitta-aineanalyysiin, kokeet suoritettiin uudestaan tarkoituksena tehdä kattava haitta-aineanalyysi saadusta sakasta. Tästä on tarkempi selostus liitteessä [21](#).

SEM-EDS (pyyhkäisyelektronimikroskopia-energiadiispersiivinen röntgenspektroskopia) -määrittämisistä (kuvat alla 6 ja 7) on nähtävissä saatujen kiteiden ulkonäkö. Kuvissa on nähtävissä hyvin vastaavanlaisia kiteitä kuin kirjallisuudessa on esitetty puhtaalle struviitille (Bianchi et al. 2020). Mukana on silti nähtävissä myös hieman epäpuhtauksia.



Kuva 6. Struviittikiteitä Huittisten puhdistamon jätevedestä, $MgSO_4$ llä saostettu, SEM-kuva, 250-kertainen suurennos.



Kuva 7. Kirjallisuudesta (Bianchi et al. 2020) löytyneet kuvat puhtaasta VWR:ltä ostetusta struviitista (vasen) ja jätevesiprosessin rejektivesikäsittelystä (Severn Trent Water Ltd) tehdystä struviitista (oikea).

Puhtaasta struviitista otetusta kuvasta nähdään, että yksittäinen struviittikide on samanmuotoinen mitä hankkeen kokeiluissa saadussa struviitissa, mutta kiteet ovat kasvaneet yhteen, mikä on tyypillistä struviitin muodostumiselle. Struviitin kidekoko saadaan sopivissa olosuhteissa kasvatettua. Suurempi kidekoko on helpommin käsiteltävää kiteytyksen jälkeen pesussa ja suodatuksessa. Myös lannoitekäytössä suurempi kidekoko on eduksi.

Struviittisaostuskokeista erotettu sakka alitti selvästi Ruokaviraston raja-arvot (Taulukko6).

Taulukko6. Struviitin saostuksen toistokokeiden analyysituloksia ja Ruokaviraston raja-arvot yksikössä mg/kg kuiva-ainetta.

	MgSO ₄ ja suuri annos NaOH:ia	Mg(OH) ₂ ja pienempi annos NaOH:ia	Ruokaviraston raja-arvot
Ba	<10	<10	
Na	175	77	
K	8 952	4 906	
Ca	4 792	5 707	
Mg	106 248	170 469	
Mn	141	166	
Fe	5 887	1 933	
Cu	23	6	600
Zn	38	17	1500
Co	<1	<1	
Cr	6	9	300
Ni	1	1	100
P	114 097	95 300	
Al	1 023	439	
S	1 160	205	
Pb	9	40	100
Cd	<0,01	0	1,5
As	1	3	25
Sn	2	2	
Ag	1	1	
Hg	<0,1	<0,1	1

[*https://www.ruokavirasto.fi/kasvit/lannoitevalmisteet/laatuvaatimukset/haitalliset-aineet-ja-hygienia/](https://www.ruokavirasto.fi/kasvit/lannoitevalmisteet/laatuvaatimukset/haitalliset-aineet-ja-hygienia/)

Magnesiumsulfaatilla saostetussa struviittinäytteessä oli struviittia 90 %, magnesiumhydroksidia 4 % ja hiiltä 4 %. Magnesiumhydroksidilla saostetussa struviittinäytteessä taas oli struviittia 75–76 % ja magnesiumhydroksidia 23 % ja hiiltä 1 %. Magnesiumsulfaatilla saostetussa struviittinäytteessä oli siis lietettä enemmän, ja magnesiumhydroksidilla saostettuun jäi ylimäärästä magnesiumhydroksidia sitä liukenematta.

Pyrolyysin (He-atmosfääri) antamat komponentit analysoitiin GC-MS:llä ja vain magnesiumsulfaatilla saostetusta näytteestä löydettiin analysoitavia komponentteja. Magnesiumsulfaatilla saostetun näytteen Py-GC-MS-määrittelyssä löytynyt piikki 40, heksaanidioiinihapon bis(2-etyyliheksyyli) ester, voi tulla muovinpehmenysaineesta ja/tai voiteluöljystä. Piikki 41 eli 1,2-bentseenidikarboksylihapon dioktyyliesteri kertoo ftalaatista. On merkittävää, että näitä ei löytynyt magnesiumhydroksidilla saostetusta näytteestä.

Haitta-aineita selvitettiin LC-MS-analyysillä. Molemmista näytteistä löytyi haitta-aineita, joskin magnesiumsulfaatilla saostetusta näytteestä löytyi useampia haitta-aineita ja yleisesti ottaen korkeammassa pitoisuudessa.

PFAS-yhdisteitä ja antibioottijäämä (erytromysiini) löytyi molemmista struviittinäytteistä. Samoin dietyylitoluamia, joka on hyönteisten karkottamiseen tarkoitettu aine, löytyi molemmista näytteistä. Verenpaine- ja turvotuslääkkeen jäämää ei löytynyt magnesiumhydroksidilla saostetusta näytteestä. Hormonivalmisteiden ja monien muiden lääkeaineiden jäämiä ei löytynyt kummastakaan näytteestä.

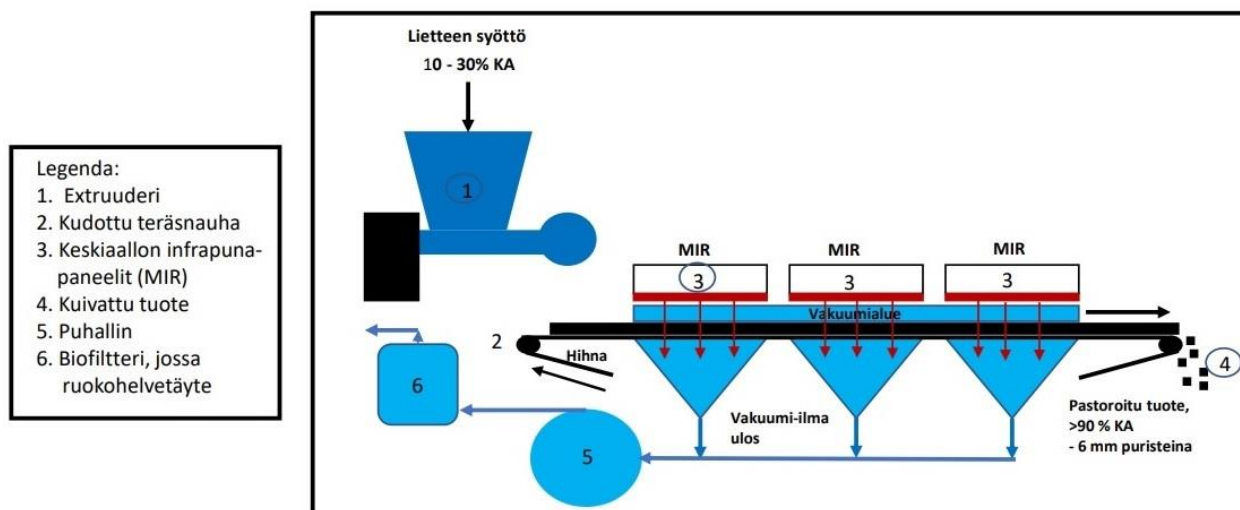
Yleisesti näytteissä havaittiin vain pieni määrä yhdisteitä. Yleensä magnesiumsulfaatilla saostetussa näytteessä oli korkeampia pitoisuuksia. Yhteensä havaittiin 10 epäpuhtautta ja 23 aineenvaihduntatuotetta. 16 rasvahapon havaitseminen näytteistä osoittaa, että rasvahapot sitoutuvat hyvin struviittiin. Tarkemmat selostukset haitta-aineista liitteessä 20.

