LAPPEENRANNAN–LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT
LAPPEENRANTA-LAHTI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY LUT

LUT School of Engineering Science

Department of Separation Science

LUT Scientific and Expertise Publications

Raportit ja selvitykset – *Reports*

119

Teemu Kinnarinen

LieteKierto-hankkeen loppuraportti

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT School of Engineering Science

Department of Separation Science

LUT Scientific and Expertise Publications

Tutkimusraportit – *Research Reports*, 119

Teemu Kinnarinen

LieteKierto

Loppuraportti

ISBN 978-952-335-861-4 (PDF)

ISSN-L 2243-3384

ISSN 2243-3384

Lappeenranta 2022

Hankkeesta lyhyesti

LieteKierto-hankkeessa selvitettiin yhdyskuntalietteen käsittelyketjuja, niihin liittyviä toimijoita, kustannuksia, liiketoimintamalleja, teknisiä rajoitteita ja paikallisia tekijöitä, jotka vaikuttavat lietteen käsittelyketjun valintaan. Lisäksi selvitettiin ravinteiden talteenottoa ja tehtiin lietteenkäsittelyn tilaa kartoittava kyselytutkimus maan suurimmille vesilaitoksille. LieteKierto-hanke toteutettiin LUT-yliopistolla aikavälillä 12/2020 – 12/2021. Hankkeen päärahoittajana oli Euroopan aluekehitysrahasto (EAKR). Hankkeen epävirallisessa ohjausryhmässä olivat LUT-yliopiston lisäksi mukana Etelä-Savon ELY-keskus, Mikkelin Vesilaitos, Metsäsairila Oy, Rejlers Oy, Eco WWS Oy, Operon Group Oy ja Endev Oy. Hankkeen sisältö löytyy tiivistettynä Liitteestä 1.

Sisällysluettelo

1. Johdanto ... 2
2. Puhdistamolietteiden synty ... 2
3. Käsittelyketjut ... 4
3.1. Käsittelymenetelmät ... 4
3.2. Toteuttamiskelpoiset käsittelyketjut ... 6
3.3. *Energiatalous* ... 9
3.4. Haitta-aineet ... 10
4. Ravinteiden talteenotto ja kiintoaineen hyötykäyttö ... 12
4.1. Ravinteiden suhteelliset määrät ... 12
4.2. Typen ja fosforin talteenotto ... 13
4.3. *Käsitellyn lietteen hyödyntäminen ilman ravinteiden talteenottoa* ... 16
4.4. Erillispolton tuhkan ja pyrolyysihiilen hyödyntäminen ... 17
5. Käsittelyketjujen kustannukset ja ympäristövaikutukset ... 17
6. Lietteenkäsittelyn laitetoimittajia ... 18
6.1. Mekaaninen kuivaus ... 18
6.2. Mädätyslaitokset ... 18
6.3. Kompostointilaitokset ... 20
6.4. Termiset kuivaimet ... 20
6.5. Polttokattilat ... 22
6.6. Pyrolyysiuunit ja -laitokset ... 23
7. Liiketoimintamallien tarkastelu ... 24
8. Paikallisten tekijöiden vaikutus käsittelyketjun valintaan ... 26
8.1. Puhdistamolietteiden imago ... 26
8.2. Maantieteellinen sijainti ... 27
8.3. Synergiaedut ... 27
9. Kyselytutkimus jätevedenpuhdistamoille ... 28
9.1. Kysymyksenasettelu ... 28
9.2. Tulokset ... 29
10. Johtopäätökset ... 31
LIITTEET ... 31
LIITE 1 LieteKierto-tietokortti ... 31
LIITE 2 Kyselytutkimuksen lomake ... 31
Lähdeluettelo ... 32

1. Johdanto

Yhdyskuntalietteitä syntyy Suomessa kymmenillä puhdistamoilla, jotka tuottavat kuiva-aineen määrällä mitattuna vuosittain yli 140 000 tonnia lietettä. Lietettä ei voi käyttää tai läjittää sellaisenaan, vaan se on ensin käsiteltävä haitta-aineiden tuhoamiseksi ja ravinne- ja energiasisällön hyödyntämiseksi. Käsittelyn toisena tavoitteena on lietemäärän pienentäminen. Mahdollisia käsittelyjä ja niiden yhdistelmiä (l. käsittelyketjuja) on olemassa kymmenittäin, joista Suomessa on nykyään käytössä kymmenkunta muunnelmaa. Paikallisiin oloihin sopivan käsittelyketjun valinta voi olla vaikea tehtävä, sillä vaihtoehtoja on paljon, eikä tulevaisuuden vaatimuksista esimerkiksi ravinteiden hyödyntämistä ja haitta-aineiden poistamista koskien ole varmaa tietoa. Kaupallisia ratkaisuja yhdyskuntalietteiden käsittelyyn on tarjolla monilta toimijoilta, jotka ovat tyypillisesti keskittyneet tarjoamaan laitteistoja vain tiettyyn käsittelyketjuun tai sen osaan, kuten esimerkiksi lietteen mädätykseen, tai kuivaukseen ja sen jälkeiseen polttoon. Suurimmilla toimijoilla on kuitenkin tarjota laitteet ja järjestelmät lähes kaikkiin käsittelyketjuihin kumppaniverkostojensa kautta.

LieteKierto-hankkeen tärkeimpänä tavoitteena oli kuvata yhdyskuntalietteen käsittelyn ja hyödyntämisen vaihtoehdot, jotka ovat toteutuskelpoisia, kun huomioidaan sekä kaupalliset realiteetit että ympäristöasiat. Siksi hankkeessa painotettiin käsittelyratkaisuja, jotka ovat jo osoittaneet toimivuutensa ja jotka koostuvat riittävän kypsästä, kaupallistetusta teknologiasta ja ovat siten hankittavissa laitteistoja toimittavilta yrityksiltä. Selvityksen tuloksia esiteltiin marras-joulukuussa 2021 pidetyissä LieteKierto 1- ja LieteKierto 2 -webinaareissa, joista ensimmäisen aiheena oli puhdistamolietteiden käsittelyratkaisut, kun taas toisessa keskityttiin lietteiden ravinteisiin sekä niiden talteenottoon ja hyötykäyttöön.

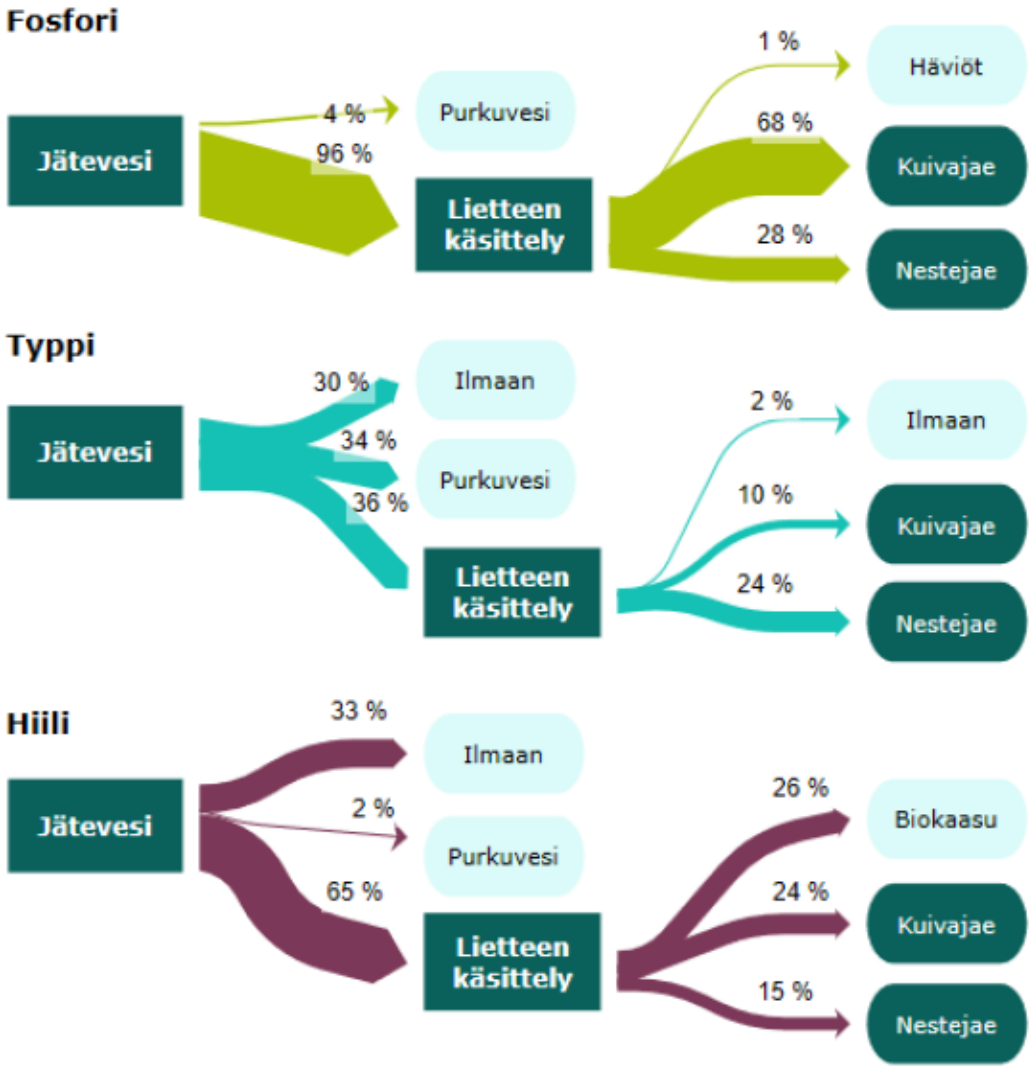
Samaa aihepiiriä sivuavia hankkeita on Suomessa toteutettu 2010-luvulla useita, muttei kuitenkaan samasta näkökulmasta. Berninger (2018) on kartoittanut lietteiden käsittelyyn, ravinteiden talteenottoon, tuotteistukseen, turvallisuuteen (mm. haitta-aineet) ja ohjauskeinoihin liittyviä hankkeita julkaisussaan Puhdistamolieteselvitys – Yhteenveto toteutettujen hankkeiden tuloksista. Selvityksessä mainituissa hankkeissa on tutkittu mm. lietteiden käsittelyä, fosforin talteenottoa, haitta-aineiden poistoa ja lietteiden käyttöä maataloudessa. Vesilaitosyhdistyksen julkaisemat raportit (Vesilaitosyhdistys 2013, 2014, 2016, 2019, 2021) antavat myös hyvän kokonaiskuvan lietteenkäsittelystä. Lietekierto-hanke täydentää aikaisemmissa hankkeissa kertynyttä tietoa, pyrkien huomioimaan kaupalliset ja teknologiset lähtökohdat aiempaa selkeämmin.

2. Puhdistamolietteiden synty

Jätevedenpuhdistamolla lietteeseen päätyy sekä jätevedestä peräisin olevaa kiinteää ja liuennutta ainesta että mahdollisesta kemiallisesta fosforinpoistosta aiheutuvaa sakkaa. Puhdistamolietteen tuhkapitoisuus on korkea, ja varsinkin rauta- ja alumiinisuoloilla tehtävän kemiallisen fosforinpoiston jälkeen se voi olla jopa yli 30 % lietteen kuiva-aineesta. Puhdistamolla liete voidaan lingota tai puristaa ylimääräisen nesteen erottamiseksi, jolloin muutaman prosentin kuiva-ainepitoisuus saadaan nostettua 20–30 %:iin. Mekaanisesti kuivattu liete on edullisempi kuljettaa käsiteltäväksi, ja vesipitoisuuden laskun ansiosta myös termisten käsittelyjen käyttö tulee taloudellisesti houkuttelevammaksi.

Lehtoranta et al. (2021) ovat laatineet havainnepiirroksen (Kuva 1), jossa on havainnollistettu fosforin, typen ja hiilen päätyminen jätevedestä lietteen esikäsittelyn ja mädätyksen kautta

mädätysjäännöksen kuiva- ja nestejakeeseen. Kuvan 1 massataseesta nähdään, että jätevedenpuhdistamolla fosforista keskimäärin 96 % poistetaan lietteen mukana, ja mädätyksessä tapahtuvan vähäisen häviön jälkeen lähes 70 % jää kiinteään jakeeseen ja lähes 30 % nestejakeeseen. Typpi puolestaan jakaantuu puhdistamolla tasaisemmin, kun puhdistusprosessissa kaasumaiseen muotoon muuntuu noin 30 %, samalla kun purkuveteen ja lietteenkäsittelyyn molempiin päätyy n. 35 % jäteveden sisältämästä typestä. Mädätyksessä typen poistuminen ilmaan on vähäistä, ja noin kaksi kolmasosaa typestä jää nestejakeeseen, joka yleensä kierrätetään takaisin puhdistamolle. Hiilestä kolmannes poistuu puhdistamolla ilmaan, pari prosenttia jää purkuveteen ja 2/3 sitoutuu lietteeseen. Mädätyksessä biokaasua syntyy vaihtelevia määriä, Kuvassa 1 esitetyn osuuden ollessa hyvin maltillinen. Mädätyksen jälkeen kuivajakeeseen jää selvästi enemmän hiiltä kuin nestejakeeseen.



Kuva 1. Fosforin, typen ja hiilen arvioitu jakautuminen eri virtoihin suhteessa jäteveden sisältämiin kokonaismääriin, kun liete käsitellään mädättämällä. (Lehtoranta et al. 2021)

3. Käsittelyketjut

Koska yhdellä käsittelyllä harvoin päästään haluttuun lopputulokseen haitta-aineiden pitoisuuden ja lietteen koostumuksen suhteen, käsittelyt suoritetaan vaiheittain eri menetelmien ketjuina. Tässä kappaleessa käydään läpi yleisimmät puhdistamolietteen käsittelymenetelmät ja -ketjut.

3.1. Käsittelymenetelmät

Puhdistamolietteen käsittelymenetelmät voidaan karkeasti ottaen jakaa biologisiin, kemiallisiin ja termisiin menetelmiin. Biologisiin menetelmiin kuuluvat luonnollisia mikrobeja hyödyntävät mädätys ja kompostointi. Yleisimmät kemialliset käsittelyt ovat emäksisissä olosuhteissa tapahtuva kalkkistabilointi ja happamissa olosuhteissa suoritettava Kemicond-märkähapetus. Termisistä käsittelyistä tunnetuimmat ja käytetyimmät menetelmät ovat terminen kuivaus, poltto ja pyrolyysi.

Mädätys

Nykyisin lietteen ensimmäinen käsittely puhdistamolla suoritetun tiivistyksen ja mahdollisen mekaanisen vedenerotuksen jälkeen on useimmiten mädätys, jossa lietteen sisältämää hiiltä hajotetaan kaasumaiseen muotoon, erityisesti metaaniksi CH_4 ja hiilidioksidiksi CO_2 hapettomissa olosuhteissa. Yhdyskuntalietteiden käsittelyssä mädätys suoritetaan tavallisimmin märkämädätyksenä, joka on kuivamädätykseen verrattuna helpommin operoitava (Alatalo 2019). Tällöin syötteen kiintoainepitoisuus on korkeintaan 15 % (Vieno et al. 2018). Mädätyksessä lämpötila on joko n. 30–45 °C (mesofiilinen) tai n. 50–60 °C (termofiilinen), mesofiilisen ollessa yleisempi. Myös Suomessa yhdyskuntalietteiden mädätyksessä luotetaan varmatoimisempaan mesofiiliseen mädätykseen (Kangas et al. 2011). Lietteen viipymäaika mädättämöllä on noin 2–4 viikkoa. Mädätyksen yhteydessä, yleensä ennen syöttöä reaktoriin, liete hygienisoidaan lämmittämällä se vähintään 70 °C:een taudinaiheuttajien tuhoamiseksi. Mitä korkeampaa hygienisointilämpötilaa käytetään, sitä lyhyempi on prosessin vaatima viipymäaika. Mädätyksestä saatavassa raakabiokaasussa tyypillinen metaanin ja hiilidioksidin suhde on 2:1. Metaanintuottopotentiaalia voidaan arvioida Buschwellin yhtälön avulla, kun syöttölietteen kemiallinen koostumus tunnetaan (Jarhio 2019). Raakabiokaasua voidaan jalostaa liikennepolttoaineeksi tai se voidaan polttaa kaasumoottorissa, jolla tuotetaan sähköä ja lämpöä mädättämön käyttöön. Prosessi on koko lailla energiaomavarainen. Mädätyksessä lietteen lämpöarvo laskee n. 40 % (Lohiniva et al. 2001), mistä johtuen mädätysjäännöksen jatkokäsittely polttamalla muuttuu epäedullisemmaksi vaihtoehdoksi. Toisaalta hiilen hajotessa mädätysjäännöksen typpipitoisuus kasvaa. Finnilä (2018) nostaa esiin mädätyksen hyötyinä (viitaten lähteisiin Luostarinen et al. 2011 ja Lehtomäki et al. 2007) mm. hajuhaittojen ja taudinaiheuttajien osittaisen eliminoinnin, sekä erityisesti typen muuntumisen liukoiseksi ammoniumtypeksi, joka on kasveille nopeasti hyödynnettävässä muodossa, eikä siksi ehdi haihtua ilmaan tai huuhtoutua vesistöihin kovin suurissa määrin. Vesilaitosyhdistyksen (2021) mukaan vuonna 2020 Suomessa mädätettiin yli 75 % yhdyskuntalietteestä.

