



Kanadanvesiruton kuiva- mädätys ja mädätteen jatkojalostus

Biomassat kiertoon Koillismaalla (Elodea III)

Ari-Matti Seppänen, Niina Honkala, Nora Pap, Markku Vainio, Lea Hiltunen

Rahoittajien logot



**Euroopan unionin
osarahoittama**

Uudistuva ja osaava Suomi 2021–2027





Kirjoittajat: Ari-Matti Seppänen, Niina Honkala, Nora Pap, Markku Vainio, Lea Hiltunen

Copyright: Luonnonvarakeskus (Luke)

Julkaisija: Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki 2025 Julkaisuvuosi: 2025

Kannen kuva: Ari-Matti Seppänen

Sisällys

1. Työn tavoitteet	5
2. Materiaalit.....	6
3. Kuivamädätys suotopetireaktorissa	7
4. Mädatteen esikäsittely.....	10
5. Kuivajakeen jatkojalostus.....	13
6. Nestejakeen jatkojalostus	17
6.1. Nestejakeen esikäsittely, reaktori 1	17
6.2. Kalvosuodatukset, reaktori 1.....	19
6.3. Nesteen esikäsittely, reaktori 2.....	21
6.4. Kalvosuodatukset, reaktori 2.....	22
6.4.1. Mikro-suodatus	22
6.4.2. Käänteisosmoosi	23
7. Jatkojalostuksen massavirtaumat ja hävikit.....	25
8. Teknologioiden skaalautuvuus ja kustannustehokkuus	27
9. Mädatteesta tuotettujen jakeiden testaus kontrolloiduissa olosuhteissa	28
Lähteet	
LIITE 1	

1. Työn tavoitteet

Tässä Biomassat kiertoon Koillismaalla (ELODEA III) hankkeen työkokonaisuudessa tavoitteena oli kehittää menetelmiä, joilla kanadanvesirutto (*Elodea canadensis*) saadaan hyödynnettyä tehokkaasti sekä energiantuotantoon että lannoitevalmisteiden raaka-aineena. Korjatun kanadanvesiruton biokaasukokeilla (Syken toimeksiantama tilaustutkimus) selviää massan energiantuotantopotentiaali ja siitä jäljelle jäävän mädätysjäännöksen jatkojalostaminen kierrätyslannoitteeksi mahdollistaa vesiruton sisältämien ravinteiden paremman hyödynnettävyyden ja kuljetettavuuden. Tulosten pohjalta arvioitiin myös onko käytetyt menetelmät teknologiansa ja kustannustehokkuutensa puolesta skaalattavissa suurempaan mittakaavaan. Biokaasutuskokeet ja mädätysjäännöksen jatkojalostusprosessien kehittäminen toteutettiin Luken Biokaasun ja ravinteiden kierrätyksen pilotti- ja koealustalla Biopajalla, Jokioisilla kesän 2024 – kevään 2025 aikana Mädätysjäännöksestä tuotettujen kuiva- ja nestejakeiden vaikutuksia kasvien alkukehitykseen testattiin Luke Oulussa. Hanke sai rahoitusta Euroopan unionilta Uudistuva ja osaava Suomi 2021–2027 -ohjelmasta Pohjois-Pohjanmaan liiton kautta.

2. Materiaalit

Kanadanvesirutto (kuva 1) toimitettiin hankkeen toimesta Luken Biopajalle toukokuussa 2024. Perkolaationesteenä käytettiin Metener Oy:n Palopuron biokaasulaitoksen perkolaationestettä, joka noudettiin biokaasulaitokselta 31.5.2024. Kanadanvesirutto säilytettiin ulkona paalattuna ja perkolaationeste huoneenlämpötilassa kuivamädätyskokeen aloitukseen. Koe käynnistettiin 5.6.2024.

Kanadanvesiruton ja perkolaationesteen analyysitulokset on esitetty taulukossa 1. Kuiva-aineen (total solids, TS) ja orgaanisen aineen pitoisuuksien (volatile solids, VS) määritykset tehtiin standardin SFS 3008¹ mukaisesti. Kokonaistypen (N_{tot}) määrittäminen tehtiin Kjeldahl-tekniikalla, rikkihappopoltto ja tislauksen Kjeltec-analysaattorilla (Luken sisäinen menetelmä JOK3004). Liukoisen ammoniumtypen (NH_4-N) määrittäminen tehtiin suoralla tislauksella Kjeltec-analysaattorilla. Fosforin (P_{tot}) ja kaliumin (K_{tot}) määrittäminen tehtiin hajotusmenetelmällä käyttäen typpihappomärkäpolttoa ja mittaus ICP-OES:llä (Luken sisäinen menetelmä JOK3001).

Taulukko 1. Vesiruton ja perkolaationesteen kuiva-ainepitoisuus TS ja orgaanisen aineen pitoisuus VS.

	TS %	VS %	N % tp	NH_4-N % tp	P g/kg tp	K g/kg tp	Sähkön- johtavuus $\mu S/cm$
Kanadanvesirutto	23,62	20,68	0,66	0,16	1,20	5,42	
Perkolaationeste	3,32	1,09	0,29	0,20	0,113	8,58	6370

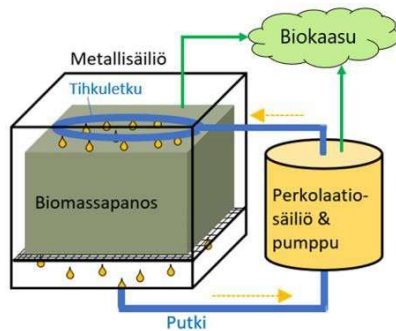


Kuva 1. Vesiruttopaali.

¹ SFS 3008. Veden, lietteen ja sedimentin kuiva-aineen ja hehkutusjäännöksen määrittäminen. Suomen standardoimisliitto 1990.

3. Kuivamädätys suotopetireaktorissa

Kuivamädätyskoe toteutettiin Luken Jokioisten Biopajan kahdessa rinnakkaisessa 1 m³ pilot-mittakaa-
van suotopetireaktorissa 5.6.-24.10.2024 Suotopetireaktorissa biomassan läpi valutetaan mikrobeja
sisältävää perkolaationestettä, joka pumpataan reaktorin pohjalta takaisin perkolaationestesäiliöön.
Prosessilämpötila ylläpidetään 37 °C:ssa. Suotopetireaktorin toimintaperiaate on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. Suotopetireaktorin toimintaperiaate (Ville Pyykkönen, Luke)

Kokeen käynnistyksen yhteydessä molemmat reaktorit täytettiin kanadanvesirutolla (kuva 3). Kokeen
alussa perkolaationestettä lisättiin molempien reaktoreiden perkolaatiosäiliöihin 140 l. Prosessiin
alussa perkolaationestettä imeytyy materiaaliin, jolloin perkolaationestesäiliöihin joudutaan lisää-
mään vettä. Tässä kokeessa perkolaationestesäiliöihin lisättiin vettä kahden ensimmäisen viikon ai-
kana. Kanadanvesiruton ja perkolaationesteen sekä orgaanisen kuiva-aineen (VS) määrä per reaktori
on esitetty taulukossa 2.

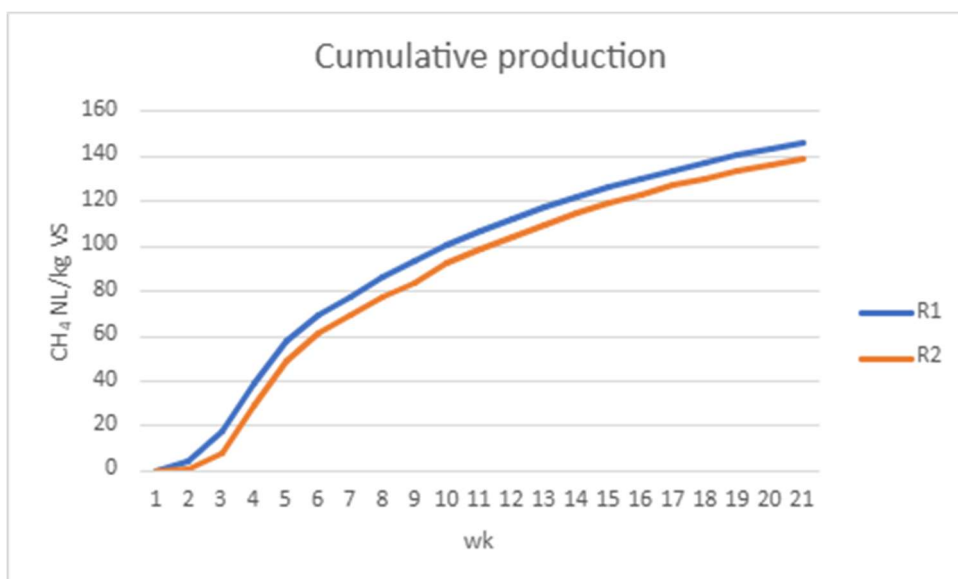
Taulukko 2. Reaktorikohtaiset massat ja orgaanisen kuiva-aineen (VS) määrät.