7.2. Infrapunakuivaus

7.2.1. Infrapunakuivauskoeajot

Nanopar on suomalainen cleantech-yritys, joka on kehittänyt uuden, käänteentekevän menetelmän kunnallisten vesilaitosten sekä sellu- ja paperiteollisuuden orgaanisten lietteiden kuivaukseen ja jatkojalostukseen. Nanoparin jätevesilaitosmittakaavan laitteisto on nimeltään Paskier -prosessi. Siinä on vakuumiavusteinen infrapunakuivain, jauh-in, sekoittaja, granulaattori, lisäainesilo sekä pakkaus-kone. On suunniteltu, että sitä käytetään jätevedenpuhdistamolla tai biokaasulaitoksella. Kun kuivattuun lietteeseen lisätään tarkoitukseen sopivia mikro- ja makroravinteita, se voidaan tuotteistaa lannoittavaksi kuivarakeeksi. Kuivausprosessi tuhoaa mahdolliset bakteerit ja patogeenit. Sen avulla kuntien on mahdollista täyttää EU:n kiristyviä kaatopaikkadirektiivejä, kun biologisesti hajoavien kaatopaikkojen määrää on vähennettävä. Prosessin kulut ovat pienemmät kuin kilpailevilla termisillä lietteenkäsittelymenetelmillä. Laitteisto vie tilaa kahden 12 metrin merikontin verran. Kun lietettä kuivataan jätevedenpuhdistamolla, säästetään huomattavasti, lietteen kuljetus vähenee, eikä uusia kompostointipaikkoja tarvita. (Nanopar)

Terminen kuivaus hygienisoi tuotteen, mutta raskasmetallit säilyvät lopputuotteessa. Niiden pitoisuudet tosin alittavat tyypillisesti lainsäädännön asettamat rajat. Mikromuoveja terminen kuivaus ei poista. (Lehtoranta et al. 2021)



Kuva8. Nanoparin vakuumiavusteisen infrapunakuivaimen toimintaperiaate (Kuntonen 2022)

Infrapunakuivauksessa syöteaine syötetään puristimen läpi 10–30 % kuiva-ainepitoisuudessa. Siitä syöte johdetaan hihnakuivaimelle, jossa infrapunapaneelit kuivaavat syötettä. Syöte kuivuu suurempaan kuin 90 % kuiva-ainepitoisuuteen.

Hankkeen toimenpiteinä tehtiin Envorin laitoksen mädätysjäännöksen rikastus- ja prosessointikokeita infrapunakuivauksella Nanopar Oy:llä. Envorin mädätysjäännöstä kuivattiin Nanoparin infrapunakuivaimella ja sekoitettiin Berner Chemicalsin Mg-sakalla ja MgSO_4 -pölyllä, jotka molemmat ovat Mg-yhdisteiden valmistuksessa syntyvää sivuvirtaa.

Gasumin Turun biokaasulaitoksella syntyy sivuvirtana typpipitoista rejektivettä, joka olisi hyvä saada takaisin järkevällä tavalla ravinnekiertoon. Suunnitelmana oli tehdä kokeilu ja rikastaa typpivesi Berner Chemicalsin magnesiumtuotteella ja mahdollisilla muilla lisäravinteilla. Tavoitteena oli saada aikaan tuote, jota lainsäädännön puitteissa mahdollisesti voidaan käyttää laadukkaana lannoitetuotteena. Suunnitelmana oli kuivata Gasumin Turun biokaasulaitoksen typpikonsentraattia infrapunakuivauksella. Typpikonsentraattiin pyrittiin lisäämään joko ennen tai jälkeen kuivauksen rikastetta, esim. Mg-sivuvirtaa.

7.2.2. Infrapunakuivauksen tulokset

Envorin mädätysjäännöstä kuivattiin Nanoparin infrapunakuivaimella ensin, minkä jälkeen sitä sekoitettiin magnesiumsulfaattipölyyn (3 kg kuivattua mädätysjäännöstä ja 0,33 kg pölyä). Taulukossa 6 analyysitulokset ennen ja jälkeen magnesiumkemikaalien sekoituksen.

Taulukko6. Envor-mädätysjäännöksen analyysitulokset ennen (Enmä-t) ja jälkeen (Enmä-k) kuivauksen ja sekoituksen magnesiumkemikaalin kanssa jälkeen (Enmä-Mg-k).

		Enmä-t	Enmä-k	Enmä-Mg-k	Raja-arvo*
pH		6,3	5,9	5,9	
kuiva-aine	%	24,7	92,4	92,2	
Johtokyky (1:5)	mS/m	331	232	488	
typpi, kok.pitoisuus	g/kg ka	41	43	41	
typpi, vesiliukoinen	g/kg ka	7,2	8,18	6,69	
fosfori, vesiliukoinen	mg/kg ka	11	64	76	
tuhka	%ka	45	33,3	38,2	
hehkutushäviö	% ka	55	66,7	61,8	
arseeni	mg/kg ka	5,6	<5,2	<5,3	25
kadmium	mg/kg ka	1,4	0,65	0,77	1,5
kromi	mg/kg ka	28	28	44	300
kupari	mg/kg ka	430	570	580	600
elohopea	mg/kg ka	0,52	0,38	0,35	1
kalium	g/kg ka	1,6	2,5	2,8	
magnesium	g/kg ka	2,2	3	8,3	luonnollisesti pölystä
nikkeli	mg/kg ka	87	43	53	100
fosfori, kok.pitoisuus	g/kg ka	30	31	32	
lyijy	mg/kg ka	13	16	16	100
rikki	g/kg ka	23	12	18	
sinkki	mg/kg ka	650	630	670	1500

[*https://www.ruokavirasto.fi/kasvit/lannoitevalmisteet/laatuvaatimukset/haitalliset-aineet-ja-hygienia/](https://www.ruokavirasto.fi/kasvit/lannoitevalmisteet/laatuvaatimukset/haitalliset-aineet-ja-hygienia/)

Taulukon 6 perusteella nähdään, että kokonaistypen ja liukoisien typen määrä ei ole juurikaan kuivauksessa ja sekoituksessa muuttunut. Fosforikaan ei ole juuri muuttunut, paitsi liukoisien fosforin määrä on kuivauksessa ja sekoituksessa kasvanut. Sekoituksen jälkeiset kromin ja magnesiumin määrien kasvu johtui magnesiumsulfaattipölystä. Elohopean pienentynyt määrä johtunee siitä, että elohopea höyrystyy jo huoneenlämpötilassa.

Taulukosta 6 nähdään myös, että mikään mädätysjäännösjae, ei tuore, ei kuivattu, eikä kuivattu ja Mg-sekoiteltu, ei ylittänyt kansallisen lannoitelainsäädännön haitallisten aineiden enimmäispitoisuuksia.

Kuvassa9 ENVOR-mädätysjäännös kuivattuna, sekä kuivattuna ja jauhattuna.



Kuva9. ENVOR-mädätysjäännös kuivattuna (alareuna) ja kuivattuna ja jauhattuna.

7.2.3. Haitta-aineet

Haitta-aineanalyysi tehtiin tuoreesta Envor-mädätysjäännöksestä ja infrapunakuivatusta Envor-mädätysjäännöksestä. Tuoreen Envor-mädätysjäännöksen ja infrapunakuivatun mädätysjäännöksen dioksiini, furaani, PCB-yhdiste, PFOS- ja PFOA-pitoisuuksia verrattiin Laki ja Veden muistiossa (Liite 8) POP-asetuksen jäteraja-arvoihin (POP-asetus 2019). Mitatut pitoisuudet alittivat kyseiset raja-arvot reilusti. Näytteiden metallipitoisuudet täyttivät Liitedirektiivin ja Maa- ja metsätalousministeriön asetuksen 24/11 raja-arvot. Hygieeniset indikaattorit täyttivät myös lainsäädännön raja-arvot. Laatulannoite-laaturjärjestelmän raja-arvot metalleille ovat lainsäädäntöä tiukemmat. Tuoreessa mädätysjäännöksessä oli laaturjärjestelmän raja-arvoja korkeampia pitoisuuksia kadmiumia ja nikkeliä. Infrapunakuivatussa mädätysjäännöksessä laaturjärjestelmän raja-arvo ylittyi kuparin kohdalla. PAH-yhdisteiden summa alitti selvästi lainsäädännön ja Laatulannoite-laaturjärjestelmän raja-arvon 6 mg/kg ka molemmissa näytteissä. Osa analyysien määritysrajoista oli niin korkeita, että on mahdollista, että PCB-yhdisteitä, palonestoaineita ja ftalaatteja esiintyi näytteissä, mutta selvästi määritysrajaa pienemmissä pitoisuuksissa. Pääosin näytteiden orgaanisten haitta-aineiden pitoisuudet olivat samalla tasolla kuin aiemmin Suomessa on mitattu yhdyskuntajätevesilietteistä ja biokaasulaitosten mädätysjäännöksistä. Tuoreen ja infrapunakuivatun näytteen tuloksissa oli vain vähän eroa keskenään. PFAS-yhdisteitä kuitenkin esiintyi infrapunakuivatussa mädätysjäännöksessä vähemmän kuin tuoreessa mädätysjäännöksessä. Öljyhiilivetyjä taas löytyi enemmän infrapunakuivatussa näytteessä kuin tuoreessa näytteessä.