Kompostointi

Kompostoinnissa liete tai mädäte, joista molemmat kompostoidaan yleensä mekaanisesti kuivattuina, mineralisoituu aerobisesti eli hapen läsnä ollessa. Syötteen hiilisisältö hajoaa osittain kaasuiksi, lähinnä CO_2:ksi, luonnollisten prosessien seurauksena. Kompostointi

saattaa vaatia mittavan määrän tukiainetta, kuten haketta, kuorta, turvetta tai olkea, jotta olosuhteet olisivat mikrobien hapensaannin kannalta otolliset. Tukiaineen määrä riippuu kompostin rakenteesta ja erityisesti syötteen kosteuspitoisuudesta. Yleensä järkevänä tasona pidetään syöttölietteen yli 20 % kuiva-ainepitoisuutta (Vieno et al. 2018). On hyvin tavallista, että tukiainetta tarvitaan enemmän kuin varsinaista syötettä. Kompostointi jakautuu aktiivivaiheeseen ja jälkikypsytykseen. Muutaman viikon mittainen aktiivivaihe voidaan suorittaa reaktorikompostointina, jossa massan hapensaanti varmistetaan puhaltamalla kompostiin ilmaa (tunnelikompostori) ja mahdollisesti myös kääntelemällä sitä (rumpukompostori tai yhdistelmä). Tämän jälkeen massa siirretään aumoihin jälkikypsytykseen, jonka annetaan jatkua jopa yli vuoden ennen kuin komposti käytetään hyödyksi tai jatkojalostetaan esim. erilaisiksi multatuotteiksi. Tukimateriaali voidaan poistaa seulomalla ennen kompostin loppukäyttöä, usein jo hyvissä ajoin kesken jälkikypsytyksen. Vesilaitosyhdistyksen (2021) mukaan noin 60 % Suomessa v. 2020 syntyneestä yhdyskuntalietteestä kompostoitiin.

Kemialliset käsittelyt

Lietteiden kemiallinen käsittely Suomessa tapahtuu joko kalkkistabiloimalla tai kemiallisesti hapettamalla. Kemiallisessa hapetuksessa käytetään Kemicond-menetelmää. Kalkkistabilointi voidaan tehdä joko poltetulla (CaO) tai sammutetulla ($Ca(OH)_2$) kalkilla, siten että pH:n noustessa taudinaiheuttajat kuolevat ja liete hygienisoituu. Poltettua kalkkia kuluu tällöin n. 6–10 % suhteessa lietteen kuiva-aineen määrään, minkä pitäisi riittää nostamaan pH vähintään 2 h ajaksi yli 12:een (Jaukkuri et al. 2018). Poltetulla kalkilla käsiteltäessä lietteen lämpötila nousee jopa n. 55 °C:een, mistä on suuresti apua hygienisoitumisessa. Sammutetun kalkin käyttö ei nosta lietteen lämpötilaa, jolloin käsittelyaika pitenee huomattavasti ja hygienisoituminen voi jäädä heikommaksi (Vieno et al. 2018). Puhdistamolietteet kalkkistabiloidaan yleisimmin mekaanisen vedenpoiston jälkeen, jolloin massassa on vähemmän vapaata vettä. Kalkkistabiloidun lietteen kuiva-ainepitoisuus on n. 40 % (Jaukkuri et al. 2018). Käsittelyssä lietteen määrä kasvaa, mikä johtuu kalkin lisäämisestä. Kalkkistabiloitua lietettä voidaan tarvittaessa jälkikypsyttää jopa kuukausien ajan.
Kemicond-menetelmää käytettäessä syötettä ei linkokuivata, vaan laimean lietteen pH lasketaan ensin happamaksi rikkihapolla, minkä jälkeen vetyperoksidilla hapettamalla saadaan liete kunnostettua sekä taudinaiheuttajien että käsiteltävyyden osalta. Samalla kun liete hygienisoituu, sen rakenne muuttuu vähemmän tarttuvaksi, mikä helpottaa jatkokäsittelyä tai peltokäyttöä. Kemicond-käsittelyn päätteeksi liete neutraloidaan NaOH:lla ja lietteestä poistetaan nestettä mekaanisesti, jotta sen varastointi tai kuljettaminen olisi helpompaa.

Termiset prosessit

Mekaanisesti kuivattujen lietteiden ja mädätysjäännösten käsittelyyn voidaan soveltaa myös lämmön avulla toimivia (l. termisiä) menetelmiä. Kaikkiin termisiin menetelmiin liittyy terminen kuivaus joko erillisenä vaiheena, prosessiin integroituna kuivauksena tai polttokattilassa tapahtuvana veden haihtumisena, ennen kuin palaminen pääsee käyntiin. Lietteen termistä kuivausta ei voida korvata mekaanisella vedenpoistolla kuin osittain, koska sen rakenteessa on eri tavoin lietematriisiin sitoutunutta vettä, joka ei poistu mekaanisin menetelmin ja on siten yksinkertaisinta poistaa haihduttamalla. Terminen kuivaus on erittäin energiaintensiivinen prosessi, jota harvoin kannattaa jatkaa yli 90 % kuiva-ainepitoisuuteen asti. Täyskuivana pidetään >85 % kuiva-ainepitoisuuteen kuivattua lietettä, joka on pölymäistä tai granuloitunutta ja voidaan polttaa sellaisenaan (Vieno et al. 2018). Näin kuiva liete ei enää homehdu varastoitaessa. Kuivaintyypistä riippuen laitteiston ominaisenergiankulutus vaihtelee välillä 0.8–1.1 MWh/t, josta lämpöenergian

osuus on 95–99 % (Capodaglio & Olsson 2019). Kuivauksen hankalin vaihe on n. 40–60 % ka-pitoisuus, jossa liete tarttuu herkästi kiinni pintoihin. Vaiheesta voidaan päästä nopeasti ohi käyttämällä kuivauksessa apuaineina kuivia tukimateriaaleja, esim. haketta tai turvetta. Kuivatun lietteen takaisinkierrätyksellä saadaan sama vaikutus. Liete viipyy kuivaimessa n. 30–120 min (Vesilaitosyhdistys 2019).

Kuivattu liete voidaan käsitellä polttamalla (>850 °C, min. 2 s) joko sellaisenaan, jolloin puhutaan erillispoltosta, tai yhdessä muiden polttoaineiden kanssa, jolloin on kyse rinnakkaispoltosta. Hieman perinteisistä polttotekniikoista poikkeava, erillispolttoon suunniteltu Endev Oy:n PAKU-prosessi, on koekäytössä Napapiirin Energia ja Vesi Oy:llä Rovaniemellä.
Kaasutuksessa puolestaan lämpötila on tyypillisesti 700–900 °C, ja sen tuloksena muodostuu päätuotteina vetyä H_2 ja hiilimonoksidia CO.

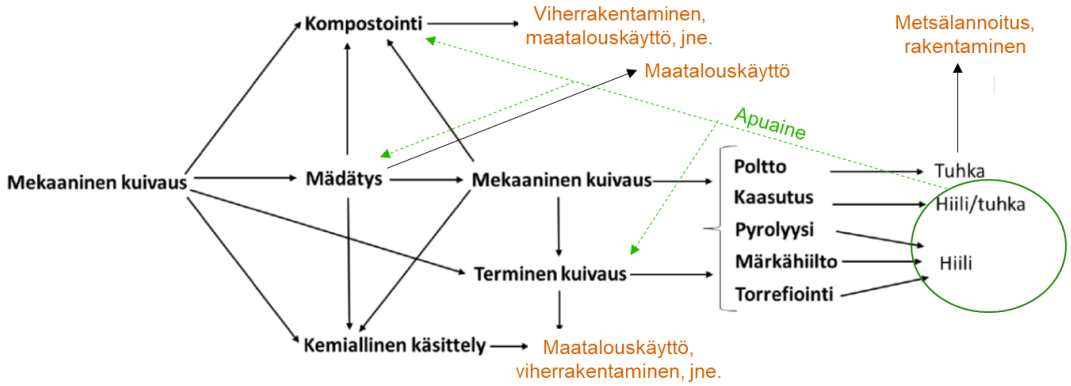
Potentiaalisena vaihtoehtona poltolle ja kaasutukselle on pyrolyysi (n. 450–550 °C), jossa orgaanisen materiaalin hajoaminen on epätäydellisempää. Pyrolyysi voidaan suorittaa myös korkeammissa lämpötiloissa. Lämpötilan ja muiden olosuhteiden valinnalla voidaan vaikuttaa tuotefraktioiden (hiili, öljy, kaasu) suhteellisiin osuuksiin. Viipymäaika pyrolyysissä on olosuhteista riippuen n. 10–60 min (Vesilaitosyhdistys 2019). HSY on rakentanut Ämmässuon jätteenkäsittelykeskukseen koelaitoksen, jossa pyrolysoidaan yhdyskuntalietettä. Tavoitteena on selvittää, voidaanko uuden Blominmäen puhdistamon lietettä käsitellä kilpailukykyisesti pyrolyysillä, ja siten jatkossa vähentää merkittävästi Ämmässuon kompostilaitoksen kuormitusta (HSY 2022).

Riittävä terminen käsittely voidaan suorittaa matalammassakin lämpötilassa (220–300 °C), jolloin puhutaan torrefioinnista, sekä märkähiiltomenetelmällä n. 8–15 prosentin ka-pitoisuudessa, lämpötilan ollessa 180 – 250 °C. Märkähiilto vaatii mekaanisen erotuksen ja mahdollisesti myös hiilifraktion termisen kuivauksen hiiltoprosessin jälkeen.

LieteKierto-hankkeessa termisistä käsittelyistä tarkasteltiin vain polttoa ja pyrolyysiä, koska ne edustavat myös lietteenkäsittelyssä käytännössä koeteltua tekniikkaa ja ovat osoittautuneet toimiviksi laitosmittakaavassa. Lisäksi molemmat menetelmät ovat (koe)käytössä Suomen olosuhteissa, mikä lisää niiden kiinnostavuutta.

3.2. Toteuttamiskelpoiset käsittelyketjut

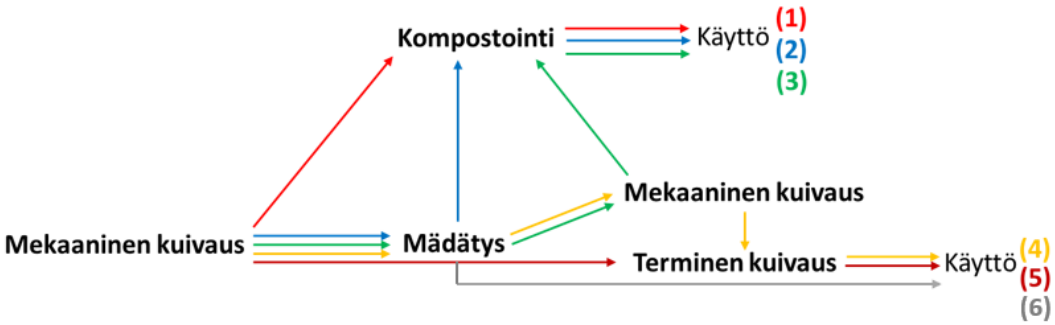
Kun vähintään kaksi edellisessä kappaleessa esiteltyä käsittelyä suoritetaan peräkkäin, muodostuu käsittelyketju. Kuvasta 2 havaitaan, että mahdollisia reittejä eri käsittelyjen kautta lopputuotteeksi on suurehko määrä. Kuten Kuvasta 2 nähdään, pääoperaatioiden lisäksi käsittelyketjuun voi kuulua myös mekaaninen kuivaus eli vedenerotus (vedetöinti). Linkouksen parametrien vaikutuksesta lopputuotteen ominaisuuksiin löytyy yksityiskohtaista tietoa Aarnion (2018) lopputyöstä. Kun mädätys on mukana käsittelyketjussa, myös erillinen lietteen hygienisointi kuuluu käsittelyketjuun. Kuvassa ei ole selkeyden vuoksi esitetty kaikkia prosessivaiheita, eli esimerkiksi kompostoinnin vaiheiden ja kompostin jatkojalostuksen, sekä kemiallisesti käsitellyn lietteen jatkokypsytyksen, kuten myös mädätyksen yhteydessä suoritettavan hygienisoinnin, oletetaan sisältyvän ko. käsittelyihin.



Kuva 2. Yhdyskuntalietteen käsittelyketjujen yleiskaavio tyypillisine käyttökohteineen, sis. termisessä käsittelyssä syntyvän jäännöshiilen käyttömahdollisuudet käsittelyketjussa.

Kuvassa 2 esitettyjen mahdollisten hyötykäyttötapojen suhteellista yleisyyttä on arvioitu Vesilaitosyhdistyksen (2021) julkaisussa, jonka mukaan lietteitä hyödynnetään nykyisin etenkin maatalouskäytössä (46 %), viherrakentamisessa (40 %) ja maisemoinnissa (7 %). Lisäksi varastoinnin tai polton osuus on 4 %, ja 3 %:lla lietteistä käyttötapa ei ole tiedossa. Maatalouskäyttöä harjoitetaan suhteellisesti eniten Hämeessä, Etelä-Pohjanmaalla, Pohjois-Savossa, Satakunnassa ja Pohjois-Pohjanmaalla. Viherrakentamisen osuus on suuri mm. Uudellamaalla, Pirkanmaalla, Keski-Suomessa, Kaakkois-Suomessa sekä Varsinais-Suomessa ja Ahvenanmaalla.

Kuvassa 3 on esitetty mädätyksen, kompostoinnin ja termisen kuivauksen käyttöön perustuvat käsittelyketjut. Käsittelyketjujen suhteellinen merkitys vaihtelee: märkämädätyksen, mekaanisen kuivauksen ja kompostoinnin sisältävä ketju on Suomessa yleisin, ja sitä käytetään erityisesti suurilla puhdistamoilla. Myös mädätteen käyttö pellolle levitettävänä lietteenä on, ainakin toistaiseksi, suhteellisen yleistä. Termisen kuivauksen ja rakeistuksen avulla maanparannusraetta tuottava prosessi on käytössä Lakeuden Etapilla. Joensuun Vesi on hiljattain luopunut termisestä kuivauksesta.



(1) Kompostointi → Seostaminen ja käyttö tai loppusijoitus
(2) Mädätys → Kompostointi → Seostaminen ja käyttö tai loppusijoitus
(3) Mädätys → Mekaaninen kuivaus → Kompostointi → Seostaminen ja käyttö tai loppusijoitus
(4) Mädätys → Mekaaninen kuivaus → Terminen kuivaus ja loppuprosessointi → Käyttö
(5) Terminen kuivaus ja loppuprosessointi → Käyttö
(6) Mädätys → Hygienisoidun lietteen peltokäyttö

Kuva 3. Käsittelyketjut, joihin sisältyy mädätys, kompostointi tai terminen kuivaus.

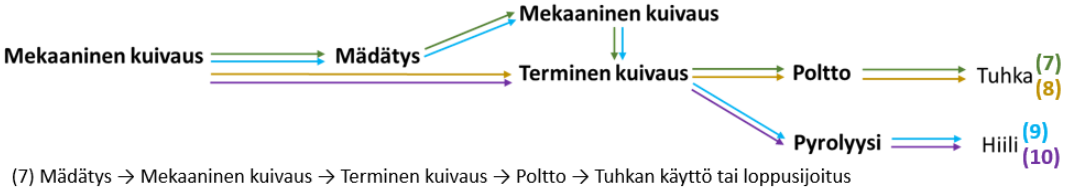
Kustannuksia potentiaalisesti *alentavat* seuraavat tekijät, kun käsittelyketju sisältää mädätyksen, kompostoinnin tai termisen kuivauksen:

a) Mädätyksestä saatavan raakabiokaasun energiakäyttö mädättämön laitteiston sähköistykseen, prosessin ja tilojen lämmitykseen sekä lietteen tai mädätteen hygienisointiin;
b) Mädätyksestä saatavan raakabiokaasun ja termisesti kuivatun (maanparannus)tuotteen ulosmyynti.

Käsittelykustannuksia puolestaan *aiheuttavat* syötteen ja tuotteen kuljetukset sekä itse prosessit, esim. lietteen kuumennus sen hygienisoimiseksi, sekoitus, rejektivesien käsittely ja apuaineiden käyttö kompostoinnissa (ja mahdollisesti kuivauksessa). Kustannuksia aiheutuu myös mahdollisesta raakabiokaasun jalostuksesta liikennekäyttöön soveltuvaksi sekä lietekompostin seostamisesta esimerkiksi multatuotteiden tuottamiseksi. Näitä operaatioita voidaan kuitenkin pitää myös lietteen käsittelyketjujen jälkeisinä mahdollisuuksina lisätä lopputuotteen arvoa, joten nettokustannuksia ei välttämättä synny.