	Reaktori 1 (R1)	Reaktori 2 (R2)
Kanadanvesirutto kg	229	230
Kanadanvesirutto kg VS	47,37	47,57
Perkolaationeste l	140	140
Perkolaationeste kg VS	1,53	1,53
Yhteensä VS per reaktori kg	48,90	49,10
Vesilisäys l	97	104

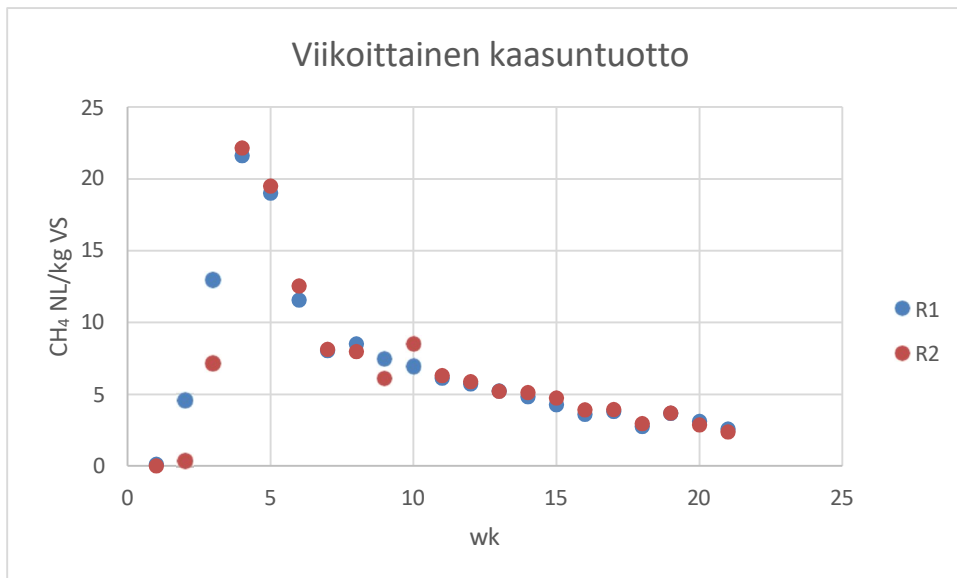


Kuva 3. Kanadanvesiruttoa reaktorissa.

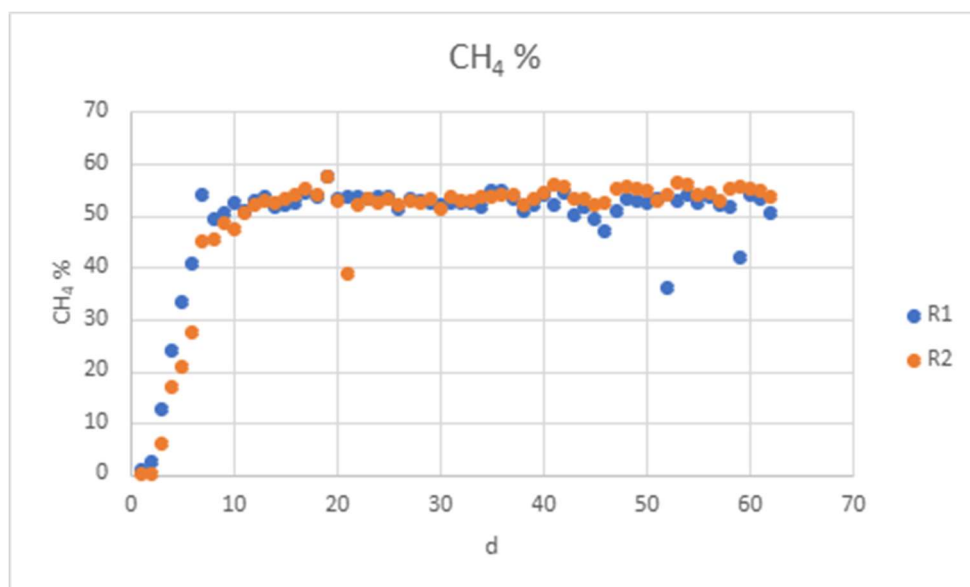
Kumulatiivinen kaasuntuotto oli rinnakkaisilla reaktoreilla samankaltaista (kuva 4). Kokonaistuotto oli reaktorissa 1 (R1) 146 normaali litraa (NL)/kg VS ja reaktorissa 2 (R2) 139 NL/kg VS. Ero todennäköisesti johtuu R2:n perkolaationestesäiliön vuodosta kokeen alussa. Verrattuna aikaisempiin suotopetireaktorikokeiden tuloksiin härkävavulla (340 l/kg VS) ja hevosenlantahärkävavuseoksella (190 l/kg VS) (Pyykkönen et al. 2023) kokonaistuotto jäi hieman alhaisemmaksi. Kuvasta 4 ja 5 käy ilmi, että prosessin käynnistyttyä metaanintuotto oli nopeaa neljänteen viikkoon asti ja tasaantui sen jälkeen, mikä on tyypillistä kyseiselle reaktorityypille. Metaanin tuotto oli kuitenkin kokeen lopussa edelleen 2,5 NL/kg VS. Tämä viittaa siihen, että kokeen päättyessä panoksessa oli hajoamatonta orgaanista ainesta jäljellä. Tuotetun raakabiokaasun metaanipitoisuus nousi molemmissa reaktoreissa yli 50 % 10 päivässä ja pysyi tällä tasolla muutamia mittauspoikkeamia lukuun ottamatta kokeen loppuun saakka (kuva 6). Kaasun metaanipitoisuus oli molemmissa reaktoreissa suotopetireaktorille tyypillisellä tasolla.



Kuva 4. Kumulatiivinen kaasuntuotto reaktorissa 1 (R1) ja reaktorissa 2 (R2).



Kuva 5. Biokaasun viikkotuotto reaktorissa 1 (R1) ja reaktorissa 2 (R2).



Kuva 6. Tuotetun biokaasun metaanipitoisuus (CH₄) reaktorissa 1 (R1) ja reaktorissa 2 (R2).

4. Määtteen esikäsittely

Kuivamädätyskokeen päätyttyä reaktorit pumpattiin mahdollisimman tyhjäksi perkolaationesteestä ja mädäte (kuva 7) kerättiin talteen. Reaktorin 1 mädätettä oli 197 kg ja reaktorin 2 mädätettä 194 kg. Molempien reaktoreiden mädähteistä otettiin kaksi rinnakkaista näytettä, jotka toimitettiin Luken Jo-
kioisten laboratorioon analysoitavaksi. Analyysitulokset on esitetty taulukossa 3.



Kuva 7. Kuivamädätyskokeen mädätettä. (Niina Honkala, Luke)

Taulukko 3. Määtteenäytteiden analyysitulokset reaktorista 1 (R1) ja reaktorista 2 (R2) kahtena toistona A ja B.

	TS %	VS %	N % tp	NH ₄ -N % tp	P g/kg tp	K g/kg tp
Mädäte R1A	16,32	12,62	0,50	0,14	0,647	4,08
Mädäte R1B	17,43	13,23	0,50	0,17	0,696	4,33
Mädäte R2A	17,70	13,55	0,56	0,17	0,752	4,71
Mädäte R2B	18,68	13,51	0,61	0,14	0,623	5,28

Mädäte separoitiin Pellon Group pilot -mittakaavan ruuvipuristimella (kuva 8) Luken Biopajalla. Ruuvipuristimella on mahdollista erotella näyte kuiva- ja nestejakeisiin. Ruuvipuristimen asetuksia voidaan säätää lisäämällä painoja, jousia ja levyjä vastuksen kasvattamiseksi. Mädätteen separoinnissa vastuksena käytettiin pelkkiä painoja.

Molempien reaktoreiden mädätteen separointi sujui pääosin hyvin, mutta pitkät vesiruton varret kiertivät ruuvin ympärille. Riittävällä syötöllä varret katkeilivat ja massa eteni ruuvissa ilman suuria haasteita. Molempien reaktoreiden mädätteiden separointijakeiden osuudet syöttestä olivat samankaltaisia (taulukko 4) ja ravinteet jakautuivat suhteellisen tasaisesti neste- ja kuivajakeeseen. Reaktorin 2 kuivajae jäi kuitenkin reaktorin 1 kuivajaeita hieman kosteammaksi. Separoinnin jälkeen nestejake pakastettiin. Ruuviseparoinnin neste- ja kuivajakeiden analyysitulokset on esitetty taulukossa 5.



Kuva 8. Pellon ruuvipuristin Biopajalla. (Torni-Filmi Oy, Luke)

Taulukko 4. Separoinnin neste- ja kuivajakeiden määrät.

	R1	R2
Syöte (kg)	193	189
Kuivajae (kg)	130	128
Kuivajakeen osuus syöttestä (%)	67	68
Nestejake (kg)	57	55
Nestejakeen osuus syöttestä (%)	30	29
Hävikki (%)	3	3

Taulukko 5. Ruuviseparoitujen jakeiden analyysitulokset reaktoreittain.

	TS %	VS %	N % tp	NH ₄ -N % tp	P g/kg tp	K g/kg tp	Sähkön- johtavuus μS/cm
Ruuvi, nestejäte, R1	7,57	4,47	0,39	0,11	0,277	3,79	3030
Ruuvi, kuivajäte, R1	25,61	16,26	0,55	0,12	0,560	4,60	
Ruuvi, nestejäte R2	7,53	4,34	0,35	0,10	0,425	3,50	2700
Ruuvi, kuivajäte, R2	24,15	17,17	0,65	0,11	0,734	4,68	



Kuva 9. Ruuviseparoinnin kuivajäte. (Niina Honkala, Luke)

5. Kuivajakeen jatkojalostus

Separoinnin jälkeen kuivajakeen jatkojalostusta jatkettiin kuivaamalla se laboratoriolämpökaapeissa. Massaa kuivattiin kolmen päivän ajan 80°C lämpötilassa, jonka aikana kosteuspitoisuus laski 76 %:sta 2 %:iin. Kuivattu näyte jauhettiin leikkurimyllyllä (Retsch SM 2000) sekä 20 mm että 3 mm seulalla, jolloin näytteen sisältämät kivet jauhaantuivat (kuva 10).



Kuva 10. Kuivatun kuivajakeen jauhaminen leikkurimyllyllä.