Tarkempi selostus kokeista Nanoparin raportissa Liitteessä [5](#), Laki ja Veden haitta-ainemuistio Liitteessä [8](#), Eurofin sin analyysitulokset Liitteissä [17](#), [18](#) ja [19](#), sekä haitta-ainetulokset Liitteissä [15](#) ja [16](#).

7.2.4. Konsentraattikokeet

Konsentraattikokeissa yritettiin kuivata infrapunakuivauksella suoraan biokaasulaitoksen konsentraattia. Se ei kuitenkaan onnistunut. Siksi sitä sekoiteltiin ensin hienonnettuun magnesiumkakkujakeeseen ja magnesiumsulfaattipölyyn. Tarkoitus oli lisätä mädätysjäännökseen 10–15 % konsentraattia ja lisäksi siitä tulisi kuivauskelpoinen syöte. Sekoittuminen ei kuitenkaan onnistunut. Konsentraatin koostumus vaikutti aiheuttavan ongelmia laitteiston kuivausosalla tukkimalla viiran ja kuivauksessa palamalla (kuva10). Tarkemmat tiedot Nanoparin raporteissa Liitteissä [4](#) ja [6](#).



Kuva 10. Infrapunakuivauksessa palanutta konsentraattia.

7.3. Autoterminen hapellinen hajotusprosessi

7.3.1. Koeajot mikrobikäsittelylle

Biopallon patentoidun teknologian avulla orgaaniset sivuvirrat muunnetaan hygienisoiduksi maanparannus- ja kierrätyslannoitetuotteiden raaka-aineeksi alle vuorokaudessa. Teollisuuden jätevirtoja kutsutaan usein sivuvirroiksi. Ne ohjataan nykyään mahdollisuuksien mukaan kiertotalouteen. Biopallo-reaktori hygienisoi teollisuuden orgaaniset sivuvirrat orgaaniseksi humukseksi. Yhden Biopallo-reaktorin käsittelykapasiteetti on maksimissaan 50 tn/vrk. Saadulla orgaanisella humuksella saadaan maaperään mikro-organismeille optimiolosuhteet. Näin saatu elävä maaperä tuottaa terveellisempää ruokaa, puhtaampia vesistöjä ja puhdasta ympäristöä. Tämä on siksi, koska elävä maaperä sitoo ja varastoi hiiltä ilmasta maaperään, jossa sitä tarvitaan. (Biopallo)

Ravinteet sitoutuvat suurimmalta osalta kuituihin. Reaktorista ulostulevat massat ovat käyttökelpoisia sellaisenaan tai runsasravinteisilla lisäkomponenteilla rikastettuna ja rakeistettuna. Prosessista tullut orgaaninen biomassa sopii maanparanteeksi ja voidaan levittää peltoon kalkin tai kuivalannan levitykseen sopivalla kalustolla. Käyttömäärät riippuvat tuotteen ravinnepitoisuuksista, mutta 4–8 tn/ha käyttömäärät

ovat tavanomaisia ja tällöin maahan saadaan ravinteiden lisäksi niin korkea määrä hiiltä, että se muuttaa pellon hiilikädenjäljen negatiivisesta positiiviseksi. (Biopallo)

Biopallo-prosessissa orgaanisia massoja hajotetaan mikrobiologisesti aerobisissa oloissa niin, että massa samalla hygienisoituu riittävän korkeassa lämpötilassa. Raaka-ainemassojen valinnalla, biohajotuksen nopeutta säätelämällä ja sopivia bakteerikantoja lisäämällä tuotetaan orgaanista massaa, jossa on tallella kaikki hyvä: maata parantavia kuitumaisia ja pitkälle hajonneita orgaanisia aineita, kasvinravinteita sekä kasveille, maalle ja sen luontaiselle maaeliöstölle hyödyllisiä mikrobikantoja. (Biopallo)

Ranskassa on käytössä ATAD (autoheated thermophilic aerobic digestion) -menetelmä, joka on lähellä Biopallon mikrotermistä käsittelyä. Sitä voidaan käyttää myös puhdistamolietteelle. Se tapahtuu korkeassa lämpötilassa $>50\text{ }^{\circ}\text{C}$, mikä johtaa haihtuvien kiintoaineiden ja patogeenien hajoamiseen. ATAD-menetelmää käytetään yleensä kaksivaiheisena prosessina. Ensimmäisessä vaiheessa lämpötila on alhaisella termofiilisellä alueella (noin $45\text{ }^{\circ}\text{C}$), maksimaalinen desinfiointi saavutetaan toisessa vaiheessa, jossa lämpötilat voivat vaihdella välillä $50\text{--}60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pilottitutkimusten pohjalta on onnistuneesti suunniteltu ja rakennettu täysimittaisia ATAD-laitoksia meijeri- ja perunajalostukseen. (ATAD)

Hankkeessa haastateltiin ja kartoitettiin kahta mikrobikäsittely teknologiayritystä DTS Finland Oy:tä ja Biopallo Oy:tä. Mikrobikäsittelyssä lietteelle suunnitellaan ja valmistetaan mikrobiymppe, jonka avulla biolietteen käsittelyprosessi herätetään toimintaan. Mikrobitoiminta nostaa lietteen lämpötilaa ja haihduttaa lietteestä vettä. Lämpötilaa edelleen nostamalla saadaan liete myös hygienisoitua. Prosessi toimii panostyypillisesti ja mikrobitoiminnan herätyksen jälkeen liete prosessoituu orgaaniseksi humukseksi. Prosessiin voidaan lisätä joko muita sivuvirtoja ja/tai lisä- ja hivenravinteita.

Biopallo-käsittely valittiin koeajoihin reaktorikoon perusteella. Biopallo-käsittelyssä kasvatettiin mikrobijuuri, joka lisättiin reaktoriin. Samoin mikrobitoiminnan herättämiseksi lisättiin kananlantaa. Jotta liete pysyi käsittelyn aikana ilmapana, siihen lisättiin myös haketta, joka lopussa seulottiin pois, sekä järviruokoa. Käsittely onnistui hyvin ja saatiin hygieenistä maanparannusainetta. Lisäaineiden myötä ravinnesuhteet hieman muuttuivat.

7.3.2. Tulokset

Biopallon UPM-kokeissa käsiteltiin UPM Rauman jätevesilaitoksen primääri- ja sekundäärilietettä, jossa on siis UPM Rauman tehtaiden, Metsä Fibren tehtaan ja yhdyskunnan jätevettä käsiteltynä, autotermisellä mikrobien hygienisointikäsittelyllä. Biopallo-käsittelyssä massaun lisättiin kanankakkaa ja haketta, mutta hake pyrittiin seulomaan käsittelyn jälkeen pois. Biopallo-käsittely liete myös rakeistettiin käsittelyn jälkeen. Käsittely onnistui hyvin ja saatiin hygieenistä maanparannusainetta. Lisäaineiden myötä ravinnesuhteet hieman muuttuivat.

Taulukko7. UPM-lietteen laatuanalyysi. Taulukossa on esitetty analyysitulokset ennen ja jälkeen Biopallo-käsittelyn, sekä rakeistuksen jälkeen. Keskellä vahvennetulla Ruokaviraston kansallisen lannoitelainsäädännön raja-arvot.