Yllä mainituista tekijöistä johtuen on myös selvää, että käytettäessä raakabiokaasua mädättämön prosessien energianlähteenä, ulosmyytävän kaasun tuotantopotentiaali heikkenee selvästi. Samoin on syytä mainita, että termisesti kuivatut lopputuotteet, kuten rakeet tai pelletit, voidaan nykyisessä markkinatilanteessa myydä korkeintaan nimellisellä hinnalla. Normaalilla lietekompostilla ei tällä hetkellä ole Suomessa rahallista arvoa. Tilanne voi kuitenkin muuttua lannoitteiden kallistuessa tai niiden saatavuuden huonontuessa.

Kuvassa 4 esitetään käsittelyketjut, joissa liete ensin kuivataan ja sitten poltetaan tai pyrolysoidaan. Vaikka mädätys alentaa lietteen lämpöarvoa, sen käytöllä saadaan monipuolistettua lietteen energiakäyttöä biokaasun tuotannon ansiosta. Lisäksi pystytään vähentämään termisestä kuivauksesta aiheutuvia hajuhaittoja.



(7) Mädätys → Mekaaninen kuivaus → Terminen kuivaus → Poltto → Tuhkan käyttö tai loppusijoitus
(8) Terminen kuivaus → Poltto → Tuhkan käyttö tai loppusijoitus
(9) Mädätys → Mekaaninen kuivaus → Terminen kuivaus → Pyrolyysi → Hiilen käyttö esim. kompostoinnissa tai loppusijoitus
(10) Terminen kuivaus → Pyrolyysi → Hiilen käyttö esim. kompostoinnissa tai loppusijoitus

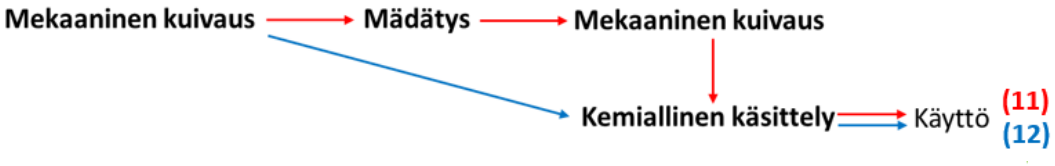
Kuva 4. Käsittelyketjut, joihin sisältyy terminen kuivaus ja sitä seuraava poltto tai pyrolyysi.

Käsittelyketjussa, jossa on mukana terminen kuivaus ja sen jälkeinen poltto tai pyrolyysi, on kustannuksia mahdollista *alentaa* seuraavin tavoin:

a) Poltosta tai pyrolyysistä saatavan lämpöenergian käyttö lietteen termiseen kuivaukseen;
b) Mädätystä käytettäessä biokaasun energiakäytön ulottaminen myös mekaaniseen ja termiseen kuivaukseen;
c) Tuhkan ja pyrolyysihiilen jalostaminen tuotteiksi, joilla on markkinahinta.

Kustannuksia *lisäävistä* tekijöistä maininnan arvoisia ovat kuljetukset, sekä tukipolttoaineiden käyttö, joka on välttämätöntä sekä poltossa että pyrolyysissä. Lisäksi termisiin menetelmiin liittyy aina korkeahkot investointikustannukset.

Yhdyskuntalietteen kemiallinen käsittely kalkkistabilointia käyttäen on esitetty Kuvassa 5. Kalkkistabiloinnista saatava lopputuote on korkean pH:n ansiosta hyvin hygienisoitua.



(11) Mädätys → Mekaaninen kuivaus → Kalkkikäsittely ja jälkikypsytys → Käyttö, varastointi tai loppusijoitus
(12) Kalkkikäsittely ja jälkikypsytys → Käyttö, varastointi tai loppusijoitus

Kuva 5. Käsittelyketjut, joihin sisältyy kemiallinen käsittely kalkkistabiloinnilla.

Kalkkistabiloinnin sisältävissä käsittelyketjuissa on huomioitava mahdolliset kuljetukset, kalkin hankinta, kalkin kunnollinen sekoittuminen lietteeseen, sekä mahdollinen jälkikypsytys. Menetelmä on parhaiten soveltuva pienille puhdistamoille. Kalkkistabilointi ei Suomen oloissa sovellu ympärivuotiseksi käsittelymenetelmäksi, koska kalkkistabiloidun lietteen peltolevitys on mahdollista vain kesäaikaan.

Kuva 6 havainnollistaa Kemiran kehittämään Kemicond-menetelmään tukeutuvia käsittelyketjuja. Kemicond-menetelmä hygienisoi lietteen tehokkaasti rikkihapolla hapottamalla ja vetyperoksidilla hapettamalla.

(13) Mädätys → Kemicond-käsittely → Mekaaninen kuivaus → Käyttö, varastointi tai loppusijoitus
(14) Kemicond-käsittely → Mekaaninen kuivaus → Käyttö, varastointi tai loppusijoitus

Kuva 6. Käsittelyketjut, joihin sisältyy kemiallinen käsittely Kemicond-menetelmällä.

Myös Kemicond-käsittelyn kokonaiskustannuksiin vaikuttavat kemikaalikustannukset. Laitteistoissa on jonkin verran eroa, sillä Kemicond suoritetaan normaalisti lietteelle, jota ei ole esikuivattu mekaanisesti. Kemicond-käsittelyn jälkeen neutraloitu liete on mahdollista kuivata mekaanisesti ennen käyttöä.

3.3. *Energiatalous*

Käsittelyjen energiankulutusta ei ole mielekästä arvioida tarkasti, sillä laitteisto- ja laitoskohtaiset erot ovat suuria, ja lisäksi mm. koneiden ja laitteiden erilaisesta operoinnista aiheutuu suurta vaihtelua. Karkeasti ottaen voidaan kuitenkin arvioida Taulukossa 1 esitettävien arvojen olevan oikeaa suuruusluokkaa. Kemiallisten käsittelyjen kohdalla on energiankulutuksen sijaan järkevämpää arvioida kemikaalien tarvetta, joten niitä ei ole esitetty Taulukossa 1.

Taulukko 1. Käsittelyjen arvioidut energiankulutukset (kWh/t).

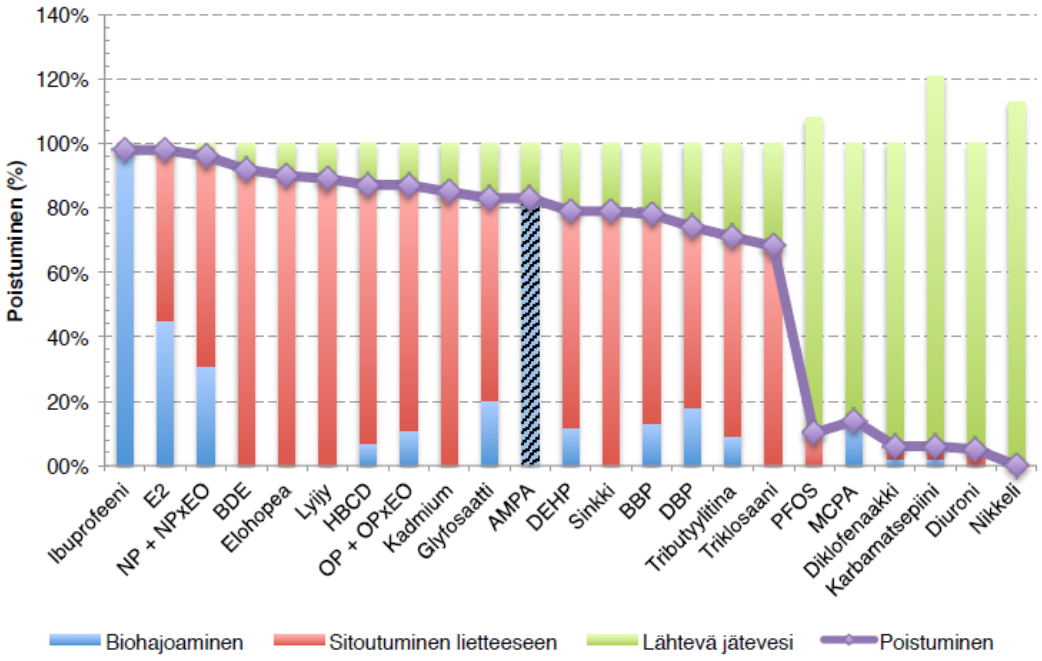
Käsittely	**Energiankulutus kWh/t**	**Lisätietoja**	**Lähde**
Mekaaninen vedenerotus	10-60	Riippuu mm. lietteen esikäsittelystä	Buchauer (2019)
Mädätys	90-150	Vain sähkönkulutus. Kaasun energiasisällön ansiosta prosessi energiaomavarainen	Motiva (2018)
Kompostointi	70	Lisäksi Dieseliä kuluu 5-8 L/t	Motiva (2018)
Terminen kuivaus	800-1100 [1] 1700-1800 [2] Lämpö: 500-700 [3] Sähkö: 20-50 [3]	Lämmöntuotanto kevyellä polttoöljyllä: 260 $kg_{öljyä}/t_{TS}$	[1] Capodaglio & Olsson (2019) [2] Motiva (2018) [3] Vesilaitosyhdistys (2019)
Terminen kuivaus + poltto	Lämpö: 10 (25 % TS) Sähkö: 75-80 (25-27 % TS) PAKU: jopa omavarainen (> 20 % TS)	Oletus: apuaineen osuus pieni ja lämpöä hyödynnetään esikuivauksessa, ja terminen kuivaus optimiin, ei maksimiin	Vesilaitosyhdistys (2019); Lehtoranta et al. (2021)
Terminen kuivaus + pyrolyysi	Lämpö: 70-150 Sähkö: 60-90	Oletus: apuaineen osuus pieni ja lämpöä tai pyrolyysituotteita hyödynnetään prosessissa ja esikuivauksessa (optimiin, ei maksimiin)	Vesilaitosyhdistys (2019); Lehtoranta et al. (2021)

Puhdistamolietteen lämpöarvo on tyypillisesti noin 14 – 18 MJ/kg TS, ja lämpöarvo laskee mädätyksen seurauksena noin kolmanneksella tasolle 8 – 12 MJ/kg TS (Aatsinki 2021). Polton energiataseeseen vaikuttaa siis lietteen kuiva-ainepitoisuuden lisäksi orgaanisen aineksen massaosuus lietteessä. Polton kokonaisuutta tarkasteltaessa myös tukipolttoaineen lämpöarvo ja kuiva-ainepitoisuus ovat huomioitavia tekijöitä. Manninen ja Laitinen (2015) esittävät SYKE:n raportissa polton apupolttoaineen tarpeeksi energiasisällöllä mitaten 460 ja 330 kWh/t lietettä, kun liete poltetaan ilman termistä esikuivausta 20 ja 30 % kuiva-ainepitoisuuksissa.

3.4. Haitta-aineet

Yhdyskuntalietteisiin päätyy väistämättä haitallisia aineita, joista aivan kaikkia ei voida poistaa tai tuhota millään käsittelyllä, mikäli myös käsittelyjäännökseen jäävät haitta-aineet huomioidaan. Kaikilla käsittelyketjuilla on kuitenkin myönteisiä vaikutuksia haitta-aineiden tuhoutumiseen.

Ennen lietteen käsittelymenetelmien vertailua on hyvä selvittää, kuinka haitta-aineet tyypillisesti hajoavat ja jakautuvat puhdistamolla lietteeseen ja purkuveteen. Vesilaitosyhdistyksen julkaisemasta tutkimuksesta (Vieno 2014) selviää, että useimpien haitta-aineiden biohajoaminen puhdistamolla ei ole erityisen merkittävää (Kuva 7). Tarkastelluista haitta-aineista ibuprofeeni hajoaa lähes täydellisesti, mutta haitallisten metallien ja lähes kaikkien muiden tarkasteltujen haitta-aineiden poistuminen puhdistamolta tapahtuu suurelta osin lietteen tai jäteveden mukana.



Kuva 7. Haitta-aineiden biohajoaminen jätevedenpuhdistamolla ja niiden jakautuminen lietteen ja lähtevän jäteveden välillä.

Taulukkoon 2 on koottu käsittelyketjujen kokonaisvaikutukset lopputuotteen laatuun käyttäen mittareina taudinaiheuttajien, mikromuovien, muiden orgaanisten yhdisteiden ja raskasmetallien tuhoutumista käsittelyissä.

Taulukko 2. Haitta-aineiden poistuminen yhdyskuntalietteen käsittelyketjuissa. Ei vaikutusta (0), osittainen vaikutus (+), selkeä vaikutus (++) ja erittäin selkeä tai kokonaisvaltainen vaikutus (+++).

Käsittely	Taudin-aiheuttajat	Mikro-muovit	Muut org. yhdisteet	Raskas-metallit
Mädätys + kompostointi	++	0	+	0
Mädätys + terminen kuivaus	+++	0	0(+)	0
Mädätys + kalkkistabilointi	++(+)	0	0(+)	0*
Mädätys + Kemicond	++(+)	0	++	0
Terminen kuivaus + poltto	+++	+++	+++	0**
Mädätys + kuivaus + poltto	+++	+++	+++	0**
Terminen kuivaus + pyrolyysi	+++	++	++(+)	0***
Mädätys + kuivaus + pyrolyysi	+++	++	++(+)	0***

** Kalkin lisäys alentaa konsentraatiota*
*** Raskasmetallit jäävät tuhkaan*
**** Raskasmetallit jäävät pyrolyysihiileen*

Kuten Taulukosta 2 havaitaan, ns. raskasmetallit eli haitalliset metallit tai alkuaineet eivät poistu millään käsittelyketjulla, vaan rikastuvat käsittelyjäännökseen.

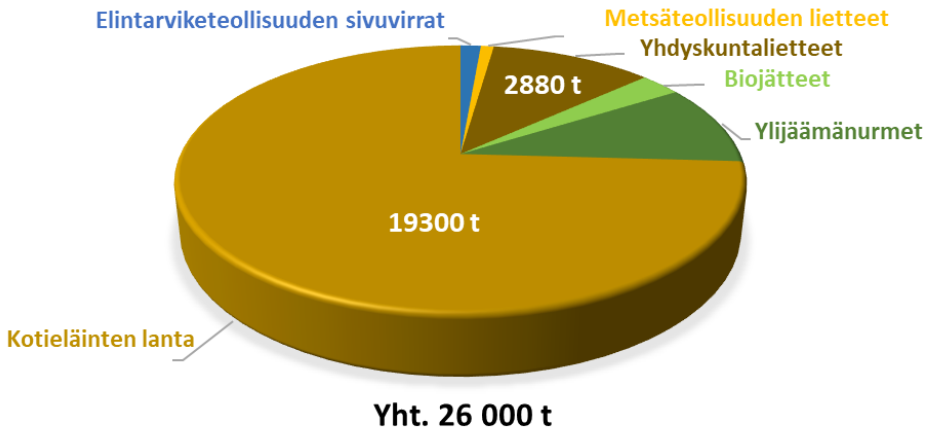
Koska haitalliset metallit eivät tuhoudu vaan rikastuvat käsittelyketjussa, niiden pitoisuuksiin joudutaan kiinnittämään erityistä huomiota. Vieno et al. (2018) ovat taulukoineet haitallisten metallien raja-arvoja lietteessä ja maaperässä sekä enimmäiskuormituksia EU:n jätevesilietedirektiivin ja eri maiden kansallisen lainsäädännön mukaan. Suomessa haitallisille metalleille on puhdistamolietteen maatalouskäytössä seuraavat raja-arvot (mg/$kg_{kuiva\text{-}ainetta}$): As = 25, Hg = 1,0, Cd = 1,5, Cr = 300, Cu = 600, Pb = 100, Ni = 100 ja Zn = 1 500.

4. Ravinteiden talteenotto ja kiintoaineen hyötykäyttö

Ravinteiden hyödyntäminen on olennainen osa lietteenkäsittelyä. Ravinteita voidaan erottaa lietteestä tai sen käsittelystä saatavista jakeista, kuten mädätyksen rejektistä tai polton tuhkasta. Vaihtoehtoisesti ravinteet voidaan käyttää ilman varsinaista talteenottoa mädätyksen, kompostoinnin tai kuivauksen jälkeen lietemassaan sitoutuneina komponentteina. Korkean lämpötilan termisissä käsittelyissä, erityisesti poltossa, lähes kaikki typpi menetetään savukaasujen mukana ja fosfori muuntuu hankalammin hyödynnettävään muotoon.

4.1. Ravinteiden suhteelliset määrät

Yhdyskuntalietteen ravinteista tärkeimmät ovat typpi ja fosfori. Kierrätettävissä olevan fosforin määrän perusteella voidaan arvioida yhdyskuntalietteiden suhteellista osuutta kierrätysravinteiden tarjonnassa. Haaviston (2018) mukaan kotieläinten lanta on Suomessa merkittävin kierrätysfosforin lähde, vastaten noin ¾:n osuudesta. Suomessa yhdyskuntien puhdistamolietteisiin sitoutuneen fosforin määrän arvioidaan olevan vuositasolla noin 2 900 tonnia, mikä on hieman yli 10 % kierrätyskelpoisen fosforin kokonaismäärästä. Kokonaisuutta on havainnollistettu Kuvassa 8. Kaliumpitoisuudet lietteissä ovat suhteellisen matalia, eikä kaliumilla siten ole samanlaista taloudellista merkitystä kuin typellä ja fosforilla.



Kuva 8. Suomessa vuosittain syntyvän kierrätettävissä olevan fosforin määrä alalajeittain. (Muokattu lähteestä Haavisto 2018, alkup. data: Marttinen et al. 2017).