Kuivatun kuivajakeen pelletöintiin käytettiin Amandus Kahl Laboratory Press type 14-175 -pelletöintilaitetta (kuva 11). Laitteen toiminta perustuu tasomatriisiin, jonka läpi kaksi pyörivää kolleripyörää puristaa syötetyn biomassan. Pelletti muodostuu matriisin puristuskanavassa lämpötilan noustessa kollerin puristaessa massaa matriisin kartiomaisiin reikiin. Matriisissa puristuvan pelletin pituus määrittyy matriisin alla pyörivän leikkurin etäisyydestä matriisiin ja käytettävän massan läpäisevyydestä. Laitteen syöttö on toteutettu tärysyöttimen avulla. Laite mittaa matriisin lämpötilaa ja kollerin pyörimistaajuutta.

Laitteen käytön yhteydessä matriisin ja laitteesta ulostulevan pelletin lämpötilaa seurattiin infrapunalämpömittarilla ja pelletin laatua aistinvaraisesti. Onnistunut pelletöityminen edellyttää noin 45 °C lämpötilaa. Tuoreet pelletit kuivattiin imemällä huoneilmaa pellettien läpi viirakuivurissa.

Pelletöintiajon onnistumiseen ja ajoparametreihin kuten lämpötiloihin voidaan vaikuttaa muuttamalla pelletöintiseoksen kosteuspitoisuutta, lisäämällä seosaineita tai vaihtamalla pelletöintimatriisia erikokoisiin puristussuhteisiin.



Kuva 11. Amandus Kahl Laboratory Press type 14-175 -pelletöintilaitte Jokioisten Biopajalla.

Tulokset

Kokeet aloitettiin selvittämällä kuivatun mädätysjäänneksen pelletoitavuutta 1 kg koeajoin käyttäen 4 mm ja 4:1 puristussuhteen matriisia (puristuskanavan pituus 16 mm, matriisin paksuus 30 mm). Ennen pelletöintiä seokseen lisättiin 10 % vettä, jolloin sen kosteuspitoisuus nousi optimaaliselle 10-15 % alueelle. Pellettileikkurin etäisyys matriisista asetettiin 6 mm:iin.

Ensimmäinen pelletöintiajo oli onnistunut (Kuva12.). Massa pelletöityi 55 °C lämpötilassa hyvin lujaksi pelletiksi ilman tukkeutumishaasteita. Pellettierän laadussa oli huomattavaa vaihtelua pelletin pituudessa sekä ajon aikana syntyi 12 % jauhoa.



Kuva 12. Ensimmäinen pellettiajo kuivatulla ja jauhetulla kuivajakeella oli onnistunut

Toiseen pelletöintiajo seosta muutettiin nostamalla kosteuslisäys 13 %:iin ja lyhennettiin pellettileikkurin etäisyyttä matriisista 2,5 mm, jonka odotettiin parantavan sekä pellettierän tasalaatuisuutta että vähentävän syntyvän jauhon määrää. Tämä muutos syötteen kosteudessa vaikutti pellettierän laatuun odotetun laisesti. Pelletöitymislämpötilat pysyivät vastaavina, mutta itse pelletti oli hieman pehmeämpää ja seos virtasi matriisiin läpi sulavammin. Tämän seurauksena syntyneen jauhon määrä laski 8,3 %:iin. Tuotetut pelletit vastasivat hankkeen kasvatuskokeiden asettamia tavoitteita ja pelletöinnissä pystyttiin etenemään isomman erän tuottamiseen kasvatuskokeita varten.

Suurempi 7 kg pellettiajo toteutettiin 2. ajoa vastaavilla asetuksilla, 13 % kosteuslisäyksellä ja vastaavalla matriisilla sekä leikkurin etäisyydellä. Suuremman erän tulokset vastasivat toisen ajon tuloksia. Ainoa poikkeus oli pelletöintilämpötiloissa, jotka ehtivät nousta ajon edetessä 65 °C:een. Tuotettu pellettierä kuivattiin viirakuivurissa heti pelletöinnin jälkeen, seulottiin 2 mm seulalla, paketoitiin ja toimitettiin jatkokokeisiin. Tuotetuista kuivajakeista ja pelleteistä toimitettiin edustavat näytteen ravineanalyysiin.



Kuva 13. Kasvatuskokeisiin tuotettu suurempi pellettierä kuivattiin imemällä huoneilmaa pellettipedin läpi viirakuivurissa.

Hankkeen aikana Biopajalle hankittiin myös pienemmän puristussuhteen pellettimatriisit 3:1 ja 2:1, joilla toteutettiin 2 kg koeajot kuivatulla kuivajakeella. Aikaisempiin ajoihin verrattuna puristussuhteen pienentäminen tuotti pehmeämmän pelletin, jonka pinta oli samea. Samalla myös prosessin tehokkuus vaikutti parantuvan ja lopputuotteen jauhopitoisuus väheni. Näiden koeajojen perusteella voidaan todeta että 2:1 puristussuhde on riittävä tälle materiaalille.



Kuva 14. 2:1 puristussuhteen pelletit eivät enää olleet kiiltäväpintaisia

Ravinnepitoisuuksiltaan tuotetut jakeet vastasivat osittain mädätysjäännöksen ravinnepitoisuuksia (taulukko 6). Jo lähtökohtaisesti mädätysjäännöksen ravinnepitoisuus on alhainen ja niin myös siitä separoidun kuivajakeen. Kasvilannoitusta ajatellen typen ja kaliumin lähes samansuuruiset pitoisuudet voidaan nähdä eduksi, mutta näiden tasot eivät yllä levitystyössä tarjoamaan kasvin tarvitsemaa ravinmäärää yhdellä levityskerralla.

Taulukko 6. Mädätysjäännöksestä prosessoitujen kuivien jakeiden analyysitulokset.

	TS %	N % tp	NH ₄ -N % tp	P g/kg tp	K g/kg tp
Kuivajae, ruuviseparoitu	25,6	0,55	0,12	0,56	4,6
Kuivajae, kuivattu ja jauhettu	96,8	1,82	0,22	2,69	17,4
Pelletti	88,3	1,7	0,03	2,2	13

6. Nestejakeen jatkojalostus

6.1. Nestejakeen esikäsittely, reaktori 1

Nestejakeen jatkojalostuksen tavoitteena oli selvittää sille soveltuva prosessointiketju ja tuottaa ravinnepitoista nestettä kasvatuskokeita varten. Ensimmäisessä vaiheessa mädätteen separoinnin nestejake lingottiin laboratoriomittakaavan dekantterilingolla (Lemitec MD60, kuva 15). Lingolla saadaan erotettua kuiva-aine nestejakeesta, jolloin nestejakeen kuiva-ainepitoisuus on alhaisempi ja soveltuu siten paremmin kalvosuodatusprosessiin.

Ensimmäisessä vaiheessa tavoitteena oli testata menetelmän soveltuvuutta nesteen esikäsittelyyn sekä löytää sopivat asetukset. Linko ylikuormittui suurimmilla kierroksilla, joten kierroksia jouduttiin laskemaan lingon toimivuuden varmistamiseksi (bowl 9000 rpm, differential speed 100 rpm). Alkutesauksessa käytettiin myös eri kokoisia patolevyjä (52 mm, 48 mm, 44 mm). Näistä suurin patolevy 52 mm, soveltui lingon toimivuuden kannalta parhaaksi ratkaisuksi.

Linkoa varten ruuvipuristimelta saatu nestejake siivilöitiin 4 mm ja 2 mm siivilöillä, koska lingolle syötettävän materiaalin maksimipartikkelikoko on kyseiselle linkomallille 2 mm. Siivilöity nestejake lingottiin kolmessa vaiheessa. Kustakin vaiheesta saatu nestejake lingottiin uudelleen aina patolevyä seuraavaan vaiheeseen pienentäen. Reaktorin 1 mädätteen ruuviseparoinnin nestejake lingottiin taulukon 7 mukaisilla asetuksilla.

Taulukko 7. Dekantterilingon asetukset kussakin ajossa.

	Linko, vaihe 1 7.1.2025	Linko, vaihe 2 9.1.2025	Linko, vaihe 3 13.1.2025
Bowl (rpm)	9000	9000	10 000
Differential speed (rpm)	100	100	100
Weir disc (mm)	52	48	44



Kuva 15. Dekantterilinko koekäytössä. (Niina Honkala, Luke)

Kuivajae erottui testiajoissa huonosti, eikä dekantterilingolla päästy nestejakeen osalta tavoiteltuun, noin kahden prosentin kuiva-ainepitoisuuteen. Tästä syystä dekantterilingolta saatu nestejake vielä sentrifugoitiin (Eppendorf, Centrifuge 5920 R, 4250 rpm, 15 min., 4 °C). Sentrifugoinnin jälkeen nestejakeen kuiva-ainepitoisuus oli lähellä tavoiteltua kahta prosenttia.

Taulukko 8. Neste- ja kuivajakeiden määrät, osuudet sekä analyysitulokset.

	Linko, vaihe 1	Linko, vaihe 2	Linko, vaihe 3	Sentrifugi
Syöte (kg)	23,70	15,29	13,86	12,92
Syötteen TS (%)	7,19	3,42	3,29	3,16
Nestejae (kg)	16,53	15,08	13,61	11,85
Nestejakeen osuus (%)	69,76	98,64	98,20	91,67
Nestejakeen TS (%)	3,42	3,29	3,16	2,41
Nestejakeen pH	7,95	7,92	7,82	8,02
Kuivajae (kg)	6,60	0	0	1,08
Kuivajakeen osuus (%)	27,87	0	0	8,32
Kuivajakeen TS (%)	16,46			11,84

Taulukko 9. Lingottujen ja sentrifugoitujen jakeiden analyysitulokset (reaktori 1).