	Ennen	Biopallo-käsittelyn jälkeen	Raja-arvo*	Yksikkö	Rakeistuksen jälkeen
salmonella		ei todettu			
escherichia coli		<10		MPN/g	
rikki, kuiva näyte	0,91	0,49		%	
hiili, kuiva näyte	41,3	42,8		%	
vety, kuiva näyte	5,1	5,2		%	
typpi, kuiva näyte	2,53	1,55		%	3,73
kloori, kuiva näyte	0,095	0,1		%	
natrium	3500	2300		mg/kg ka	
kalium	1500	3300		mg/kg ka	4200
fosfori	3300	2900		mg/kg ka	10000
arseeni	1,8	1,1	25	mg/kg ka	
kadmium	1,2	0,71	1,5	mg/kg ka	
koboltti	3,5	2,7		mg/kg ka	
kromi	61	94	300	mg/kg ka	
kupari	19	17	600	mg/kg ka	
lyijy	6,7	4,1	100	mg/kg ka	
mangaani	1200	750		mg/kg ka	
molybdeeni	3,4	3,8		mg/kg ka	
nikkeli	38	50	100	mg/kg ka	
sinkki	180	140	1500	mg/kg ka	
tallium	0,22	0,11		mg/kg ka	
vanadiini	32	17		mg/kg ka	

[*https://www.ruokavirasto.fi/kasvit/lannoitevalmisteet/laatuvaatimukset/haitalliset-aineet-ja-hygienia/](https://www.ruokavirasto.fi/kasvit/lannoitevalmisteet/laatuvaatimukset/haitalliset-aineet-ja-hygienia/)

Taulukosta7 nähdään, että käsittelemätönkään liete ei ylittänyt kansallisen lannoitelainsäädännön haitallisten aineiden enimmäispitoisuuksia. Kaliumin lisäys johtui todennäköisesti käsittelyssä käytettyjen apuaineiden myötä. Kadmiumin määrä UPM:n lietteessä oli alun perin alle Ruokaviraston raja-arvon. Kadmiumin määrä ei lisääntynyt koeajossa, vaan lisäaineiden myötä kadmiumipitoisuus puoliintui ja oli käsittelyn jälkeen 0,7 mg/kg ka. Tämä johtui todennäköisesti siitä, että hakkeena käytettiin kuusipuuhaketta.

Kuvassa 11 Biopallokäsiteltyä UPM-lietettä.



Kuva11. Vasaramyllyllä käsitelty UPM-Biopallokäsittely liete (vasen), rakeistuksen läpikäynyt UPM-Biopallokäsittely liete (oikea).

7.3.3. Haitta-aineet

Haitta-aineanalyysi tehtiin Biopallokäsittelystä ja rakeistetusta UPM Rauman sekalietteestä (tulokset Liitteet 12, 13 ja 14). Tuloksia verrattiin Laki ja Veden toimesta lainsäädännössä asetettuihin haitta-aineiden raja-arvoihin lietevalmisteille tai lannoitevalmisteille (muistio Liite 7). Kaikki haitta-aineiden pitoisuudet olivat alle lainsäädännössä lannoitevalmisteille asetettujen raja-arvojen. Hygieeniset indikaattorit täyttivät lainsäädännössä asetetut raja-arvot. Kaikki haitta-aineiden pitoisuudet täyttivät myös Laatulannoitejärjestelmän raja-arvot, jotka ovat osin lainsäädäntöä tiukemmat. POP-aineiden (pysyvät orgaaniset yhdisteet ovat orgaanisia aineita, jotka hajoavat hitaasti ympäristössä, kertyvät eläviin organismeihin ja aiheuttavat riskejä ihmisten terveydelle ja ympäristölle (Euroopan kemikaalivirasto)) osalta POP-asetuksen (2019/1021) (POP-asetus 2019) jäteraja-arvot alittuivat selvästi. Näytteestä mitattu AOX-yhdisteiden (orgaaninen yhdiste, jossa hiiliketjuun on liittynyt vähintään yksi klooriryhmä) pitoisuus oli korkeampi kuin Suomessa on raportoitu biokaasulaitosten mädätysjäätöksistä. Lainsäädännössä ei ole käytössä raja-arvoa AOX:lle, mutta useissa Euroopan maissa sovelletaan AOX:n raja-arvoa yhdyskuntajätevesilietteiden käytölle maataloudessa. Nämä raja-arvot ylittyivät Biopallokäsittelystä UPM:n lietteessä.

Tarkempi selostus kokeista Biopallon raportissa Liitteessä [3](#), haitta-aineiden tarkemmat selostukset Laki ja Veden haitta-ainemuistiossa Liitteessä [7](#), Eurofin sin ravinneanalyysitulokset Liitteissä [9](#), [10](#) ja [11](#), sekä haitta-ainetulokset Liitteissä [12](#), [13](#) ja [14](#).

7.4. Kalkkistabilointi UPM

7.4.1. Kalkkistabilointikokeet

Kalkkistabilointikokeilut tehtiin UPM:n toimesta Kaukaan tutkimuskeskuksella. Jätevesiliete pitää aina stabiloida ennen maatalouskäyttöä. Kompostoinnin ja mädätyksen ohella liete voidaan stabiloida kalkilla.

Rauman bioliete stabiloitiin UPM Kaukaan tutkimuskeskuksella sekä Ca(OH)_2 :lla ja CaO :lla. Kokeissa haettiin sopiva kalkan määrä saamaan riittävä lietteen stabilointi.

Kadmiumpitoisuus kokeiden jälkeen oli 1,2–1,4 mg/kg ka. E-coli laski alle raja-arvon (lannoitelainsäädäntö) ja salmonellaa ei löydetty. Tuote näin ollen hygienisoitui hyvin. Ruokaviraston mukaisten raja-arvojen suhteen tuote on sopiva maanparannusaineeksi.

7.5. Fosforinsaostus magnesiumkemikaaleilla

7.5.1. Fosforinsaostuskokeet

Fosforia saostettiin magnesiumsulfaatilla ja -hydroksidilla käyttäen pohjana keinotekoisesti tehtyä fosforiliuosta fosforilannoitteesta, vesiliukoisesta kiteisestä monoammoniumfosfaatista, sekä Huittisten jätevedestä, välillä lisäten yleisiä, nykyisin käytössä olevia polymeerejä ja välillä ilman. Ennen ja jälkeen yhdisteiden lisäyksen liukaisen fosforin tuloksia verrattiin toisiinsa.

7.5.2. Fosforinsaostustulokset

Magnesiumsulfaatilla liukaisen fosforin määrä ei juurikaan vähentynyt. Eri määriä magnesiumhydroksidia lisättiin noin 7 mg/l liukaisen fosforin fosforilaimennokseen. Parhaimmillaan 1000 mg/l ja 500 mg/l magnesiumhydroksidiannoksilla kuivana liukaisen fosforin vähenemät olivat luokkaa 42–48 %. Pienemmillä annoksilla liukoinen fosfori ei juurikaan vähentynyt. Sama koe tehtiin niin, että alkuperäiseksi liukaisen fosforin pitoisuudeksi yritettiin saada 14 mg/l. Suuremmilla hydroksidiannostuksilla 1000 mg/l ja 500 mg/l liukaisen fosforin vähenemät olivat 53–54 %. Kun magnesiumhydroksidia lisättiin Huittisten jäteveteen pitoisuuksilla 100–500 mg/l, vähenemät olivat 56–74 %.

Polymeerejä tutkittiin magnesiumsulfaatin ja magnesiumhydroksidin kanssa ja parhaiten toimivaa polymeeriä yksin. Ensin pitäen jätevetenä fosforilaimennosta ja sitten Huittisten jätevettä. Huittisten jätevettä tutkittiin vain magnesiumhydroksidin kanssa. Polymeerit eivät juurikaan vaikuttaneet tulokseen sulfaatilla.

Magnesiumhydroksidin kanssa kationiset ja nonioninen polymeeri ei auttanut fosforin saostuksessa fosforilaimennoksella. Tulokset olivat huonompia kuin ilman polymeeriä. Ilmeisesti polymeerin jokin ainesosa häiritsi mittauksia, koska vähenemät olivat suurimmalla osalla miinusmerkkisiä.

Huittisten jäteveden kanssa yksi kationinen polymeeri, joka on käytössä puhdistamolla, oli selvästi paras polymeeri, ja muilla polymeereillä polymeerin jotkin ainesosat tuntuivat häiritsevän tulosta ja suodatettukin tulos oli heikompi kuin pelkällä magnesiumhydroksidilla.

Sillä ei ollut juurikaan merkitystä, oliko alkuperäinen liukaisen fosforin määrä liuoksessa 7 mg/l vai 14 mg/l, vähenemät olivat prosenttiosuuksissa samansuuntaisia kummassakin.

Polymeerin tarkoitus on helpottaa saostamista keräämällä hiukkasia yhteen isommiksi partikkeleiksi. Kokeissa ei selvää näkyvää saostumaa syntynyt, mutta polymeerit auttoivat liukaisen fosforin vähentymisessä magnesiumsulfaatilla ja fosforilaimennoksella. Paras tulos syntyi yhdellä kationisella polymeerillä ilman magnesiumyhdisteitä. Kuten Ebeling et al. tutkimuksissaan vuonna 2005 huomasi, että polymeeri poistaa fosforia vedestä, näin tämän polymeerin kanssa kävi. Rintala 2021 totesi opinnäytetyössään, että polymeerin varauksella tai molekyylipainolla ei ollut tilastollisesti merkittävää eroa puhdistustuloksen kannalta, ja että puhdistustulosta voisi periaatteessa tehostaa millä tahansa

polymeerillä. Yleisesti on huomattu, että erilaisia polymeerejä pitää vain kokeilla, eikä etukäteen voi tietää, mikä toimii parhaiten.