Ruuhela (2017) on selvittänyt lopputyössään, kuinka ravinteet jakautuvat eri jakeisiin lietteen kompostoinnissa, mädätyksessä, termisessä kuivauksessa, pyrolyysissä ja poltossa. Taulukosta 3 nähdään, että kompostoinnissa valtaosa typestä ja fosforista saadaan talteen kiinteään kompostiin, mutta kuitenkin yli 40 % päätyy jäteveteen tai haihtuu. Mädätyksestä puolestaan havaitaan, että fosforista noin kolme neljäsosaa menee mädätysjäännökseen ja loput rejektiveteen, kun taas typestä hieman yli puolet jää rejektiveteen. Lietteen termisessä kuivauksessa lauhderejektiin päätyy vain viitisen prosenttia typestä, jolloin kuivajakeeseen saadaan lähes kaikki fosfori ja 95 % typestä. Pyrolyysistä saadaan, prosessiolosuhteista riippuen, vaihtelevia määriä kiinteää hiiltä, nestemäistä öljyä ja kaasumaista jaetta. Fosfori pyrkii sitoutumaan biohiileen, typen päätyessä neste- ja kaasujakeisiin. Poltossa fosfori sitoutuu tuhkaan ja typpi poistuu savukaasujen mukana.

Taulukko 3. Ravinteiden jakautuminen eri virtoihin Turun seudun puhdistamon lietteen tapauksessa (Ruuhela 2017).

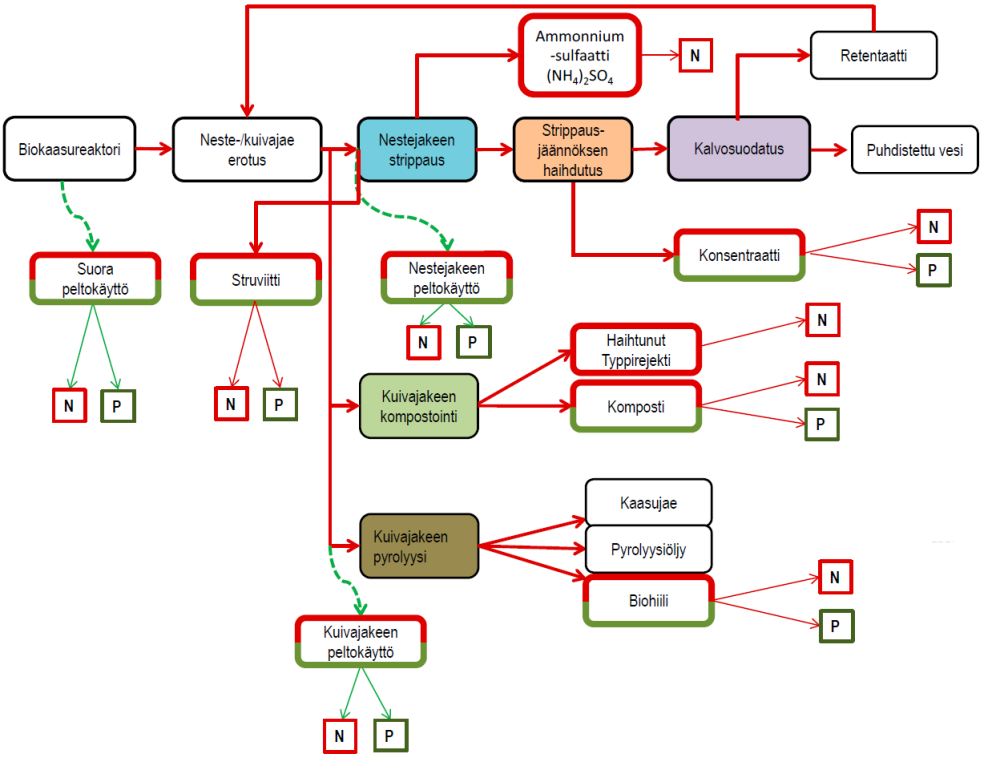
Menetelmä	Ravinne	Muodostuvat jakeet (TS/a)			
Kompostointi		Komposti	Jätevesi + haihtuvat yhdisteet		
	P	218 (57 %)	164 (43 %)		
	N	567 (56 %)	445 (44 %)		
Mädätys (mesofiilinen ja termofiilinen keskimäärin)		Rejektivesi	Mädätysjäännös	Biokaasu	
	P	55 (24 %)	173 (76 %)	0	
	N	257 (53 %)	227 (46,9 %)	5 (0,1 %)	
Kuivaus		Rejektivesi	Kuivattu liete		
	P	0,05 (0,02 %)	227,95 (99,8 %)		
	N	25 (5 %)	459 (95 %)		
Pyrolyysi (kuivauksen jälkeen)		Bioöljy	Biohiili	Savukaasut	Jätevesi
	P	7 (3 %)	221 (97 %)	0	0
	N	315 (65 %)	0	85 (17,5 %)	85 (17,5 %)
Poltto		Tuhka	Savukaasut	Jätevesi	
	P	228 (100 %)	0	0	
	N	0	242 (50 %)	242 (50 %)	

4.2. Typen ja fosforin talteenotto

Typpeä ja fosforia voidaan ottaa talteen rejektivesistä saostamalla, kiteyttämällä tai strippaamalla. Kalvosuodatuksen, haihdutuksen, biologisen käsittelyn ja pH-säädön avulla voidaan erotustehokkuutta parantaa. Fosforin talteenottoa suunniteltaessa on kuitenkin pidettävä mielessä, että vähintään kaksi kolmasosaa mädätteen fosforisisällöstä jää kiintoainejakeeseen, ellei sitä muunneta liukoiseen muotoon esimerkiksi biologisen tai kemiallisen liuotusprosessin avulla. Ammoniumtypen erillistalteenotto on mahdollista mädättämön rejektivedestä strippaamalla, myös struviittisaostuksen jälkeen. Strippauksen energiankulutukseksi on arvioitu n. 50 kWh/t, kalvosuodatukselle arvio on 6 kWh/$t_{perm.}$, ja haihdutukselle 265 kWh/t (Mönkäre et al. 2016).

Kuva 9 esittää mahdollisia vaihtoehtoja typen ja fosforin ottamiseksi talteen eri jakeista, lietteen mädätyksen jälkeen. Ensimmäinen vaihtoehto, jota edelleen Suomessakin harjoitetaan, on lietemäisen mädätteen suora peltokäyttö. Lietteen suorassa peltokäytössä on paitsi selkeät etunsa, myös omat ongelmakohtansa (ks. Kpl 8.1). Mädätteen linkoamisen jälkeen nestejakeesta on helppo saostaa struviittia tai ottaa ammoniumtyppeä talteen strippaamalla. Myös nestejakeen peltokäyttö on mahdollista,

mutta sen matalamman fosforipitoisuuden takia tuskin nykytilanteessa kannattavaa. Kuivajakeen kompostoinnissa syntyy itse kompostin lisäksi typpirejektiä. Mikäli nestejakeen jatkojalostus strippaamalla nähdään lisäarvoa tuovaksi prosessiksi, mutta erotuksessa syntynyttä kuivajaetta ei halutakaan jatkokäsitellä, kuivajae voidaan levittää pellolle. Liukoisen fosforin raja-arvo on tässä tapauksessa 400 kg/ha/5 v (Finnilä, 2018).



Kuva 9. Mädätteen sisältämien ravinteiden talteenottomahdollisuuksia, kun menetelminä käytetään struviittisaostusta, ammoniumtypen strippausta, strippausjäännöksen haihdutusta, sekä kuivajakeen kompostointia tai pyrolyysiä. (Mönkäre et al. 2016)

On myös kehitetty prosesseja, joissa fosforin jälkisaostuksella talteen otettua fosforia käytetään ammoniakin strippauksen jälkeisessä vaiheessa pesuliuoksessa fosforihapon muodossa, jolloin se ammoniumtyppisen kaasuvirran kanssa reagoidessaan muodostaa ammoniumfosfaattia. Suomessa HSY on pilotoinut prosessia kauppanimellä RAVITA (ks. Kainulainen 2017).

Kaupallisia prosesseja fosforin talteenottoon lietteenkäsittelyprosessien eri jakeista löytyy runsaasti (ks. Taulukko 4). Lopputuotteena on yleisimmin struviitti eli magnesiumammoniumfosfaatti ja toisinaan kalsiumvetyfosfaatti (brushiitti) tai kalsiumfosfaatti. Struviitin kiteytys tapahtuu Yhtälön (1) mukaisesti, kun fosfaattia ja ammoniumia sisältävään liuokseen lisätään magnesiumioneja, esimerkiksi MgO, $Mg(OH)_2$ tai $MgCl_2$.

$$Mg^{2+} + NH_4^+ + HPO_4^{2-} + 6H_2O \rightarrow MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O\,(s) + H^+ \qquad (1)$$

Struviitin saostukseen soveltuva pH-alue on 7 – 11,5, mutta parhaiten saostus onnistuu niukkaliukoisella alueella, kun pH on välillä 9 – 10,7 (Kokko et al. 2019).

Taulukko 4. Kaupallisia prosesseja fosforin talteenottoon lietteenkäsittelyssä syntyvistä virroista. Taulukon pohjana on käytetty Finnilän (2018) eri lähteistä kokoamia tietoja.

Prosessi	Tuote	Talteenotto-%	Lisätiedot	Valmistaja
CalPrex*	Brushiitti $CaHPO_4 \cdot 2H_2O$	-	Käytetään MagPrex-prosessin esikäsittelynä	Centrisys/CNP
MagPrex (aik. AirPrex)**	Struviitti	90-98	Joko rejektille tai linkoamattomalle mädätteelle	Centrisys/CNP
Crystalactor	Kalsiumfosfaatti	70-80	Vaatii kiintoainepellettejä, joiden läpi neste virtaa	Royal HaskoningDHV
Ostara Pearl***	Struviitti	75-95	Kaupallistettu Crystal Green -lannoitetuote	Ostara
NuReSys	Struviitti	80-85	Teknologiaa myös linkoamattomalle mädätteelle	NuReSys
Phospaq	Struviitti	70-95	Struviitin erotus hydrosyklonin ja ruuvipuristimen avulla	Paques
ANPHOS	Struviitti	N/A	2 vaihetta: CO_2:n strippaus ja struviitin kiteytys	Colsen

** vaatii muutoksia puhdistamon prosessiin*
*** perustuu Seaborne-prosessiin*
**** tehostettavissa WASSTRIP-prosessin avulla*

Taulukossa mainittujen ja jo kaupallistettujen prosessien lisäksi on kehitetty suuri määrä pilot-mittakaavassa toimivia konsepteja. Näistä tunnetuimpia on kuvattu lyhyesti alla. Menetelmät on koottu lähteistä Vesilaitosyhdistys 2016, Finnilä 2018, Virtanen 2020 ja käsittelyjä tarjoavien yritysten verkkosivuilta.

- KREPRO-käsittelyssä mädätysjäännöstä tai lietettä hydrolysoidaan termisesti, jonka jälkeen hapolla uutettu lopputuote otetaan talteen rautafosfaattisakkana n. 75 % saannolla.
- Mephrec-prosessissa liete poltetaan masuunityyppisessä uunissa koksin kera, ja lopputuotteena saadaan fosforipitoinen kuonafraktio (sis. mm. piifosfaattia), jonka mukana n. 80 % fosforista saadaan talteen.
- P-Roc-prosessissa mädättämön rejektivedestä kiteytetään kalsiumfosfaattia 45 %:n erotustehokkuudella.
- PAKU-prosessi mahdollistaa mekaanisesti kuivatun lietteen tai mädätysjäännöksen termisen kuivauksen ja erillispolton 85 % talteenottoasteella. Poltosta saatavasta tuhkasta valtaosa otetaan talteen tuotetuhkana ja pieni osa on jätetuhkaa. Tuotetuhkaa voidaan käyttää esimerkiksi metsälannoitteena. Endev Oy:n pilot-laitos on käynnistynyt Rovaniemellä yhteistyössä Napapiirin Energia ja Vesi Oy:n kanssa vuonna 2019.
- ASH DEC -prosessi on Outotecin kehittämä polttomenetelmä, jossa alkalisuolojen läsnä ollessa, termisten reaktioiden avulla 800 – 1050 °C:ssa, fosforin talteenottoasteeksi saadaan 90 – 98 % (ks. Hermann 2014). Menetelmässä

raskasmetallit höyrystyvät pois ja lopputuote on fosforirikas tuhka (Havukainen et al. 2012).

- BioCon-käsittelyssä lietettä tai lietetuhkaa uutetaan hapolla ja uuttoliuosta käsitellään ioninvaihdolla. Tuotteena on fosforihappo.
- PASH-menetelmä perustuu lietteenpolton tuhkan uuttoon suolahapolla, minkä jälkeen struviittia ja kalsiumfosfaattia saostetaan kalkilla uuttoliuoksesta n. 90 % tehokkuudella.
- SEPHOS-menetelmässä lietteenpolton tuhkaa uutetaan ensin rikkihapolla, minkä jälkeen pH:ta nostetaan natriumhydroksidilla ja alumiinifosfaattipitoinen sakka otetaan talteen (Nieminen 2010).
- THERMPHOS-menetelmässä elektrotermisellä prosessilla saadaan lietteenpolton tuhkasta fosforia talteen. Prosessi ei sovellu runsaasti rautaa sisältäville lietteille, joten sen soveltaminen Suomen olosuhteissa ei ole järkevää.
- Aqua Reci -prosessissa lietettä hapetetaan ylikriittisellä vedellä korkeassa lämpötilassa ja paineessa (> 221 bar ja > 374 °C), jolloin orgaaninen hiili hajoaa CO_2:ksi, typpi N_2:ksi ja fosfori hapettuu P_2O_5:ksi. Fosforin talteenotto suoritetaan seuraavassa prosessivaiheessa saostamalla fosfaattia joko CaO:lla tai MgO:lla.

Edellä mainittujen prosessien lisäksi Shaddel et al. (2019), ks. lähteestä erityisesti Fig. 2, listaa suuren määrän erilaisia fosforin talteenottoprosesseja, joista useimmat eivät kuitenkaan ole kaupallisesti saatavilla.

Lietteessä fosfori on rikastuneena kiintoaineeseen. Niinpä fosforin tehokas erottaminen lietteestä vaatii esimerkiksi termisen hydrolyysin tai bioliuotuksen, jonka jälkeen fosfori voidaan saostaa. Vesilaitosyhdistyksen (2016) mukaan bioliuotuksen ja KREPRO-menetelmän yhdistelmää käytettäessä lisäkustannus kompostointiin verrattuna on 14 – 20 €/kg P, polton tuhkasta liuotettaessa ja saostettaessa 7-11 €/kg P, ja bioliuotuksen ja struviittikiteytyksen yhdistelmällä 14-22 €/kg P. Tämän vertailun perusteella siis ravinteiden erottamista lietteen tai mädätteen sisältämästä kiintoaineesta ei siis voida pitää taloudellisena ratkaisuna, varsinkaan jos myös vähäravinteisen erotusjäännöksen käsittelystä aiheutuvat lisäkustannukset huomioidaan.

4.3. *Käsitellyn lietteen hyödyntäminen ilman ravinteiden talteenottoa*

Lietteen ravinnesisältö voidaan hyödyntää myös ilman ravinteiden erotusta. Tällöin hyötykäytettävä valmiste luokitellaan Suomessa joko maanparannusaineeksi tai kasvualustaksi. Vesilaitosyhdistys (2021) esittää Ruokaviraston vuonna 2019 tekemän tyyppinimiluokittelun, jossa orgaanisten maanparannusaineiden ryhmään 3A2 kuuluvat maanparannuskomposti (3A21), tuorekomposti (3A23), kuivarae tai jauhe (3A25), hapotettu tai stabiloitu puhdistamoliete (3A26), maanparannuslahote (3A27) ja vanhennettu puhdistamoliete (3A29). Samasta lähteestä löytyy myös maanparannusaineena sellaisenaan käytettävät sivutuotteet (ryhmä 3A5): kalkkistabiloitu puhdistamoliete (3A51), mädätysjäännös (3A52), lahotettu puhdistamoliete (3A53) sekä kemiallisesti hapetettu puhdistamoliete (3A57). Lietteen jatkojalostuksesta lopputuotteeksi vastaa usein ulkopuolinen toimija, ja yhä harvemmin jatkojalostajana on itse vesilaitos.

Suomessa mädättämällä, kompostoimalla, kemiallisesti ja termisesti (kuivaamalla) käsiteltyjä lietteitä hyödynnetään pääosin maataloudessa ja viherrakentamisessa.

4.4. Erillispolton tuhkan ja pyrolyysihiilen hyödyntäminen

Lietteen erillispolton tuhkalla voisi olla potentiaalia erityisesti metsälannoitteena. Lietetuhkalle ei kuitenkaan ole vielä haettu hyväksyntää lannoitevalmisteiden tyyppinimiluetteloon, joten sitä voidaan käyttää korkeintaan 3 % pitoisuudessa muuhun tuhkaan seostettuna (Vesilaitosyhdistys 2019). Joidenkin lähteiden mukaan (esim. Lehtoranta et al. 2021) PAKU-prosessista saatavaa tuhkaa olisi mahdollista käyttää metsälannoitteena.