	TS %	N % tp	NH ₄ -N % tp	K g/kg tp	P g/kg tp	Sähkön- johtavuus μS/cm
Nestejae, ruuvi	7,19	0,40	0,12	4,04	0,449	3130
Nestejae, ruuvi, siivilöity	7,20	0,24	0,11	3,88	0,341	3040
Nestejae, linko	3,42	0,27	0,09	3,87	0,154	2920
Kuivajae, linko	16,46	0,74	0,18	4,36	1,17	
Nestejae, linko 2	3,29	0,27	0,09	3,75	0,146	2980
Nestejae, linko 3	3,16	0,27	0,11	3,78	0,137	3130
Nestejae, sentrifugi	2,41	0,22	0,10	3,72	0,0850	3140
Kuivajae, sentrifugi	11,84	0,89	0,21	4,63	0,657	

Tulosten perusteella suuri osa kuiva-aineesta erottuu jo ensimmäisessä ajossa suurinta patolevyä käyttäen. Dekantterilingolla ei saatu kuitenkaan eroteltua hienompia partikkeleita, vaan lingolla erottunut nestejake vaatii vielä sentrifugoinnin.

6.2. Kalvosuodatuksset, reaktori 1

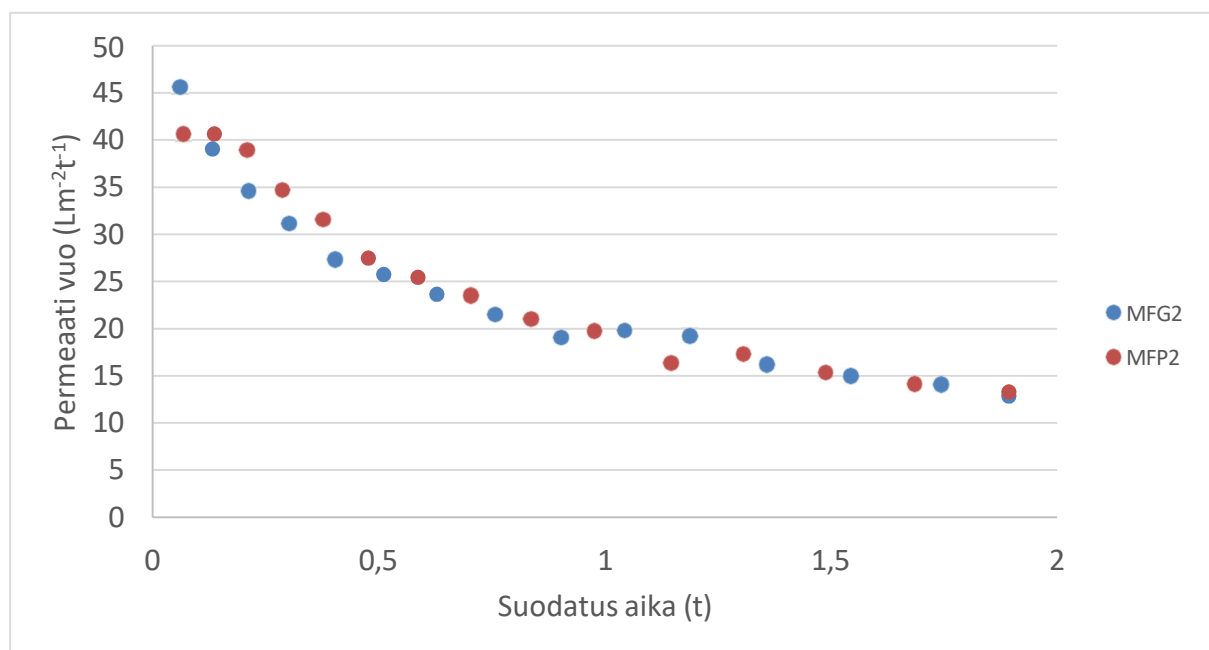
Esikäsitellyn nestejakeen selkeyttämiseksi nestejake suodatettiin Alfa Lavalin Labstak M20 -kalvosuodatuslaitteistolla. Prosessin käyttövoima perustuu kalvon eri puolilla olevaan paine-eroon. Laitteistolla voidaan tehdä mikro-, ultra- ja nanosuodatusta sekä käänteisosmoosia. Mikro-suodatuksissa paine vaihtelee välillä 1–3 baaria ja käänteisosmoosissa välillä 40–50 baaria. Mikro- ja ultrasuodatusta käytetään yleensä esikäsitelyprosessina, kun taas nanosuodatusta ja käänteisosmoosia käytetään liuosten konsentroinnissa. Mikro-suodatuksen tarkoitus on nesteiden selkeytys.

Laitteistoa on sekä laboratorio- että laitosmittakaavassa ja syötemäärä vaihtelee välillä 5–50 l ja kalvojen pinta-ala välillä 0,036 m²–0,72 m². Laitteistossa on mahdollista käyttää flat sheet -mallia tai spiraalikalvoja ja erilaisia mikro-suodatuksen kalvoja on mahdollista testata yhtä aikaa.

Tässä kokeessa käytettiin flat sheet -kalvoja ja yhdessä suodatuksessa testattiin kahta eri kalvoa samanaikaisesti. Mikro-suodatuksessa testattiin Alfa Lavalin MFP2- ja MFG2-kalvoja. Molemmissa kalvossa huokoskoko on 0,2 µm, mutta MFP2-kalvon materiaali on fluoropolymeeri ja MFG2-kalvon polysulfoni. Käytetyt kalvot olivat flat sheet -mallia, joiden aktiivipinta-ala oli 0,036 m²/kalvotyyppi.

Suodatuksen tehokkuus määritetään laskemalla permeaattivuo, eli nestemäärä, joka läpäisee 1 m² kalvon tunnissa. Permeaattivuo on näin ollen tärkeä mittari koko kalvosuodatuksen aikana. Puhtaan veden vuo puolestaan on mittari, jonka avulla on mahdollista seurata kalvon tukkeutumista. Tästä syystä kokeet aloitetaan aina mittaamalla puhtaan veden vuo, joka mitataan uudelleen suodatuksen jälkeen. Kalvosuodatuksessa saadaan aina kaksi nestevirtaa; permeaatti on syötön osa, joka läpäisee kalvon ja retentaatti, joka kierrätetään takaisin säiliöön (konsentraatti).

Kuvassa 16 on esitetty käytettyjen kalvojen permeaattivuot. Permeaattivuokuviossa näkyy kaksi erillistä vaihetta; ensimmäinen on nopea laskeutumisvaihe noin 20 Lm⁻²h⁻¹ vuohon asti, jonka jälkeen lasku hidastuu. Kalvojen permeaattivuossa ei ilmennyt suuria eroja, vaikka kalvojen materiaali oli eri. Permeaattivuon lisäksi laboratoriossa määritettiin permeaattien sameus. Analyysitulokset on esitetty taulukossa 10. Analyysitulosten perusteella jatkotutkimuksiin valittiin MFG2-kalvo, koska permeaattin sameus oli paljon pienempi.



Kuva 16. Mikro-suodatuskalvojen MFG2 ja MFP2 permeaattivuot suodatusajan funktiona.



Kuva 17. Kuvassa vasemmalla mikrosuodatuksen syöte, keskellä kaksi permeaattia ja oikealla retentaatti. (Niina Honkala, Luke)

Taulukko 10. Mikrosuodatettujen jakeiden analyysitulokset.

	TS %	N % tp	NH ₄ N % tp	P g/kg tp	K g/kg tp	Sähkön- johtavuus μS/cm	Sameus NTU
MF syöte	2,36	0,21	0,12	0,085	3,71	3360	
MF permeaatti, MFP2	1,05	0,11	0,09	0,014	3,22	2980	67,70
MF permeaatti, MFG2	1,09	0,11	0,09	0,015	3,29	3010	8,79
MF retentaatti	3,62	0,31	0,12	0,157	3,75	3150	

6.3. Nesteen esikäsittely, reaktori 2

Reaktorin 1 nestejakeen linkoustulosten kokemusten perusteella voitiin todeta, että kuiva-aine ei erotu lingolla riittävästi. Koeajojen perusteella yksi ajo lingolla ja sentrifugointi ovat riittävä esikäsittely kalvosuodatusta varten ja neste lingottiin toisessa kokeessa vain kerran seuraavilla asetuksilla; bowl 9000 rpm, differential speed 100 rpm, weir disc 52 mm. Lingolta saatu nestejake sentrifugoitiin asetuksilla 4250 rpm, 15 min. ja 4 °C. Lingon ja sentrifugin neste- ja kuivajakeiden määrät, näiden osuudet, kuiva-ainepitoisuudet (TS) ja pH on esitetty taulukossa 11.

Taulukko 11. Lingottujen ja sentrifugoitujen jakeiden määrät, osuudet sekä kuiva-ainepitoisuudet ja pH.

	Dekantterilinko	Sentrifugi
Syöte (kg)	23,00	14,42
Syötteen TS (%)	7,53	3,32
Nestejake (kg)	15,46	12,75
Nestejakeen osuus (%)	67,25	88,42
Nestejakeen TS (%)	3,32	2,20
pH	7,91	7,89
Kuivajake (kg)	7,05	1,67
Kuivajakeen osuus (%)	30,65	11,58
Kuivajakeen TS (%)	17,01	11,48

Lingottujen ja sentrifugoitujen jakeiden analyysitulokset on esitetty taulukossa 12. Nesteen riittävyyden varmistamiseksi lingon syöttestä, ruuviseparoinnin nestejakeesta R2 ei otettu tässä vaiheessa erikseen näytettä, vaan tässä tulosten arvioinnissa käytettiin kyseisestä nesteestä jo aiemmin saatuja tuloksia.