Huittisten jäteveden ja magnesiumhydroksidin kanssa polymeerit käyttäytyivät vaihtelevasti, mutta eivät kuitenkaan merkittävästi parantaneet tulosta.

8. Teknitaloudellinen tarkastelu

Hankkeessa tehtiin erilaisia prosessointi- ja rikastuskokeiluja jätevesilietteilä ja mädätysjäännöksillä tavoitteena saada laadukas lannoitetuote. Kokeilujen prosessoinnit onnistuivat teknisesti hyvin ja tuloksena saatiin kuivattuja lannoitetuotteita, joiden ravinnepitoisuudet ja haitta-ainepitoisuudet analysoitiin. Poikkeuksena tutkituista jakeista ainoastaan infrapunakuivauksen kokeilut, joissa lisättiin typpikonsentraattia, eivät onnistuneet typpikonsentraatin viskositeetin ja koostumuksen vuoksi.

8.1. Struviitti

Struviittisaostuskokeiluissa tuotteena saatiin fosfaattisakkaa, josta noin puolet oli struviittia eli magnesiumammoniumfosfaattia ja loput magnesium- ja kaliumfosfaatteja, jotka kaikki ovat lannoitetuotteita. Fosforia saatiin talteen 500 l kontissa olevasta jätevedestä yli 90 % ja siitä saatiin valmistettua struviittia sisältävää fosfaattisakkaa noin 1 kg. Kokeilujen perusteella sakasta on noin puolet struviittia ja puolet muita lannoitekelpoisia fosfaatteja. Koska tässä hankkeessa valmistettiin vain pieni määrä struviittia, ei sen teollisia valmistuskustannuksia voida vielä tämän kokeilun perusteella tarkasti laskea.

Teoreettinen struviitin saantopotentiaali koko jätevesipuhdistamon tulovirtaamasta tämän kokeen perusteella olisi vuodessa 36 t. Struviitin valmistuksen taloudellisuutta rajoittava tekijä on lietteen vanhenemisen ja kiteiden muodostumisen vaatima aika, joitten takia struviittia täytyy valmistaa panostyyppisesti. Struviitin hinta maailmanmarkkinoilla on 0–500 eur/t (nollan minimiarvo liittyy paikalliseen tilanteeseen ilman sopivia markkinoita) (De Vrieze et al. 2019).

Fosforin talteenoton kustannuksista struviittina on otettava myös huomioon kustannukset, jotka aiheutuvat jätevedenpuhdistamon siirtymisestä BioP-prosessiin ja toisaalta on otettava huomioon säästöt, joita saavutetaan kemikaalien vähentämisen ja lietteiden kuljetuskustannusten säästön myötä. Prosessin kehitys BioP-tyyppiseksi on vaatinut Huittisten Puhdistamolta tutkimusresursseja ja pieniä muutoksia prosessiin, mutta ei esimerkiksi suuria allas- tai laiteinvestointeja. Huittisten Puhdistamolla kemikaaleissa ja kuljetuksissa säästö verrattuna kemialliseen fosforin talteenottoon on ollut n. 25 000 eur vuodessa.

8.2. Mikrobikäsittely bioliete

Mikrobikäsittelyssä lisättiin prosessiin apuaineiksi orgaanisia jakeita, jotka parantavat prosessoinnin suorittamista sekä nostavat lannoitetuotteen orgaanista pitoisuutta ja hiilipitoisuutta. Ravinnepitoisuudet olivat pääravinteiden osalta normaalilla kierrätyslannoitetasolla. Metallipitoisuudet vähenivät verrattuna käsittelemättömään tuotteeseen johtuen apuaineista.

Mikrobikäsittelyssä kustannuksia tulee mahdollisista orgaanisista apuaineista, mikäli niitä ei saa hyödynnettyä täysin sivutuotteena ilman kustannuksia. Biopallo-käsittely vaatii myös energiaa. Itse prosessi alkuvaiheen jälkeen on autoterminen. Teknologiatoimittajan mukaan esimerkiksi 53 000 t/vuosi tuottavan teollisen mittakaavan laitoksen käsittelyssä lopputuotteen omakustannushinta on n. 25 € - 35 €/t riippuen läpimenoajasta eli reseptistä. Kustannus sisältää energiankulutuksen kustannukset, 2 hlön palkkakustannukset, huollon ja varaosat, prosessin/reseptin tukiaineet (mm. hake). Tukiaineiden tarve ja

määrä riippuu primäärijakeesta ja reseptistä, jolla prosessi saadaan käyntiin (C/N-suhde). Tonnihintaan ei ole sisällytetty laitosinvestointia. Lopputuotteen markkinahintaa ei ole arvioitu, koska siihen vaikuttaa moni asia. Prosessista syntyvä lopputuotetta voidaan esim. rakeistuksen yhteydessä vielä terästää esimerkiksi urealla tai ammoniumsulfaatilla AMS, mikä lisää kustannuksia, mutta myös lannoitteen arvoa. Lopputuote voi olla jo sellaisenaan maanparannusaine tai turpeen korvaava raaka-aine kasvualustoihin. Mitä lyhyempi läpimenoaika on, sitä edullisempi on tonnihinta. UPM Rauman sekalietteen koeajojen läpimenoaika oli 1½ vuorokautta, ja siitä voidaan hinnaksi arvioida 30 €/tn. Teknologiatoimittajan koeajojen perusteella on huomattu että, kun mikrobikanta vahvistuu, niin teollisen prosessin läpimenoaika lyhenee, ja sillä on suora vaikutus tonnihintaan. Arviolta UPM Rauman lietteen teollisen prosessin läpimenoaika lyhenemisen vaikutuksesta lopullisen tuotteen kustannukset voisivat olla 25 €/tonni.

8.3. Infrapunakuivattu ja rikastettu mädätysjäänös

Infrapunakuivatuissa lannoitetuotteissa oli ravinnepitoisuudet pääravinteiden osalta normaalilla kierrätyslannoitetasolla ja lisäksi magnesiumituotteiden lisäys luonnollisesti nosti tuotteiden magnesiumpitoisuutta. Infrapunakuivatuissa tuotteissa haitta-ainepitoisuudet olivat matalalla tasolla lukuun ottamatta vähäisiä metallipitoisuuksien nousuja. Koska metalleja ei lisätty tai niitä ei voinut siirtyä prosessin aikana tuotteeseen, pääteltiin, että nousut johtuivat todennäköisesti siitä, että infrapunakuivauksessa säteilylämpötila on niin korkea, että tapahtui joidenkin aineiden höyrystymistä ja orgaanisen aineksen solun sisäistä kuivumista. Tuote oli infrapunakuivauksen jälkeen kevyempää kuin laboratorion kuiva-ainepitoisuusmäärittelyn jälkeen. Tämä kuivumisilmiö lisää haihtumattomien jakeiden painoprosenttisuutta kuivapainossa.