Lietteenpolton tuhkaa on mahdollista käyttää myös muihin tarkoituksiin, kuten sementin, asfaltin ja tiilien raaka-aineena. Maarakentaminen ja kaivosten täyttö lietetuhkalla on myös mahdollista.

Pyrolyysihiiltä voidaan periaatteessa käyttää esimerkiksi kompostoinnissa tukimateriaalina tai mädätyksessä massan rakennetta parantamaan. Kainulaisen (2019) mukaan lietehiiltä ei vielä voida käyttää maanparannusaineena pelloilla, puutarhoissa ja viherrakentamisessa, koska sillä ei ole tyyppinimeä lannoitevalmisteena. Jos kuitenkin hyväksyntää tyyppinimiluetteloon haetaan, sopivin ryhmä olisi 3A3 eli maan rakennetta parantavat aineet.

5. Käsittelyketjujen kustannukset ja ympäristövaikutukset

Taulukossa 5 on esitetty suuntaa antavia arvioita eri käsittelyketjujen kustannuksista. Erityisesti termisten menetelmien kohdalla kustannukset voivat tällä hetkellä olla selvästi Taulukon 5 arvoja korkeammat. Tiedot perustuvat haastatteluihin sekä Pöyryn (2018) ja Vesilaitosyhdistyksen (2019) julkaisuihin.

Taulukko 5. Käsittelyketjujen arvioidut kustannukset, sis. laiteinvestoinnit 20 vuoden takaisinmaksuajalla ja 5 % korkokannalla.

Käsittelyketju	**Kapasiteetti 5000 $t_{ka.}$/a Kustannus €/t**	**Kapasiteetti 10000 $t_{ka.}$/a Kustannus €/t**
Mädätys + kompostointi	60-70	50-60
Mädätys + terminen kuivaus (85-90 % TS)	80-100	70-90
Mädätys + kalkkistabilointi	75-80	70-75
Mädätys + Kemicond	95-100	90-95
Terminen kuivaus (45% TS) + erillispoltto	85-90	75-80
Mädätys + kuivaus (45 % TS) + erillispoltto	120-130	110-120
Terminen kuivaus (45 % TS) + pyrolyysi	95-100	85-90
Mädätys + kuivaus (45 % TS) + pyrolyysi	120-140	110-130

Pelkän mädätyksen kustannuksiksi on arvioitu n. 40 – 50 €/t. Alan toimijoiden yleinen näkemys on, että mädätyksen ja kompostoinnin kustannuksissa tullaan näkemään nousua, sillä lopputuotteiden laatuvaatimukset tiukentuvat ja toisaalta hyötykäyttökohteiden määrä mahdollisesti vähenee. (Pöyry 2018)

Lietteen kuljetus aiheuttaa merkittäviä kustannuksia erityisesti silloin, kun kuljetusmatka on pitkä ja liete on märkää. Liete kannattaa siis loppukäsitellä mahdollisimman lähellä syntypaikkaansa, mikäli olosuhteet sallivat. Tehokas mekaaninen kuivaus ennen kuljetusta auttaa pitämään kustannukset maltillisempina ja voi myös helpottaa lietteen jatkokäsittelyä. Pöyryn (2018) selvityksen mukaan täysperävaunuyhdistelmällä kuljetuskustannukset 100 km etäisyydelle ovat 9 €/t, 300 km etäisyydelle 21 €/t ja 500 km etäisyydelle 35 €/t, olettaen että ajoneuvoyhdistelmä ajetaan takaisin tyhjänä. Selvityksen tekemisen jälkeen polttoaineiden hinnannousu ja muiden kustannusten nousu on kuitenkin lisännyt kuljetuskustannuksia vähintään 20–25 %. Lauronen (2017) on selvittänyt kuljetusten CO_2-päästöjä. Täysperävaunuyhdistelmällä 40 tonnin hyötykuormalla maantieajossa päästöt ovat n. 1 200 g CO_2-ekv./km ja ilman kuormaa ajettaessa n. 800 g CO_2-ekv./km.

6. Lietteenkäsittelyn laitetoimittajia

Laitetoimittajien esittelyssä keskitytään yhtiöihin, joilla on referenssejä lietteenkäsittelystä, jotka markkinoivat laitteitaan Euroopassa, ja joilla on mahdollisuus toimittaa laitteistoja myös Suomeen. Tarkastelun ulkopuolelle on rajattu useimmat yhdysvaltalaiset yritykset, joilla ei ole merkittävää toimintaa Euroopassa ja valtava joukko kiinalaisia yrityksiä, joiden kyvystä toimittaa valmiita laiteratkaisuja Suomeen ei ole tietoa saatavilla.

6.1. Mekaaninen kuivaus

Lietteen mekaaninen kuivaus jätevedenpuhdistamolla ei varsinaisesti kuulu LieteKierto-hankkeen sisältöön, mutta koska sillä on vaikutusta lietteen jatkokäsittelyyn, on aihetta syytä käsitellä lyhyesti. Mekaanisen kuivauksen tavoitteena on poistaa lietteestä vapaata vettä, jolloin käsittelyyn lähtevän lietteen määrä pienenee huomattavasti, kun kiintoainepitoisuus nousee muutamasta massaprosentista jopa yli 30 m-%:iin. Useimmiten lietteen mekaaninen kuivaus tapahtuu lingoilla, joista tavallisimmin käytetään dekantterilinkoja. Linkojen vaihtoehtoina ovat ruuvipuristimet, suotonauhapuristimet ja kammiosuodattimet. Ennen mekaanista kuivausta liete flokkuloidaan polymeerillä, jota lingolla erotettaessa kuluu Aarnion (2018) mukaan 0.5 – 8 kg per lietteen kuiva-ainetonni. Tarvittava annostus riippuu lietteen tyypistä: aktiiviliete ja mädäte vaativat selvästi suuremman polymeeriannostuksen kuin primääriliete.

Suomessa lietteen mekaaniseen vedenpoistoon soveltuvia laitteistoja tarjoavat mm. Andritz AG, Alfa Laval AB, GEA Group AG ja Huber GmbH.

6.2. Mädätyslaitokset

Mädätyslaitoksia valmistavia, valmistuttavia, suunnittelevia, huoltavia ja mahdollisesti operoivia yrityksiä on koottu Taulukkoon 6, josta puuttuu pienten laitosten toimittajat ja

sellaiset toimijat, joilla ei ole merkittävää toimintaa Euroopassa ja joiden referenssit eivät liity Suomeen rakennettuihin laitoksiin.

Taulukko 6. Mädättämöjä tarjoavia yrityksiä, niiden toiminnan yleiskuvaus ja referenssejä Suomessa toteutettuihin biokaasulaitoksiin.

Yritys	Kuvaus	Referenssejä Suomessa
Gasum Oy	Rakennuttaa, omistaa ja operoi mädättämöjä ja jatkojalostaa biokaasua	mm. Oulun, Kuopion ja Turun biokaasulaitokset
Watrec Oy	Rakentaa mädättämöjä, mm. Gasumille	mm. Gasum Oy:n Oulun ja Kuopion biokaasulaitokset
Ecoprotech Oy	Rakentaa omia EPAD-mädättämöjä ja edustaa MARTIN / Thöni -kuivamädättämöjä Suomessa	mm. Etelä-Karjalan jätehuolto Oy:n biolaitos ja Kymen Bioenergia Oy:n (v. 2019 alk. osa Gasumia) biokaasulaitos
Weltec Biopower GmbH	Rakentaa mädättämöjä	BioKymppi Oy:n biokaasulaitos Kitee
Hitachi Zosen Inova (HZI) Schmack GmbH	Rakentaa mädättämöjä	N/A
STRABAG Umwelttechnik GmbH	Rakentaa mädättämöjä	HSY:n Ämmässuon ekoteollisuuskeskus
Suez Water Technologies & Solutions	Tarjoaa mädättämöjä (Digelis)	N/A

Gasum Oy on Suomen merkittävin toimija mädättämöjen omistajana sekä niissä tuotetun biokaasun jatkojalostuksen ja jakelun aloilla. Yhtiö on hyödyntänyt laitosprojekteissaan esimerkiksi Watrec Oy:n osaamista.

Ecoprotech Oy:n kumppanina toimii saksalainen MARTIN GmbH / Thöni Industriebetriebe, joka on erikoistunut kuivamädätykseen, ja lisäksi Ecoprotech Oy:llä on tarjolla märkämädätykseen oma EPAD-reaktorinsa. Ensimmäinen EPAD-laitos käynnistyi Forssassa vuonna 1999.

Suomen Biovoima Oy käyttää mädättämöjen rakentajana saksalaista HZI Schmack GmbH:ta. Yrityksen oman referenssiluettelon mukaan sillä ei vielä ole laitostoimituksia yhdyskuntalietteen mädätykseen.

Strabag GmbH rakentaa sekä märkä- että kuivamädättämöjä. HSY:llä on käytössä biojätteen kuivamädätyslaitos Ämmässuon ekoteollisuuskeskuksessa. Strabag ei

referenssiluettelonsa mukaan ole rakentanut märkämädättämöjä puhtaasti yhdyskuntalietteelle vuoden 2010 jälkeen.

Suez Water Technologies & Solutions tarjoaa sekä mesofiilistä että termofiilistä prosessia Digelis-tuotemerkillä. Suezin kotisivulta löytyvien referenssien mukaan Digelis-mädättämöjä on myyty maailmalla ainakin Ranskaan, Egyptiin, Chileen ja Unkariin. Termisen hydrolyysin sisältäviä Digelis Turbo -prosesseja yhtiö on toimittanut Chileen ja Espanjaan.

6.3. Kompostointilaitokset

Tunneli- tai rumpukompostointilaitoksen rakentaminen ei ole suurta erityisosaamista vaativaa tekniikkaa. Erityisesti tunnelikompostointi on helppo toteuttaa, koska siinä ei välttämättä tarvita liikkuvia osia. Täyttö ja tyhjennys tehdään pyöräkuormaajalla, poikkeuksena eräät suuret laitokset, joissa käytetään kuljettimia. Suomessa on tyypillistä, että laitoksen suunnittelun jälkeen toteutuksesta vastaa paikallinen urakoitsija.

Tunnelikompostointi skaalautuu hyvin ja soveltuu myös suurille laitoksille, joten se on Suomessa käytetyistä lietteen laitoskompostoinnin tekniikoista yleisin. Kapasiteetiltaan Suomen suurimmat tunnelikompostointilaitokset yltävät kymmeniintuhansiin tonneihin vuodessa ja rumpukompostointilaitosten vuosikapasiteetti noin 15 000 tonniin (Pöyry 2007).

Tunnelikompostoinnissa laitosinvestointiin mahdollisesti sisältyvistä koneista ja laitteista Kantoluoto (2020) mainitsee opinnäytetyössään murskainsekoittimet, paineilmakompressorit, seulontalinjastot, tunnelintäyttölaitteet ja poistokaasujen biopesurin.

Euroopasta löytyy joitakin yrityksiä, jotka aktiivisesti markkinoivat mittakaavaltaan riittävän suuria kompostilaitoksia myös puhdistamolietteen käsittelyyn:

- STRABAG Umwelttechnik GmbH (Düsseldorf, Saksa)
- Scolari Srl (Paderno Franciacorta, Italia)
- ECSAB l. European Composting System AB (Enköping, Ruotsi)

Yllä tuskin on enempää kuin ohut pintaraapaisu kompostijärjestelmien valmistamiseen kykenevistä yrityksistä. Suunnitteluosaamista kompostointiin löytyy myös valtavasti, joten aihetta ei kannata käsitellä enempää tässä yhteydessä.

Lisätietoa komposti- ja mädätyslaitoksiin liittyvistä toimijoista löytyy Sitran rahoittamasta selvityksestä (ks. Loikala 2016).

6.4. Termiset kuivaimet

Yhdyskuntalietteitä voidaan kuivata termisesti joko a) kuljetusta ja loppukäyttöä tai b) termistä loppukäsittelyä varten. Mahdollisia termisiä loppukäsittelyitä kuivauksen jälkeen ovat poltto, kaasutus, pyrolyysi ja muut hiiltomenetelmät. Kuivaimen yhdistäminen lietteen energiakäytön yhteyteen auttaa parantamaan termisen loppukäsittelyn

energiataloutta ja lisäksi helpottaa savukaasujen käsittelyä, koska kuivemmasta materiaalista muodostuu vähemmän vesihöyryä.

Lietteen kuivaus toteutetaan joko kontakti- tai konvektiokuivauksena. Lämmönsiirto kontaktikuivauksessa tapahtuu kiinteän pinnan kautta lietteeseen, mikä on haastavaa ja voi aiheuttaa epätasaista kuivumista ja paikallisia eroja hygienisoitumisen suhteen. Poistokaasua syntyy vähän, mikä on hyvä asia poistokaasun jatkokäsittelyn kannalta. Konvektiokuivaus puolestaan perustuu kuuman ilmavirran suoraan kontaktiin lietteen kanssa. Pölyn määrä ja poistokaasun tilavuusvirta kasvavat kontaktikuivaukseen verrattuna. Lisäksi prosessin energiatehokkuus ei yllä kontaktikuivauksen tasolle.

Termiset kuivaimet jaetaan toimintaperiaatteensa mukaan seuraaviin tyyppeihin (selvyyden vuoksi myös englanniksi): nauhakuivaimet (band dryers), rumpukuivaimet (drum), siipiratas-/lapakuivaimet (paddle), muut pyörivät kuivaimet (rotary), puhallus-/suihkuvirtauskuivaimet (flash) ja leijupetikuivaimet (fluidized bed). Lisäksi lietteen kuivaaminen suoralla aurinkoenergialla voi tulla kyseeseen ilmastoltaan suotuisissa kohteissa.

Kuivaus on teollisuudessa hyvin yleinen prosessi, ja myös lietteenkuivaukseen erikoistuneita laitetoimittajia on paljon. Taulukossa 7 on esitetty joitakin tunnettuja kuivausjärjestelmien toimittajia.

Taulukko 7. Yhdyskuntalietteen kuivauksen laitetoimittajia ja kaupallisia tuotteita.

Laitetoimittaja	Kuivaintyyppi	Tuote / sarja
Andritz AG	Nauha-, rumpu-, lapa- ja leijupetikuivaimet	Belt drying system BDS Drum drying system DDS Gouda paddle dryer Fluid bed drying system FDS
Huber GmbH	Nauha- kiekko- ja aurinkokuivaimet	Belt Dryer BT Disc Dryer RotaDry Solar-Regenerative Sludge Dryer SRT
Veolia S.A.	Nauhakuivaimet	BioCon
Suez Water Tech. & Solutions Ltd.	Nauha- ja aurinkokuivaimet	Evaporis & Heliantis
Eliquo Stulz GmbH	Nauhakuivaimet	EloDry
BNW Industries (& ETIA)	Nauhakuivaimet	Beltomatic
Kenki Corp. (& ETIA)	Kaksoisruuvikuivain	Kenki Dryer
Dorset GM	Nauhakuivain (metallinauha)	Biosolids plate belt dryer

Taulukossa 7 nauhakuivaimella tarkoitetaan nauhan tyyppisesti kiertävällä alustalla varustettua kuivainta, jonka nauha voi koostua esim. rei'itetyistä metallilaatoista tai metalliviirasta.

6.5. Polttokattilat

Suomessa yhdyskuntalietettä poltetaan erillispolttona vain Napapiirin Energia & Vesi Oy:n koelaitoksella, missä on käytössä Endev Oy:n PAKU-leijukerrospoltto. Vesilaitosyhdistyksen (2019) raportin mukaan puhdistamolietteitä poltetaan Suomessa vähäisissä määrin muun polttoaineen seassa Haapavedellä Vapon laitoksella, Riihimäellä Fortumin laitoksella sekä muutamalla pienellä laitoksella. Lietettä polttoaineenaan käyttävien kattilalaitosten valmistajia on listattu Taulukossa 8.

Taulukko 8. Yhdyskuntalietteen polttoon soveltuvien kattilajärjestelmien laitetoimittajia ja kaupallisia tuotteita.

Valmistaja	Kattilatyyppi	Tuote / sarja
Andritz AG	Kupliva leijupeti (BFB)	EcoFluid
Sludge2energy GmbH (Huber & WTE Wassertechnik GmbH)	Kupliva leijupeti (BFB)	sludge2energy
Veolia S.A:	Leijupeti	PYROFLUID
Suez Water Technologies & Solutions Ltd.	Leijupeti	Thermylis
KÛTTNER MARTIN GmbH	Arina, leijupeti	MARTIN
Endev Oy	Kiertävä leijupeti + kuivain	PAKU

Valmistajien käyttämä terminologia vaihtelee, joten Taulukon 8 tiedoissa "leijupeti" voi periaatteessa tarkoittaa joko kuplivaa (BFB) tai kiertävää (CFB) leijupetiä, mutta todennäköisimmin kysymyksessä on kuitenkin paremmin lietteenpolttoon soveltuva BFB.

Andritzin suuresta lietteenkäsittelylaitteistojen valikoimasta löytyy lietteenpolttoon sopiva EcoFluid-kattilajärjestelmä, jossa käytetään kuplivaa leijupetiä.