Taulukko 12. Separoinnin nestejakeiden analyysitulokset.

	TS %	N % tp	NH ₄ N % tp	P g/kg tp	K g/kg tp
Nestejake, ruuvi, R2	7,53	0,35	0,10	0,425	3,5
Nestejake, linko, R2	3,32	0,19	0,10	0,110	3,36
Kuivajake, linko R2	17,01	0,68	0,18	1,18	4,18
Nestejake, sentrifugi, R2	2,20	0,26	0,09	0,180	3,57
Kuivajake, sentrifugi, R2	11,48	0,84	0,18	0,670	4,19

6.4. Kalvosuodattimet, reaktori 2

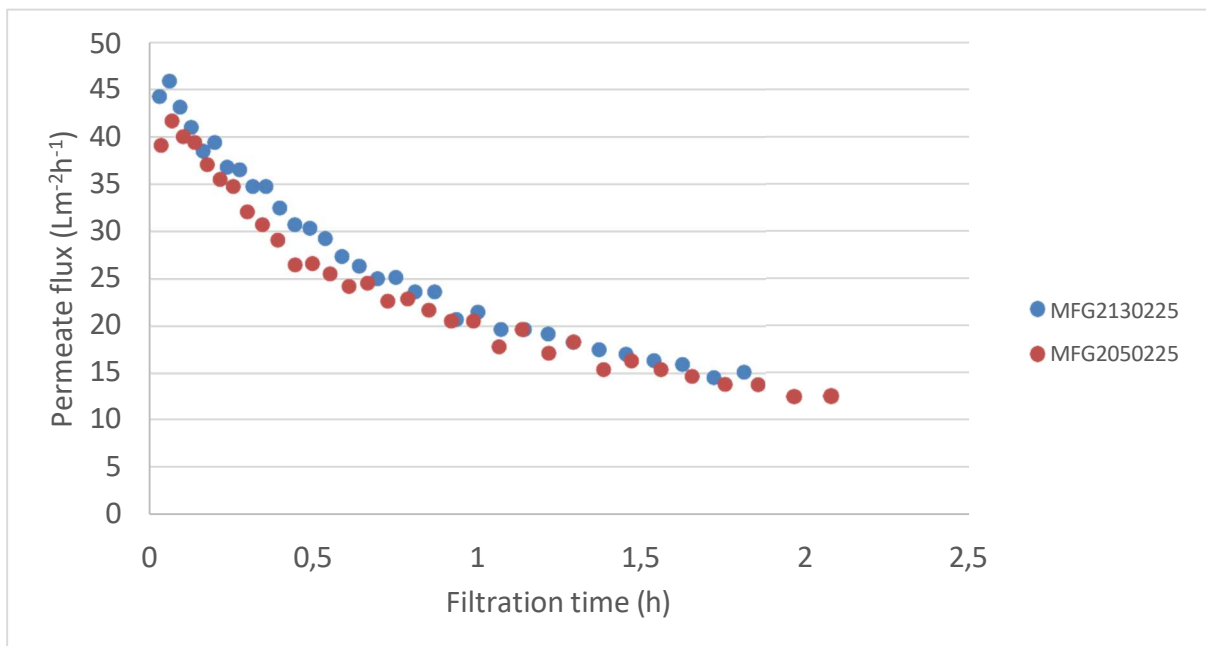
6.4.1. Mikro-suodatus

Esikäsitelty neste ja mikro-suodatettiin (MF) Alfa Lavalin Labstack M20 -kalvosuodatuslaitteistolla MFG2 -kalvoilla. Ennen mikro-suodatusta neste siivilöitiin 125 µm siivilällä. Mikro-suodatuksia tehtiin kaksi, jotta permeaattia saatiin riittävästi käänteisosmoosia (RO) varten. Kahden mikro-suodatuksen permeaattit yhdistettiin käänteisosmoosin syötteeksi.

MFG2-kalvon permeaattivuota tutkittiin kahdesta näkökulmasta: 1. eroaako permeaattivuoto suuresti esikokeissa saadusta permeaattivuodasta, 2. näyttävätkö rinnakkaiskokeiden permeaattivuodot samanlaisia kuviota. Permeaattivuodon lisäksi tärkeä ominaisuus on konsentraatiokerroin (concentration factor) niin prosessin kuin ravinteiden kannalta. Konsentraatiokerroin lasketaan varten määritetään permeaatin prosenttinen osuus syötteestä (RR=recovery rate %). Konsentraatiokerroin lasketaan kaavalla:

$$CF = \frac{1}{1 - RR}$$

Tulokset osoittivat, että kahden erillisen mikro-suodatuksen permeaattivuodot eivät eroa merkittävästi toisistaan, ja alkuvuoto laskee noin 45 Lm⁻²h⁻¹ arvosta 15 Lm⁻²h⁻¹ arvoon kuten esikokeissa. Permeaattivuoto suodatusajan funktiona on esitetty kuvassa 18. Näytteen MFG2130525 permeaattivuoto oli hieman korkeampi alussa mutta tasaantui ajan kuluessa MFG2050225 kanssa. Prosessikokeissa oli kuitenkin permeaattivuodon liukuva keskiarvo (moving average) laskettu, ja MFG2130225 näytteen keskiarvo oli 26,03 Lm⁻²h⁻¹. Näytteen MFG2050225 permeaattivuodon keskiarvo oli 22,85 Lm⁻²h⁻¹ ja koko suodatus kesti hieman pidempään.



Kuva 18. Mikro-suodatuksen permeaattivuoto suodatusajan funktiona.

Permeaatin osuus syötteestä (RR=recovery rate %) ja konsentraatiokerroin laskettiin molemmissa ko-keissa. Prosessoitavaa nestejakeita oli molemmissa suodatuksissa 5000 ml ja kerätty permeaatti 3200 ml. Näin ollen prosessien RR on 64 % ja laskettu konsentraatiokerroin 2,77.

Edellä mainitun lisäksi on tärkeää tarkastella miten ravinteet jakautuvat permeaatin ja retentaatin välillä. Taulukossa 13 on mikrosuodatusjakeiden analyysituloksia.

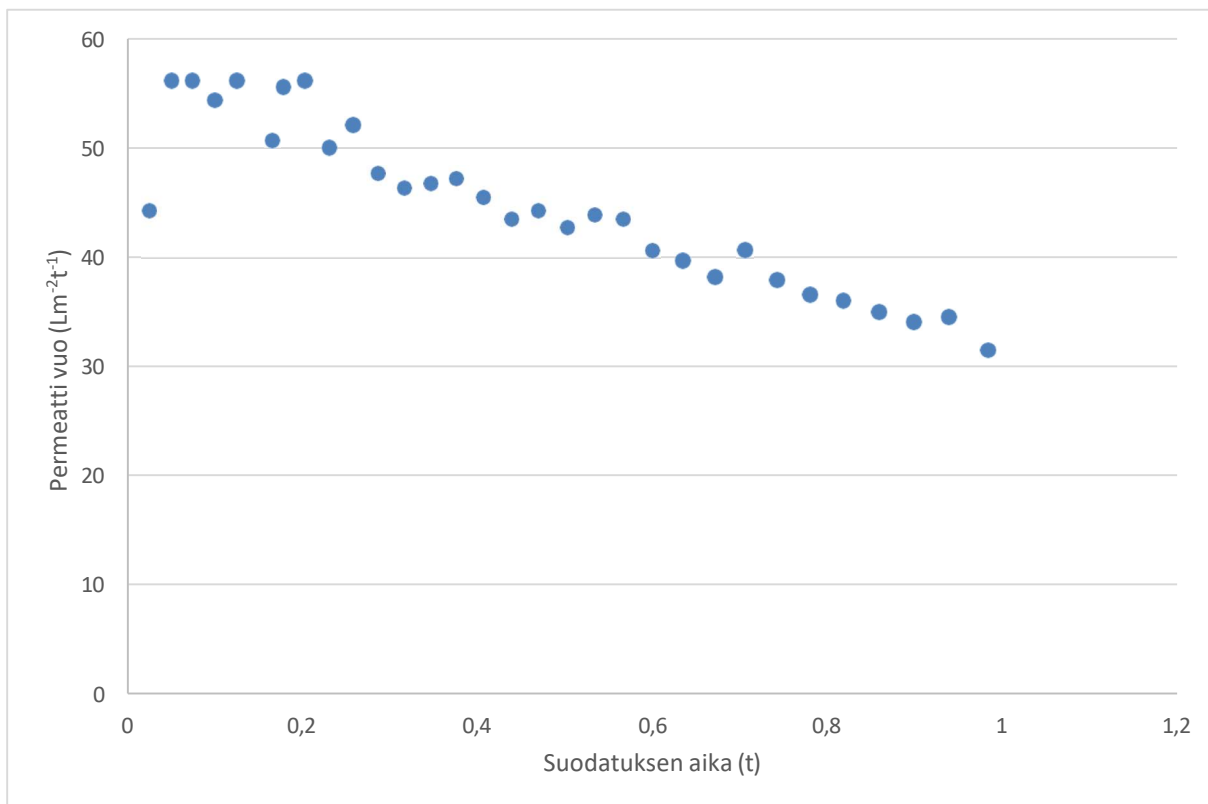
Taulukko 13. Mikrosuodatusten jakeiden analyysitulokset.