Infrapunakuivauksen energia- ja henkilökustannukset ovat 40 eur/m³. Tällä hetkellä viljelijät maksavat käytännössä määrän tai lingotun tuotteen kuljetuksesta ja mahdollisesti levityksestä ja itse tuotteen hinta on vähäinen. Infrapunakuivatun ja tuotteistetun lannoitteen hyödyt tulevat viljelijälle lannoitteen laadusta, helposta varastoinnista, kuljetuksesta ja levityksestä. Lisäksi tuotteesta saadaan hajutonta infrapunakuivauksen jälkeen. Mikäli taas jätevesiliete kuivattaisiin suoraan lannoitteeksi ilman mädätystä, se toisi säästöjä jätevesipuhdistamon kustannuksiin. Infrapunakuivauksen käyttökustannukset ovat 40 eur/m³ ilman investointikustannusta ja mädätyksen kustannukset kuljetuksineen n 80 eur/m³. Infrapunakuivatuista lietteistä laskettiin teollisen mittakaavan kustannusten eri skenaariot: 1) kun liete ainoastaan kuivataan 2) kun liete kuivataan ja myydään ja 3) liete tuotteistetaan lannoitteeksi ja myydään. Skenaarioita verrattiin nykyisiin mädätyskustannuksiin. Oletusarvoina oli, että lietemäärä olisi 1000 m³/a ja lietteen nykyinen käsittelykustannus olisi 80 eur/m³. Siten lietteen nykyinen käsittelykustannus olisi 80 000 eur/a. Skenaariolla 1 päästään 50 000 euron/a säästöihin, skenaariolla 2 säästöt olisivat 77 000 eur/a, skenaariolla 3 säästöt olisivat 132 000 euron/a säästöihin. Tällöin on kuitenkin huomattava, että lietteen sisältämä energia jää hyödyntämättä, kun lietettä ei mädätetä. (J. Kuntonen, Paskier feasibility study)

8.4. Fosforinsaostus magnesiumilla

Fosforinsaostuskokeissa magnesiumhydroksidin kanssa Huittisten jätevedellä päästiin liukoisen fosforin vähenemään yli 74 %. Tämä on hyvä tulos ja puoltaa sitä, että magnesiumhydroksidia voisi käyttää fosforin saostuksessa jätevesilaitoksilla. Kationiset polymeerit voivat auttaa fosforin saostuksessa kunnallisesta jätevedestä (Kartsalo 2022), mutta näissä kokeissa Huittisten jätevedellä ei saatu aikaiseksi merkittävää parannusta.

Magnesiumhydroksidi siis saostaa fosforia jätevedestä, mutta ei välttämättä ole tarpeeksi tehokas ainoana saostajana. Seuraavassa hankkeessa tutkitaan tätä lisää. Se on järkevää, koska magnesiumhydroksidin käyttö mahdollistaisi rauta- ja alumiiniyhdisteiden käytön vähentämisen ja magnesium itsessään on hyvä ravinne kasveille.

9. Johtopäätökset

Hankkeen aikana kierrätyslannoitteiden tarve ja niiden käytön selvittäminen on osoittautunut vieläkin ajankohtaisemmaksi kuin alun perin arveltiin. Tähän on vaikuttanut sota Ukrainassa, lannoitteiden hintojen nousu ja Suomen huoltovarmuuden parantaminen lannoitemarkkinoilla.

Yrityksiltä on tullut positiivista palautetta hankkeen aihetta kohtaan. Yritykset ovat olleet hyvin valveutuneita omista mahdollisuuksistaan ja kiinnostuneita parantamaan omia prosessejaan ravinteita talteen ottavaan suuntaan ja hyödyntää nykyisiä sivuvirtojaan kierrätyslannoitetuotantoon. Monessa tapauksessa rajoittavana tekijänä yrityksillä on ajan ja resurssien puute asian tutkimiseen ja kehittämiseen. Hanke on antanut apuja ja ollut vetävänä tekijänä asioiden eteenpäin viemiseen. Satakuntalaisista yrityksistä, joihin otettiin yhteyttä, suurin osa oli vähintään jossain määrin kiinnostunut asiasta. Viisi (5) yritystä lähti mukaan hankkeeseen rahoituserällä ja osallistumalla työpajoihin sekä antamalla omaa sivuvirtatuotantoaan jalostuksen kokeilukäyttöön.

Työpajojen yhteydessä löydettiin paljon yrityskohteita, joita voitaisiin lähteä tutkimaan. Valikoitujen toimenpiteiden tavoitteissa löydettiin synergiaa monen eri yrityksen kanssa. Työpajassa syntyi uusia työstettäviä ideoita sekä yhteistyömahdollisuuksia osallistuvien yritysten kesken. Hankkeessa mukana olleista yrityksistä ainakin kolme yritystä on lähtenyt suunnittelemaan kierrätyslannoitteiden jatkokehitystä hankkeen pohjalta.

Lähteet

ATAD. FUCHS ATAD-PROCESS. [Viitattu 27.6.2022] Saatavissa: https://isma.pagesperso-orange.fr/en_sat-documentation.html

Berlin T. 2023. Uudistettu lannoitelainsäädäntö. Prizztechin SATA-Ravinne Puhdistamolietteestä peltoravinteeksi -webinaari 30.3.2023. Saatavissa: https://www.prizz.fi/media/bio-ja-kiertotalous/bio-ja-kiertotalous-tapahtumat/puhdistamolietteesta-peltoravinteeksi/titta_berlin_mmm_30032023.pdf

Berninger K., Pihl T., Kasanen P., Mikola A., Tynkkynen O. & Vahala R. 2017. Jätevesien fosfori hyötykäyttöön – teknologioita ja ohjauskeinoja. Valtioneuvoston kanslia. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 62/2017.

Biopallo. [Viitattu 9.6.2022]. Saatavissa: <https://www.biopallo.com/>

Biopallo 2. [Viitattu 1.3.2023]. Saatavissa: <https://www.biopallo.com/miksi>

De Vrieze J., Colica G., Pintucci C., Sarli J., Pedizzi C., Willegghems G., Bral A., Varga S., Prat D., Peng L., Spiller M., Buysse J., Colsen J., Benito O., Carballa M. & Vlaeminck S. E. 2019 Resource recovery from pig manure via an integrated approach: A technical and economic assessment for full-scale applications, Bioresource Technology 272, 582–593

Ebeling J., Rishel K. & Sibrell P. 2005 Screening and evaluation of polymers as flocculation aids for the treatment of aquacultural effluent. Aquacultural Engineering Vol. 33, Issue 4. pp 235-249. Amsterdam. Elsevier.

Euroopan kemikaalivirasto. POP-yhdisteet tutuksi. [Viitattu 20.3.2023]. Saatavissa: <https://echa.europa.eu/fi/understanding-pops>

Eurofins 2020. Maan NIR-analyysi: Orgaanisen aineksen merkitys maan rakenteelle ja kasvukunnolle. [Viitattu 1.3.2023]. Saatavissa: <https://cdnmedia.eurofins.com/european-east/media/2853730/maan-nir-analyysi-orgaaninen-aines.pdf>

Farmit 2009. Tunnista magnesiumin puutosoireet kasvustosta – Magnesium ravinteena. [Viitattu 24.5.2022]. Saatavissa: <https://www.farmit.net/kasvinviljely/2009/04/01/tunnista-magnesiumin-puutosoireet-kasvustosta-magnesium-ravinteena>

Farmit b 2009. Tunnista fosforin puutosoireet kasvustosta – Fosfori ravinteena. [Viitattu 3.8.2022]. Saatavissa: <https://www.farmit.net/kasvinviljely/2009/03/26/tunnista-fosforin-puutosoireet-kasvustosta-fosfori-ravinteena>

Fjäder P. & Äystö L. 2021. Haitalliset aineet yhdyskuntalietteissä. SYKE. SATA-Ravinne webinaari 31.8.2021. Saatavissa: https://www.prizz.fi/media/bio-ja-kiertotalous/bio-ja-kiertotalous-materiaalit/syke_haitalliset-aineet-yhdyskuntalietteissa_pf_310821_la-jaettava.pdf

Gasum. Miten biokaasua tuotetaan? [Viitattu 4.5.2022]. Saatavissa: <https://www.gasum.com/kaasusta/biokaasu/biokaasu/miten-biokaasua-tuotetaan/>

Gasum 2. Säästä kustannuksissa – hyödynnä paikallisia kierrätyslannoitteita. [Viitattu 3.8.2022]. Saatavissa: <https://www.gasum.com/Yrityksille/mukaan-kiertotalouteen/kierratyslannoitteet/>

GESAMP (2015). "Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment" (Kershaw, P. J., ed.). (IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP/UNDP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection). Rep. Stud. GESAMP No. 90, 96 p.

Gonzàles-Morales C., Fernández B., Molina F., Naranjo-Fernández D., Matamoros-Veloza A. ja Camargo-Valero M. A. 2021. Influence of pH and temperature on struvite purity and recovery from Anaerobic Digestate. Sustainability, vol. 13 (19), p.10730. DOI: 10.3390/su131910730

Haavisto M. 2018. Puhdistamolietepohjaisten kierrätyslannoitteiden käytön esteet ja keinoja esteiden poistamiseksi. Prizztech Oy, Työ- ja elinkeinoministeriö, Satakuntaliitto.

Haavisto M., Luhtanen M., Vuorela J., Autioniemi A., Majjala P., Jaakkola S., Kirkkala T., Mikkilä E. 2020 Satakunnan biokaasulaitokset osana tehokasta ravinteiden kierrätystä. Prizztech Oy ja Pyhäjärvi-instituutti.