Huberilla on lietteenpoltossa teknologiakumppanina WTE Wassertechnik, ja yhteistyöyritys on nimeltään sludge2energy GmbH. Yritys tarjoaa kuplivalla leijupedillä varustettua S2E Fluidizer -järjestelmää, jonka väitetään olevan energiaomavarainen ja toimivan ilman tukipolttoaineita. Omavaraisuuteen vaadittavaa lietteen kuiva-ainepitoisuutta (TS) ja hehkutushäviötä (VS) ei kuitenkaan mainita yhtiön kotisivuilla.
Veolian Pyrofluid-kattilalaitosten kapasiteetit vaihtelevat välillä 200 – 5 000 kg_{DS}/h. Polttolämpötila on 850 – 900 °C.

Suez Water Technologies & Solutions tarjoaa lietteenpolttoon Thermylis-leijupetipolttoa ja mahdollisuutta järjestelmään kytkettyyn lietteen esikuivaukseen (Thermylis 2S). Sähköturbiinin kanssa järjestelmä kantaa nimeä Thermylis 2R.

Vuonna 2020 Outotec myi leijupetipolttoon perustuvan lietteenpolttoteknologiansa saksalaiselle KÛTTNER MARTIN GmbH:lle, joka oli aikaisemmin keskittynyt lietteen arinapolttoon. Küttner Martinin tuotenimiä ovat mm. Vario, SITY 2000 ja SYNCOM.

Endev Oy:n PAKU-erillispolttotekniikka sisältää erityislaatuisen lietteen kuivausyksikön, jossa poltosta saatava lämpöenergia saadaan kätevästi hyödynnettyä syöttölietteen termisessä kuivauksessa. PAKU-laitos on lähes energiaomavarainen, mutta tukipolttoainetta kuitenkin käytetään.

Taulukossa 8 listattujen yritysten lisäksi Valmet Oyj tarjoaa BFB-kattilajärjestelmiä, jotka soveltuvat metsäteollisuuden lietteiden polttoon muun biomassan kanssa. Valmet ei näyttäisi aktiivisesti markkinoivan teknologiaansa yhdyskuntalietteiden käsittelyyn.

6.6. Pyrolyysiuunit ja -laitokset

Puhdistamolietteen pyrolyysiin on tarjolla erilaisia pyöröuuneja, joissa esikuivattu liete liikkuu ja sekoittuu normaalisti ruuvin avustuksella. Taulukossa 9 esitettyjen uunien (t. reaktorien) välillä on jonkin verran eroja yksityiskohdissa, kuten ruuvien ja kammioiden lukumäärässä ja tavassa, jolla reaktorin lämmitys on järjestetty. Kaikkien valmistajien laitteet kestävät selvästi korkeampiakin lämpötiloja kuin pyrolyysissä tyypillisesti käytetty 450–550 °C.

Taulukko 9. Yhdyskuntalietteen pyrolyysiin soveltuvien reaktorien laitetoimittajia ja kaupallisia tuotteita.

Valmistaja	Laitetyyppi	Tuote / sarja
Pyreg GmbH	Pyöröuuni	Pyreg P-500 & 1500, Pyreg PX
Eisenmann GmbH	Pyrolyysin ja polton yhdistävä kaksoiskammioinen pyöröuuni + ruuvi (ei markkinoida aktiivisesti Euroopassa)	Pyrobustor
Biogreen & ETIA Group	Sähkölämmitteinen ruuvi	Spirajoule
Splainex Ecosystems Ltd.	Pyrolyysilaitokset (pyöröuuni)	Splainex pyrolysis plant
Tecam	Pyrolyysilaitokset (pyöröuuni)	Tecam's pyrolysis technology

Pyreg GmbH valmistaa pyrolyysiin ja muihin hiiltoprosesseihin soveltuvia reaktoreita. Pyreg P-1500 kykenee käsittelemään lietettä kuiva-aineena mitattuna 2 800 t/a. 13 metrin mittaisessa ja 3 m leveässä reaktorissa lämpötila on tyypillisesti 500 – 700 °C, hitaassa pyrolyysissä matalampikin.

Biogreen & ETIA Group markkinoivat sähkölämmitteistä ruuvireaktoria, jossa ruuvi on sijoitettu kammioon. Laitteistolla päästään korkeampiinkin lämpötiloihin kuin pyrolyysi vaatii (n. 850 °C:een).

Splainex Ecosystems Ltd. suunnittelee ja toimittaa pyrolyysilaitoksia myös yhdyskuntalietteen käsittelyyn. Yrityksen sivuilta löytyvästä informaatiosta ei käy ilmi tarkempia tietoja pyrolyysireaktoreista.

Tecamin pyrolyysiteknologia ei juuri poikkea muista. Pyrolyysilämpötila Tecamin laitteissa on tyypillisesti 450 – 600 °C. Tecam markkinoi sekä pyöriviä että staattisia laitteistoja, mutta suosittelee suuremmille (> 1 t/h) kapasiteeteille vain pyöröuuneja.

Samoin kuin poltossa, lietteen pyrolyysissä käytetään yleisesti tukipolttoainetta, jollaiseksi soveltuu esimerkiksi hake, turve, pelletti tai muu biomassa. Lietteen kosteuspitoisuuden kasvaessa sen tehollinen lämpöarvo laskee, jolloin vaadittava tukipolttoaineen määrä kasvaa. Kaikissa Taulukon 9 pyrolyysiuuneissa käytetään ruuvia, jonka tehtävä on kuljettaa, murskata ja sekoittaa pyrolysoitavaa materiaalia.

7. Liiketoimintamallien tarkastelu

Kuva 10 havainnollistaa Suomessa käytössä olevia yhdyskuntalietteen käsittelyn liiketoimintamalleja. Suomessa lietteen käsittely hyödyntämiskelpoiseksi lopputuotteeksi on lietettä tuottavan vesilaitoksen kannalta pakollinen kuluerä, joten sana *liiketoiminta* viittaa tässä tapaan, jolla lietteen loppukäsittely on järjestetty.

Kuva 10. Yhdyskuntalietteen käsittelyn liiketoimintamallien yleiskuvaus ja Suomessa yleisimmin käytettävät liiketoimintamallit. Oikealla nuolen paksuus kuvaa yleisyyttä ja katkoviiva kuvaa harvinaisia tapauksia. Kuva laadittu Pöyryn (2018) raportin ja haastattelu- ja kyselytietojen perusteella.

Kuvan 10 vasen puoli esittelee eri vaiheiden toimijat: yhdyskuntalietteen tuottaja on Suomessa kunnallinen vesilaitos, joka saattaa käsitellä lietteensä itse tai voi vaihtoehtoisesti ostaa käsittelyn kokonais- tai käsittelypalvelua tarjoavalta yritykseltä. Kokonaispalvelulla tarkoitetaan, että vesilaitoksen ei tarvitse etsiä loppukäyttäjää tuottamalleen lietteelle, vaan se jää palveluntarjoajan tehtäväksi. Tässä tapauksessa kokonaispalvelua tarjoava yritys voi käyttää lietteen itse tai sopia lietteen käytöstä ulkopuolisten yritysten kanssa. Pelkän käsittelypalvelun hankkinut vesilaitos saa järjestää loppukäytön parhaaksi katsomallaan tavalla, vaihtoehtojen ollessa joko oma käyttö tai sopimus loppukäytöstä ulkopuolisen yrityksen kanssa.

Liiketoimintamallien suhteellista yleisyyttä havainnollistetaan Kuvan 10 oikeassa laidassa olevassa kaaviossa. Nuolen paksuus indikoi liiketoimintamallin suhteellista yleisyyttä. Suomessa yleisin liiketoimintamalli on A-B-C ja kohtalaisen yleisiä ovat myös A-B-B, A-A-C ja A-A-A. Liiketoimintamallin valinnassa on tärkeintä ottaa huomioon paikalliset tekijät, kuten käsittelyalueen koko, sijainti ja lopputuotteen käyttömahdollisuudet lähialueella. Paikallisia tekijöitä käsitellään tarkemmin Luvussa 8.

Kuvassa 10 esitetyt liiketoimintamallit koskevat nimenomaan yhdyskuntalietteitä. Metsäteollisuudessa syntyvien kuitu- ja biolietteiden käsittelystä vastaa selvästi yleisemmin yhtiö itse. Mekaanisesti kuivatun lietteen polttaminen lämpöarvoltaan parempien kiinteiden biopolttoaineiden seassa ja tuhkan läjitys yhtiön ylläpitämälle kaatopaikalle on alalla normaali käytäntö.

Lietteen loppukäyttäjän löytämiseen voi käyttää Pöyryn (2018) listaamia toimijoita, joita ovat 1) viherrakentamista tekevät ja kasvualustoja tai maanparannusaineita tuottavat yritykset, 2) maisemointia harjoittavat toimijat, kuten kaivokset ja kaatopaikat, 3) energiakasvien (esim. pajun) tuottajat sekä 4) lietteen mahdolliset polttajat, mm. jätteenpolttolaitokset ja metsäteollisuuden biovoimalaitokset. Samasta Pöyryn (2018) raportista löytyy myös hyödyllistä tietoa yhteyden saamiseksi yllä mainittuihin toimijoihin.

Kun liiketoimintaa katsotaan käsittelypalvelua tarjoavan yrityksen näkökulmasta, lietteen loppukäyttäjän ja viranomaistahojen lisäksi on monia muitakin tärkeitä sidosryhmiä, joiden kanssa toimitaan:

- Käsittelyyn sekä lopputuotteen ja sivutuotteiden jalostukseen tarvittavia laitteistoja valmistavat ja niitä huoltavat yritykset
- Urakoitsijat, kuljetusyritykset, jne.
- Tukimateriaalien ja kemikaalien toimittajat
- Rejektivesien käsittelijät tai käyttäjät

Puhdistamolietteen käsittelypalvelujen hankinnasta löytyy tietoa Laitisen et al. (2014) tekemästä selvityksestä, johon palveluja tarvitsevan on hyödyllistä perehtyä ennen hankintaan ryhtymistä.

8. Paikallisten tekijöiden vaikutus käsittelyketjun valintaan

Yhdyskuntalietteiden käsittelymenetelmien valintakriteerit voidaan karkeasti jakaa ensisijaisiin ja toissijaisiin kriteereihin. Ensisijaiset kriteerit määrittävät, voidaanko käsittelyä ylipäänsä toteuttaa, kun taas toissijaisten mutta silti tärkeiden kriteerien perusteella voidaan vaikuttaa mm. käsittelyn energia-, materiaali- ja kustannustehokkuuteen.

Ensisijaiset valintakriteerit ovat:

- Käsittelyyn ja välivarastointiin käytettävissä olevan alueen koko, sijainti ja infrastruktuuri
- Lainsäädännölliset rajoitteet ja ympäristölupa-asiat

Toissijaiset valintakriteerit ovat:

- Investointi- ja käyttökustannukset
- Lietteen hyödyntämismahdollisuudet (lainsäädäntö huomioiden)

Seuraavissa kappaleissa käydään lyhyesti läpi muutamia muita käsittelymenetelmän valintaan vaikuttavia, toimintaympäristöstä riippuvia seikkoja.

8.1. Puhdistamolietteiden imago

Puhdistamolietteiden käytön ongelmana on, että niiden sisältämistä taudinaiheuttajista ja haitta-aineista johtuen myös käsiteltyjä lietteitä saatetaan pitää käyttökelvottomina. Myös käsittelyprosessin ja loppusijoituksen aiheuttamia hajuja pidetään luonnollisesti epämiellyttävinä. Ääriesimerkki hyötykäytön ongelmista on käsitellyn lietteen peltolevitys ruoan tuotantoketjuun kytkeytyvällä pellolla. LieteKierto-hankkeessa haastatelluista asiantuntijoista osa suhtautui mädätetyn lietteen peltokäyttöön tai jopa lietekompostin käyttöön maanparannusaineena hyvin kielteisesti, kun taas osa piti tärkeänä, että lietteestä saadaan ravinteet käyttöön mahdollisimman edullisesti ja monipuolisesti. Polttomenetelmissä puolestaan on ongelmana, että typpi menetetään, fosfori muuntuu vaikeammin hyödynnettäväksi ja haitalliset metallit rikastuvat tuhkaan, jonka käyttö ilman jatkokäsittelyjä voi olla ongelmallista. Orgaaniset haitta-aineet kuitenkin tuhoutuvat poltossa erinomaisesti. Matalamman lämpötilan termiset käsittelyt tuhoavat orgaanisia haitta-aineita vähemmän täydellisesti.

Tässä raportissa ei oteta kantaa, pitäisikö lietteiden hyötykäytön nykyisiä käytäntöjä tai lainsäädäntöä muuttaa. Keskustelua aiheesta on syytä jatkaa, samoin myös eri haitta-aineiden kertymiseen ja pitkän aikavälin vaikutuksiin liittyvää tutkimusta.

Yksittäisenä esimerkkinä lopputuotteen hyödyntämisen vaikeudesta mainittakoon Oulun Veden Kemicond-käsitellyn lietteen loppusijoituksen ongelmat. Noin puolet lietteestä on käytetty peltokohteissa, mihin on jo pidemmän aikaa suhtauduttu kielteisesti, ja puolet on kompostoitu alueella, jossa kompostoinnin ympäristölupa päättyi keväällä 2020 (Oulun Vesi 2018). Oulun Veden (2021) katsauksesta selviää, että lietteen mädätystä on lisätty ja Kemicond-käsitellyn lietteen peltokäyttö jatkuu edelleen, sillä sopimuskausi päättyy vuonna 2024.

8.2. Maantieteellinen sijainti

Tässä kappaleessa oletetaan, että liete vähintäänkin mädätetään ja mädätysjäännös mahdollisesti jatkokäsitellään. Lietteen käsittelyketjun valintaan vaikuttaa voimakkaasti puhdistamon ja lietteen jatkokäsittelyalueen välinen etäisyys. Mädättämölle paras sijainti on, olosuhteiden salliessa, lähellä puhdistamoa. Mikäli matka on lietevolyymiin suhteutettuna lyhyt, lietteen siirto kuljettimella tai pumppaus mädättämölle on taloudellisesti järkevää. Pumpuilla siirrettäessä on huomioitava lietteen reologiset ominaisuudet, eli mekaanista vedenpoistoa ei kannata viedä maksimikuivuuteen asti, koska tällöin pumppauksen kustannukset kasvavat tai pumppaus ei onnistu. Jos mädättämö syystä tai toisesta sijaitsee kauempana puhdistamosta ja liete joudutaan siirtämään kuorma-autolla, ylimääräisen nesteen kuljettamista kannattaa välttää. Tällöin tehokas mekaaninen vedenpoisto ennen kuljetusta on tärkeää.

Hygienisoitu mädätysjäännös voidaan mädätyksen jälkeen mahdollisesti käyttää pelloilla, mikäli sopivia kohteita on lähialueella. Kuten yllä Kuvan 2 yhteydessä kerrottiin, maatalouskäyttöä eli helpoimmillaan mädätysjäännöksen peltolevitystä, harjoitetaan tietyissä maakunnissa paljon ja joissakin ei juuri lainkaan (ks. Vesilaitosyhdistys 2021). Mikäli mädätettä ei voida tai haluta käyttää sellaisenaan, on otettava huomioon, että mekaanisen erotuksen jälkeen melko matalafosforinen (mutta volyymiltaan huomattava) nestejae on käsiteltävä, useimmiten siis palautettava puhdistamolle. Kiintoainejakeelle sopii loppukäsittelynä kompostointi, kuivaus, kemiallinen käsittely tai korkean lämpötilan loppukäsittely (poltto- ja hiiltomenetelmät). Sijainnista riippuen, kuljetuskustannukset saattavat vielä tässäkin vaiheessa muodostua suureksi kulueräksi.

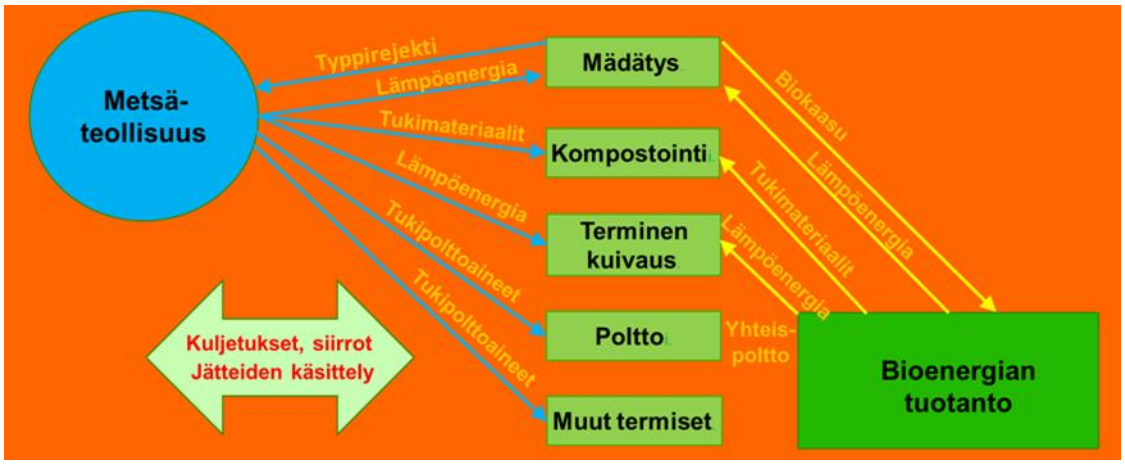
Mädätyksen jälkeisissä käsittelyissä on tärkeää käydä läpi paikalliset tekijät ja miettiä, millaiseksi toimintaympäristö voi kehittyä tulevaisuudessa. Seuraavat kysymykset on kysyttävä ennen käsittelymenetelmän valintaa:

- Onko kompostille riittävästi todellista hyötykäyttöä lähialueella?
- Onko kompostointilaitokselle tarjolla riittävästi pinta-alaa?
- Onko sijainti riittävän syrjäinen haju- ja meluhaittoihin suhteutettuna?
- Saadaanko paikallisista lähteistä edullisesti tukimateriaaleja kompostointiin tai termisiin käsittelyihin?
- Onko kohtuuhintaista lämpöenergiaa tarjolla esim. teollisuudesta?
- Onko paikkakunnalla tarvetta sähkön tai kaukolämmön lisätuotannolle?
- Löytyykö synergiaetuja materiaaleissa ja energiassa esim. metsäteollisuuden tai bioenergia-alan kanssa?