	TS %	N % tp	NH ₄ N % tp	P g/kg tp	K g/kg tp
Nestejae, sentrifugi, R2 (syöte)	2,20	0,26	0,09	0,180	3,57
MF permeaatti, 050225	0,94	0,09	0,07	0,040	2,97
MF retentaatti, 050225	3,68	0,30	0,11	0,200	3,48
MF permeaatti, 130225	1,03	0,09	0,07	0,0400	3,03
MF retentaatti, 130225	3,84	0,31	0,11	0,220	3,59

Analyysitulosten perusteella fosfori oli konsentroitunut retentaatissa, ja vain pieni osuus kulkeutui permeaattiin. Tämä osoittaa, että myös mikrosuodatuksen retentaatti kannattaa hyödyntää, koska se sisältää tärkeää fosforia. Nestejakeiden volyymin huomioon ottaen, typpeä ja kaliumia on enemmän permeaatissa. Retentaatin korkean ravinnepitoisuuden ja määrän perusteella prosessia täytyy vielä optimoida niin, että ravinteiden pitoisuus olisivat suurempi permeaatissa. Tämä onnistuu esimerkiksi olosuhteita muuttamalla niin, että vähemmän partikkeleita laskeutuu kalvon pinnalle, jolloin partikkelikerros olisi pienempi tai sitä ei muodostuisi. Tämä edellyttää prosessin mallintamista konsentraatiopolarisaation vaikutuksen määrittämiseksi. Prosessiparametrejä säätämällä konsentraatiopolarisaatiota voitaisiin pienentää ja arvokkaita komponentteja siirtää enemmän permeaattiin.

6.4.2. Käänteisosmoosi

Käänteisosmoosissa käytettiin RO98pHt flat sheet -kalvoja, joiden aktiivinen pinta ala oli 0,072 m². Permeaattivuo suodatusajan funktiona näkyy kuvassa 19. Konsentraatio onnistui, tilavuuden korjauskerroin (volumetric reduction factor) oli lähes kolme. Permeaattivuo kuitenkin laski koko suodatusajan, noin 60 Lm⁻²h⁻¹:sta 30 Lm⁻²h⁻¹:iin. Taulukossa 14 on esitetty käänteisosmoosin eri jakeiden analyysitulokset ja taulukossa 15 reaktorin 2 perkolaationesteen, mädätteen, mädätteen ruuviseparoidun nestejakeen sekä käänteisosmoosin retentaatin analyysitulokset.



Kuva 19. Käänteisosmoosin permeaattivuo suodatusajan funktiona.

Taulukko 14. Käänteisosmoosin (RO) eri jakeiden analyysitulokset.

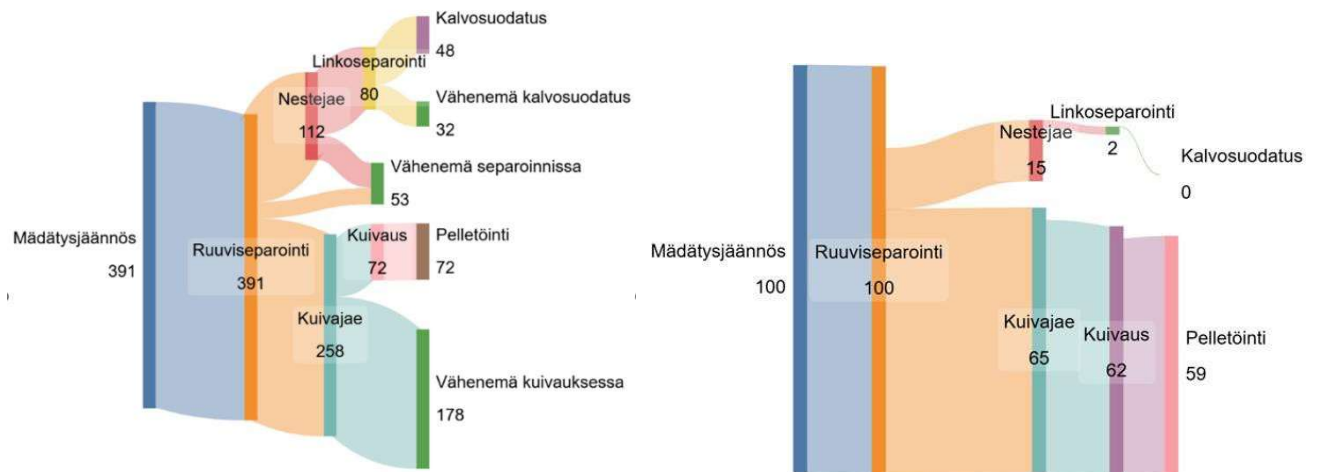
	TS %	N % tp	NH ₄ N % tp	P g/kg tp	K g/kg tp
RO syöte	0,93	0,09	0,07	0,0400	2,94
RO permeaatti	0,02	<0,02	<0,02	0,00	0,03
RO retentaatti	2,38	0,21	0,16	0,100	7,49

Taulukko 15. Reaktorin 2 eri jakeiden analyysitulokset.

	TS %	N % tp	NH ₄ N % tp	P g/kg tp	K g/kg tp
Perkolaationeste, R2	1,32	0,12	0,10	0,048	3,87
Mädäte R2A	17,70	0,56	0,17	0,752	4,71
Mädäte R2B	18,68	0,61	0,14	0,623	5,28
Ruuvien neste, R2	7,53	0,35	0,10	0,425	3,5
RO retentaatti	2,38	0,21	0,16	0,100	7,49

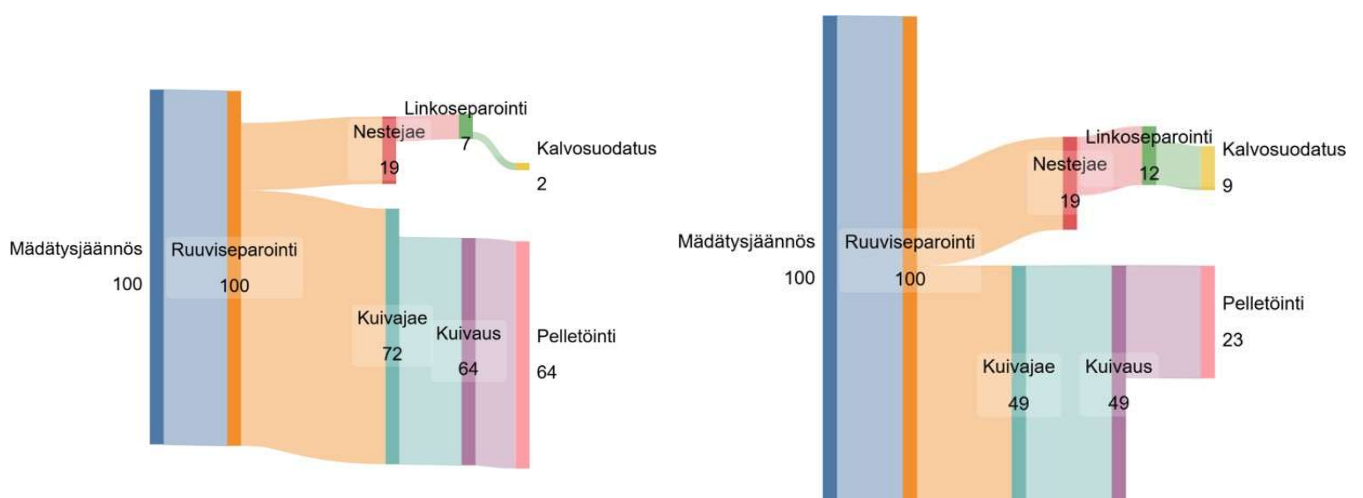
7. Jatkojalostuksen massavirtaumat ja hävikit

Tarkastellessa massan ja ravinteiden taseita saadaan tarkempi käsitys, minne ravinteet ja materia päätyvät prosessoinnissa. Koska mädätysjäännös oli hyvin kosteaa, suurin osa prosesseissa kulkevasta massasta on nestettä ja lopputuotteita syntyy vain noin kolmannes lähtömassasta (Kuva 20.a).



Kuva 20. Vasemmalla prosessointiketjun kokonaismassan (kg) ja oikealla fosforin (kg) jakautuminen eri vaiheittain.

Suuria massahävikkejä ei ole havaittavissa massavirroissa. Ruuviseparoinnissa hävikkiä tapahtui noin 5%. Kuivauksessa kaikki kuivajakeesta olevasta nesteestä haihdutetaan, mutta muuten hävikit eivät ole merkittäviä ja linkoseparoinnissa ja kalvosuodatuksessa syntyvät sivujakeet voidaan kierrättää takaisin prosessiin. Fosforin jakautuminen prosessissa painottuu vahvasti kuivajakeeseen eikä separoinnin jälkeen ole havaittavissa suuria häviöitä pellettituotteeseen päätyvässä fosforimäärässä (kuva 20). Tarkastellessa typen virtoja prosessissa havaitaan suurempia hävikkejä (kuva 21).



Kuva 21. Vasemmalla kokonaistypen (%) ja oikealla liukoisien typen (%) jakautuminen prosessointiketjussa.

Kokonaistypestä ei häviä paljoa pellettituotteen prosessointiketjussa, mutta nestejakeen linkoseparoinnissa ja kalvosuodatuksessa jää paljon typpeä sivujakeisiin eikä se siten päädy lopputuotteeseen. Liukoisen typen hävikit ovat suuria jo ruuviseparointivaiheessa eikä lopputuotteisiin päädy kuin kolmannes lähtömäärästä. Osalta suuria typen hävikkejä voi selittää typpianalytiikan haastavuus etenkin näin laimean pitoisuuden massasta. Todettava on, että vaikka nestejakeen prosessointi onnistui teknisesti, se ei saavuttanut typen konsentroinnin tavoitetta vaan prosessointivaiheissa hukatun typen myötä konsentraatio jäi ruuviseparoinnin nestejaetta alhaisemmaksi.