Halinen A. 2021. BioP-prosessi jätevedenpuhdistamolla. SATA-Ravinne - puhdistamolietteen jalostus lannoitekäyttöön -webinaari 31.8.2021. Saatavissa: https://www.prizz.fi/media/bio-ja-kiertotalous/bio-ja-kiertotalous-materiaalit/huittisten_puhdistamo_bio-p-2021.pdf

Hao X.D., Wang C.C., Lan L. & von Loosdrecht M.C.M. 2008. Struvite formation, analytical methods and effects of pH and Ca²⁺. Water Sci. Technol. 53: 191-198.

Hao X., Wang C., van Loosdrecht M.F.M., Hu Y. 2013. Looking beyond struvite for P-recovery. Environ. Sci. Technol. 49: 4965-4966.

John Nurmisen Säätiö 2021. Itämeren rehevöitymisen juurisyitä ratkotaan ravinnekarttojen ja -strategioiden avulla. [Viitattu 1.3.2023]. Saatavissa: <https://johnnurmisenfaatio.fi/itameren-rehevoitymisen-juurisyita-ratkotaan-ravinnekarttojen-ja-strategioiden-avulla/>

Kartsalo J. Sähköpostiviesti 3.2.2022. Kemira.

Kok D.-J., Pande S., van Lier J.B., Ortigara A., Savenije H., Uhlenbrook S. 2018. Global phosphorus recovery from wastewater for agricultural reuse. Hydrology and Earth System Sciences, 22, 5781-5799.

Konola I., Toivikko S. 2019. Yhdyskuntalietteen käsittelyn ja hyödyntämisen nykytilannekatsaus. Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 57. Suomen Vesilaitosyhdistys ry

Koskela M. 2022. Sähköpostikeskustelu 5.4.2022 ProAgria.

Kozik A., Hutnik N., Matynia A., Gluzinska J. & Piotrowski K. 2011. Recovery of phosphate(V) ions from liquid waste solutions containing organic impurities. Chemik, 65: 675-686.

Kuntonen J. 2022 Sähköpostikeskustelu 30.3.2022 Nanopar.

Kyttä V. 2019. Kierrätyslannoitteiden elinkaariset ympäristövaikutukset kauran (avena sativa) tuotannossa. Pro gradu. Helsingin yliopisto.

- Käytännön maamies 2020. Kalkkitaulukko. [Viitattu 10.7.2023]. Saatavissa: <https://kaytannonmaamies.fi/wp-content/uploads/2020/06/iso-kalkkitaulukko-2020.pdf>
- Köngäs & Liljendahl 2021. Lounais-Suomen ravinnekarttojen päivitys osana Sustainable biogas -hanketta. Vahanen Environment Oy. Saatavissa: <https://sustainablebiogas.eu/wp-content/uploads/2021/09/Official-rapport-in-Finnish.pdf>
- Laatulanointe 2021. Laatukäsikirja. [Viitattu 11.4.2022] Saatavissa: https://laatulanointe.fi/wp-content/uploads/2021/04/Laatukäsikirja_versio-2.1_korjatut-liitenumerot2.pdf
- Laitinen J., Alhola K., Manninen K., Säylä J. 2014. Puhdistamolietteen ja biojätteen käsittely ravinteita kierrättäen. Hankeraportti Suomen ympäristökeskus SYKE.
- Lakeuden Etappi. Ranu on tutkittu ja turvallinen käyttää. [viitattu 1.4.2022] Saatavissa: <https://julkaisut.etappi.com/etappi-aviisi-1-2019/etappi-aviisi-12019/ranu-turvallinen-kaytaa/index.html>
- Lehtoranta S., Malila R., Fjäder P., Laukka V., Mustajoki J., Äystö L. 2021. Jätevesien ravinteet kiertoon turvallisesti ja tehokkaasti. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 18/2021. Suomen ympäristökeskus
- Lemola R., Uusitalo R., Hyväluoma J., Sarvi M., Turtola E. 2018. Suomen peltojen maalajit, multavuus ja fosforipitoisuus. Luonnonvarakeskus.
- Lenntech. Phosphorus removal. [Viitattu 31.1.2022] Saatavissa: <https://www.lenntech.com/phosphorous-removal.htm>
- Leppämäki A. 2019. Biopolymeerien käyttö vesienpuhdistuksessa ja ravinteiden kierrätyksessä. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö
- Liao P., Gao Y. & Lo K. 1993. Chemical precipitation of phosphate and ammonia from swine wastewater. Biomass and Bioenergy, Vol. 4, No. 5, pp. 365–371.
- Luke 2022. Tilastotietokanta. [Viitattu 22.2.2023]. Saatavissa: <https://statdb.luke.fi/PxWeb/pxweb/fi/LUKE/>
- Maa- ja metsätalousministeriö. Lannoitevalmisteet. [Viitattu 20.2.2023]. Saatavissa: <https://mmm.fi/elaimet-kasvit/lannoitevalmisteet>
- Maa- ja metsätalousministeriön ja ympäristöministeriön työryhmä. 2011. Suomesta ravinteiden kierrätyksen mallimaa. Helsinki. [Viitattu 10.7.2023]. Saatavissa: https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Suomesta-ravinteiden-kierrätyksen-mallimaa-D86BF824_5399_426A_80A5_A86AF13DB955-31378.pdf/88c34625-938d-ee1e-c89c-afbee6e6b44a/Suomesta-ravinteiden-kierrätyksen-mallimaa-D86BF824_5399_426A_80A5_A86AF13DB955-31378.pdf?t=1603260568024
- Magnusson, K. & Norén, F. 2014. Screening of microplastic particles in and down-stream a wastewater treatment plant. IVL Swedish Environmental Research Institute, Number C 55 August 2014 Report
- Maijala P., Kirkkala T. & Jori M. 2019. SATAKUNNAN BIO- JA KIERTOTALOUDEN KASVUOHJELMA, Kiertotalouden symbioosien mallin luominen biokaasulaitosten ympärille. Pyhäjärvi-instituuttisäätiö. Saatavissa: <https://satakunta.fi/wp-content/uploads/2020/11/Kiertotalouden-symbioosien-mallit-biokaasulaitoksen-ymparille.pdf>

Marttinen S., Venelampi O., Iho A., Koikkalainen K., Lehtonen E., Luostarinen S., Rasa K., Sarvi M., Tampio E., Turtola E., Ylivainio K., Grönroos J., Kauppila J., Koskiahio J., Valve H., Laine-Ylijoki J., Lantto R., Oasmaa A. & Castell-Rüdenhausen M. Kohti ravinteiden kierrätyksen läpimurtoa – Nykytila ja suositukset ohjauskeinojen kehittämiseksi Suomessa. 2017. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 45/2017. Luonnonvarakeskus, Helsinki.

MetsäGroup. Tuotannon sivuvirrat hyödynnetään tehokkaasti. [Viitattu 20.2.2023]. Saatavissa: <https://www.metsagroup.com/fi/vastuullisuus/ilmasto-ja-ymparisto/sivuvirtojen-hyodyntaminen/>

Muoviteollisuus. [Viitattu 15.12.2022] Saatavissa: <https://www.plastics.fi/fi/>

Muys M., Phukan R., Brader G., Samad A., Moretti M., Haiden B., Pluchon S., Roest K., Vlaeminck S., Spiller M. 2020. A systematic comparison of commercially produced struvite: Quantities, qualities and soil-maize phosphorus availability. Science of the Total Environment Volume 756 (2021) 143726.