8.3. Synergiaedut

Yhdyskuntalietteiden käsittelylle on löydettävissä paljon synergiaetuja muiden toimijoiden kanssa, joista erityisesti metsäteollisuus ja bioenergia-ala nousevat merkittävään rooliin Suomen olosuhteissa. Kuvassa 11 on esitetty tärkeimpiä synergiaetuja, jotka ovat saavutettavissa, kun lietteenkäsittely järjestetään lähellä metsäteollisuutta tai bioenergian tuotantolaitosta. Metsäbioenergian tuotantoa löytyy lähes jokaiselta sellu- paperi- kartonkitehtaalta sekä mekaanisen metsäteollisuuden laitoksilta, mm. sahoilta ja vaneritehtailta.

Metsäteollisuuden omien jätevesien käsittelyssä voidaan hyödyntää yhdyskuntalietteen mädätyksen typpirejektiä, jonka käytöllä saadaan puhdistusprosessi toimimaan tehokkaammin ja voidaan vähentää ostoravinteiden (erityisesti urean) tarvetta. Metsäteollisuuden laitoksilta puolestaan voi olla saatavilla matalapaineista ylijäämähöyryä, joka soveltuu yhdyskuntalietteen hygienisointiin, mädätysprosessin lämmitykseen ja lietteen termiseen kuivaukseen. Kompostoinnissa voidaan käyttää apuaineina metsäteollisuuden bioenergiaksikin soveltuvia sivuvirtoja, kuten haketta ja kuorta, sekä esimerkiksi silputtua paperi- ja kartonkirejektiä, joille kylläkin on käyttöä myös tehtailla. Nollakuidun käyttö lienee kokonaisuuden kannalta järkevämpää. Myös lietteen polton, pyrolyysin ja muiden termisten käsittelymenetelmien toimintaa voidaan tehostaa käyttämällä metsäteollisuuden biojakeita tukipolttoaineina.



Kuva 11. Yhdyskuntalietteen käsittelymenetelmien synergioita metsäteollisuuden ja bioenergian tuotantolaitosten kanssa.

Bioenergiasektorin kanssa lietteenkäsittelyllä on sekä energiaan että materiaalitehokkuuteen liittyviä synergioita. Mädättämön biokaasua voidaan käyttää lukemattomiin eri tarkoituksiin, ja biokattiloista saatavalla lämmöllä voidaan tehostaa erityisesti mädätystä ja lietteen termistä kuivausta. Polttoaineiden ja tukimateriaalien, kuten puuhakkeen, yhteishankinnoilla voitaisiin mahdollisesti saada aikaan kustannussäästöjä. Lietteen pienimuotoinen poltto biovoimaloissa on myös mahdollista, mutta tyypillisesti lietteen osuutta ei kannata nostaa muutamaa prosenttia korkeammaksi sen korkean vesipitoisuuden ja matalan lämpöarvon takia.

Kuvasta 11 on jätetty pois käsittelymenetelmien keskinäiset synergiaedut, joista merkittävin on poltossa tai muussa termisessä loppukäsittelyssä vapautuvan energian käyttö termisessä kuivauksessa. Myös mädätyksestä saatavan biokaasun energiakäyttö kompostointilaitoksella tai termisissä käsittelyissä on mahdollista.

9. Kyselytutkimus jätevedenpuhdistamoille

9.1. Kysymyksenasettelu

Sähköpostitse toteutetun kyselytutkimuksen tarkoituksena oli selvittää perustiedot suurimpien kaupunkien lietteenkäsittelystä ja tiedustella tulevia kehityssuuntia. Kysely lähetettiin 23 laitokselle, joiden vastuulla on maan suurimpien, yli 40 000 asukkaan kaupunkien jätevedenkäsittely. Kysymyksiä esitettiin hyvin rajallinen määrä, jotta

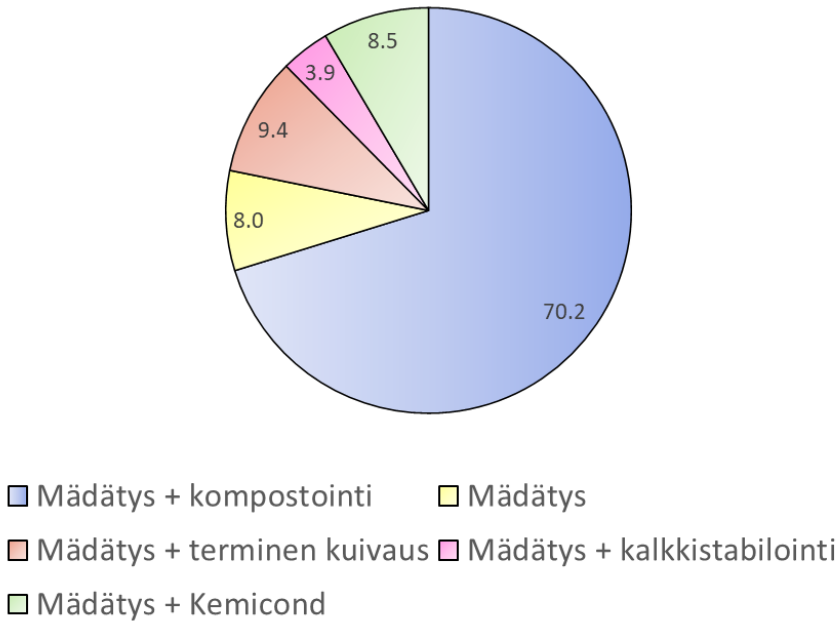
vastauksia saataisiin mahdollisimman paljon. Kyselytutkimuksen lomake on raportin liitteenä (Liite 2).

Seuraavia asioita kysyttiin:

1. Laitokselta käsittelyyn lähtevän lietteen määrä ja kuiva-ainepitoisuus
2. Käytössä oleva käsittelyketju (valinta kuvan perusteella)
3. Jos investointi pitäisi tehdä nyt, minkä käsittelyketjun valitsisit ja millä perustein?
4. Onko käsittelyn lopputuotteella hinta (€)?
5. Synergiaedut muiden alojen kanssa
6. Liiketoimintamalli (tuottaja – käsittelijä – loppukäyttäjä)
7. Mistä kohdasta käsittelyketjua ottaisit talteen a) typpeä ja b) fosforia?

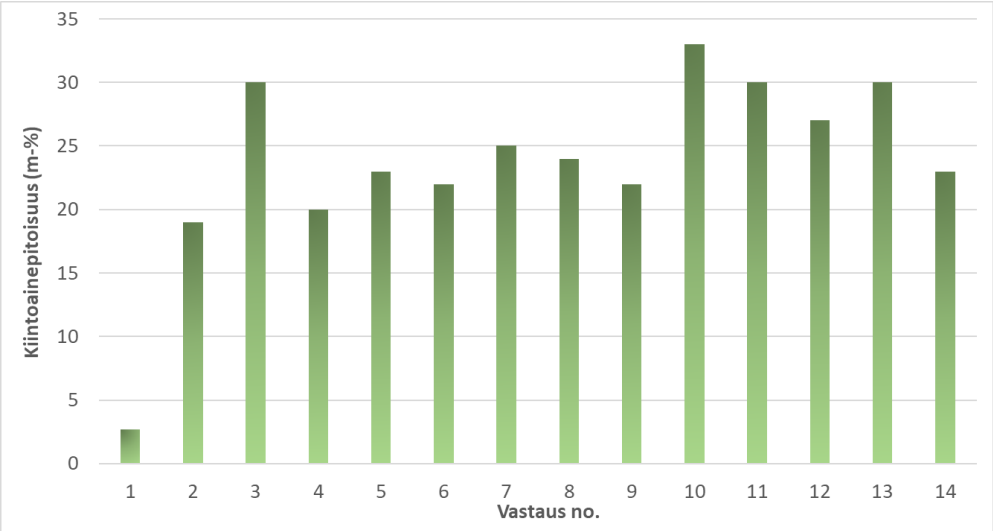
9.2. Tulokset

14 puhdistamoa 23:sta eli 61 % vastasi kyselyyn määräaikaan mennessä. Näillä puhdistamoilla syntyvä märkälietemäärä oli yhteensä 375 000 t/a eli kuiva-aineena ilmaistuna 81 000 t/a, mikä on yli puolet Suomessa vuosittain käsiteltävästä kuiva-ainemäärästä. Suurin osa vastaajista jätti vastaamatta vähintään yhteen kysymykseen, mutta tärkeimpiin kysymyksiin laitoskohtaisista tiedoista saatiin arviot kaikilta vastanneilta. Kyselytutkimuksen tulosten perusteella yleisin käsittelyketju Suomen suurimmissa kaupungeissa on mädätys + mekaaninen kuivaus + kompostointi. Kuvassa 12 on esitetty kyselyyn vastanneiden puhdistamojen käyttämien käsittelyketjujen suhteelliset osuudet kuivatonnien perusteella laskettuna.



Kuva 12. Kyselyyn vastanneiden puhdistamojen tuottamille lietteille käytettävien käsittelymenetelmien prosenttiosuudet kuiva-aineen määrään perustuen.

Kuvassa 13 on esitetty kyselyyn vastanneiden puhdistamojen lietteiden kuiva-ainepitoisuudet. Puhdistamolta lähtevän lietteen kuiva-ainepitoisuus vaihteli välillä 3–30 % ja keskiarvo oli mekaanista kuivausta käyttävillä puhdistamoilla 25 %. Kuivan lietteen määrällä painotettu kiintoainepitoisuuden keskiarvo oli 27 %. Osa puhdistamoista (vastanneista yksi) ei käytä mekaanista kuivausta ennen mädätystä, ja toisaalta hygienisoitua mädätettä ei välttämättä jatkokäsitellä ennen loppukäyttöä.



Kuva 13. Kyselyyn vastanneilta puhdistamoilta käsittelyyn lähtevien lietteiden kiintoainepitoisuudet.

Mikäli puhdistamoilla olisi jouduttu investoimaan lietteenkäsittelyyn syksyllä 2021, lähes kaikki vastaajat olisivat sisällyttäneet mädätyksen käsittelyketjuun. Suosituin käsittelyketju kyselyssä oli mädätys + mekaaninen kuivaus + kompostointi, jonka valintaa perusteltiin yksinkertaisuudella, varmatoimisuudella, ravinteiden kierrolla ja kohtuullisella hinnalla. Toiseksi suosituin vaihtoehto oli mädätys + kuivaus + poltto, jota pidettiin hyvänä ratkaisuna kiertotalouden edistämisen ja haitta-aineiden tuhoutumisen kannalta.

Vastanneista kolme mainitsi myös pyrolyysin kiinnostavuuden mahdollisena loppukäsittelynä. Pyrolyysiteknologiaa kohtaan näyttää siis olevan jonkin verran kiinnostusta, vaikkei Suomessa vielä täyden mittakaavan pyrolyysilaitoksia olekaan.

Viitaten Luvussa 8 esiteltyihin liiketoimintamalleihin, yleisin tapa järjestää lietteenkäsittely oli myös tässä kyselyssä järjestely, jossa lietteen tuottaja hankkii käsittelyn kokonaispalvelua tarjoavalta yritykseltä, joka huolehtii loppukäytöstä siten, että loppukäyttäjä on ulkopuolinen toimija. Kyselyyn vastanneilla puhdistamoilla oli synergiaetuja erityisesti maatalouden ja energiantuotannon kanssa. Ulkoistettuun liiketoimintamalliin A-B-C luotti seitsemän vastaajaa, itse lietteensä käsitteli mallilla A-A-A neljä puhdistamoa, ja mallit A-B-B ja A-A-C olivat kumpikin käytössä kahdella puhdistamolla. Yksi puhdistamo ilmoitti käyttävänsä kahta mallia limittäin, mistä johtuen 14 puhdistamolla liiketoimintamalleja oli käytössä 15 kpl.

Kysyttäessä ravinteiden talteenotosta, vastaajat mainitsivat potentiaalisiksi tekniikoiksi RAVITA-prosessin ja NPHarvest-prosessin. Typen talteenottoa mädättämön rejektistä ja fosforin mahdollista talteenottoa lietteenpolton tuhkasta pidettiin kiinnostavimpina tapoina saada ravinteet kiertoon. Suomessa yleisesti käytössä oleva tapa kierrättää ravinteet joko mädätteen tai kompostin muodossa mainittiin järkevänä käytäntönä.

10. Johtopäätökset

LieteKierto-hankkeessa kartoitettiin yhdyskuntalietteen käsittelyn eri vaihtoehdot, jotka voidaan toteuttaa kaupallisten ratkaisujen avulla ympäristönäkökohdat huomioiden. Kaiken hankkeessa kerätyn tiedon tiivistäminen ytimekkäiksi johtopäätöksiksi tuskin on tarkoituksenmukaista, joten annettakoon tässä painoarvoa vain niille seikoille, joita erityisesti on syytä korostaa jatkossa:

- Päätöksenteon hierarkia yhdyskuntalietteen käsittelyssä: lainsäädäntö ja ympäristöasiat → paikalliset erityispiirteet → kustannukset → tekninen toteutus, joista kaksi viimeistä vaihtavat keskenään paikkaa, jos kahdessa edellä mainitussa tapahtuu ratkaisevia muutoksia.
- Yhdyskuntalietteen mädätys biokaasuksi on yleistynyt ja tulee edelleen yleistymään.
- Lietteenkäsittelyssä arvostetaan varmatoimisia ja vuosien ajan koeteltuja ratkaisuja, mikä myös näkyy selkeästi Suomeen käsittelylaitteistoja myyneiden yritysten referensseistä.
- On mahdollista, että tulevaisuudessa ravinteiden talteenottoa käsittelyn eri vaiheista on lisättävä, mutta sitä ei pidä tehdä hinnalla millä hyvänsä. Niin haitta-aineiden poistossa kuin ravinteiden talteenotossa on ajateltava kokonaisuutta, ei yksittäisiä etuja. Menetelmissä on edelleen paljon kehitettävää. Suomessa lietteiden hyödynnettävyys voi parantua jatkossa, jos fosforin kemiallista saostusta rautafosfaatiksi pystytään vähentämään puhdistamoilla.
- Syvempi yhteistyö metsäteollisuuden ja energiasektorin toimijoiden kanssa voisi tuoda merkittäviä synergiaetuja yhdyskuntalietteiden käsittelyyn. Asiaan liittyy kuitenkin vielä monia käytännön haasteita.

Kiitokset

LieteKierto-hankkeeseen sisältyi aihepiiriin perehtyneiden asiantuntijoiden haastatteluja ja suppea kyselytutkimus kunnallisille jätevedenpuhdistamoille. Suuret kiitokset kaikille arvokasta aikaansa hankkeeseen käyttäneille. Lisäksi haluamme kiittää LieteKierto-webinaarien puhujia ja muita osallistujia.

LIITTEET

LIITE 1 LieteKierto-tietokortti
LIITE 2 Kyselytutkimuksen lomake

Lähdeluettelo

Aarnio, A. Lietteen linkouksen parametrit ja optimointi. Opinnäytetyö, Turun AMK, 2018.

Berninger, K., Puhdistamolieteselvitys, Yhteenveto toteutettujen hankkeiden tuloksista. Tyrsky-Konsultointi Oy, 2018.

Capodaglio, A.G., Olsson, G. Energy issues in sustainable urban wastewater management: use, demand reduction and recovery in the urban water cycle. Sustainability 12, 2020, 266.

Finnilä, J. Anaerobisen jätevedenkäsittelyn jälkeinen fosforin ja typen talteenotto. Kandidaatintyö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2018.

Gareis, C, HSY, Hiiltoprosessi jätevesilietteen käsittelyssä. Biotalouspäivät, 2018.

Haavisto, M., Puhdistamolietepohjaisten kierrätyslannoitteiden käytön esteet ja keinoja esteiden poistamiseksi. Prizztech Oy, 31.12.2018.

Hakala, S. Yhdyskuntajätevesilietteiden käsittelyn tilanne EU-maissa. Kandidaatintyö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2015.

Havukainen, J., Horttanainen, M., Linnanen, L. Feasibility of ASH DEC- process in treating sewage sludge and manure ash in Finland. Tutkimusraportti, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2012.

Hermann, L. Outotec modular energy and phosphorus recovery processes, 2014.