8. Teknologioden skaalautuvuus ja kustannustehokkuus

Tarkasteltaessa jatkojalostusteknologioiden skaalautuvuutta teolliseen mittakaavaan ei kanadanve-siruton mädätysjäännöksen jatkojalostukselle pelletiksi ole kokeiden tulosten perusteella teknisiä es-teitä. Massa separoitui tehokkaasti ruuviseparoinnissa. Kuivajakeen kuivaaminen on toteutettavissa esimerkiksi vakuumikuivauksella. Jauhatukseen tarvitaan tarpeeksi tehokas teknologia, joka pystyy jauhamaan myös pieniä kiviä kuten vasaramylly. Kuivattu ja jauhettu mädätysjäännös pelletöityy on-gelmitta. Nestejakeen näkökulmasta prosessiketju on monimutkaisempi, sillä onnistuakseen kalvo-suodatus vaati laboratoriomittakaavassa sen, että nestejake sekä linkoseparoidaan että sentrifugoi-daan. Epävarmaksi jää, paraneeko nesteen erottuminen linkoseparointia ylöskaalatessa ja päästäänkö kalvosuodatuksen soveltuvaan tasajakoisuuteen. Laboratoriolinkouksella tämä ei onnistunut, vaan tarvittiin lisäksi sentrifugointi.

Kustannustehokkuuden näkökulmasta kuivajakeen jatkojalostamisessa kuivaus nousee keskeiseen rooliin. Mädätysjäännöksen ruuviseparoinnin energiankulutus on Luken kokeiden perusteella noin 0,5–1 kWh/m³ eli tällä massalla noin 0,6–1,2 kWh/tn. Kuivajakeen kuivaamisessa on tarpeen haihdut-taa 63 kosteusprosenttia massasta, joka tarkoittaa 630 litraa vettä tonnista mädätysjäännöstä. Opti-mitilanteessa yleisimmillä kuivausteknologioilla kosteuden haihduttaminen kuluttaa noin 0,7 kWh/litra vettä (Martynenko & Vieira, 2023), jolloin mädätysjäännös tonnin kuivaaminen kuluttaisi 441 kWh/tn. Kortisten biomassojen jauhatukseen vasaramyllyllä kuluu kirjallisuuden perusteella 11–28 kWh/tn (Paraschiv et al. 2023). Pelletöinin energiankulutus on Luken kokeiden perusteella noin 60–65 kWh/tn. Jatkojalostuksen pelletiksi kokonaisenergiankulutukseksi tämän arvioin perusteella muo-dostuisi siis 513–535 kWh/tn, joka 0,07€/kWh energianhinnalla tarkoittaisi 35,9–37,6 €/tn syötettä ja 57,0–59,6 €/tn valmista tuotetta. Energiankulutuksesta jopa 80 % kuluu kuivauksessa.

Verrattaessa kuivajakeen prosessoinnin kokonaishintaa ravinteiden arvoon tuotteen markkinapoten-tiaali tarkentuu. Luken 2025 teettämän lannoitetuotteiden kilpailutuksen perusteella mineraalityppi-kilon hinnaksi markkinoilla muodostui $2,0 \pm 0,5$ €/kg. Jalostuskustannusten perusteella tuotteen tulisi sisältää vähintään 2,9 % typpeä, jolloin sen pystyisi kattamaan jalostuskulut lannoitteen arvolla. Fos-forikilon hinta markkinoilla on noin 3,5 €/kg ja kaliumkilon noin 4,4€/kg. Laboratoriossa tuotetun pelle-tin ravinteilla NPK 1,7-0,2-1,3 tuotteen ravinteiden yhteenlasketuksi arvoksi muodostuu 98 €/tn. Pelkkä typpi ei riitä kattamaan pelletin tuotantokustannuksia, mutta yhdessä ravinnepitoisuuden arvo on suurempi kuin tuotantokustannuksien. Tuottajan näkökulmasta pelletin ravinnepitoisuus on sopu-suhtainen yleisimpien viljelykasvien lannoitukseen, mutta niin alhainen että nykyaikaisilla lannoitteen-levittimillä tarvitaan useampi levityskerta.

Vastaavasti nestejakeen kustannustehokkuus näyttää haastavammalta. Linkoseparoinnin energianku-lutukseksi mädätysjäännöksillä on Lukessa arvioitu 2–6 kWh/tn. Kalvosuodatukselle kirjallisuudessa on arvioitu 16–23 kWh/tn (Gineau et al. 2018). Tällöin kokonaisenergiankulutukseksi nestejakeen pros-essoinnille muodostuisi 18,5–31 kWh/tn eli 1,3–2,3 €/tn käsiteltyä massaa ja 105–187 €/tn neste-tuotetta. Tällä markkinahinnalla nestelannoitteen tulisi sisältää vähintään 5 % typpeä. Laboratorioko-keissa tuotettu nestelannoite ei yllä tähän 0,21 % typpipitoisuudellaan. Huomioitava on myös se, että kaikilla viljelijöillä ei ole laitteistoa nestemäisten lannoitteiden levittämiseen ja näin laimeita lannoitteita levittäessä levityskustannukset nousevat huomattavasti suurempaan rooliin kuin ravinteiden hinta, joka osaltaan vaikuttaa tuottajien maksuhalukkuuteen.

9. Mädatteestä tuotettujen jakeiden testaus kontrolloiduissa olosuhteissa

Aineisto ja menetelmät

Mädatteestä tuotettujen kuiva- ja nestejakeiden vaikutusta kolmen erityyppisen kasvilajin alkuunläh- töön testattiin kahdessa kasvatuskaappikokeessa. Jakeiden ominaisuudet sekä ravinne- ja raskasme- tallipitoisuudet analysoitiin Eurofinsissä. Kokeissa kasvualustana käytettiin peltomaata (multava kar- kea hietä, pH 5,9). Käsittelymäärien suunnittelussa otettiin huomioon määrän soveltuvuus peltokäyt- töön. Lisäksi käyttömäärät pyrittiin täsmäämään liukoisen typen (100 tai 90 kg N/ha) suhteen.

Ensimmäisessä kokeessa (Koe 1) verrattiin pelletöidyn kuivajakeen sekä ruuviseparoidun ja senti- fugoidun nestejakeen kahta eri käyttömäärää. Käyttömäärät suunniteltiin Luke Jokioisissa tehtyjen analyysien perusteella, sillä tulokset Eurofinsistä saatiin vasta kokeen perustamisen jälkeen. Jakeita täydennettiin typen osalta suomensalpietarilla (NPK 21-0-1) ja fosforin osalta superfosfaatilla (NPK 0-20-0). Toisessa kokeessa (Koe 2) verrattiin kolmea puristussuhteeltaan erilaista pellettiä ruuviseparoi- tuun ja sentrifugoituun nestejakeeseen (Taulukko 16). Käyttömäärät suunniteltiin Eurofinsissä tehtyjen analyysien perusteella. Jakeita täydennettiin ainoastaan typen osalta, koska Kokeessa 1 jakeiden täy- dennys fosforilannoitteella ei vaikuttanut kasvien alkukehitykseen. Molemmista kokeista mineraali- lannoiteverrokkina oli YaraMila Hevi 3 (NPK 11-4,6-17,6) ja käsittelemättömänä kontrollina lannoit- tamaton peltomaa.

Taulukko 16. Kokeen 2 käsittelyt, jakeiden ja täydennyslannoitteen käyttömäärät sekä annettujen ravinteiden kokonaismäärät.

	Käsittely	Käyttömäärä		Annettu ravinnemäärä		
		Käsittely t/ha	Täydennys* kg/ha	N kg/ha	P kg/ha	K kg/ha
Kontrolli	Lannoittamaton peltomaa	-	-	0	0	0
Mineraali	YaraMila Hevi 3	0,8	0	90	38	144
Pelletti 1	Pelletti, puristussuhde 4:1	5	328	90	11	68
Pelletti 2	Pelletti, puristussuhde 3:1	5	328	90	11	68
Pelletti 3	Pelletti, puristussuhde 2:1	5	328	90	11	68
Ruuvisep	Ruuviseparoitu nestejake	20	281	90	3,8	147
Sentrifug	Sentrifugoitu nestejake	38	81	90	6,2	145