Nanopar. Paskier® Prosessi. [Viitattu 5.4.2022] Saatavissa: <https://www.nanopar.fi/fi/paskier-prosessi/>

Perko H. 2022. Puhelinkeskustelu 28.3.2022. Prizztech

POP-asetus 2019. Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R1021&from=fi>

ProAgria 2013. Puhdistamolietteen käyttö maataloudessa. Julkaisija: Vesilaitosyhdistys. ISBN 978-952-6697-91-8

ProAgria Länsi-Suomi 2020. Lanta tehokkaaseen käyttöön. ISSN 2342–8651

RE-tilan materiaali. [Viitattu 20.1.2023]. Saatavissa: <http://ravinnejaenergia.fi/materiaali/omalannoitteet/lannanlevittimet/>

RIL. 2004. 124–2–2004 Vesihuolto II. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry

Rinta-Harri A. 2022. Sähköpostikeskustelu 18.3.2022 Berner Chemicals

Rintala V. 2021. Polymeerin valinta Kuhasalon jätevedenpuhdistamolle. Opinnäytetyö. Karelia-ammattikorkeakoulu

Ruokatieto. Satakunta. [Viitattu 3.2.2023] Saatavissa: <https://ruokatieto.fi/ruokatieto/ruokakulttuuri/alueelliset-erot-ja-erikoisuudet/satakunta/>

Ruokavirasto. [Viitattu 5.4.2022] Saatavissa: <https://www.ruokavirasto.fi/yritykset/rehu--ja-lannoiteala/lannoitevalmisteet/laatuvaatimukset/kierratysravinteet/jatevesilietteet/>

Ruokavirasto 2. Sivutuotteiden luokittelu. [Viitattu 4.5.2022] Saatavissa: <https://www.ruokavirasto.fi/yritykset/elainala/elaimista-saatavat-sivutuotteet/sivutuotteiden-luokittelu/>

Ruokavirasto 3. [Viitattu 6.6.2022] Saatavissa: <https://www.ruokavirasto.fi/viljelijat/opaat/sitoumus-ja-sopimusehdot/ymparistokorvauksen-sitoumusehdot/ymparistokorvauksen-sitoumusehdot-2022/#ympysitoumus>

Ruokavirasto 4. [Viitattu 11.8.2022] Saatavissa: <https://www.ruokavirasto.fi/yritykset/rehu--ja-lannoiteala/lannoitevalmisteet/lannoitelan-toiminta/lainsaadanto/tyyppinimi/>

Ruokavirasto 5. KANSALLINEN LANNOITEVALMISTEIDEN TYYPPINIMILUETTELO. [Viitattu 11.8.2022] Saatavissa: https://www.ruokavirasto.fi/globalassets/yritykset/lannoiteala/tiedostot/tyyppinimiluettelo_konsolidoitu_22_11_2019.pdf

Ruokavirasto 6. Orgaanisen lannoitteen tuoteseloste. [Viitattu 1.3.2023] Saatavissa: <https://www.ruokavirasto.fi/kasvit/lannoitevalmisteet/laatuvaatimukset/pakkausmerkinnat/orgaaniset-lannoitteet/>

Ruokavirasto 7. Kansallisen lannoitelain siirtymäkausi 31.12.2024 saakka. [Viitattu 2.5.2023] Saatavissa: <https://www.ruokavirasto.fi/kasvit/lannoitevalmisteet/uusi-lannoitelaki/siirtymaajat/>

Ruokavirasto 8. EU:n uusi lannoitevalmisteasetus (2019/1009). [Viitattu 14.7.2023] Saatavissa: <https://www.ruokavirasto.fi/kasvit/lannoitevalmisteet/eun-uusi-lannoiteasetus/>

Ruokavirasto 9. Lainsäädäntö. [Viitattu 14.7.2023] Saatavissa: <https://www.ruokavirasto.fi/kasvit/lannoitevalmisteet/lannoitelan-toiminta/lainsaadanto/>

Ruokavirasto 10. Tyyppinimi. [Viitattu 14.7.2023] Saatavissa: <https://www.ruokavirasto.fi/kasvit/lannoitevalmisteet/lannoitelan-toiminta/lainsaadanto/tyyppinimi/>

Ruokavirasto 11. Tuoteluokat ja ainesosaluokat. [Viitattu 14.7.2023] Saatavissa: <https://www.ruokavirasto.fi/kasvit/lannoitevalmisteet/uusi-lannoitelaki/tuoteluokat-ja-ainesosaluokat/>

Ruokavirasto 12. Kierrätysravinteet. [Viitattu 14.7.2023] Saatavissa: <https://www.ruokavirasto.fi/kasvit/lannoitevalmisteet/laatuvaatimukset/kierratysravinteet/>

Satafood. Sivuvirroista luomulannoite kasvihuonetuotantoon – Luomukas. [Viitattu 15.3.2023] Saatavissa: <https://www.satafood.net/hankkeet/sivuvirroista-luomulannoite-kasvihuonetuotantoon-luomukas/>

Satakuntaliitto 2020. Elinvoimaa ja lisäarvoa metsien sivuvirroista Satakunnassa – Satakunnan metsätalouden kasvuohjelma. Saatavissa: https://satakunta.fi/wp-content/uploads/2021/01/kasvuohjelma_low.pdf

Seppänen A-M., Luostarinen S. & Pesonen L. 2019 Kierrätyslannoitus – Suunnittelu, käytännöt ja mahdollisuudet tulevaisuudessa. Luke

Sitra 2021. Soilfood jalostaa lannoitteita teollisuuden sivuvirroista: ”Jalostetut tuotteet tekevät maanviljelijöiden pelloista hiilinieluja”. [Viitattu 15.3.2023]. Saatavissa: <https://www.sitra.fi/caset/soilfood-jalostaa-lannoitteita-teollisuuden-sivuvirroista-jalostetut-tuotteet-tekevät-maanviljelijöiden-pelloista-hiilinieluja/>

Suomen Biokierto ja Biokaasu ry. Tilastot. [Viitattu 3.3.2023]. Saatavissa: <https://biokierto.fi/tilastot/>

Suomen Vesilaitosyhdistys. 2016. Teknis-taloudellinen tarkastelu jätevesien käsittelyn tehostamisesta Suomessa. Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 42. Helsinki.

Sääluoto K. 2018. Struviitin valmistus. Hämeen ammattikorkeakoulu

Tampio E., Luostarinen S., Kapuinen P., Kykkänen S., Pyykkönen V., Rasa K., Seppänen A-M. Termonen M, Winquist E. & Järvenranta K. 2022. Maatalouden, yhdyskuntien ja elintarviketeollisuuden biomassojen kierrätyspotentiaali, prosessointi lannoitevalmisteiksi, logistiikka ja käyttö maataloudessa. Julkaisussa: Vainio, E. (toim.). 2022. Maatalouden typpihaaste – vaihtoehtoja ja ratkaisuja: Synteesiraportti. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 53/2022. Luonnonvarakeskus. Helsinki. s.

Thelin G. 2016. Struvite – a technique for P recovery. Malmö. [Viitattu 8.7.2022] Saatavissa: https://d1pdf7a38rpjk8.cloudfront.net/fileadmin/user_upload/1025_Gunnar_Thelin_EkoBalans.pdf

Toivikko S. 2023. Vesihuolto ja kiertotalous. Vesilaitosyhdistyksen webinaari 16.2.2023

Tuloslaari. [Viitattu 3.6.2022] Saatavissa: <http://www.tuloslaari.fi/>

UPM 2022. Kierrätysravinteiden piilevä potentiaali. [Viitattu 11.7.2023]. Saatavissa: <https://www.upm.com/fi/artikkelit/kiertotalous/22/kierratysravinteiden-piileva-potentiaali/>

Vieno N. & Arjonen M. 2021. Uudet haitalliset aineet suomalaisilla jätevedenpuhdistamoilla. Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 70, Helsinki.

Vieno, N., Sarvi, M., Salo, T., Rämö, S., Ylivainio, K., Pitkänen, T. & Kusnetsov, J. 2018. Puhdistamolietteen sisältämien haitta-aineiden aiheuttamat riskit lannoitekäytössä. Luonnonvarakeskus, Helsinki. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 58/2018. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-661-2>

Yara. Typpi. [Viitattu 2.5.2022] Saatavissa: <https://www.yara.fi/lannoitus/ravinteet/typpi/>

Yara 2. Kalium. [Viitattu 2.5.2022] Saatavissa: <https://www.yara.fi/lannoitus/ravinteet/kalium/>

Yara 3. Lannoiteopas 2020–2021. [Viitattu 6.6.2022] Saatavissa: https://www.yara.fi/contentassets/933fda523d41435ca01181ddbd46f4b1/yara_lannoiteopas_2020_fi_040_9.pdf/

Yara 4. Yara ja UPM kehittävät yhteistyössä kierrätyslannoitetta. [Viitattu 21.2.2023]. Saatavissa: <https://www.yara.fi/tietoa-yarasta/vastuullisuus/ymparisto/kiertotalous-yaran-toiminnassa/kierratyslannoite/>

Ympäristöministeriö. Ravinteiden kierrätysohjelma. [Viitattu 20.2.2023]. Saatavissa: <https://ym.fi/ravinteidenkierratys>