HSY (Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä), Ämmässuon jätteenkäsittelykeskuksen toiminta vuonna 2021, Raportti 23.2.2022.

Jarhio, T., Puhdistamolietteiden käsittely biokaasutekniikalla. Kandidaatintyö, Tampereen yliopisto, 2019.

Kainulainen, A., HSY, Lietehiilihanke ja lietteen pyrolyysin koetoimintalaitos. Biohiilipäivä, Forssa, 15.3.2019.

Kainulainen, A., HSY, Ravinteiden talteenotto ja uudet lietteenkäsittelymenetelmät. Biotalouspäivät 2017.

Kantaluoto, N., Ämmässuon ekoteollisuuskeskuksen biojätteen käsittelyn massatase ja energiatase. Insinöörityö, Metropolia Ammattikorkeakoulu, 2020.

Kokko, m., Poranen, J., Rintala, J. Struviitin saostus puhdistamolietteestä. Loppuraportti, 4.11.2019.

Laitinen, J., Alhola, K., Manninen, K., Säylä, J., Puhdistamolietteen ja biojätteen käsittely ravinteita kierrättäen. Hankeraportti, Suomen ympäristökeskus SYKE, 2014.

Lauronen, M. Jätevesilietteen eri käsittelyvaihtoehtojen kasvihuonekaasupäästöjen vertailu pohjoisissa olosuhteissa. Diplomityö, Oulun Yliopisto, 2017.

Lehtomäki, A., Paavola, T., Luostarinen, S. & Rintala, J. Biokaasusta energiaa maatalouteen – raaka-aineet, teknologiat ja lopputuotteet. Jyväskylän yliopiston bio- ja ympäristötieteiden laitoksen tiedonantoja, 85, 2007.

Lohiniva, E., Mäkinen, T., Sipilä, K., Lietteiden käsittely, uudet ja käytössä olevat tekniikat, VTT Tiedotteita 2081, Espoo, 2001.

Luostarinen, S., Paavola, T., Ervasti, S., Sipilä, I., Rintala, J. Lannan ja muun eloperäisen materiaalin käsittelyteknologiat. MTT, Jokioinen, 2011.

Marttinen et al., Kohti ravinteiden kierrätyksen läpimurtoa. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 45/2017, Luonnonvarakeskus, Helsinki, 2017.

Miettinen, H. Yhdyskuntalietteen kuivaus, -poltto-ominaisuudet ja -hyötykäyttö. Kandidaatintyö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2018.

Motiva.fi, Energiatehokas lietteen jatkojalostus, Energiatehokas vesihuoltolaitos, Tietokortti 10/2018.

Mönkäre, T., Kinnunen, V., Tampio, E., Ervasti, S., Lehtonen, E., Kettunen, R., Rintala, J., Ravinnevision, Selvitys Pirkanmaan puhdistamolietteiden ja biojätteiden ravinteista ja niiden potentiaalisesta käytöstä. Pirkanmaan elinkeino- liikenne- ja ympäristökeskus, Raportteja 74, 2016.

Nieminen, J. Phosphorus recovery and recycling from municipal wastewater sludge. Diplomityö, Aalto-yliopisto, 2010.

Oulun Vesi. Muutoksiin mukautuvat lietteen käsittelyketjut ja ratkaisut, case: Oulun Vesi. Yritystilaisuus, 22.2.2018.

Oulun Vesi. Johtajan katsaus 2021. https://www.ouka.fi/oulu/oulun-vesi/johtajan-katsaus

Pöyry Environment Oy, Lietteenkäsittelyn nykytila Suomessa ja käsittelymenetelmien kilpailukyky -selvitys, 2007.

Pöyry Oyj. Lietteen hyödyntäminen ilman maatalouskäyttöä. Loppuraportti, 8.5.2018.

Rantala, V. Struviitin saostaminen sähkökemiallisesti. Kandidaatintutkielma, Oulun yliopisto, 2020.

Rantanen, P., Valve, M., Kangas, A. Lietteen loppusijoitus -esiselvitys. Suomen ympäristökeskus, Helsinki, 2008.

Ruuhela, S., Puhdistamolietteen käsittelyn hankinnan laatukriteerien kehittäminen, Varsinais-Suomen elinkeineo- liikenne- ja ympäristökeskus, Raportteja 18/2017, Ravinneneutraali kunta -hanke, 2017.

Savolainen, A., Tähtiniemen vedenpuhdistamolla syntyvän lietteen käsittelyvaihtoehdot. Opinnäytetyö, Savonia-ammattikorkeakoulu, 2018.

Shaddel, S., Bakhtiary-Davijany, H., Kabbe, C., Dadgar, F., Osterhus, S.W. Sustainable sewage sludge management: from current practices to emerging nutrient recovery technologies. Sustainability 11, 2019, 3435.

Smol, M., Kulczycka, J., Henclik, A., Gorazda, K., Wzorek, Z., The possible use of sewage sludge ash (SSA) in the construction industry as a way towards a circular economy. J Cleaner Prod 95, 45-54.

Sääluoto, K. Struviitin valmistus. Hankeraportti, 2015.

Tenno, T. BSR Water – Nutrient recycling potential in wastewater sector. Unlocking the nutrient recycling potential in the Baltic Sea Region, EUSBSR Annual Forum Workshop, 30.9.2020.

Toivikko, S. Tilannekuva, Vesilaitosyhdistys. Lieteresurssi tänään ja huomenna, 28.11.2019, Aalto-yliopisto.

Vesilaitosyhdistys. Puhdistamolietteen käyttö maataloudessa, 2013.

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

Vesilaitosyhdistys. Puhdistamolietteen termiset käsittelymenetelmät ja niiden soveltuvuus Suomeen, Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 56, Helsinki, 2019.

Vesilaitosyhdistys. Yhdyskuntalietteen käsittelyn ja hyödyntämisen nykytilannekatsaus. Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 57, Helsinki, 2019.

Vieno, N. Haitalliset aineet jätevedenpuhdistamoilla -hankkeen loppuraportti, Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 34, Helsinki, 2014.

Vieno et al. Puhdistamolietteiden sisältämien haitta-aineiden aiheuttamat riskit lannoitekäytössä. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 58/2018, Luonnonvarakeskus, Helsinki, 2018.

Virtanen, J. Mädätetyn jätevesilietteen jatkojalostus. Diplomityö, Tampereen yliopisto, 2020.

LIETEKIERTO

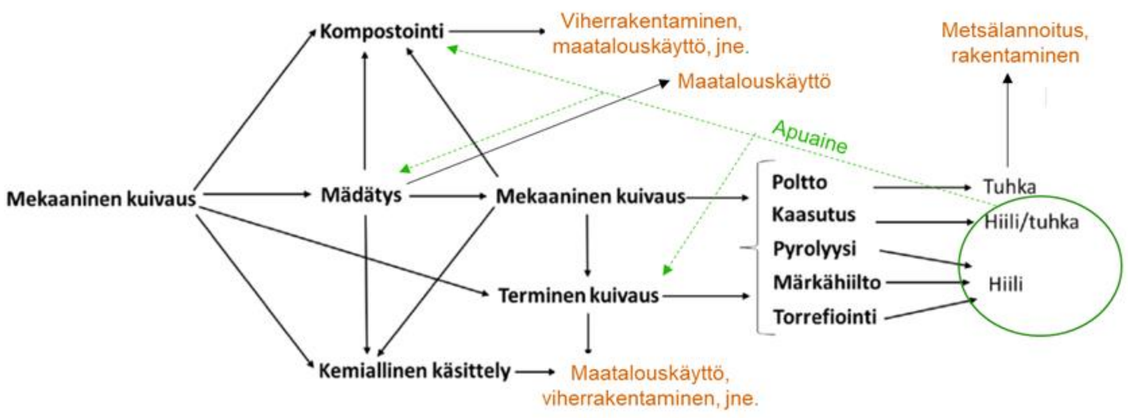
Tiivistelmä hankkeen tuloksista

Teemu Kinnarinen, tutkijatohtori, LUT-yliopisto
27.4.2022

Hankkeen tavoitteet

Lietekierto-hankkeen tavoitteena oli kuvata yhdyskuntalietteen käsittelyn ja hyödyntämisen vaihtoehdot, jotka ovat toteutuskelpoisia, kun huomioidaan sekä kaupalliset realiteetit että ympäristöasiat. Siksi hankkeessa painotettiin kaupallisesti saatavilla olevia, toimintavarmoja ratkaisuja. Pääasiallisina tutkimusmenetelminä olivat haastattelut, kirjallisuusselvitys, muu tiedonhaku ja kyselytutkimus.

Kuvassa 1 on esitetty eri menetelmistä koostuvat käsittelyketjut, joita hankkeessa tarkasteltiin.



Kuva 1. Yhdyskuntalietteen käsittelyketjut.

Käsittelymenetelmät

Vuonna 2020 Suomessa syntyneestä yhdyskuntalietteestä mädätettiin yli 75 %. Yleisin käsittelyketju oli mädätys + kompostointi. Maatalous ja viherrakentaminen ovat yleisimmät lopputuotteen käyttötavat. Termisillä poltto- ja hiiltomenetelmillä saadaan orgaaniset haitta-aineet tuhottua, mutta kustannukset ovat korkeammat kuin mädätyksessä ja kompostoinnissa. Kemiallisista käsittelyistä ollaan luopumassa.

Kuva 2. Yhdyskuntalietteen käsittelyn liiketoimintamallit. Punaisten nuolten paksuus kuvaa mallin yleisyyttä Suomessa..

Käsittelyketjun ja liiketoimintamallin valinta

- Tärkeintä on sopeutua paikallisiin olosuhteisiin.
- Käsittelyn yleisin liiketoimintamalli (Kuva 2) on kokonaispalvelu, jossa palveluntarjoaja käsittelee lietteen ja järjestää jäännökselle käyttöä.
- Palveluntarjoajan on tunnettava liiketoimintaan liittyvät sidosryhmät, kuten laitteistojen valmistajat ja paikalliset yritykset.
- Käsitellyn lietteen hyötykäyttö, maantieteellinen sijainti ja synergiat muiden alojen kanssa vaikuttavat käsittelyketjun valintaan.

Johtopäätökset

- On monta hyvää tapaa käsitellä liete: pelkät kustannukset eivät ole ratkaiseva tekijä.
- Ravinteiden talteenotto lietteestä, mädätteestä, mädätyksen rejektivedestä ja polton tuhkasta aiheuttaa kustannuksia, mutta on mahdollista lukuisilla menetelmillä.
- Kiertotalouden edistämisessä lietteen tuottajien ja käsittelijöiden yhteistyö viranomaisten kanssa on avainasemassa.

Lietekierto-raportti

Hankkeen tuotoksena syntyi yhdyskuntalietteen käsittelyketjuja ja niihin liittyvää liiketoimintaa käsittelevä raportti, joka on ladattavissa LUT-yliopiston sivuilta.

YHTEYSTIEDOT

Teemu Kinnarinen, tutkijatohtori, LUT-yliopisto
etunimi.sukunimi@lut.fi, 040 5621398

Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020
Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

LIETEKIERTO-HANKKEEN KYSELY JÄTEVEDENPUHDISTAMOILLE
SYKSY 2021

Tuottamanne lietteen määrä

Puhdistamo(i)lta lähtevän kostean lietteen määrä, t/a _____

Lietteen kuiva-ainepitoisuus, m-% _____

Lietteenne käsittelyketju (Kuva 1 seuraavalla sivulla)

Mikä käsittelyketjuista (#1-13) kuvaa parhaiten lietteenne käsittelyä? _____

Jos investoisitte lietteenne käsittelyyn nyt, minkä käsittelyketjun (#1-13) valitsisitte? ____

Miten perustelisitte valintanne? _____

Onko nykyisin käyttämänne käsittelyn lopputuotteella hinta (€/t)? _____

Synergiaedut muiden alojen kanssa (rasti viivalle jos on)

A) Maatalous ____
B) Metsäteollisuus ____
C) Rakentaminen ____
D) Elintarviketeoll. ____
E) Energiantuotanto ____
F) Muu, mikä? _____

Mahdolliset synergiat tarkemmin: _____

Liiketoimintamallinne[(1)]

1. Lietteen tuottaja
   A) Vesihuoltolaitos tai jätevedenpuhdistamoyhtiö
2. Lietteen käsittelijä
   A) Vesihuoltolaitos tai jätevedenpuhdistamoyhtiö
   B) Kokonaispalvelua tarjoava yritys, joka huolehtii loppukäytöstä
   C) Käsittelypalvelua tarjoava yritys, lietteen tuottaja vastaa loppukäytöstä
3. Lietteen loppukäyttäjä
   A) Vesihuoltolaitos tai jätevedenpuhdistamoyhtiö
   B) Kokonaispalvelua tarjoava yritys, jolla omaa loppukäyttöä
   C) Ulkopuolinen loppukäyttäjä

   Valitse parhaiten sopiva yhdistelmä tai useampi, esim. ABC tai AAC: _____

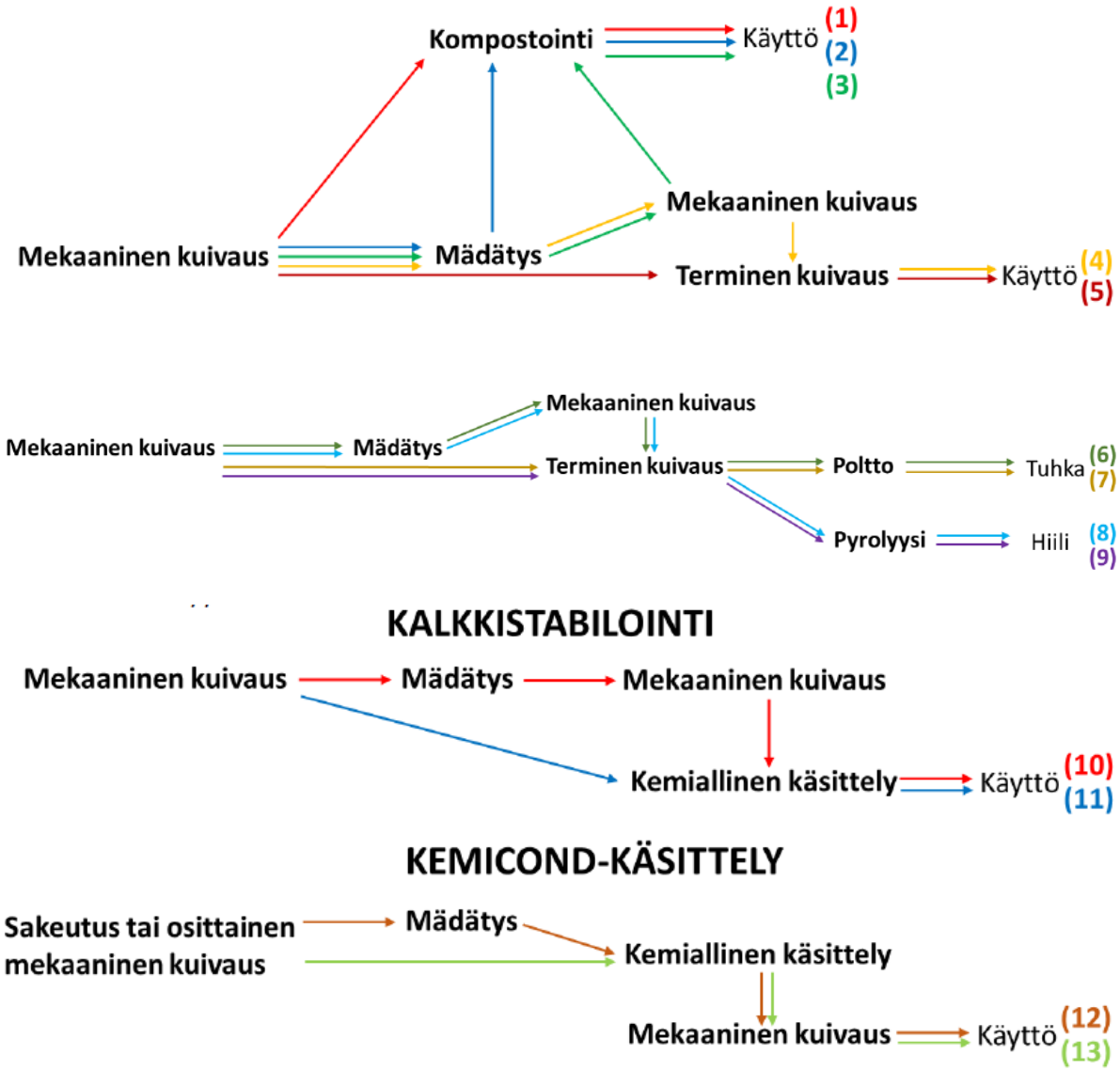
   Muu liiketoimintamalli, millainen? _____

Typen ja fosforin talteenotto lietteestä

Mistä kohdasta lietteenne käsittelyprosessia ottaisitte talteen ***typpeä*** ja millä menetelmällä?

Mistä kohdasta lietteenne käsittelyprosessia ottaisitte talteen ***fosforia*** ja millä menetelmällä?

Lähteet

1. Pöyry Oyj. Lietteen hyödyntäminen ilman maatalouskäyttöä. Loppuraportti, 8.5.2018.

KUVA 1 KÄSITTELYKETJUT #1-13