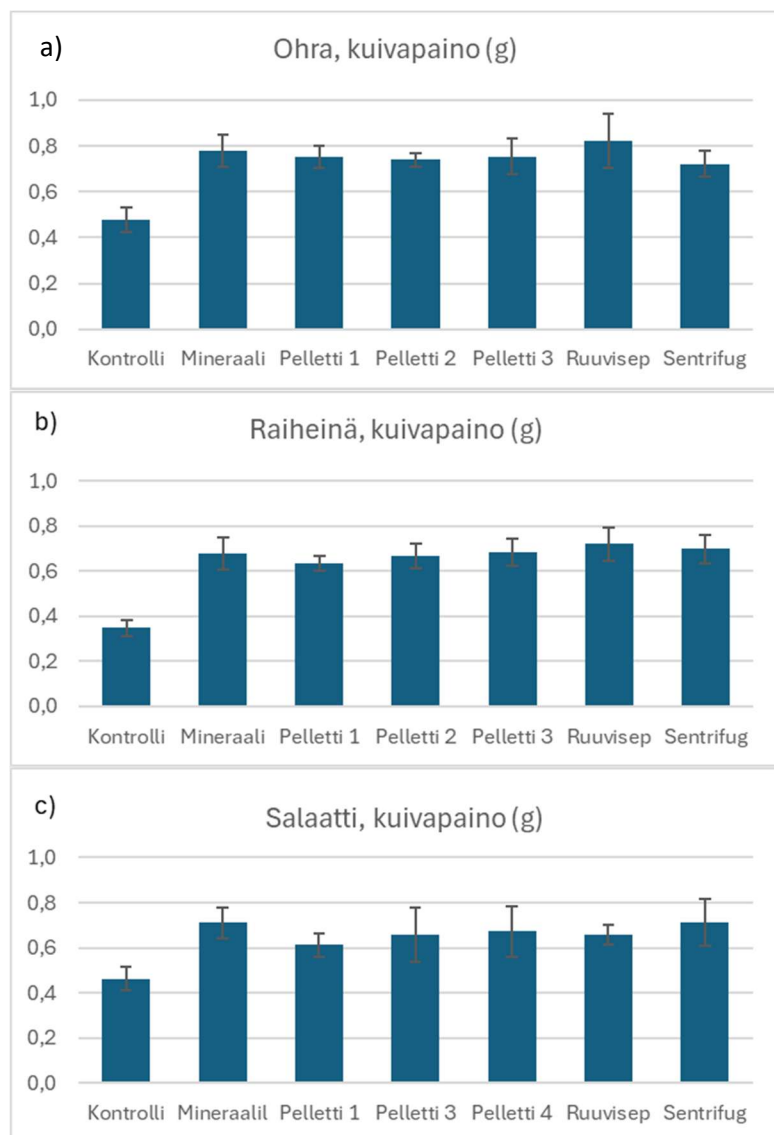
*Suomensalpietari NPK 21-0-1

Jakeet sekoitettiin kasvualustaan kylvöä edeltävänä päivänä. Kasvualustoihin lisättiin vettä siten, että kaikissa käsittelyissä maan kosteus oli lähtötilanteessa sama. Lannoitetut kasvualustat punnittiin ruukkuihin (8 cm x 8 cm x 8 cm) ja niihin kylvettiin ohran (16/ruukku), raiheinän (25/ruukku) tai salaatin (5/ruukku) siemeniä. Jokaisesta käsittely-kasvilaji -kombinaatiosta oli kuusi rinnakkaista ruukku. Ruukut asetettiin muovipusseihin veden pääsyn estämiseksi ruukusta toiseen, ja ruukut jaettiin kol- melle alustalle siten, että kullakin oli kaksi rinnakkaista ruukku. Ruukut peitettiin muovilla taimet- tumiseen asti. Taimettumisen jälkeen kasveja kasteltiin kolme kertaa viikossa vedellä ja kaksi kertaa kasvun aikana 0,06 % (w/v) nestemäisellä lannoitteella (Green Care, Puutarhan kesäTM NPK 13-7-20 + mikroravinteet; Yara Vlaardingen, Alankomaat). Kokeet tehtiin kasvatuskaapeissa (Fitotron, Weiss Technik, Saksa) kontrolloiduissa oloissa (päivänpituus 16 h, päivälämpötila 18 °C, yölämpötila 15 °C, ilman suhteellinen kosteus 60 %). Taimettuneet kasvit laskettiin 4, 7 ja 14 vuorokauden kuluttua kyl-

vöstä. Kuuden viikon kuluttua kylvöstä kasvien maanpäällisistä osista määritettiin tuore- ja kuivapainot.

Tulokset

Mädätteestä tuotetut kuiva- ja nestejakeet eivät vaikuttaneet ohran, raiheinän tai salaatin taimettumiseen kummassakaan kokeessa. Molemmissa kokeissa sekä kuiva- että nestejakeet lisäsivät kasvin kuivapainoa merkitsevästi verrattuna lannoittamattomaan kontrolliin ja tuottivat yhtä suuren biomassan kuin mineraalilannoite. Kokeessa 1 käyttömäärät suunniteltiin alustavissa analyyseissä saatujen ravinnepitoisuuksien perusteella. Eurofinsissä tehtyjen analyysien tulokset kuitenkin poikkesivat jonkin verran alustavista tuloksista, minkä vuoksi toteutuneet ravinnemäärät eivät täysin vastanneet suunniteltuja. Esimerkiksi typen määrät eivät olleet kaikissa käsittelyissä samat. Näin ollen kokeen 1 tuloksia voi pitää vain suuntaa antavina. Kokeessa 2 käsittelyjen ravinnemäärät pystyttiin täsmäämään tarkemmin. Mädätteestä tuotettujen kuiva- ja nestejakeiden välillä ei ollut merkitseviä eroja millään testatulla kasvilajilla (Kuva 22). Pelletin tiiviys ei vaikuttanut kasvien alkukehitykseen.



Kuva 22. Mädätteestä tuotettujen kuiva- ja nestejakeiden vaikutus kontrolloiduissa oloissa kasvaneen a) ohran, b) raiheinän ja c) salaatin kuivapainoon kuusi viikkoa kylvön jälkeen. Käsittelyjen selitykset ovat taulukossa 16. Hajontapylväät kuvaavat keskihajontaa.

Mädätteestä tuotetut kuiva- ja nestejakeet sisältävät arvokkaita ravinteita (Liite 1, Taulukko 1), jotka ovat hyödynnettävissä lannoitteina. Jakeiden sisältämien haitta-aineiden pitoisuudet alittavat selvästi Maa- ja metsätalousministeriön lannoitevalmisteasetuksessa 964/2023 säädetyt haitta-aineiden enimmäispitoisuudet (MMM 2023) (Liite 1, Taulukko 2). Käytön rajoitteena on kuitenkin ravinteiden alhaiset pitoisuudet jakeissa, minkä vuoksi käyttömäärät ovat suuria. Käytännön oloissa suuret käyttömäärät asettavat erityisvaatimuksia levityskalustolle ja/tai edellyttävät useampaa levityskertaa.

LÄHTEET

- Martynenko A, Vieira G. 2023. Sustainability of drying technologies: system analysis. *Sustainable Food Technology* 1, 629-640. <https://doi.org/10.1039/D3FB00080J>
- MMM 2023. Maa- ja metsätalousministeriön asetus lannoitevalmisteista 964/2023. <https://www.finlex.fi/fi/lainsaadanto/saaduskokoelma/2023/964>
- Pyykkönen V, Winkvist E, Seppänen A.-M, Vainio M, Virkkunen E, Koppelmäki K, Rasi S. 1923. Anaerobic digestion of solid agricultural biomass in leach-bed reactors. *Bioengineering* 10, 433. <https://doi.org/10.3390/bioengineering10040433>
- Paraschiv G, Moiceanu G, Voicu G, Chitoiu M, Cardei P, Dinca MN, Tudor P. 2021. Optimization issues of a hammer mill working process using statistical modelling. *Sustainability* 13, 973. <https://doi.org/10.3390/su13020973>
- Gienau T, Brüß U, Kraume M, Rosenberger S. 2018. Nutrient recovery from biogas digestate by optimised membrane treatment. *Waste and Biomass Valorization* 9. 10.1007/s12649-018-0231-

Taulukko 1. Kanadanvesiruton kuivamädätyksessä syntyneestä mädätysjäännöksestä tuotettujen kuiva- ja nestejakeiden ominaisuudet ja ravinnepitoisuudet. Analyysien tekijä Eurofins.

Ominaisuus	Yksikkö	Kuivajae Pelletti	Nestejae	
			Ruuviseparoitu	Sentrifugoitu
pH, happamuus (1:5)		8,6	7,8	8
Johtokyky (1:5)	mS/m	151	341	337
Kuiva-aine	%	88,3	6,6	2,5
Kosteus	%	11,7	93,4	97,5
Tuhka	% ka	38,5	38,6	43,2
Hehkutushäviö	% ka	61,5	61,4	56,8
Tilavuuspaino	kg/m ³	660	1000	1000
Typpi (N), kokonaispitoisuus	g/kg ka	19	63	93
Typpi (N), vesiliukoinen	g/kg ka	0,34	10,7	71,3
Fosfori (P), kokonaispitoisuus	g/kg ka	2,5	4,9	4,2
Fosfori (P), vesiliukoinen	mg/kg ka	470	2400	1700
Kalium (K), kokonaispitoisuus	g/kg ka	15	110	150
Magnesium (Mg), kokonaispitoisuus	g/kg ka	2,7	3,5	1,9
Rikki (S), kokonaispitoisuus	g/kg ka	2,4	5	6
Natrium (Na), kokonaispitoisuus	g/kg ka	0,76	5,1	7,3
Rauta (Fe), kokonaispitoisuus	mg/kg ka	5200	4500	2900
Mangaani (Mn), kokonaispitoisuus	mg/kg ka	480	810	520
Boori (B), kokonaispitoisuus	mg/kg ka	39	28	<22

Taulukko 2. Kanadanvesiruton kuivamädätyksessä syntyneestä mädätysjäännöksestä tuotettujen kuiva- ja nestejakeiden haitta-ainepitoisuudet sekä niiden sallitut enimmäismäärät. Analyysien tekijä Eurofins.

Haitta-aine	Pitoisuus mg/kg ka			
	Kuivajae	Nestejae		Sallittu enintään*
	Pelletti	Ruuviseparoitu	Sentrifugoitu	
Arseeni (As)	<5,2	<5,3	<5,4	40
Elohopea (Hg)	<0,07	<0,07	0,08	1
Kadmium (Cd)	<0,1	0,18	0,28	1,5
Kromi (Cr)	48	34	15	300
Kupari (Cu)	14	21	34	600
Lyijy (Pb)	2,3	3,1	4,4	100
Nikkeli (Ni)	8,2	24	18	70
Sinkki (Zn)	73	160	270	1500

*Haitallisen aineen enimmäispitoisuus orgaanisessa lannoitteessa, MMM 964/2023



Luonnonvarakeskus
Latokartanonkaari 9

00790 Helsinki

puh. 029 532 6000